

Compás
capacitación e investigación

El Agro Algorítmico

Dinero, Datos y Gobernanza en la Era de las Bio-Métricas

Marcos Daniel Araujo Criollo
Ahmed El Salous

www.grupocompas.com

El Agro Algorítmico
Dinero, Datos y Gobernanza en la Era de las Bio-Métricas

Marcos Daniel Araujo Criollo
Ahmed El Salous

ISBN: 978-9942-53-219-0
Primera edición, 2026

© Marcos Daniel Araujo Criollo
Universidad Agraria del Ecuador
https://orcid.org/0009-0005-2240-9266

Ahmed El Salous
Universidad Agraria del Ecuador
https://orcid.org/0000-0001-7395-5420

© Editorial Grupo Compás, 2026
GuayaquiL, Ecuador
www.grupocompas.com
http://repositorio.grupocompas.com

Primera edición, 2026

ISBN: 978-9942-53-219-0
DOI: 10.31876/9789942532190
Distribución online
Acceso abierto

Esta obra ha sido sometida a un proceso de evaluación bajo el sistema de arbitraje doble ciego (double-blind peer review), garantizando el anonimato tanto de los autores como de los evaluadores externos. El dictamen favorable certifica que el contenido cumple con los más altos estándares de rigor científico, calidad editorial y originalidad exigidos por la comunidad académica internacional para su indexación y reconocimiento científico.

Cita
Araujo, M., El Salous, A. (2026). El Agro Algorítmico Dinero, Datos y Gobernanza en la Era de las Bio-Métricas. Editorial Grupo Compás.

Índice

Índice 2
Introducción: cómo leer este libro 25
A quién está dirigido 25
Cómo está organizado cada capítulo 25
Cómo está organizado el libro 26
Sobre los escenarios y las fuentes 27
Una advertencia antes de empezar 27
Parte I. Fundamentos: datos y dinero 28
Capítulo 1. El nacimiento de los bio-datos 29
Fase 1. El gancho: cuarenta toneladas sin pasado 29
Fase 2. El diagnóstico: por qué un lote pierde su memoria 30
2.1 El cadmio no se ve, se hereda 30
2.4 Las cuatro fallas sistémicas 32
2.5 Qué es un bio-dato 32
2.6 Por qué un bio-dato tiene valor financiero 33
Fase 3. La tesis: el lote como objeto de datos 34
3.1 De la semilla al empaque: la estela de datos 34
3.2 La representación: el lote como tensor 36
3.3 El modelo: estimar la calidad antes de medirla 37
3.4 El nuevo estándar de confianza: medición, modelo e incertidumbre 38
3.5 La ingeniería: software que trata los datos como producto biológico 39
3.6 El lote 2611, reescrito 40

Fase 4. El framework de acción: cinco pasos para convertir el proceso biológico en activo de datos 41
Capítulo 2. Del bio-dato al balance: crédito, seguro y activos digitales 43
Esquema del capítulo 43
Fase 1. El gancho: la cosecha que nadie quiso financiar 43
Fase 2. El diagnóstico: por qué el dinero rehúye al agro 44
2.1 La pérdida esperada que el banco no puede estimar 44
2.2 El inventario biológico como garantía imperfecta 45
2.3 El seguro indemnizatorio y la economía del peritaje 46
2.4 La tokenización y el problema del oráculo, otra vez 47
Fase 3. La tesis: el riesgo biológico como variable medible 47
3.1 El expediente de riesgo biológico 47
3.2 Crédito: reducir la incertidumbre antes que el riesgo 48
3.3 Seguro paramétrico: pagar por un índice 49
3.4 El riesgo de base: el problema que el seguro paramétrico no resuelve solo 50
3.5 Tokenización con respaldo: tres capas obligatorias 51
3.6 La cooperativa de Quiñónez, reescrita 52
Fase 4. El framework de acción: cinco pasos para convertir bio-datos en dinero 53
Parte II. 56
Gobernanza e integridad 56
Capítulo 3. Cuando el algoritmo decide: gobernanza y auditoría de modelos en la cadena agroalimentaria 57
Esquema del capítulo 57
Fase 1. El gancho: el ojo que no conocía la Amazonía 57
Fase 2. El diagnóstico: por qué fallan los modelos en el agro y por qué nadie lo nota 59

2.1 La métrica que engaña: exactitud promedio 59
2.3 Etiquetas ruidosas: el modelo aprende de humanos que no coinciden 60
2.4 Variables sustitutas: discriminación sin intención 61
2.5 Ciclos de retroalimentación: el modelo confirma su propio error..... 61
2.6 Sesgo de automatización y brecha de responsabilidad 62
2.7 El marco normativo ya llegó 62
Fase 3. La tesis: el modelo como activo regulado de la empresa..... 63
3.1 Cambiar la categoría del modelo 63
3.2 Inventario y clasificación de riesgo 63
3.3 Documentación: ficha del modelo y ficha del conjunto de datos..... 64
3.4 La auditoría de algoritmos en cinco pruebas 65
3.5 Despliegue en sombra y predicción con abstención 66
3.6 El derecho a apelar y la explicación útil 66
3.7 Arquitectura de gobernanza: tres líneas y una firma 67
3.8 El centro de acopio, reescrito..... 67
Fase 4. El framework de acción: cinco pasos para gobernar los modelos de la empresa 68
Capítulo 4. Food Fraud Intelligence: el fraude que pasa todos los análisis.. 71
Esquema del capítulo 71
Fase 1. El gancho: dos laboratorios, dos continentes 71
Fase 2. El diagnóstico: por qué el fraude pasa los controles 73
2.1 Qué es el fraude alimentario y en qué se diferencia de un problema de inocuidad 73
2.2 El análisis dirigido y el caso de la melamina 73
2.3 Las tres condiciones del fraude 74
2.4 El punto ciego del certificado 74

2.5 Las formas de fraude con mayor exposición en la cadena ecuatoriana 75
Fase 3. La tesis: el fraude como señal que se puede anticipar 76
3.1 Cambiar la pregunta 76
3.2 El precio como sensor de fraude 76
3.3 El balance de masa productivo: la prueba de lo imposible 77
3.4 La huella analítica no dirigida: verificar la autenticidad 77
3.5 Muestreo basado en riesgo: poner el laboratorio donde está el fraude 78
3.6 Inteligencia externa: aprender del fraude de otros 79
3.7 El escenario de Guayaquil, reescrito 80
Fase 4. El framework de acción: cinco pasos para instalar inteligencia antifraude 81
Capítulo 5. Compliance Intelligence: la regulación de destino como dato de campo 84
Esquema del capítulo 84
Fase 1. El gancho: el insecticida que perdió su lugar y el contenedor que volvió 84
Unión Europea, 2020 84
Del Guayas a Rotterdam 85
Fase 2. El diagnóstico: por qué se cumple en origen y se incumple en destino 86
2.1 Un mismo producto, varios límites 86
2.2 El registro en origen no garantiza el acceso en destino 86
2.3 La velocidad del cambio regulatorio 86
2.4 La distancia entre el escritorio y la finca 87
2.5 El periodo de carencia como promedio 87
2.6 Las señales que nadie mira 87
Fase 3. La tesis: el requisito de destino como bio-dato del lote 88

3.1 Cambiar el punto de control 88
3.2 Una base de requisitos por mercado 88
3.3 Programas de aplicación según el destino 89
3.4 El periodo de espera por mercado con incertidumbre 89
3.5 Muestreo previo al embarque basado en riesgo 90
3.6 Asignar cada lote al mercado donde cumple 91
3.7 Leer los rechazos de otros como alerta temprana 91
3.8 La exportadora de fruta, reescrita 92
Fase 4. El framework de acción: cinco pasos para convertir la regulación de destino en dato de campo 93
Capítulo 6. Forensic Agriculture: reconstruir la causa cuando la evidencia se degrada 95
Esquema del capítulo 95
Fase 1. El gancho: el huerto de duraznos y la hoja quemada 95
Misuri, temporadas 2015 a 2020 95
Santo Domingo de los Tsáchilas, una semana después 96
Fase 2. El diagnóstico: por qué las disputas agrícolas se resuelven mal 96
2.1 La convergencia de síntomas 96
2.2 La evidencia tiene vida media 97
2.3 La ausencia de línea base 97
2.4 El peritaje sin método 98
2.5 El costo económico de la incertidumbre 99
Fase 3. La tesis: la causa como inferencia con incertidumbre cuantificada 99
3.1 Cambiar la pregunta pericial 99
3.2 Las primeras 72 horas: protocolo de preservación 100
3.3 El patrón espacial: la forma del daño revela su origen 101
3.4 La cronología satelital: fechar el inicio del daño 102

3.5 La química retrospectiva: estimar la exposición inicial 103
3.6 La estimación de la pérdida: el contrafactual 103
3.7 La estructura del informe forense agrícola 104
3.8 La finca de Santo Domingo, reescrita 104
Fase 4. El framework de acción: cinco pasos para estar preparado ante una disputa técnica 105
Capítulo 7. Soberanía y seguridad del bio-dato: de quién es el dato agrícola y cómo se defiende 109
Esquema del capítulo 109
Fase 1. El gancho: el frigorífico sin pantallas y la piscina sin registro 109
Estados Unidos, Australia y Canadá, mayo y junio de 2021 109
Golfo de Guayaquil, semana de mayor cosecha 110
Fase 2. El diagnóstico: los dos flancos del bio-dato 111
2.1 La paradoja de la digitalización 111
2.2 La convergencia de tecnologías de información y de operación 111
2.3 Disponibilidad, integridad y confidencialidad 112
2.4 Cuantificar el riesgo cibernético 113
2.5 La pregunta sin firma: ¿de quién es el dato? 113
2.6 La asimetría del valor del dato 114
Fase 3. La tesis: el bio-dato soberano y verificable 114
3.1 Seguridad y soberanía como condiciones del valor 114
3.2 Integridad desde el sensor 114
3.3 Continuidad operativa: diseñar para el día del ataque 115
3.4 Contratos de datos con productores 116
3.5 Aprender sin centralizar: modelos federados y privacidad diferencial 117
3.6 La gobernanza del dato como un solo sistema 119

Fase 4. El framework de acción: cinco pasos para proteger y controlar los bio-datos 121
Parte III 123
Sostenibilidad y territorio 123
Capítulo 8. ESG Data: del informe de sostenibilidad al dato auditable 124
Esquema del capítulo 124
Fase 1. El gancho: el ganado que cambiaba de finca 124
Amazonía brasileña, década de 2010 124
Golfo de Guayaquil, auditoría de un comprador 125
Fase 2. El diagnóstico: por qué el dato ESG del agro es tan frágil 126
2.1 Informe ESG frente a dato ESG 126
2.2 El marco regulatorio que traslada la exigencia hacia el origen 126
2.3 Por qué el agro es el eslabón más difícil de medir 127
2.4 El atajo del factor por defecto 128
2.5 La incertidumbre que nadie reporta 128
2.6 Las cuatro fallas del dato ESG agroalimentario 129
Fase 3. La tesis: el dato ESG como bio-dato con trazabilidad completa 129
3.1 Aplicar al ESG la misma disciplina que a la calidad 129
3.2 La jerarquía de calidad del dato 130
3.3 Propagar la incertidumbre 131
3.4 Verificación satelital del uso del suelo 132
3.5 Mapear la red de proveedores, no solo la lista 132
3.6 Preparar el dato para la verificación externa 133
3.7 Conectar el dato ESG con el dinero 133
3.8 La exportadora de camarón, reescrita 134
Fase 4. El framework de acción: cinco pasos para convertir el informe ESG en dato auditable 135

Capítulo 9. Carbono agrícola: vender una tonelada que nadie puede ver. 137
Esquema del capítulo 137
Fase 1. El gancho: los créditos que no valían lo que decían y el contrato de cuarenta años 137
Londres y Hamburgo, enero de 2023 137
Una cooperativa cacaotera, una propuesta de carbono 138
Fase 2. El diagnóstico: por qué el carbono agrícola es un activo difícil de creer 139
2.1 Lo que se vende es una diferencia contra un escenario imaginario... 139
2.2 Adicionalidad: ¿habría pasado de todas formas? 139
2.3 Permanencia: el carbono puede volver a la atmósfera 139
2.4 El carbono del suelo es muy difícil de medir 140
2.5 Doble conteo 140
2.6 El productor como parte débil del contrato 141
Fase 3. La tesis: el carbono como bio-dato con contrafactual explícito y medición con potencia 141
3.1 Un activo de carbono es tan bueno como su línea base 141
3.2 Construir la línea base con controles reales 141
3.3 Medir con la potencia necesaria y deducir la incertidumbre 142
3.4 Registrar quién reclama cada tonelada 142
3.5 Crédito o *insetting*: dos caminos para el mismo carbono 143
3.6 Proteger al productor en el contrato 144
3.7 La cooperativa, reescrita 145
Fase 4. El framework de acción: cinco pasos para evaluar un activo de carbono agrícola 146
Capítulo 10. Territorial Intelligence: del dato de finca a la decisión de territorio 148
Esquema del capítulo 148

Fase 1. El gancho: el hongo que cruzó la frontera y el galpón vacío 148
La Guajira, agosto de 2019 148
Litoral ecuatoriano, tres años después de una inauguración 149
Fase 2. El diagnóstico: por qué el territorio agrícola se planifica a ciegas.. 150
2.1 Datos dispersos entre instituciones 150
2.2 Unidades espaciales incompatibles 150
2.3 Límites administrativos frente a territorios funcionales 151
2.4 Decisiones sin ciclo de retroalimentación 151
2.5 La vigilancia fitosanitaria como caso extremo 151
Fase 3. La tesis: el territorio como sistema de datos con unidad común 152
3.1 Definir la inteligencia territorial 152
3.2 La unidad espacial común 152
3.3 Las capas del territorio 153
3.4 Modelo de aptitud y riesgo 154
3.5 Ubicación óptima de infraestructura 155
3.6 Vigilancia fitosanitaria basada en riesgo 155
3.7 Escenarios: el territorio que vendrá 156
3.8 La gobernanza del dato territorial 156
3.9 El centro de acopio, reescrito 157
Fase 4. El framework de acción: cinco pasos para construir inteligencia territorial 158
Capítulo 11. El pequeño productor en la economía de los bio-datos: inclusión o exclusión por cumplimiento 160
Esquema del capítulo 160
Fase 1. El gancho: el teléfono que cambió una economía y la lista que dejó fuera a una asociación 160
Kenia, 2007 en adelante 160

Una asociación cacaotera en la Amazonía ecuatoriana 161
Fase 2. El diagnóstico: por qué el dato cuesta más a quien produce menos 162
2.1 El riesgo que este libro puede agravar 162
2.2 El costo fijo del dato 162
2.3 La brecha digital no es solo de conectividad 163
2.4 La desconfianza tiene fundamentos 163
2.5 El valor que no regresa 164
2.6 La adopción depende de lo que ve el vecino 164
Fase 3. La tesis: el dato del pequeño productor se gestiona en forma asociativa 164
3.1 Cambiar la unidad de gestión 164
3.2 El modelo de control interno: una figura que ya funciona 165
3.3 Verificación por muestreo con confianza conocida 165
3.4 Diseñar para las condiciones reales 166
3.5 Que el valor regrese al productor 167
3.6 Quién paga la infraestructura compartida 167
3.7 Medir la inclusión 168
3.8 La asociación amazónica, reescrita 169
Fase 4. El framework de acción: cinco pasos para incluir a los pequeños productores en la economía de los bio-datos 170
Capítulo 12. El agua como dato: regar con balance y no con calendario ... 172
Esquema del capítulo 172
Fase 1. El gancho: el día cero y la bomba que no se apagaba 172
Ciudad del Cabo, 2017 y 2018 172
Península de Santa Elena, una temporada seca 173
Fase 2. El diagnóstico: por qué se riega mal aun cuando el agua escasea 173

2.1 El calendario fijo ignora la demanda de la planta 173
2.2 El suelo no se ve 174
2.3 Lo que no se mide no se puede defender 174
2.4 El agua tiene valor, pero no tiene precio 174
2.5 Una cuenca, muchas decisiones aisladas 174
Fase 3. La tesis: el riego como balance diario entre lo que el cultivo consume y lo que el suelo guarda 175
3.1 Cuánta agua consume el cultivo: la evapotranspiración 175
3.2 Cuánta agua guarda el suelo: el balance hídrico 175
3.3 Verificar el balance con sensores 176
3.4 Cuánto rinde cada milímetro: la respuesta del cultivo al agua 176
3.5 El valor económico del agua 177
3.6 El dato de agua fuera de la finca 177
3.7 La cuenca como sistema compartido 178
3.8 La finca de frutales, reescrita 178
Fase 4. El framework de acción: cinco pasos para regar con datos 179
Parte IV. Operaciones de la cadena 181
Capítulo 13. Procurement Analytics: comprar materia prima biológica con datos 182
Esquema del capítulo 182
Fase 1. El gancho: el año en que el cacao valió oro y el siguiente 182
Mercados internacionales, 2024 a 2026 182
Una chocolatería de origen en Guayaquil 183
Fase 2. El diagnóstico: por qué la compra agrícola pierde dinero sin que nadie lo vea 184
2.1 El precio por kilo no es el costo por kilo 184
2.2 La calidad promedio esconde la variabilidad 184

2.3 Concentración: el riesgo que no se mide 185
2.4 El riesgo de precio sin gestionar 185
2.5 El efecto látigo 186
2.6 El costo de comprar a ciegas 186
Fase 3. La tesis: la compra como decisión cuantificada con bio-datos 187
3.1 El costo efectivo por unidad útil 187
3.2 La ficha del proveedor con bio-datos 188
3.3 Clasificar las materias primas antes de gestionarlas 189
3.4 Gestionar el precio: cobertura escalonada y fórmulas de precio 190
3.5 Asignar el volumen entre proveedores 191
3.6 Pronosticar el abastecimiento y dimensionar el inventario 191
3.7 La compra conectada con el fraude y el ESG 192
3.8 La chocolatería, reescrita 192
Fase 4. El framework de acción: cinco pasos para comprar materia prima con datos 193
Capítulo 14. Pronóstico de cosecha: vender lo que todavía está en el árbol 196
Esquema del capítulo 196
Fase 1. El gancho: el trigo que nadie vio comprar y el contrato que no se pudo cumplir 196
Washington y Moscú, 1972 196
Guayaquil, un trimestre después de una firma 197
Fase 2. El diagnóstico: por qué se compromete lo que no se tendrá 198
2.1 El pronóstico por opinión 198
2.2 Los incentivos de quien informa 198
2.3 La biología da señales con meses de anticipación 198
2.4 El clima entra con retraso 199

2.5 El pronóstico como cifra única 199
2.6 Lo que cuesta equivocarse 199
Fase 3. La tesis: el pronóstico como estimación estadística que se actualiza y se evalúa 199
3.1 Contar el inventario biológico con muestreo estratificado 199
3.2 Covariables satelitales y climáticas 200
3.3 Actualizar el pronóstico a lo largo de la temporada 201
3.4 Evaluar el pronóstico con honestidad 201
3.5 Comprometer según la incertidumbre y el costo de equivocarse 202
3.6 Compartir pronósticos sin perder ventaja 202
3.7 La exportadora de cacao, reescrita 203
Fase 4. El framework de acción: cinco pasos para pronosticar la cosecha y comprometer con seguridad 204
Capítulo 15. Cadena de frío y vida útil dinámica: la fecha que debería moverse 207
Esquema del capítulo 207
Fase 1. El gancho: un tercio en duda y una devolución de supermercado. 207
El mundo, 2019 207
Guayaquil, una carta de un supermercado 208
Fase 2. El diagnóstico: por qué se pierden alimentos que salieron bien de la planta 208
2.1 La fecha fija supone una cadena perfecta 208
2.2 El deterioro depende del tiempo y de la temperatura 209
2.3 Las rupturas de frío son invisibles en el momento 209
2.4 Cada eslabón mide solo lo suyo 210
2.5 Despachar por orden de llegada 210
Fase 3. La tesis: la vida útil como bio-dato que se recalcula con cada hora de temperatura 210

3.1 La historia térmica como atributo del lote 210
3.2 Calcular la vida útil restante 211
3.3 Incertidumbre en la vida útil 211
3.4 Despachar según lo que a cada lote le queda 212
3.5 Prevenir antes de calcular 212
3.6 La fecha dinámica: posibilidades y límites 213
3.7 Contratos que reparten la responsabilidad con datos 213
3.8 La procesadora de carnes, reescrita 214
Fase 4. El framework de acción: cinco pasos para gestionar la vida útil con datos 214
Capítulo 16. Del residuo al ingrediente: valorizar subproductos con datos 217
Esquema del capítulo 217
Fase 1. El gancho: la ciudad donde los residuos se volvieron contratos y las cáscaras que nadie quería 217
Kalundborg, Dinamarca, desde la década de 1970 217
Los Ríos, un montón de cáscaras junto al centro de acopio 218
Fase 2. El diagnóstico: por qué los subproductos se desperdician aunque tengan valor 219
2.1 Composición desconocida y variable 219
2.2 Volumen estacional y disponibilidad incierta 219
2.3 El agua pesa y cuesta 219
2.4 La logística del material disperso 220
2.5 Sin especificación no hay mercado 220
Fase 3. La tesis: el subproducto como producto con sus propios bio-datos 220
3.1 Caracterizar con variabilidad 220
3.2 El balance de masa del subproducto 221
3.3 El radio económico de recolección 221

3.4 Elegir la ruta con análisis técnico-económico 222
3.5 Respetar los límites de uso 223
3.6 La especificación del subproducto como producto 223
3.7 La simbiosis a escala de territorio 223
3.8 La cooperativa, reescrita 224
Fase 4. El framework de acción: cinco pasos para convertir un subproducto en producto 225
Capítulo 17. Ganadería de precisión: el animal como unidad de datos 228
Esquema del capítulo 228
Fase 1. El gancho: el virus que viajó en camiones y la vaca que nadie miró 228
Reino Unido, 2001 228
Una lechería en la Sierra, un martes cualquiera 229
Fase 2. El diagnóstico: por qué la ganadería pierde dinero sin verlo 230
2.1 El promedio del hato 230
2.2 La enfermedad subclínica 230
2.3 Registros que existen para el regulador y no para el ganadero 230
2.4 Movimientos sin red 231
2.5 El alimento que no se mide por animal 231
Fase 3. La tesis: cada animal es una serie de datos con un comportamiento esperado 231
3.1 La identificación individual como clave de todo 231
3.2 La curva esperada de cada animal 232
3.3 Detectar la desviación antes que el síntoma 232
3.4 Eficiencia alimenticia individual 233
3.5 El valor económico de cada animal 233
3.6 La red de movimientos como herramienta sanitaria 234

3.7 Del dato individual al mercado 234
3.8 La lechería de la Sierra, reescrita 235
Fase 4. El framework de acción: cinco pasos para gestionar el hato animal por animal 236
Capítulo 18. Evidencia de insumos: del ensayo que vende al dato que decide 239
Esquema del capítulo 239
Fase 1. El gancho: la categoría que exigió pruebas y el frasco de la promesa 239
Unión Europea, 2019 239
Santo Domingo de los Tsáchilas, una charla de ventas 240
Fase 2. El diagnóstico: por qué se compran insumos sin saber si sirven 240
2.1 El ensayo único 240
2.2 El promedio sin dispersión 241
2.3 Lo que el registro demuestra y lo que no 241
2.4 Los bioinsumos tienen respuestas más variables 241
2.5 El aprendizaje que no se acumula 241
Fase 3. La tesis: muchos ensayos pequeños valen más que un ensayo perfecto 242
3.1 Experimentación en finca 242
3.2 Registrar las condiciones de cada finca 242
3.3 Combinar los ensayos: metaanálisis de efectos aleatorios 243
3.4 El intervalo que le importa al productor 243
3.5 La probabilidad de que el insumo pague 244
3.6 Explicar la variabilidad: dónde funciona el insumo 244
3.7 El papel de cada actor 245
3.8 La cooperativa cacaotera, reescrita 246

Fase 4. El framework de acción: cinco pasos para comprar insumos con evidencia 247

Capítulo 19. Gemelos digitales agroindustriales: simular antes de arriesgar la cosecha 250

Esquema del capítulo 250

Fase 1. El gancho: la nave que se salvó en tierra y la piscina que se ahogó de noche 250

Houston, abril de 1970 250

Golfo de Guayaquil, 4:30 de la mañana 251

Fase 2. El diagnóstico: por qué los gemelos digitales del agro suelen quedarse en tableros 251

2.1 Modelo, sombra y gemelo 251

2.2 Los sistemas biológicos tienen estados ocultos 252

2.3 Los sensores mienten con el tiempo 253

2.4 Las decisiones biológicas no admiten ensayo 253

2.5 El gemelo como proyecto tecnológico sin pregunta de decisión 253

Fase 3. La tesis: un gemelo digital útil es un modelo de decisión con incertidumbre 254

3.1 Empezar por la decisión 254

3.2 El modelo mecanístico: el balance de oxígeno 254

3.3 Asimilación de datos: que el modelo se corrija con los sensores 255

3.4 Del estado estimado a la probabilidad de riesgo 255

3.5 Decidir con riesgo explícito 256

3.6 Validar el gemelo y gobernarlo 256

3.7 Cuándo vale la pena construir un gemelo 257

3.8 Del gemelo de la piscina al gemelo de la cadena 257

3.9 La camaronera, reescrita 258

Fase 4. El framework de acción: cinco pasos para construir un gemelo digital que decida 259

Capítulo 20. Innovación de producto con datos del consumidor: lanzar lo que alguien va a comprar 261

Esquema del capítulo 261

Fase 1. El gancho: la fórmula que ganó las degustaciones y perdió el mercado 261

Estados Unidos, 1985 261

Guayaquil, una línea de chocolates que no se vendió 262

Fase 2. El diagnóstico: por qué fracasan los productos nuevos 262

2.1 Probar con quien no compra 262

2.2 Medir el agrado sin medir el porqué 263

2.3 La intención de compra sobrestimada 263

2.4 El precio se descubre al final 263

2.5 Costo, vida útil y regulación como sorpresas 263

Fase 3. La tesis: el desarrollo de producto como una secuencia de decisiones con datos 264

3.1 Puertas de decisión con criterios explícitos 264

3.2 Pruebas sensoriales con consumidores del segmento 265

3.3 El análisis de penalidades: qué corregir 265

3.4 El análisis conjunto: cuánto vale cada atributo 266

3.5 Calibrar la intención de compra 266

3.6 Clasificar los atributos según su efecto en la satisfacción 267

3.7 Integrar lo técnico desde el prototipo 267

3.8 La chocolatería, reescrita 268

Fase 4. El framework de acción: cinco pasos para desarrollar productos con datos del consumidor 269

Parte V. Capital, organización y conocimiento 271

Capítulo 21. Due Diligence y Venture Capital AgTech: invertir donde la biología marca el ritmo 272
Esquema del capítulo 272
Fase 1. El gancho: los invernaderos que cotizaban en bolsa y las piscinas del piloto 272
Kentucky, 2021 a 2023 272
Golfo de Guayaquil, una presentación de inversión 273
Fase 2. El diagnóstico: por qué se pierde dinero invirtiendo en el agro 274
2.1 El manual del software no funciona con sistemas biológicos..... 274
2.2 El piloto sin control y la regresión a la media..... 274
2.3 La potencia estadística que casi nadie calcula 275
2.4 Un ciclo no es una tecnología 276
2.5 La economía unitaria escondida..... 276
2.6 La adopción supuesta..... 276
2.7 El tamaño del mercado inflado 277
Fase 3. La tesis: due diligence con la disciplina de la evidencia biológica . 277
3.1 La jerarquía de evidencia para AgTech 277
3.2 Reanalizar el piloto con datos crudos..... 278
3.3 La economía del productor primero..... 279
3.4 La economía de la startup con costos reales..... 279
3.5 Valoración ajustada por hitos de evidencia..... 280
3.6 La due diligence de una empresa agroindustrial en operación 280
3.7 La sala de datos agrícola 281
3.8 La startup de alimentación, reescrita..... 282
Fase 4. El framework de acción: cinco pasos para una due diligence técnica en AgTech 283
Capítulo 22. La hoja de ruta: del libro a la primera campaña 285

Esquema del capítulo 285

Fase 1. El gancho: dos segundos para rastrear un mango y un año para no terminar nada 285

Estados Unidos, 2016 y 2017 285

Guayaquil, un año después de un seminario 286

Fase 2. El diagnóstico: por qué las transformaciones basadas en datos se estancan 287

2.1 Demasiadas iniciativas a la vez 287

2.2 El orden equivocado 287

2.3 El purgatorio de los pilotos 287

2.4 Tecnología sin dueño de proceso 288

2.5 Calendario de oficina en un negocio de campañas 288

Fase 3. La tesis: construir capacidades en orden, una campaña a la vez 288

3.1 Un modelo de madurez para los bio-datos 288

3.2 El mapa de dependencias 290

3.3 Priorizar con valor, probabilidad y costo 292

3.4 La regla de las tres iniciativas 292

3.5 Pilotos con criterio de escalamiento definido de antemano 293

3.6 Roles mínimos 293

3.7 Una hoja de ruta organizada por campañas 294

3.8 Medir el avance con madurez y con dinero 295

3.9 La agroexportadora, reescrita 295

Fase 4. El framework de acción: cinco pasos para convertir este libro en una hoja de ruta 296

Capítulo 23. El talento híbrido: quién hace todo esto 299

Esquema del capítulo 299

Fase 1. El gancho: la profesión más atractiva del siglo y el analista que renunció 299

Cambridge, Massachusetts, octubre de 2012 299
Guayaquil, un año después de una contratación 300
Fase 2. El diagnóstico: por qué el talento en datos no prospera en el agro 301
2.1 Especialistas sin contexto 301
2.2 Técnicos sin herramientas 301
2.3 Nadie traduce 301
2.4 El talento híbrido casi no existe en el mercado 302
2.5 La formación que no cambia nada 302
2.6 La rotación que se lleva la inversión 302
Fase 3. La tesis: el talento híbrido se construye por proyectos, con un mapa y con un traductor 302
3.1 Los perfiles que se necesitan 302
3.2 Medir la brecha de competencias 303
3.3 Formar con proyectos reales de la empresa 304
3.4 Formar al traductor desde dentro 304
3.5 Comunidades de práctica entre empresas e instituciones 305
3.6 Reducir la dependencia de una persona 305
3.7 Evaluar el retorno de la formación 306
3.8 La agroexportadora, reescrita 306
Fase 4. El framework de acción: cinco pasos para construir el talento híbrido 307
Capítulo 24. Caso integrado: tres campañas de una exportadora de cacao 310
Esquema del capítulo 310
Fase 1. El gancho: un programa de calidad que se volvió un sistema y una exportadora que empezó de cero 310
Programa de calidad sostenible de una marca de café, desde 2003 310

Cacaos del Pacífico, punto de partida 311
Fase 2. El diagnóstico: el punto de partida y el costo de no hacer nada ... 312
2.1 El diagnóstico de madurez 312
2.2 El costo de no hacer nada 312
2.3 El mapa de dependencias aplicado 313
Fase 3. La tesis aplicada: tres campañas de transformación 313
3.1 Antes de la campaña 1: la base y el equipo 313
3.2 Campaña 1: construir la identidad 314
3.3 Entre la campaña 1 y la campaña 2: convertir datos en decisiones ... 315
3.4 Campaña 2: gobernar, extender y vender mejor 315
3.5 Campaña 3: optimizar y conservar 316
3.6 Lo que no funcionó 317
3.7 El resultado después de tres campañas 318
Fase 4. El framework de acción: cinco pasos para gestionar la transformación como un sistema 319
Capítulo 25. Knowledge Systems: que el conocimiento no se jubile con quien lo tiene 321
Esquema del capítulo 321
Fase 1. El gancho: el olfato que se fue con el maestro fermentador 321
Ecuador, inicios del siglo XX 321
Una exportadora de cacao en Los Ríos, un lunes de marzo 322
Fase 2. El diagnóstico: por qué las organizaciones agroindustriales pierden lo que saben 323
2.1 Conocimiento tácito y explícito 323
2.2 El requisito que se cumple en papel 323
2.3 Concentración del conocimiento crítico 324
2.4 Manuales que nadie usa 324

2.5 Lecciones que nadie registra 324
2.6 El asistente de IA que responde con seguridad 325
Fase 3. La tesis: el conocimiento experto como activo que se mapea, se captura y se convierte en datos 325
3.1 Mapear el conocimiento crítico 325
3.2 Capturar el saber tácito con métodos específicos 326
3.3 Convertir el criterio experto en bio-datos 327
3.4 Una base de conocimiento con IA gobernada 328
3.5 Aprender después de cada incidente 329
3.6 El ciclo completo: datos, dinero, gobernanza y conocimiento 329
3.7 La exportadora de Los Ríos, reescrita 330
Fase 4. El framework de acción: cinco pasos para construir el sistema de conocimiento de la empresa 331
Referencias bibliográficas 333
Anexo A. Mapa de herramientas por capítulo 347
Anexo B. Datos y referencias pendientes de verificación 350

Introducción: cómo leer este libro

Este libro parte de una observación que se repite en fincas, plantas, centros de acopio, bancos y comités de inversión: la cadena agroalimentaria genera a diario una enorme cantidad de información biológica, química y física sobre lo que produce, y casi toda esa información se pierde. Se pierde porque no se registra, porque se registra sin identidad, porque nadie la vincula con el lote que describe o porque nadie la usa para decidir. Mientras tanto, los compradores, los bancos, las aseguradoras, los reguladores y los inversionistas toman decisiones sobre esa misma cadena con información incompleta, y cobran por la incertidumbre que eso les genera.

A esa información, cuando se registra con identidad, contexto, medida con incertidumbre, método y procedencia, la llamamos **bio-dato**. La tesis del libro es que el bio-dato es un activo: reduce riesgos, abre financiamiento, protege la calidad, sostiene el cumplimiento y permite negociar mejor. Y que, como todo activo, necesita gobernanza para que su valor sea creíble y para que no se convierta en una fuente de errores, de exclusión o de abuso.

A quién está dirigido

El libro está escrito para quienes toman decisiones en la cadena agroalimentaria o sobre ella: gerentes y directores de empresas agroindustriales, responsables de calidad, compras, operaciones y sostenibilidad, inversionistas y analistas de crédito, auditores, consultores y responsables de política pública. No requiere formación en ciencia de datos. Las fórmulas que aparecen están explicadas en el texto y pueden omitirse sin perder el argumento; están ahí para quienes quieran aplicar las herramientas o verificar su lógica.

Cómo está organizado cada capítulo

Todos los capítulos siguen la misma estructura en cuatro fases:

1. **El gancho.** Un caso que muestra el problema en su dimensión física y comercial. Cuando es posible, se trata de un caso real documentado; en la mayoría de los capítulos, se complementa con un escenario compuesto ambientado en la cadena agroalimentaria ecuatoriana.

2. **El diagnóstico.** La explicación técnica de por qué ocurre el problema: los mecanismos biológicos, estadísticos, económicos o regulatorios que lo producen.

3. **La tesis.** La solución, con las herramientas de datos, modelos y gobernanza que la hacen posible, y el mismo escenario del gancho reescrito con esas herramientas en funcionamiento.

4. **El framework de acción.** Una tabla de cinco pasos con responsable, evidencia de cumplimiento y plazo de referencia, y una regla de cierre dirigida al directorio.

Cómo está organizado el libro

Los veinticinco capítulos se agrupan en cinco partes.

- **Parte I. Fundamentos: datos y dinero** define el bio-dato y explica cómo se convierte en crédito, seguro y activos financieros.

- **Parte II. Gobernanza e integridad** trata los riesgos de usar datos y modelos: decisiones algorítmicas sin control, fraude, cumplimiento regulatorio en destino, disputas técnicas y seguridad de la información.

- **Parte III. Sostenibilidad y territorio** aborda los datos ambientales y sociales, el carbono, la planificación territorial, la inclusión de los pequeños productores y el agua.

- **Parte IV. Operaciones de la cadena** aplica las herramientas a decisiones operativas: compras, pronóstico de cosecha, cadena de frío, subproductos, ganadería, insumos, gemelos digitales e innovación de producto.

- **Parte V. Capital, organización y conocimiento** se ocupa de la evaluación de inversiones, la hoja de ruta de implementación, el talento, un caso integrado y la conservación del conocimiento de la organización.

Los capítulos pueden leerse en orden o de forma independiente. Cuando un capítulo usa una herramienta desarrollada en otro, lo indica con el número del capítulo correspondiente. El Anexo A resume las herramientas principales de cada capítulo para quien busque una en particular.

Sobre los escenarios y las fuentes

Los escenarios compuestos de cada capítulo son construcciones narrativas. Las empresas, cooperativas, instituciones y personas que aparecen en ellos son ficticias, aunque los mecanismos técnicos, regulatorios y comerciales que ilustran son reales. Cada capítulo cierra con una nota que distingue los hechos documentados de los elementos narrativos.

Esta versión del manuscrito contiene marcas de verificación pendiente, señaladas con la expresión "a confirmar", en datos, fechas, cifras y referencias que deben contrastarse con fuentes primarias antes de la publicación. El Anexo B las reúne por capítulo. Ninguna cifra, autor o referencia se ha completado sin fuente; cuando un dato no pudo verificarse, se indicó de forma explícita.

Una advertencia antes de empezar

Nada en este libro requiere implementarse completo. El capítulo 22 propone empezar por muy poco: la identidad de los lotes, el registro de las parcelas y la seguridad básica de la información. Casi todas las demás herramientas dependen de esa base. Una empresa que construye esa base en una campaña ya tiene más capacidad que la mayoría de su sector. Una que intenta hacerlo todo a la vez, como muestra ese mismo capítulo, suele terminar sin nada.

Parte I. Fundamentos: datos y dinero

Capítulo 1. El nacimiento de los bio-datos

Un alimento cambia de estado químico y microbiológico a cada hora. El registro de esos cambios queda en manos de quien decidió medirlos, y ahí está el negocio.

Fase 1. El gancho: cuarenta toneladas sin pasado

Escenario compuesto. La empresa y los personajes son ficticios; los límites regulatorios, los mecanismos biológicos y la lógica comercial descritos son reales.

Bodega de acopio en la vía a Daule. Martes, 06:40. Andrés Villacís, gerente de calidad de una exportadora mediana, abre el correo antes que la puerta del contenedor. El comprador europeo envió el informe del laboratorio de recepción. El lote 2611, cuarenta toneladas de cacao Nacional destinadas a chocolate oscuro de alto contenido de cacao, superó la especificación contractual de cadmio. El comprador no lo rechaza por ley: el límite legal europeo se aplica al chocolate terminado, no al grano. Lo rechaza porque su contrato le exige garantizar que el producto final no superará los 0,80 mg/kg que fija la normativa de la Unión Europea para chocolate con 50 % o más de materia seca de cacao, y con ese grano no puede garantizarlo.

Villacís baja a la bodega. El olor lo recibe antes que los sacos: además del aroma ácido del cacao bien fermentado, hay una nota amoniacal, casi de jamón, en una fracción del lote. Sobrefermentación. Eso explica otro dato del informe, un pH de cotiledón fuera del perfil esperado. Hay dos problemas apilados, uno químico y otro microbiológico, en el mismo lote.

La pregunta del comprador es breve: *¿de qué fincas viene el cadmio?*

Villacís no puede responderla. El lote 2611 se armó mezclando entregas de 63 productores durante once días. Cada entrega tenía una guía de recepción en papel con peso, humedad estimada al tacto y precio pagado. Nadie registró la proporción de cada productor en la mezcla final. Nadie midió cadmio por finca. La fermentación ocurrió en cajones de cinco proveedores distintos, sin registro de temperatura ni de volteos. El lote existe físicamente, pesa cuarenta toneladas, y en términos de información no tiene pasado.

El costo para la empresa va más allá del flete de retorno o del descuento negociado. El comprador abrirá una no conformidad de proveedor y, en la siguiente campaña, pedirá análisis de cadmio por lote antes del embarque, a cargo del exportador. El banco que financia el inventario de la exportadora recibirá la noticia por la vía de las cuentas por cobrar. La aseguradora de crédito revisará la calificación. Un problema de química de suelos terminó convertido en un problema de costo de capital.

Lo que falló aquí fue la gobernanza de datos. El cacao estaba dentro de los parámetros biológicos habituales de la zona y el personal hizo su trabajo de recepción. Pero la operación nunca convirtió los eventos biológicos del grano en registros que pudieran consultarse después. En este libro llamamos **bio-datos** a esos registros.

Fase 2. El diagnóstico: por qué un lote pierde su memoria

2.1 El cadmio no se ve, se hereda

El cadmio en el grano de cacao proviene principalmente del suelo. La planta lo absorbe por la raíz y lo transloca hacia hojas, testa y cotiledón. La concentración en el grano depende del cadmio total y disponible del suelo, del pH (los suelos ácidos aumentan su disponibilidad), de la materia orgánica, de la edad de la plantación y del material genético. Estudios realizados en Ecuador encontraron relación entre el cadmio del suelo y el del grano, y una alta variabilidad entre zonas y entre fincas cercanas (Chavez et al., 2015; Argüello et al., 2019).

Esa variabilidad es el núcleo del problema. Si la concentración en el grano dependiera solo de la provincia, bastaría con elegir la zona de compra. Pero depende de la parcela. Dos fincas a pocos kilómetros pueden entregar granos con concentraciones muy diferentes. Cuando el acopiador mezcla sus entregas, el cadmio del lote es un promedio ponderado por masa de concentraciones que nadie midió. El lote hereda el riesgo de su peor proveedor, diluido en una proporción que nadie registró.

Expresado de forma formal, si un lote L se compone de entregas $i = 1, \dots, n$ con masas m_i y concentraciones c_i, la concentración del lote es:

$$C_L = \frac{\sum_{i=1}^{n} m_i \; c_i}{\sum_{i=1}^{n} m_i} = \mathbf{w}^{\top}\mathbf{c}$$

donde $\mathbf{w}$ es el vector de fracciones de masa de cada entrega. Villacís conocía, a lo sumo, las masas. No conocía $\mathbf{w}$ del lote final porque la mezcla se hizo sin registro, y no conocía ningún c_i. El balance de masa es exacto; la ignorancia fue organizativa.

2.2 La fermentación es un bioproceso sin bitácora

La fermentación del cacao es una sucesión microbiana espontánea. En las primeras horas dominan levaduras que consumen los azúcares de la pulpa y producen etanol. Luego crecen bacterias ácido-lácticas y, con la aireación de los volteos, bacterias ácido-acéticas que oxidan el etanol a ácido acético. Esa reacción es exotérmica: la masa se calienta y el ácido acético difunde hacia el cotiledón, mata el embrión y activa las reacciones que generan los precursores del sabor a chocolate.

Si la fermentación se prolonga o la masa pierde control de temperatura y aireación, bacterias aeróbicas formadoras de esporas y otros microorganismos degradan proteínas, sube el pH y aparecen notas pútridas o amoniacales. Si es corta, quedan granos pizarrosos o violetas, astringentes. Un secado lento o un almacenamiento húmedo agregan otro riesgo: el crecimiento de mohos y la posible formación de ocratoxina A.

En la práctica, la calidad del grano se verifica al final con la prueba de corte, que clasifica los granos por su color interno y defectos según la norma técnica ecuatoriana para cacao en grano (INEN, s. f.). La prueba de corte es útil, pero llega tarde: describe el resultado de una fermentación que ya ocurrió y no permite reconstruir por qué salió así. Sin curvas de temperatura, registro de volteos ni tiempos de secado, la fermentación es una caja negra con un resultado visible y ninguna causa documentada.

2.3 El patrón se repite en otras cadenas

El mismo diagnóstico aplica fuera del cacao. En la carne empacada al vacío, la vida útil depende de la carga microbiana inicial, del oxígeno residual dentro del empaque y, sobre todo, de la cadena de frío. Bacterias psicrotróficas, entre ellas especies de *Clostridium* asociadas al llamado "empaque hinchado" (*blown pack*), pueden crecer a temperaturas de refrigeración y producir gas y olores sin señales previas visibles. Cuando el reclamo llega desde el supermercado, la pregunta es la misma que recibió Villacís: ¿qué pasó con este lote, en qué punto

y por qué? Si la temperatura del despacho, el lote de faenamiento y el turno de empaque no quedaron vinculados a cada caja, la respuesta tampoco existe.

2.4 Las cuatro fallas sistémicas

El caso del lote 2611 permite separar cuatro fallas que se repiten en la mayoría de las operaciones agroalimentarias de la región.

Falla	Descripción técnica	Consecuencia financiera
Ruptura de identidad	El lote pierde la relación con sus unidades de origen en un evento de transformación (mezcla, fermentación conjunta, corte, empaque)	La responsabilidad se vuelve colectiva y el riesgo no se puede asignar ni asegurar
Medición tardía	La calidad se mide al final del proceso, cuando ya no hay forma de actuar	El defecto se descubre cuando ya tiene el costo máximo: después del embarque
Dato sin contexto	Se registra un valor (humedad 7 %) sin método, instrumento, operador ni incertidumbre	El dato no resiste una auditoría ni un litigio; vale poco como garantía
Dato sin estructura	Registros en papel, hojas de cálculo aisladas, mensajes de chat	No se puede consultar, cruzar ni modelar; no sirve como activo

Ninguna de estas fallas se corrige comprando un software de trazabilidad. Se corrigen cuando la organización decide que cada transformación biológica del producto debe dejar un registro estructurado, con identidad, contexto y procedencia.

2.5 Qué es un bio-dato

Un bio-dato es el registro estructurado de un estado o de una transformación biológica, química o física de una unidad identificable de producto, vinculado a su origen y medido con un método conocido.

Tiene cinco componentes obligatorios:

1. **Identidad:** a qué unidad pertenece (parcela, entrega, cajón de fermentación, lote, caja), con un identificador que no se pierda en las transformaciones.

2. **Contexto:** cuándo, dónde y quién lo generó, con coordenadas cuando corresponda.

3. **Valor medido con su unidad y su incertidumbre:** "humedad 7,2 % ± 0,3 % (k = 2)" es un bio-dato; "humedad bien" no lo es.

4. **Método:** instrumento, técnica analítica, versión del procedimiento o del modelo que produjo la estimación.

5. **Procedencia (*lineage*):** de qué datos anteriores se derivó, para poder reconstruir la cadena completa.

El término "huella digital inmutable" se usa con frecuencia y conviene precisarlo. Un sistema puede hacer que un registro sea **resistente a la alteración**: una vez escrito, cualquier modificación posterior queda en evidencia, por ejemplo mediante funciones hash encadenadas o registros distribuidos. Ese mecanismo no garantiza que el dato sea **verdadero**. Si un operador escribe una humedad falsa, la cadena de bloques preservará esa falsedad con total fidelidad. En la literatura de sistemas distribuidos esto se conoce como el problema del oráculo: el punto débil está en la captura, no en el almacenamiento. Por eso, en este libro, la inmutabilidad es una condición necesaria y nunca suficiente. La confianza se construye en el punto de medición.

2.6 Por qué un bio-dato tiene valor financiero

En 1970, George Akerlof describió cómo la asimetría de información sobre la calidad de un bien hace que los compradores paguen el precio de la calidad promedio esperada, lo que expulsa del mercado a los vendedores de buena calidad (Akerlof, 1970). El comercio agroalimentario funciona en buena parte bajo esa lógica: el comprador no puede verificar la calidad de cada lote a un costo razonable, así que descuenta el riesgo en el precio, en las condiciones de pago o en las exigencias de análisis.

El bio-dato reduce esa asimetría. Su valor económico puede expresarse como la suma de las pérdidas que evita y los beneficios que habilita:

$$V_{bio} \approx \Delta p_{rechazo} \cdot K_{rechazo} \; + \; \Delta r \cdot F \; + \; \pi \cdot Q \; - \; C_{captura}$$

donde $\Delta p_{rechazo}$ es la reducción en la probabilidad de rechazo o reclamo, $K_{rechazo}$ el costo total de un rechazo (flete, descuento, no conformidad, pérdida de cliente), Δr la reducción en la tasa de financiamiento o en la prima de seguro, F el monto financiado o asegurado, π la prima de precio por calidad demostrada, Q el volumen vendido y $C_{captura}$ el costo de generar y gobernar los datos.

La ecuación no tiene valores universales. Cada empresa debe estimar sus propios términos, y el cálculo suele mostrar que el término de rechazo evitado basta para pagar la captura de datos en la primera campaña con un incidente. El punto conceptual es otro: el dato pasa a tener un valor financiero medible cuando cambia una decisión de un tercero (comprador, banco, aseguradora, regulador). Un dato que no modifica ninguna decisión externa es un costo operativo.

Fase 3. La tesis: el lote como objeto de datos

3.1 De la semilla al empaque: la estela de datos

Cada etapa del proceso biológico genera datos, se registren o no. La tabla siguiente describe esa estela para el cacao. Las columnas de la derecha indican quién puede pagar por cada dato o qué decisión externa cambia.

Etapa	Evento biológico o físico	Bio-datos generados	Quién lo valora
Material genético	Selección de clon o variedad	Identidad genética, origen del material, vivero	Comprador de cacao fino de aroma, programas de denominación de origen

Etapa	Evento biológico o físico	Bio-datos generados	Quién lo valora
Suelo y parcela	Disponibilidad de nutrientes y metales	Coordenadas del polígono, pH, cadmio total y disponible, materia orgánica	Comprador (riesgo de cadmio), autoridad UE (EUDR), banco (garantía)
Manejo	Fertilización, control sanitario, enmiendas	Insumos aplicados, dosis, fechas, residuos esperados	Comprador (residuos de plaguicidas), certificadoras
Cosecha	Madurez de la mazorca	Fecha, parcela, peso fresco, estado sanitario	Acopiador (rendimiento), aseguradora (estimación de producción)
Fermentación	Sucesión microbiana exotérmica	Curva de temperatura, volteos, duración, masa, pH	Comprador premium, desarrollo de producto
Secado	Pérdida de agua	Humedad final, método, duración, actividad de agua	Comprador (moho, ocratoxina), almacén
Acopio y mezcla	Combinación de entregas	Composición del lote (vector **w**), pesos, calidad por entrega	Exportador (asignación de riesgo), banco (inventario financiado)
Almacenamiento	Estabilidad del grano	Temperatura, humedad relativa, control de plagas	Almacén, aseguradora, financiador

Etapa	Evento biológico o físico	Bio-datos generados	Quién lo valora
Embarque	Transporte	Contenedor, sellos, condiciones de viaje	Comprador, aseguradora de transporte
Procesamiento y empaque	Tostado, molienda, empaque	Parámetros de proceso, lote de producto final vinculado a lotes de grano	Marca, regulador, consumidor

Hoy la mayoría de estos datos se generan y se pierden. La tesis de este capítulo es que la ventaja competitiva de una exportadora, de una planta o de una cooperativa dependerá de cuántos de ellos conserve con identidad, contexto y procedencia, y de cuántos convierta en decisiones de terceros.

3.2 La representación: el lote como tensor

Para que los bio-datos sean modelables, hay que darles una estructura matemática que preserve sus relaciones. La representación natural de un sistema de producción es un tensor de tres dimensiones:

$$\mathcal{X} \in \mathbb{R}^{U \times T \times V}$$

donde U son las unidades (parcelas, entregas, cajones, lotes), T los instantes o etapas de medición y V las variables medidas. Cada celda $x_{u,t,v}$ es un bio-dato. A esa estructura se agregan dos elementos:

- Una **máscara de observación** $\mathcal{M}$ del mismo tamaño, que indica qué celdas fueron medidas y cuáles faltan. En el agro, la mayor parte del tensor está vacía, y modelar sin reconocerlo produce estimaciones con una seguridad que no tienen.

- Una **matriz de composición** $\mathbf{W}$, que registra en qué proporción cada unidad de origen forma parte de cada unidad derivada. Es el componente que faltó en el lote 2611. Con $\mathbf{W}$ registrada, cualquier propiedad aditiva de los lotes (cadmio, humedad, masa) puede calcularse

o estimarse desde las fincas, y cualquier hallazgo en un lote puede rastrearse hacia sus fincas de origen.

La matriz $\mathbf{W}$ es el dato más barato de capturar y el de mayor valor. Basta con registrar, en el momento de la mezcla, qué entregas y cuántos kilos entran en cada lote. No requiere sensores ni laboratorio, solo disciplina en el punto de transformación.

3.3 El modelo: estimar la calidad antes de medirla

Con el tensor estructurado, la calidad deja de ser una medición final y pasa a ser una estimación continua con incertidumbre conocida. Tres familias de modelos cubren la mayoría de las necesidades.

a) Modelos jerárquicos para contaminantes de origen. El cadmio de cada finca puede modelarse como una variable que depende de covariables del suelo (pH, cadmio del suelo, materia orgánica) y de efectos anidados de zona y finca:

$$\log c_i \sim \mathcal{N}\left(\beta_0 + \boldsymbol{\beta}^\top \mathbf{z}_i + \alpha_{zona(i)} + \gamma_{finca(i)},\ \sigma^2\right)$$

Un modelo bayesiano jerárquico de este tipo comparte información entre fincas de la misma zona. Así, una finca con pocos análisis recibe una estimación razonable a partir de sus vecinas y de sus propias características de suelo, y la incertidumbre de esa estimación queda cuantificada. Cada nuevo análisis de laboratorio actualiza el modelo.

b) Optimización de mezclas con restricción probabilística. Con estimaciones por finca y la matriz de composición, la mezcla deja de ser una operación de bodega y pasa a ser un problema de optimización. El exportador puede armar lotes que cumplan la especificación del comprador con un nivel de confianza definido:

$$\max_{\mathbf{w}} \text{valor}(\mathbf{w}) \quad \text{sujeto a} \quad P(\mathbf{w}^\top \mathbf{c} \le C_{max}) \ge 1 - \varepsilon$$

El exportador asigna a cada destino el grano que puede cumplir su especificación, en lugar de descubrir el incumplimiento en el laboratorio del comprador. Las entregas con mayor riesgo se canalizan hacia mercados o productos con exigencias compatibles, y las fincas con riesgo alto entran en programas de mitigación agronómica en vez de quedar excluidas sin explicación.

c) Modelos quimiométricos y de proceso para la calidad física y química. La espectroscopía de infrarrojo cercano (NIR), combinada con regresión por mínimos cuadrados parciales (PLS), permite estimar en segundos variables como humedad, grasa, índice de fermentación o contenido de polifenoles a partir de un espectro. Cada modelo se calibra contra el método de referencia de laboratorio y se valida con muestras independientes, informando el error de predicción (RMSEP) y la relación entre la desviación estándar de referencia y ese error (RPD). Un modelo sin estas métricas no debe usarse para decisiones comerciales.

Para metales traza como el cadmio, la estimación por NIR es indirecta y en general poco exacta. La decisión correcta es usar el modelo jerárquico para priorizar qué fincas y lotes analizar, y confirmar con métodos instrumentales de referencia en laboratorios acreditados bajo ISO/IEC 17025. El modelo reduce el número de análisis necesarios; no los reemplaza.

En la fermentación, sensores de temperatura de bajo costo en los cajones generan curvas que se pueden comparar con el perfil esperado. Un modelo de detección de anomalías alerta cuando un cajón no alcanza la temperatura que indica actividad acética o cuando la supera durante demasiado tiempo. El operador puede intervenir mientras la masa todavía se puede corregir. La prueba de corte queda como verificación final y como dato de entrenamiento para mejorar el modelo.

3.4 El nuevo estándar de confianza: medición, modelo e incertidumbre

El comercio internacional de alimentos ha confiado tradicionalmente en dos instrumentos: el certificado (una auditoría periódica que dice que el sistema funciona) y el análisis de laboratorio (una muestra que dice que un lote cumple). Ambos son puntuales. El modelamiento analítico agrega un tercer instrumento: una estimación continua de la calidad de cada lote, con su incertidumbre, construida a partir de toda la historia biológica registrada.

Este estándar exige tres condiciones que hoy pocas empresas cumplen.

- Metrología explícita. Cada medición debe declarar su incertidumbre. Un modelo que combina datos sin incertidumbre combina errores desconocidos.

- **Validación independiente.** Los modelos se validan con datos que no participaron en su entrenamiento y se revalidan cuando cambia la zona, la temporada o el instrumento. La deriva del modelo es un riesgo operativo y debe gestionarse como tal.

- **Trazabilidad del propio modelo.** Cada estimación debe indicar qué versión del modelo la produjo y con qué datos. Si un comprador cuestiona un lote, la empresa debe poder reconstruir el cálculo completo.

La regulación avanza en la misma dirección. El Reglamento (UE) 2023/1115 exige a los operadores que comercializan cacao, café y otras materias primas en la Unión Europea vincular el producto con la geolocalización de las parcelas donde se produjo. La regla de trazabilidad alimentaria de la FDA de Estados Unidos (21 CFR Parte 1, Subparte S) estructura la información en eventos críticos de seguimiento y elementos de datos clave para los alimentos de su lista. Su fecha de cumplimiento fue postergada, y conviene verificar la vigente. El estándar EPCIS 2.0 de GS1 ofrece un lenguaje común para registrar esos eventos entre empresas. Ninguna de estas normas exige modelos predictivos, pero todas exigen identidad, contexto y procedencia, los mismos componentes del bio-dato. La empresa que construya esa base para cumplir la regulación tendrá también la materia prima para modelar su calidad.

3.5 La ingeniería: software que trata los datos como producto biológico

La captura de bio-datos falla cuando se diseña como un proyecto de tecnología de una sola vez. Funciona cuando se gestiona con las prácticas del desarrollo ágil de software, aplicadas a datos.

- **Contratos de datos.** Cada punto de captura (recepción, fermentación, secado, mezcla) tiene un esquema acordado: qué variables, en qué unidades, con qué rangos válidos y qué identificadores. Un registro que no cumple el contrato se rechaza en el momento de la captura, cuando el operador todavía puede corregirlo.

- **Pruebas automáticas sobre los datos.** Del mismo modo que el software tiene pruebas unitarias, los flujos de datos tienen pruebas: humedades imposibles, sumas de composición distintas de uno, lotes sin origen o fechas fuera de secuencia disparan alertas antes de que el dato alimente un modelo o un informe.

- **Integración y despliegue continuos de modelos.** Cada versión de un modelo se entrena, se valida y se publica con un procedimiento automatizado y documentado. Si la validación falla, el modelo anterior sigue operando.

- **Versionado de datos y modelos.** Cada informe a un comprador o a un banco queda asociado a una versión de datos y de modelo, de modo que pueda reproducirse meses después.

- **Registro resistente a la alteración.** Los eventos se encadenan con funciones hash o se anclan periódicamente en un registro externo. La tecnología específica (base de datos con auditoría, registro distribuido, cadena de bloques) es una decisión secundaria. Lo que se exige es que cualquier alteración quede en evidencia.

Esta arquitectura cuesta menos de lo que suele pensarse. El componente caro es la disciplina organizativa: lograr que la persona que recibe el cacao a las seis de la mañana registre la entrega con su identificador de parcela todos los días, incluida la semana de mayor volumen. Por eso la captura debe diseñarse para el operador, con formularios móviles mínimos, lectores de código y valores precargados, y no para el analista que verá los datos después.

3.6 El lote 2611, reescrito

Volvamos a la bodega de Villacís con la arquitectura descrita en operación.

Cada entrega llega con el identificador de parcela del productor, registrado previamente con su polígono georreferenciado y un análisis de suelo. El modelo jerárquico asigna a cada entrega una estimación de cadmio con su intervalo de confianza. Los sensores de los cajones de fermentación muestran que dos de ellos, de un mismo proveedor, mantuvieron temperatura alta durante más tiempo del perfil esperado; el sistema los marcó y ese grano se separó. La mezcla del lote 2611 se armó con un optimizador que respetaba la especificación del comprador con 95 % de confianza, y el exportador envió un análisis confirmatorio de un laboratorio acreditado antes del embarque.

Si el comprador encuentra igualmente un valor fuera de especificación, la conversación cambia. Villacís puede mostrar la composición del lote, las estimaciones por finca, el análisis previo al embarque y la incertidumbre de cada valor. Puede identificar las tres entregas con mayor contribución esperada y abrir una investigación acotada. El incidente pasa de ser un fallo de proveedor a ser

un evento con causa documentada, y eso protege la relación comercial, la calificación de crédito y el precio de la campaña siguiente.

Fase 4. El framework de acción: cinco pasos para convertir el proceso biológico en activo de datos

Paso	Acción concreta	Responsable	Evidencia de cumplimiento	Plazo de referencia
1. Mapear eventos críticos	Listar cada punto donde el producto cambia de identidad o de estado (recepción, mezcla, fermentación, secado, empaque, despacho) y definir qué dato mínimo debe registrarse en cada uno	Gerencia de calidad con jefatura de operaciones	Mapa de eventos y lista de elementos de dato por evento, aprobado por gerencia	2 semanas
2. Preservar la identidad en las mezclas	Registrar la composición de cada lote (qué entregas y cuántos kilos) desde la próxima campaña, aunque todo lo demás siga en papel	Jefe de bodega o acopio	100 % de los lotes con matriz de composición completa	Inmediato, desde la siguiente mezcla
3. Instalar contratos de datos en la captura	Definir esquema, unidades, rangos válidos e identificadores para cada evento; migrar la captura a formularios digitales con validación automática	Calidad con soporte de TI o proveedor externo	Porcentaje de registros rechazados en captura, con tendencia decreciente	4 a 8 semanas

Paso	Acción concreta	Responsable	Evidencia de cumplimiento	Plazo de referencia
4. Construir el primer modelo de una sola variable de riesgo	Elegir la variable que más costó en la última campaña (cadmio, humedad, índice de fermentación) y construir un modelo validado contra laboratorio de referencia, con métricas de error publicadas internamente	Calidad con analista de datos	Modelo documentado, validado con datos independientes y con versión registrada	8 a 12 semanas
5. Llevar el dato a una negociación	Presentar el expediente de bio-datos de un lote o de una campaña a un comprador, banco o aseguradora y negociar una condición concreta: prima de precio, menor frecuencia de análisis, mejor tasa o mejor cobertura	Gerencia general y comercial	Al menos una condición contractual o financiera modificada con base en los datos	Primera campaña completa

Regla de cierre para el directorio: si en doce meses ningún tercero tomó una decisión distinta gracias a los datos de la empresa, el programa registró información pero no generó bio-datos con valor. Revise el paso 5 antes de invertir en más tecnología.

Nota del autor sobre el escenario de apertura: la empresa, los personajes y el lote 2611 son una construcción narrativa. Los límites regulatorios, los mecanismos biológicos de acumulación de cadmio y de fermentación, y la lógica contractual y financiera descrita corresponden a la práctica real del comercio de cacao.

Capítulo 2. Del bio-dato al balance: crédito, seguro y activos digitales

El banco no presta sobre cacao. Presta sobre lo que puede verificar del cacao.

Esquema del capítulo

- La garantía biológica: por qué el inventario agrícola no financia y qué datos lo vuelven financiable.
- El seguro paramétrico: pagar por un índice en lugar de peritar una pérdida, y el riesgo que eso introduce.
- Tokenización de activos agrícolas: qué parte es ingeniería financiera y qué parte es promesa sin respaldo.

Fase 1. El gancho: la cosecha que nadie quiso financiar

Escenario compuesto. La cooperativa, el banco y los personajes son ficticios; los mecanismos de crédito, seguro y comercialización descritos son reales.

Los Ríos, primera semana de mayo. La cosecha principal de cacao está en su punto más alto y Rosa Quiñónez, gerente de una cooperativa de 210 socios, tiene un problema de caja. Sus socios entregan grano todos los días y necesitan cobrar en efectivo y en el momento. La cooperativa vende a una exportadora que paga a treinta días. Si no paga contra entrega, los socios llevan el cacao al intermediario de la carretera, que paga menos pero paga ya.

Quiñónez pide al banco una línea de capital de trabajo para comprar la cosecha de sus socios. El oficial de crédito revisa la carpeta y hace tres preguntas. ¿Qué garantía real ofrece la cooperativa? El galpón está en un terreno comunal sin escritura individual. ¿Cuál es el historial de ventas? Hay facturas, pero los volúmenes varían mucho entre años y nadie sabe explicar por qué. ¿Qué pasa si el cacao se daña o el precio cae? Nadie lo había calculado.

El oficial ofrece un monto que cubre una fracción de lo solicitado, a una tasa que refleja que, para el banco, la cooperativa es una caja negra. Quiñónez acepta lo

poco que le dan. Durante las semanas siguientes, una parte de los socios vende al intermediario.

Tres semanas después, lluvias intensas inundan parte de la zona baja. Un tercio de las fincas pierde la floración de la siguiente cosecha y algunos socios pierden plantas jóvenes. La cooperativa tenía contratado un seguro agrícola tradicional para una parte de sus socios. El ajustador tarda en llegar porque hay cientos de reclamos en la provincia. Cuando llega, las fincas ya fueron limpiadas y la evidencia del daño es difícil de reconstruir. El pago, cuando llega, llega tarde para financiar la rehabilitación.

Nadie en esta historia actuó de mala fe. El banco cobró por un riesgo que no podía medir. La aseguradora aplicó un proceso de peritaje diseñado para pocos siniestros dispersos, no para un evento que afecta a toda una zona al mismo tiempo. La cooperativa tenía cacao, tierras productivas y socios con años de entregas, pero no tenía ninguno de esos activos expresado en una forma que un tercero pudiera verificar a bajo costo.

El capítulo 1 definió el bio-dato. Este capítulo trata de lo que pasa cuando falta: el dinero se encarece, llega tarde o no llega.

Fase 2. El diagnóstico: por qué el dinero rehúye al agro

2.1 La pérdida esperada que el banco no puede estimar

Un banco mide el riesgo de un crédito con la pérdida esperada, que se descompone en tres factores (Basel Committee on Banking Supervision, 2005):

$$EL = PD \times LGD \times EAD$$

PD es la probabilidad de incumplimiento, LGD la fracción del monto que se pierde si hay incumplimiento (una vez ejecutadas las garantías) y EAD la exposición en el momento del incumplimiento.

El problema del financiamiento agrícola no es que estos valores sean altos. Es que el banco no puede estimarlos con precisión, y cuando no puede estimarlos, asume valores conservadores. Para la cooperativa de Quiñónez:

- PD incierta. Los ingresos dependen del rendimiento de las fincas, del precio internacional y del clima. El banco no tiene datos de rendimiento por finca, ni de la variabilidad histórica, ni de la exposición a eventos

climáticos. Sin datos, la PD se fija por categoría ("cooperativa agrícola pequeña") y no por el riesgo real de esta cooperativa.

- LGD **alta.** El inventario de cacao es una garantía débil para el banco: puede perder calidad, puede desaparecer, puede no tener comprador inmediato y su valor depende de una calidad que el banco no sabe medir. Si el banco tuviera que ejecutar la garantía, no sabría cuánto vale ese cacao ni dónde está exactamente.

- EAD **estable.** Es el único término que el banco controla, y por eso lo reduce: otorga menos dinero.

Este es el mismo mecanismo de Akerlof (1970) del capítulo anterior, trasladado al mercado de crédito. Cuando el prestamista no puede distinguir a los buenos deudores de los malos, cobra a todos una tasa que refleja el riesgo promedio. Los buenos deudores encuentran esa tasa demasiado cara y quedan fuera, o aceptan menos dinero del que necesitan.

2.2 El inventario biológico como garantía imperfecta

Una garantía funciona cuando cumple cuatro condiciones: existe, se puede identificar, mantiene su valor y se puede ejecutar. El inventario agrícola tiene dificultades con las cuatro.

Condición	Problema en el inventario agrícola	Dato que lo resolvería
Existencia	El grano puede venderse, mezclarse o retirarse sin que el banco lo sepa	Registro de entradas y salidas por lote en un almacén con custodia independiente
Identificación	Un saco de cacao es igual a otro a simple vista	Identificador de lote con su composición y origen (matriz de composición, capítulo 1)
Conservación del valor	Humedad, plagas y mohos degradan el grano; el precio fluctúa	Monitoreo de condiciones de almacenamiento, estimación de calidad por lote y cobertura de precio

Condición	Problema en el inventario agrícola	Dato que lo resolvería
Ejecutabilidad	Sin comprador identificado ni calidad conocida, el banco no sabe a quién vender ni a qué precio	Contrato de venta vigente, calidad certificada, título transferible

La figura jurídica que resuelve parte de este problema existe desde hace décadas: el certificado de depósito emitido por un almacén general de depósito, que acredita la existencia de una mercancía bajo custodia de un tercero y puede usarse como garantía o transferirse. Su limitación práctica en el agro es la calidad. El almacén certifica cuántos kilos hay, pero no cuánto valen esos kilos si la calidad es desconocida o si se degrada durante el almacenamiento. Los bio-datos completan la parte que el instrumento jurídico no cubre.

2.3 El seguro indemnizatorio y la economía del peritaje

El seguro agrícola tradicional paga la pérdida real de cada asegurado, verificada por un perito en campo. Este modelo tiene tres debilidades estructurales en agricultura de pequeña y mediana escala:

- **Costo de verificación.** Peritar una finca de pocas hectáreas cuesta casi lo mismo que peritar una grande. En fincas pequeñas, ese costo es una fracción alta de la prima.
- **Riesgo moral y selección adversa.** El asegurado sabe más que la aseguradora sobre su manejo y sobre el riesgo de su parcela. Si la pérdida depende en parte del manejo, el seguro reduce el incentivo a cuidar el cultivo.
- **Eventos covariados.** Una inundación o una sequía afecta a miles de fincas al mismo tiempo. La capacidad de peritaje se satura justo cuando más se necesita, y el pago llega tarde.

El resultado es un seguro caro, lento y con baja adopción. Los programas públicos de subsidio a la prima reducen el costo para el productor, pero no corrigen el costo de verificación ni el retraso en el pago.

2.4 La tokenización y el problema del oráculo, otra vez

La promesa de la tokenización agrícola es representar un activo físico (una cosecha, un lote en almacén, una parcela) como un token digital que puede fraccionarse, transferirse y usarse como garantía en plataformas financieras. Existen implementaciones comerciales que tokenizan granos depositados en acopiadores, como la plataforma argentina Agrotoken (Agrotoken, s. f.).

El problema conceptual es el mismo que el capítulo 1 identificó para la "inmutabilidad". Un token es un registro digital resistente a la alteración. Su valor depende de tres vínculos que la tecnología de registro no garantiza:

1. El vínculo físico: que el activo exista, esté donde se dice y tenga la calidad declarada. Esto depende de la custodia y de la medición, es decir, de los bio-datos.

2. El vínculo jurídico: que el tenedor del token tenga un derecho exigible sobre el activo, reconocido por la legislación del país donde está el activo.

3. El vínculo de mercado: que exista un comprador dispuesto a recibir el activo o el token a un precio verificable.

Un token sin estos tres vínculos es un registro contable sin respaldo. La pregunta que un inversionista debe hacer ante cualquier propuesta de tokenización agrícola es: ¿quién custodia el activo, quién mide su calidad y qué tribunal haría cumplir mi derecho? Si la respuesta a alguna de las tres es vaga, el riesgo está escondido en el token.

Fase 3. La tesis: el riesgo biológico como variable medible

3.1 El expediente de riesgo biológico

La solución estructural consiste en presentar a bancos, aseguradoras e inversionistas un expediente de riesgo biológico: un conjunto ordenado de bio-datos que permite estimar los términos de la pérdida esperada con precisión suficiente para que el tercero cambie su decisión.

El expediente no es un informe narrativo. Es una estructura de datos con evidencia verificable, organizada según la pregunta financiera que responde.

Pregunta del financiador	Componente del expediente	Bio-datos que lo sostienen
¿Cuánto producirá? (PD)	Historial productivo por unidad	Rendimientos por parcela y campaña, edad de plantación, material genético, registros de manejo
¿Qué tan variable es? (PD)	Perfil de exposición climática	Series de precipitación y temperatura de la zona, historial de eventos extremos, índices de vegetación por parcela
¿Qué pasa si no paga? (LGD)	Valor de la garantía	Inventario en custodia por lote, calidad estimada con incertidumbre, contrato de venta, cobertura de precio
¿Cuánto me debe en el peor momento? (EAD)	Flujo de caja proyectado	Calendario de cosecha, contratos de compra, condiciones de pago de los compradores
¿Me están diciendo la verdad?	Integridad del dato	Método de captura, procedencia, validación cruzada con fuentes externas (satélite, almacén, comprador)

La última fila es la que más pesa. Un banco puede aceptar datos imperfectos si sabe cuán imperfectos son. Lo que no puede aceptar es un dato cuya procedencia desconoce.

3.2 Crédito: reducir la incertidumbre antes que el riesgo

El efecto de los bio-datos sobre el crédito suele malinterpretarse. Los datos no hacen que una finca sea menos riesgosa: el clima, el precio y la biología siguen siendo los mismos. Lo que hacen es reducir la **incertidumbre del banco sobre el riesgo**, y eso tiene valor económico propio.

Sea $\widehat{PD}$ la estimación del banco y σ_{PD} su incertidumbre. Un banco prudente fija el precio del crédito sobre un percentil alto de la distribución de PD, no sobre su media:

$$PD_{precio} \approx \widehat{PD} + z_{\alpha}\,\sigma_{PD}$$

Con datos escasos, σ_{PD} es grande y el precio del crédito sube aunque la PD real sea baja. Con un historial productivo verificable, σ_{PD} se reduce y la tasa puede bajar sin que el banco asuma más riesgo. Este es el argumento central para negociar con un banco: la cooperativa no le pide que asuma más riesgo, sino que deje de cobrarle por una incertidumbre que ya puede eliminar.

Para la LGD, el mecanismo es más directo. Un inventario en almacén con custodia independiente, con calidad estimada por lote (modelos NIR y modelos jerárquicos de contaminantes del capítulo 1) y con un contrato de venta vigente, tiene un valor de recuperación conocido. El banco puede aplicar un margen de seguridad menor sobre el valor de la garantía y, por tanto, prestar más sobre el mismo inventario.

Tres instrumentos aprovechan estos datos de forma directa:

- Financiamiento de inventario con certificado de depósito, complementado con monitoreo de condiciones de almacenamiento y estimación de calidad por lote.
- Financiamiento de cadena (*supply chain finance*), en el que el banco adelanta el pago al proveedor apoyándose en la solidez del comprador final. El dato clave es el contrato de compra y el historial de cumplimiento entre ambas partes.
- Calificación con datos alternativos, en la que el historial de entregas, la regularidad de los registros productivos y los indicadores satelitales de la parcela complementan, o sustituyen en parte, el historial crediticio tradicional.

3.3 Seguro paramétrico: pagar por un índice

El seguro paramétrico, o seguro por índice, cambia la pregunta. En lugar de verificar la pérdida de cada asegurado, paga cuando un índice objetivo cruza un umbral definido en el contrato: la precipitación acumulada en un periodo, la

temperatura máxima durante la floración o un índice de vegetación medido por satélite.

La función de pago típica es lineal entre un umbral de activación I_t y un umbral de salida I_s:

$$P(I) = \begin{cases} 0 & \text{si } I \geq I_t \\ S \cdot \dfrac{I_t - I}{I_t - I_s} & \text{si } I_s < I < I_t \\ S & \text{si } I \leq I_s \end{cases}$$

donde I es el valor observado del índice (por ejemplo, precipitación acumulada en un índice de sequía) y S la suma asegurada. Para riesgos de exceso, como inundación, la función se invierte.

Las ventajas son concretas: el pago se calcula sin peritaje, llega en días en lugar de meses, el costo administrativo baja, y el asegurado no puede influir en el índice, lo que elimina el riesgo moral. La experiencia internacional con estos seguros es amplia, incluido el seguro ganadero por índice desarrollado en el norte de Kenia, que usa índices de vegetación satelitales para estimar mortalidad del ganado (Chantarat et al., 2013).

3.4 El riesgo de base: el problema que el seguro paramétrico no resuelve solo

El seguro paramétrico tiene un costo oculto: el **riesgo de base**, la diferencia entre la pérdida real del asegurado y el pago del índice. Si llovió poco en la estación meteorológica pero mucho en la finca, el productor no tiene pérdida y cobra. Si llovió normal en la estación pero el río desbordó en la zona baja, el productor pierde todo y no cobra nada. El segundo caso destruye la confianza en el producto. La literatura económica muestra que el riesgo de base puede reducir de forma marcada la demanda de estos seguros, sobre todo entre productores con aversión al riesgo (Clarke, 2016; Carter et al., 2017).

El riesgo de base se puede medir y reducir con bio-datos. Sea L_j la pérdida de la finca j y $P(I_j)$ el pago del índice asignado a esa finca. El diseño del contrato puede plantearse como un problema de minimización del error esperado:

$$\min_{I_t,\, I_s,\, \text{fuente del índice}} \mathbb{E}\left[\left(L_j - P(I_j)\right)^2\right]$$

sujeto a una prima pura igual al pago esperado, $\pi = \mathbb{E}[P(I)]$, más los recargos de la aseguradora.

Este problema solo puede resolverse si existen series históricas de pérdidas por finca (L_j) que puedan compararse con series históricas del índice (I_j). Ahí está el vínculo con el capítulo 1: los rendimientos por parcela y campaña, registrados con identidad y contexto, son la materia prima para calibrar el índice. Sin ese historial, la aseguradora diseña el índice con datos de zona y el productor carga con un riesgo de base que nadie cuantificó.

Tres prácticas reducen el riesgo de base:

- **Resolución espacial adecuada.** Usar índices con resolución cercana a la escala de la finca. Productos de precipitación de libre acceso que combinan datos satelitales y de estaciones, como CHIRPS, ofrecen series históricas largas con resolución de unos pocos kilómetros (Funk et al., 2015), suficientes para muchos diseños, aunque no para fenómenos muy locales como inundaciones ribereñas.
- **Índices compuestos.** Combinar precipitación, temperatura e índices de vegetación en el periodo fenológico crítico, con ponderaciones calibradas contra pérdidas históricas.
- **Capa de verificación selectiva.** Un esquema híbrido en el que el índice activa el pago y una verificación rápida con imágenes satelitales o con fotografía georreferenciada del productor corrige los casos con discrepancia evidente.

3.5 Tokenización con respaldo: tres capas obligatorias

La tokenización agrícola tiene sentido cuando resuelve un problema de liquidez o de fraccionamiento que los instrumentos tradicionales no resuelven, y cuando sus tres vínculos con la realidad están construidos antes que el token. La arquitectura mínima tiene tres capas:

Capa	Función	Requisito mínimo
Física	Garantizar que el activo existe y tiene la calidad declarada	Custodia por un tercero independiente, identificación por lote, bio-datos de calidad con incertidumbre, auditoría periódica

Capa	Función	Requisito mínimo
Jurídica	Garantizar que el token da un derecho exigible	Título o certificado reconocido por la ley local, contrato que vincule token y activo, procedimiento de ejecución definido
Digital	Registrar emisión, transferencia y redención	Registro resistente a la alteración, oráculos de datos con procedencia verificable, regla de redención (cómo se cambia el token por el activo o su valor)

El orden de construcción importa: primero la capa física, después la jurídica y al final la digital. La mayoría de los proyectos fallidos invierten este orden. Empiezan por la plataforma y descubren tarde que el activo no tiene custodia confiable o que el token no tiene validez jurídica en el país donde está el grano.

Para una empresa agroexportadora mediana, la tokenización rara vez es el primer paso. El primer paso es tener los datos y la custodia que harían posible un certificado de depósito con calidad verificada. Con eso resuelto, el instrumento financiero que se use después (certificado tradicional, financiamiento de inventario o token) es una decisión de costo y de acceso a inversionistas, no de viabilidad.

3.6 La cooperativa de Quiñónez, reescrita

Volvamos a Los Ríos con un expediente de riesgo biológico construido durante dos campañas.

Cada socio tiene su parcela georreferenciada y un historial de entregas por campaña. La cooperativa conoce el rendimiento por hectárea de cada finca y su variabilidad entre años. El grano entra a un almacén con custodia independiente, se registra por lote con su composición y recibe una estimación de calidad con incertidumbre. La cooperativa tiene un contrato de compra con la exportadora que fija volumen, calidad y condiciones de pago.

Quiñónez llega al banco con esa información. El oficial de crédito ya no evalúa una "cooperativa agrícola pequeña", sino un historial productivo verificable y un inventario con valor de recuperación conocido. El banco financia contra el inventario en almacén, con un margen de seguridad acorde con la calidad

estimada, y adelanta parte del pago de la exportadora con base en el contrato. La cooperativa puede pagar contra entrega y los socios dejan de vender al intermediario.

Para el riesgo climático, la cooperativa negoció con una aseguradora un seguro por índice de exceso de precipitación, calibrado con las pérdidas históricas de sus propias fincas. Cuando llega la inundación, el índice cruza el umbral en las celdas de la zona baja y el pago se activa en días. Algunas fincas de la zona alta, con pérdidas menores que el pago, cobran de más; dos fincas cercanas al río, con pérdidas por desborde que el índice de lluvia no capturó, quedan cubiertas por la capa de verificación con imágenes satelitales. El riesgo de base existe, pero está medido y tiene un mecanismo de corrección.

La biología y el clima son los mismos de la primera versión. Lo que cambió es la cantidad de incertidumbre que la cooperativa traslada a sus financiadores.

Fase 4. El framework de acción: cinco pasos para convertir bio-datos en dinero

Paso	Acción concreta	Responsable	Evidencia de cumplimiento	Plazo de referencia
1. Identificar la decisión financiera que más cuesta	Calcular cuánto paga hoy la organización por incertidumbre: diferencia de tasa frente a clientes con garantía real, crédito no obtenido, pérdidas no aseguradas, ventas a intermediarios por falta de liquidez	Gerencia financiera	Cuantificación en dólares de las tres principales fuentes de costo financiero atribuibles a falta de información	2 semanas

Paso	Acción concreta	Responsable	Evidencia de cumplimiento	Plazo de referencia
2. Construir el historial productivo verificable	Consolidar al menos dos campañas de rendimientos por parcela, con georreferenciación y método de registro declarado; completar con series climáticas públicas de la zona	Calidad y técnicos de campo	Base de datos por parcela con procedencia de cada registro	1 campaña (si hay registros previos) a 2 campañas
3. Poner el inventario bajo custodia y medición	Trasladar el inventario financiable a un almacén con custodia independiente o implementar un esquema equivalente de control de existencias por lote, con estimación de calidad	Operaciones y comercial	Inventario identificado por lote, con calidad estimada y conciliación periódica con el custodio	4 a 8 semanas
4. Medir el riesgo de base antes de comprar un seguro por índice	Comparar las pérdidas históricas de las propias fincas con el índice propuesto por la aseguradora; calcular en cuántos años el índice habría pagado sin pérdida o no habría pagado con pérdida	Gerencia con asesor técnico independiente	Tabla de coincidencias y discrepancias entre índice y pérdidas reales para el periodo disponible	3 a 6 semanas

Paso	Acción concreta	Responsable	Evidencia de cumplimiento	Plazo de referencia
5. Presentar el expediente y negociar una condición	Llevar el expediente de riesgo biológico al banco, a la aseguradora o al comprador y negociar una condición concreta: mayor monto, menor tasa, menor margen de garantía, prima ajustada o adelanto de pago	Gerencia general	Al menos una condición financiera modificada con base en el expediente	Siguiente ciclo de renovación de crédito o seguro

Regla de cierre para el directorio: antes de aprobar cualquier proyecto de tokenización, exija respuesta documentada a tres preguntas: quién custodia el activo, quién mide su calidad y qué norma jurídica hace exigible el derecho del tenedor. Si alguna respuesta no está documentada, el proyecto todavía no está listo.

Nota del autor sobre el escenario de apertura: la cooperativa, el banco, los personajes y el evento de inundación descritos son una construcción narrativa. Los mecanismos de crédito, la lógica del seguro indemnizatorio y paramétrico y las limitaciones de la tokenización corresponden a la práctica real de los mercados financieros agrícolas.

Parte II.

Gobernanza e integridad

Capítulo 3. Cuando el algoritmo decide: gobernanza y auditoría de modelos en la cadena agroalimentaria

Un modelo que fija precios a productores es una política comercial escrita en código. Si nadie la revisa, nadie la gobierna.

Esquema del capítulo

- La brecha de responsabilidad: quién responde cuando un modelo rechaza un lote, castiga un precio o reduce un crédito.
- Por qué fallan los modelos en el agro: deriva de datos, etiquetas ruidosas, variables sustitutas y ciclos de retroalimentación.
- Auditoría de algoritmos y arquitectura de gobernanza: qué se mide, quién firma y cómo se apela.

Fase 1. El gancho: el ojo que no conocía la Amazonía

Escenario compuesto. La empresa, los proveedores y los personajes son ficticios; los mecanismos técnicos de falla de los modelos y los marcos normativos citados son reales.

Centro de acopio de una exportadora en la provincia del Guayas. La empresa instaló hace un año un sistema de visión por computadora en la recepción. Una cámara fotografía cien granos cortados longitudinalmente, y un modelo de clasificación asigna cada grano a una categoría de la prueba de corte: bien fermentado, medianamente fermentado, violeta, pizarroso, mohoso. Con esa clasificación, el sistema calcula el porcentaje de fermentación del lote y aplica de forma automática la tabla de precios. La gerencia está satisfecha: la recepción es más rápida, el criterio es uniforme y se acabaron las discusiones con los productores sobre si el grano estaba "bien cortado".

En enero, la empresa firma un acuerdo con una asociación de productores de la Amazonía norte para ampliar su oferta. Los primeros camiones llegan en febrero. El sistema clasifica una proporción alta de granos como violetas, señal de

fermentación insuficiente. Los lotes reciben descuento. La asociación protesta: sus socios fermentan cinco días con volteos, como les enseñó el programa de asistencia técnica, y su cacao ha ganado reconocimientos en concursos de calidad. La empresa responde que el sistema es objetivo y que los datos son los datos.

Pasan tres meses. La asociación empieza a vender a otro comprador. En una reunión tensa, su presidenta pide algo simple: que alguien le explique por qué la máquina dice que su cacao está mal fermentado. Nadie en la sala puede hacerlo. El proveedor del software dice que el modelo tiene una exactitud de 94 % en la validación. El jefe de calidad no sabe con qué granos se entrenó el modelo. La gerencia comercial no sabía que el precio dependía por completo de esa clasificación.

Una catadora con experiencia revisa a mano una muestra de los lotes rechazados. Encuentra que buena parte de los granos clasificados como violetas tienen una pigmentación interna más intensa, propia del material genético de la zona, pero con la estructura agrietada y el color característico de un grano bien fermentado. El modelo se entrenó con fotografías de cacao del Litoral y nunca había visto ese patrón de color.

El daño no termina en la relación con la asociación. El porcentaje de fermentación calculado por el sistema alimentaba también el expediente de calidad que la exportadora entregaba a su banco para su línea de financiamiento de inventario, el instrumento descrito en el capítulo 2. Durante tres meses, el banco recibió reportes que mostraban un deterioro en la calidad del inventario. El oficial de riesgo aplicó un margen de seguridad mayor sobre la garantía. Un error de clasificación en una cámara de recepción terminó reduciendo la línea de crédito de la empresa.

La cámara hizo exactamente lo que fue entrenada para hacer. Lo que nadie había resuelto era quién respondía por sus decisiones.

Fase 2. El diagnóstico: por qué fallan los modelos en el agro y por qué nadie lo nota

2.1 La métrica que engaña: exactitud promedio

El proveedor tenía razón en un sentido estrecho: el modelo clasificaba bien el 94 % de los granos del conjunto de validación. El problema es que ese conjunto se extrajo de la misma población que el entrenamiento, cacao del Litoral fotografiado en la misma cámara. La exactitud promedio describe el desempeño sobre los datos que el modelo ya conoce. No dice nada sobre su desempeño en una población distinta.

Si el error se mide por subgrupo g (zona de origen, material genético, tipo de fermentación), el panorama cambia. Sea e_g la tasa de error en el subgrupo g y e la tasa de error global. La brecha máxima de desempeño es:

$$\Delta_{max} = \max_g \left| e_g - e \right|$$

Un modelo con 6 % de error global puede tener 4 % en el subgrupo mayoritario y 30 % en un subgrupo pequeño. La exactitud promedio esconde esa brecha porque el subgrupo pequeño pesa poco en el promedio. En una cadena agroalimentaria, los subgrupos pequeños suelen ser los proveedores nuevos, las zonas remotas y los materiales genéticos menos comunes, que son justamente los que una empresa quiere incorporar.

2.2 Deriva de datos: el mundo cambia y el modelo no

Los modelos de aprendizaje automático suponen que los datos de operación se parecen a los de entrenamiento. Cuando esa condición se rompe, el fenómeno se conoce como cambio en la distribución de los datos (*dataset shift*) (Quiñonero-Candela et al., 2009). En el agro, este cambio es la regla y no la excepción, por tres razones:

- **Variación espacial.** Suelos, clima, material genético y prácticas de manejo cambian entre zonas. Un modelo entrenado en una provincia hereda sus particularidades.

- **Variación temporal.** Cada campaña tiene un clima distinto. Una temporada lluviosa cambia la fermentación, el secado y la incidencia de mohos.

- **Variación de instrumento.** Una cámara nueva, otra iluminación o un cambio en el procedimiento de corte modifican las imágenes sin que cambie el grano.

La deriva puede vigilarse. Una medida operativa común es el índice de estabilidad poblacional (PSI), que compara la distribución de una variable en el periodo de referencia (e_i) con su distribución actual (a_i), en k intervalos:

$$PSI = \sum_{i=1}^{k} (a_i - e_i) \ln\left(\frac{a_i}{e_i}\right)$$

En la práctica de riesgo crediticio se usan con frecuencia umbrales de referencia como 0,10 para una alerta y 0,25 para un cambio significativo. Esos umbrales son convenciones del sector, no leyes estadísticas, y cada organización debe calibrarlos para su caso. En el centro de acopio, un PSI calculado sobre la distribución de color de los granos habría marcado la llegada de los lotes amazónicos desde el primer camión.

2.3 Etiquetas ruidosas: el modelo aprende de humanos que no coinciden

Un modelo supervisado aprende de ejemplos etiquetados. En la prueba de corte, las etiquetas las ponen catadores o inspectores, y dos inspectores pueden clasificar el mismo grano en categorías distintas, sobre todo en los casos intermedios entre "medianamente fermentado" y "violeta".

El grado de acuerdo entre evaluadores se mide con el coeficiente kappa de Cohen (Cohen, 1960), que corrige el acuerdo observado p_o por el acuerdo esperado por azar p_e:

$$\kappa = \frac{p_o - p_e}{1 - p_e}$$

Si los inspectores que etiquetaron las fotografías tienen un acuerdo moderado entre sí, el modelo aprende ese desacuerdo como si fuera la verdad. Ningún modelo supera de forma confiable la calidad de sus etiquetas. Antes de evaluar la exactitud de un clasificador, una auditoría debe medir el acuerdo entre los

humanos que lo entrenaron. Muchas veces el problema está en las etiquetas, no en el algoritmo.

2.4 Variables sustitutas: discriminación sin intención

Un modelo puede tratar de forma distinta a un grupo de productores sin usar ninguna variable que lo identifique. En el caso del acopio, la pigmentación del grano funcionó como variable sustituta (*proxy*) del origen geográfico. El modelo no "sabía" que los lotes venían de la Amazonía, pero los castigaba de forma sistemática por una característica asociada a ese origen y no a la calidad de fermentación.

Lo mismo ocurre en modelos de calificación crediticia con datos alternativos, como los descritos en el capítulo 2. Variables como la distancia a una vía principal, la conectividad del teléfono o la ausencia de historial bancario pueden correlacionarse con la pobreza rural, con zonas indígenas o con productoras mujeres cuyos títulos de tierra están a nombre de otra persona. Un modelo puede aprender esas correlaciones y reproducir exclusiones existentes con apariencia de objetividad técnica.

Una medida simple para detectar este efecto es la razón de impacto entre grupos: la tasa de resultado favorable del grupo con menor tasa dividida por la tasa del grupo con mayor tasa. Las guías de selección de personal de Estados Unidos usan desde 1978 la regla de las cuatro quintas partes, según la cual una razón inferior a 0,8 se considera evidencia de impacto adverso que debe investigarse (Equal Employment Opportunity Commission et al., 1978). Esa regla pertenece a otro contexto jurídico, pero ofrece un umbral de alerta útil para revisar modelos que asignan precios o crédito a productores.

2.5 Ciclos de retroalimentación: el modelo confirma su propio error

Cuando las decisiones de un modelo cambian el comportamiento de quienes son evaluados, el error puede reforzarse solo. Si el sistema paga menos a una zona, los mejores productores de esa zona venden a otro comprador. Los que quedan son los que no tienen alternativa, a veces con peor calidad. En la siguiente campaña, el cacao que llega de esa zona efectivamente es peor, y los datos parecen confirmar que el modelo tenía razón. Un sistema sin auditoría externa no puede distinguir entre "esa zona produce peor cacao" y "nuestro modelo expulsó a los buenos productores de esa zona".

2.6 Sesgo de automatización y brecha de responsabilidad

Los operadores humanos tienden a aceptar las recomendaciones de un sistema automatizado aun cuando contradicen otras señales disponibles, un fenómeno documentado en la investigación sobre factores humanos (Parasuraman y Manzey, 2010). En el centro de acopio, el personal de recepción veía granos que conocía y aun así aplicaba el descuento, porque "el sistema lo dice".

A esto se suma la brecha de responsabilidad. El proveedor de software responde por el desempeño en su conjunto de validación. El jefe de calidad responde por el procedimiento de recepción. La gerencia comercial responde por los precios. Nadie responde por el modelo como instrumento que fija precios. Cuando una decisión con efectos económicos sobre terceros no tiene un responsable designado, la organización no tiene gobernanza sobre ella.

2.7 El marco normativo ya llegó

Esta discusión dejó de ser solo ética o reputacional. El Reglamento (UE) 2024/1689, conocido como Ley de Inteligencia Artificial de la Unión Europea, clasifica como de alto riesgo determinados usos de la IA, entre ellos la evaluación de la solvencia crediticia de personas físicas, y les impone obligaciones de gestión de riesgos, calidad de datos, documentación técnica, supervisión humana y registro de eventos (Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, 2024). Aunque un modelo de clasificación de grano en Ecuador no esté sujeto a ese reglamento, los compradores, bancos e inversionistas europeos trasladan cada vez más esas exigencias a sus proveedores mediante contratos y cuestionarios de debida diligencia.

En Ecuador, la Ley Orgánica de Protección de Datos Personales de 2021 regula el tratamiento de datos de personas naturales, incluidos los productores registrados en plataformas de compra o crédito, y contempla derechos relacionados con decisiones basadas únicamente en tratamientos automatizados (Asamblea Nacional del Ecuador, 2021). Cualquier modelo que califique a productores individuales debe revisarse frente a esa norma.

En el plano voluntario existen dos referencias de uso internacional: la norma ISO/IEC 42001:2023, que establece requisitos para un sistema de gestión de inteligencia artificial y es certificable, y el Marco de Gestión de Riesgos de IA del NIST de Estados Unidos (NIST, 2023), organizado en cuatro funciones: gobernar, mapear, medir y gestionar.

Fase 3. La tesis: el modelo como activo regulado de la empresa

3.1 Cambiar la categoría del modelo

El primer cambio es conceptual. Un modelo que influye en precios, aceptación de lotes, crédito o asignación de proveedores debe gestionarse con el mismo rigor que una política de crédito o una especificación de calidad, y no como una herramienta de software. Debe tener un dueño con nombre, una documentación aprobada, una validación independiente antes de usarse, un monitoreo continuo y un procedimiento formal para cambiarlo o retirarlo.

La banca aprendió esta lección hace años con la gestión del riesgo de modelos. La industria agroalimentaria apenas empieza, y lo hace en el peor momento: cuando los modelos ya están en operación y nadie sabe cuántos hay.

3.2 Inventario y clasificación de riesgo

No se puede gobernar lo que no se ha contado. El punto de partida es un inventario de todos los modelos y reglas automatizadas que toman o influyen en decisiones, clasificados según el efecto de un error.

Nivel de riesgo	Criterio	Ejemplos en la cadena agroalimentaria	Exigencia mínima
Alto	El modelo afecta de forma directa a ingresos, crédito o acceso al mercado de terceros, o a la inocuidad del producto	Clasificación de calidad que fija precio al productor; calificación crediticia de productores; liberación automática de lotes por inocuidad	Validación independiente previa, auditoría por subgrupos, supervisión humana, mecanismo de apelación, revisión anual externa

Nivel de riesgo	Criterio	Ejemplos en la cadena agroalimentaria	Exigencia mínima
Medio	El modelo apoya decisiones internas con efecto económico relevante, con revisión humana	Pronóstico de rendimiento para planificación de compras; optimización de mezclas; detección de anomalías en fermentación	Validación previa, monitoreo de deriva, dueño designado, revisión anual interna
Bajo	El modelo tiene efecto operativo limitado y fácilmente reversible	Asistentes para redactar documentos; clasificación de correos; tableros descriptivos	Registro en el inventario, reglas de uso, verificación humana del resultado

El sistema de visión del centro de acopio era de riesgo alto desde el primer día, porque fijaba precios a terceros sin intervención humana. Se gestionó como si fuera de riesgo bajo.

3.3 Documentación: ficha del modelo y ficha del conjunto de datos

Dos instrumentos propuestos en la literatura de aprendizaje automático se convirtieron en práctica de referencia. La ficha del modelo (*model card*) documenta para qué se diseñó, con qué datos se evaluó, su desempeño desagregado por subgrupos relevantes y sus limitaciones conocidas (Mitchell et al., 2019). La ficha del conjunto de datos (*datasheet*) documenta cómo se recolectaron los datos, quién los etiquetó, qué poblaciones representan y cuáles no (Gebru et al., 2021).

Para un modelo agroalimentario, estas fichas deben responder como mínimo:

- ¿De qué zonas, materiales genéticos, campañas e instrumentos provienen los datos de entrenamiento?
- ¿Quién etiquetó los datos y cuál fue el acuerdo entre evaluadores (kappa)?

- ¿Cuál es el desempeño por zona, por material genético y por campaña, con intervalos de confianza?
- ¿En qué condiciones no debe usarse el modelo?
- ¿Qué versión está en operación y quién aprobó su puesta en marcha?

Si la exportadora hubiera tenido estas fichas, la primera pregunta habría mostrado que la Amazonía no estaba representada, y la cuarta habría prohibido usar el modelo en esos lotes hasta validarlo.

3.4 La auditoría de algoritmos en cinco pruebas

La auditoría de un modelo de alto riesgo debe revisar cinco aspectos. Cada uno tiene una métrica y un criterio de aceptación definidos antes de la auditoría, no después de ver los resultados.

Prueba	Pregunta	Métrica de referencia
Calidad de etiquetas	¿Los humanos que entrenaron el modelo coinciden entre sí?	Kappa de Cohen entre evaluadores sobre una muestra común
Representatividad	¿Los datos de entrenamiento cubren las poblaciones donde opera el modelo?	Proporción de cada subgrupo en entrenamiento frente a operación
Desempeño por subgrupo	¿El error es similar entre zonas, materiales y proveedores?	Tasa de error por subgrupo con intervalo de confianza; brecha máxima Δ_{max}
Calibración	¿Cuando el modelo dice 90 % de confianza, acierta cerca del 90 % de las veces?	Curva de calibración, error de calibración esperado
Efecto económico	¿El modelo produce resultados desiguales para grupos de productores?	Razón de impacto en precio o aprobación entre grupos

La auditoría se complementa con una prueba que pocas empresas hacen: **comparar el modelo contra el procedimiento que reemplazó**. Si los catadores humanos tenían un acuerdo moderado entre sí y el modelo alcanza un acuerdo similar con ellos, el modelo no empeoró la situación; la hizo más rápida y uniforme. Si el modelo es peor que los humanos en algún subgrupo, debe retirarse de ese subgrupo hasta corregirse.

3.5 Despliegue en sombra y predicción con abstención

Un modelo de alto riesgo no debe entrar en operación directamente. Primero opera **en sombra**: clasifica cada lote en paralelo con el procedimiento humano, sin efecto sobre el precio, durante un periodo suficiente para cubrir la variabilidad de proveedores. Solo cuando las discrepancias están analizadas y explicadas, el modelo pasa a decidir.

En operación, el modelo debe poder abstenerse. La predicción con abstención (*selective prediction*) consiste en que el modelo solo decide cuando su confianza supera un umbral τ, y deriva el resto de los casos a revisión humana:

$$\hat{y}(x) = \begin{cases} f(x) & \text{si } \mathrm{conf}(x) \geq \tau \ \text{ y } \ x \in \mathcal{D}_{ref} \\ \text{revisión humana} & \text{en otro caso} \end{cases}$$

donde $\mathcal{D}_{ref}$ representa el dominio de referencia, es decir, el tipo de datos para los que el modelo fue validado. Un detector de datos fuera de distribución, basado por ejemplo en la distancia de la imagen a las del conjunto de entrenamiento, habría enviado los primeros granos amazónicos a un catador humano en lugar de aplicarles un descuento automático.

El umbral τ es una decisión de negocio y no un parámetro técnico. Un umbral alto envía más casos a revisión humana, con más costo y menos errores. Un umbral bajo automatiza más, con menos costo y más errores. La gerencia debe fijarlo conociendo esa relación, que se representa con la curva de cobertura y riesgo del modelo.

3.6 El derecho a apelar y la explicación útil

Un productor afectado por una decisión automatizada necesita una explicación que pueda usar. Para un clasificador de granos, la explicación útil no es un mapa de calor sobre la imagen: es la fotografía de los granos clasificados, la categoría asignada a cada uno, la tabla de precios aplicada y un procedimiento para solicitar una segunda evaluación humana con plazo y responsable definidos.

El mecanismo de apelación cumple dos funciones. Protege la relación comercial, porque el productor tiene una vía distinta a irse con otro comprador. Y genera datos de auditoría: cada apelación resuelta a favor del productor es un caso etiquetado de error del modelo, la información más valiosa para corregirlo. Una empresa que no recibe apelaciones no tiene un modelo perfecto; tiene un modelo cuyos errores se van por otra puerta.

3.7 Arquitectura de gobernanza: tres líneas y una firma

El modelo de las tres líneas, de uso extendido en auditoría interna (Institute of Internal Auditors, 2020), ofrece una estructura que se adapta bien a la gobernanza de modelos.

Línea	Rol en la gobernanza de modelos	Quién la ejerce en una empresa agroalimentaria mediana
Primera	Desarrolla, opera y monitorea el modelo; responde por su desempeño diario	Dueño del modelo (jefe de calidad, de compras o de crédito, según el uso) con el equipo técnico o el proveedor
Segunda	Valida el modelo antes de su uso, fija umbrales de riesgo y revisa el monitoreo	Comité de modelos con participación de calidad, riesgos y legal; en empresas pequeñas, un validador externo
Tercera	Audita de forma independiente que el sistema de gobernanza funciona	Auditoría interna o auditor externo con competencia en datos

La regla operativa es una sola: **ningún modelo de riesgo alto entra en operación sin la firma de un dueño con nombre y la aprobación de un validador que no lo desarrolló.** Con esa regla, la pregunta de la presidenta de la asociación tiene destinatario.

3.8 El centro de acopio, reescrito

Volvamos a la exportadora con una gobernanza básica en funcionamiento.

El sistema de visión está registrado en el inventario como modelo de riesgo alto. Su dueño es el jefe de calidad. La ficha del modelo indica que fue entrenado

con cacao del Litoral y prohíbe su uso en otras zonas sin validación. Cuando se firma el acuerdo con la asociación amazónica, el comité de modelos ordena un periodo de operación en sombra para esos lotes. Durante seis semanas, el modelo clasifica en paralelo con dos catadores. La auditoría por subgrupos muestra una tasa de error alta en los granos amazónicos, concentrada en la confusión entre "violeta" y "bien fermentado". El equipo técnico reentrena el modelo con fotografías etiquetadas de la nueva zona y lo vuelve a validar.

Mientras tanto, los lotes amazónicos se clasifican con catadores humanos y se pagan según la tabla de precios. El reporte de calidad al banco incluye una nota que explica que la clasificación de esos lotes es manual y por qué. El índice de estabilidad poblacional del color de grano queda configurado como alerta permanente para detectar la llegada de cualquier otro origen no representado.

La asociación sigue vendiendo a la exportadora. Su presidenta recibió, en la primera reunión, una explicación con fotografías y una fecha para la validación del modelo.

Fase 4. El framework de acción: cinco pasos para gobernar los modelos de la empresa

Paso	Acción concreta	Responsable	Evidencia de cumplimiento	Plazo de referencia
1. Inventariar y clasificar	Listar todos los modelos, reglas automatizadas y herramientas de IA que influyen en precios, aceptación de lotes, crédito, proveedores o inocuidad; clasificarlos en riesgo alto, medio o bajo	Gerencia general con calidad, TI y finanzas	Inventario aprobado con dueño designado para cada modelo de riesgo alto	3 semanas

Paso	Acción concreta	Responsable	Evidencia de cumplimiento	Plazo de referencia
2. Documentar los modelos de riesgo alto	Elaborar ficha del modelo y ficha del conjunto de datos; medir el acuerdo entre los evaluadores humanos que generaron las etiquetas	Dueño de cada modelo con el proveedor técnico	Fichas completas, incluido desempeño por subgrupo y condiciones de no uso	4 a 6 semanas
3. Auditar antes de seguir usando	Aplicar las cinco pruebas de auditoría a cada modelo de riesgo alto ya en operación; suspender su uso en los subgrupos donde el desempeño sea inferior al del procedimiento humano	Validador independiente (interno o externo)	Informe de auditoría con criterios de aceptación definidos de antemano y decisiones tomadas	6 a 10 semanas
4. Instalar monitoreo y abstención	Configurar alertas de deriva (por ejemplo, PSI) sobre las variables de entrada y salida; definir el umbral de confianza bajo el cual el caso pasa a revisión humana	Dueño del modelo con soporte técnico	Tablero de monitoreo activo y registro de casos derivados a revisión humana	4 semanas después de la auditoría
5. Abrir la vía de apelación	Publicar a proveedores y clientes afectados un procedimiento de segunda evaluación con plazo y responsable; usar cada apelación resuelta como dato para corregir el modelo	Gerencia comercial con calidad	Procedimiento comunicado y registro de apelaciones con su resolución	Antes de la siguiente campaña

Regla de cierre para el directorio: pregunte en la próxima sesión cuántos modelos toman decisiones con efecto económico sobre terceros en la empresa y quién firma por cada uno. Si nadie puede responder en el momento, el paso 1 es la prioridad de este trimestre.

Nota del autor sobre el escenario de apertura: la exportadora, la asociación, los personajes y el sistema de visión descrito son una construcción narrativa. Los mecanismos de falla de los modelos (deriva de datos, etiquetas ruidosas, variables sustitutas, ciclos de retroalimentación, sesgo de automatización) y los marcos normativos citados son reales. La afirmación sobre la pigmentación del cacao amazónico se usa como recurso narrativo; la variación de color del cotiledón entre materiales genéticos es real, pero su efecto específico sobre un clasificador debe tratarse como hipótesis ilustrativa.

Capítulo 4. Food Fraud Intelligence: el fraude que pasa todos los análisis

El laboratorio encuentra lo que se le pide buscar. El defraudador lo sabe antes que el laboratorio.

Esquema del capítulo

- Por qué el fraude alimentario sobrevive a los sistemas de inocuidad: el análisis dirigido y el punto ciego del certificado.
- El precio como sensor: la diferencia entre el producto auténtico y su sustituto anticipa dónde aparecerá el fraude.
- Inteligencia antifraude: balance de masa productivo, huella analítica no dirigida y muestreo basado en riesgo.

Fase 1. El gancho: dos laboratorios, dos continentes

Dublín, enero de 2013

En enero de 2013, la Autoridad de Seguridad Alimentaria de Irlanda (FSAI) publicó los resultados de un estudio sobre la autenticidad de productos cárnicos vendidos en supermercados irlandeses y británicos. Buscaba ADN de especies no declaradas en hamburguesas y otros productos etiquetados como carne de res. Encontró ADN de caballo en una parte de las muestras; en una de ellas, la carne de caballo representaba una fracción considerable del contenido cárnico (FSAI, 2013).

En las semanas siguientes, el caso se extendió por buena parte de Europa. Hubo retiros de productos en varios países, investigaciones sobre una cadena de proveedores e intermediarios que cruzaba fronteras, y una revisión gubernamental en el Reino Unido que terminó proponiendo un rediseño del sistema de integridad alimentaria (Elliott, 2014).

Lo que convierte a este caso en una lección para este libro es un dato técnico. Los productos involucrados habían pasado por controles. Las plantas tenían

sistemas de inocuidad, auditorías y análisis microbiológicos. La carne de caballo no representaba un peligro de inocuidad evidente, así que ningún plan HACCP la contemplaba. Y nadie analizaba la especie de rutina, porque se daba por hecho que la carne de res era de res. El fraude no burló los controles: pasó por un lugar donde no había ninguno.

Guayaquil, campaña de alto precio

Escenario compuesto. La empresa, los proveedores y los personajes son ficticios; los mecanismos de fraude y los métodos técnicos descritos son reales.

Una exportadora mediana vende cacao fino de aroma de tipo Nacional a chocolateros de origen en Europa. El contrato paga una prima sobre el cacao convencional, y esa prima depende de la autenticidad del material genético: los compradores pagan por el perfil de sabor del Nacional y lo comunican así en sus empaques.

Es un año de precios internacionales altos. Uno de los proveedores de la exportadora, un acopiador con buena reputación, aumenta sus entregas de "Nacional" en una proporción que nadie cuestiona. El grano cumple la humedad, la prueba de corte da buenos resultados y el análisis de cadmio está dentro de especificación. Todo pasa.

Meses después, un comprador europeo devuelve una evaluación sensorial con observaciones: el perfil floral característico aparece atenuado y hay una astringencia que no corresponde al origen declarado. Un análisis genético encargado por el comprador indica una proporción importante de material genético distinto al declarado, compatible con un clon de alta productividad que se paga a precio de cacao convencional.

El acopiador no había alterado ni un solo grano. Había mezclado dos cacaos de calidad comercial aceptable. Ninguno de los análisis que hacía la exportadora estaba diseñado para detectarlo, porque todos medían calidad e inocuidad, y lo que había cambiado era la identidad.

Fase 2. El diagnóstico: por qué el fraude pasa los controles

2.1 Qué es el fraude alimentario y en qué se diferencia de un problema de inocuidad

El fraude alimentario es el engaño deliberado sobre un alimento, sus ingredientes o su empaque con fines económicos. La literatura distingue sus formas: dilución, sustitución, ocultamiento, mejora no autorizada, etiquetado falso, falsificación y comercio no declarado (Spink y Moyer, 2011). La adulteración por motivos económicos es la forma más estudiada: se agrega, se sustituye o se oculta algo para aumentar el valor aparente del producto.

La diferencia con un problema de inocuidad es de intención y de lógica. Un peligro de inocuidad (un patógeno, un residuo de plaguicida, un metal pesado) aparece por falla del proceso o del entorno, y los sistemas como HACCP se diseñan para prevenirlo con controles en puntos definidos. El fraude aparece porque alguien gana dinero con él, y quien lo comete estudia los controles para evitarlos. Un sistema diseñado contra fallas accidentales es débil frente a un adversario que se adapta.

2.2 El análisis dirigido y el caso de la melamina

En 2008, en China, se detectó leche y fórmula infantil adulteradas con melamina, un compuesto industrial rico en nitrógeno. El caso causó enfermedades renales en una gran cantidad de lactantes y varias muertes, y llevó a la Organización Mundial de la Salud a convocar una reunión de expertos sobre los riesgos de la melamina y el ácido cianúrico (WHO, 2009).

El mecanismo técnico del fraude es la mejor ilustración de la debilidad del análisis dirigido. El contenido de proteína de la leche se estimaba con métodos que miden nitrógeno total, como el método Kjeldahl, y convierten ese nitrógeno en proteína con un factor. La melamina aporta mucho nitrógeno sin ser proteína. Al agregarla a una leche diluida, el análisis indicaba un contenido de proteína normal. El método medía exactamente lo que estaba diseñado para medir, y por eso fue burlado.

La lección es general. Un análisis dirigido responde a una pregunta específica: ¿hay cadmio?, ¿cuánta proteína?, ¿cuánta humedad? El defraudador elige un adulterante o un sustituto que ese análisis no puede ver. Si la exportadora de cacao medía humedad, fermentación y cadmio, un sustituto con buena humedad, buena fermentación y bajo cadmio pasaba sin problema.

2.3 Las tres condiciones del fraude

La criminología describe el fraude a partir de la coincidencia de presión o motivación, oportunidad y racionalización (Cressey, 1953). En la cadena agroalimentaria, esas condiciones se traducen en variables observables.

Condición	Expresión en la cadena agroalimentaria	Variables observables
Motivación económica	La diferencia de precio entre el producto auténtico y su sustituto hace rentable el engaño	Brecha de precio, escasez de oferta, costos de producción del auténtico
Oportunidad	El sustituto es difícil de distinguir y la cadena tiene puntos de mezcla sin control	Similitud física, número de intermediarios, mezclas sin registro, ausencia de análisis de identidad
Debilidad de controles y de detección	El riesgo de ser descubierto o sancionado es bajo	Frecuencia de muestreo, tipo de análisis, auditorías anunciadas, historial de sanciones

Esta tabla ya contiene la idea central del capítulo: casi todas estas variables pueden medirse antes de que ocurra el fraude.

2.4 El punto ciego del certificado

Los esquemas de certificación reconocidos por la Iniciativa Global de Seguridad Alimentaria (GFSI) exigen a las empresas certificadas una evaluación de vulnerabilidad al fraude y un plan para mitigarlo (GFSI, 2020). Es un avance importante, pero su aplicación tiene un límite práctico: muchas evaluaciones de vulnerabilidad se hacen una vez al año, con una matriz cualitativa de "alto,

medio, bajo", y no cambian aunque cambien los precios, los proveedores o las campañas.

El fraude, en cambio, responde a variaciones de corto plazo. Una matriz que calificó al cacao Nacional como de "vulnerabilidad media" en una campaña de precios normales sigue diciendo lo mismo cuando la prima se multiplica. La evaluación cumple el requisito del certificado y deja de describir el riesgo real.

2.5 Las formas de fraude con mayor exposición en la cadena ecuatoriana

Sin pretender un inventario completo, tres cadenas de exportación ilustran mecanismos de fraude documentados en el comercio internacional de alimentos.

- Cacao fino de aroma. El riesgo principal es la sustitución o mezcla de material genético de mayor valor con clones de alta productividad, y la declaración falsa de origen geográfico o de certificaciones (orgánico, comercio justo). La dificultad de distinguir los granos a simple vista y la existencia de muchos puntos de acopio y mezcla aumentan la oportunidad.

- Camarón congelado. El riesgo frecuente en productos del mar congelados es el exceso de glaseado (capa de hielo protectora) o la retención de agua mediante agentes como fosfatos, que aumentan el peso vendido. También aparece la declaración incorrecta de talla o de especie.

- Productos con certificación de origen o de proceso. Cualquier producto que se venda con un atributo invisible (orgánico, libre de deforestación, de una zona protegida) tiene un incentivo para declarar ese atributo sin cumplirlo. El Reglamento europeo sobre deforestación, tratado en el capítulo 1, crea un atributo de este tipo, y con él un incentivo nuevo para falsear la geolocalización.

Fase 3. La tesis: el fraude como señal que se puede anticipar

3.1 Cambiar la pregunta

El enfoque tradicional pregunta: ¿este lote está adulterado? Para responderla, necesita saber qué buscar. El enfoque de inteligencia antifraude pregunta otra cosa: ¿dónde, cuándo y en qué proveedor es más probable que aparezca un fraude, y qué evidencia tengo de que este lote es auténtico?

Este cambio tiene consecuencias técnicas. Pasa de detectar adulterantes conocidos a verificar la autenticidad del producto frente a un perfil de referencia. Pasa de muestrear de forma uniforme a concentrar los análisis donde el riesgo es mayor. Y pasa de una evaluación anual a una vigilancia continua de las señales que anticipan el fraude.

3.2 El precio como sensor de fraude

La motivación económica puede medirse. Para un producto auténtico con precio P_a y un sustituto creíble con precio P_s, el incentivo relativo al fraude en el periodo t es:

$$I_t = \frac{P_{a,t} - P_{s,t}}{P_{a,t}}$$

Cuando I_t aumenta, también aumenta la ganancia por cada kilogramo sustituido, y con ella la probabilidad de fraude. Si a eso se suma una escasez del producto auténtico (una mala cosecha, una enfermedad, un evento climático), la presión crece por los dos lados: más ganancia por fraude y más dificultad para cumplir los volúmenes comprometidos con producto auténtico.

En la práctica, el monitoreo puede ser simple. Una exportadora puede seguir semanalmente la prima que paga por el cacao fino de aroma frente al precio del cacao convencional, la prima del orgánico frente al convencional o el precio por talla del camarón, y fijar umbrales que activen un aumento automático del muestreo de autenticidad. Ninguna de estas señales prueba un fraude. Indican cuándo el sistema de control debe estar más alerta.

3.3 El balance de masa productivo: la prueba de lo imposible

La herramienta antifraude más potente de la cadena agroalimentaria no requiere laboratorio. Consiste en comparar lo que un proveedor entrega con lo que podría producir.

Para un proveedor j con superficie registrada A_j y un rendimiento esperado $\hat{Y}_j$ (estimado a partir de su historial, de su zona y de su material genético), el índice de plausibilidad productiva de una campaña es:

$$R_j = \frac{V_j}{A_j \cdot \hat{Y}_j}$$

donde V_j es el volumen entregado como producto de un atributo específico (Nacional, orgánico, libre de deforestación). Un valor de R_j cercano a 1 es coherente. Un valor sostenidamente mayor que 1, más allá de la incertidumbre del rendimiento esperado, indica que el proveedor entrega más de lo que sus parcelas registradas pueden producir. El exceso tiene que venir de otro lado.

Este índice usa exactamente los bio-datos descritos en el capítulo 1: parcelas georreferenciadas, rendimientos históricos por campaña y registros de entregas. En el escenario de Guayaquil, el acopiador aumentó sus entregas de Nacional en un año de precios altos. Con un índice de plausibilidad por proveedor, ese aumento habría aparecido como una alerta antes de que el comprador europeo lo detectara en la taza.

Para intermediarios que acopian de muchos productores, el balance se aplica en cascada: el volumen de Nacional que el acopiador declara debe ser compatible con la suma de lo que sus productores registrados pueden producir. Para cadenas con certificación de origen o de deforestación, el mismo cálculo verifica que el volumen certificado no supere la capacidad productiva de las parcelas certificadas.

3.4 La huella analítica no dirigida: verificar la autenticidad

La lección de la melamina indica que buscar adulterantes uno por uno es insuficiente. La alternativa es caracterizar el producto auténtico de forma global y verificar si un lote se parece a ese perfil. Esto se conoce como análisis no dirigido o huella analítica (*fingerprinting*).

Las técnicas espectroscópicas como el infrarrojo cercano o medio, la espectroscopía de resonancia magnética nuclear o la espectrometría de masas generan un perfil con cientos o miles de variables por muestra. Con una base de referencia de muestras auténticas, se construye un modelo de una sola clase: describe cómo es el producto auténtico y mide cuánto se aleja cada nueva muestra de esa descripción. Un método clásico de este tipo es el modelado independiente de clases (SIMCA), basado en análisis de componentes principales.

Un lote con un perfil alejado del modelo auténtico se marca como sospechoso, aunque no se sepa qué tiene de distinto. Esa es la diferencia con el análisis dirigido: el modelo no necesita conocer el adulterante para detectar que algo cambió. Después, un análisis confirmatorio específico identifica la causa. Para el cacao fino de aroma, ese análisis confirmatorio puede ser genético, mediante marcadores moleculares que distinguen materiales genéticos.

Dos condiciones son indispensables para que este enfoque funcione:

- **Una base de referencia auténtica y representativa.** Las muestras de referencia deben tener procedencia comprobada (parcela, material genético, campaña) y cubrir la variabilidad natural del producto auténtico entre zonas y años. Un modelo entrenado con pocas zonas marcará como sospechoso cualquier origen legítimo no representado, que es el mismo problema de deriva y representatividad analizado en el capítulo 3.

- **Validación con tasas de error conocidas.** El modelo debe validarse con muestras auténticas que no participaron en su construcción y con muestras adulteradas o sustituidas de forma controlada. La empresa debe conocer su tasa de falsos positivos (lotes auténticos marcados como sospechosos) y de falsos negativos (lotes adulterados que pasan), porque ambas tienen costo.

3.5 Muestreo basado en riesgo: poner el laboratorio donde está el fraude

Los análisis de autenticidad cuestan. Ninguna empresa puede analizar genéticamente cada lote. La solución es asignar el presupuesto de análisis según el riesgo estimado de cada proveedor y de cada lote.

Un modelo bayesiano sencillo permite combinar las señales. Para cada proveedor j, la probabilidad de fraude se actualiza con la evidencia disponible:

$$P(\text{fraude}_j \mid \text{señales}) \propto P(\text{señales} \mid \text{fraude}_j)\ P(\text{fraude}_j)$$

La probabilidad previa $P(\text{fraude}_j)$ refleja el historial del proveedor y el riesgo general del producto. Las señales incluyen el incentivo de precio I_t, el índice de plausibilidad R_j, los resultados de la huella analítica, las alertas de inteligencia externa y los hallazgos de auditorías. Cada análisis confirmatorio, positivo o negativo, actualiza el modelo.

Con esta estimación, el plan de muestreo deja de ser uniforme:

Nivel de riesgo estimado	Acción sobre los lotes del proveedor
Bajo	Muestreo de rutina con huella analítica rápida; análisis confirmatorio aleatorio de baja frecuencia
Medio	Huella analítica en todos los lotes; análisis confirmatorio en una fracción mayor; revisión del balance de masa en cada entrega
Alto	Análisis confirmatorio de cada lote antes de aceptar la prima; auditoría no anunciada; retención del pago de la prima hasta el resultado

El efecto disuasivo importa tanto como la detección. Un proveedor que sabe que sus lotes se analizarán con mayor intensidad cuando sus entregas no cuadran con su capacidad productiva tiene menos oportunidad y más riesgo de ser descubierto. El sistema actúa sobre las tres condiciones del fraude al mismo tiempo.

3.6 Inteligencia externa: aprender del fraude de otros

El fraude se repite entre empresas y países. Las bases de datos públicas de incidentes y alertas permiten saber qué productos y qué mecanismos de fraude están activos en el mercado. El sistema de alerta rápida de la Unión Europea para alimentos y piensos (RASFF) publica notificaciones sobre productos

rechazados o retirados, y la investigación académica ha construido bases de datos históricas de casos de adulteración por motivos económicos (Moore et al., 2012).

Una función de inteligencia antifraude revisa estas fuentes con una frecuencia definida, registra los incidentes relacionados con sus productos, sus orígenes y sus mercados, y usa esa información para actualizar las probabilidades previas del modelo de riesgo. Un aumento de notificaciones sobre un producto o un origen es una señal temprana de que el mecanismo de fraude está circulando.

3.7 El escenario de Guayaquil, reescrito

Volvamos a la exportadora con un sistema de inteligencia antifraude básico.

El tablero semanal muestra que la prima del cacao Nacional frente al cacao convencional creció de forma marcada en la campaña de precios altos. El umbral definido se activa y el plan de muestreo de autenticidad pasa automáticamente al nivel medio para todos los proveedores de Nacional. En la tercera semana, el índice de plausibilidad del acopiador supera el rango esperado: sus entregas de Nacional exceden lo que pueden producir las fincas registradas de sus productores, aun con el rendimiento más alto de su historial.

El proveedor sube a riesgo alto. La exportadora retiene la prima de sus lotes hasta el resultado del análisis confirmatorio. La huella espectroscópica de dos lotes cae fuera del modelo de referencia del Nacional, y el análisis genético confirma una proporción relevante de otro material. La exportadora rechaza la prima de esos lotes, los paga como cacao convencional, suspende al proveedor y documenta el caso.

El comprador europeo nunca recibe el cacao sustituido. La exportadora puede mostrarle, en su siguiente auditoría, el sistema que detectó el problema. La autenticidad pasó de ser una promesa del contrato a ser un atributo verificado con datos.

Fase 4. El framework de acción: cinco pasos para instalar inteligencia antifraude

Paso	Acción concreta	Responsable	Evidencia de cumplimiento	Plazo de referencia
1. Identificar los atributos que se pagan y no se ven	Listar cada atributo invisible por el que la empresa cobra o paga prima (material genético, origen, orgánico, libre de deforestación, talla, especie) y su sustituto creíble	Calidad con comercial	Lista de atributos con su sustituto y su brecha de precio actual	2 semanas
2. Instalar el sensor de precio	Monitorear semanalmente la brecha de precio entre cada atributo y su sustituto; definir umbrales que eleven el muestreo de forma automática	Comercial con calidad	Tablero de brechas de precio y regla de escalamiento aprobada	3 semanas

Paso	Acción concreta	Responsable	Evidencia de cumplimiento	Plazo de referencia
3. Calcular el balance de masa productivo por proveedor	Cruzar volúmenes entregados con superficie registrada y rendimiento esperado; investigar a todo proveedor cuyo índice supere el rango esperado	Compras con técnicos de campo	Índice de plausibilidad calculado para el 100 % de los proveedores de productos con prima	1 campaña
4. Construir la referencia de autenticidad	Reunir muestras auténticas con procedencia comprobada y desarrollar, con un laboratorio aliado, un modelo de huella analítica y un análisis confirmatorio para el atributo principal	Calidad con laboratorio externo o universidad	Base de referencia documentada y modelo validado con tasas de falsos positivos y negativos conocidas	1 a 2 campañas

Paso	Acción concreta	Responsable	Evidencia de cumplimiento	Plazo de referencia
5. Asignar el muestreo por riesgo y actualizar la evaluación de vulnerabilidad	Reemplazar el muestreo uniforme por un plan escalonado según el riesgo estimado de cada proveedor; actualizar la evaluación de vulnerabilidad del sistema de inocuidad con estos datos en cada campaña y no una vez al año	Calidad, con aprobación de gerencia	Plan de muestreo por riesgo vigente y evaluación de vulnerabilidad con fecha de la campaña en curso	Siguiente campaña

Regla de cierre para el directorio: pregunte qué porcentaje de los ingresos por primas (calidad, origen, certificación) está respaldado por un análisis de autenticidad y no solo por la declaración del proveedor. Ese porcentaje mide la exposición de la empresa al fraude mejor que cualquier matriz de vulnerabilidad.

Nota del autor: el caso de la carne de caballo en Europa (2013) y el caso de la melamina en China (2008) son hechos documentados. El escenario de la exportadora de Guayaquil es una construcción narrativa; los mecanismos de sustitución de material genético en cacao fino de aroma, los métodos de huella analítica y el balance de masa productivo descritos son reales y aplicables.

Capítulo 5. Compliance Intelligence: la regulación de destino como dato de campo

Un producto puede estar registrado en el país de origen, aplicarse a la dosis correcta y aun así ser rechazado en el puerto de destino.

Esquema del capítulo

- Por qué los envíos se rechazan en frontera aunque el productor haya cumplido: límites de residuos distintos por mercado, cambios regulatorios rápidos e información que no llega a la finca.
- El rechazo en frontera como señal: lo que los registros públicos de rechazos y alertas anticipan.
- Inteligencia regulatoria aplicada: base de requisitos por mercado, programas de aplicación según destino, modelo de disipación de residuos con incertidumbre, muestreo previo al embarque y asignación de lotes a mercados.

Fase 1. El gancho: el insecticida que perdió su lugar y el contenedor que volvió

Unión Europea, 2020

El clorpirifós fue durante décadas uno de los insecticidas organofosforados más usados en el mundo, en cultivos tan distintos como cítricos, banano, hortalizas y cereales. En enero de 2020, la Unión Europea decidió no renovar la aprobación de esta sustancia activa y de su variante metilada, tras una evaluación de la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria que identificó preocupaciones sobre sus efectos en la salud humana (Comisión Europea, 2020a). Ese mismo año, la Unión Europea redujo los límites máximos de residuos de estas sustancias en los alimentos, en la mayoría de los casos al límite de cuantificación analítica (Comisión Europea, 2020b) [fechas de aplicación a confirmar].

Para los exportadores de países donde el producto seguía registrado y en uso, la consecuencia fue directa. Una aplicación que era legal en la finca, hecha a la dosis de la etiqueta y respetando el periodo de carencia autorizado en el país de origen, podía dejar residuos que pasaban a ser un incumplimiento en el puerto europeo. La regla había cambiado en el destino, no en la finca.

Del Guayas a Rotterdam

Escenario compuesto. La exportadora, los productores y los personajes son ficticios; los mecanismos regulatorios, técnicos y comerciales descritos son reales.

Una exportadora de fruta tropical vende a Estados Unidos y, desde hace dos años, también a la Unión Europea. Compra a quince productores del Guayas y de Los Ríos. Su jefa de calidad, Gabriela Andrade, mantiene una lista de productos fitosanitarios "autorizados", elaborada hace años con base en el registro nacional y en los límites del mercado estadounidense.

Uno de los productores tiene un problema de plagas a pocas semanas de la cosecha. Consulta con el vendedor de la casa comercial, que le recomienda un insecticida registrado en Ecuador para ese cultivo, y lo aplica respetando el periodo de carencia de la etiqueta. La fruta se cosecha, pasa la inspección de calidad de la exportadora y se embarca hacia Rotterdam.

En el destino, el análisis oficial encuentra residuos de la sustancia por encima del límite máximo vigente en la Unión Europea para ese producto, un límite mucho más bajo que el que se aplica en Estados Unidos. El lote se rechaza y la notificación se publica en el sistema europeo de alerta rápida para alimentos y piensos (RASFF), visible para autoridades e importadores de toda la Unión. El importador cancela los dos pedidos siguientes mientras evalúa al proveedor. Los controles europeos sobre ese producto y ese origen se intensifican durante los meses siguientes.

Nadie hizo nada ilegal en Ecuador. El productor usó un producto registrado y respetó la etiqueta. La exportadora cumplió su procedimiento. El problema estaba en un dato que nadie conectó: el límite de residuos del mercado de destino de ese lote específico.

Fase 2. El diagnóstico: por qué se cumple en origen y se incumple en destino

2.1 Un mismo producto, varios límites

Los límites máximos de residuos de plaguicidas (LMR) se fijan por combinación de sustancia activa y producto alimentario, y cada mercado fija los suyos. La Comisión del Codex Alimentarius, de la FAO y la OMS, establece límites de referencia internacional (FAO y OMS, s. f.). La Unión Europea tiene su propio marco, regulado por el Reglamento (CE) 396/2005, con límites que en muchos casos son más bajos que los del Codex y que se fijan por defecto en un valor muy bajo cuando no existe un límite específico (Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, 2005). Estados Unidos, China, Japón, Rusia y otros mercados tienen sus propias listas de tolerancias.

El resultado es que una misma aplicación puede dejar un residuo aceptable en un mercado e inaceptable en otro. Una exportadora que vende a varios destinos no tiene un solo estándar que cumplir, sino una matriz de estándares que cambia por mercado, por producto y por sustancia.

2.2 El registro en origen no garantiza el acceso en destino

El registro de un producto fitosanitario en el país de origen evalúa su eficacia, su seguridad para el ambiente y para quien lo aplica, y fija un periodo de carencia que garantiza que los residuos en la cosecha cumplan el límite nacional o la referencia que la autoridad haya adoptado. Ese periodo de carencia no está calculado para el límite de cada mercado de exportación.

Esta distinción es poco conocida en el campo. Para el productor, "registrado y aplicado según la etiqueta" equivale a "cumple". Para el mercado de destino, la única pregunta es si el residuo en el producto que llega está por debajo de su propio límite.

2.3 La velocidad del cambio regulatorio

Los límites máximos de residuos cambian con frecuencia. Una sustancia puede perder su aprobación en un mercado, ver reducido su límite tras una nueva evaluación o recibir un límite nuevo cuando un exportador lo solicita con

estudios de respaldo. Cada cambio tiene una fecha de aplicación y, a veces, periodos de transición para productos ya en circulación.

Para una exportadora mediana, seguir estos cambios en cada mercado y para cada sustancia relevante es una tarea que rara vez tiene un responsable. La información existe y es pública, pero está dispersa en diarios oficiales, bases de datos y notificaciones en varios idiomas. La lista de productos autorizados de la exportadora del escenario se elaboró hace años y nadie la actualizó cuando empezó a exportar a la Unión Europea.

2.4 La distancia entre el escritorio y la finca

Aun cuando el área de calidad de la exportadora conoce los límites de cada mercado, esa información tiene que llegar al productor antes de que decida qué aplicar. En la práctica, las decisiones de control de plagas se toman en la finca, muchas veces con la recomendación de un vendedor de insumos que conoce el registro nacional y no los mercados de destino de esa fruta. Si la exportadora no traduce su conocimiento regulatorio en instrucciones concretas por productor y por lote, la decisión crítica se toma sin esa información.

2.5 El periodo de carencia como promedio

Aun cuando se conoce el límite del mercado de destino, el tiempo necesario para que el residuo baje por debajo de él no es fijo. La disipación de un residuo en un cultivo depende de la sustancia, de la dosis, del clima, de la lluvia, del crecimiento del fruto y de la formulación. Los estudios de residuos supervisados que respaldan un periodo de carencia reflejan condiciones de ensayo, no todas las condiciones posibles en campo. Un periodo de carencia tratado como un umbral exacto ignora esa variabilidad.

2.6 Las señales que nadie mira

Los mercados de destino publican sus rechazos. El sistema europeo RASFF publica notificaciones sobre productos rechazados en frontera o retirados del mercado. La Administración de Alimentos y Medicamentos de Estados Unidos publica informes de rechazos de importación (FDA, s. f.). Estos registros muestran qué productos, de qué orígenes y por qué causas están siendo rechazados, y permiten detectar cuándo aumentan los controles sobre un producto y un país.

Pocas exportadoras medianas usan estas fuentes de forma sistemática. Las consultan después del rechazo, cuando ya forman parte de las estadísticas.

Fase 3. La tesis: el requisito de destino como bio-dato del lote

3.1 Cambiar el punto de control

La tesis de este capítulo es que el cumplimiento de los requisitos de destino no se verifica en la recepción ni en el puerto: se decide en la finca, semanas antes de la cosecha. Para que esa decisión sea correcta, el mercado de destino de cada lote debe conocerse, o al menos estimarse, desde el campo, y los requisitos de ese mercado deben estar disponibles como datos que restringen las decisiones de aplicación.

En los términos de este libro, el mercado de destino y sus requisitos son atributos del lote, igual que su origen o su humedad. Un lote destinado a la Unión Europea tiene restricciones distintas que uno destinado a Estados Unidos, y esas restricciones deben viajar con él desde la planificación de la cosecha.

3.2 Una base de requisitos por mercado

La herramienta de partida es una base de datos estructurada de requisitos, mantenida por un responsable y actualizada con una frecuencia definida. Su unidad mínima es una combinación de cinco campos.

Campo	Contenido	Ejemplo
Producto	Producto agrícola con su código según el mercado	Pitahaya, banano, cacao en grano
Sustancia	Sustancia activa y, cuando corresponde, sus metabolitos incluidos en la definición del residuo	Nombre de la sustancia y definición regulatoria del residuo
Mercado	País o bloque de destino	Unión Europea, Estados Unidos, China

Campo	Contenido	Ejemplo
Límite	Valor del límite máximo y unidad	mg/kg
Vigencia	Fecha de entrada en vigor, periodo de transición y fecha de la última verificación	Fecha de aplicación del reglamento correspondiente

Sobre esta base se construyen dos productos. El primero es un sistema de alertas: cuando cambia un límite que afecta a un producto que la empresa exporta, el responsable recibe una notificación con la sustancia, el mercado y la fecha de aplicación. El segundo es una lista de sustancias permitidas por producto y mercado, que reemplaza la lista única de productos autorizados.

3.3 Programas de aplicación según el destino

La lista de sustancias permitidas solo sirve si llega a la decisión en la finca. Para eso, la exportadora define con cada productor un programa de manejo fitosanitario que considera el destino previsto de la fruta:

- Para lotes con destino a mercados de límites bajos, se usan solo sustancias con límite suficiente en ese mercado, o con un periodo de espera calculado para ese límite.
- Para lotes con destino incierto, se aplica el criterio del mercado más exigente al que podrían destinarse.
- Cada aplicación se registra con sustancia, dosis, fecha y lote, con los formularios del capítulo 6, de modo que la exportadora conoce la historia de aplicaciones de cada lote antes de recibirlo.

La relación con las casas comerciales de insumos también cambia. La exportadora comparte con ellas, o con sus técnicos, la lista de sustancias permitidas por destino, para que sus recomendaciones en campo sean compatibles con el mercado de la fruta.

3.4 El periodo de espera por mercado con incertidumbre

Cuando una sustancia tiene límite en el mercado de destino pero ese límite es más bajo que el considerado en la etiqueta, el productor necesita saber cuántos

días esperar después de la aplicación. El modelo de disipación de primer orden del capítulo 6 permite estimarlo. Si C_0 es el residuo inicial esperado después de la aplicación a la dosis usada y k la constante de disipación, el residuo al tiempo t es $C(t) = C_0 e^{-kt}$, y el tiempo necesario para que baje hasta el límite del mercado m es:

$$t_m = \frac{\ln(C_0/LMR_m)}{k}$$

Como C_0 y k varían entre aplicaciones, la decisión debe tomarse con un margen. Una forma práctica es usar valores conservadores: el residuo inicial alto de su rango esperado y la constante de disipación baja de su rango (disipación lenta), obtenidos de estudios de residuos supervisados, de la literatura o de los propios análisis de la empresa. Con esos valores, el periodo de espera resultante cubre la mayoría de las situaciones. Si se dispone de suficientes datos, se puede estimar directamente la probabilidad de superar el límite en la fecha de cosecha prevista:

$$P(C(t_h) > LMR_m) = P(\ln C_0 - k\, t_h > \ln LMR_m)$$

y fijar la fecha de cosecha para que esa probabilidad quede por debajo de un umbral aceptable para la empresa. Cada análisis de residuos que la exportadora realiza, con su fecha de aplicación y de cosecha, mejora la estimación de los parámetros para sus propias condiciones.

Este cálculo no sustituye a la etiqueta ni a la normativa del país de origen. La etiqueta fija el periodo de carencia mínimo legal. El cálculo por mercado agrega una restricción adicional cuando el mercado de destino es más exigente.

3.5 Muestreo previo al embarque basado en riesgo

El análisis de residuos antes del embarque es la última barrera antes de la frontera. Con presupuesto limitado, el muestreo debe concentrarse donde el riesgo es mayor, con la lógica de los capítulos 4 y 11. El riesgo de un lote para un mercado aumenta cuando:

- su historial de aplicaciones incluye sustancias con límite bajo en ese mercado;
- la fecha de cosecha está cerca del periodo de espera calculado;
- el productor tiene antecedentes de residuos detectados;

- los registros públicos de rechazos muestran un aumento de notificaciones para ese producto y ese origen en el mercado de destino;
- falta parte del registro de aplicaciones del lote.

Los lotes de alto riesgo se analizan antes del embarque. Los de riesgo bajo se analizan con una frecuencia menor, suficiente para verificar que el sistema funciona.

3.6 Asignar cada lote al mercado donde cumple

El capítulo 1 propuso optimizar las mezclas para que cada lote de cacao cumpliera la especificación de cadmio de su comprador. El mismo principio se aplica a los residuos. Cuando una exportadora vende a varios mercados con límites distintos, puede asignar cada lote al mercado donde su riesgo de incumplimiento es aceptable.

Sea $r_{\ell m}$ el riesgo estimado de que el lote ℓ incumpla en el mercado m, $v_{\ell m}$ el valor de venderlo en ese mercado y K_m el costo de un rechazo en ese mercado (incluido el efecto sobre la relación con el importador y sobre los controles futuros). La asignación busca maximizar el valor esperado:

$$\max_{y} \sum_{\ell} \sum_{m} y_{\ell m} \left(v_{\ell m} - r_{\ell m} K_m \right)$$

sujeto a que cada lote se asigne a un solo mercado y a que se respeten los volúmenes comprometidos con cada cliente. Un lote con residuos aceptables para Estados Unidos y con riesgo alto para la Unión Europea se destina al primero, aunque el precio europeo sea mayor. El resultado es menos rechazos, sin necesidad de descartar fruta que cumple en otro mercado.

3.7 Leer los rechazos de otros como alerta temprana

Los registros públicos de rechazos y alertas se convierten en inteligencia cuando se revisan con método. Una función de inteligencia regulatoria revisa periódicamente las notificaciones de los mercados de destino para los productos y orígenes de la empresa, y registra:

- qué sustancias aparecen en rechazos de productos y orígenes similares;
- si aumenta la frecuencia de notificaciones para un producto y un país, lo que suele anticipar controles más intensivos en frontera;

- qué otros peligros (contaminantes, microbiológicos, documentales) se reportan.

Estas señales alimentan la base de requisitos, el cálculo de riesgo de los lotes y el plan de muestreo. Una exportadora que observa un aumento de rechazos de su producto y su origen en un mercado puede ajustar su programa de aplicaciones y su muestreo antes de que el siguiente rechazo sea el suyo.

3.8 La exportadora de fruta, reescrita

Volvamos a la exportadora del Guayas con una función de inteligencia regulatoria en operación.

La base de requisitos tiene los límites de Estados Unidos, la Unión Europea y Canadá para las sustancias usadas por sus quince productores. Andrade recibe alertas cuando cambia un límite relevante y revisa la base cada mes contra las fuentes oficiales. Al inicio de cada temporada, la exportadora entrega a cada productor una lista de sustancias permitidas según el destino previsto de su fruta y comparte esa lista con los técnicos de las casas comerciales que visitan a sus proveedores.

Cuando el productor del escenario enfrenta su problema de plagas, consulta la lista. La sustancia que le recomienda el vendedor tiene un límite muy bajo en la Unión Europea. El sistema calcula, con valores conservadores, que el periodo de espera para ese límite es varias veces el de la etiqueta. El productor tiene dos opciones: usar otra sustancia permitida para el destino europeo o usar la recomendada y destinar ese lote a Estados Unidos, donde el residuo esperado está dentro del límite. Elige la segunda. La aplicación queda registrada con su lote.

Cuando el lote llega a la planta, el sistema de asignación lo destina a Estados Unidos. Como su historial incluye una sustancia sensible, se analiza antes del embarque; el resultado está dentro del límite estadounidense. Los demás lotes del productor, sin esa aplicación, van a Rotterdam. Ningún contenedor regresa.

Fase 4. El framework de acción: cinco pasos para convertir la regulación de destino en dato de campo

Paso	Acción concreta	Responsable	Evidencia de cumplimiento	Plazo de referencia
1. Construir la base de requisitos	Reunir, para cada producto exportado y cada mercado de destino, los límites de residuos de las sustancias que usan los proveedores, con fuente oficial y fecha de vigencia; designar un responsable de mantenerla	Calidad o asuntos regulatorios	Base de requisitos con fuente, vigencia y fecha de última verificación por registro	4 a 6 semanas
2. Emitir listas de sustancias permitidas por destino	Traducir la base en listas por producto y mercado; entregarlas a cada productor y a los técnicos de las casas comerciales antes de cada temporada	Calidad con compras y asistencia técnica	Listas entregadas con acuse de recibo de cada productor	Antes de la siguiente temporada
3. Registrar las aplicaciones por lote	Implementar el registro de sustancia, dosis, fecha y lote de cada aplicación, con el destino previsto de la fruta	Asistencia técnica con los productores	Proporción de lotes con registro completo de aplicaciones	1 temporada

Paso	Acción concreta	Responsable	Evidencia de cumplimiento	Plazo de referencia
4. Calcular periodos de espera por mercado y asignar lotes	Estimar con valores conservadores el periodo de espera por mercado para las sustancias sensibles; asignar cada lote al mercado donde su riesgo es aceptable	Calidad con analista de datos	Tabla de periodos de espera por sustancia y mercado; registro de asignación de lotes con su riesgo estimado	1 temporada
5. Vigilar los rechazos y ajustar el muestreo	Revisar cada mes los registros públicos de rechazos de los mercados de destino; ajustar el plan de muestreo previo al embarque según el riesgo de cada lote	Calidad o asuntos regulatorios	Informe mensual de inteligencia regulatoria y plan de muestreo vigente	Desde el primer mes

Regla de cierre para el directorio: pregunte quién en la empresa sabe, hoy, qué límites de residuos cambiaron en los últimos doce meses en cada mercado al que se exporta, y cómo llegó esa información a los productores. Si la respuesta es "nadie" o "no llegó", el próximo rechazo ya está en el campo.

Nota del autor: la no renovación de la aprobación del clorpirifós en la Unión Europea y la posterior reducción de sus límites máximos de residuos son hechos regulatorios documentados; las fechas y datos de publicación deben confirmarse antes de la publicación. El escenario de la exportadora de fruta es una construcción narrativa; los mecanismos regulatorios, los modelos de disipación y los métodos de asignación descritos son reales y aplicables.

Capítulo 6. Forensic Agriculture: reconstruir la causa cuando la evidencia se degrada

En el campo, la evidencia tiene vida media. Cada día que pasa sin muestrear, la verdad pierde concentración.

Esquema del capítulo

- Por qué las disputas agrícolas se resuelven mal: síntomas que convergen, evidencia que se degrada y peritajes sin método.
- La reconstrucción técnica de la causa: patrón espacial, cronología satelital, química retrospectiva y evaluación de hipótesis competitivas.
- La estimación de la pérdida: el contrafactual que separa el daño atribuible del ruido biológico y climático.

Fase 1. El gancho: el huerto de duraznos y la hoja quemada

Misuri, temporadas 2015 a 2020

En el sureste de Misuri, Estados Unidos, un productor de duraznos empezó a observar hojas deformadas y árboles debilitados en su huerto a partir de 2015. En esos años se había introducido en la región el cultivo de soya y algodón tolerantes al herbicida dicamba, un compuesto volátil que puede desplazarse fuera del campo donde se aplica y dañar cultivos sensibles. El productor atribuyó la pérdida de miles de árboles a la deriva del herbicida aplicado en campos vecinos y demandó a los fabricantes. En 2020, un jurado federal falló a su favor y concedió una indemnización elevada, que luego fue modificada en instancias posteriores [detalles del fallo y montos a confirmar con fuente judicial].

Más allá del resultado, el caso muestra la dificultad central de la agricultura forense. Los árboles mostraban síntomas, pero los síntomas por sí solos no identifican la causa. El herbicida se aplicó en otros predios, en otras fechas y bajo condiciones meteorológicas que nadie registró en el huerto. Entre la

aplicación y el juicio pasaron años. La disputa se decidió con evidencia reconstruida: patrones de daño, registros de aplicación, condiciones climáticas, testimonios técnicos y la plausibilidad de las explicaciones alternativas.

Santo Domingo de los Tsáchilas, una semana después

Escenario compuesto. La finca, la empresa y los personajes son ficticios; los mecanismos técnicos y los métodos descritos son reales.

Un productor de cacao aplica un fertilizante foliar nuevo en un lote de cuatro hectáreas, siguiendo la recomendación del vendedor de la casa comercial. Seis días después, una parte de las hojas jóvenes presenta bordes necróticos, manchas cloróticas y caída de flores. El productor llama al técnico de la empresa. El técnico visita la finca, observa los síntomas y dice que el producto no causa ese daño: probablemente fue una mezcla incorrecta en el tanque, una dosis excesiva o un problema de clima.

El productor guarda la factura y la etiqueta del envase. No tomó fotografías antes de la aplicación ni guardó la mezcla. No registró la dosis exacta ni la hora de aplicación. No anotó si llovió o hizo sol esa tarde. Dos semanas después, cuando decide reclamar por escrito, buena parte de las hojas dañadas ya cayó, la floración se perdió y la parcela tuvo dos lluvias fuertes.

El reclamo termina en una conversación sin salida. El productor tiene un daño evidente y la convicción de que el producto lo causó. La empresa tiene un registro sanitario vigente, ensayos de eficacia aprobados y la convicción de que su producto es seguro a la dosis recomendada. Ninguna de las dos partes tiene la evidencia necesaria para demostrar su posición. Si el caso llega a un juzgado, el perito designado visitará una finca donde la evidencia ya se degradó.

Fase 2. El diagnóstico: por qué las disputas agrícolas se resuelven mal

2.1 La convergencia de síntomas

Las plantas responden al estrés con un repertorio limitado de síntomas visibles: clorosis, necrosis, deformación foliar, caída de flores y frutos, enanismo. Esos mismos síntomas pueden ser causados por fitotoxicidad de un producto aplicado, deriva de un herbicida vecino, deficiencias o toxicidades nutricionales,

estrés hídrico, temperaturas extremas, enfermedades fúngicas o bacterianas, plagas, salinidad o compactación del suelo.

En términos de diagnóstico, esto significa que la probabilidad de observar el síntoma dado cada causa no es suficiente para identificar la causa. Necrosis en bordes de hoja joven es compatible con fitotoxicidad, pero también con una deficiencia de calcio o con una quemadura por sol tras una aplicación con alta temperatura. Una conclusión basada solo en el síntoma, en cualquier dirección, es especulación técnica.

2.2 La evidencia tiene vida media

La evidencia en campo se degrada. Los residuos de un producto aplicado se disipan por degradación química, fotólisis, lavado por lluvia y metabolismo de la planta. Una aproximación habitual es la cinética de primer orden:

$$C(t) = C_0\, e^{-kt}, \qquad t_{1/2} = \frac{\ln 2}{k}$$

donde C_0 es la concentración inicial, $C(t)$ la concentración al tiempo t y $t_{1/2}$ la vida media de disipación. Si una sustancia tiene una vida media de pocos días en follaje, un muestreo hecho dos semanas después puede encontrar una concentración muy baja o no detectable, aunque la exposición inicial haya sido alta. La ausencia de residuo en una muestra tardía no prueba la ausencia de exposición.

Los síntomas también evolucionan. Las hojas dañadas caen, las plantas emiten brotes nuevos, los patógenos oportunistas colonizan tejido muerto y ocultan la causa primaria. Cada día sin registro reduce la capacidad de distinguir entre causas.

2.3 La ausencia de línea base

Para demostrar un daño hay que mostrar la diferencia entre el estado observado y el estado que habría existido sin el evento. En la mayoría de las fincas no existe un registro del estado previo: ni fotografías fechadas, ni conteos de floración, ni historial de rendimiento por lote, ni análisis de suelo recientes. Sin línea base, la magnitud del daño queda sujeta a la memoria y al interés de cada parte.

Este es otro caso del problema que atraviesa todo el libro. Los bio-datos del capítulo 1 (registros de manejo, rendimientos por parcela, análisis de suelo)

cumplen funciones comerciales y financieras, y además son la línea base que permite demostrar o descartar un daño.

2.4 El peritaje sin método

Cuando una disputa agrícola llega a un proceso judicial o a un reclamo de seguro, la evaluación técnica suele quedar a cargo de un perito que visita el lugar, observa, entrevista a las partes y emite una opinión. El problema no es la competencia del perito, sino la estructura de su trabajo. Tres fallas metodológicas son frecuentes:

- Diagnóstico por confirmación. El perito evalúa si los hechos son compatibles con la hipótesis de quien lo contrató, sin evaluar con el mismo rigor las hipótesis alternativas.

- Conclusiones categóricas sin incertidumbre. El informe afirma que el producto "causó" o "no causó" el daño, sin expresar cuán fuerte es la evidencia ni qué otras explicaciones quedan abiertas.

- Evidencia sin cadena de custodia. Las muestras se toman sin protocolo, sin registro de quién las tomó, cómo se conservaron y cuándo llegaron al laboratorio, lo que permite a la contraparte cuestionar su validez.

La ciencia forense, en otras áreas, ha desarrollado estándares para evitar estas fallas. En Estados Unidos, el caso *Daubert v. Merrell Dow Pharmaceuticals* (1993) estableció criterios para que un juez evalúe la admisibilidad del testimonio científico, entre ellos que el método haya sido probado, tenga una tasa de error conocida y sea aceptado en la comunidad científica. En Europa, la Red Europea de Institutos de Ciencias Forenses publicó una guía para expresar las conclusiones periciales como fuerza de la evidencia a favor de una hipótesis frente a otra (ENFSI, 2015). La agricultura forense aún no ha adoptado estas prácticas de forma sistemática.

En Ecuador, la prueba pericial en los procesos civiles se rige por el Código Orgánico General de Procesos, y los peritos que actúan en procesos judiciales deben estar acreditados ante el Consejo de la Judicatura [normativa de acreditación vigente a confirmar].

2.5 El costo económico de la incertidumbre

Una disputa agrícola sin evidencia sólida tiene costos para todas las partes. El productor pierde el daño y el costo del reclamo. La empresa de insumos pierde reputación aunque su producto no haya causado el daño, o paga compensaciones para evitar un conflicto que no puede ganar ni perder con claridad. La aseguradora paga siniestros que no puede verificar o rechaza siniestros legítimos. El sistema judicial resuelve con pruebas débiles. La incertidumbre se distribuye entre todos como un costo que nadie registra en su contabilidad.

Fase 3. La tesis: la causa como inferencia con incertidumbre cuantificada

3.1 Cambiar la pregunta pericial

La pregunta "¿el producto causó el daño?" no admite una respuesta científica honesta en la mayoría de los casos agrícolas. La pregunta que sí la admite es: **¿cuánto más probable es la evidencia observada si el producto causó el daño que si lo causó otra cosa?**

Este cambio, que proviene de la ciencia forense moderna, transforma el trabajo del perito. Su tarea deja de ser elegir una causa y pasa a ser evaluar la evidencia bajo hipótesis competitivas explícitas. La herramienta central es la razón de verosimilitud:

$$LR = \frac{P(E \mid H_1)}{P(E \mid H_2)}$$

donde E es el conjunto de evidencias observadas, H_1 la hipótesis de una parte (el producto aplicado causó el daño) y H_2 la hipótesis alternativa (el daño se debe a otra causa, que debe especificarse: deficiencia nutricional, condiciones climáticas, mezcla incorrecta). Un LR mucho mayor que 1 indica que la evidencia apoya H_1; mucho menor que 1, que apoya H_2; cercano a 1, que la evidencia no permite distinguir.

El perito informa la fuerza de la evidencia. La decisión sobre la causa, que también depende de otras consideraciones, corresponde al juez, al árbitro o a

las partes. Esta separación protege la credibilidad técnica del informe y evita que el perito asuma un rol que no le corresponde.

3.2 Las primeras 72 horas: protocolo de preservación

La calidad de cualquier conclusión forense depende de lo que se haga en los primeros días. Un protocolo de preservación debe estar escrito y disponible antes de que ocurra el incidente, para que el productor, la empresa o la aseguradora puedan aplicarlo sin esperar a un perito.

Elemento	Acción	Propósito
Registro fotográfico georreferenciado	Fotografías con coordenadas y fecha de plantas afectadas y no afectadas, de detalle y panorámicas, con referencia de escala	Documentar síntomas antes de que evolucionen y permitir el análisis del patrón espacial
Delimitación del área afectada	Recorrer el borde del daño y registrar su perímetro con GPS	Calcular superficie y analizar la forma del patrón
Muestras con cadena de custodia	Muestras de tejido afectado, tejido sano de la misma parcela, suelo y, si existe, remanente del producto o de la mezcla; cada una con etiqueta, responsable, fecha, hora y condiciones de conservación	Permitir análisis de residuos, nutrientes y patógenos con validez probatoria
Plantas testigo	Identificar y marcar plantas comparables no afectadas	Establecer el contrafactual inmediato
Registro de la aplicación	Producto, lote, dosis, volumen de agua, mezcla, equipo, operador, fecha y hora	Reconstruir la exposición

Elemento	Acción	Propósito
Condiciones meteorológicas	Temperatura, humedad, viento y lluvia del día de la aplicación y de los días siguientes, de una estación cercana o de fuentes públicas	Evaluar hipótesis climáticas y de deriva

El costo de este protocolo es bajo: un teléfono con GPS, bolsas y etiquetas para muestras, una nevera portátil y un formulario. Su valor se determina después, cuando la disputa existe y la evidencia ya no puede recuperarse.

3.3 El patrón espacial: la forma del daño revela su origen

Diferentes causas producen patrones espaciales distintos. Esta es la herramienta de diagnóstico diferencial más potente de la agricultura forense, porque el patrón persiste más que los residuos y puede reconstruirse con fotografías y con imágenes satelitales.

Causa probable	Patrón espacial característico
Fitotoxicidad por aplicación propia	Sigue el recorrido del equipo de aplicación: franjas, mayor daño en traslapes y cabeceras, límites que coinciden con el área tratada
Deriva desde un predio vecino	Gradiente de daño que disminuye con la distancia a la fuente, orientado según la dirección del viento durante la aplicación
Enfermedad	Focos que se expanden desde puntos iniciales, distribución agregada, avance progresivo en el tiempo
Deficiencia o toxicidad nutricional	Coincide con zonas de suelo, pendiente, drenaje o historial de manejo; límites difusos que no siguen el recorrido de aplicación
Estrés climático	Afecta de forma relativamente uniforme a plantas de igual edad y exposición; mayor en bordes expuestos, partes altas o zonas sin sombra

Para la deriva, el gradiente puede modelarse. Una aproximación simple supone que la intensidad del daño D decrece de forma exponencial con la distancia x a la fuente:

$$D(x) = D_0\, e^{-\lambda x}$$

Si los datos de campo muestran un gradiente coherente con esta forma, orientado en la dirección del viento registrado, la hipótesis de deriva gana fuerza. Si el daño es uniforme o sigue el recorrido del equipo propio, pierde fuerza.

La agregación espacial del daño se puede cuantificar con estadísticos de autocorrelación como el índice de Moran (Moran, 1950), que indica si las plantas dañadas tienden a estar juntas (patrón de foco, propio de enfermedades) o distribuidas de forma regular o aleatoria.

3.4 La cronología satelital: fechar el inicio del daño

Muchas disputas dependen de una pregunta temporal: ¿el daño empezó antes o después de la aplicación? Las imágenes satelitales de libre acceso permiten responderla en muchos casos. La misión Sentinel-2 de la Agencia Espacial Europea ofrece imágenes multiespectrales con resolución de hasta 10 metros y revisitas frecuentes (Drusch et al., 2012), con un archivo histórico que permite reconstruir la evolución de una parcela antes del incidente.

Con índices de vegetación como el NDVI, calculado a partir de las bandas roja e infrarroja cercana,

$$NDVI = \frac{NIR - Rojo}{NIR + Rojo}$$

se construye una serie temporal de la parcela afectada y de parcelas testigo cercanas. Si la caída del índice en la parcela afectada empieza después de la fecha de aplicación y no se observa en las testigo, la cronología apoya la hipótesis de un evento local asociado a la aplicación. Si la caída empezó antes, o se observa también en parcelas sin aplicación, la hipótesis pierde fuerza.

La nubosidad de la región costera y amazónica limita la disponibilidad de imágenes útiles, y la resolución de 10 metros no permite ver plantas individuales en parcelas pequeñas. Estas limitaciones deben declararse en el informe. El análisis satelital complementa la evidencia de campo; no la reemplaza.

3.5 La química retrospectiva: estimar la exposición inicial

Cuando se dispone de una muestra tomada días después de la aplicación y se conoce, aunque sea de forma aproximada, la vida media de disipación del compuesto en la matriz muestreada, se puede estimar la concentración inicial invirtiendo la cinética de primer orden:

$$\hat{C}_0 = C(t)\, e^{kt}$$

La incertidumbre de esta estimación es grande, porque la vida media varía con la temperatura, la radiación, la lluvia y la especie vegetal. Por eso el cálculo debe hacerse con un rango de valores de k tomados de la literatura o de estudios de disipación, y el resultado debe presentarse como un intervalo. Si incluso el extremo inferior del intervalo supera la concentración esperada a la dosis recomendada, la evidencia apoya una sobredosis o una mezcla incorrecta. Si el intervalo es compatible con la dosis recomendada, la hipótesis de sobredosis pierde fuerza.

Los análisis de nutrientes en tejido afectado y sano, y los análisis de suelo, permiten evaluar en paralelo las hipótesis nutricionales. Los análisis fitopatológicos permiten evaluar las hipótesis de enfermedad.

3.6 La estimación de la pérdida: el contrafactual

Determinar la causa es la mitad del trabajo. La otra mitad es estimar cuánto se perdió. Aquí el error más común es comparar el rendimiento después del incidente con el rendimiento de años anteriores, como si toda la diferencia se debiera al incidente. El rendimiento varía cada año por clima, alternancia productiva y manejo.

El método más defendible es la comparación de diferencias en diferencias, ampliamente usada en econometría para estimar efectos causales con datos observacionales (Angrist y Pischke, 2009). Se compara el cambio en la parcela afectada con el cambio en parcelas testigo comparables durante el mismo periodo:

$$\widehat{\Delta Y} = \left(\bar{Y}_{post}^{\,afectada} - \bar{Y}_{pre}^{\,afectada}\right) - \left(\bar{Y}_{post}^{\,testigo} - \bar{Y}_{pre}^{\,testigo}\right)$$

La primera diferencia mide cuánto cambió la parcela afectada. La segunda mide cuánto cambiaron las parcelas que no sufrieron el evento, lo que captura el efecto del clima y de otros factores comunes. La pérdida atribuible es la

diferencia entre ambas. Este cálculo requiere datos de rendimiento por parcela antes y después del evento, en la parcela afectada y en las testigo, que son exactamente los bio-datos que una finca con buena gestión ya registra. Cuando no existen datos de rendimiento previos, las series satelitales pueden aportar una aproximación, con la incertidumbre declarada.

3.7 La estructura del informe forense agrícola

Un informe pericial construido con este método tiene una estructura distinta a la de una opinión técnica tradicional:

1. **Pregunta pericial** formulada de forma precisa.
2. **Hipótesis competitivas** explícitas, incluidas las de ambas partes y las alternativas razonables.
3. **Evidencia disponible**, con su procedencia, su cadena de custodia y sus limitaciones.
4. **Métodos de análisis** aplicados, con referencias y supuestos.
5. **Evaluación de la evidencia** bajo cada hipótesis, expresada como razón de verosimilitud o, al menos, como una escala verbal de fuerza de la evidencia con criterios definidos.
6. **Estimación de la pérdida** con su método y su intervalo de incertidumbre.
7. **Limitaciones** del análisis y evidencia que habría cambiado la conclusión.

Un informe con esta estructura puede ser cuestionado en sus supuestos, pero no en su método. Eso lo vuelve más útil para resolver la disputa, sea en un tribunal, en un arbitraje o en una negociación.

3.8 La finca de Santo Domingo, reescrita

Volvamos a la finca de cacao con un protocolo forense disponible desde antes del incidente.

La casa comercial entrega, junto con su fertilizante foliar, una ficha de aplicación con un código QR que abre un formulario sencillo: producto, lote, dosis, volumen de agua, mezcla, hora y condiciones del día. El productor la llena al aplicar. Seis días después, al ver los síntomas, abre el protocolo de las primeras

72 horas. Toma fotografías georreferenciadas de plantas afectadas y de plantas sanas en el mismo lote, recorre el borde del daño con el GPS del teléfono, toma muestras de hojas afectadas y sanas, y guarda en la nevera el remanente del producto que quedó en el envase.

El análisis posterior muestra un patrón claro: el daño sigue las hileras tratadas y es más intenso en las cabeceras, donde el operador giró y volvió a pasar. El registro de aplicación indica que la mezcla se preparó con el doble del volumen de producto recomendado por error de lectura de la etiqueta, y que la aplicación se hizo al mediodía con temperatura alta. La serie satelital no muestra caída de vigor antes de la aplicación ni en parcelas vecinas. Los análisis nutricionales no muestran deficiencias relevantes.

La evidencia apoya con fuerza la hipótesis de fitotoxicidad por dosis excesiva y aplicación en condiciones desfavorables, frente a la hipótesis de un defecto del producto a la dosis recomendada. El caso no termina en un juicio. La empresa revisa la redacción de su etiqueta, que se prestaba a confusión, y acuerda con el productor apoyo técnico para la rehabilitación del lote. Las dos partes tienen la misma evidencia y llegan a la misma conclusión.

Fase 4. El framework de acción: cinco pasos para estar preparado ante una disputa técnica

Paso	Acción concreta	Responsable	Evidencia de cumplimiento	Plazo de referencia
1. Escribir el protocolo de las primeras 72 horas	Elaborar un protocolo de preservación de evidencia (fotografías georreferenciadas, delimitación, muestras con cadena de custodia, testigos, registro de aplicación y clima) y preparar el kit físico	Calidad o asistencia técnica, con asesoría de un laboratorio	Protocolo aprobado y kit disponible en cada finca, centro de acopio o equipo técnico de campo	3 semanas

Paso	Acción concreta	Responsable	Evidencia de cumplimiento	Plazo de referencia
2. Registrar la línea base antes de necesitarla	Mantener registros de manejo, aplicaciones, rendimientos por parcela y análisis de suelo; definir parcelas testigo permanentes en fincas propias o de proveedores clave	Producción o asistencia técnica	Base de datos con línea base por parcela actualizada en cada campaña	1 campaña
3. Incorporar el registro en el punto de aplicación	Para empresas de insumos: entregar con cada producto un formulario o código QR que capture dosis, mezcla, hora y condiciones; para fincas: registrar cada aplicación con esos datos	Empresas de insumos y administradores de finca	Porcentaje de aplicaciones registradas con datos completos	1 a 2 meses

Paso	Acción concreta	Responsable	Evidencia de cumplimiento	Plazo de referencia
4. Evaluar hipótesis competitivas antes de responder	Ante cualquier reclamo, formular por escrito las hipótesis de ambas partes y las alternativas, y analizar la evidencia bajo cada una (patrón espacial, cronología satelital, química, nutrientes, patógenos) antes de emitir una posición	Responsable técnico con apoyo de un perito o consultor independiente	Informe técnico con hipótesis explícitas y fuerza de la evidencia para cada una	Dentro de las 2 semanas siguientes al reclamo
5. Estimar la pérdida con contrafactual	Calcular la pérdida atribuible con parcelas testigo y comparación de diferencias en diferencias, con intervalo de incertidumbre; usar el resultado como base de negociación, reclamo de seguro o informe pericial	Gerencia con perito o consultor independiente	Estimación documentada con método, datos y supuestos	Al cierre de la cosecha afectada

Regla de cierre para el directorio: revise los reclamos técnicos de los últimos tres años (de clientes, proveedores, aseguradoras o vecinos) y pregunte en cuántos la empresa tuvo evidencia suficiente para sostener su posición. Si la respuesta es "en pocos", el paso 1 cuesta menos que el próximo reclamo.

Nota del autor: el caso del huerto de duraznos en Misuri y la controversia sobre la deriva de dicamba en Estados Unidos son hechos documentados; los detalles

del proceso judicial y los montos deben confirmarse con la fuente judicial antes de la publicación. El escenario de la finca de cacao en Santo Domingo de los Tsáchilas es una construcción narrativa; los métodos forenses descritos son reales y aplicables.

Capítulo 7. Soberanía y seguridad del bio-dato: de quién es el dato agrícola y cómo se defiende

Cada sensor que instala una planta para medir mejor es también una puerta que alguien puede intentar abrir.

Esquema del capítulo

- El costo oculto de digitalizar la cadena: más datos, más superficie de ataque, y ataques que ya paralizaron a la industria alimentaria.
- La pregunta que nadie firmó: quién es dueño de los datos que genera una finca, una máquina o una plataforma, y quién captura su valor.
- Arquitectura de soberanía y seguridad: integridad del dato desde el sensor, continuidad operativa, contratos de datos con productores y modelos que aprenden sin centralizar la información.

Fase 1. El gancho: el frigorífico sin pantallas y la piscina sin registro

Estados Unidos, Australia y Canadá, mayo y junio de 2021

A finales de mayo de 2021, JBS, una de las mayores empresas procesadoras de carne del mundo, sufrió un ataque de *ransomware*, un tipo de programa malicioso que cifra los sistemas informáticos de la víctima y exige un pago para devolver el acceso. El ataque obligó a detener operaciones en plantas de Estados Unidos, Australia y Canadá. La empresa informó después que había pagado el equivalente a 11 millones de dólares a los atacantes para proteger sus operaciones y evitar la filtración de datos [fuente primaria a confirmar].

El caso mostró a la industria alimentaria algo que el sector financiero conocía desde hacía años: una planta moderna depende de sus sistemas digitales tanto como de sus máquinas. La faena, el despiece, el empaque, la cadena de frío, la planificación de despachos, la facturación y la trazabilidad se coordinan con software. Cuando ese software se detiene, la planta se detiene, aunque todas

sus máquinas funcionen. Y en la industria de alimentos perecederos, el tiempo de detención se mide en producto perdido.

En los meses siguientes, la Oficina Federal de Investigaciones de Estados Unidos advirtió que los grupos de *ransomware* estaban atacando al sector de alimentos y agricultura, y que tendían a hacerlo en momentos críticos de la temporada, cuando la presión para pagar era mayor [nota de la FBI de 2021 a confirmar].

Golfo de Guayaquil, semana de mayor cosecha

Escenario compuesto. La empresa, el comprador y los personajes son ficticios; los mecanismos de ataque, los riesgos sobre la integridad de los datos y las medidas de protección descritas son reales.

Una empacadora de camarón mediana instaló en los últimos tres años todo lo que este libro recomienda. Sensores de temperatura en túneles de congelación y cámaras de frío, registro digital de cada lote desde la recepción, trazabilidad hasta la piscina de origen, un tablero de calidad en la nube y un sistema que envía al comprador europeo, en tiempo real, el historial de temperatura de cada contenedor.

Un lunes de la semana de mayor cosecha, las pantallas de la planta muestran un mensaje en inglés: los archivos están cifrados y hay un plazo de setenta y dos horas para pagar. El sistema de gestión de la planta no responde. El servidor que controla las alarmas de las cámaras de frío está cifrado. El registro de lotes tampoco está disponible. La planta tiene cientos de toneladas de camarón en proceso y en cámaras, y camiones que siguen llegando de las camaroneras.

El equipo vuelve al papel. Los operadores leen las temperaturas en los displays locales de los equipos y las anotan a mano. La recepción registra los lotes en cuadernos. Los despachos se retrasan. La empresa no tiene una copia de respaldo separada de la red: la que tenía estaba en un disco conectado al mismo servidor, y también fue cifrada.

El problema más grave aparece cuatro días después, cuando la planta logra recuperar parte de sus sistemas. El comprador europeo pregunta si los registros de temperatura de los contenedores despachados durante el ataque son confiables, y si los registros anteriores pudieron haber sido alterados por los atacantes antes de cifrarlos. La empresa no puede responder. Sus datos no tenían ninguna protección que permitiera demostrar que no fueron modificados.

Esa misma semana, una de las asociaciones de camaroneros que abastece a la empresa descubre otro problema. La aplicación de monitoreo de piscinas que sus socios usan desde hace dos años, ofrecida gratis por un proveedor de tecnología, tenía en sus condiciones de uso una cláusula que permitía al proveedor usar y comercializar los datos agregados de producción. La asociación se entera porque un comprador internacional le cita, en una negociación de precio, datos de rendimiento de su propia zona que solo podían provenir de esa aplicación.

Fase 2. El diagnóstico: los dos flancos del bio-dato

2.1 La paradoja de la digitalización

Los capítulos anteriores defendieron una tesis: el bio-dato es un activo que reduce riesgos, abre financiamiento y protege la calidad. Este capítulo agrega la condición que lo hace posible. Un activo digital tiene dos flancos que deben defenderse.

El primero es la **seguridad**: la capacidad de mantener los datos y los sistemas disponibles, íntegros y confidenciales frente a ataques y fallas. El segundo es la **soberanía**: la capacidad de quien genera el dato de decidir quién lo usa, para qué y con qué retribución.

La digitalización aumenta el valor de los datos y, al mismo tiempo, su exposición. Cada sensor, cada aplicación móvil, cada conexión con la nube y cada integración con un comprador o un banco agrega una vía posible de ataque y una cláusula contractual que alguien debe leer.

2.2 La convergencia de tecnologías de información y de operación

Las plantas agroindustriales tienen dos mundos digitales que antes estaban separados. Las tecnologías de información (TI) gestionan datos: facturación, inventarios, correo, tableros de calidad. Las tecnologías de operación (TO) controlan procesos físicos: controladores de túneles de congelación, sistemas de alarma de cámaras de frío, dosificadores, básculas, calderas.

La integración de ambos mundos, necesaria para la trazabilidad y el monitoreo en tiempo real, crea un camino para que un ataque que entra por un correo de phishing llegue hasta un controlador de temperatura. Muchos equipos de operación fueron diseñados para redes aisladas, con contraseñas de fábrica y

sin actualizaciones de seguridad. La serie de normas IEC 62443 establece requisitos de ciberseguridad para sistemas de automatización y control industrial (IEC, s. f.), pero su aplicación en plantas medianas de América Latina es aún limitada.

2.3 Disponibilidad, integridad y confidencialidad

La seguridad de la información se organiza tradicionalmente en tres propiedades. En la cadena agroalimentaria, cada una tiene consecuencias específicas.

Propiedad	Qué significa	Ejemplo de falla en la cadena agroalimentaria	Consecuencia
Disponibilidad	Los sistemas y datos funcionan cuando se necesitan	*Ransomware* que cifra el sistema de gestión de planta en plena cosecha	Detención de la operación, pérdida de producto perecedero, incumplimiento de despachos
Integridad	Los datos no fueron alterados sin autorización	Registros de temperatura modificados para ocultar una ruptura de la cadena de frío, o alterados por un atacante	Pérdida de validez de toda la trazabilidad; riesgo de inocuidad no detectado; reclamos sin defensa
Confidencialidad	Solo acceden a los datos quienes están autorizados	Filtración de listas de proveedores, precios o datos de rendimiento por zona	Pérdida de poder de negociación; exposición de datos personales de productores

La integridad es la propiedad más importante para el argumento de este libro y la menos atendida. El capítulo 1 advirtió que un registro resistente a la alteración no garantiza que el dato sea verdadero. Este capítulo agrega lo inverso: un dato verdadero en el momento de la captura pierde su valor como evidencia si no se puede demostrar que nadie lo modificó después.

2.4 Cuantificar el riesgo cibernético

El riesgo cibernético suele tratarse como un tema técnico del área de sistemas. Para el directorio, debe expresarse en dinero. Una formulación clásica de la gestión de riesgos de seguridad estima la pérdida anual esperada de un escenario de amenaza como:

$$PAE = TAO \times PUE$$

donde TAO es la tasa anual de ocurrencia estimada del escenario y PUE la pérdida por evento. En una empacadora de camarón, la pérdida por un evento de *ransomware* en temporada alta incluye el producto que se deteriora o se reclasifica, las multas por incumplimiento de contratos, el costo de recuperación, el tiempo de operación perdido, el posible pago a los atacantes y la pérdida de confianza de los compradores. Esta última es la más difícil de estimar y suele ser la mayor.

La pérdida por evento depende, sobre todo, de dos parámetros que la empresa sí controla: el tiempo que tarda en recuperar la operación (tiempo objetivo de recuperación) y la cantidad de datos que pierde (punto objetivo de recuperación, es decir, cuánto tiempo hacia atrás puede perder información). Una empresa con copias de respaldo aisladas y un plan probado reduce ambos de días a horas.

2.5 La pregunta sin firma: ¿de quién es el dato?

El segundo flanco es menos visible y más extendido. Cuando un productor usa una aplicación de monitoreo, cuando una cosechadora o una estación meteorológica registra datos de una finca, cuando una plataforma de comercialización registra precios y volúmenes, ¿de quién son esos datos?

En la mayoría de los casos, la respuesta está en condiciones de uso que nadie leyó. Las organizaciones de productores de varios países reaccionaron a este problema con principios voluntarios. En Estados Unidos, un grupo de organizaciones agrícolas y empresas tecnológicas publicó en 2014 principios de privacidad y seguridad para datos agrícolas, que establecen que el productor es dueño de la información generada en su operación y debe consentir su uso (American Farm Bureau Federation et al., 2014). En Europa, las organizaciones de la cadena agroalimentaria publicaron en 2018 un código de conducta sobre el intercambio de datos agrícolas mediante acuerdos contractuales (Copa-Cogeca et al., 2018).

La regulación también avanzó. El Reglamento (UE) 2023/2854, conocido como Ley de Datos de la Unión Europea, establece derechos para los usuarios de productos conectados, entre ellos maquinaria agrícola, para acceder a los datos que generan esos productos y compartirlos con terceros (Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, 2023) [fechas de aplicación a confirmar]. En Ecuador, la Ley Orgánica de Protección de Datos Personales protege los datos de personas naturales, lo que incluye a productores individuales identificables, pero no resuelve la titularidad de los datos productivos agregados ni de los datos de empresas.

2.6 La asimetría del valor del dato

El caso de la asociación de camaroneros ilustra la consecuencia económica de no resolver la soberanía. Los datos agregados de rendimiento, costos y precios de una zona tienen valor comercial: permiten a un comprador estimar la oferta futura, a un proveedor de insumos ajustar sus precios, a un fondo de inversión elegir dónde invertir. Si esos datos los captura un intermediario tecnológico sin retribución, el productor paga dos veces: entrega su información gratis y luego negocia en desventaja con quienes la usan.

Esta asimetría es el mismo problema de información de Akerlof que atraviesa el libro, en sentido inverso. Los capítulos anteriores mostraron cómo el productor que tiene datos reduce la asimetría frente al comprador. Este muestra cómo el productor que cede sus datos sin control la aumenta.

Fase 3. La tesis: el bio-dato soberano y verificable

3.1 Seguridad y soberanía como condiciones del valor

La tesis de este capítulo es que el valor financiero del bio-dato, definido en el capítulo 1, depende de dos condiciones que hasta ahora se dieron por supuestas: que el dato pueda demostrar su integridad desde el momento de su captura, y que quien lo genera controle su uso. Un bio-dato que puede haber sido alterado no sirve como evidencia ante un comprador, un banco o un tribunal. Un bio-dato que el productor no controla genera valor para otros.

3.2 Integridad desde el sensor

La protección de la integridad debe empezar donde nace el dato y no en la base de datos. La arquitectura mínima tiene tres capas.

a) Identidad del dispositivo y firma del dato. Cada sensor o equipo de captura tiene una identidad digital única. Cada lectura se firma con una clave criptográfica asociada a esa identidad en el momento de la captura. Si alguien modifica la lectura después, la firma deja de coincidir y la alteración queda en evidencia. Esto responde de forma directa a la pregunta del comprador europeo: la empresa puede demostrar que el registro de temperatura que entrega es el mismo que generó el sensor.

b) Encadenamiento y anclaje de los registros. Los registros firmados se encadenan con funciones hash, de modo que cada registro incluye una huella del anterior, y la huella del conjunto se ancla periódicamente en un registro externo e independiente. Es el mecanismo de resistencia a la alteración descrito en el capítulo 1, aplicado desde el origen.

c) Detección de anomalías en los datos. Un atacante, o un operador que quiere ocultar un problema, puede intentar alimentar el sistema con datos falsos desde el origen. Los modelos de detección de anomalías, que comparan cada serie con su comportamiento esperado y con sensores vecinos, identifican patrones imposibles: una cámara de frío que mantiene una temperatura perfectamente constante durante días, o un túnel cuyo registro no cambia cuando todos los demás cambian.

3.3 Continuidad operativa: diseñar para el día del ataque

La pregunta no es si una empresa sufrirá un incidente cibernético, sino cuánto tardará en recuperarse cuando ocurra. El Marco de Ciberseguridad del NIST, en su versión 2.0 publicada en 2024, organiza la gestión del riesgo en seis funciones: gobernar, identificar, proteger, detectar, responder y recuperar (NIST, 2024). Para una empresa agroindustrial mediana, las medidas con mayor efecto en la pérdida por evento son pocas y concretas.

Medida	Implementación	Efecto
Copias de respaldo aisladas	Varias copias, en distintos medios, con al menos una fuera de línea o inmutable y fuera de la red principal; restauración probada periódicamente	Reduce el punto de recuperación y elimina la necesidad de pagar por recuperar datos

Medida	Implementación	Efecto
Segmentación entre TI y TO	Separar la red de control de planta de la red administrativa; acceso controlado entre ambas	Evita que un ataque en la red administrativa alcance los controladores de frío y proceso
Modo manual documentado	Procedimientos y formularios para operar, registrar y despachar sin sistemas digitales, practicados en simulacros	Mantiene la operación y la trazabilidad durante el incidente
Control de accesos	Autenticación de múltiples factores para accesos remotos y cuentas con privilegios; eliminación de contraseñas de fábrica	Cierra las vías de entrada más frecuentes
Plan de respuesta	Roles definidos, contactos de soporte externo, comunicación con clientes y autoridades, criterio para decisiones de pago	Reduce el tiempo de recuperación y los errores bajo presión

El modo manual merece una mención especial. En la empacadora del escenario, volver al papel salvó parte de la operación. Pero se improvisó. Una empresa que tiene formularios en papel preparados, que sabe qué temperaturas leer en los displays locales y que ha practicado el procedimiento puede mantener la trazabilidad durante el incidente y entregar al comprador un registro manual firmado, en lugar de un vacío.

3.4 Contratos de datos con productores

La soberanía del dato se resuelve con contratos claros, no con declaraciones. Un contrato de datos entre un productor o una asociación y cualquier empresa que capture sus datos (una plataforma tecnológica, un comprador, un proveedor de insumos) debe responder al menos siete preguntas.

Pregunta	Contenido mínimo del contrato
¿Qué datos se capturan?	Lista de variables, frecuencia y forma de captura
¿Para qué se usan?	Usos permitidos de forma explícita; todo uso no listado requiere nuevo consentimiento
¿Quién más accede?	Terceros con acceso, en qué forma (individual o agregada) y con qué fin
¿Se pueden vender o comercializar?	Prohibición o condiciones explícitas, con retribución definida si se permite
¿Cómo se protegen?	Medidas de seguridad, notificación de incidentes y responsabilidades
¿Puede el productor llevarse sus datos?	Derecho a descargar sus datos en un formato estándar en cualquier momento
¿Qué pasa al terminar la relación?	Eliminación o devolución de los datos, y destino de los datos agregados ya generados

Para productores pequeños, negociar estas condiciones de forma individual es difícil. La negociación colectiva a través de una asociación, una cooperativa o un gremio cambia la relación de fuerzas. Una cooperativa de datos, en la que los productores aportan sus datos a una entidad que ellos gobiernan y que negocia su uso con terceros, es una figura en desarrollo en distintos países y encaja con el consorcio de datos territoriales que se propone en el capítulo 10.

3.5 Aprender sin centralizar: modelos federados y privacidad diferencial

Muchos de los modelos descritos en este libro mejoran con más datos: el modelo jerárquico de cadmio, los modelos de calidad, la calibración de índices de seguro, la detección de fraude. La forma tradicional de obtener más datos es centralizarlos, lo que crea exactamente el problema de soberanía que este capítulo describe.

Dos técnicas permiten construir modelos con datos de muchas organizaciones sin que estas los entreguen.

Aprendizaje federado. El modelo se entrena por partes en los sistemas de cada participante, con sus propios datos, y solo se comparten los parámetros del modelo, no los datos (McMahan et al., 2017). Un conjunto de exportadoras podría entrenar un modelo común de detección de anomalías en fermentación sin que ninguna revele a las demás sus proveedores ni sus registros.

Privacidad diferencial. Cuando se publican estadísticas agregadas, se agrega un ruido aleatorio calibrado que impide deducir la información de un participante individual, con una garantía matemática sobre el máximo de información que puede filtrarse (Dwork, 2006). Formalmente, un mecanismo $\mathcal{M}$ cumple privacidad diferencial con parámetro ε si, para dos conjuntos de datos D y D' que difieren en un solo participante, y para cualquier resultado S:

$$P[\mathcal{M}(D) \in S] \leq e^{\varepsilon} P[\mathcal{M}(D') \in S]$$

Un valor pequeño de ε implica que la presencia o ausencia de un productor en los datos casi no cambia lo que se publica. Una asociación podría publicar rendimientos promedio por zona para negociar con compradores sin exponer los datos de ninguna finca.

Ambas técnicas tienen costos: complejidad técnica y, en el caso de la privacidad diferencial, menor precisión de las estadísticas. No son necesarias para todos los casos, pero hacen posible la colaboración entre competidores y la protección de productores en los casos donde la centralización no es aceptable.

3.6 La gobernanza del dato como un solo sistema

Seguridad y soberanía no son un proyecto separado de los demás capítulos. Se integran en la misma arquitectura de gobierno.

Elemento del libro	Requisito de seguridad y soberanía
Bio-datos de calidad y trazabilidad (capítulo 1)	Firma en el origen, encadenamiento, respaldo aislado
Expediente de riesgo para bancos y aseguradoras (capítulo 2)	Control de qué datos se comparten, con quién y para qué
Modelos de decisión (capítulo 3)	Protección contra manipulación de datos de entrada y de entrenamiento
Datos de autenticidad y fraude (capítulo 4)	Confidencialidad de las bases de referencia y de los índices de proveedores
Evidencia forense (capítulo 6)	Cadena de custodia digital equivalente a la física
Datos ESG (capítulo 8)	Integridad verificable para el aseguramiento externo
Datos territoriales (capítulo 10)	Acuerdos de intercambio, agregación, privacidad de productores
Datos de compras (capítulo 13)	Confidencialidad de precios y proveedores
Sala de datos para inversionistas (capítulo 21)	Acceso controlado, registro de consultas, acuerdos de confidencialidad
Base de conocimiento (capítulo 25)	Control de acceso y respaldo del conocimiento crítico

3.7 La empacadora y la asociación, reescritas

Volvamos al Golfo de Guayaquil con una arquitectura de seguridad y soberanía en funcionamiento.

La red de control de la planta está separada de la red administrativa. Los sensores de temperatura firman cada lectura y los registros se encadenan y anclan cada hora en un servicio externo. Hay tres copias de respaldo, una de ellas fuera de línea, y la restauración se prueba cada trimestre. El modo manual tiene formularios impresos y fue practicado en un simulacro dos meses antes.

El ataque llega igual, por un correo malicioso que abrió un empleado del área administrativa. Cifra los equipos administrativos y el sistema de gestión de planta. No alcanza los controladores de frío, que siguen operando en su red separada. La planta pasa al modo manual en una hora. En dos días, la empresa restaura sus sistemas desde la copia fuera de línea, con una pérdida de datos de pocas horas, cubierta por los registros manuales. No paga a los atacantes.

Cuando el comprador europeo pregunta por la integridad de los registros de temperatura, la empresa le entrega los registros firmados por los sensores y la verificación de su encadenamiento contra el anclaje externo. Los registros del periodo del ataque son los manuales, firmados por los operadores y respaldados por las lecturas de los controladores, que nunca dejaron de funcionar. El comprador acepta la evidencia.

La asociación de camaroneros, por su parte, renegoció colectivamente con el proveedor de la aplicación. El nuevo contrato prohíbe la comercialización de sus datos sin su autorización, garantiza el derecho a descargarlos y establece que cualquier estadística de zona se publique con protección de privacidad y con acceso prioritario para la asociación. Los datos de rendimiento de la zona ahora los usa la asociación para negociar.

Fase 4. El framework de acción: cinco pasos para proteger y controlar los bio-datos

Paso	Acción concreta	Responsable	Evidencia de cumplimiento	Plazo de referencia
1. Inventariar datos, sistemas y contratos	Listar los sistemas de TI y TO, los dispositivos conectados, los datos que generan y todos los contratos o condiciones de uso con terceros que capturan o reciben datos de la empresa o de sus productores	Gerencia con TI, operaciones y legal	Inventario de sistemas, dispositivos, flujos de datos y contratos de datos	3 a 4 semanas
2. Estimar la pérdida por evento y fijar objetivos de recuperación	Calcular la pérdida esperada de un incidente que detenga la planta en temporada alta; definir el tiempo y el punto objetivo de recuperación aceptables	Gerencia general y finanzas con TI	Estimación de pérdida por evento y objetivos de recuperación aprobados por el directorio	2 semanas
3. Instalar las cinco medidas básicas de continuidad	Copias de respaldo aisladas con restauración probada, segmentación entre TI y TO, modo manual documentado y practicado, autenticación de múltiples factores, plan de respuesta	TI con operaciones	Prueba de restauración exitosa, diagrama de red segmentada, simulacro realizado	2 a 4 meses

Paso	Acción concreta	Responsable	Evidencia de cumplimiento	Plazo de referencia
4. Proteger la integridad de los bio-datos críticos	Implementar firma de las lecturas en el origen, encadenamiento y anclaje externo para los datos que se entregan como evidencia (cadena de frío, trazabilidad, calidad, ESG); agregar detección de anomalías	Calidad con TI o proveedor externo	Registros verificables para los datos críticos y procedimiento de verificación documentado	3 a 6 meses
5. Renegociar los contratos de datos	Revisar las condiciones de uso de las plataformas que capturan datos de la empresa o de sus productores; negociar, de forma colectiva cuando sea posible, usos permitidos, prohibición de comercialización no autorizada, portabilidad y retribución	Gerencia con legal, gremio o asociación	Contratos de datos revisados con las siete cláusulas mínimas	Siguiente renovación de cada contrato

Regla de cierre para el directorio: pregunte cuántas horas tardaría la empresa en volver a operar si mañana todos sus sistemas amanecen cifrados, y cuándo fue la última vez que se probó una restauración completa. Si nadie conoce la primera respuesta o la segunda es "nunca", el paso 3 es la inversión más rentable de este año.

Nota del autor: el ataque de ransomware a JBS en 2021 es un hecho documentado públicamente; los detalles y el monto informado deben confirmarse con fuentes primarias antes de la publicación. El escenario de la empacadora de camarón y de la asociación de camaroneros es una construcción narrativa; los mecanismos de ataque, los marcos normativos y las medidas técnicas descritas son reales y aplicables.

Parte III

Sostenibilidad y territorio

Capítulo 8. ESG Data: del informe de sostenibilidad al dato auditable

Un informe de sostenibilidad puede redactarse en una semana. El dato que lo respalda tarda una campaña en existir.

Esquema del capítulo

- La brecha entre el informe ESG y el dato ESG: factores por defecto, proveedores indirectos y afirmaciones sin respaldo.
- Por qué el agro es el eslabón más difícil de medir: emisiones biológicas, cambio de uso del suelo y cadenas de suministro difusas.
- Arquitectura de datos ESG auditables: jerarquía de calidad del dato, propagación de la incertidumbre, verificación satelital y mapeo de la red de proveedores.

Fase 1. El gancho: el ganado que cambiaba de finca

Amazonía brasileña, década de 2010

Durante años, los grandes frigoríficos brasileños desarrollaron sistemas para no comprar ganado criado en tierras deforestadas ilegalmente en la Amazonía. Los sistemas cruzaban la ubicación de sus proveedores directos con mapas de deforestación y con listas de áreas embargadas. Sobre el papel, la cadena estaba limpia.

Investigaciones de organizaciones no gubernamentales documentaron una falla estructural en esos sistemas: el control alcanzaba al último proveedor, la finca que vendía el animal al frigorífico, pero no a las fincas donde el animal había nacido y se había criado. Un animal podía pasar sus primeros años en una finca con deforestación reciente y luego trasladarse a una finca sin problemas antes de la venta. Esta práctica se conoce como "lavado de ganado" (Global Witness, 2020). Los informes de sostenibilidad de las empresas mostraban altos porcentajes de cumplimiento en proveedores directos, y esos porcentajes eran ciertos. Lo que no mostraban era que el riesgo estaba concentrado en los

proveedores indirectos, a los que nadie medía. El caso tuvo consecuencias comerciales y financieras: compradores internacionales revisaron sus contratos, inversionistas cuestionaron públicamente a las empresas y los frigoríficos anunciaron compromisos para monitorear también a sus proveedores indirectos. El problema no era la falta de un informe ESG. Era que el informe medía lo fácil de medir y presentaba ese resultado como si describiera toda la cadena.

Golfo de Guayaquil, auditoría de un comprador

Escenario compuesto. La empresa, el comprador y los personajes son ficticios; los marcos de medición, los mecanismos de falla y las herramientas descritas son reales.

Una exportadora de camarón mediana recibe un cuestionario de su principal cliente, una cadena de supermercados europea. El cliente necesita datos de emisiones de su cadena de suministro para su propio reporte de sostenibilidad y quiere evidencia de que el camarón no proviene de piscinas construidas sobre áreas de manglar reciente.

La exportadora tiene un informe de sostenibilidad bien diseñado. Declara una huella de carbono por kilogramo de camarón, un compromiso de "cero conversión de manglar" y un porcentaje alto de proveedores evaluados. Cuando el equipo del cliente pide los datos de respaldo, aparecen los problemas.

La huella de carbono se calculó con factores de emisión por defecto tomados de una base de datos internacional, no con el consumo real de energía, balanceado y combustible de las camaroneras proveedoras. El compromiso de manglar se apoya en declaraciones juradas firmadas por los productores. La "evaluación de proveedores" consistió en un cuestionario que respondieron los proveedores directos; las camaroneras que venden a esos proveedores, a través de intermediarios, no aparecen en ninguna base de datos de la exportadora.

Semanas después, una organización ambiental publica un análisis de imágenes satelitales que identifica piscinas construidas en los últimos años sobre zonas que antes eran manglar, dentro del área de abastecimiento de varios exportadores. La exportadora no puede saber si alguna de esas piscinas está en su cadena, porque no sabe dónde están todas sus piscinas.

El informe de sostenibilidad no mentía. Simplemente no podía demostrar nada.

Fase 2. El diagnóstico: por qué el dato ESG del agro es tan frágil

2.1 Informe ESG frente a dato ESG

Un informe ESG es un documento que comunica el desempeño ambiental, social y de gobernanza de una organización. Un dato ESG es una medición específica, con método, procedencia e incertidumbre, que sostiene una afirmación del informe. La mayoría de las organizaciones agroalimentarias de tamaño mediano invierten en el informe y descuidan el dato.

Esa brecha se volvió costosa porque el informe dejó de ser un documento de comunicación y pasó a ser un insumo de terceros. El comprador usa los datos del proveedor para su propio reporte regulatorio. El banco los usa para calcular las emisiones financiadas de su cartera y para fijar la tasa de un crédito vinculado a sostenibilidad. El inversionista los usa para evaluar riesgos climáticos y de transición. Cuando un tercero usa el dato para cumplir una obligación propia, ya no le basta con la afirmación: necesita el respaldo.

2.2 El marco regulatorio que traslada la exigencia hacia el origen

Varias normas y estándares internacionales empujan esa exigencia hacia los proveedores de países productores, aunque no se apliquen directamente a ellos.

- Contabilidad de gases de efecto invernadero. El Protocolo de Gases de Efecto Invernadero distingue entre emisiones directas (alcance 1), emisiones por energía comprada (alcance 2) y emisiones indirectas de la cadena de valor (alcance 3) (WRI y WBCSD, 2004, 2011). Para un supermercado o una marca de alimentos, la mayor parte de su huella está en el alcance 3, es decir, en sus proveedores agrícolas.
- Reporte de sostenibilidad corporativo en la Unión Europea. La Directiva (UE) 2022/2464 amplió la obligación de reportar información de sostenibilidad con estándares comunes y con verificación externa. Su calendario y su alcance fueron modificados en 2025 [alcance y fechas vigentes a confirmar], pero las grandes empresas europeas que siguen obligadas necesitan datos de su cadena de suministro.

- **Estándares internacionales de divulgación.** Las normas IFRS S1 y S2, publicadas en 2023, establecen requisitos de divulgación de riesgos relacionados con la sostenibilidad y el clima, y están siendo adoptadas por distintas jurisdicciones (IFRS Foundation, 2023).

- **Afirmaciones ambientales ante el consumidor.** La Directiva (UE) 2024/825 restringe las afirmaciones ambientales genéricas y las basadas en compensaciones de emisiones cuando no están debidamente sustentadas [fechas de aplicación a confirmar].

- **Metas climáticas en el sector agrícola.** La iniciativa Science Based Targets publicó en 2022 una guía específica para el sector de bosques, tierra y agricultura (SBTi, 2022), que exige a las empresas con emisiones agrícolas relevantes fijar metas separadas para esas emisiones y comprometerse con cero deforestación.

- **Deforestación.** El Reglamento (UE) 2023/1115, tratado en el capítulo 1, exige geolocalización y debida diligencia para el cacao, el café, la palma, la soya, el ganado, la madera y el caucho.

El efecto acumulado es claro: el exportador ecuatoriano no está obligado por la mayoría de estas normas, pero sus clientes sí, y le trasladan la exigencia por contrato.

2.3 Por qué el agro es el eslabón más difícil de medir

Las emisiones y los impactos de una planta industrial se concentran en pocos puntos medibles: calderas, motores, consumo eléctrico. Los del agro son biológicos, difusos y variables.

- **Emisiones biológicas.** El óxido nitroso de los suelos fertilizados, el metano de la fermentación entérica del ganado o de suelos inundados y el carbono de la materia orgánica del suelo dependen del clima, del tipo de suelo, del manejo y del momento. Su medición directa es costosa y se estima con modelos.

- **Cambio de uso del suelo.** La conversión de bosque o manglar en cultivo o piscina libera carbono almacenado durante décadas. En muchos productos agrícolas tropicales, esta fuente puede pesar más que todas las demás juntas. Su cálculo depende de saber qué había en cada parcela antes y cuándo cambió.

- **Cadenas difusas.** Un exportador puede comprar a cientos de productores a través de intermediarios que cambian cada campaña. Medir cada uno es difícil; ignorarlos deja fuera la parte más riesgosa de la cadena.

2.4 El atajo del factor por defecto

Ante la dificultad de medir, la práctica habitual es estimar. Las emisiones se calculan multiplicando un dato de actividad A (kilogramos de fertilizante, litros de combustible, hectáreas) por un factor de emisión EF:

$$E = \sum_i A_i \cdot EF_i$$

Las directrices del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) organizan los métodos en niveles: el nivel 1 usa factores por defecto globales o regionales; el nivel 2, factores específicos del país; el nivel 3, modelos o mediciones específicas del sitio (IPCC, 2006, 2019). Los factores por defecto permiten reportar algo cuando no hay datos, pero describen un promedio que puede estar lejos de la realidad de una finca concreta.

El problema surge cuando la empresa usa factores por defecto y presenta el resultado como si fuera una medición. Peor aún: con factores por defecto, la huella de la empresa no cambia aunque cambie su manejo. Si una camaronera reduce su consumo de diésel con aireadores eléctricos más eficientes, el cálculo basado en promedios no lo refleja. La empresa no puede demostrar su mejora ni ganar con ella.

2.5 La incertidumbre que nadie reporta

Cada término de la ecuación de emisiones tiene incertidumbre. Los datos de actividad pueden venir de facturas (baja incertidumbre) o de estimaciones del productor (alta). Los factores de emisión de nivel 1 para emisiones biológicas pueden tener rangos de incertidumbre amplios. Sin embargo, la mayoría de los informes reportan una cifra única, con varios decimales, como si fuera exacta.

Una cifra de huella de carbono sin intervalo de incertidumbre es una afirmación que no se puede evaluar. Si un año la cifra baja un 5 % y la incertidumbre es de ±40 %, la empresa no sabe si mejoró o no. Si un comprador compara dos proveedores con huellas que difieren en un 10 %, y ambas tienen incertidumbres de ±40 %, la comparación no tiene sentido.

2.6 Las cuatro fallas del dato ESG agroalimentario

Falla	Descripción	Riesgo asociado
Cobertura parcial	Se mide al proveedor directo y se omite al indirecto	El riesgo real queda fuera del informe; exposición a denuncias y pérdida de clientes
Estimación presentada como medición	Factores por defecto sin declarar su origen ni su incertidumbre	Afirmaciones que no resisten una verificación externa; riesgo de *greenwashing*
Declaración sin verificación	Compromisos sostenidos por declaraciones juradas o cuestionarios	El dato depende de la buena fe del proveedor; no sirve como evidencia
Dato sin vínculo financiero	El indicador ESG no está conectado a decisiones de crédito, precio o contratos	La empresa asume el costo de medir sin capturar el beneficio

Fase 3. La tesis: el dato ESG como bio-dato con trazabilidad completa

3.1 Aplicar al ESG la misma disciplina que a la calidad

El capítulo 1 definió el bio-dato con cinco componentes: identidad, contexto, valor con incertidumbre, método y procedencia. La tesis de este capítulo es que un dato ESG auditable cumple exactamente las mismas condiciones. La emisión de una camaronera en una campaña, la condición de "libre de conversión de manglar" de una piscina o el número de trabajadores con contrato formal en una finca son bio-datos de otra dimensión, y se gestionan con la misma arquitectura.

Esta tesis tiene una consecuencia práctica importante: la empresa no necesita un sistema ESG separado de su sistema de trazabilidad y calidad. Necesita que

su sistema de bio-datos incluya las variables ESG relevantes, con la misma identidad de parcela, de lote y de proveedor.

3.2 La jerarquía de calidad del dato

No todos los datos ESG pueden medirse directamente desde el primer año. La solución es declarar, para cada indicador, de qué tipo de dato proviene y trabajar para subir de nivel con el tiempo. La Asociación para la Contabilidad del Carbono Financiero (PCAF) usa una escala de calidad del dato de 1 a 5 para las emisiones financiadas de bancos e inversionistas, donde 1 corresponde a datos verificados del emisor y 5 a estimaciones basadas en promedios del sector (PCAF, 2022). Una escala similar puede aplicarse a los datos de la cadena agroalimentaria.

Nivel	Tipo de dato	Ejemplo en una camaronera	Uso recomendado
1	Medición primaria verificada por un tercero	Consumo eléctrico y de diésel según facturas y medidores, verificado en auditoría	Reporte a clientes, financiamiento vinculado a sostenibilidad
2	Medición primaria no verificada	Consumo reportado por el productor con respaldo de facturas	Reporte con advertencia; base para mejora
3	Dato de actividad primario con factor específico del país o del sistema	Litros de diésel registrados por el productor con factor nacional de emisión	Reporte de alcance 3 con incertidumbre declarada
4	Dato de actividad estimado con factor por defecto	Producción por hectárea con factor promedio de la industria	Primer inventario; identificación de prioridades

Nivel	Tipo de dato	Ejemplo en una camaronera	Uso recomendado
5	Promedio sectorial sin dato de la empresa	Huella promedio del camarón de cultivo según una base de datos internacional	Solo como referencia inicial; nunca como afirmación de desempeño

La empresa reporta, junto con cada indicador, la proporción del volumen cubierta por cada nivel. Un comprador o un banco puede así evaluar cuánto confiar en la cifra. Y la empresa tiene un plan de mejora concreto: mover volumen del nivel 5 al nivel 1, empezando por los proveedores de mayor peso.

3.3 Propagar la incertidumbre

Cada indicador ESG debe reportarse con su intervalo. Para la ecuación de emisiones, si los términos son independientes, una aproximación de primer orden para la incertidumbre relativa de cada componente i es:

$$u_{rel}(E_i) = \sqrt{u_{rel}(A_i)^2 + u_{rel}(EF_i)^2}$$

y la incertidumbre absoluta del total combina las de cada componente:

$$u(E) = \sqrt{\sum_i \left(E_i \cdot u_{rel}(E_i)\right)^2}$$

Cuando las incertidumbres son grandes o las distribuciones son asimétricas, como ocurre con las emisiones de óxido nitroso de suelos, la simulación de Monte Carlo ofrece un resultado más confiable: se generan miles de combinaciones posibles de los datos de actividad y de los factores según sus distribuciones, y se obtiene la distribución del total.

El análisis de incertidumbre tiene un uso estratégico que pocas empresas aprovechan. Al descomponer la incertidumbre total, la empresa identifica qué componente aporta más a ella. Ahí es donde conviene invertir en medición primaria. En muchas cadenas agrícolas, el componente de mayor incertidumbre es el cambio de uso del suelo, lo que lleva directamente a la siguiente herramienta.

3.4 Verificación satelital del uso del suelo

El cambio de uso del suelo es el dato ESG que más puede verificarse con fuentes independientes de bajo costo. Existen productos satelitales globales de libre acceso que permiten reconstruir la historia de una parcela.

- Pérdida de cobertura forestal. El conjunto de datos de cambio forestal global, construido a partir de imágenes Landsat, ofrece mapas anuales de pérdida de cobertura arbórea a escala global desde el año 2000 (Hansen et al., 2013).

- Manglar. La iniciativa Global Mangrove Watch publica mapas de extensión de manglar a escala global para distintos años, que permiten identificar áreas convertidas (Bunting et al., 2018).

- Imágenes de alta frecuencia. Las misiones Sentinel, descritas en el capítulo 6, permiten revisar parcelas específicas con resolución de 10 metros.

El procedimiento consiste en cruzar el polígono de cada parcela o piscina proveedora con estos mapas para verificar si hubo conversión después de una fecha de corte. El resultado es un dato de nivel alto, independiente de la declaración del productor. Las limitaciones deben declararse: la resolución de los mapas globales puede no detectar cambios pequeños, la nubosidad reduce las imágenes disponibles y la clasificación automática tiene errores. Los casos dudosos se revisan con imágenes de mayor resolución o con verificación en campo.

La condición previa es la misma que en los capítulos anteriores: hay que tener el polígono de cada unidad productiva. Sin georreferenciación, no hay verificación posible.

3.5 Mapear la red de proveedores, no solo la lista

El caso del ganado brasileño muestra que el riesgo ESG se concentra donde la empresa no mira. La herramienta para corregirlo es representar la cadena de suministro como una red y no como una lista de proveedores directos.

En términos formales, la cadena es un grafo dirigido $G = (V, E)$, donde los nodos V son unidades productivas, acopiadores, plantas y exportadores, y las aristas E

representan flujos de producto con su volumen. El indicador de cobertura de trazabilidad hasta el origen es:

$$\text{Cobertura} = \frac{\text{volumen vinculado a unidades productivas con polígono verificado}}{\text{volumen total comprado}}$$

Este indicador es más honesto que el porcentaje de proveedores directos evaluados, porque mide qué parte del producto la empresa puede efectivamente rastrear hasta la parcela. Una empresa con 95 % de proveedores directos evaluados puede tener una cobertura hasta el origen del 40 % si la mayor parte de su volumen llega a través de intermediarios.

La representación en red permite además propagar el riesgo. Si una unidad productiva tiene una alerta de conversión de manglar, el sistema identifica todos los lotes, acopiadores y embarques que recibieron producto de esa unidad, gracias a la matriz de composición descrita en el capítulo 1.

3.6 Preparar el dato para la verificación externa

Los datos ESG que se usan en reportes regulatorios o en financiamiento vinculado a sostenibilidad requieren verificación externa. El Consejo de Normas Internacionales de Auditoría y Aseguramiento (IAASB) publicó en 2024 la norma ISSA 5000 para encargos de aseguramiento de información de sostenibilidad [estado de adopción a confirmar]. Los verificadores distinguen entre aseguramiento limitado, que confirma que no hay evidencia de errores materiales, y aseguramiento razonable, que exige evidencia suficiente para afirmar que la información es correcta.

Un dato preparado para la verificación cumple cuatro condiciones: tiene una política documentada que define cómo se calcula; tiene un rastro desde la cifra reportada hasta los registros de origen (facturas, mediciones, polígonos); tiene controles que detectan errores (rangos válidos, conciliaciones); y tiene un responsable que firma. Son las mismas condiciones que el capítulo 3 exigió a los modelos de riesgo alto.

3.7 Conectar el dato ESG con el dinero

Medir tiene costo. Para que el sistema sea sostenible, el dato ESG debe cambiar alguna decisión financiera, como se planteó en el capítulo 2. Tres conexiones son las más directas:

- **Crédito vinculado a sostenibilidad.** En este tipo de financiamiento, la tasa de interés se ajusta según el cumplimiento de metas de desempeño predefinidas en indicadores clave (Loan Market Association et al., 2023). Un exportador con un indicador de cobertura de trazabilidad o de emisiones por kilogramo verificado puede negociar una reducción de tasa al cumplir sus metas.

- **Acceso y permanencia con compradores.** Para los compradores sujetos a obligaciones de reporte, un proveedor con datos de nivel alto reduce su costo de cumplimiento. Eso se traduce en preferencia en la asignación de volúmenes, contratos de mayor plazo o primas.

- **Reducción del riesgo reputacional y legal.** Un dato verificable permite responder a una denuncia en días, con evidencia, en lugar de en meses con declaraciones.

3.8 La exportadora de camarón, reescrita

Volvamos al Golfo de Guayaquil con una arquitectura de datos ESG en funcionamiento.

La exportadora tiene registradas todas las camaroneras de su red, incluidas las que le venden a través de intermediarios, con su polígono georreferenciado. Su indicador de cobertura hasta el origen está publicado en su informe junto con la meta de aumentarlo cada campaña. Cada polígono se cruzó con los mapas de manglar de distintos años; las piscinas con conversión posterior a la fecha de corte fueron excluidas del abastecimiento o están en un plan de restauración documentado.

La huella de carbono se calcula con datos primarios de consumo de energía y balanceado para las camaroneras que representan la mayor parte del volumen (niveles 1 a 3) y con factores por defecto para el resto (nivel 4), con la proporción declarada y un intervalo de incertidumbre calculado por simulación. El análisis de incertidumbre mostró que el balanceado es el componente de mayor peso, así que la exportadora trabaja con sus proveedores de alimento para obtener factores de emisión específicos.

Cuando la organización ambiental publica su análisis satelital, la exportadora cruza los polígonos señalados con su red en una tarde. Ninguna de las piscinas identificadas está en su cadena, y puede demostrarlo con el mapa de su red y con su registro de verificación. Su cliente europeo usa esos datos en su propio

reporte, y el banco de la exportadora acepta el indicador de cobertura como meta de un crédito vinculado a sostenibilidad.

Fase 4. El framework de acción: cinco pasos para convertir el informe ESG en dato auditable

Paso	Acción concreta	Responsable	Evidencia de cumplimiento	Plazo de referencia
1. Identificar qué datos piden los terceros	Revisar los cuestionarios y contratos de los principales clientes, bancos e inversionistas y listar los indicadores ESG que solicitan, con el nivel de evidencia que exigen	Gerencia comercial con sostenibilidad o calidad	Lista priorizada de indicadores con su solicitante y su uso	2 semanas
2. Calificar la calidad de cada dato	Asignar a cada indicador el nivel de la jerarquía de calidad del dato y calcular qué proporción del volumen está en cada nivel	Sostenibilidad o calidad	Tabla de indicadores con nivel de calidad y cobertura por nivel	3 semanas
3. Mapear la red hasta el origen	Registrar los polígonos de las unidades productivas directas e indirectas que concentran la mayor parte del volumen; calcular el indicador de cobertura hasta el origen	Compras con técnicos de campo	Indicador de cobertura calculado y plan para aumentarlo por campaña	1 campaña

Paso	Acción concreta	Responsable	Evidencia de cumplimiento	Plazo de referencia
4. Verificar el uso del suelo y reportar la incertidumbre	Cruzar los polígonos con mapas satelitales de deforestación y manglar; recalcular la huella con datos primarios donde sea posible e informar cada indicador con su intervalo	Sostenibilidad con analista de datos o consultor	Registro de verificación por polígono y huella con incertidumbre declarada	1 a 2 campañas
5. Vincular el dato a una condición financiera	Negociar con el banco o con el comprador al menos un indicador verificable como base de una condición: tasa, volumen asignado, plazo de contrato o prima	Gerencia general y financiera	Contrato o crédito con indicador ESG y meta definidos	Siguiente renovación de crédito o contrato

Regla de cierre para el directorio: tome cada afirmación ambiental o social del último informe de sostenibilidad y pregunte qué registro de origen la respalda. Las afirmaciones que solo se sostienen en declaraciones del proveedor o en promedios del sector son el inventario de riesgo reputacional de la empresa.

Nota del autor: el caso del lavado de ganado en la cadena de la carne de la Amazonía brasileña está documentado en investigaciones públicas de organizaciones no gubernamentales. El escenario de la exportadora de camarón en el Golfo de Guayaquil es una construcción narrativa; la conversión histórica de manglar para acuicultura en la costa ecuatoriana es un hecho conocido, pero las piscinas, la organización ambiental y el análisis descritos son ficticios. Los marcos de medición, las normas y las herramientas citadas son reales.

Capítulo 9. Carbono agrícola: vender una tonelada que nadie puede ver

Un crédito de carbono es una promesa sobre algo que no ocurrió. Su valor depende de que alguien pueda demostrar qué habría pasado sin él.

Esquema del capítulo

- Por qué los mercados de carbono perdieron confianza: líneas base infladas, permanencia dudosa y mediciones que no detectan lo que dicen vender.
- El carbono del suelo y de los sistemas agroforestales: un activo real con una medición difícil.
- Arquitectura de un activo de carbono creíble: línea base contrafactual, muestreo con potencia suficiente, deducciones por incertidumbre, permanencia y la alternativa del *insetting* en la propia cadena de valor.

Fase 1. El gancho: los créditos que no valían lo que decían y el contrato de cuarenta años

Londres y Hamburgo, enero de 2023

En enero de 2023, una investigación conjunta de *The Guardian*, el semanario alemán *Die Zeit* y la organización de periodismo SourceMaterial publicó un análisis sobre los créditos de carbono de conservación de bosques tropicales certificados por Verra, el mayor certificador del mercado voluntario. Con base en estudios científicos que comparaban la deforestación real en los proyectos con la de áreas similares sin proyecto, la investigación concluyó que una gran mayoría de los créditos analizados probablemente no representaba reducciones reales de emisiones, porque las líneas base de deforestación con las que se habían calculado sobrestimaban la amenaza a los bosques (Greenfield, 2023). Verra cuestionó la metodología del análisis y defendió sus estándares [respuesta oficial a confirmar].

La discusión pública que siguió afectó la confianza en todo el mercado voluntario de carbono. Varias empresas revisaron sus compromisos de compensación y crecieron las iniciativas para definir criterios de integridad de los créditos. El debate de fondo no era técnico en sus palabras, pero sí en su sustancia: un crédito de carbono vale lo que vale la estimación de lo que habría ocurrido sin el proyecto, y esa estimación es un modelo contrafactual que puede construirse bien o mal.

Una cooperativa cacaotera, una propuesta de carbono

Escenario compuesto. La cooperativa, el desarrollador de proyectos y los personajes son ficticios; los mecanismos técnicos y contractuales descritos son reales.

Una cooperativa de productores de cacao en sistemas agroforestales, con árboles de sombra y frutales intercalados, recibe una propuesta de una empresa desarrolladora de proyectos de carbono. La empresa ofrece registrar un proyecto de captura de carbono en los suelos y en los árboles de las fincas de los socios, certificarlo bajo un estándar voluntario y vender los créditos. La cooperativa no tendría que invertir: la empresa cubre los costos de desarrollo y se queda con una parte de los ingresos.

La propuesta suena bien. Los socios ya tienen árboles, y les pagarían por algo que hacen de todas formas. Antes de firmar, el gerente de la cooperativa lee el contrato con un asesor y encuentra varias preguntas sin respuesta. El contrato dura varias décadas y obliga a los socios a mantener los árboles y ciertas prácticas durante todo ese tiempo, con penalidades si no lo hacen. La línea base del proyecto supone que, sin el proyecto, los socios cortarían sus árboles de sombra para sembrar cacao a pleno sol, algo que la mayoría nunca pensó hacer. La medición del carbono del suelo se haría con un modelo y unas pocas muestras. La empresa se queda con los derechos de comercialización de los créditos y la cooperativa no conoce el precio al que se venderán.

Además, una de las chocolateras europeas que compra cacao a la cooperativa le había propuesto meses antes algo distinto: pagar una prima por el cacao producido en sistemas agroforestales y registrar la captura de carbono como reducción dentro de su propia cadena de suministro. Las dos propuestas no pueden coexistir sin contar dos veces el mismo carbono.

Fase 2. El diagnóstico: por qué el carbono agrícola es un activo difícil de creer

2.1 Lo que se vende es una diferencia contra un escenario imaginario

Un crédito de carbono de un proyecto agrícola o forestal representa una tonelada de dióxido de carbono equivalente que se dejó de emitir o que se capturó gracias al proyecto, frente a lo que habría ocurrido sin él. La cantidad de créditos es, en esencia:

$$CR = \left(C_{proyecto} - C_{base}\right) - F - B - U$$

donde $C_{proyecto}$ es el carbono capturado o las emisiones evitadas con el proyecto, C_{base} lo que habría ocurrido en la línea base sin proyecto, F las fugas (emisiones desplazadas a otro lugar por efecto del proyecto), B la reserva de amortiguamiento que se retiene contra el riesgo de reversión y U la deducción por incertidumbre de la medición.

El término C_{base} no se puede observar: es un escenario contrafactual. Si se exagera la amenaza de la línea base (más deforestación, más pérdida de carbono del suelo, más emisiones de lo que habría ocurrido realmente), el proyecto genera créditos por reducciones que no existieron. Es el problema que la investigación de 2023 señaló en los proyectos forestales, y se aplica de la misma forma a los proyectos agrícolas.

2.2 Adicionalidad: ¿habría pasado de todas formas?

Un proyecto es adicional cuando las reducciones o capturas no habrían ocurrido sin el ingreso del carbono. Si los productores de la cooperativa ya mantenían sus árboles de sombra y no tenían intención de cortarlos, pagarles créditos por conservarlos no genera un beneficio climático adicional. La adicionalidad es difícil de demostrar porque requiere razonar sobre las intenciones y los incentivos de los productores, y es fácil de afirmar en un documento de proyecto.

2.3 Permanencia: el carbono puede volver a la atmósfera

El carbono almacenado en árboles y suelos puede perderse: por tala, incendio, cambio de uso del suelo, cambio de prácticas o eventos climáticos. Un crédito

vendido hoy por carbono capturado puede quedar anulado en la práctica si ese carbono se libera dentro de unos años. Los estándares abordan este riesgo con reservas de amortiguamiento y con contratos de larga duración que obligan a mantener las prácticas, lo que traslada al productor una obligación de décadas.

2.4 El carbono del suelo es muy difícil de medir

El carbono orgánico del suelo es un depósito importante en los sistemas agrícolas, pero medir sus cambios es técnicamente difícil. El contenido de carbono varía mucho entre puntos cercanos de una misma parcela y los cambios por manejo son lentos y pequeños en relación con el contenido total. El stock de carbono en una capa de suelo se calcula como:

$$SOC = C \times DA \times e \times \left(1 - f_g\right)$$

donde SOC es el stock en toneladas de carbono por hectárea, C la concentración de carbono orgánico en porcentaje, DA la densidad aparente en gramos por centímetro cúbico, e el espesor de la capa en centímetros y f_g la fracción de fragmentos gruesos. Cualquier error en la densidad aparente o en la profundidad muestreada se traduce directamente en error del stock. Además, si el manejo cambia la densidad del suelo, comparar el carbono a una profundidad fija puede producir resultados engañosos; por eso la literatura recomienda comparar a masa equivalente de suelo (Ellert y Bettany, 1995).

Para detectar un cambio pequeño frente a una variabilidad grande, se necesitan muchas muestras. Con la fórmula de tamaño de muestra del capítulo 21, si la variabilidad espacial del stock es grande en relación con el cambio esperado en unos años, el número de muestras necesario puede ser de decenas o cientos por estrato. Muchos proyectos reemplazan esa medición por modelos, cuyos supuestos pueden no corresponder a las condiciones locales.

2.5 Doble conteo

Una misma tonelada de carbono puede ser reclamada por varios actores: el productor que la vende como crédito, la empresa compradora del producto agrícola que la registra como reducción en su cadena de valor, y el país que la incluye en su inventario nacional. Sin reglas claras de quién la reclama y cómo se registra, el carbono se cuenta más de una vez y la afirmación climática de alguno de los actores es falsa. La cooperativa del escenario estaba a punto de ofrecer el mismo carbono a dos compradores distintos.

2.6 El productor como parte débil del contrato

En muchos proyectos de carbono agrícola, el productor asume las obligaciones de largo plazo (mantener árboles y prácticas durante décadas) mientras el desarrollador controla la certificación, la comercialización y el precio. La información sobre cuántos créditos se generan, a qué precio se venden y cómo se reparten los ingresos suele ser asimétrica. Es otra forma del problema de soberanía del dato del capítulo 7: el carbono es un activo que nace en la finca y cuyo valor se captura lejos de ella.

Fase 3. La tesis: el carbono como bio-dato con contrafactual explícito y medición con potencia

3.1 Un activo de carbono es tan bueno como su línea base

La tesis de este capítulo es que el valor de un activo de carbono agrícola depende de tres datos que deben poder auditarse: una línea base contrafactual defendible, una medición con potencia estadística suficiente para detectar el cambio que se reclama, y un registro que impida contar dos veces el mismo carbono. Las tres son extensiones de las herramientas de este libro.

3.2 Construir la línea base con controles reales

La forma más sólida de estimar lo que habría ocurrido sin el proyecto es observar lo que ocurre en áreas comparables donde no hay proyecto. Es la lógica de las diferencias en diferencias del capítulo 6 y del contrafactual del capítulo 21. Para un proyecto agroforestal, la línea base dinámica compara la evolución del carbono (o de la cobertura arbórea, observable por satélite) en las fincas del proyecto con la evolución en fincas similares fuera del proyecto, seleccionadas por características como suelo, pendiente, distancia a vías y tipo de productor.

$$\Delta C_{atribuible} = \left(C_t^{proy} - C_0^{proy}\right) - \left(C_t^{ctrl} - C_0^{ctrl}\right)$$

Si las fincas de control mantienen sus árboles igual que las del proyecto, el proyecto no tiene captura adicional atribuible, por mucho carbono que almacenen las fincas. Si las fincas de control pierden cobertura y las del proyecto no, la diferencia es atribuible al proyecto. Una línea base construida así puede revisarse periódicamente con nuevas imágenes satelitales y no depende de supuestos fijados al inicio.

3.3 Medir con la potencia necesaria y deducir la incertidumbre

El plan de medición del carbono debe diseñarse con un cálculo de potencia antes de empezar: cuántas muestras por estrato se necesitan para detectar, con una confianza definida, el cambio que el proyecto espera generar en el periodo de verificación. Si el número necesario es inviable, el proyecto debe reconocer que no puede medir el cambio con precisión y ajustar sus afirmaciones, usar periodos de verificación más largos o combinar mediciones con modelos validados localmente.

La incertidumbre de la estimación debe traducirse en una deducción de créditos. Varios estándares aplican deducciones cuando la incertidumbre supera un umbral, de forma que solo se acredita la parte del cambio que se puede afirmar con confianza [reglas específicas del estándar a confirmar]. Un enfoque simple y conservador es acreditar el límite inferior del intervalo de confianza del cambio atribuible en lugar de su valor central:

$$CR_{conservador} = \widehat{\Delta C}_{atribuible} - z_{1-\alpha} \times EE\left(\widehat{\Delta C}_{atribuible}\right)$$

Esta regla premia la buena medición: un proyecto que reduce la incertidumbre con más muestras o mejores métodos obtiene más créditos por el mismo carbono real.

Los árboles de un sistema agroforestal son más fáciles de medir que el suelo. Su biomasa se estima con inventarios de diámetro y altura y con ecuaciones alométricas por especie, y su evolución puede seguirse con imágenes de alta resolución. Para muchos proyectos agroforestales, el carbono de los árboles es el componente más verificable, y el del suelo el más incierto.

3.4 Registrar quién reclama cada tonelada

Para evitar el doble conteo, cada tonelada de carbono debe tener un solo dueño de la reclamación. Esto exige un registro, a escala de parcela y de periodo, que indique si la captura o la reducción se vendió como crédito, se registró como reducción en la cadena de valor de un comprador o se mantuvo sin reclamar. La identidad de parcela del capítulo 1 y la cobertura de trazabilidad del capítulo 8 son la base de ese registro.

Los marcos internacionales también se ocupan de este problema. El artículo 6 del Acuerdo de París establece reglas para la transferencia internacional de resultados de mitigación entre países que incluyen ajustes para evitar el doble

conteo con los inventarios nacionales (Naciones Unidas, 2015) [aplicación al mercado voluntario y a Ecuador a confirmar]. El Consejo de Integridad para el Mercado Voluntario de Carbono publicó en 2023 sus Principios Básicos de Carbono, que incluyen criterios de adicionalidad, permanencia, cuantificación robusta y ausencia de doble conteo (ICVCM, 2023).

3.5 Crédito o *insetting*: dos caminos para el mismo carbono

El escenario de la cooperativa presentaba dos opciones excluyentes.

Dimensión	Crédito de carbono en el mercado voluntario	*Insetting* en la cadena de valor del comprador
Quién paga	Un comprador de créditos, a menudo ajeno a la cadena del producto	La empresa que compra el producto agrícola
Cómo se paga	Precio del crédito, repartido entre desarrollador y productores	Prima por el producto o pago por prácticas, dentro de la relación comercial
Qué reclama el comprador	Compensación de sus emisiones con créditos	Reducción de las emisiones de su propia cadena de suministro (alcance 3)
Medición	Según el estándar de certificación del crédito	Según las guías de contabilidad de la cadena de valor y de metas climáticas del comprador
Relación con el productor	A menudo mediada por un desarrollador, de largo plazo	Integrada en la relación comercial, renovable con los contratos de compra
Riesgo de doble conteo	Si el comprador del producto también reclama la reducción	Si el productor también vende créditos por el mismo carbono

La guía de la iniciativa Science Based Targets para el sector de bosques, tierra y agricultura, citada en el capítulo 8, orienta a las empresas con emisiones agrícolas a reducir las emisiones y aumentar las capturas dentro de sus propias cadenas de suministro (SBTi, 2022). Para una cooperativa que vende a compradores con metas climáticas de ese tipo, el *insetting* puede ofrecer una relación más estable y un pago más directo que un crédito en el mercado voluntario. La decisión depende de las condiciones concretas de cada oferta, y debe tomarse con los números de ambas sobre la mesa.

3.6 Proteger al productor en el contrato

Cualquier contrato de carbono, sea de crédito o de *insetting*, debe revisarse con las preguntas del contrato de datos del capítulo 7, ampliadas para el carbono:

- Duración y salida: cuántos años obliga al productor, qué pasa si vende su finca, si muere o si necesita cambiar de cultivo, y cuáles son las penalidades.
- Línea base: qué supone el proyecto que habría ocurrido sin él, y si ese supuesto es realista para las fincas de los socios.
- Medición: quién mide, con qué método, con cuántas muestras y quién paga la medición.
- Precio y reparto: a qué precio se venden los créditos o cuánto paga el comprador por el *insetting*, qué parte recibe el productor y cómo se verifica.
- Propiedad de los datos y de los créditos: quién es dueño de los datos de las fincas y de los créditos emitidos.
- Exclusividad: si el contrato impide al productor participar en otros esquemas, y cómo se evita el doble conteo.

Una cooperativa que negocia estas condiciones de forma colectiva, con asesoría técnica independiente, tiene una posición mucho más fuerte que un productor individual frente a un desarrollador.

3.7 La cooperativa, reescrita

Volvamos a la cooperativa con un análisis basado en datos.

La cooperativa no firma la propuesta original. Con apoyo de la universidad local, compara las dos opciones con sus propios datos. Las imágenes satelitales de los últimos años muestran que la cobertura arbórea de las fincas de los socios y la de fincas cercanas sin ningún programa se mantuvo estable. La línea base del desarrollador, que suponía la tala de los árboles de sombra, no se sostiene: la captura adicional atribuible a un proyecto de conservación sería pequeña. El cálculo de potencia para el carbono del suelo muestra que, con la variabilidad de sus fincas, harían falta muchas más muestras de las que el proyecto preveía para detectar el cambio prometido en el periodo de verificación.

La propuesta de *insetting* de la chocolatera europea, en cambio, no depende de una línea base de amenaza: paga una prima por el cacao producido en sistemas agroforestales con una cobertura arbórea mínima verificada por satélite, y una prima adicional por cada árbol nuevo plantado y mantenido, medido con inventario. La chocolatera registra la captura de los árboles nuevos como reducción en su cadena de suministro. El contrato dura lo mismo que el de compra de cacao y se renueva con él. La cooperativa registra cada parcela con su polígono y su estado, de modo que el carbono no pueda venderse dos veces.

La cooperativa negocia y firma con la chocolatera. Los socios reciben una prima por algo que ya hacían y un pago adicional por lo que agregan. La afirmación climática de la chocolatera se apoya en datos verificables. Nadie vendió una tonelada que no pudiera demostrar.

Fase 4. El framework de acción: cinco pasos para evaluar un activo de carbono agrícola

Paso	Acción concreta	Responsable	Evidencia de cumplimiento	Plazo de referencia
1. Revisar la línea base con datos	Comparar la evolución de la cobertura arbórea o del carbono en las parcelas del proyecto con parcelas similares sin proyecto, usando series satelitales; verificar si la amenaza supuesta en la línea base es real	Responsable técnico con apoyo universitario o consultor	Análisis contrafactual con parcelas de control	4 a 8 semanas
2. Calcular la potencia de la medición	Estimar la variabilidad del carbono del suelo y de la biomasa por estrato; calcular el número de muestras necesario para detectar el cambio prometido en el periodo de verificación	Analista con laboratorio de suelos	Plan de muestreo con cálculo de potencia y costo de medición	3 a 4 semanas
3. Estimar los créditos de forma conservadora	Calcular el carbono atribuible con su intervalo de confianza; acreditar el límite inferior y aplicar fugas, reserva de amortiguamiento y deducciones del estándar	Analista con el desarrollador o el comprador	Estimación de créditos conservadora y documentada	2 semanas

Paso	Acción concreta	Responsable	Evidencia de cumplimiento	Plazo de referencia
4. Comparar crédito e *insetting*	Calcular para los productores el ingreso esperado, los costos, las obligaciones y los riesgos de cada opción disponible, incluido el *insetting* con los compradores actuales	Gerencia de la cooperativa o empresa	Matriz comparativa de opciones con ingresos netos y obligaciones	2 a 3 semanas
5. Negociar el contrato y registrar la reclamación	Revisar duración, salida, línea base, medición, precio, reparto, propiedad de datos y exclusividad; registrar cada parcela y periodo con la opción elegida para evitar el doble conteo	Gerencia con asesoría legal y técnica independiente	Contrato firmado con las cláusulas mínimas y registro de reclamaciones por parcela	Antes de firmar

Regla de cierre para el directorio o la asamblea: ante cualquier propuesta de carbono, pida que se muestre qué habría pasado en las parcelas sin el proyecto y cómo se sabe. Si la respuesta es un supuesto y no un dato, el crédito puede perder su valor en la primera auditoría seria.

Nota del autor: la investigación periodística de 2023 sobre créditos de carbono de conservación forestal y la respuesta de Verra son hechos documentados; los detalles deben confirmarse con las fuentes originales antes de la publicación. El escenario de la cooperativa cacaotera es una construcción narrativa; los métodos de cálculo de carbono, línea base contrafactual, potencia estadística y prevención del doble conteo descritos son reales y aplicables.

Capítulo 10. Territorial Intelligence: del dato de finca a la decisión de territorio

Las plagas, el agua y los mercados no respetan los límites parroquiales.
Los presupuestos públicos sí.

Esquema del capítulo

- Por qué la planificación agrícola territorial falla: datos dispersos entre instituciones, unidades espaciales incompatibles y decisiones tomadas sobre límites administrativos.
- La amenaza que obliga a pensar en territorio: vigilancia fitosanitaria, riesgo climático y flujos logísticos.
- Arquitectura de inteligencia territorial: unidad espacial común, capas integradas, modelos de aptitud, ubicación óptima y vigilancia basada en riesgo.

Fase 1. El gancho: el hongo que cruzó la frontera y el galpón vacío

La Guajira, agosto de 2019

En agosto de 2019, el Instituto Colombiano Agropecuario confirmó la presencia de *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* raza 4 tropical (Foc R4T) en plantaciones de banano de La Guajira, en el norte de Colombia, y declaró una emergencia fitosanitaria [resolución y fecha exacta a confirmar]. Era la primera detección confirmada de este patógeno en América Latina. En 2021 se confirmó su presencia en Perú [fuente oficial a confirmar].

El hongo causa la marchitez por *Fusarium*, una enfermedad del suelo que afecta a las variedades de banano del subgrupo Cavendish, base de la exportación mundial. No existe un tratamiento químico eficaz y el patógeno puede persistir en el suelo durante muchos años. Se dispersa con el suelo adherido a

herramientas, vehículos, calzado, material de siembra y agua de riego o de escorrentía.

Para Ecuador, uno de los mayores exportadores de banano del mundo, la noticia cambió la naturaleza del problema. La defensa ya no podía organizarse finca por finca. Una sola plantación infectada, en cualquier punto del territorio, pone en riesgo a todas las que comparten caminos, cuencas, cuadrillas de trabajadores o proveedores de plantas. La pregunta dejó de ser "¿cómo protejo mi finca?" y pasó a ser "¿dónde es más probable que entre el hongo, por qué vías se movería y dónde debo vigilar para detectarlo a tiempo?". Esa es una pregunta de inteligencia territorial, y requiere datos que ninguna finca, empresa o institución tiene por sí sola.

Litoral ecuatoriano, tres años después de una inauguración

Escenario compuesto. El gobierno local, el centro de acopio y los personajes son ficticios; los mecanismos de planificación y los métodos descritos son reales.

Un gobierno provincial inaugura un centro de acopio de cacao con equipos de secado, bodega y laboratorio de calidad. El proyecto se financió con recursos propios y con una contraparte de cooperación internacional. El sitio se eligió porque el terreno era de propiedad pública y estaba en la cabecera de un cantón con alta superficie de cacao según el censo agropecuario.

Tres años después, el centro opera con una fracción de su capacidad. Las razones aparecen una por una. La superficie de cacao del cantón está concentrada en el extremo opuesto, a una hora y media por caminos que se vuelven intransitables en invierno. Los productores de esa zona venden a acopiadores privados ubicados sobre la vía principal hacia Guayaquil, que pagan al contado. Una parte del área de influencia del centro se inunda con frecuencia, y varios productores redujeron su superficie de cacao después de perder plantaciones en dos inviernos seguidos. Además, un estudio de suelos que la universidad local había hecho años antes mostraba que la zona cercana al centro tenía valores altos de cadmio, un dato que nadie consultó al planificar.

Cada uno de estos datos existía. El censo estaba en la entidad nacional de estadística, la red vial en el ministerio de obras públicas, el riesgo de inundación en la secretaría de gestión de riesgos, el cadmio en una tesis de la universidad y los flujos comerciales en la cabeza de los acopiadores. Nadie los había puesto en el mismo mapa antes de decidir.

Fase 2. El diagnóstico: por qué el territorio agrícola se planifica a ciegas

2.1 Datos dispersos entre instituciones

La información necesaria para planificar un territorio agrícola está repartida entre muchas instituciones con mandatos, formatos y calendarios distintos: estadísticas agropecuarias, registros de productores, catastros prediales, registros sanitarios, mapas de suelos, datos climáticos, mapas de amenazas, redes viales, registros tributarios y padrones de programas de apoyo. Cada institución recopila lo que necesita para su función, y casi ninguna diseña sus datos para que se combinen con los de otras.

El resultado es que el costo de integrar los datos recae sobre quien quiere tomar una decisión territorial, y ese costo suele ser tan alto que la decisión se toma sin integrar.

2.2 Unidades espaciales incompatibles

Aun cuando los datos se consiguen, su combinación tropieza con un problema técnico: cada fuente usa una unidad espacial distinta. Las estadísticas agropecuarias se publican por provincia o cantón; los registros de programas, por parroquia; los catastros, por predio; los mapas de suelos, por unidades cartográficas; los datos climáticos, por estación o por celda de una grilla; los registros de productores para el reglamento europeo de deforestación, por polígono de parcela.

Cuando los datos se agregan a unidades administrativas grandes, aparecen dos distorsiones conocidas en el análisis espacial. La primera es el problema de la unidad espacial modificable: los resultados de un análisis cambian según cómo se dibujen los límites de las unidades y según su tamaño (Openshaw, 1984). Un cantón puede aparecer como "de alta producción de cacao" cuando su producción está concentrada en una esquina. La segunda es la falacia ecológica: atribuir a los individuos o a las fincas una característica que solo describe el promedio de la unidad (Robinson, 1950). El gobierno provincial del escenario cometió las dos: tomó un promedio cantonal y lo trató como si describiera el lugar donde iba a construir.

2.3 Límites administrativos frente a territorios funcionales

Los presupuestos, las competencias y la rendición de cuentas se organizan por límites administrativos. Los procesos agrícolas se organizan por territorios funcionales: cuencas hidrográficas, áreas de abastecimiento de un centro de acopio, corredores de movimiento de una plaga, zonas homogéneas de suelo y clima. Un centro de acopio atiende a los productores que llegan a él en un tiempo razonable, sin importar en qué parroquia estén. Un patógeno del suelo viaja por el agua y por los caminos, no por los mapas políticos.

La primera ley de la geografía, formulada por Waldo Tobler, resume el fundamento de esta observación: todo está relacionado con todo, pero las cosas cercanas están más relacionadas que las distantes (Tobler, 1970). La planificación territorial que ignora la cercanía y la conectividad real ignora la variable más importante del análisis.

2.4 Decisiones sin ciclo de retroalimentación

Las inversiones públicas y de cooperación en el agro suelen evaluarse por su ejecución (se construyó el centro, se entregaron las plantas, se capacitó a tantos productores) y no por su efecto en el territorio. Sin un sistema que registre lo que ocurre después, el error del centro de acopio no se aprende. El siguiente proyecto se ubicará con el mismo criterio.

2.5 La vigilancia fitosanitaria como caso extremo

La amenaza del Foc R4T muestra el costo máximo de estas fallas. Una vigilancia fitosanitaria eficaz requiere saber dónde están todas las plantaciones susceptibles, por dónde se mueven el suelo, el agua, el material vegetal y las personas, y dónde es más probable una introducción. Con recursos de inspección limitados, distribuir la vigilancia de forma uniforme o según la superficie cultivada de cada provincia desperdicia esfuerzo en zonas de bajo riesgo y deja sin cubrir las rutas de entrada más probables.

En vigilancia epidemiológica, este problema se aborda con la vigilancia basada en riesgo, que asigna el esfuerzo de muestreo según la probabilidad de introducción y la consecuencia esperada en cada unidad (Stärk et al., 2006). Aplicarla exige exactamente lo que falta: datos territoriales integrados.

Fase 3. La tesis: el territorio como sistema de datos con unidad común

3.1 Definir la inteligencia territorial

La inteligencia territorial agrícola es la capacidad de integrar datos biofísicos, productivos, logísticos, socioeconómicos y de riesgo sobre una unidad espacial común, para modelar el territorio y tomar decisiones sobre él con evidencia y con un ciclo de aprendizaje.

La diferencia con un sistema de información geográfica tradicional no es la tecnología, sino el propósito. Un sistema de información geográfica produce mapas. Un sistema de inteligencia territorial responde preguntas de decisión: dónde invertir, dónde vigilar, a quién priorizar, qué pasará si cambia el clima o si llega una plaga.

3.2 La unidad espacial común

El primer paso técnico es resolver la incompatibilidad de unidades. La solución consiste en adoptar una grilla regular como unidad de integración, a la que se asignan todos los datos sin importar su unidad original.

Las grillas hexagonales jerárquicas, como el sistema de indexación H3 publicado como código abierto (Uber Technologies, 2018), ofrecen ventajas para este uso: cada hexágono tiene un identificador único, todas las celdas vecinas están a la misma distancia del centro, existen resoluciones anidadas que permiten pasar de lo regional a lo local, y la grilla no depende de ningún límite administrativo. Una grilla cuadrada en un sistema de coordenadas proyectado también es válida; lo importante es que sea una sola, estable y documentada.

Cada fuente se asigna a las celdas según su naturaleza:

- Datos de polígono (parcelas, unidades de suelo, áreas inundables): proporción del área de cada celda cubierta por cada categoría.
- Datos de punto (fincas sin polígono, centros de acopio, estaciones climáticas, detecciones de plagas): conteo o asignación a la celda que los contiene, o interpolación cuando corresponde.

- **Datos de red** (caminos, ríos): longitud por celda y, sobre todo, tiempo de viaje desde cada celda a puntos de interés.
- **Datos agregados por unidad administrativa** (estadísticas cantonales): solo cuando no hay alternativa, distribuidos con un método explícito (por ejemplo, proporcional a la cobertura de cultivo observada por satélite) y marcados como de menor calidad.

Esta asignación tiene que declarar su incertidumbre, igual que cualquier bio-dato. Una celda cuyo valor proviene de un polígono medido en campo no tiene la misma calidad que una celda cuyo valor proviene de repartir un promedio cantonal.

3.3 Las capas del territorio

Un sistema de inteligencia territorial agrícola organiza sus datos en capas que pueden consultarse y combinarse.

Capa	Variables típicas	Fuentes posibles
Biofísica	Suelo (textura, pH, metales), pendiente, altitud, clima histórico, disponibilidad hídrica	Mapas de suelos, estudios universitarios, modelos de elevación, productos climáticos satelitales
Productiva	Parcelas georreferenciadas, cultivo, edad, material genético, rendimiento histórico	Registros de productores (incluidos los creados para el reglamento europeo de deforestación), catastros, empresas compradoras
Logística	Red vial y su transitabilidad estacional, tiempos de viaje, centros de acopio, plantas, puertos	Ministerios de obras públicas, gobiernos locales, empresas, datos colaborativos

Capa	Variables típicas	Fuentes posibles
Comercial	Flujos de producto desde las zonas productoras hasta los compradores, precios por zona	Registros de compra de exportadoras y acopiadores, encuestas
Socioeconómica	Tamaño de finca, organización de productores, acceso a crédito y asistencia técnica	Censos, registros de programas, gremios
Riesgo	Amenaza de inundación, sequía, deslizamiento; presencia o riesgo de plagas; cambio de uso del suelo	Secretarías de gestión de riesgos, autoridad fitosanitaria, mapas de deforestación

La capa productiva es la más valiosa y la más difícil. Aquí el capítulo 1 se conecta con el territorio: las parcelas georreferenciadas que exportadores y autoridades registran para la trazabilidad y para el reglamento europeo de deforestación son, sumadas, el mapa productivo más preciso que el país ha tenido. Integrarlas en un sistema territorial, con las protecciones de datos que corresponden, multiplica su valor.

3.4 Modelo de aptitud y riesgo

Con las capas integradas, el primer modelo útil es un índice de aptitud o de prioridad por celda. Una forma habitual es la evaluación multicriterio con pesos:

$$S_h = \sum_{k=1}^{K} w_k \, \tilde{x}_{h,k}, \qquad \sum_k w_k = 1$$

donde S_h es el índice de la celda h, $\tilde{x}_{h,k}$ el valor normalizado del criterio k en esa celda (por ejemplo, aptitud del suelo, riesgo de inundación invertido, tiempo de viaje a un mercado) y w_k el peso de cada criterio. Los pesos pueden derivarse con métodos estructurados de comparación por pares, como el proceso analítico jerárquico (Saaty, 1980), que obliga a los decisores a explicitar sus prioridades y permite verificar su consistencia.

Dos reglas evitan los errores más comunes:

- **Separar restricciones de criterios.** Las celdas que no cumplen una condición indispensable (zona protegida, inundación recurrente, contaminación por encima de un umbral) se excluyen antes del cálculo. No deben compensarse con buenos valores en otros criterios.

- **Analizar la sensibilidad de los pesos.** Si un cambio pequeño en los pesos cambia de forma radical las celdas priorizadas, la decisión no es robusta y debe discutirse antes de ejecutarla.

3.5 Ubicación óptima de infraestructura

La pregunta del centro de acopio tiene una formulación clásica en investigación de operaciones: el problema de la p-mediana, que busca ubicar p instalaciones de forma que se minimice la distancia, o el tiempo de viaje, ponderada por la demanda de todos los puntos atendidos (Hakimi, 1964):

$$\min \sum_{i} \sum_{j} v_i \; d_{ij} \, y_{ij}$$

sujeto a que cada celda de producción i quede asignada a una sola instalación, que solo se asignen celdas a instalaciones abiertas, y que se abran exactamente p instalaciones entre los sitios candidatos j. Aquí v_i es el volumen de producción de la celda i, d_{ij} el tiempo de viaje entre la celda y el sitio candidato, y y_{ij} indica la asignación.

Usar tiempo de viaje en la época de lluvias, y no distancia en línea recta, cambia los resultados en territorios con caminos de tierra. Incorporar a los acopiadores existentes como competencia, con una regla que reconozca que el productor elige según precio y forma de pago además de distancia, acerca el modelo a la realidad. El resultado del modelo no reemplaza la decisión política, pero hace visible el costo de elegir un sitio por razones distintas a la cobertura del servicio.

3.6 Vigilancia fitosanitaria basada en riesgo

Para una amenaza como el Foc R4T, la inteligencia territorial permite asignar los recursos de vigilancia según el riesgo de cada celda. Un esquema simple estima un índice de riesgo como producto de la probabilidad de introducción y de la consecuencia:

$$R_h = P(\text{introducción})_h \times C_h$$

La probabilidad de introducción puede estimarse con variables territoriales: cercanía a pasos fronterizos y rutas de transporte, movimiento de maquinaria, cuadrillas de trabajadores y material de siembra entre zonas, presencia de cauces que conectan con zonas de riesgo. La consecuencia depende de la superficie susceptible en la celda y en sus vecinas conectadas por esas mismas vías.

El esfuerzo de muestreo se asigna en proporción al riesgo, con un componente mínimo en todas las celdas productivas para detectar introducciones por vías no previstas. Los sitios centinela se ubican en las celdas de mayor riesgo y en los nodos de la red de movimiento: viveros, centros de acopio, empacadoras, puntos de lavado de vehículos. Cada inspección, positiva o negativa, actualiza la estimación de riesgo. Una detección temprana en un sitio centinela permite delimitar y contener; una detección tardía en una finca cualquiera puede llegar cuando el patógeno ya se dispersó.

3.7 Escenarios: el territorio que vendrá

Las decisiones territoriales tienen horizontes largos. Un centro de acopio dura décadas; una plantación de cacao, también. La inteligencia territorial debe permitir evaluar escenarios: cambios en la aptitud climática de los cultivos, cambios en la frecuencia de inundaciones, expansión de una plaga, apertura de una vía o de un mercado. Cada escenario se modela modificando las capas correspondientes y recalculando los índices y las ubicaciones. Una decisión que resulta buena en la mayoría de los escenarios es preferible a una que resulta óptima en el escenario actual y mala en los demás.

3.8 La gobernanza del dato territorial

Un sistema de inteligencia territorial depende de que instituciones y empresas compartan datos que hoy guardan por separado. Eso requiere acuerdos explícitos.

- Acuerdos de intercambio de datos que definan qué se comparte, con qué nivel de agregación, para qué usos y con qué responsabilidades.
- Protección de datos personales. Los polígonos de parcelas y los registros de productores son datos personales cuando permiten identificar a una persona natural. Su uso debe cumplir la normativa de protección de datos (en Ecuador, la Ley Orgánica de Protección de Datos

Personales, citada en el capítulo 3) y, en general, publicarse solo de forma agregada en la grilla.

- **Retorno de valor a quien aporta datos.** Los productores, gremios y empresas que aportan datos deben recibir algo a cambio: análisis de su zona, alertas de riesgo, acceso a programas. Sin retorno, el sistema pierde a sus fuentes.
- **Ciclo de actualización y evaluación.** Cada inversión decidida con el sistema debe registrar sus resultados en el tiempo, para que el sistema aprenda de sus aciertos y errores.

Una figura útil para organizar estos acuerdos es un consorcio o fideicomiso de datos territoriales, en el que participen gobiernos locales, autoridad sanitaria, universidades, gremios y empresas, con reglas de gobernanza claras y un operador técnico neutral.

3.9 El centro de acopio, reescrito

Volvamos al gobierno provincial con un sistema de inteligencia territorial básico en funcionamiento.

Antes de decidir la ubicación del centro, el equipo técnico integra en una grilla hexagonal las parcelas de cacao registradas por exportadoras y por el programa nacional de registro de productores, el mapa de amenaza de inundación, los análisis de cadmio de la universidad, la red vial con tiempos de viaje en época de lluvias y la ubicación de los acopiadores privados existentes.

Las celdas inundables y las de cadmio alto quedan excluidas como sitios candidatos. El modelo de p-mediana muestra que el terreno público de la cabecera cantonal cubre una fracción baja de la producción en un tiempo de viaje razonable, y que un sitio sobre la vía principal, cerca de la zona de mayor concentración de parcelas, cubre una fracción mucho mayor. El análisis de los acopiadores privados indica que el centro solo será competitivo si ofrece pago contra entrega, lo que exige asociar el proyecto a un esquema de financiamiento de inventario como el descrito en el capítulo 2.

La decisión final sigue siendo política: el gobierno provincial negocia la compra de un terreno sobre la vía principal y diseña el modelo de pago con una cooperativa y un banco. Pero ahora la decisión tiene evidencia, sus supuestos

están escritos y su resultado se medirá cada año con el volumen efectivamente acopiado frente al previsto.

Fase 4. El framework de acción: cinco pasos para construir inteligencia territorial

Paso	Acción concreta	Responsable	Evidencia de cumplimiento	Plazo de referencia
1. Elegir una decisión concreta	Seleccionar una decisión territorial próxima y de alto costo (ubicación de infraestructura, priorización de inversión, plan de vigilancia sanitaria) como primer caso de uso	Autoridad del gobierno local, gremio o empresa promotora	Pregunta de decisión escrita, con alcance territorial y fecha límite	2 semanas
2. Adoptar la unidad espacial común	Definir una grilla única (por ejemplo, hexagonal jerárquica) y su resolución para el territorio de interés, con reglas documentadas para asignar cada tipo de dato	Equipo técnico con apoyo universitario o consultor	Documento técnico de la grilla y reglas de asignación	3 semanas
3. Integrar las capas necesarias para la decisión	Reunir y asignar a la grilla solo las capas que la decisión requiere, con acuerdos de intercambio de datos y calificación de la calidad de cada capa	Equipo técnico con las instituciones fuente	Capas integradas con fuente, fecha, método y calidad declarados	6 a 10 semanas

Paso	Acción concreta	Responsable	Evidencia de cumplimiento	Plazo de referencia
4. Modelar y validar en campo	Aplicar el modelo correspondiente (aptitud multicriterio, p-mediana, vigilancia basada en riesgo), analizar la sensibilidad y verificar en campo una muestra de celdas priorizadas	Equipo técnico con técnicos de campo	Resultados del modelo, análisis de sensibilidad e informe de verificación en campo	4 a 6 semanas
5. Decidir, registrar y medir el resultado	Tomar la decisión con el modelo como insumo, documentar los supuestos y definir el indicador que se medirá cada año para evaluar el resultado	Autoridad decisora	Acta de decisión con supuestos e indicador de resultado, y primera medición anual	Decisión inmediata; primera evaluación al año

Regla de cierre para el directorio o el concejo: antes de aprobar la próxima inversión territorial, pida un mapa que muestre qué parte de la población o de la producción objetivo queda dentro de un tiempo de viaje razonable del sitio propuesto, en época de lluvias. Si nadie puede producir ese mapa, el paso 2 es la inversión prioritaria.

Nota del autor: la confirmación de Foc R4T en Colombia en 2019 y su posterior detección en Perú son hechos documentados por las autoridades fitosanitarias de esos países; las referencias oficiales deben completarse antes de la publicación. El escenario del centro de acopio es una construcción narrativa; los métodos de análisis espacial, localización óptima y vigilancia basada en riesgo descritos son reales y aplicables.

Capítulo 11. El pequeño productor en la economía de los bio-datos: inclusión o exclusión por cumplimiento

Si medir cuesta lo mismo para una hectárea que para mil, la exigencia de datos termina siendo una barrera de entrada.

Esquema del capítulo

- El riesgo que este libro podría agravar: que la exigencia de datos expulse de las cadenas de exportación a quienes producen en pequeña escala.
- Por qué el dato cuesta más al pequeño productor: costos fijos, brecha digital, desconfianza y extracción de valor.
- Arquitectura de inclusión: infraestructura de datos compartida, diseño para baja conectividad, verificación por muestreo y retorno del valor al productor.

Fase 1. El gancho: el teléfono que cambió una economía y la lista que dejó fuera a una asociación

Kenia, 2007 en adelante

En 2007, el operador de telefonía Safaricom lanzó en Kenia M-Pesa, un servicio que permite enviar, recibir y guardar dinero con un teléfono móvil básico, sin cuenta bancaria. El servicio se extendió con rapidez entre hogares rurales y urbanos de bajos ingresos. Un estudio publicado en *Science* estimó que el acceso a este servicio de dinero móvil aumentó el consumo per cápita y redujo la pobreza en una proporción de los hogares kenianos, con efectos mayores en los hogares encabezados por mujeres (Suri y Jack, 2016).

El caso se convirtió en una referencia sobre inclusión digital por una razón de diseño: el servicio funcionaba con los teléfonos que la gente ya tenía, con mensajes de texto y sin conexión a internet, y se apoyaba en una red de agentes locales que convertían efectivo en dinero electrónico y viceversa. No exigía a los

usuarios cambiar de tecnología ni de hábitos para empezar. La tecnología se adaptó a las condiciones de quienes debían usarla.

Una asociación cacaotera en la Amazonía ecuatoriana

Escenario compuesto. La asociación, la exportadora y los personajes son ficticios; los mecanismos de exclusión y las soluciones descritas son reales.

Una asociación de 140 familias cacaoteras de la Amazonía vende desde hace ocho años a una exportadora de Guayaquil. La mayoría de las fincas tiene menos de tres hectáreas, combina cacao con cultivos de autoconsumo y está a varias horas de la vía principal. La cobertura celular es irregular. La edad promedio de los jefes de finca supera los cincuenta años, y varios hablan kichwa en casa.

La exportadora vende una parte de su cacao a Europa y debe cumplir el reglamento europeo sobre deforestación, que exige la geolocalización de cada parcela de origen. La empresa evalúa el costo de registrar los polígonos de las 140 fincas, verificar su historial de uso del suelo, mantener el registro actualizado y asegurar la trazabilidad de cada entrega hasta su parcela. Lo compara con el costo de hacer lo mismo con cinco fincas medianas de la costa que producen un volumen similar. El costo por kilogramo de la asociación es varias veces mayor.

La gerencia toma una decisión que parece técnica: concentrar las compras para Europa en proveedores "con capacidad de cumplimiento" y destinar el cacao de la asociación al mercado nacional y a destinos sin exigencias de trazabilidad, con un precio menor. Nadie en la exportadora tiene la intención de excluir a la asociación. La decisión simplemente minimiza el costo de cumplir. Para las 140 familias, el efecto es una caída de ingresos.

Este riesgo ha sido señalado por organizaciones que trabajan con productores de cacao y café, que advierten que la aplicación de la norma europea puede excluir a las organizaciones de pequeños productores que no tienen los medios para cumplir sus requisitos de trazabilidad (AVSF y Ethiquable, 2025).

Fase 2. El diagnóstico: por qué el dato cuesta más a quien produce menos

2.1 El riesgo que este libro puede agravar

Los capítulos anteriores defendieron que los bio-datos reducen riesgos, abren financiamiento, protegen la calidad y sostienen el cumplimiento. Todas esas afirmaciones son válidas para quien puede generar y gestionar esos datos. Este capítulo plantea la pregunta que la tesis del libro obliga a responder: ¿qué pasa con quien no puede?

Una parte considerable de la producción agrícola mundial proviene de fincas pequeñas (Lowder et al., 2016). En Ecuador, el cacao, el café y otros cultivos de exportación dependen en buena medida de fincas familiares de pocas hectáreas. Si la economía de los bio-datos se construye solo para operaciones medianas y grandes, las exigencias de trazabilidad, ESG, calidad verificada y crédito basado en datos funcionarán como un filtro que concentra el mercado en quienes ya tienen escala.

2.2 El costo fijo del dato

La razón principal es económica. Buena parte del costo de generar y gestionar datos es fijo por unidad productiva: registrar un polígono, verificar su historial satelital, capacitar al productor, mantener su registro, auditar su cumplimiento. Ese costo es parecido para una finca de dos hectáreas que para una de doscientas.

Si F es el costo fijo anual de cumplimiento por finca y v el costo variable por kilogramo, el costo por kilogramo de una finca que produce Q kilogramos al año es:

$$c(Q) = \frac{F}{Q} + v$$

Para una finca pequeña, el término F/Q domina. Una finca que produce una fracción pequeña del volumen de una finca mediana tiene un costo de cumplimiento por kilogramo proporcionalmente mayor. Cualquier comprador que minimice el costo de cumplimiento preferirá a los proveedores grandes, aunque la calidad del cacao de los pequeños sea igual o mejor.

2.3 La brecha digital no es solo de conectividad

Las soluciones digitales de trazabilidad suelen diseñarse con supuestos urbanos: teléfono inteligente, conexión estable, alfabetización digital, tiempo para aprender una aplicación. En zonas rurales, cada uno de estos supuestos puede fallar.

Dimensión	Supuesto del diseño típico	Realidad frecuente en fincas pequeñas
Dispositivo	Teléfono inteligente propio y actualizado	Teléfono básico o compartido en la familia
Conectividad	Conexión permanente a internet	Cobertura irregular; señal solo en ciertos puntos
Alfabetización	Lectura fluida y uso cotidiano de aplicaciones	Lectura limitada en algunos casos; uso de mensajería por voz
Idioma	Interfaz en español técnico	Preferencia por el idioma materno, explicaciones orales
Tiempo y costo	El productor dedica tiempo a registrar datos	El registro compite con el trabajo de la finca y con otras ocupaciones

Una aplicación que exige conexión permanente y formularios largos no fracasa por mala voluntad del productor. Fracasa porque no fue diseñada para él.

2.4 La desconfianza tiene fundamentos

Los pequeños productores tienen razones para desconfiar de quien les pide datos. El capítulo 7 describió cómo una plataforma puede capturar y comercializar los datos de los productores sin retribución. Además, los datos de producción, ubicación e ingresos pueden usarse para fines que el productor no autorizó: fijar precios en su contra, evaluar su capacidad de pago sin su conocimiento o cobrar impuestos. Cuando la relación con el comprador es desigual, entregar datos puede aumentar la vulnerabilidad del productor en lugar de reducirla.

2.5 El valor que no regresa

Cuando un pequeño productor entrega sus datos para que el comprador cumpla una norma europea, el beneficio principal lo captura el comprador: acceso a un mercado de mayor precio. Si el productor no recibe una parte de ese beneficio (en precio, en acceso a crédito, en asistencia técnica, en información útil para su finca), el registro de datos es para él un costo sin retorno. Y un sistema que impone costos sin retorno a quienes deben alimentarlo produce datos de mala calidad o deja de recibirlos.

2.6 La adopción depende de lo que ve el vecino

La investigación sobre difusión de innovaciones mostró hace décadas que la adopción de nuevas prácticas depende de su ventaja relativa percibida, de su compatibilidad con las prácticas existentes, de su complejidad, de la posibilidad de probarla en pequeño y de la visibilidad de sus resultados (Rogers, 2003). En comunidades rurales, la visibilidad pasa por los pares: un productor adopta cuando ve que a su vecino le funcionó. Un sistema de datos que no muestra resultados concretos a los primeros productores que lo usan no se difunde.

Fase 3. La tesis: el dato del pequeño productor se gestiona en forma asociativa

3.1 Cambiar la unidad de gestión

La tesis de este capítulo es que el pequeño productor no debe gestionar sus datos de forma individual, igual que no comercializa su cacao de forma individual cuando pertenece a una asociación. La unidad de gestión del dato debe ser la organización de productores: asociación, cooperativa o grupo de proveedores de un acopiador. Esa organización actúa como operador de datos de sus socios.

Este cambio ataca directamente el problema del costo fijo. Si la organización asume una parte de los costos fijos de forma compartida (sistema de registro, verificación satelital, auditoría, capacitación), el costo por kilogramo baja:

$$c_{asoc} = \frac{F_{org}}{\sum_i Q_i} + \frac{f_{ind}}{\bar{Q}} + v$$

donde F_{org} es el costo fijo compartido por toda la organización, distribuido sobre el volumen total de sus socios, y f_{ind} es el costo fijo que sigue siendo individual por finca (por ejemplo, el levantamiento inicial del polígono), menor que el costo fijo total de una gestión individual. Con una organización de varios cientos de socios, el primer término puede ser comparable al de un productor mediano.

3.2 El modelo de control interno: una figura que ya funciona

La gestión asociativa del cumplimiento no es una idea nueva. La certificación orgánica en grupo de pequeños productores funciona desde hace años con un sistema de control interno: la organización inspecciona a todos sus socios con su propio personal, mantiene los registros, aplica sanciones internas, y el organismo certificador externo audita el sistema y verifica una muestra de fincas en lugar de inspeccionar cada una [referencia sobre certificación grupal y sistemas de control interno a confirmar].

El mismo modelo puede aplicarse a la trazabilidad, al cumplimiento de la norma europea sobre deforestación, a los datos ESG y a la calidad. La organización registra y verifica a sus socios con un procedimiento documentado; el comprador o el verificador externo audita el procedimiento y una muestra. El costo de la verificación externa se reduce y la organización desarrolla una capacidad que le pertenece.

3.3 Verificación por muestreo con confianza conocida

La verificación de una muestra de fincas en lugar de todas exige responder una pregunta: ¿cuántas fincas hay que verificar para tener una confianza razonable de que la proporción de incumplimiento es baja?

Si se quiere detectar, con una confianza C, al menos un caso de incumplimiento cuando la proporción real de fincas que incumplen es igual o mayor que p, y el número de fincas es grande en relación con la muestra, el tamaño mínimo de muestra aproximado es:

$$n \geq \frac{\ln(1 - C)}{\ln(1 - p)}$$

Por ejemplo, para detectar con un 95 % de confianza una proporción de incumplimiento de al menos 5 %, se necesitan unas 59 fincas; para detectar una proporción de al menos 10 %, unas 29. Para poblaciones pequeñas se aplica la

corrección por población finita, que reduce el número necesario. Las normas de muestreo de aceptación, como la serie ISO 2859, ofrecen planes de muestreo estandarizados que pueden adaptarse (ISO, 1999).

El muestreo debe combinarse con el enfoque de riesgo de los capítulos 4 y 10: las fincas con mayor riesgo (por su cercanía a bosque, por su historial, por un índice de plausibilidad productiva alto) se verifican con mayor probabilidad que las demás. La organización verifica a todos; el verificador externo verifica la muestra.

3.4 Diseñar para las condiciones reales

La lección de M-Pesa es de diseño: la tecnología debe adaptarse a las condiciones del usuario, no al revés. Para la captura de datos en fincas pequeñas, esto implica decisiones concretas.

Principio	Implementación
Funcionar sin conexión	Aplicaciones que registran los datos en el dispositivo y los sincronizan cuando hay señal; formularios que no requieren internet para completarse
Usar los canales que la gente ya usa	Registro por mensajes de texto o de voz, llamadas, o mensajería instantánea; confirmación por los mismos canales
Captura intermediada	Promotores comunitarios o técnicos de la organización que levantan los polígonos y registran los datos con el productor, en lugar de exigir que cada productor use la aplicación
Lenguaje e idioma	Interfaz con pocas palabras, iconos y voz; versiones en el idioma de la comunidad cuando corresponda
Mínimo de datos	Registrar solo lo que la decisión o la norma exige; cada campo adicional reduce la calidad del resto
Devolución inmediata	Cada registro devuelve algo útil al productor: confirmación de su entrega, peso, calidad, precio, pago

La captura intermediada merece énfasis. En muchas organizaciones, un técnico de campo con un teléfono inteligente y un GPS puede levantar los polígonos de decenas de fincas por semana. El productor participa y valida, pero no necesita manejar la tecnología. El costo de ese técnico, compartido entre todos los socios, es menor que el costo de capacitar a cada productor en una aplicación que usará pocas veces al año.

3.5 Que el valor regrese al productor

Un sistema de datos de pequeños productores solo se sostiene si devuelve valor a quienes lo alimentan. Cinco formas de retorno son viables y se refuerzan entre sí.

- Precio. El comprador que accede a un mercado de mayor valor gracias a los datos comparte una parte de ese valor como prima de trazabilidad o de cumplimiento, pagada a la organización o al productor.
- Crédito. El historial de entregas, rendimientos y calidad de cada socio, gestionado por la organización, se convierte en el expediente de riesgo del capítulo 2, que permite acceder a crédito para la organización y, a través de ella, para los socios.
- Información para la finca. La organización devuelve a cada productor datos útiles: su rendimiento comparado con el de la zona, alertas de plagas o de clima del sistema territorial del capítulo 10, resultados de calidad de sus entregas.
- Poder de negociación. Los datos agregados de la organización, protegidos como describe el capítulo 7, permiten negociar con compradores con información propia sobre volúmenes, calidades y costos.
- Servicios. El registro de los socios facilita su acceso a programas públicos, seguros por índice y asistencia técnica.

3.6 Quién paga la infraestructura compartida

La infraestructura de datos de una organización de pequeños productores tiene costos iniciales que la organización rara vez puede asumir sola: equipos, sistema de registro, levantamiento inicial de polígonos, capacitación de promotores. Hay tres fuentes que pueden combinarse.

- Compradores, que tienen el mayor interés inmediato en el cumplimiento y pueden financiar la infraestructura con contratos de compra de varios años y descontar parte del costo de las primas futuras.

- Cooperación internacional y programas públicos, interesados en evitar la exclusión de pequeños productores de los mercados de exportación. El registro nacional de productores de cacao y café promovido por las autoridades ecuatorianas para cumplir la norma europea es un ejemplo de infraestructura pública que reduce el costo fijo para todos [estado y alcance del registro a confirmar].

- Financiamiento ligado a resultados, en el que bancos o fondos de impacto financian la infraestructura y recuperan la inversión con una parte de las primas obtenidas.

El acuerdo de financiamiento debe dejar claro que los datos pertenecen a la organización y a sus socios, con los contratos de datos del capítulo 7, y que quien financia no adquiere el derecho a usarlos para otros fines.

3.7 Medir la inclusión

Si la inclusión no se mide, la presión del costo la reduce sin que nadie lo note. Un comprador comprometido con la inclusión de pequeños productores puede seguir tres indicadores en su cadena:

- Participación de pequeños productores en el volumen total comprado, por mercado de destino (para detectar si los pequeños quedan relegados a los mercados de menor precio).

- Costo de cumplimiento por kilogramo según el tamaño de la finca de origen, para identificar dónde la infraestructura compartida tiene más efecto.

- Retorno al productor, medido como la diferencia entre el precio recibido por los productores con datos verificados y el precio del mercado local sin trazabilidad.

Estos indicadores también son datos ESG en el sentido del capítulo 8, y cada vez más compradores e inversionistas los piden.

3.8 La asociación amazónica, reescrita

Volvamos a la Amazonía con un modelo asociativo de datos en funcionamiento.

La exportadora, en lugar de reemplazar a la asociación, firma con ella un contrato de compra de tres años para el mercado europeo. Financia la compra de dos teléfonos inteligentes con GPS, el sistema de registro y la capacitación de dos promotores de la propia comunidad, uno de ellos bilingüe. El costo se recupera con una parte de la prima del mercado europeo durante los tres años.

Los promotores levantan los polígonos de las 140 fincas en dos meses, con la participación de cada familia. El registro se hace sin conexión y se sincroniza en el centro de acopio de la asociación, donde hay señal. La verificación satelital del uso del suelo la realiza la exportadora para todos los polígonos; las fincas cercanas a bosque se revisan en campo. La asociación implementa un sistema de control interno con un reglamento aprobado en asamblea. Cada año, un verificador externo audita el sistema y visita una muestra de fincas, con mayor probabilidad para las de mayor riesgo.

Cada vez que un socio entrega cacao, recibe un mensaje de texto con el peso, la humedad, el resultado de la prueba de corte y el precio. Al final de cada campaña, la asociación entrega a cada familia una ficha con su producción comparada con el promedio de la zona. Con el historial de dos campañas, la asociación negocia con una cooperativa de ahorro y crédito una línea de financiamiento para la compra de cosecha, con el inventario en custodia como garantía.

El costo de cumplimiento por kilogramo de la asociación sigue siendo mayor que el de las fincas medianas de la costa, pero la diferencia se redujo lo suficiente para que la prima europea la cubra con margen. Las 140 familias siguen en la cadena de exportación.

Fase 4. El framework de acción: cinco pasos para incluir a los pequeños productores en la economía de los bio-datos

Paso	Acción concreta	Responsable	Evidencia de cumplimiento	Plazo de referencia
1. Medir la exposición a la exclusión	Calcular qué proporción del volumen proviene de pequeños productores, a qué mercados se destina y cuál es su costo de cumplimiento por kilogramo frente al de proveedores grandes	Compras con sostenibilidad	Indicadores de inclusión por mercado de destino y por tamaño de finca	3 semanas
2. Acordar el modelo asociativo	Definir con cada organización de productores quién opera los datos, qué capacidades necesita, qué parte del costo asume cada parte y por cuánto tiempo se compromete la compra	Gerencia comercial con la organización de productores	Acuerdo firmado con roles, financiamiento y contrato de datos	1 a 2 meses
3. Diseñar la captura para las condiciones reales	Implementar registro sin conexión, captura intermediada por promotores, canales de mensajería conocidos y un mínimo de datos; probar con un grupo piloto antes de extender	Organización de productores con apoyo técnico del comprador o de un consultor	Sistema de registro operando con el grupo piloto y ajustes documentados	2 a 3 meses

Paso	Acción concreta	Responsable	Evidencia de cumplimiento	Plazo de referencia
4. Instalar el control interno y la verificación por muestreo	Aprobar en la organización un reglamento de control interno; definir el plan de muestreo externo basado en riesgo con confianza conocida	Organización de productores con el comprador y el verificador	Reglamento aprobado, primer ciclo de control interno y primera verificación externa por muestreo	1 campaña
5. Asegurar el retorno y medirlo	Definir y pagar la prima de trazabilidad; devolver a cada productor información útil de su finca; conectar el historial de la organización con crédito; medir el retorno cada campaña	Comprador y organización de productores	Prima pagada, fichas entregadas a los productores, indicador de retorno al productor por campaña	Desde la primera campaña

Regla de cierre para el directorio: pregunte qué parte del volumen que la empresa compra a pequeños productores se destinaba a mercados de alto valor hace tres años y qué parte se destina hoy. Si la proporción bajó desde que aumentaron las exigencias de datos, la empresa está resolviendo su cumplimiento a costa de su base de proveedores, y ese costo aparecerá cuando la necesite.

Nota del autor: el lanzamiento de M-Pesa en Kenia y su efecto estimado sobre la pobreza son hechos documentados en la literatura citada. El riesgo de exclusión de pequeños productores por las exigencias del reglamento europeo sobre deforestación ha sido señalado por organizaciones de cooperación que trabajan con cadenas de cacao y café. El escenario de la asociación amazónica es una construcción narrativa; los mecanismos de exclusión y las soluciones descritas son reales y aplicables.

Capítulo 12. El agua como dato: regar con balance y no con calendario

Una finca que no sabe cuánta agua necesita su cultivo riega por costumbre. Y la costumbre casi nunca coincide con la planta.

Esquema del capítulo

- Por qué se riega mal aun cuando el agua escasea: calendarios fijos, ausencia de medición y desconocimiento de lo que el cultivo consume.
- El agua como recurso compartido: cuencas bajo presión y productores que compiten por el mismo caudal.
- Arquitectura del riego basado en datos: evapotranspiración del cultivo, balance hídrico del suelo, respuesta del rendimiento al agua, valor económico del agua y gestión compartida en la cuenca.

Fase 1. El gancho: el día cero y la bomba que no se apagaba

Ciudad del Cabo, 2017 y 2018

Después de varios años de lluvias por debajo de lo normal, Ciudad del Cabo, en Sudáfrica, enfrentó entre 2017 y 2018 la posibilidad de que sus embalses llegaran a un nivel en el que se suspendería el suministro de agua por la red pública. Las autoridades llamaron a esa fecha el "día cero" y aplicaron restricciones severas al consumo urbano. La agricultura de la región, que comparte el sistema de embalses con la ciudad, vio reducidas sus asignaciones de agua [detalles y cifras a confirmar con fuentes oficiales].

El día cero no llegó, gracias a la reducción del consumo y al regreso de las lluvias. Pero la crisis dejó una lección que trasciende a la ciudad: cuando el agua escasea, la pregunta deja de ser cuánta agua quiere cada usuario y pasa a ser cuánta necesita, con qué evidencia y qué valor produce cada metro cúbico. Los

usuarios que pueden responder con datos negocian mejor su asignación. Los que no, la pierden.

Península de Santa Elena, una temporada seca

Escenario compuesto. La finca, la junta de regantes y los personajes son ficticios; los mecanismos y los métodos descritos son reales.

Una finca de frutales para exportación en la costa ecuatoriana riega por goteo con agua de un canal compartido con otras fincas. El encargado de riego sigue un calendario fijo: tantas horas por sector, tantos días por semana, el mismo esquema durante toda la temporada seca. Nunca falta agua en la finca, así que el esquema parece correcto.

Ese año, la junta de regantes anuncia que el caudal del canal será menor por la baja disponibilidad de la fuente y que las asignaciones se reducirán. El administrador de la finca protesta: necesita toda su agua. La junta le pregunta cuánta agua consume realmente su cultivo y cuánta aplica. Nadie en la finca lo sabe. El medidor de caudal de la entrada nunca se instaló.

Cuando un técnico revisa el sistema, encuentra dos problemas. En los sectores de suelo arenoso, el agua se pierde por debajo de las raíces porque los riegos son largos y espaciados. En los sectores de suelo arcilloso, los riegos frecuentes mantienen el suelo saturado y aumentan los problemas de enfermedades de raíz. En ninguno de los dos se riega según lo que la planta consume. La finca usa más agua de la que necesita en unos sectores, menos de la que necesita en otros, y no puede demostrar ninguna de las dos cosas.

Fase 2. El diagnóstico: por qué se riega mal aun cuando el agua escasea

2.1 El calendario fijo ignora la demanda de la planta

La cantidad de agua que un cultivo consume cambia cada día. Depende de la radiación solar, la temperatura, la humedad del aire, el viento y la etapa de desarrollo del cultivo. Un día nublado y húmedo, la planta consume mucho menos que un día soleado, seco y con viento. Un frutal en floración tiene necesidades distintas que en llenado de frutos. Un calendario de riego fijo aplica

la misma cantidad todos los días y, por definición, se equivoca casi siempre: en exceso los días de baja demanda y en defecto los de alta demanda.

2.2 El suelo no se ve

El agua aplicada no va directamente a la planta: se almacena en el suelo, de donde las raíces la extraen. Cada suelo tiene una capacidad distinta para retener agua. Un suelo arenoso retiene poca y la pierde rápido por drenaje; uno arcilloso retiene mucha y se satura con facilidad. Sin conocer la capacidad de retención del suelo de cada sector ni la profundidad de las raíces, el encargado de riego no puede saber cuánta agua aplicar en cada riego para reponer lo consumido sin perder el excedente.

2.3 Lo que no se mide no se puede defender

Muchas fincas no miden el agua que aplican. No tienen medidores de caudal, no registran los tiempos de riego por sector o no relacionan esos registros con el consumo del cultivo. Cuando aparece una restricción, una auditoría de un comprador o una discusión con otros usuarios de la cuenca, la finca no tiene datos para demostrar que usa el agua con eficiencia. Su posición se reduce a una afirmación.

2.4 El agua tiene valor, pero no tiene precio

En muchas zonas, el costo que paga el productor por el agua es bajo o se limita a la energía de bombeo y a la cuota de la junta de regantes. Ese costo no refleja el valor del agua cuando escasea. Si el agua es barata, el incentivo para medirla y ahorrarla es débil, hasta que una restricción la vuelve el recurso más escaso de la finca. En ese momento, la falta de datos convierte un problema de eficiencia en un problema de producción.

2.5 Una cuenca, muchas decisiones aisladas

El agua de una cuenca es compartida. Cada finca que riega en exceso reduce el agua disponible para las demás y, en algunos casos, contribuye a problemas de drenaje, salinización o contaminación aguas abajo. Las decisiones de riego se toman finca por finca, sin información sobre el balance de la cuenca. Es el mismo problema de los límites administrativos frente a los territorios funcionales que el capítulo 10 describió para la planificación agrícola.

Fase 3. La tesis: el riego como balance diario entre lo que el cultivo consume y lo que el suelo guarda

3.1 Cuánta agua consume el cultivo: la evapotranspiración

El consumo de agua de un cultivo se estima con la evapotranspiración, la suma del agua que se evapora del suelo y la que transpira la planta. La metodología de referencia internacional es la publicada por la FAO en su serie de riego y drenaje n.° 56 (Allen et al., 1998). Primero se calcula la evapotranspiración de referencia ET_0, que representa la demanda de agua de la atmósfera sobre un cultivo de referencia, con la ecuación de Penman-Monteith a partir de datos de radiación, temperatura, humedad y viento. Luego se ajusta al cultivo específico con un coeficiente de cultivo K_c, que varía según la etapa de desarrollo:

$$ET_c = K_c \times ET_0$$

Los datos meteorológicos necesarios pueden obtenerse de una estación en la finca, de estaciones cercanas o de productos satelitales y de reanálisis. Los coeficientes de cultivo se toman de la publicación de la FAO o de estudios locales, y se ajustan con la experiencia de cada finca. Con este cálculo, la finca sabe cada día cuánta agua consumió su cultivo.

3.2 Cuánta agua guarda el suelo: el balance hídrico

El suelo funciona como una cuenta de ahorro de agua. El balance diario del agua en la zona de raíces, expresado como agotamiento D_r (cuánta agua falta para llegar a la capacidad máxima de retención), es:

$$D_{r,t} = D_{r,t-1} - P_t - I_t + ET_{c,t} + DP_t$$

donde P_t es la precipitación efectiva, I_t el riego aplicado, $ET_{c,t}$ la evapotranspiración del cultivo y DP_t la percolación profunda, el agua que se pierde por debajo de las raíces cuando el suelo está saturado.

La cantidad total de agua que el suelo puede poner a disposición de las raíces depende de su capacidad de retención y de la profundidad de las raíces:

$$ADT = 1000\,(\theta_{CC} - \theta_{PMP})\,Z_r$$

donde ADT es el agua disponible total en milímetros, θ_{CC} y θ_{PMP} el contenido volumétrico de agua a capacidad de campo y en el punto de marchitez permanente, y Z_r la profundidad efectiva de las raíces en metros. Solo una fracción p de esa agua puede extraerse sin que el cultivo sufra estrés: el agua fácilmente aprovechable, $AFA = p \times ADT$ (Allen et al., 1998).

La regla de riego que se deriva de este balance es simple: regar cuando el agotamiento se acerca al agua fácilmente aprovechable, y aplicar la cantidad que lo devuelve a la capacidad de campo, sin excederla. En un suelo arenoso, con poca agua disponible, esto implica riegos cortos y frecuentes. En uno arcilloso, riegos más espaciados. Exactamente lo contrario de lo que hacía la finca del escenario.

3.3 Verificar el balance con sensores

El balance hídrico es un modelo y acumula errores con el tiempo. Los sensores de humedad del suelo, instalados a distintas profundidades en sectores representativos, permiten verificarlo y corregirlo. Es la lógica de la asimilación de datos del capítulo 19: el modelo proyecta el agotamiento cada día y los sensores lo ajustan cuando llega una medición. Con pocos sensores bien ubicados, uno o dos por tipo de suelo y por cultivo, el balance de toda la finca puede mantenerse calibrado.

Los sensores también revelan problemas que el balance no ve: un gotero obstruido, una presión insuficiente en el extremo de una línea, una zona donde el agua se acumula. Un patrón de humedad anormal en un sensor es una señal para revisar el sistema de riego en ese sector.

3.4 Cuánto rinde cada milímetro: la respuesta del cultivo al agua

No toda reducción de agua reduce el rendimiento en la misma proporción. La relación entre el déficit de agua y la pérdida de rendimiento se describe con el factor de respuesta del rendimiento al agua, propuesto por la FAO (Doorenbos y Kassam, 1979):

$$1 - \frac{Y_a}{Y_m} = K_y \left(1 - \frac{ET_a}{ET_m}\right)$$

donde Y_a y Y_m son el rendimiento real y el máximo, ET_a y ET_m la evapotranspiración real y la máxima, y K_y el factor de respuesta, que varía por

cultivo y por etapa. Un K_y mayor que 1 indica que el rendimiento cae más que proporcionalmente al déficit de agua; menor que 1, que cae menos.

Esta relación permite tomar decisiones cuando el agua no alcanza para todo. En las etapas en que el cultivo es poco sensible al déficit, se puede regar menos con poca pérdida de rendimiento. En las etapas sensibles, como la floración o el cuajado de frutos en muchos frutales, se concentra el agua disponible. Esta estrategia, conocida como riego deficitario controlado, aumenta la productividad del agua: más producción por cada metro cúbico aplicado.

3.5 El valor económico del agua

Con la respuesta del rendimiento al agua, la finca puede estimar el valor marginal del agua en cada sector y en cada etapa: cuánto ingreso adicional produce un metro cúbico más. Si $\Delta Y/\Delta W$ es el aumento de producción por unidad de agua adicional y P el precio del producto, el valor marginal del agua es:

$$VM_{agua} = P \times \frac{\Delta Y}{\Delta W} - c_{agua}$$

donde c_{agua} es el costo variable de aplicarla (energía, cuota, mano de obra). Cuando el agua es limitada, la regla de asignación eficiente dentro de la finca es repartirla de modo que su valor marginal sea parecido en todos los sectores: dar más agua a los sectores y etapas donde cada metro cúbico produce más valor y menos donde produce poco. Una finca que sigue un calendario fijo reparte el agua de la misma forma en todas partes y desperdicia valor.

3.6 El dato de agua fuera de la finca

Los datos de consumo de agua tienen usos más allá del riego.

- Ante la junta de regantes o la autoridad del agua: una finca que puede demostrar cuánto consume su cultivo, cuánto aplica y qué eficiencia tiene, negocia su asignación con evidencia y no con presión.

- Ante los compradores: cada vez más compradores internacionales incluyen el agua en sus evaluaciones de sostenibilidad. La huella hídrica de un producto, que distingue el agua de lluvia, el agua de riego y el agua necesaria para asimilar contaminantes, tiene una metodología establecida (Hoekstra et al., 2011). Un dato de agua de alto nivel, en el

sentido de la jerarquía de calidad del capítulo 8, sostiene esas evaluaciones.

- Ante los financiadores: un proyecto de riego tecnificado con datos de consumo y de productividad del agua presenta un caso de inversión más sólido ante bancos y fondos, con la lógica del capítulo 2.

3.7 La cuenca como sistema compartido

La eficiencia de una finca tiene un límite: si las demás usuarias de la cuenca no gestionan su agua, el ahorro de una puede ser absorbido por el exceso de otras. La gestión del agua a escala de cuenca requiere datos compartidos: caudales disponibles, demandas de los cultivos en cada zona, asignaciones y consumos reales. Las estimaciones de evapotranspiración por satélite, disponibles en portales públicos como WaPOR de la FAO para varias regiones del mundo [cobertura para Ecuador a confirmar], permiten estimar el consumo de agua de los cultivos de toda una zona sin depender de que cada finca lo reporte.

Una junta de regantes o una autoridad de cuenca con estos datos puede hacer lo que el capítulo 10 propuso para el territorio: asignar el agua según la demanda real de los cultivos, priorizar en épocas de escasez según criterios explícitos y medir el resultado. La finca que ya mide su consumo es la que mejor puede participar en ese sistema.

3.8 La finca de frutales, reescrita

Volvamos a la costa con un sistema de riego basado en datos.

La finca instala un medidor de caudal en la entrada y en cada sector, una estación meteorológica sencilla y sensores de humedad del suelo en dos sectores arenosos y dos arcillosos. Un técnico caracteriza la capacidad de retención de cada tipo de suelo y la profundidad de raíces del cultivo. Con esos datos, el sistema calcula cada día la evapotranspiración del cultivo y el agotamiento del agua en cada sector, y recomienda cuándo y cuánto regar.

En los sectores arenosos, los riegos pasan a ser cortos y diarios; en los arcillosos, más espaciados. Los sensores confirman que el suelo arenoso ya no pierde agua por debajo de las raíces y que el arcilloso ya no permanece saturado. La incidencia de problemas de raíz en los sectores arcillosos baja en la temporada siguiente.

Cuando la junta de regantes anuncia la reducción del caudal, la finca presenta su consumo medido, la evapotranspiración calculada de su cultivo y su eficiencia de aplicación. Con la reducción, aplica riego deficitario controlado: reduce el agua en las etapas de baja sensibilidad y la concentra en la floración y el cuajado. El rendimiento baja menos que la reducción del agua. La finca termina la temporada con menos agua y con una producción por metro cúbico mayor que la del año anterior.

Fase 4. El framework de acción: cinco pasos para regar con datos

Paso	Acción concreta	Responsable	Evidencia de cumplimiento	Plazo de referencia
1. Medir el agua aplicada	Instalar medidores de caudal en la entrada y, cuando sea posible, por sector; registrar volúmenes y tiempos de riego	Administrador de la finca con el encargado de riego	Registro diario o semanal del agua aplicada por sector	2 a 4 semanas
2. Caracterizar suelos y cultivo	Determinar la capacidad de retención de agua de cada tipo de suelo, la profundidad de raíces y los coeficientes de cultivo por etapa	Técnico con laboratorio de suelos	Ficha de suelo y cultivo por sector	1 a 2 meses
3. Calcular el balance hídrico diario	Calcular la evapotranspiración del cultivo con datos meteorológicos y el agotamiento del agua del suelo por sector; aplicar la regla de riego según el agua fácilmente aprovechable	Técnico o analista de datos	Recomendación diaria de riego por sector y registro de su cumplimiento	1 mes después del paso 2

Paso	Acción concreta	Responsable	Evidencia de cumplimiento	Plazo de referencia
4. Verificar con sensores y ajustar	Instalar sensores de humedad en sectores representativos; usar sus lecturas para corregir el balance y detectar fallas del sistema de riego	Técnico con proveedor de sensores	Balance calibrado con sensores e informe de fallas detectadas	1 a 2 meses
5. Asignar el agua por valor y compartir los datos	Estimar la respuesta del rendimiento al agua por etapa; en escasez, priorizar las etapas y sectores de mayor valor marginal; presentar los datos de consumo y eficiencia a la junta de regantes, compradores y financiadores	Gerencia con el técnico	Plan de riego deficitario para escasez e informe de consumo y productividad del agua	Antes de la siguiente temporada seca

Regla de cierre para el directorio o el propietario: pregunte cuántos metros cúbicos de agua aplicó la finca en la última temporada, cuántos consumió realmente el cultivo y cuánto producto obtuvo por metro cúbico. Si ninguna de las tres cifras existe, la finca no podrá defender su agua el día que escasee.

Nota del autor: la crisis hídrica de Ciudad del Cabo de 2017-2018 es un hecho documentado; los detalles sobre las asignaciones agrícolas deben confirmarse con fuentes oficiales antes de la publicación. El escenario de la finca de frutales y de la junta de regantes es una construcción narrativa; los métodos de cálculo de evapotranspiración, balance hídrico, respuesta del rendimiento al agua y valor marginal del agua descritos son reales y aplicables.

Parte IV. Operaciones de la cadena

Capítulo 13. Procurement Analytics: comprar materia prima biológica con datos

En la agroindustria, el margen se gana o se pierde en la compra. La planta solo ejecuta lo que la compra ya decidió.

Esquema del capítulo

- Por qué la compra de materia prima agrícola se decide por costumbre: precio por kilo frente a costo por kilo útil, proveedores sin evaluación y riesgo de precio sin gestionar.
- La volatilidad como condición permanente: lo que enseñó el ciclo de precios del cacao.
- Analítica de compras: costo efectivo, evaluación de proveedores con bio-datos, cobertura de precio, asignación de volumen y pronóstico de abastecimiento.

Fase 1. El gancho: el año en que el cacao valió oro y el siguiente

Mercados internacionales, 2024 a 2026

Durante décadas, los contratos de futuros de cacao se negociaron mayoritariamente entre unos 2.000 y 4.000 dólares por tonelada. A partir de 2024, problemas de producción en Costa de Marfil y Ghana, los dos mayores productores del mundo, desencadenaron un alza sin precedentes (Primicias, 2025). En 2025, los futuros superaron los 10.000 dólares por tonelada y llegaron a picos más altos a inicios de ese año (El Oriente, s. f.). Ecuador, con una oferta en crecimiento, vio cómo el cacao se convertía en uno de sus principales productos de exportación no petroleros, con ingresos récord.

El ciclo no terminó ahí. A inicios de 2026, la recuperación productiva en África Occidental estabilizó los precios internacionales. En enero de 2026, el valor de

las exportaciones ecuatorianas de cacao cayó más de la mitad frente al mismo mes del año anterior (Zumba, 2026).

Para quienes compran cacao como materia prima, el ciclo completo fue una prueba de resistencia. Primero tuvieron que comprar a precios que multiplicaban los de su presupuesto. Después, quienes habían comprado o comprometido volumen en el pico vieron caer el valor de su inventario.

Una chocolatería de origen en Guayaquil

Escenario compuesto. La empresa y los personajes son ficticios; los mecanismos de compra, riesgo y analítica descritos son reales.

Una chocolatería de origen mediana elabora barras y coberturas para el mercado nacional y para dos distribuidores en el exterior. Su jefa de compras, Daniela Ortega, compra cacao en grano a cinco proveedores con los que la empresa trabaja desde hace años. El criterio de compra es simple y heredado: se compra al proveedor que ofrece el menor precio por kilo y que cumple la humedad y la prueba de corte en la recepción.

Cuando el precio empezó a subir, la gerencia pidió asegurar abastecimiento. Ortega cerró compromisos de compra a precio fijo para varios meses con su proveedor más grande, que ya representaba casi la mitad del volumen. El precio pactado era alto, pero menor que el del mercado en ese momento. En la reunión de gerencia, la decisión se celebró como un acierto.

Ocho meses después, el precio internacional había bajado de forma marcada. La empresa seguía recibiendo cacao al precio pactado, muy por encima del precio al que sus competidores compraban en el mercado. Su costo de materia prima la dejó fuera de una licitación de coberturas para una cadena de pastelerías. Al mismo tiempo, el proveedor grande, presionado por su propia caja, empezó a entregar lotes con mayor humedad y más granos defectuosos. Cumplían en el límite la especificación de recepción, pero el rendimiento en la planta bajó: se necesitaba más grano para producir la misma cantidad de licor de cacao.

Cuando la gerencia pidió a Ortega un análisis del problema, ella descubrió que no tenía cómo hacerlo. Sabía cuánto había pagado por kilo a cada proveedor, pero no cuánto le había costado cada kilo de licor de cacao producido con el grano de cada uno. No sabía qué proporción de su riesgo estaba concentrada

en un solo proveedor. Y no tenía ninguna herramienta para decidir cuánto volumen comprometer a precio fijo y cuánto dejar abierto.

Fase 2. El diagnóstico: por qué la compra agrícola pierde dinero sin que nadie lo vea

2.1 El precio por kilo no es el costo por kilo

La mayoría de las empresas agroindustriales comparan proveedores por el precio por kilo de materia prima. Ese número es fácil de ver, fácil de negociar y engañoso. Lo que importa a la empresa es el costo por unidad de producto útil que sale de la planta.

Un kilo de cacao con exceso de humedad, granos defectuosos o impurezas rinde menos licor. Un lote con fermentación irregular exige más clasificación o se destina a un producto de menor valor. Un proveedor con entregas impuntuales obliga a mantener más inventario o a comprar de urgencia a otro precio. Cada uno de estos efectos es un costo que no aparece en la factura del proveedor y que tampoco aparece, en la mayoría de los casos, en ningún informe de compras.

Este es el concepto de costo total de adquisición: el precio pagado más todos los costos que el producto genera hasta convertirse en valor para la empresa.

2.2 La calidad promedio esconde la variabilidad

Cuando una empresa evalúa la calidad de sus proveedores, suele mirar el promedio: la humedad media de las entregas, el porcentaje medio de granos bien fermentados. El promedio esconde lo que más afecta a una planta: la variabilidad. Un proveedor con una humedad promedio aceptable pero con lotes muy variables obliga a ajustar el proceso constantemente, genera reprocesos y aumenta el riesgo de que un lote fuera de especificación pase la recepción.

En términos de proceso, dos proveedores con la misma media y distinta desviación estándar no son equivalentes. El que entrega lotes más homogéneos reduce el costo de control y el costo de no calidad de la planta, aunque su precio por kilo sea algo mayor.

2.3 Concentración: el riesgo que no se mide

La chocolatería tenía casi la mitad de su volumen en un solo proveedor. Esa concentración no apareció en ningún informe porque nadie la midió. Cuando el proveedor empezó a deteriorar su calidad, la empresa no tenía alternativas listas para absorber ese volumen.

La concentración puede medirse con el índice de Herfindahl-Hirschman, que se usa en análisis de competencia para medir la concentración de mercado (U.S. Department of Justice y Federal Trade Commission, 2023). Aplicado a la cartera de proveedores, con s_j como la participación porcentual del proveedor j en el volumen comprado:

$$HHI = \sum_j s_j^2$$

El índice va de valores cercanos a cero, cuando el volumen está muy repartido, a 10.000, cuando todo el volumen proviene de un solo proveedor. Con cinco proveedores de igual tamaño, el índice es 2.000. La chocolatería, con un proveedor cercano al 50 % y el resto repartido entre cuatro, tenía un índice mucho más alto, señal de una cartera concentrada y vulnerable.

2.4 El riesgo de precio sin gestionar

Las empresas que compran materias primas con precios internacionales volátiles enfrentan dos riesgos opuestos. Si no fijan precio, quedan expuestas a las alzas. Si fijan precio para todo su volumen, quedan expuestas a las bajas, como le pasó a la chocolatería. La decisión de cuánto fijar, por cuánto tiempo y con qué instrumento es una decisión de gestión de riesgo que en muchas empresas medianas se toma por intuición en una reunión de gerencia.

Además, el precio local que paga una empresa en Ecuador no es igual al precio de los futuros internacionales. Entre ambos existe una diferencia, llamada base, que depende de la calidad, del origen, de la logística y de la oferta y demanda local:

$$\text{Base}_t = P_t^{local} - P_t^{futuro}$$

La base también varía. Una empresa que se protege con instrumentos ligados al precio internacional sigue expuesta a los cambios de la base, el mismo

concepto de riesgo de base que el capítulo 2 describió para el seguro paramétrico.

2.5 El efecto látigo

Las decisiones de compra reaccionan a las señales de la demanda y de los precios. Cuando cada eslabón de la cadena amplifica esas señales (compra de más cuando ve que sube la demanda, compra de menos cuando baja), las fluctuaciones crecen a medida que se alejan del consumidor final. Este fenómeno, conocido como efecto látigo, fue documentado en cadenas de suministro industriales y explicado por la distorsión de la información entre eslabones (Lee et al., 1997).

En la compra de materia prima agrícola, el efecto látigo se combina con la estacionalidad de las cosechas y con la volatilidad de precios. Una empresa que compra de más en el pico de precio por miedo al desabastecimiento, y luego compra de menos cuando los precios bajan, amplifica sus costos en lugar de suavizarlos.

2.6 El costo de comprar a ciegas

Falla	Síntoma	Costo oculto
Comparar por precio por kilo	Se elige al proveedor más barato en factura	Menor rendimiento, más reprocesos, más rechazos de producto final
Mirar solo el promedio de calidad	Proveedores con medias aceptables y lotes muy variables	Ajustes constantes de proceso, mayor costo de control, riesgo de no conformidades
No medir la concentración	Dependencia de uno o dos proveedores	Interrupción del abastecimiento o pérdida de poder de negociación
Gestionar el precio por intuición	Todo fijo o todo abierto, según el humor del mercado	Pérdidas por alzas o por bajas que podían acotarse

Falla	Síntoma	Costo oculto
No pronosticar el abastecimiento	Compras de urgencia, exceso de inventario	Precios de urgencia, capital inmovilizado, deterioro del grano almacenado

Fase 3. La tesis: la compra como decisión cuantificada con bio-datos

3.1 El costo efectivo por unidad útil

La primera herramienta de la analítica de compras es reemplazar el precio por kilo por un costo efectivo por unidad de producto útil. Para un proveedor j, una formulación simple es:

$$C_j^{ef} = \frac{P_j + L_j + Q_j}{\eta_j}$$

donde P_j es el precio pagado por kilo de materia prima, L_j el costo logístico por kilo (transporte, recepción, manipulación), Q_j el costo de calidad por kilo (análisis, clasificación, reprocesos, rechazos atribuibles al proveedor) y η_j el rendimiento: kilos de producto útil (por ejemplo, licor de cacao) obtenidos por kilo de materia prima recibida.

El rendimiento η_j es el término decisivo y el más difícil de obtener. Requiere que la planta pueda atribuir su producción al proveedor de origen, lo que solo es posible si la identidad del lote se conserva desde la recepción hasta el proceso. Esa es la matriz de composición del capítulo 1, aplicada dentro de la planta. Sin ella, la empresa no puede saber qué proveedor le rinde más, y seguirá comprando al más barato en factura.

En la práctica, el cálculo puede empezar con aproximaciones: rendimiento estimado a partir de la humedad, del porcentaje de defectos y de la cáscara de cada lote, y validado periódicamente con corridas de producción separadas por proveedor.

3.2 La ficha del proveedor con bio-datos

La evaluación de proveedores debe construirse con los datos que la empresa ya genera en recepción y en planta, organizados por proveedor y por lote. Una ficha de proveedor útil incluye cuatro dimensiones.

Dimensión	Indicadores	Fuente
Costo	Costo efectivo por unidad útil; precio frente al promedio del mercado	Compras, recepción, planta
Calidad	Media y desviación estándar de humedad, fermentación, defectos y contaminantes; porcentaje de lotes fuera de especificación	Recepción y laboratorio (bio-datos del capítulo 1)
Cumplimiento	Puntualidad, cumplimiento de volúmenes comprometidos, documentación completa	Compras y bodega
Riesgo	Participación en el volumen total, índice de plausibilidad productiva (capítulo 4), cobertura de trazabilidad hasta el origen (capítulo 8), alertas de cumplimiento	Compras, calidad, sostenibilidad

La variabilidad de la calidad puede expresarse con índices de capacidad de proceso, ya conocidos en gestión de calidad. Para una especificación con límite superior LSE (por ejemplo, humedad máxima), el índice unilateral es:

$$C_{pk} = \frac{LSE - \mu}{3\sigma}$$

donde μ y σ son la media y la desviación estándar de la variable en las entregas del proveedor. Un proveedor con un índice alto entrega lotes consistentemente alejados del límite; uno con un índice bajo entrega lotes que rozan o cruzan el límite con frecuencia. Este indicador traduce la variabilidad a un número que un comité de compras puede comparar.

3.3 Clasificar las materias primas antes de gestionarlas

No todas las materias primas requieren la misma estrategia. La matriz propuesta por Kraljic (1983) clasifica los insumos según su impacto en el resultado de la empresa y según el riesgo de abastecimiento, y asigna a cada cuadrante una estrategia distinta.

Cuadrante	Impacto en resultado	Riesgo de abastecimiento	Ejemplo en una chocolatería	Estrategia
Estratégico	Alto	Alto	Cacao fino de aroma de origen específico	Relación de largo plazo, desarrollo de proveedores, trazabilidad completa, gestión activa del precio
Apalancamiento	Alto	Bajo	Azúcar, leche en polvo	Negociación por volumen, licitaciones, comparación frecuente de precios
Cuello de botella	Bajo	Alto	Empaque especial importado	Asegurar abastecimiento, inventario de seguridad, proveedores alternativos
No crítico	Bajo	Bajo	Insumos de limpieza	Simplificar la compra y reducir el costo administrativo

En la chocolatería, el cacao era un insumo estratégico gestionado como si fuera de apalancamiento: se compraba al mejor precio de factura, sin relación de desarrollo ni gestión del riesgo.

3.4 Gestionar el precio: cobertura escalonada y fórmulas de precio

La gestión del riesgo de precio en una empresa mediana no requiere operar en bolsas internacionales. Requiere decidir con método qué parte del volumen se fija, cuándo y cómo. Tres herramientas cubren la mayoría de los casos.

a) Contratos con fórmula de precio. En lugar de fijar un precio absoluto, el contrato fija un diferencial sobre una referencia pública (por ejemplo, el precio de los futuros internacionales en una fecha determinada) más un ajuste por calidad. La empresa fija la base, que conoce mejor y que varía menos, y deja el precio internacional para fijarlo en el momento que decida. Esta estructura es común en el comercio de materias primas agrícolas.

b) Cobertura escalonada. En lugar de fijar todo el volumen en una sola fecha, la empresa fija una parte del volumen de los meses siguientes en varios momentos, según una regla escrita. Por ejemplo: fijar una proporción del volumen del mes $t + 3$ cada mes, y aumentar esa proporción a medida que el mes se acerca. El resultado es un precio promedio que suaviza las alzas y las bajas, y que elimina la tentación de acertar el mejor momento del mercado.

c) Razón de cobertura de varianza mínima. Para las empresas que sí pueden usar futuros u otros derivados, directamente o a través de un intermediario, la proporción del volumen que conviene cubrir para minimizar la varianza del costo puede estimarse como:

$$h^* = \rho \, \frac{\sigma_S}{\sigma_F}$$

donde σ_S es la desviación estándar de los cambios del precio local, σ_F la de los cambios del precio del futuro y ρ la correlación entre ambos (Hull, 2021). Si la correlación entre el precio local y el internacional es baja, la cobertura con futuros protege poco, y la empresa debe preferir contratos locales a precio fijo o con fórmula.

La regla de gobierno que acompaña estas herramientas es una política de cobertura aprobada por el directorio: qué porcentaje mínimo y máximo del volumen puede fijarse para cada horizonte, quién puede decidir dentro de esos límites y cómo se informa el resultado. Con esa política, la decisión de la chocolatería de fijar casi todo su volumen con un solo proveedor por varios meses habría estado fuera de los límites permitidos.

3.5 Asignar el volumen entre proveedores

Con el costo efectivo, la ficha de calidad y una medida de riesgo por proveedor, la asignación del volumen deja de ser una decisión por costumbre y se puede plantear como un problema de optimización:

$$\min_{\mathbf{q}} \sum_{j} q_j \, \mathbb{E}\left[C_j^{ef}\right] + \lambda \cdot \text{Riesgo}(\mathbf{q})$$

sujeto a que la suma de las cantidades asignadas q_j cubra la demanda, que cada proveedor reciba un volumen dentro de su capacidad y de un mínimo que mantenga la relación comercial, y que la concentración (por ejemplo, el índice de Herfindahl-Hirschman) no supere un límite definido. El término de riesgo puede incluir la variabilidad del costo efectivo de cada proveedor, su riesgo de incumplimiento y la correlación entre proveedores de una misma zona expuestos al mismo clima. El parámetro λ expresa cuánto está dispuesta la empresa a pagar por reducir el riesgo.

El modelo no reemplaza el criterio comercial. Lo hace explícito. Si la gerencia decide asignar más volumen a un proveedor por razones estratégicas, el modelo muestra cuánto cuesta esa decisión en términos de costo esperado y de riesgo.

3.6 Pronosticar el abastecimiento y dimensionar el inventario

La compra de materia prima agrícola enfrenta dos fuentes de incertidumbre: la demanda de producto terminado y la oferta de materia prima, que depende de la cosecha. Un pronóstico básico combina el calendario de cosecha de cada zona, el historial de entregas de cada proveedor por mes y la demanda proyectada de producción.

El inventario de seguridad necesario para cubrir la variabilidad de la demanda durante el tiempo de reposición puede estimarse con la fórmula clásica de gestión de inventarios (Silver et al., 2017):

$$SS = z\,\sigma_d\sqrt{L}$$

donde z corresponde al nivel de servicio deseado, σ_d es la desviación estándar de la demanda por periodo y L el tiempo de reposición en periodos. En materias primas biológicas, esta fórmula debe complementarse con dos restricciones: la vida útil del insumo almacenado (el grano de cacao se deteriora si la humedad o la temperatura no se controlan) y el costo del capital inmovilizado, que se

vuelve muy alto cuando los precios son elevados. Un inventario de seguridad calculado en un año de precios bajos puede ser financieramente insostenible en un año de precios altos.

Para materias primas perecederas compradas por campaña, el problema del vendedor de periódicos ofrece un criterio útil. La cantidad óptima a comprar es aquella cuya probabilidad acumulada de demanda iguala la razón crítica:

$$F(Q^*) = \frac{p - c}{p - s}$$

donde p es el valor del producto cuando se vende, c el costo de la materia prima y s el valor de rescate de lo que sobra. Cuando el costo de la materia prima sube y su valor de rescate cae, la razón crítica baja y la cantidad óptima a comprar se reduce. Es la formalización de lo que la chocolatería debió hacer en el pico de precios: comprar menos de lo que su miedo al desabastecimiento le pedía.

3.7 La compra conectada con el fraude y el ESG

La analítica de compras comparte sus datos con los capítulos anteriores. El índice de plausibilidad productiva del capítulo 4 detecta proveedores que entregan más de lo que pueden producir, una señal que también interesa a compras. La cobertura de trazabilidad hasta el origen del capítulo 8 es un criterio de asignación de volumen cuando los clientes exigen datos ESG. Integrar estos indicadores en la ficha del proveedor evita que compras premie con más volumen a un proveedor que calidad o sostenibilidad consideran riesgoso.

3.8 La chocolatería, reescrita

Volvamos a la chocolatería con una función de analítica de compras básica.

La empresa conserva la identidad del proveedor desde la recepción hasta el tostado. Cada mes calcula el costo efectivo por kilo de licor de cacao para cada proveedor. El primer cálculo produce una sorpresa: el proveedor más barato en factura es el tercero en costo efectivo, por su menor rendimiento y su mayor variabilidad de humedad. Uno de los proveedores pequeños, algo más caro por kilo, resulta el más económico por kilo de licor.

El directorio aprueba una política de cobertura: entre el 30 % y el 60 % del volumen de los tres meses siguientes puede fijarse, en tramos mensuales, con contratos de fórmula de precio; ningún proveedor puede superar el 35 % del

volumen anual. Cuando los precios suben, Ortega fija tramos según la regla y no según el pánico. Cuando los precios bajan, solo una parte del volumen está comprometida a precio alto, y la parte abierta se compra al nuevo precio de mercado. El costo promedio de la empresa no es el más bajo posible en ningún mes, pero tampoco el más alto, y su variabilidad es mucho menor que la de sus competidores.

Cuando el proveedor grande empieza a deteriorar su calidad, la ficha lo detecta en dos meses por la caída de su índice de capacidad de humedad. Como ya tiene un tope de participación, la empresa reasigna volumen a los proveedores con mejor costo efectivo sin poner en riesgo su abastecimiento.

Fase 4. El framework de acción: cinco pasos para comprar materia prima con datos

Paso	Acción concreta	Responsable	Evidencia de cumplimiento	Plazo de referencia
1. Analizar el gasto y la concentración	Consolidar las compras de los últimos 12 a 24 meses por insumo y proveedor; calcular la participación de cada proveedor y el índice de concentración; clasificar los insumos en la matriz de Kraljic	Compras con finanzas	Informe de gasto por insumo y proveedor, índice de concentración y clasificación de insumos	3 semanas

Paso	Acción concreta	Responsable	Evidencia de cumplimiento	Plazo de referencia
2. Calcular el costo efectivo de los insumos estratégicos	Conservar la identidad del proveedor desde la recepción hasta el proceso para los insumos estratégicos; estimar rendimiento, costo de calidad y costo logístico por proveedor	Compras, calidad y producción	Costo efectivo por unidad útil para cada proveedor estratégico	1 a 2 meses
3. Construir la ficha del proveedor	Reunir indicadores de costo, calidad (media, variabilidad e índice de capacidad), cumplimiento y riesgo por proveedor; revisarla en un comité mensual	Compras con calidad	Ficha actualizada y acta del comité de compras	1 mes después del paso 2
4. Aprobar una política de cobertura y concentración	Definir porcentajes mínimos y máximos de volumen a fijar por horizonte, instrumentos permitidos (fórmula de precio, contratos a plazo, derivados), tope de participación por proveedor y responsables	Gerencia general y finanzas, con aprobación del directorio	Política aprobada y primer informe de cumplimiento	4 semanas

Paso	Acción concreta	Responsable	Evidencia de cumplimiento	Plazo de referencia
5. Asignar volumen y dimensionar inventario con modelo	Usar el costo efectivo, la ficha y la política para asignar el volumen de la siguiente campaña; calcular el inventario de seguridad considerando vida útil y costo de capital	Compras con analista de datos	Plan de compras de la campaña con asignación por proveedor, inventario objetivo y supuestos documentados	Antes de la siguiente campaña

Regla de cierre para el directorio: pida a compras el costo por unidad de producto terminado atribuible a cada proveedor estratégico. Si la respuesta solo incluye el precio por kilo de la factura, la empresa está eligiendo proveedores con la mitad de la información.

Nota del autor: el ciclo de precios internacionales del cacao entre 2024 y 2026 está documentado en las fuentes periodísticas citadas, que a su vez se basan en datos del Banco Central del Ecuador y de los mercados de futuros; para la versión final conviene sustituirlas por las series oficiales (Banco Central del Ecuador, ICCO o la bolsa de futuros correspondiente). El escenario de la chocolatería de Guayaquil es una construcción narrativa; las herramientas de analítica de compras descritas son reales y aplicables.

Capítulo 14. Pronóstico de cosecha: vender lo que todavía está en el árbol

Quien sabe antes cuánto se va a cosechar no necesita adivinar el precio: lo negocia.

Esquema del capítulo

- Por qué las empresas comprometen volúmenes que no tendrán: pronósticos de opinión, incentivos para exagerar y ciclos biológicos que se ignoran.
- La cosecha como variable que se puede estimar con meses de anticipación en cultivos perennes.
- Arquitectura de pronóstico: conteo fenológico con muestreo estratificado, covariables satelitales y climáticas, actualización a lo largo de la temporada, evaluación honesta del error y compromisos dimensionados según la incertidumbre.

Fase 1. El gancho: el trigo que nadie vio comprar y el contrato que no se pudo cumplir

Washington y Moscú, 1972

En 1972, la Unión Soviética enfrentó una mala cosecha de granos. En pocas semanas, compradores soviéticos adquirieron grandes volúmenes de trigo y otros granos a empresas comercializadoras estadounidenses, en buena parte a precios bajos y con apoyo de los subsidios a la exportación vigentes en Estados Unidos. Cuando la magnitud de las compras se hizo pública, los precios internacionales del trigo subieron con fuerza. El episodio se conoció en la prensa estadounidense como "el gran robo del grano" [fuentes históricas y detalles a confirmar].

La lección que extrajeron las autoridades estadounidenses fue que no podían depender de la información que otros países decidían publicar sobre sus

cosechas. En los años siguientes, la NASA, el Departamento de Agricultura y la agencia oceánica y atmosférica de Estados Unidos desarrollaron el Experimento de Inventario de Cultivos en Grandes Áreas (LACIE), que usó imágenes del satélite Landsat y datos climáticos para estimar la producción de trigo en distintas regiones del mundo (MacDonald y Hall, 1980). Fue uno de los primeros programas que trató la cosecha futura como una variable que se podía medir desde fuera, con método, antes de que se cosechara.

Guayaquil, un trimestre después de una firma

Escenario compuesto. La exportadora, los compradores y los personajes son ficticios; los mecanismos biológicos, comerciales y estadísticos descritos son reales.

Una exportadora mediana de cacao recibe de un comprador europeo una oferta atractiva: un contrato de venta a precio fijo por un volumen grande, con entrega en el siguiente trimestre. Para decidir, el gerente comercial consulta a sus principales acopiadores y técnicos de campo. Todos coinciden en que la floración fue buena y en que la cosecha será abundante. Suman sus estimaciones, aplican un pequeño descuento por prudencia y firman.

Dos meses después, las entregas están por debajo de lo previsto. Un periodo seco más largo de lo habitual en la etapa de llenado de las mazorcas redujo el número de frutos que llegaron a madurar y su tamaño. Algunos acopiadores, que habían estimado alto para asegurar que la exportadora les comprara más volumen, ahora venden parte de su cacao a otros compradores que pagan más. La exportadora tiene que comprar cacao en el mercado al contado, a un precio mayor que el de su contrato, para cumplir con su cliente. La operación que parecía rentable termina con pérdida.

El problema no fue el clima, que nadie controla. Fue que la decisión de comprometer volumen se tomó con un pronóstico que no tenía método, no tenía una medida de su incertidumbre y se construyó con información de personas que tenían incentivos para inflarla.

Fase 2. El diagnóstico: por qué se compromete lo que no se tendrá

2.1 El pronóstico por opinión

En la mayoría de las empresas agroindustriales medianas, el pronóstico de cosecha se construye sumando estimaciones de técnicos, acopiadores y productores. Estas estimaciones tienen valor, porque quienes las hacen conocen el campo, pero tienen tres limitaciones: no tienen un método común, no expresan su incertidumbre y no se evalúan después contra lo que efectivamente se cosechó. Sin evaluación, nadie sabe si los estimadores tienden a sobreestimar, a subestimar o a acertar.

2.2 Los incentivos de quien informa

Las personas que informan una estimación de cosecha tienen intereses en el resultado. Un acopiador puede sobreestimar para asegurar que la exportadora le compre o le adelante dinero. Un productor puede subestimar para negociar mejor el precio o para evitar compromisos. Un técnico de campo puede ser optimista porque la cosecha refleja la calidad de su asistencia. Estos sesgos no son deshonestidad: son el resultado previsible de pedir información a quien se ve afectado por ella. El problema es tratarla como si fuera neutral.

2.3 La biología da señales con meses de anticipación

En cultivos perennes como el cacao, el banano o el café, una parte importante de la cosecha futura ya está en la planta mucho antes de la cosecha. En el cacao, por ejemplo, las mazorcas tardan varios meses desde la polinización de la flor hasta la madurez [duración por material genético y zona a confirmar]. Esto significa que, en cualquier momento de la temporada, existe en los árboles un inventario de frutos en distintas etapas de desarrollo que determinará buena parte de la cosecha de los meses siguientes.

Ese inventario biológico puede contarse. Los frutos pequeños tienen una probabilidad de llegar a cosecha menor que los grandes, por pérdidas naturales, plagas, enfermedades o estrés, pero esas probabilidades se pueden estimar. Una empresa que no cuenta el inventario biológico está ignorando la mejor información disponible sobre su abastecimiento futuro.

2.4 El clima entra con retraso

Las condiciones climáticas afectan la cosecha con retrasos que dependen de la etapa del cultivo. Una sequía durante la floración reduce el número de frutos futuros; una sequía durante el llenado reduce el tamaño y el peso de los frutos existentes; un exceso de lluvia en la etapa de maduración puede aumentar las enfermedades. Un pronóstico que no relaciona el clima de cada periodo con la etapa del cultivo en ese periodo pierde gran parte de la información climática.

2.5 El pronóstico como cifra única

Aun cuando el pronóstico tiene método, suele comunicarse como una cifra única: "esperamos tantas toneladas". Una cifra única no dice si la incertidumbre es de un 5 % o de un 40 %, y esa diferencia determina cuánto volumen se puede comprometer con seguridad. La decisión del gerente de la exportadora habría sido distinta si hubiera sabido que el rango plausible de su abastecimiento incluía volúmenes muy por debajo de su compromiso.

2.6 Lo que cuesta equivocarse

El error de pronóstico tiene costos asimétricos. Sobreestimar el abastecimiento lleva a comprometer ventas que no se pueden cumplir, con compras de emergencia al contado, penalidades o pérdida de clientes. Subestimarlo lleva a vender en el mercado al contado lo que se pudo vender con contrato, o a no aprovechar una oportunidad comercial. Estos costos no son iguales, y el pronóstico debe usarse de una forma que los tenga en cuenta.

Fase 3. La tesis: el pronóstico como estimación estadística que se actualiza y se evalúa

3.1 Contar el inventario biológico con muestreo estratificado

La base del pronóstico en cultivos perennes es el conteo de frutos por etapa de desarrollo en una muestra de plantas. Para que el conteo represente a toda la superficie, el muestreo se organiza por estratos: grupos de parcelas homogéneas por zona, edad de plantación, material genético y manejo. En cada estrato h se seleccionan al azar parcelas y, dentro de ellas, plantas, y se cuentan los frutos en cada etapa.

La producción esperada del estrato en el horizonte de pronóstico se estima a partir de los conteos, de la probabilidad de que un fruto de cada etapa llegue a cosecha y del peso esperado por fruto:

$$\hat{Y}_h = N_h \sum_e \bar{f}_{h,e} \;\; s_e \;\; w_e$$

donde N_h es el número de plantas del estrato, $\bar{f}_{h,e}$ el número promedio de frutos por planta en la etapa e según la muestra, s_e la probabilidad de que un fruto de esa etapa llegue a cosecha en el horizonte y w_e el peso de grano seco esperado por fruto cosechado. La producción total es la suma de los estratos, $\hat{Y} = \sum_h \hat{Y}_h$.

El muestreo estratificado tiene una ventaja estadística conocida: si los estratos agrupan parcelas parecidas entre sí, la varianza de la estimación total es menor que con un muestreo aleatorio simple del mismo tamaño (Cochran, 1977). La varianza de la estimación de la media en cada estrato, s_h^2/n_h, se combina para obtener la incertidumbre total, a la que se agrega la incertidumbre de los parámetros s_e y w_e.

Los parámetros de supervivencia y de peso por fruto se estiman con datos propios: siguiendo durante una o dos temporadas una muestra de frutos marcados desde su etapa temprana hasta la cosecha. Ese seguimiento es el bio-dato de base del pronóstico, y mejora cada año.

3.2 Covariables satelitales y climáticas

El conteo de frutos se complementa con variables que se pueden observar en toda la superficie y no solo en la muestra. Los índices de vegetación de las imágenes satelitales describen el vigor de las plantaciones; los datos de precipitación y temperatura por periodo permiten estimar el efecto del clima según la etapa del cultivo. Investigaciones con cultivos anuales han mostrado que es posible estimar rendimientos a escala de parcela combinando imágenes satelitales con modelos de cultivo (Lobell et al., 2015). En cultivos perennes con sombra o con dosel cerrado, como el cacao bajo sombra, la señal satelital es más débil y debe validarse con cuidado.

Las covariables entran al pronóstico de dos maneras. La primera es ajustar las probabilidades de supervivencia de los frutos según el clima esperado: un periodo seco en la etapa de llenado reduce s_e para los frutos que están en esa etapa. La segunda es extender la estimación a las parcelas que no se

muestrearon, mediante un modelo que relaciona los conteos de la muestra con las covariables observadas en toda la superficie.

3.3 Actualizar el pronóstico a lo largo de la temporada

El pronóstico no es un número que se calcula una vez. Se actualiza cada vez que llega información nueva: un nuevo conteo, un mes de clima observado, las primeras entregas reales. Una forma sencilla de combinar un pronóstico previo con una nueva estimación independiente, cuando ambos tienen errores aproximadamente normales, es el promedio ponderado por precisión:

$$\hat{Y}_{nuevo} = \frac{\hat{Y}_1/\sigma_1^2 + \hat{Y}_2/\sigma_2^2}{1/\sigma_1^2 + 1/\sigma_2^2}, \qquad \sigma^2_{nuevo} = \left(\frac{1}{\sigma_1^2} + \frac{1}{\sigma_2^2}\right)^{-1}$$

La estimación más precisa pesa más, y la incertidumbre combinada es menor que la de cualquiera de las dos. Es la misma lógica de asimilación de datos del capítulo 19, aplicada a la cosecha. A medida que avanza la temporada, la proporción de la cosecha ya observada crece, el pronóstico converge hacia el valor real y su intervalo de incertidumbre se estrecha.

Las estimaciones de técnicos y acopiadores no se descartan. Se incorporan como una fuente más, con el peso que les corresponde según su historial de acierto y corregidas por su sesgo medido. Un acopiador que en las últimas tres temporadas sobreestimó en promedio un porcentaje determinado aporta información útil una vez corregido ese porcentaje.

3.4 Evaluar el pronóstico con honestidad

Un sistema de pronóstico sin evaluación no mejora. Al final de cada temporada, cada pronóstico emitido se compara con la cosecha real. Tres medidas son suficientes para empezar:

- Error porcentual absoluto medio, que indica cuánto se equivocó el pronóstico en promedio, sin importar la dirección.
- Sesgo, que indica si el pronóstico tiende a sobreestimar o a subestimar.
- Cobertura de los intervalos, que indica si los intervalos de pronóstico contienen el valor real con la frecuencia anunciada. Si un intervalo del 80 % contiene el valor real solo la mitad de las veces, el sistema subestima su propia incertidumbre.

Para comparar sistemas de pronóstico que entregan distribuciones completas y no solo un valor, la literatura de pronóstico recomienda reglas de puntuación propias, que premian a la vez la exactitud y la honestidad sobre la incertidumbre (Gneiting y Raftery, 2007). Para una empresa que empieza, la cobertura de los intervalos es la medida más útil, porque es la que protege sus compromisos comerciales. Las prácticas generales de construcción y evaluación de pronósticos están bien documentadas en la literatura especializada (Hyndman y Athanasopoulos, 2021).

3.5 Comprometer según la incertidumbre y el costo de equivocarse

Con un pronóstico expresado como distribución, la decisión de cuánto comprometer en contratos a plazo deja de ser una apuesta. Si c_s es el costo por tonelada de comprometer de más (comprar al contado para cumplir, penalidades) y c_u el costo por tonelada de comprometer de menos (vender al contado a menor precio, oportunidad perdida), el volumen óptimo a comprometer es el cuantil de la distribución del abastecimiento que iguala la razón crítica:

$$F(Q^*) = \frac{c_u}{c_u + c_s}$$

Es la misma estructura del problema del vendedor de periódicos del capítulo 13, aplicada al lado de las ventas. Si comprometer de más es mucho más caro que comprometer de menos, el cuantil es bajo y la empresa compromete una fracción prudente del abastecimiento esperado. Si ocurre lo contrario, compromete más.

En el escenario de la exportadora, comprometer de más tenía un costo alto (comprar al contado en un mercado al alza para cumplir un contrato a precio fijo) y comprometer de menos tenía un costo moderado (vender el resto al contado). La razón crítica indicaba comprometer solo un cuantil bajo de la distribución del abastecimiento. El gerente comprometió por encima de la media.

3.6 Compartir pronósticos sin perder ventaja

Un pronóstico de cosecha confiable es información valiosa para la empresa y también para sus contrapartes. Un banco puede usarlo para dimensionar una línea de financiamiento de compra de cosecha (capítulo 2). Una aseguradora, para diseñar un seguro de rendimiento por zona. Una asociación de productores, para negociar volúmenes y precios. El sistema de inteligencia

territorial del capítulo 10 puede agregar pronósticos de muchos actores para estimar la oferta de un territorio.

Compartir tiene un riesgo: revelar a los compradores la oferta propia puede debilitar la posición negociadora. Las herramientas del capítulo 7 permiten encontrar un equilibrio: compartir pronósticos agregados a nivel de zona, con protección de privacidad, y reservar el pronóstico detallado de la empresa para sus decisiones propias y para el banco que la financia bajo acuerdo de confidencialidad.

3.7 La exportadora de cacao, reescrita

Volvamos a la exportadora con un sistema de pronóstico de cosecha en operación desde dos temporadas antes.

Los técnicos de campo cuentan cada mes las mazorcas por etapa en una muestra estratificada de plantas en las fincas de los principales proveedores. Las probabilidades de supervivencia y el peso por mazorca se estimaron con frutos marcados durante la temporada anterior. El modelo incorpora la precipitación acumulada por etapa y el índice de vegetación de las parcelas. Las estimaciones de los acopiadores se incluyen corregidas por su sesgo histórico, que en dos de ellos resultó ser una sobreestimación sistemática.

Cuando llega la oferta del comprador europeo, el sistema muestra un abastecimiento esperado para el trimestre con un intervalo amplio, porque la temporada seca apenas comienza y una parte de las mazorcas está en la etapa de llenado. La razón crítica, calculada con el precio del contrato, el precio al contado esperado y las penalidades del contrato, indica comprometer un volumen cercano al percentil 25 de la distribución. El gerente negocia con el comprador un contrato por ese volumen, con una opción de ampliarlo en la mitad del trimestre.

El periodo seco reduce la cosecha, como en la versión original. El pronóstico se actualiza cada mes y su intervalo se desplaza hacia abajo. La exportadora cumple su contrato con cacao de sus propios proveedores y no ejerce la opción de ampliación. No gana todo lo que habría ganado con un año de buena cosecha, pero tampoco pierde. Al final de la temporada, la evaluación muestra que el intervalo del 80 % contuvo el valor real en la mayoría de los meses, y el modelo se ajusta con los datos de un año seco, que antes no tenía.

Fase 4. El framework de acción: cinco pasos para pronosticar la cosecha y comprometer con seguridad

Paso	Acción concreta	Responsable	Evidencia de cumplimiento	Plazo de referencia
1. Medir el error del pronóstico actual	Comparar los pronósticos de las últimas temporadas (aunque hayan sido de opinión) con las cosechas o entregas reales; calcular error medio, sesgo y sesgo por informante	Comercial con calidad o analista de datos	Informe de error histórico por fuente de pronóstico	2 a 3 semanas
2. Diseñar el muestreo estratificado y marcar frutos	Definir estratos homogéneos, seleccionar al azar parcelas y plantas, capacitar a los técnicos en el conteo por etapa y marcar una muestra de frutos para estimar supervivencia y peso	Asistencia técnica con apoyo estadístico	Protocolo de muestreo aprobado, primer conteo realizado y frutos marcados en seguimiento	1 a 2 meses, con seguimiento durante la temporada

Paso	Acción concreta	Responsable	Evidencia de cumplimiento	Plazo de referencia
3. Construir el modelo con covariables	Combinar conteos, supervivencia, peso por fruto, clima por etapa e índices satelitales en un modelo que entregue el pronóstico con su intervalo; incorporar las estimaciones de los informantes corregidas por sesgo	Analista de datos con asistencia técnica	Modelo documentado con su ficha según el capítulo 3 y primer pronóstico con intervalo	1 temporada
4. Actualizar cada mes y evaluar al cierre	Actualizar el pronóstico con cada nuevo conteo, mes de clima y entregas; al cierre de la temporada, evaluar error, sesgo y cobertura de intervalos	Analista de datos	Serie de pronósticos mensuales y evaluación de fin de temporada	Mensual y al cierre de cada temporada

Paso	Acción concreta	Responsable	Evidencia de cumplimiento	Plazo de referencia
5. Comprometer con regla de cuantil	Definir con finanzas los costos de comprometer de más y de menos; fijar el volumen de los contratos a plazo según el cuantil correspondiente; negociar opciones de ampliación cuando la incertidumbre es alta	Gerencia comercial con finanzas	Política de compromisos aprobada y contratos dimensionados con la regla	Antes de la siguiente negociación de contratos

Regla de cierre para el directorio: pregunte con qué intervalo de incertidumbre se pronosticó la cosecha de la última temporada y si la cosecha real cayó dentro de ese intervalo. Si el pronóstico no tenía intervalo, la empresa está firmando contratos a plazo sin saber cuánto arriesga.

Nota del autor: las compras soviéticas de granos de 1972 y el desarrollo posterior del programa LACIE son hechos históricos documentados; los detalles deben precisarse con fuentes primarias antes de la publicación. El escenario de la exportadora de cacao es una construcción narrativa; los métodos de muestreo, modelamiento, actualización y evaluación de pronósticos descritos son reales y aplicables.

Capítulo 15. Cadena de frío y vida útil dinámica: la fecha que debería moverse

La fecha impresa en el empaque es una promesa hecha el día de producción. La temperatura de cada hora siguiente decide si se cumple.

Esquema del capítulo

- Por qué se pierden alimentos perecederos que salieron bien de la planta: fechas fijas, rupturas de frío invisibles y despachos por orden de llegada.
- La biología del deterioro como función del tiempo y la temperatura, y por qué puede calcularse.
- Arquitectura de vida útil dinámica: registro de temperatura por lote, modelos de deterioro, vida útil restante estimada y despacho según lo que a cada lote le queda.

Fase 1. El gancho: un tercio en duda y una devolución de supermercado

El mundo, 2019

En su informe sobre el estado mundial de la agricultura y la alimentación de 2019, la FAO estimó que una proporción considerable de los alimentos producidos en el mundo se pierde entre la cosecha y la venta minorista, sin contar el desperdicio en los hogares y en el comercio (FAO, 2019) [porcentaje exacto a confirmar]. Las causas varían según el producto y la región, pero en los productos perecederos (frutas, hortalizas, carnes, pescados, lácteos) las fallas de temperatura durante el almacenamiento y el transporte aparecen entre las más importantes.

La pérdida en la cadena de frío tiene una característica que la vuelve difícil de gestionar: casi nunca se ve en el momento en que ocurre. Un contenedor refrigerado que pierde unas horas de temperatura en un puerto, un camión que espera con la puerta abierta en una descarga o una góndola de supermercado

mal regulada no producen un daño visible ese día. El daño aparece días después, en otro lugar, y para entonces nadie sabe dónde se originó.

Guayaquil, una carta de un supermercado

Escenario compuesto. La empresa, el supermercado y los personajes son ficticios; los mecanismos biológicos y los métodos descritos son reales.

Una procesadora de carnes de Guayaquil vende cortes refrigerados empacados al vacío a una cadena de supermercados. Cada empaque lleva una fecha de vencimiento fija, calculada con un estudio de vida útil hecho a temperatura de refrigeración controlada. La planta cumple sus buenas prácticas, mantiene sus cámaras en rango y despacha en camiones refrigerados.

La cadena de supermercados envía una carta. En el último mes, varios lotes se devolvieron por olor y por empaques inflados antes de su fecha de vencimiento. El supermercado amenaza con reducir los pedidos. La procesadora revisa sus registros: las cámaras de la planta estuvieron en rango y los análisis de salida fueron normales. Su conclusión es que el problema está en el supermercado. El supermercado responde que sus góndolas funcionan bien y que el problema está en la planta.

Nadie puede demostrar nada. La procesadora mide la temperatura en su planta y no sabe qué pasó en el camión, en el centro de distribución del supermercado ni en la góndola. El supermercado no mide la temperatura de cada lote. Mientras tanto, el centro de distribución despacha a las tiendas en el orden en que recibe los lotes: el primero que entra es el primero que sale, sin importar cuánta vida útil real le queda a cada uno. Un lote que pasó varias horas a temperatura alta en un camión averiado se despacha a la tienda más lejana, donde estará más días en la góndola. Es el lote que vuelve.

Fase 2. El diagnóstico: por qué se pierden alimentos que salieron bien de la planta

2.1 La fecha fija supone una cadena perfecta

La fecha de vencimiento de un producto perecedero se calcula con estudios de vida útil que suponen una historia de temperatura determinada, normalmente una temperatura de refrigeración constante. En la realidad, cada lote vive una

historia distinta: tiempos de espera en la carga, variaciones en el transporte, aperturas de puertas, tiempos en los andenes, temperaturas de las góndolas. Una fecha fija ignora esa historia. Para un lote que tuvo una cadena perfecta, la fecha es conservadora y se desperdicia producto apto. Para un lote que sufrió rupturas de frío, la fecha es optimista y el producto se deteriora antes.

2.2 El deterioro depende del tiempo y de la temperatura

El deterioro de los alimentos perecederos es un conjunto de procesos biológicos y químicos: crecimiento de microorganismos, oxidación de grasas, cambios de color, maduración y senescencia en frutas y hortalizas. La velocidad de estos procesos depende fuertemente de la temperatura. En muchos de ellos, una relación útil es la ecuación de Arrhenius:

$$k(T) = A\, e^{-E_a/(R\,T)}$$

donde k es la velocidad de la reacción de deterioro, T la temperatura absoluta, E_a la energía de activación, R la constante de los gases y A un factor que depende del proceso. Para el crecimiento de bacterias en el rango de refrigeración, un modelo empírico muy usado es el modelo de raíz cuadrada (Ratkowsky et al., 1982):

$$\sqrt{\mu_{max}} = b\,(T - T_{min})$$

donde μ_{max} es la tasa máxima de crecimiento, T_{min} una temperatura mínima teórica de crecimiento propia de cada microorganismo y b una constante. La consecuencia práctica es que unos pocos grados de diferencia pueden cambiar de forma importante la velocidad de deterioro. Unas horas a temperatura alta pueden consumir días de vida útil.

2.3 Las rupturas de frío son invisibles en el momento

Una ruptura de frío no deja una marca visible en el producto en el momento en que ocurre. La carne empacada al vacío que pasó varias horas a una temperatura más alta de lo debido se ve igual al llegar al centro de distribución. El efecto aparece días después, cuando la población microbiana alcanza el nivel en que produce olores, gas o cambios de color. En la carne envasada al vacío, el capítulo 1 mencionó las bacterias asociadas al empaque hinchado, capaces de crecer a temperaturas de refrigeración; una ruptura de frío acelera ese crecimiento.

2.4 Cada eslabón mide solo lo suyo

Cada actor de la cadena mide la temperatura en su propio tramo, si la mide: la planta en sus cámaras, el transportista en su equipo, el distribuidor en sus bodegas, la tienda en sus góndolas. Esos registros no se conectan al lote. Cuando aparece un problema, ninguna de las partes puede reconstruir la historia térmica completa del lote, y la responsabilidad se discute sin evidencia, como en el capítulo 6.

2.5 Despachar por orden de llegada

La regla de despacho más común en almacenes de perecederos es "primero en entrar, primero en salir". Esa regla tiene sentido cuando todos los lotes tienen la misma historia y la misma vida útil restante. Cuando las historias difieren, la regla puede enviar los lotes más deteriorados a los destinos más lejanos o con mayor rotación lenta, justamente donde no deberían ir. La literatura sobre gestión de la cadena de frío propone en su lugar la regla "primero en vencer, primero en salir", basada en la vida útil restante de cada lote y no en su fecha de ingreso [referencia a confirmar].

Fase 3. La tesis: la vida útil como bio-dato que se recalcula con cada hora de temperatura

3.1 La historia térmica como atributo del lote

La tesis de este capítulo extiende la del capítulo 1: la historia de temperatura de un lote es un bio-dato tan importante como su origen o su composición. Si cada lote lleva consigo un registro de las temperaturas a las que estuvo expuesto, su vida útil puede recalcularse en cualquier punto de la cadena.

El registro puede hacerse de varias formas, según el valor del producto y el costo aceptable:

- Registradores de temperatura por lote o por pallet, que guardan la temperatura cada pocos minutos y se leen al llegar a cada eslabón.
- Sensores conectados en contenedores, camiones y cámaras, que transmiten la temperatura en tiempo real y se vinculan a los lotes que transportan o almacenan.

- Indicadores de tiempo y temperatura, etiquetas que cambian de color de forma irreversible según la exposición acumulada a tiempo y temperatura, cuya respuesta puede calibrarse para que represente la cinética de deterioro del producto (Taoukis y Labuza, 1989).

La integridad de estos registros debe protegerse con los mecanismos del capítulo 7, porque son evidencia en una disputa como la del supermercado.

3.2 Calcular la vida útil restante

Con la historia térmica del lote y un modelo de deterioro, la vida útil consumida puede calcularse como una suma de tiempos ponderados por la velocidad de deterioro a cada temperatura. Si la vida útil de referencia a la temperatura T_{ref} es VU_{ref}, y el lote pasó intervalos de tiempo Δt_i a temperaturas T_i, la vida útil restante es:

$$VUR = VU_{ref} - \sum_i \Delta\, t_i \, \frac{k(T_i)}{k(T_{ref})}$$

Cada intervalo a una temperatura mayor que la de referencia consume más vida útil que su duración real; cada intervalo a temperatura menor consume menos. Para el crecimiento microbiano, el cálculo puede hacerse directamente con modelos de crecimiento que estiman la población en cada momento a partir de la historia de temperatura, como los modelos dinámicos de Baranyi y Roberts (1994). La vida útil termina cuando la población estimada alcanza el nivel asociado con el deterioro o con un límite de seguridad.

Los parámetros de estos modelos se obtienen de estudios de vida útil a varias temperaturas, de la literatura y de bases de datos de microbiología predictiva. La empresa los ajusta con sus propios datos de análisis microbiológicos y sensoriales a lo largo del tiempo.

3.3 Incertidumbre en la vida útil

La vida útil restante calculada tiene incertidumbre: la carga microbiana inicial varía entre lotes, los parámetros del modelo tienen error y la temperatura registrada puede no ser la del centro del producto. El cálculo debe expresarse con un margen. Una práctica razonable es calcular la vida útil restante con valores conservadores (carga inicial alta de su rango, crecimiento rápido de su rango) para decisiones de inocuidad, y con valores centrales para decisiones comerciales sobre calidad. En productos con riesgo de microorganismos

patógenos, la decisión de inocuidad se basa en los criterios regulatorios y nunca en un cálculo optimista.

3.4 Despachar según lo que a cada lote le queda

Con la vida útil restante de cada lote, el despacho deja de ser por orden de llegada. La regla "primero en vencer, primero en salir" envía primero los lotes con menor vida útil restante. Una versión más completa asigna cada lote al destino donde su vida útil restante es compatible con el tiempo que pasará hasta su venta.

Sea VUR_ℓ la vida útil restante del lote ℓ, τ_d el tiempo esperado de transporte y de permanencia en góndola en el destino d, y $v_{\ell d}$ el valor de vender el lote en ese destino. Una asignación factible exige que la vida útil cubra ese tiempo con un margen δ:

$$y_{\ell d} = 1 \;\Rightarrow\; VUR_\ell \geq \tau_d + \delta$$

y, entre las asignaciones factibles, se elige la que maximiza el valor total y minimiza la pérdida esperada. Los lotes con poca vida útil restante se destinan a tiendas cercanas con alta rotación, a canales institucionales o a procesamiento (por ejemplo, transformación en productos cocidos o congelados), en lugar de enviarse a donde volverán como devolución. Es la misma lógica de asignación de lotes a mercados de los capítulos 1 y 5, aplicada al tiempo.

3.5 Prevenir antes de calcular

El cálculo de la vida útil restante no reemplaza el buen manejo de la cadena de frío. Su valor más importante es mostrar dónde se consume la vida útil. Cuando se analizan las historias térmicas de muchos lotes, aparecen patrones: un andén donde los pallets esperan demasiado, un transportista con temperaturas sistemáticamente altas, una tienda con góndolas mal reguladas, una hora del día en que las descargas rompen la cadena. Cada patrón es una oportunidad de prevención con un valor calculable: los días de vida útil que se dejan de perder.

El indicador útil para la gerencia es la vida útil consumida en cada tramo de la cadena, comparada con la que se consumiría a la temperatura de referencia:

$$\text{Exceso de consumo en el tramo } j = \sum_{i \in j} \Delta\, t_i \left(\frac{k(T_i)}{k\left(T_{ref}\right)} - 1 \right)$$

Este indicador, calculado por transportista, por almacén y por tienda, convierte una discusión sobre culpas en una conversación sobre datos.

3.6 La fecha dinámica: posibilidades y límites

Si la vida útil restante puede calcularse, la pregunta siguiente es si la fecha que ve el consumidor podría ajustarse según la historia real del lote. Existen propuestas e investigaciones sobre fechas dinámicas y etiquetas inteligentes, pero su aplicación al consumidor final enfrenta límites regulatorios, porque las normas de etiquetado de alimentos exigen fechas fijas declaradas por el fabricante, y límites de confianza, porque el consumidor necesita entender qué significa una fecha que cambia [marco normativo de etiquetado aplicable a confirmar].

Por eso, en la mayoría de los casos, la vida útil dinámica es hoy una herramienta de gestión entre empresas: para decidir despachos, rebajas de precio, destinos alternativos y responsabilidades contractuales. La fecha impresa sigue siendo la que fija la norma; la vida útil restante calculada decide qué hacer con el lote antes de que esa fecha llegue.

3.7 Contratos que reparten la responsabilidad con datos

La disputa entre la procesadora y el supermercado se resuelve mejor con un contrato que con una carta. Un acuerdo de cadena de frío entre proveedor, transportista y cliente puede definir:

- el rango de temperatura aceptable en cada tramo y la tolerancia de tiempo fuera de rango;
- quién mide, con qué dispositivo y cómo se comparten los registros por lote;
- cómo se calcula la vida útil consumida en cada tramo;
- quién asume el costo de una devolución según el tramo donde se consumió la vida útil en exceso.

Con un contrato así, la devolución de un lote deja de ser una discusión y pasa a ser un cálculo. Y cada actor tiene un incentivo económico para mejorar su tramo.

3.8 La procesadora de carnes, reescrita

Volvamos a Guayaquil con un sistema de vida útil dinámica en funcionamiento.

Cada pallet sale de la planta con un registrador de temperatura vinculado al número de lote. La procesadora y la cadena de supermercados firman un acuerdo de cadena de frío que define rangos, tolerancias y la regla para asignar el costo de las devoluciones según los registros. El centro de distribución lee los registradores al recibir cada pallet y el sistema calcula la vida útil restante de cada lote con el modelo de crecimiento de la flora de deterioro, ajustado con los estudios de la procesadora a varias temperaturas.

En la tercera semana, un camión de la empresa transportista sufre una falla en su equipo de frío. El registrador muestra varias horas por encima del rango. El sistema estima que esos lotes perdieron varios días de vida útil. En lugar de despacharse por orden de llegada a la tienda más lejana, se asignan a dos tiendas cercanas con alta rotación y con un precio promocional. Ninguno vuelve. El costo de la promoción se asigna a la transportista según el acuerdo, y la transportista revisa el mantenimiento de sus equipos.

Al cabo de tres meses, el análisis de las historias térmicas muestra que la mayor parte del exceso de consumo de vida útil se concentraba en el tiempo de espera de los pallets en el andén del centro de distribución durante el cambio de turno. El supermercado reorganiza los horarios de descarga. Las devoluciones bajan y la procesadora mantiene sus pedidos. La fecha impresa en los empaques no cambió; lo que cambió es que cada actor sabe cuánta vida útil le queda a cada lote y dónde se pierde.

Fase 4. El framework de acción: cinco pasos para gestionar la vida útil con datos

Paso	Acción concreta	Responsable	Evidencia de cumplimiento	Plazo de referencia
1. Registrar la historia térmica por lote	Incorporar registradores de temperatura o sensores vinculados al número de lote en los tramos críticos (planta, transporte, almacén del cliente)	Calidad y logística	Proporción de lotes con historia térmica completa desde la planta hasta el cliente	1 a 2 meses

Paso	Acción concreta	Responsable	Evidencia de cumplimiento	Plazo de referencia
2. Construir el modelo de deterioro	Con estudios de vida útil a varias temperaturas y la literatura de microbiología predictiva, ajustar un modelo de deterioro para cada producto principal	Calidad con laboratorio o universidad	Modelo documentado con sus parámetros, incertidumbre y validación con lotes reales	2 a 4 meses
3. Calcular la vida útil restante y despachar con ella	Calcular la vida útil restante de cada lote al llegar a cada eslabón; reemplazar el despacho por orden de llegada por la asignación según vida útil restante y destino	Logística con calidad	Regla de despacho aplicada y registro de asignaciones con su vida útil restante	1 mes después del paso 2
4. Medir el exceso de consumo por tramo	Calcular, por transportista, almacén y tienda, la vida útil consumida en exceso frente a la temperatura de referencia; priorizar las mejoras donde el exceso es mayor	Logística con los actores de la cadena	Informe mensual de exceso de consumo por tramo y acciones de mejora	Desde el primer mes con datos
5. Formalizar el acuerdo de cadena de frío	Firmar con transportistas y clientes un acuerdo que defina rangos, tolerancias, registros compartidos y asignación del costo de devoluciones según la vida útil consumida en cada tramo	Gerencia comercial con legal	Acuerdo firmado y primera liquidación de devoluciones con base en datos	Siguiente renovación de contratos

Regla de cierre para el directorio: pregunte en qué tramo de la cadena se consumió la vida útil de los últimos diez lotes devueltos. Si la respuesta es una

opinión y no un registro, la empresa está pagando devoluciones que otros causaron, o causando devoluciones sin saber dónde.

Nota del autor: la estimación de pérdidas de alimentos entre la cosecha y la venta minorista proviene del informe de la FAO de 2019; el porcentaje exacto debe citarse del informe antes de la publicación. El escenario de la procesadora de carnes es una construcción narrativa; los modelos de cinética de deterioro, microbiología predictiva y asignación de lotes descritos son reales y aplicables a carnes, pescados, lácteos, frutas y hortalizas, con los parámetros de cada producto.

Capítulo 16. Del residuo al ingrediente: valorizar subproductos con datos

Un subproducto se convierte en producto el día en que alguien puede describir su composición, su volumen y su disponibilidad con la misma precisión que la del producto principal.

Esquema del capítulo

- Por qué los subproductos agroindustriales se desperdician aunque tengan valor: composición desconocida, volumen estacional, logística costosa y ausencia de especificación.
- La simbiosis industrial: cuando el residuo de una empresa es la materia prima de otra.
- Arquitectura de valorización basada en datos: caracterización con variabilidad, balance de masa y agua, radio económico de recolección, especificación del subproducto como producto y selección de rutas con análisis técnico-económico.

Fase 1. El gancho: la ciudad donde los residuos se volvieron contratos y las cáscaras que nadie quería

Kalundborg, Dinamarca, desde la década de 1970

En la ciudad industrial de Kalundborg, en Dinamarca, un conjunto de empresas desarrolló a lo largo de varias décadas una red de intercambios en la que el residuo o el subproducto de una se convirtió en insumo de otra. Entre los intercambios descritos en la literatura figuran el uso de vapor y calor residual de una central eléctrica por otras industrias y por la calefacción urbana, el aprovechamiento del yeso de la desulfuración de gases en la fabricación de placas, y el uso de biomasa y lodos de procesos de fermentación como fertilizante o alimento animal en granjas de la zona (Ehrenfeld y Gertler, 1997) [intercambios vigentes y detalles a confirmar].

Kalundborg se convirtió en el ejemplo más citado de simbiosis industrial, un concepto que estudia cómo empresas distintas pueden intercambiar materiales, energía, agua y subproductos para obtener ventajas mutuas (Chertow, 2000). La lección para este libro no está en la ingeniería de cada intercambio, sino en su condición previa: cada intercambio funcionó porque alguien supo qué contenía el residuo, cuánto se generaba, cuándo estaba disponible y qué especificación necesitaba quien lo iba a usar. Sin esos datos, el residuo seguía siendo un costo.

Los Ríos, un montón de cáscaras junto al centro de acopio

Escenario compuesto. La cooperativa, las empresas y los personajes son ficticios; los mecanismos técnicos y económicos descritos son reales.

Una cooperativa de productores de cacao instaló un centro de quiebre de mazorcas para comprar cacao en baba y fermentarlo de forma centralizada. La decisión mejoró la calidad del grano. También creó un problema: cada semana de cosecha se acumulan toneladas de cáscara de mazorca junto al centro. La cáscara representa la mayor parte del peso de la mazorca [proporción a confirmar con fuente], tiene mucha humedad, se descompone rápido, atrae insectos y genera lixiviados. Además, los técnicos advierten que los montones de cáscara pueden mantener inóculo de enfermedades del cacao si se dejan cerca de las plantaciones.

La cooperativa paga para que retiren la cáscara. Un día, un productor de ganado de la zona pregunta si puede llevarse una parte para alimentar a sus animales. Otro día, una empresa de abonos pregunta si podría comprarla para compostaje. Una investigadora de la universidad menciona que la cáscara contiene fibra, potasio y compuestos con posible valor industrial. La cooperativa no sabe qué responder a ninguno, porque no sabe cuánta cáscara produce cada semana, qué humedad tiene, qué composición, ni si esa composición cambia según la época o el origen. No puede ofrecer una especificación, un volumen garantizado ni un precio. La cáscara sigue siendo un costo.

Fase 2. El diagnóstico: por qué los subproductos se desperdician aunque tengan valor

2.1 Composición desconocida y variable

Un comprador industrial o un productor pecuario necesita saber qué contiene el material que compra. Para usar cáscara de cacao en alimentación animal, necesita conocer su contenido de fibra, proteína, minerales y de compuestos que pueden limitar su uso, como ciertos alcaloides o micotoxinas si el material se deteriora. Para usarla en compost o como fuente de potasio, necesita conocer sus nutrientes. Para usarla en extracción de compuestos, necesita conocer su concentración.

Los subproductos agroindustriales tienen una composición variable: cambia con el material genético, la madurez, la época del año, el manejo y el tiempo transcurrido desde que se generaron. Sin datos de esa variabilidad, el comprador no puede formular, dosificar ni garantizar la calidad de su propio producto. Un análisis aislado no basta, porque no dice cuánto varía la composición entre lotes.

2.2 Volumen estacional y disponibilidad incierta

La generación de subproductos sigue el ritmo de la cosecha y del procesamiento. La cooperativa produce mucha cáscara en los meses de cosecha alta y poca en los de cosecha baja. Un comprador que necesita un abastecimiento estable no puede depender de un proveedor que no sabe cuánto tendrá cada mes. Es el mismo problema de pronóstico del capítulo 14, aplicado al subproducto.

2.3 El agua pesa y cuesta

Muchos subproductos agroindustriales tienen un contenido de agua muy alto. Transportar un material con mucha humedad significa pagar flete por agua. Secarlo cuesta energía. Si no se seca, se deteriora en pocos días. El agua que hay que retirar para llevar un material desde una humedad inicial h_0 hasta una humedad final h_f (ambas en base húmeda) por cada unidad de masa inicial m_0 es:

$$m_{agua} = m_0 \frac{h_0 - h_f}{1 - h_f}$$

Con humedades iniciales altas, la mayor parte de la masa que se recolecta es agua que debe evaporarse o transportarse. Este dato, que rara vez se calcula, determina muchas veces si una ruta de valorización es rentable o no.

2.4 La logística del material disperso

Los subproductos agrícolas se generan en muchos puntos dispersos: fincas, centros de acopio, plantas pequeñas. Recolectarlos tiene un costo que crece con la distancia. Si la densidad de generación es baja y el valor del material es bajo, el costo de recolección puede superar su valor. Muchas iniciativas de valorización fracasan porque calcularon el valor del subproducto en la planta de destino sin calcular cuánto cuesta llevarlo hasta ella.

2.5 Sin especificación no hay mercado

Un producto se compra y se vende con una especificación: rangos de composición, humedad, impurezas, presentación, volumen por entrega. Un subproducto sin especificación se negocia como residuo, a precio de residuo o gratis. Es la misma lógica del capítulo 2 sobre el inventario como garantía: lo que no se puede describir y verificar no se puede valorar. La cooperativa no podía ofrecer cáscara a un precio porque no podía decir qué estaba vendiendo.

Fase 3. La tesis: el subproducto como producto con sus propios bio-datos

3.1 Caracterizar con variabilidad

El primer paso para valorizar un subproducto es caracterizarlo como se caracteriza un producto: muestreos periódicos, durante al menos una campaña completa, que registren su composición junto con las variables que pueden explicar su variación (época, origen, material genético, tiempo desde la generación). El resultado no es un análisis, sino una ficha con la media, la variabilidad y los factores que la explican para cada componente relevante.

Para la cáscara de mazorca de cacao, la literatura describe su potencial como fuente de fibra, minerales y compuestos bioactivos, y sus posibles usos en

alimentación animal, abonos y aplicaciones industriales (Campos-Vega et al., 2018). Pero la composición de la cáscara de una cooperativa concreta debe medirse, porque de ella depende qué ruta tiene sentido.

3.2 El balance de masa del subproducto

El segundo paso es el balance de masa: cuánta cáscara se genera por kilogramo de grano, cuánta por semana y cuánta por mes, con su pronóstico basado en el pronóstico de cosecha del capítulo 14. Si g es la relación entre la masa de subproducto fresco y la masa de producto principal procesado, y Q_t el volumen de producto principal esperado en el periodo t, el subproducto esperado es:

$$S_t = g\, Q_t$$

con la incertidumbre que hereda del pronóstico de cosecha y de la variabilidad de g. Con este dato, la cooperativa puede ofrecer volúmenes con rangos de confianza y comprometer contratos según la regla de cuantil del capítulo 14.

3.3 El radio económico de recolección

Cuando el subproducto se genera de forma dispersa, la logística determina su valor. Un modelo sencillo supone que el subproducto se genera con una densidad ρ (toneladas por kilómetro cuadrado y por periodo) alrededor de una planta de procesamiento. El volumen disponible dentro de un radio r crece con el cuadrado del radio, mientras que la distancia media de transporte crece de forma proporcional al radio:

$$Q(r) = \rho\, \pi\, r^2, \qquad \bar{d}(r) = 2/3\ r$$

donde la distancia media de un área circular uniforme a su centro es dos tercios del radio. El margen neto de recolectar dentro de un radio r, con un valor neto por tonelada en planta v y un costo de transporte por tonelada y kilómetro c_t, es:

$$M(r) = Q(r)(v - c_t\ 2/3\ r) - F$$

donde F son los costos fijos de la operación. El radio en que el margen por tonelada adicional se vuelve negativo es el límite económico de recolección. Este cálculo, aunque simple, responde a la pregunta que muchas iniciativas no se hacen: hasta dónde vale la pena ir a buscar el subproducto. En la práctica, la red vial real y la distribución de los puntos de generación se modelan con las herramientas de inteligencia territorial del capítulo 10.

3.4 Elegir la ruta con análisis técnico-económico

Un mismo subproducto puede tener varias rutas de valorización con distintos niveles de inversión, riesgo y valor. Para la cáscara de cacao, las rutas posibles incluyen el compostaje, el uso como alimento animal fresco o ensilado, el secado y molienda para balanceados, la obtención de cenizas ricas en potasio, la producción de carbón vegetal o biocarbón, y la extracción de compuestos de mayor valor. Cada ruta exige una composición mínima, un volumen mínimo, un tratamiento y una inversión.

El valor neto anual de cada ruta r puede estimarse como:

$$VN_r = \sum_t S_t^{(r)} \left(p_r \, y_r - c_{proc,r} - c_{log,r} \right) - CF_r$$

donde $S_t^{(r)}$ es el subproducto destinado a la ruta en el periodo t, p_r el precio del producto obtenido, y_r el rendimiento del proceso (unidades de producto por tonelada de subproducto), $c_{proc,r}$ y $c_{log,r}$ los costos de proceso y de logística por tonelada, y CF_r los costos fijos anuales, incluida la amortización de la inversión. Cada término tiene incertidumbre, y la comparación entre rutas debe hacerse con escenarios de precio, rendimiento y volumen.

Tres reglas ayudan a decidir:

- Empezar por la ruta que acepta la variabilidad. Las rutas de mayor valor suelen exigir composiciones más estrechas y volúmenes más estables. El compostaje o la alimentación animal local toleran más variabilidad y permiten empezar con poca inversión mientras se acumulan datos.
- No invertir en una ruta de alto valor sin una campaña de datos. La extracción de compuestos o la producción de ingredientes industriales requiere conocer la variabilidad de la materia prima antes de diseñar la planta.
- Considerar el costo evitado. El valor de una ruta incluye lo que deja de pagarse por disponer del residuo y los riesgos sanitarios o ambientales que se eliminan.

3.5 Respetar los límites de uso

La valorización tiene límites técnicos y sanitarios que los datos deben hacer visibles. En alimentación animal, la proporción de un subproducto en la dieta está limitada por su valor nutritivo y por sus factores antinutricionales. Si un componente limitante tiene una concentración a en el subproducto y la dieta admite como máximo una concentración A_{max} de ese componente, la inclusión máxima del subproducto en la dieta, sin otras fuentes del componente, es:

$$x_{max} = \frac{A_{max}}{a}$$

Como a varía entre lotes, el cálculo debe hacerse con un valor alto de su rango y no con el promedio, para que la dieta sea segura con los lotes de mayor concentración. Los valores de A_{max} deben provenir de la literatura y de ensayos de alimentación para cada especie y categoría animal.

En el uso agrícola, la cáscara compostada debe manejarse de forma que no se convierta en fuente de enfermedades para las plantaciones, y su aplicación como abono debe considerar sus nutrientes y su contenido de metales, incluido el cadmio del capítulo 1, que puede concentrarse en algunos residuos de la planta.

3.6 La especificación del subproducto como producto

Con la caracterización, el balance de masa y la ruta elegida, la cooperativa puede emitir una especificación del subproducto: rangos de composición garantizados, humedad, presentación, volumen por entrega, calendario de disponibilidad y método de verificación. Cada lote de subproducto recibe una identidad y sus bio-datos, como cualquier lote de cacao.

La especificación cambia la negociación. El ganadero, la empresa de abonos o la industria ya no compran un residuo: compran un insumo con características conocidas. El precio deja de ser simbólico y pasa a reflejar el valor del insumo para el comprador, menos su riesgo. Y la cooperativa puede firmar contratos de suministro con volumen y precio definidos.

3.7 La simbiosis a escala de territorio

Un subproducto que no tiene valor suficiente para una cooperativa puede tenerlo para un conjunto de generadores en un territorio. Si varias cooperativas, empacadoras y procesadoras de una zona generan subproductos compatibles,

un sistema de inteligencia territorial como el del capítulo 10 puede identificar dónde se generan, en qué cantidades y con qué composición, y dónde están los posibles usuarios. Con esos datos, se puede diseñar una red de intercambios como la de Kalundborg a escala agroindustrial: una planta de compostaje regional, un centro de secado compartido o un acuerdo con una fábrica de balanceados.

La economía circular, en el sentido que le dan las organizaciones que la promueven, busca mantener los materiales en uso con su mayor valor posible durante el mayor tiempo posible (Ellen MacArthur Foundation, 2013). Para un subproducto agrícola, eso solo es posible si sus datos viajan con él.

3.8 La cooperativa, reescrita

Volvamos al centro de acopio de Los Ríos con un programa de valorización basado en datos.

Durante una campaña, la cooperativa registra cada semana el peso de la cáscara generada y toma muestras quincenales para analizar humedad, fibra, proteína, minerales y los componentes limitantes para alimentación animal. Con esos datos calcula la relación entre cáscara y grano, su variación estacional y la variabilidad de cada componente. El pronóstico de cosecha le permite estimar la cáscara disponible por mes.

El análisis técnico-económico compara cuatro rutas. La extracción de compuestos de alto valor requiere una inversión y una estabilidad de composición que la cooperativa no tiene todavía. El secado para balanceados industriales no es rentable por el costo de evaporar el agua. Las dos rutas viables a corto plazo son el ensilaje para ganaderos dentro de un radio de recolección calculado y el compostaje controlado del resto, para aplicarlo en las propias fincas de los socios con un análisis de nutrientes y metales.

La cooperativa emite una ficha técnica de cáscara ensilada con rangos de composición y una inclusión máxima recomendada en la dieta de rumiantes, calculada con los valores altos de los componentes limitantes y respaldada por un ensayo de alimentación con la universidad. Firma contratos de suministro con tres ganaderos de la zona. El compost reemplaza una parte del fertilizante que compraban los socios. La cooperativa deja de pagar por el retiro de la cáscara, recibe un ingreso por la venta del ensilado y elimina los montones que

preocupaban a los técnicos. Con dos campañas más de datos, evaluará si la ruta de mayor valor se vuelve viable.

Fase 4. El framework de acción: cinco pasos para convertir un subproducto en producto

Paso	Acción concreta	Responsable	Evidencia de cumplimiento	Plazo de referencia
1. Medir el volumen y el balance de masa	Registrar el peso de cada subproducto generado por semana y su relación con el producto principal; proyectar la disponibilidad mensual con el pronóstico de cosecha	Responsable de planta o centro de acopio	Registro semanal de generación y proyección mensual con rango	1 campaña
2. Caracterizar con variabilidad	Tomar muestras periódicas durante una campaña y analizar humedad, composición y componentes limitantes; registrar época y origen	Calidad con laboratorio o universidad	Ficha de caracterización con media, variabilidad y factores de variación	1 campaña
3. Calcular logística y agua	Calcular el agua a retirar o transportar, el costo de secado y el radio económico de recolección o distribución	Analista con logística	Cálculo de costos logísticos y de secado por ruta	3 a 4 semanas

Paso	Acción concreta	Responsable	Evidencia de cumplimiento	Plazo de referencia
4. Comparar rutas con análisis técnico-económico	Estimar el valor neto anual de cada ruta posible con escenarios de precio, rendimiento y volumen; incluir el costo evitado de disposición; respetar los límites técnicos y sanitarios de uso	Gerencia con apoyo técnico	Matriz de rutas con valor neto, inversión, riesgos y requisitos	4 a 6 semanas
5. Emitir la especificación y firmar contratos	Publicar una ficha técnica del subproducto con rangos garantizados, volumen y calendario; firmar contratos de suministro con usuarios; asignar identidad y bio-datos a cada lote de subproducto	Gerencia comercial con calidad	Ficha técnica vigente y contratos de suministro firmados	Siguiente campaña

Regla de cierre para el directorio o la asamblea: pregunte cuánto paga hoy la organización por disponer de sus residuos y cuánto sabe sobre su composición. Si paga y no sabe, está pagando por desechar un insumo que todavía no ha aprendido a vender.

Nota del autor: la simbiosis industrial de Kalundborg está documentada en la literatura citada; los intercambios vigentes deben confirmarse antes de la publicación. El escenario de la cooperativa cacaotera es una construcción

narrativa; los métodos de caracterización, balance de masa, cálculo logístico y análisis técnico-económico descritos son reales y aplicables a cáscaras, pulpas, cabezas y exoesqueletos de camarón, sueros, vísceras y otros subproductos agroindustriales.

Capítulo 17. Ganadería de precisión: el animal como unidad de datos

En un hato, el promedio esconde a la vaca enferma. Y la vaca enferma se come el margen de las sanas.

Esquema del capítulo

- Por qué la ganadería pierde dinero en silencio: enfermedades subclínicas, promedios de hato y movimientos de animales sin registro.
- Las crisis sanitarias que obligaron a identificar a cada animal, y lo que esa identificación permite hoy.
- Arquitectura de datos por animal: identificación individual, curvas de producción esperadas, detección temprana de desviaciones, eficiencia alimenticia individual y red de movimientos para la vigilancia sanitaria.

Fase 1. El gancho: el virus que viajó en camiones y la vaca que nadie miró

Reino Unido, 2001

En febrero de 2001 se confirmó un brote de fiebre aftosa en el Reino Unido. La enfermedad, altamente contagiosa entre bovinos, ovinos y porcinos, se extendió con rapidez por varias regiones antes de que las autoridades pudieran contenerla. Para controlar el brote se sacrificaron millones de animales, y el costo para la agricultura, el turismo y la economía rural fue enorme [cifras y fuentes oficiales a confirmar].

Las investigaciones posteriores encontraron que el virus se había dispersado ampliamente antes de su detección, en buena parte por el movimiento de ovinos a través de mercados y entre explotaciones. Reconstruir esos movimientos fue difícil porque los registros eran incompletos. La experiencia, junto con la crisis anterior de la encefalopatía espongiforme bovina, reforzó en Europa los sistemas obligatorios de identificación y registro de animales y de sus movimientos. En el caso de los bovinos, el Reglamento (CE) 1760/2000 ya

exigía identificación individual, documentos de movimiento y bases de datos informatizadas (Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, 2000).

La lección sanitaria fue clara: en una epidemia, la información sobre dónde está cada animal y por dónde pasó vale tanto como cualquier vacuna. La lección económica tardó más en entenderse: esos mismos registros individuales, construidos para la vigilancia sanitaria, son la base para gestionar la productividad de cada animal.

Una lechería en la Sierra, un martes cualquiera

Escenario compuesto. La hacienda y los personajes son ficticios; los mecanismos biológicos y los métodos descritos son reales.

Una hacienda lechera de la Sierra ecuatoriana ordeña 180 vacas. El administrador, Rodrigo Paz, sigue de cerca tres números: la producción total diaria del hato, el precio que paga la industria por litro y el costo del balanceado. Los tres le dicen que la hacienda está bien. La producción total es estable y la planta no ha rechazado leche.

En la liquidación de la industria, sin embargo, el precio pagado por litro lleva meses en el escalón inferior de la tabla de bonificaciones por calidad, por un recuento de células somáticas del tanque más alto de lo esperado. Paz lo atribuye a la temporada. No tiene registro de producción por vaca, porque el equipo de ordeño no lo mide y el control lechero manual se abandonó hace años. Tampoco tiene registros de mastitis más allá de los casos clínicos que el ordeñador detecta por la apariencia de la leche.

Lo que el promedio esconde es que una parte del hato tiene mastitis subclínica: una inflamación de la ubre sin signos visibles, que reduce la producción de cada vaca afectada, eleva el recuento de células del tanque y puede contagiarse a otras vacas en el ordeño. Cada vaca afectada produce menos de lo que podría y empuja hacia abajo el precio de toda la leche del hato. La producción total parece estable porque las vacas sanas en pico de lactancia compensan a las afectadas. La pérdida está en la diferencia entre lo que el hato produce y lo que podría producir, y en la bonificación por calidad que no se cobra.

Fase 2. El diagnóstico: por qué la ganadería pierde dinero sin verlo

2.1 El promedio del hato

La mayoría de las explotaciones ganaderas medianas gestionan el hato como una unidad: producción total, consumo total de alimento, peso promedio. El promedio es útil para la contabilidad, pero es un mal instrumento de gestión biológica, porque los animales difieren mucho entre sí en producción, eficiencia, salud y fertilidad. Un hato con un promedio aceptable puede tener un grupo de animales muy rentables y otro grupo que no paga su alimento. Sin datos individuales, ambos grupos reciben el mismo manejo.

2.2 La enfermedad subclínica

Las enfermedades que más dinero cuestan en ganadería no siempre son las más visibles. La mastitis subclínica en lecherías, los parásitos gastrointestinales en ovinos y bovinos de pastoreo, las cojeras leves y algunas enfermedades metabólicas reducen la producción y la eficiencia sin mostrar signos que el personal identifique en el trabajo diario. Las revisiones sobre la economía de la mastitis en bovinos lecheros coinciden en que sus costos incluyen pérdida de producción, descarte de leche, tratamientos, eliminación de animales y penalidades por calidad, y en que la forma subclínica representa una parte importante de esas pérdidas (Halasa et al., 2007).

La enfermedad subclínica es, en términos de este libro, un estado oculto: existe, afecta al resultado y no se observa directamente. Igual que el oxígeno nocturno del capítulo 19, se detecta por sus efectos en variables que sí pueden medirse.

2.3 Registros que existen para el regulador y no para el ganadero

En muchos países, incluido Ecuador, existen sistemas oficiales de identificación y registro de animales y de sus movimientos, orientados a la vigilancia y el control sanitario [descripción del sistema nacional vigente a confirmar]. El ganadero los cumple como una obligación: pone el arete, registra el movimiento, obtiene la guía. Pero rara vez conecta esa identificación con sus propios datos de producción, salud y alimentación. La identificación individual existe; el uso productivo de esa identificación, no.

2.4 Movimientos sin red

Los animales se mueven entre fincas, ferias, centros de faenamiento y zonas de pastoreo. Cada movimiento conecta a los animales de un lugar con los de otro. Desde el punto de vista sanitario, el conjunto de movimientos forma una red por la que una enfermedad puede propagarse. El caso de 2001 mostró que reconstruir esa red después de la detección es lento y que la velocidad de la reconstrucción determina el tamaño del brote. Los registros de movimientos que no se analizan como red no permiten anticipar por dónde se propagaría una enfermedad ni dónde concentrar la vigilancia.

2.5 El alimento que no se mide por animal

El alimento es el principal costo de muchas explotaciones ganaderas intensivas. Los animales difieren en cuánto alimento necesitan para producir la misma cantidad de leche o de carne. Sin medición individual del consumo o, al menos, de la producción y del peso por animal, la explotación alimenta igual a animales muy eficientes y a animales que convierten mal el alimento. En el engorde de corderos o de bovinos, la diferencia de eficiencia entre animales puede ser la diferencia entre ganar y perder en un lote.

Fase 3. La tesis: cada animal es una serie de datos con un comportamiento esperado

3.1 La identificación individual como clave de todo

La base de la ganadería de precisión es la misma que la de los capítulos anteriores: identidad. Cada animal tiene un identificador único y permanente, idealmente el mismo que exige el sistema oficial de trazabilidad, para no duplicar registros. Ese identificador vincula todos los datos del animal a lo largo de su vida: nacimiento, genealogía, pesos, producción, salud, tratamientos, reproducción, alimentación, movimientos y destino final.

La literatura sobre ganadería de precisión describe este enfoque como la gestión de cada animal mediante el monitoreo continuo y automatizado de su producción, su salud y su bienestar (Berckmans, 2014). Pero la identificación y el registro sistemático preceden a cualquier sensor. Una explotación que pesa a sus animales cada mes y registra la producción individual de leche con un control lechero mensual ya puede aplicar la mayoría de los métodos de este capítulo.

3.2 La curva esperada de cada animal

Los procesos biológicos de los animales siguen patrones conocidos. La producción de leche de una vaca a lo largo de la lactancia sube hasta un pico y luego desciende de forma gradual. Una forma clásica de describir esa curva es la función propuesta por Wood (1967):

$$y_t = a\, t^{\,b}\, e^{-c\, t}$$

donde y_t es la producción en el día t de la lactancia y a, b y c son parámetros que determinan el nivel, la subida hasta el pico y la persistencia. El crecimiento de un animal de engorde sigue también curvas conocidas, que se pueden ajustar con modelos de crecimiento.

Con los datos de cada animal, se ajusta su curva esperada a partir de su historial y del de animales parecidos (misma raza, número de lactancia, época de parto). Desde ese momento, cada nueva medición se compara con lo esperado. Lo importante no es si la vaca produce mucho o poco, sino si produce lo que se esperaba de ella en ese día de su lactancia.

3.3 Detectar la desviación antes que el síntoma

La diferencia entre la producción observada y la esperada es un residuo:

$$r_t = y_t^{obs} - \hat{y}_t$$

Un residuo aislado puede ser ruido. Una secuencia de residuos negativos es una señal. Los gráficos de suma acumulada (CUSUM), desarrollados para el control estadístico de procesos (Page, 1954), acumulan las desviaciones pequeñas y persistentes y emiten una alerta cuando la suma supera un umbral:

$$S_t = \max(0,\ S_{t-1} + (-r_t) - k), \qquad \text{alerta si } S_t > h$$

donde k es una tolerancia que evita reaccionar a variaciones pequeñas normales y h el umbral de alerta. Una vaca con mastitis subclínica suele mostrar una caída leve y sostenida de producción antes de que aparezcan signos visibles. La suma acumulada la detecta mientras el problema todavía es subclínico.

La señal de producción se combina con otras mediciones disponibles: el recuento de células somáticas individual del control lechero, la conductividad eléctrica de la leche cuando el equipo de ordeño la mide, la actividad o la rumia cuando hay collares o podómetros, el peso. Un umbral de recuento de células

usado con frecuencia como referencia para sospechar de mastitis subclínica en vacas es del orden de 200.000 células por mililitro [valor de referencia y fuente a confirmar], aunque cada programa sanitario define sus propios criterios.

El resultado práctico es una lista diaria o semanal de animales que deben revisarse: no todo el hato, sino los pocos cuyas mediciones se apartan de lo esperado. El veterinario o el técnico concentra su tiempo donde está el problema.

3.4 Eficiencia alimenticia individual

Cuando se dispone de datos de consumo de alimento individual o de grupo pequeño, la eficiencia de cada animal puede estimarse de forma más precisa que con la conversión alimenticia simple. El consumo residual de alimento, propuesto por Koch et al. (1963), compara el consumo real de cada animal con el consumo que se esperaría según su peso y su producción:

$$CRA_i = C_i^{obs} - \left(\beta_0 + \beta_1 \, PV_i^{0.75} + \beta_2 \, GDP_i\right)$$

donde C_i^{obs} es el consumo observado, $PV_i^{0.75}$ el peso metabólico y GDP_i la ganancia diaria de peso (o la producción de leche corregida, en lecherías). Los coeficientes se estiman con los datos del grupo. Un animal con consumo residual negativo come menos de lo esperado para su tamaño y su producción: es más eficiente. Uno con consumo residual positivo es menos eficiente.

Aun sin medición individual del consumo, el seguimiento del peso y de la producción por animal permite identificar a los que crecen o producen menos de lo esperado con la misma alimentación, que son los candidatos a revisión sanitaria, a cambio de manejo o a descarte.

3.5 El valor económico de cada animal

Con datos individuales, la explotación puede estimar el margen de cada animal: el valor de lo que produce menos el costo de lo que consume y de su manejo sanitario. Para una vaca lechera, una aproximación diaria es:

$$M_i = y_i \, p(q_i) - C_i \, c_a - s_i$$

donde y_i es su producción, $p(q_i)$ el precio por litro según la calidad de su leche, C_i su consumo de alimento, c_a el costo por unidad de alimento y s_i sus costos sanitarios. Con este margen, las decisiones de descarte, de tratamiento y de reposición dejan de tomarse por apariencia o por costumbre. Una vaca con

mastitis subclínica crónica que eleva el recuento del tanque tiene un margen individual bajo y, además, un efecto negativo sobre el precio de toda la leche del hato. Esa externalidad debe incluirse en la decisión.

3.6 La red de movimientos como herramienta sanitaria

Los registros de movimientos, cuando se analizan como red, permiten responder preguntas que una lista de guías no responde: qué explotaciones están más conectadas con otras, qué ferias o mercados concentran contactos entre animales de muchas zonas y por dónde se propagaría con mayor rapidez una enfermedad introducida en un punto.

En una red dirigida de movimientos, donde los nodos son explotaciones, ferias y centros de faenamiento y las aristas son movimientos de animales con su fecha y su número, las medidas de centralidad identifican los nodos de mayor riesgo. Un nodo con muchas aristas de entrada desde zonas distintas (una feria regional, por ejemplo) es un punto de mezcla; uno con muchas aristas de salida hacia muchas explotaciones es un punto de dispersión. La vigilancia basada en riesgo del capítulo 10 se aplica aquí: los muestreos y las inspecciones se concentran en esos nodos.

Para la explotación individual, la red tiene un uso directo: conocer de qué orígenes llegan sus animales de reposición y qué riesgo sanitario representan, y aplicar cuarentenas y análisis de ingreso en proporción a ese riesgo.

3.7 Del dato individual al mercado

Los datos individuales tienen valor más allá de la explotación. La calidad de la leche registrada por animal y por tanque sostiene la negociación con la industria. La trazabilidad individual de la carne, desde el nacimiento hasta el faenamiento, es un requisito o una ventaja en mercados exigentes, y permite certificar atributos como el origen, la alimentación o el bienestar animal. Los registros de producción, salud y eficiencia forman el expediente de riesgo que un banco o una aseguradora pueden usar para financiar o asegurar una explotación ganadera, con la misma lógica del capítulo 2. Y los datos agregados de muchas explotaciones, protegidos según el capítulo 7, alimentan programas de mejoramiento genético y de vigilancia sanitaria.

3.8 La lechería de la Sierra, reescrita

Volvamos a la hacienda con un sistema básico de datos por animal en funcionamiento.

Paz retoma el control lechero mensual por vaca, con muestras individuales para recuento de células somáticas en un laboratorio de la zona. Cada vaca se identifica con el mismo arete del sistema oficial de trazabilidad. Los datos se cargan en una hoja estructurada, y un modelo sencillo ajusta la curva de lactancia esperada de cada vaca según su número de lactancia y su fecha de parto.

El primer control identifica a un grupo de vacas con recuentos altos, varias de ellas con producción por debajo de su curva esperada. El veterinario las examina, confirma mastitis subclínica en la mayoría y define un protocolo: tratamiento de las vacas con mayor probabilidad de cura, separación en el orden de ordeño de las que no responden, revisión de la rutina de ordeño y del equipo. Las vacas con mastitis crónica y margen individual negativo, considerando su efecto en el recuento del tanque, pasan a la lista de descarte.

Desde ese momento, la suma acumulada de los residuos de producción, actualizada con cada control y con las mediciones diarias del tanque, genera una lista de vacas a revisar antes de que su recuento suba. En pocos meses, el recuento del tanque baja lo suficiente para que la leche suba de escalón en la tabla de bonificaciones de la industria. La producción total del hato apenas cambia, porque salieron algunas vacas, pero el ingreso por litro y el margen por vaca mejoran. Paz ya no gestiona un promedio: gestiona 180 series de datos, y dedica su atención a las pocas que se apartan de lo esperado.

Fase 4. El framework de acción: cinco pasos para gestionar el hato animal por animal

Paso	Acción concreta	Responsable	Evidencia de cumplimiento	Plazo de referencia
1. Vincular la identificación oficial con los datos productivos	Usar el identificador oficial de cada animal como clave de un registro propio de producción, peso, salud, reproducción, alimentación y movimientos	Administrador de la explotación	Registro con todos los animales identificados y vinculados a sus datos	2 a 4 semanas
2. Medir producción y salud por animal con una frecuencia mínima	Implementar un control periódico individual (por ejemplo, control lechero mensual con recuento de células, o pesajes mensuales en engorde)	Administrador con técnico o veterinario	Calendario de controles cumplido y datos cargados por animal	1 a 2 meses para el primer ciclo

Paso	Acción concreta	Responsable	Evidencia de cumplimiento	Plazo de referencia
3. Ajustar curvas esperadas y activar alertas	Ajustar para cada animal su curva esperada de producción o crecimiento y aplicar una regla de alerta (por ejemplo, suma acumulada de residuos) que genere una lista de animales a revisar	Técnico o analista de datos con el veterinario	Lista periódica de animales a revisar y registro de lo encontrado en cada revisión	1 a 2 meses después del paso 2
4. Calcular el margen individual y decidir con él	Estimar el margen de cada animal con producción, precio según calidad, consumo y costos sanitarios; usar el margen y el efecto sobre el hato en las decisiones de tratamiento, descarte y reposición	Administrador con finanzas	Decisiones de descarte y reposición documentadas con el margen individual	Desde el primer cálculo

Paso	Acción concreta	Responsable	Evidencia de cumplimiento	Plazo de referencia
5. Analizar los movimientos de entrada y salida como red	Registrar el origen y destino de cada animal que entra o sale; clasificar los orígenes por riesgo sanitario y aplicar cuarentenas y análisis de ingreso en proporción a ese riesgo	Administrador con el veterinario	Registro de movimientos con nivel de riesgo y protocolo de ingreso aplicado	Desde el siguiente ingreso de animales

Regla de cierre para el directorio o el propietario: pida la lista de los diez animales con menor margen individual de la explotación y la explicación de por qué siguen en ella. Si nadie puede producir esa lista, la explotación está gestionando un promedio y pagando el alimento de animales que no lo devuelven.

Nota del autor: el brote de fiebre aftosa de 2001 en el Reino Unido y el marco europeo de identificación bovina son hechos documentados; las cifras deben confirmarse con fuentes oficiales antes de la publicación. El escenario de la lechería de la Sierra es una construcción narrativa; los mecanismos biológicos y los métodos de análisis descritos son reales y aplicables también a ovinos, caprinos y porcinos, con los ajustes de cada especie.

Capítulo 18. Evidencia de insumos: del ensayo que vende al dato que decide

Un insumo no "funciona" o "no funciona". Funciona en algunas fincas, en algunas condiciones, en cierta medida. Esa medida es lo que el productor necesita saber.

Esquema del capítulo

- Por qué los productores compran insumos con evidencia débil: ensayos únicos, promedios sin dispersión y afirmaciones que el registro no exige demostrar en su finca.
- El caso de los bioestimulantes y bioinsumos: un mercado en crecimiento con respuestas muy variables.
- Experimentación en finca y metaanálisis: cómo combinar muchos ensayos pequeños para estimar el efecto esperado, su variabilidad y la probabilidad de que el insumo pague su costo en una finca concreta.

Fase 1. El gancho: la categoría que exigió pruebas y el frasco de la promesa

Unión Europea, 2019

En 2019, la Unión Europea aprobó un nuevo reglamento sobre productos fertilizantes, el Reglamento (UE) 2019/1009, que, entre otros cambios, creó una categoría específica para los bioestimulantes de las plantas: productos que estimulan los procesos de nutrición vegetal con independencia de su contenido de nutrientes, con el fin de mejorar características como la eficiencia en el uso de nutrientes, la tolerancia al estrés abiótico o la calidad (Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, 2019). El reglamento establece que las declaraciones de efecto de estos productos deben estar respaldadas, y el Comité Europeo de Normalización desarrolló normas técnicas para la demostración de esas declaraciones [normas y alcance a confirmar].

El cambio reconoció un problema que los agrónomos conocían bien. El mercado de bioestimulantes y otros insumos biológicos había crecido rápidamente, con una gran variedad de productos y de promesas, y con evidencias de eficacia muy desiguales. Algunos productos tenían respaldo sólido; otros se vendían con un ensayo, una fotografía y un testimonio.

Santo Domingo de los Tsáchilas, una charla de ventas

Escenario compuesto. La empresa, el producto, la cooperativa y los personajes son ficticios; los mecanismos y los métodos descritos son reales.

Una cooperativa de productores de cacao recibe la visita de una empresa que vende un bioestimulante a base de extractos vegetales y microorganismos. La presentación muestra un ensayo hecho en una finca de la zona, en el que las plantas tratadas produjeron bastante más que las testigo. El vendedor ofrece un precio especial si la cooperativa compra para todos sus socios.

La mitad de los socios compra. Al final de la campaña, los resultados son dispares. Algunos productores dicen que notaron una mejora clara. Otros no ven diferencia. Unos pocos creen que les fue peor, aunque ese año también hubo problemas de clima. En la asamblea, la discusión se vuelve una disputa de testimonios. Nadie puede decir si el producto funcionó, en qué fincas, ni si pagó su costo. La cooperativa decide no volver a comprar, y el vendedor visita a la cooperativa vecina con la misma presentación.

El producto puede ser bueno, malo o útil solo en ciertas condiciones. Con la evidencia disponible, nadie puede saberlo. El único resultado seguro es que la cooperativa gastó dinero y no aprendió nada.

Fase 2. El diagnóstico: por qué se compran insumos sin saber si sirven

2.1 El ensayo único

Un ensayo hecho en una finca, durante una campaña, mide el efecto del insumo en esas condiciones de suelo, clima, material genético y manejo. Su resultado puede deberse al producto, a una diferencia entre las parcelas tratadas y testigo, o al azar. El capítulo 21 describe estos problemas para los pilotos de tecnología: falta de repeticiones, falta de aleatorización y selección de las unidades. Un

ensayo único y sin repeticiones, por bien hecho que parezca en una fotografía, no permite distinguir el efecto del ruido.

2.2 El promedio sin dispersión

Aun cuando existen varios ensayos, la información que llega al productor suele ser un promedio: "el producto aumentó el rendimiento en un tanto por ciento". El promedio no dice cuánto varía ese efecto entre fincas. Para un producto cuyo efecto es grande en algunas fincas y nulo o negativo en otras, el promedio puede ser positivo y, aun así, la mayoría de los productores puede no recuperar lo que pagó.

2.3 Lo que el registro demuestra y lo que no

Los sistemas de registro de insumos agropecuarios exigen evaluar la eficacia de los productos mediante protocolos de ensayo, en algunos casos en condiciones locales. Esa evaluación responde a la pregunta regulatoria: ¿el producto tiene el efecto declarado en condiciones de ensayo? No responde a la pregunta del productor: ¿cuánto efecto puedo esperar en mi finca, y con qué probabilidad recuperaré mi inversión? El registro es una condición necesaria para la venta, no una garantía de rentabilidad en cada finca.

2.4 Los bioinsumos tienen respuestas más variables

Los insumos biológicos (bioestimulantes, inoculantes microbianos, biofertilizantes, controladores biológicos) dependen de interacciones con el suelo, la planta, el clima y la microbiota local. Por eso su efecto tiende a variar más entre condiciones que el de un fertilizante mineral, cuyo efecto depende sobre todo de la deficiencia del nutriente. Un inoculante que funciona bien en un suelo con baja población de microorganismos benéficos puede no tener efecto en uno donde esa población ya es alta. Esa variabilidad no es un defecto del producto: es una característica que debe medirse.

2.5 El aprendizaje que no se acumula

Cada productor que aplica un insumo hace, sin saberlo, un experimento. Si registrara cómo lo aplicó, dónde y con qué resultado frente a una parte de su finca sin tratar, la cooperativa tendría decenas de ensayos al final de la campaña. Sin ese registro, cada experiencia se pierde en el testimonio. El conocimiento colectivo no crece, y la siguiente decisión se toma con la misma información pobre.

Fase 3. La tesis: muchos ensayos pequeños valen más que un ensayo perfecto

3.1 Experimentación en finca

La experimentación en finca propone que los productores, con apoyo técnico, diseñen y ejecuten ensayos sencillos en sus propias parcelas, con métodos estadísticos que permiten combinar los resultados de muchas fincas (Lacoste et al., 2022). Su lógica es la inversa del ensayo único perfecto: en lugar de controlar todas las condiciones en un sitio, se aceptan las condiciones reales de muchas fincas y se mide cómo varía el efecto entre ellas.

El diseño mínimo en una finca es simple: franjas o parcelas pareadas, una tratada y otra testigo, asignadas al azar dentro de un área homogénea, repetidas al menos dos o tres veces si la finca lo permite. El tratamiento es el que el productor aplicaría normalmente; el testigo es igual pero sin el insumo. La cosecha se registra por separado en cada franja. Con ese diseño, cada finca aporta una estimación del efecto del insumo en sus condiciones y una medida de su incertidumbre.

3.2 Registrar las condiciones de cada finca

Para entender por qué el efecto varía, cada ensayo debe registrar las condiciones que pueden influir en él. Para un bioestimulante en cacao, por ejemplo:

- características del suelo (pH, materia orgánica, textura, nutrientes principales);
- material genético y edad de la plantación;
- manejo (fertilización, poda, sombra, control sanitario);
- clima de la campaña (precipitación y temperatura por periodo);
- forma de aplicación del insumo (dosis, número de aplicaciones, fechas).

Estas variables son bio-datos de la finca en el sentido del capítulo 1. Sin ellas, la variabilidad del efecto queda sin explicar.

3.3 Combinar los ensayos: metaanálisis de efectos aleatorios

Con los resultados de muchas fincas, el efecto promedio y su variabilidad se estiman con un metaanálisis, el conjunto de métodos que combina estimaciones de varios estudios (Borenstein et al., 2009). Cada finca i aporta una estimación del efecto d_i (por ejemplo, la diferencia de rendimiento entre franjas tratadas y testigo, o su logaritmo de la razón) con su varianza v_i.

Como el efecto verdadero varía entre fincas, el modelo adecuado es el de efectos aleatorios, que supone que cada finca tiene su propio efecto verdadero, distribuido alrededor de un promedio μ con una varianza entre fincas τ^2 (DerSimonian y Laird, 1986). El efecto promedio se estima con un promedio ponderado:

$$\hat{\mu} = \frac{\sum_i w_i^* \, d_i}{\sum_i w_i^*}, \qquad w_i^* = \frac{1}{v_i + \hat{\tau}^2}$$

Las fincas con ensayos más precisos pesan más, pero la variabilidad entre fincas limita cuánto puede pesar cualquier finca individual. La proporción de la variabilidad observada que corresponde a diferencias reales entre fincas, y no a error de muestreo, se resume con el estadístico I^2. Un I^2 alto indica que el efecto del insumo depende mucho de las condiciones de cada finca.

3.4 El intervalo que le importa al productor

El metaanálisis produce dos intervalos distintos, y la diferencia entre ellos es la idea central de este capítulo.

El intervalo de confianza del efecto promedio indica con qué precisión se conoce el promedio μ. Con muchas fincas, ese intervalo puede ser estrecho.

El intervalo de predicción indica dónde puede caer el efecto en una finca nueva, considerando también la variabilidad entre fincas:

$$\hat{\mu} \pm t_{k-2}\sqrt{\hat{\tau}^2 + \mathrm{EE}(\hat{\mu})^2}$$

donde k es el número de ensayos y $\mathrm{EE}(\hat{\mu})$ el error estándar del efecto promedio. Cuando la variabilidad entre fincas es grande, el intervalo de predicción es mucho más amplio que el de confianza y puede incluir efectos nulos o negativos aunque el promedio sea claramente positivo.

Para el vendedor, el dato atractivo es el promedio. Para el productor, el dato relevante es el intervalo de predicción, porque él no recibe el promedio: recibe el efecto en su finca.

3.5 La probabilidad de que el insumo pague

Con la distribución predictiva del efecto en una finca nueva, el productor puede calcular la probabilidad de que el insumo le resulte rentable. Si el aumento de rendimiento necesario para pagar el costo del insumo y su aplicación es $d_{eq} = C_{ins}/P_{prod}$, donde C_{ins} es el costo por hectárea y P_{prod} el precio por unidad de producto, la probabilidad de recuperar la inversión es aproximadamente:

$$P\left(d > d_{eq}\right) = 1 - \Phi\left(\frac{d_{eq} - \hat{\mu}}{\sqrt{\hat{\tau}^2 + \mathrm{EE}(\hat{\mu})^2}}\right)$$

donde Φ es la función de distribución normal estándar. Este número cambia la conversación comercial. En lugar de "el producto aumenta el rendimiento en un tanto por ciento", el productor sabe que, con el precio actual de su producto, tiene una probabilidad determinada de recuperar lo que paga. Si el precio del producto agrícola baja, d_{eq} sube y la probabilidad baja; si sube, ocurre lo contrario. La decisión de compra se vuelve dependiente del precio, como debe ser.

3.6 Explicar la variabilidad: dónde funciona el insumo

Cuando la variabilidad entre fincas es alta, la pregunta siguiente es si puede explicarse con las condiciones registradas. La metarregresión relaciona el efecto de cada finca con sus características:

$$d_i = \beta_0 + \beta_1 z_{i1} + \cdots + \beta_p z_{ip} + u_i + \varepsilon_i$$

donde z_{ij} son las condiciones de la finca (pH del suelo, edad de la plantación, manejo), u_i la variabilidad no explicada entre fincas y ε_i el error de cada ensayo. Si el efecto de un bioestimulante resulta mayor en suelos ácidos o en plantaciones con baja fertilización, la recomendación deja de ser "aplíquelo" y pasa a ser "aplíquelo en estas condiciones". La probabilidad de recuperar la inversión se calcula entonces para las condiciones de cada finca.

Con pocos ensayos, la metarregresión puede encontrar relaciones espurias. Las variables a evaluar deben definirse antes de analizar los datos, con fundamento agronómico, y los resultados deben confirmarse en campañas siguientes.

3.7 El papel de cada actor

La experimentación en finca y el metaanálisis cambian el rol de los actores de la cadena de insumos.

Actor	Rol tradicional	Rol con experimentación en finca
Productor	Compra según la recomendación y el precio	Participa en ensayos sencillos; decide según la probabilidad de recuperar su inversión en sus condiciones
Cooperativa o gremio	Negocia precios de compra en volumen	Coordina la red de ensayos, registra datos y publica resultados para sus socios
Empresa de insumos	Presenta ensayos seleccionados	Aporta producto para ensayos en red y accede a datos de desempeño en condiciones reales para mejorar su producto y su recomendación
Autoridad de registro	Evalúa la eficacia con protocolos definidos	Puede considerar la evidencia de redes de ensayos en finca como complemento de los ensayos de registro [aplicabilidad según la normativa a confirmar]
Universidad o centro de investigación	Ensayos experimentales en estaciones	Diseño estadístico de la red, análisis y validación de resultados

Una empresa de insumos con un producto bueno tiene interés en participar: la evidencia en finca, publicada por una cooperativa, es más creíble para los productores que cualquier presentación de ventas. Una empresa con un producto débil tiene interés en evitarla. Esa diferencia, por sí sola, es una señal útil para la cooperativa.

3.8 La cooperativa cacaotera, reescrita

Volvamos a Santo Domingo con una red de experimentación en finca.

Cuando el vendedor presenta su bioestimulante, la cooperativa propone otra cosa: ensayarlo en veinte fincas de socios durante una campaña, con franjas tratadas y testigo asignadas al azar, con producto donado por la empresa para las franjas tratadas y con el registro de condiciones de cada finca. Un técnico de la cooperativa, con apoyo de la universidad local, diseña el protocolo y registra la cosecha por franja. La empresa acepta, porque confía en su producto.

Al final de la campaña, el metaanálisis de las veinte fincas muestra un efecto promedio positivo con un intervalo de confianza que no incluye el cero. Pero la variabilidad entre fincas es alta, y el intervalo de predicción para una finca nueva incluye efectos cercanos a cero. Con el precio del cacao de ese momento y el costo del producto, la probabilidad de recuperar la inversión en una finca cualquiera es moderada.

La metarregresión, con las variables definidas antes del análisis, sugiere que el efecto es mayor en las fincas con suelos más ácidos y con menor fertilización. Para esas fincas, la probabilidad de recuperar la inversión es alta; para las demás, baja. La cooperativa publica los resultados en una ficha para sus socios y repite el ensayo en la campaña siguiente para confirmar la relación con el suelo.

Los socios con suelos ácidos y baja fertilización compran el producto. Los demás no. La empresa vende menos que en la versión original, pero a clientes que van a recomprar, y usa los datos para ajustar su recomendación técnica. La cooperativa, por su parte, tiene ahora un método para evaluar cualquier insumo que le ofrezcan.

Fase 4. El framework de acción: cinco pasos para comprar insumos con evidencia

Paso	Acción concreta	Responsable	Evidencia de cumplimiento	Plazo de referencia
1. Pedir la distribución, no el promedio	Ante cualquier insumo nuevo, solicitar a la empresa el número de ensayos, su diseño, los resultados por sitio y la variabilidad entre sitios, además del promedio	Responsable técnico de la cooperativa, gremio o empresa	Ficha de evidencia del producto con resultados por sitio	Antes de cada decisión de compra
2. Organizar una red de ensayos en finca	Seleccionar un grupo de fincas representativas; definir un protocolo de franjas tratadas y testigo asignadas al azar, con repeticiones, y el registro de condiciones de cada finca	Cooperativa o gremio con apoyo universitario	Protocolo aprobado y fincas inscritas antes del inicio de la campaña	Antes de la campaña
3. Registrar cosecha y condiciones por franja	Medir la cosecha por franja y registrar suelo, manejo, clima y aplicación del insumo en cada finca	Técnicos de campo con los productores	Base de datos completa por finca y franja	Durante la campaña

Paso	Acción concreta	Responsable	Evidencia de cumplimiento	Plazo de referencia
4. Analizar con metaanálisis y calcular la probabilidad de recuperar la inversión	Estimar efecto promedio, variabilidad entre fincas, intervalo de predicción y probabilidad de que el insumo pague su costo al precio vigente; explorar con metarregresión las condiciones definidas de antemano	Analista con apoyo universitario	Informe con efecto, intervalos, probabilidad de rentabilidad y condiciones asociadas	Al cierre de la campaña
5. Publicar la ficha y repetir	Entregar a los productores una ficha clara con la probabilidad de recuperar la inversión según sus condiciones; repetir el ensayo para confirmar los resultados y acumular evidencia	Cooperativa o gremio	Ficha publicada y red de ensayos de la siguiente campaña planificada	Al inicio de la siguiente campaña

Regla de cierre para la gerencia o la asamblea: antes de aprobar la compra de un insumo para muchos productores, pregunte cuál es la probabilidad de que el insumo pague su costo en una finca cualquiera, al precio actual del producto. Si nadie puede responder, la compra es una apuesta colectiva.

Nota del autor: la creación de la categoría de bioestimulantes de las plantas en el Reglamento (UE) 2019/1009 es un hecho regulatorio documentado. El escenario de la cooperativa cacaotera y del bioestimulante es una construcción narrativa; los métodos de experimentación en finca, metaanálisis de efectos

aleatorios y cálculo de probabilidad de rentabilidad descritos son reales y aplicables a fertilizantes, bioinsumos, variedades y prácticas de manejo.

Capítulo 19. Gemelos digitales agroindustriales: simular antes de arriesgar la cosecha

Un gemelo digital no predice el futuro. Permite equivocarse primero en una copia.

Esquema del capítulo

- Qué es y qué no es un gemelo digital: modelo, sombra y gemelo, y por qué la mayoría de los proyectos se quedan en tableros.
- El problema de los sistemas biológicos: estados que no se miden directamente, sensores que derivan y decisiones que no admiten ensayo en la realidad.
- La arquitectura de un gemelo útil: modelo mecanístico, asimilación de datos, cuantificación de la incertidumbre, decisión con riesgo explícito y criterio económico para saber cuándo vale la pena construirlo.

Fase 1. El gancho: la nave que se salvó en tierra y la piscina que se ahogó de noche

Houston, abril de 1970

En abril de 1970, la misión Apolo 13 sufrió la explosión de un tanque de oxígeno en el módulo de servicio cuando viajaba hacia la Luna. La tripulación tuvo que usar el módulo lunar como refugio y regresar a la Tierra con energía, agua y oxígeno limitados. Una parte de la recuperación se resolvió en tierra: los ingenieros usaron simuladores y equipos que reproducían los sistemas de la nave para ensayar procedimientos de encendido, de consumo de energía y de corrección de trayectoria antes de transmitirlos a los astronautas [fuente histórica de la NASA a confirmar].

El principio que se aplicó en Houston es la base de lo que hoy se llama gemelo digital: una réplica del sistema real, alimentada con información del estado real, donde se pueden probar decisiones antes de ejecutarlas en un sistema que no

admite errores. La diferencia con 1970 es que hoy la réplica puede ser un modelo computacional, actualizado de forma continua con datos de sensores, y puede construirse para una planta de alimentos, una plantación o una piscina de camarón.

Golfo de Guayaquil, 4:30 de la mañana

Escenario compuesto. La camaronera y los personajes son ficticios; los mecanismos biológicos y los métodos descritos son reales.

Una camaronera de tamaño mediano tiene sus piscinas en una etapa avanzada del ciclo, con alta biomasa de camarón. La tarde fue nublada y calurosa, sin viento. El técnico de turno revisa el oxígeno disuelto a las diez de la noche con una sonda portátil: el valor es aceptable. Enciende los aireadores de las piscinas que, por experiencia, suelen bajar más, y deja apagados los de las demás para ahorrar diésel y electricidad.

A las cuatro y media de la mañana, un trabajador encuentra camarones en el borde de una de las piscinas con aireadores apagados, señal de falta de oxígeno. Para cuando los aireadores se encienden, una parte importante de la biomasa de esa piscina está muerta o debilitada. La pérdida equivale a buena parte del margen esperado de esa piscina en el ciclo.

El técnico no cometió un error de procedimiento. Tomó una decisión con la información que tenía: una medición de las diez de la noche y su experiencia. Lo que no tenía era una forma de estimar cuánto iba a bajar el oxígeno en cada piscina antes del amanecer, con la biomasa, la temperatura, la nubosidad de la tarde y la carga de fitoplancton de esa noche específica. La camaronera tenía datos de oxígeno de los últimos tres ciclos en una hoja de cálculo. No tenía un modelo que los usara para anticipar.

Fase 2. El diagnóstico: por qué los gemelos digitales del agro suelen quedarse en tableros

2.1 Modelo, sombra y gemelo

El término gemelo digital se usa para describir cosas muy distintas, desde un modelo tridimensional de una planta hasta un tablero con datos de sensores. La literatura de manufactura propuso una distinción útil según el flujo de

información entre el objeto físico y su representación digital (Kritzinger et al., 2018):

Nivel	Flujo de información	Ejemplo en una camaronera
Modelo digital	Ninguno automático: el modelo se alimenta y se consulta de forma manual	Hoja de cálculo para estimar biomasa a partir de muestreos
Sombra digital	Del objeto físico al digital, de forma automática	Tablero que muestra en tiempo real el oxígeno medido por sensores
Gemelo digital	En ambos sentidos: el estado real actualiza el modelo y el modelo informa o ejecuta decisiones sobre el sistema real	Modelo que estima el oxígeno futuro de cada piscina con los datos de los sensores y decide o recomienda cuándo encender cada aireador

La mayoría de los proyectos agrícolas que se presentan como gemelos digitales son sombras digitales: muestran lo que pasa, pero no anticipan ni ayudan a decidir. Una sombra digital tiene valor, pero no resuelve el problema de las cuatro y media de la mañana, porque cuando el sensor muestra el oxígeno bajo, ya es tarde.

Las revisiones sobre gemelos digitales en agricultura coinciden en que el concepto es prometedor y en que su aplicación aún es temprana, con pocos casos que cierren el ciclo completo entre datos, modelo y decisión (Pylianidis et al., 2021; Verdouw et al., 2021).

2.2 Los sistemas biológicos tienen estados ocultos

Una máquina industrial tiene pocas variables de estado y casi todas pueden medirse. Un sistema biológico tiene estados que no se miden de forma directa o que se miden con poca frecuencia. En una piscina de camarón, la biomasa se estima con muestreos periódicos; la densidad y la actividad del fitoplancton, que producen oxígeno de día y lo consumen de noche, cambian rápido y rara vez se miden; la demanda de oxígeno del sedimento depende de la materia orgánica acumulada, que nadie mide a diario.

El oxígeno disuelto que mide el sensor es la consecuencia de todos esos estados ocultos. Un tablero muestra la consecuencia. Un gemelo digital estima las causas a partir de la consecuencia y las usa para proyectar.

2.3 Los sensores mienten con el tiempo

Los sensores en ambientes agrícolas y acuícolas se ensucian, pierden calibración y fallan. Una sonda de oxígeno disuelto expuesta al agua de una piscina acumula biopelícula y su lectura se desvía de forma gradual. Si el sistema trata cada lectura como verdad, un sensor desviado puede llevar a decisiones equivocadas con apariencia de precisión. Es el problema de integridad del capítulo 7, pero por desgaste y no por ataque.

2.4 Las decisiones biológicas no admiten ensayo

En un sistema biológico, muchas decisiones no se pueden probar en la realidad sin riesgo. Un camaronero no puede apagar los aireadores de una piscina para ver qué pasa. Un productor de cacao no puede probar tres esquemas de fertilización en la misma parcela al mismo tiempo. Un jefe de planta no puede detener la cadena de frío para ver cuánto aguanta el producto. Sin un modelo que permita ensayar, las decisiones se toman por experiencia y se corrigen solo después de un error costoso, como el de la madrugada.

2.5 El gemelo como proyecto tecnológico sin pregunta de decisión

Muchos proyectos de gemelos digitales fracasan antes de producir valor porque empiezan por la tecnología: sensores, plataforma, visualización en tres dimensiones. Sin una decisión concreta que el gemelo deba mejorar, el proyecto produce un tablero sofisticado que nadie usa para decidir. Es el mismo error del capítulo 10: construir un sistema que muestra en lugar de uno que responde.

Fase 3. La tesis: un gemelo digital útil es un modelo de decisión con incertidumbre

3.1 Empezar por la decisión

Un gemelo digital útil se define por la decisión que mejora. En la camaronera, la decisión es cuándo encender cada aireador durante la noche. En una planta de congelado, puede ser cómo secuenciar la carga de los túneles. En una plantación, cuándo regar o cuándo aplicar un tratamiento sanitario. La decisión determina qué variables deben estimarse, con qué frecuencia y con qué precisión.

Para la decisión de aireación, la pregunta operativa es: ¿cuál es la probabilidad de que el oxígeno disuelto de cada piscina caiga por debajo del umbral crítico antes del amanecer si no se enciende el aireador ahora?

3.2 El modelo mecanístico: el balance de oxígeno

Los gemelos digitales de sistemas biológicos funcionan mejor cuando combinan conocimiento científico del proceso con datos. El conocimiento científico se expresa en un modelo mecanístico: ecuaciones que describen los procesos físicos y biológicos. Para el oxígeno disuelto en una piscina, el balance de masa tiene una estructura conocida en la literatura de calidad de agua en acuicultura (Boyd y Tucker, 1998):

$$\frac{dOD}{dt} = F + R_{at} + A - R_{cam} - R_{plan} - R_{sed}$$

donde OD es la concentración de oxígeno disuelto, F la producción de oxígeno por fotosíntesis del fitoplancton (cero en la noche), R_{at} el intercambio con la atmósfera, que depende de la diferencia con la saturación y del viento, A el aporte de los aireadores, R_{cam} el consumo de los camarones, proporcional a su biomasa y dependiente de la temperatura, R_{plan} la respiración del plancton y R_{sed} la demanda del sedimento.

Cada término tiene una forma funcional conocida y parámetros que dependen de la piscina. La respiración del camarón crece con la temperatura y con la biomasa. La respiración del plancton es mayor cuando hubo mucha fotosíntesis

durante el día. Por eso una tarde nublada y caliente, como la del escenario, combina menos oxígeno acumulado de día con más consumo de noche.

3.3 Asimilación de datos: que el modelo se corrija con los sensores

Un modelo mecanístico con parámetros fijos se desvía de la realidad. Un conjunto de datos de sensores sin modelo no puede proyectar. La asimilación de datos combina ambos: el modelo proyecta el estado y los sensores lo corrigen cada vez que llega una medición.

La formulación general es un modelo de espacio de estados:

$$\mathbf{x}_{t+1} = f(\mathbf{x}_t, \mathbf{u}_t, \boldsymbol{\theta}) + \mathbf{w}_t, \qquad \mathbf{y}_t = h(\mathbf{x}_t) + \mathbf{v}_t$$

donde $\mathbf{x}_t$ es el vector de estados (oxígeno disuelto, actividad del plancton, demanda del sedimento), $\mathbf{u}_t$ las acciones de control (aireadores encendidos), $\boldsymbol{\theta}$ los parámetros de la piscina, $\mathbf{y}_t$ las mediciones de los sensores, y $\mathbf{w}_t$ y $\mathbf{v}_t$ los errores del modelo y de la medición. El filtro de Kalman, desarrollado en 1960 para estimar estados de sistemas a partir de mediciones con ruido (Kalman, 1960), y sus extensiones para sistemas no lineales permiten actualizar en cada paso la estimación de los estados ocultos y su incertidumbre.

La asimilación resuelve dos problemas del diagnóstico. Estima los estados ocultos (la actividad del plancton de esa noche se infiere a partir de cómo evoluciona el oxígeno medido). Y detecta sensores desviados: si un sensor reporta valores que el modelo considera muy improbables durante varias horas seguidas, mientras los sensores vecinos se comportan como se espera, el sistema marca el sensor para revisión en lugar de confiar en él.

3.4 Del estado estimado a la probabilidad de riesgo

Con los estados estimados y su incertidumbre, el gemelo proyecta la trayectoria del oxígeno hasta el amanecer. Como la proyección es incierta, se simulan muchas trayectorias posibles (por ejemplo, con distintas combinaciones de parámetros y condiciones dentro de su rango de incertidumbre) y se estima la probabilidad de cruzar el umbral crítico:

$$p_{riesgo} = P\left(\min_{t \in [\text{ahora, amanecer}]} OD_t < OD_{crit} \;\middle|\; \text{sin aireación}\right)$$

El resultado no es "el oxígeno llegará a tal valor", sino "hay una probabilidad de tal porcentaje de que el oxígeno caiga por debajo del umbral en esta piscina

antes de las cinco y media". Esa forma de expresar el resultado es la que permite decidir con criterio económico.

3.5 Decidir con riesgo explícito

La decisión de encender un aireador tiene un costo conocido (energía o combustible durante las horas de operación) y evita una pérdida incierta (mortalidad de camarón). La regla de decisión es encender cuando la pérdida esperada evitada supera el costo de operar:

$$\text{Encender si} \quad p_{riesgo} \times L_{mort} > C_{aire}$$

donde L_{mort} es el valor de la pérdida esperada si el oxígeno cruza el umbral (biomasa en la piscina por la fracción de mortalidad esperada por el precio, más el efecto en el crecimiento del resto) y C_{aire} el costo de operar el aireador hasta el amanecer. El umbral de probabilidad que activa la decisión no es fijo: depende de cuánta biomasa hay en la piscina y de cuánto vale. En una piscina al final del ciclo, con mucha biomasa, el gemelo recomienda encender con probabilidades de riesgo bajas. En una piscina recién sembrada, solo con probabilidades altas.

Cuando el número de aireadores o la energía disponible son limitados, el problema se convierte en una asignación: encender primero donde la pérdida esperada evitada por unidad de costo es mayor. En sistemas más complejos, la decisión puede formularse como control predictivo basado en modelo, que optimiza la secuencia de acciones en un horizonte de tiempo y la recalcula cada vez que llegan nuevos datos (Rawlings et al., 2017).

3.6 Validar el gemelo y gobernarlo

Un gemelo digital que toma o recomienda decisiones con efecto económico es un modelo de riesgo medio o alto, según los criterios del capítulo 3. Debe tener un dueño, una ficha, una validación y un monitoreo.

La validación de un gemelo tiene dos niveles. El primero es la exactitud de sus proyecciones: comparar la trayectoria de oxígeno proyectada al inicio de la noche con la medida hasta el amanecer, en muchas noches y en distintas piscinas, y verificar que los intervalos de incertidumbre contienen el valor real con la frecuencia esperada. El segundo es el valor de sus decisiones: comparar, en un periodo de operación en sombra como el descrito en el capítulo 3, las

decisiones recomendadas por el gemelo con las tomadas por el técnico, y estimar la diferencia en mortalidad y en costo de energía.

La seguridad del capítulo 7 se aplica con especial cuidado. Un gemelo que controla equipos físicos es un punto de ataque. Debe operar en la red de tecnología de operación, con un modo de respaldo que encienda todos los aireadores si el gemelo o los sensores fallan, y con la posibilidad de que el técnico lo anule en cualquier momento.

3.7 Cuándo vale la pena construir un gemelo

No todas las decisiones justifican un gemelo digital. Construirlo y mantenerlo cuesta: sensores, calibración, desarrollo del modelo, validación, operación. La teoría del valor de la información ofrece el criterio (Howard, 1966): un sistema de información vale la diferencia entre el resultado esperado de decidir con él y el resultado esperado de decidir sin él.

$$VI = \mathbb{E}[\text{resultado} \mid \text{decidir con el gemelo}] - \mathbb{E}[\text{resultado} \mid \text{decidir sin el gemelo}]$$

El gemelo vale la pena cuando este valor, sumado sobre todas las decisiones de un año, supera su costo anual. Tres condiciones hacen que el valor sea alto: que la decisión se repita con frecuencia, que el costo de equivocarse sea alto y que la información actual del decisor sea pobre. La aireación nocturna en piscinas con alta biomasa cumple las tres. La decisión de fecha de cosecha de una plantación de cacao, que se toma pocas veces al año y con buena información visual, probablemente no.

Esta prueba evita el error más costoso de los gemelos digitales: construir uno porque la tecnología está disponible y no porque una decisión lo necesita.

3.8 Del gemelo de la piscina al gemelo de la cadena

Un gemelo bien construido para una decisión crítica se convierte en el núcleo de gemelos más amplios. El modelo de oxígeno, combinado con un modelo de crecimiento del camarón y con los registros de alimentación, permite simular el resultado del ciclo con distintas estrategias de densidad de siembra, alimentación y fecha de cosecha. Ese gemelo del ciclo, conectado con los precios por talla y con la capacidad de la empacadora, permite planificar la cosecha de varias camaroneras para que lleguen a la planta en el momento y en las tallas que el mercado paga mejor.

En ese nivel, el gemelo digital conecta los capítulos del libro: usa bio-datos (capítulo 1), puede respaldar un expediente de riesgo para un banco o una aseguradora (capítulo 2), se gobierna como un modelo (capítulo 3), se protege como un sistema crítico (capítulo 7) y conserva en forma de modelo parte del conocimiento de los técnicos con más experiencia (capítulo 25). Pero cada ampliación debe pasar la misma prueba del valor de la información. Un gemelo de la cadena completa que nadie usa para decidir es un tablero muy caro.

3.9 La camaronera, reescrita

Volvamos al Golfo de Guayaquil con un gemelo digital de oxígeno en operación.

Cada piscina tiene una sonda de oxígeno y temperatura, con limpieza programada y calibración semanal. Una estación meteorológica en la finca registra radiación solar, viento y temperatura. La biomasa de cada piscina se actualiza con los muestreos semanales. Cada quince minutos, el gemelo asimila las mediciones, actualiza la estimación de los estados ocultos y proyecta el oxígeno de cada piscina hasta el amanecer.

La tarde nublada y calurosa queda registrada como baja radiación y alta temperatura. A las nueve de la noche, el gemelo estima que la actividad del plancton es alta y que la producción de oxígeno durante el día fue baja. Para la piscina que en la versión original perdió su biomasa, la probabilidad de cruzar el umbral antes del amanecer es alta, y con la biomasa que tiene, la pérdida esperada supera con amplitud el costo de la aireación. El sistema envía una alerta al técnico con la recomendación de encender los aireadores a las once. El técnico confirma. Para otras dos piscinas con poca biomasa, el gemelo recomienda esperar; a la una de la mañana, con nuevas mediciones, recomienda encender una de ellas.

A las cuatro de la mañana, el sensor de una piscina empieza a reportar valores muy por encima de lo que el modelo considera posible. El gemelo lo marca como sospechoso y basa su proyección en el modelo y en las piscinas vecinas. En la mañana, la revisión encuentra biopelícula en la sonda.

Esa noche no hubo mortalidad. El consumo de energía fue algo mayor que en una noche típica, pero mucho menor que si se hubieran encendido todos los aireadores por precaución. Al final del ciclo, la comparación entre las decisiones del gemelo y las del periodo anterior muestra menos episodios de oxígeno bajo y un costo de aireación similar.

Fase 4. El framework de acción: cinco pasos para construir un gemelo digital que decida

Paso	Acción concreta	Responsable	Evidencia de cumplimiento	Plazo de referencia
1. Elegir la decisión y calcular su valor	Identificar una decisión frecuente, costosa cuando falla y tomada hoy con información pobre; estimar cuánto se pierde al año por errores en esa decisión	Gerencia de producción con finanzas	Decisión seleccionada con estimación de la pérdida anual actual y del valor máximo que un gemelo podría capturar	2 a 3 semanas
2. Construir el modelo mecanístico mínimo	Formular el balance del proceso con la literatura técnica disponible; identificar los estados que no se miden y los parámetros que deben estimarse para cada unidad	Equipo técnico con apoyo universitario o consultor	Modelo documentado con ecuaciones, supuestos, parámetros y fuentes	4 a 8 semanas
3. Instalar la medición y la asimilación	Instalar los sensores necesarios con su plan de limpieza y calibración; implementar la asimilación de datos con estimación de incertidumbre y detección de sensores desviados	Equipo técnico con proveedor de sensores y analista de datos	Sistema que actualiza los estados estimados con su incertidumbre y marca sensores sospechosos	1 a 3 meses

Paso	Acción concreta	Responsable	Evidencia de cumplimiento	Plazo de referencia
4. Validar en sombra	Operar el gemelo en paralelo con la decisión humana durante un periodo representativo; comparar proyecciones con mediciones y decisiones recomendadas con decisiones tomadas	Dueño del modelo con validador independiente	Informe de validación con exactitud de proyecciones, calibración de la incertidumbre y diferencia estimada en resultado económico	1 ciclo productivo
5. Decidir con regla económica y gobernar	Implementar la regla de decisión con costo y pérdida esperada explícitos; registrar el gemelo en el inventario de modelos; instalar el modo de respaldo seguro y la anulación manual	Gerencia de producción con TI y calidad	Regla de decisión aprobada, ficha del modelo, modo de respaldo probado y primer informe de resultados	Al inicio del siguiente ciclo

Regla de cierre para el directorio: ante cualquier propuesta de gemelo digital, pida que se nombre la decisión que va a mejorar, cuánto cuesta hoy equivocarse en esa decisión y cómo se medirá la mejora. Si la propuesta empieza por la plataforma y no por la decisión, todavía no es un gemelo digital.

Nota del autor: la misión Apolo 13 y el uso de simuladores en tierra para preparar los procedimientos de recuperación son hechos históricos documentados; los detalles deben precisarse con fuentes de la NASA antes de la publicación. El escenario de la camaronera es una construcción narrativa; el balance de oxígeno en piscinas, los métodos de asimilación de datos y los criterios de decisión descritos son reales y aplicables.

Capítulo 20. Innovación de producto con datos del consumidor: lanzar lo que alguien va a comprar

Que a la gente le guste un producto en una degustación no significa que lo vaya a comprar dos veces.

Esquema del capítulo

- Por qué fracasan los productos agroalimentarios nuevos: degustaciones que miden la preferencia equivocada, intención de compra inflada y desarrollos que ignoran costo, vida útil y regulación hasta el final.
- El consumidor como fuente de datos que se pueden medir con método.
- Arquitectura de desarrollo basado en datos: pruebas sensoriales con diseño, análisis de penalidades, análisis conjunto para estimar disposición a pagar, intención de compra calibrada y puertas de decisión que integran costo, vida útil y cumplimiento.

Fase 1. El gancho: la fórmula que ganó las degustaciones y perdió el mercado

Estados Unidos, 1985

En abril de 1985, The Coca-Cola Company reemplazó la fórmula de su bebida principal por una nueva, más dulce. La decisión se apoyó en una investigación de mercado extensa, que incluyó un gran número de pruebas de sabor a ciegas en las que la nueva fórmula superaba a la anterior y a la de su principal competidor. Pocas semanas después del lanzamiento, la empresa enfrentaba una reacción de rechazo de una parte de sus consumidores, que no reclamaban por el sabor en sí, sino por la pérdida del producto que conocían. En julio de ese mismo año, la empresa reintrodujo la fórmula original con el nombre de Coca-Cola Classic [cifras de pruebas y fechas exactas a confirmar con fuentes primarias].

El caso se estudia en escuelas de negocios por una razón metodológica: las pruebas medían bien lo que medían, que era la preferencia en un sorbo a ciegas. No medían la relación del consumidor con la marca, el efecto de beber una lata completa de una bebida más dulce ni la reacción ante la desaparición del producto original. Los datos eran correctos para una pregunta distinta de la que había que responder.

Guayaquil, una línea de chocolates que no se vendió

Escenario compuesto. La empresa y los personajes son ficticios; los mecanismos y métodos descritos son reales.

Una chocolatería de origen decide lanzar una línea de barras con alto porcentaje de cacao e inclusiones de frutas amazónicas deshidratadas, pensada para consumidores jóvenes interesados en productos saludables y de origen. El equipo desarrolla tres prototipos y los prueba con veinte personas de la empresa y sus familias. Todos los prefieren a las barras actuales. El gerente aprueba la fórmula más elogiada, diseña un empaque atractivo y lanza la línea en tres cadenas de supermercados.

Seis meses después, las ventas están muy por debajo de lo previsto y la tasa de recompra es baja. Una encuesta rápida en tiendas revela tres problemas. El amargor de la barra es excesivo para una parte importante de los consumidores del segmento al que apuntaba. El precio, fijado para cubrir el costo de las inclusiones importadas desde otra región, está por encima de lo que esos consumidores pagan por una barra de chocolate. Y algunas inclusiones absorben humedad y se ablandan antes de la fecha de vencimiento impresa, lo que genera reclamos.

Cada problema era detectable antes del lanzamiento. Ninguno se midió.

Fase 2. El diagnóstico: por qué fracasan los productos nuevos

2.1 Probar con quien no compra

Las pruebas internas, con personal de la empresa, amigos y familia, tienen tres sesgos conocidos: los participantes no representan al consumidor objetivo, conocen el producto y a quienes lo hicieron, y tienden a responder de forma

favorable. Veinte personas que trabajan en una chocolatería no representan a los consumidores jóvenes de supermercado. Sus preferencias pueden ser opuestas.

2.2 Medir el agrado sin medir el porqué

La pregunta "¿le gusta?" produce un número, pero no explica qué atributos del producto generan agrado o rechazo, ni qué cambiar. Un producto puede tener un agrado promedio aceptable y, al mismo tiempo, un atributo que una parte de los consumidores considera excesivo (demasiado amargo, demasiado dulce, demasiado duro) y que le resta mucho agrado a esa parte. El promedio esconde a ese grupo, que es el que no recomprará.

2.3 La intención de compra sobrestimada

Cuando se pregunta a un consumidor si compraría un producto, la respuesta suele sobrestimar lo que hará en realidad. La literatura de investigación de mercados documentó hace décadas que la intención de compra declarada debe ajustarse para predecir el comportamiento real, y que el ajuste depende del tipo de producto y del contexto (Jamieson y Bass, 1989). Una empresa que proyecta ventas multiplicando el porcentaje de personas que dicen "lo compraría" por el tamaño del mercado proyecta ventas que no ocurrirán.

2.4 El precio se descubre al final

Muchos desarrollos fijan el precio al final, sumando costos y un margen, sin haber medido cuánto está dispuesto a pagar el consumidor objetivo por los atributos del producto. Si el precio resultante supera esa disposición, el producto fracasa por mucho que guste. El precio es un atributo del producto, y debe probarse junto con los demás.

2.5 Costo, vida útil y regulación como sorpresas

Los desarrollos de producto en empresas medianas suelen avanzar por etapas aisladas: primero la fórmula, después el empaque, después el costo, después la vida útil, después la notificación sanitaria. Cada etapa descubre problemas que obligan a volver atrás. Las inclusiones que se ablandan son un problema de vida útil que el capítulo 15 habría detectado con un estudio a distintas temperaturas y humedades. Un ingrediente con límites de uso o con requisitos de etiquetado en un mercado de exportación es un problema de cumplimiento que el capítulo 5 habría detectado. Un costo que no deja margen al precio aceptable es un

problema que el capítulo 13 habría detectado con el costo efectivo de las materias primas.

Fase 3. La tesis: el desarrollo de producto como una secuencia de decisiones con datos

3.1 Puertas de decisión con criterios explícitos

La gestión de desarrollo de nuevos productos por etapas y puertas organiza el proceso en fases separadas por puntos de decisión, en los que un comité decide continuar, ajustar o cancelar el proyecto según criterios definidos de antemano (Cooper, 1990). La versión basada en datos de este modelo exige que cada puerta tenga criterios cuantitativos y que los criterios técnicos, comerciales y regulatorios se evalúen en paralelo y no en serie.

Puerta	Pregunta de decisión	Datos necesarios
1. Concepto	¿Existe un consumidor objetivo con una necesidad que este producto resuelve?	Definición del segmento, prueba de concepto con consumidores del segmento
2. Prototipo	¿El producto gusta al consumidor objetivo y qué hay que corregir?	Prueba sensorial con diseño, análisis de penalidades
3. Viabilidad	¿Se puede producir a un costo que deje margen al precio que el consumidor está dispuesto a pagar, con la vida útil necesaria y cumpliendo los requisitos de cada mercado?	Disposición a pagar, costo efectivo, estudio de vida útil, revisión regulatoria
4. Lanzamiento	¿Cuánto se venderá y qué tasa de recompra se espera?	Intención de compra calibrada, prueba de mercado limitada

Puerta	Pregunta de decisión	Datos necesarios
5. Revisión	¿El producto cumple lo proyectado?	Ventas, recompra, reclamos, margen real

Si el autor del libro dispone de una metodología propia de innovación agroindustrial, este es el lugar para integrarla con el modelo de puertas [referencia al Método SIPA a incorporar por el autor].

3.2 Pruebas sensoriales con consumidores del segmento

Las pruebas de agrado con consumidores siguen métodos establecidos. La escala hedónica de nueve puntos, desarrollada en el contexto de la investigación sobre alimentación militar en Estados Unidos, sigue siendo una de las herramientas más usadas para medir el agrado de un alimento (Peryam y Pilgrim, 1957). Una prueba bien diseñada cumple condiciones mínimas:

- **Participantes del segmento objetivo**, seleccionados por criterios de consumo de la categoría, y no personal de la empresa.
- **Número suficiente de participantes** para detectar las diferencias de agrado que importan, calculado con la misma lógica de tamaño de muestra del capítulo 21.
- **Presentación ciega, codificada y en orden balanceado**, para que la marca, el empaque o el orden no influyan.
- **Comparación con un producto de referencia** del mercado, para saber si el nuevo producto compite.

3.3 El análisis de penalidades: qué corregir

Para saber qué cambiar, se combina la escala de agrado con escalas de "punto justo" para los atributos clave: el participante indica si el amargor, el dulzor, la dureza o el tamaño de las inclusiones están "muy por debajo", "en su punto" o "muy por encima" de lo que prefiere. El análisis de penalidades compara el agrado promedio de quienes encuentran un atributo en su punto con el de quienes lo encuentran por encima o por debajo:

$$\text{Penalidad}_{a,+} = \bar{H}_{a,\text{en su punto}} - \bar{H}_{a,\text{demasiado}}$$

y la pondera por la proporción de participantes que están en ese grupo. Un atributo con una penalidad grande y una proporción alta de participantes que lo encuentran excesivo es la prioridad de corrección. En la chocolatería, un análisis de penalidades con consumidores del segmento habría mostrado que una proporción importante encontraba la barra demasiado amarga y que ese grupo le daba un agrado bajo. La corrección (bajar el porcentaje de cacao o equilibrar con otro ingrediente) habría ocurrido antes del lanzamiento.

3.4 El análisis conjunto: cuánto vale cada atributo

Para estimar cuánto está dispuesto a pagar el consumidor por cada atributo del producto, el análisis conjunto presenta a los participantes perfiles de producto que combinan distintos niveles de atributos (porcentaje de cacao, tipo de inclusión, origen declarado, certificación, tamaño, precio) y les pide elegir entre ellos (Green y Srinivasan, 1978). Con las elecciones, un modelo estadístico estima la utilidad que cada nivel aporta:

$$U_j = \sum_k \beta_k \; x_{jk} + \beta_p \, p_j$$

donde U_j es la utilidad del perfil j, x_{jk} los niveles de sus atributos, β_k la utilidad de cada nivel y β_p el coeficiente del precio p_j, normalmente negativo. La disposición marginal a pagar por un atributo se obtiene dividiendo su utilidad por el valor absoluto del coeficiente del precio:

$$DAP_k = \frac{\beta_k}{|\beta_p|}$$

Con este resultado, la empresa sabe cuánto más pagaría el consumidor por la inclusión de fruta amazónica, por la declaración de origen o por una certificación, y puede comparar esa cifra con el costo de cada atributo. Un atributo cuyo costo supera la disposición a pagar no debe incluirse, por atractivo que parezca en la sala de reuniones. En la chocolatería, el análisis habría mostrado si la disposición a pagar por las inclusiones importadas cubría su costo.

3.5 Calibrar la intención de compra

Para proyectar ventas, la intención de compra declarada se ajusta. Una práctica común es ponderar las respuestas de las categorías superiores de la escala con

coeficientes menores que uno, que reflejan la proporción de quienes efectivamente compran entre quienes dicen que comprarían:

$$\text{Prueba esperada} = w_1 \times \%\text{ "seguro lo compraría"} + w_2 \times \%\text{ "probablemente lo compraría"}$$

Los coeficientes w_1 y w_2 no son universales: dependen de la categoría, del país y del tipo de producto, y deben calibrarse con la experiencia de la empresa comparando la intención declarada en lanzamientos anteriores con las ventas reales [valores de referencia a confirmar]. Una empresa que no tiene historial puede usar coeficientes conservadores y ajustarlos con cada lanzamiento. La proyección de ventas debe incluir además la tasa de recompra, que es la que determina si un producto sobrevive después de la curiosidad inicial.

3.6 Clasificar los atributos según su efecto en la satisfacción

No todos los atributos afectan la satisfacción de la misma manera. El modelo de Kano distingue atributos básicos, cuya ausencia genera insatisfacción pero cuya presencia no genera entusiasmo; atributos de desempeño, cuya mejora aumenta la satisfacción de forma proporcional; y atributos de entusiasmo, que no se esperan pero generan satisfacción cuando aparecen (Kano et al., 1984). En un chocolate, la ausencia de defectos de textura y de sabor es un atributo básico; la intensidad del sabor a cacao puede ser de desempeño; una inclusión original puede ser de entusiasmo.

La clasificación orienta las prioridades: primero asegurar los atributos básicos (la barra no puede ablandarse antes de su fecha), luego optimizar los de desempeño y finalmente invertir en los de entusiasmo. La chocolatería invirtió en un atributo de entusiasmo (las inclusiones) y falló en uno básico (la estabilidad de la textura).

3.7 Integrar lo técnico desde el prototipo

La puerta 3 del modelo integra las herramientas de los capítulos anteriores en una sola evaluación de viabilidad:

- Costo efectivo de cada ingrediente (capítulo 13), con escenarios de precio y la calculadora de costos y margen de la empresa.

- **Vida útil estimada** con estudios acelerados y modelos de deterioro (capítulo 15), incluidos los cambios de textura y humedad de las inclusiones.
- **Requisitos regulatorios** de cada mercado de destino (capítulo 5): ingredientes permitidos, límites de contaminantes, etiquetado.
- **Trazabilidad y autenticidad** de los ingredientes cuyo origen se declara (capítulos 1 y 4), porque una declaración de origen amazónico que no se puede demostrar es un riesgo de fraude o de afirmación engañosa.

Un producto que no supera esta puerta no llega al lanzamiento, aunque haya ganado las pruebas de agrado. Un producto que la supera llega con su costo, su vida útil y su cumplimiento resueltos.

3.8 La chocolatería, reescrita

Volvamos a Guayaquil con un proceso de desarrollo basado en datos.

El concepto de una línea de barras con alto porcentaje de cacao e inclusiones amazónicas se prueba primero con consumidores jóvenes del segmento objetivo, que muestran interés. Los tres prototipos se evalúan con una prueba sensorial a ciegas con participantes seleccionados por consumo de chocolate en supermercados, junto con una barra líder del mercado como referencia. El análisis de penalidades muestra que una proporción importante encuentra el prototipo con más cacao demasiado amargo, y que ese grupo le da un agrado bajo. El equipo ajusta la fórmula y la vuelve a probar.

El análisis conjunto muestra que el consumidor objetivo valora la declaración de origen ecuatoriano y que su disposición a pagar por las inclusiones de fruta es menor que el costo de las inclusiones importadas desde otra región. El equipo reemplaza esas inclusiones por frutas de proveedores locales con trazabilidad, de menor costo y con una historia de origen más coherente. El estudio de vida útil detecta que las inclusiones absorben humedad en ciertas condiciones; el equipo cambia el proceso de deshidratación y el material de empaque. La revisión regulatoria confirma los requisitos de etiquetado para el mercado nacional y para un posible destino de exportación.

La intención de compra calibrada con coeficientes conservadores proyecta un volumen menor que el del plan original, y el gerente decide lanzar primero en una cadena y medir la recompra antes de ampliar. Seis meses después, la línea

tiene ventas modestas pero estables, una tasa de recompra que justifica ampliar a otras cadenas y ningún reclamo por textura. El producto lanzado no es el que ganó la degustación interna. Es el que el consumidor objetivo eligió con datos.

Fase 4. El framework de acción: cinco pasos para desarrollar productos con datos del consumidor

Paso	Acción concreta	Responsable	Evidencia de cumplimiento	Plazo de referencia
1. Definir el segmento y las puertas	Definir el consumidor objetivo y las puertas de decisión del proyecto con criterios cuantitativos para cada una	Gerencia con responsable de desarrollo	Documento del proyecto con segmento, puertas y criterios aprobados	2 semanas
2. Probar el agrado con el segmento y corregir	Realizar pruebas sensoriales a ciegas con consumidores del segmento, con referencia de mercado; aplicar análisis de penalidades a los atributos clave; ajustar y volver a probar	Desarrollo con apoyo de laboratorio sensorial o universidad	Informe sensorial con agrado, penalidades y cambios realizados	1 a 2 meses
3. Medir la disposición a pagar por atributo	Aplicar un análisis conjunto con los atributos y precios relevantes; comparar la disposición a pagar por cada atributo con su costo	Desarrollo con comercial y analista	Tabla de disposición a pagar por atributo frente a su costo	1 mes

Paso	Acción concreta	Responsable	Evidencia de cumplimiento	Plazo de referencia
4. Evaluar la viabilidad técnica completa	Calcular el costo efectivo, estimar la vida útil, revisar los requisitos regulatorios y la trazabilidad de los ingredientes declarados, todo antes de aprobar el lanzamiento	Desarrollo con calidad, compras y asuntos regulatorios	Informe de viabilidad con costo, vida útil, cumplimiento y trazabilidad	1 a 3 meses
5. Lanzar en pequeño y medir la recompra	Proyectar ventas con intención de compra calibrada; lanzar en un canal limitado; medir prueba y recompra antes de ampliar; registrar el resultado para calibrar los coeficientes de futuros lanzamientos	Gerencia comercial	Informe de lanzamiento con prueba, recompra y comparación con la proyección	3 a 6 meses

Regla de cierre para el directorio: antes de aprobar un lanzamiento, pregunte quiénes probaron el producto, si eran consumidores del segmento objetivo y cuánto dijeron estar dispuestos a pagar por él. Si las respuestas son "el equipo" y "no se preguntó", el lanzamiento es la prueba de mercado, y es la más cara.

Nota del autor: el cambio de fórmula de Coca-Cola en 1985 y la reintroducción de la fórmula original ese mismo año son hechos documentados; las cifras de las pruebas y las fechas deben confirmarse con fuentes primarias antes de la publicación. El escenario de la chocolatería de Guayaquil es una construcción narrativa; los métodos sensoriales, de análisis conjunto, de calibración de intención de compra y de gestión por puertas descritos son reales y aplicables.

Parte V. Capital, organización y conocimiento

Capítulo 21. Due Diligence y Venture Capital AgTech: invertir donde la biología marca el ritmo

Un software se puede corregir en una semana. Una cosecha fallida solo se corrige en la siguiente campaña.

Esquema del capítulo

- Por qué el capital de riesgo perdió dinero en el agro: el manual del software aplicado a sistemas biológicos.
- Las debilidades típicas de la evidencia en AgTech: pilotos sin control, economía unitaria subsidiada y adopción supuesta.
- Due diligence técnica con bio-datos: jerarquía de evidencia, potencia estadística, economía del productor, valoración ajustada por riesgo y sala de datos.

Fase 1. El gancho: los invernaderos que cotizaban en bolsa y las piscinas del piloto

Kentucky, 2021 a 2023

AppHarvest era una empresa estadounidense de agricultura en ambiente controlado que construyó invernaderos de gran escala en Kentucky para producir tomates y otras hortalizas. En 2021 salió a bolsa mediante la fusión con una empresa de adquisición de propósito especial, con una narrativa atractiva para el mercado: tecnología, sostenibilidad, menor uso de agua y producción cerca de los consumidores. En 2023, tras pérdidas operativas y dificultades de financiamiento, la empresa se acogió a un proceso de reorganización por quiebra [detalles y fechas a confirmar con fuente primaria].

No fue un caso aislado. Varias empresas de agricultura vertical y en ambiente controlado que habían levantado capital en los años de mayor auge enfrentaron procesos de quiebra o reestructuración en los años siguientes, y la inversión de

capital de riesgo en tecnología agroalimentaria cayó de forma pronunciada después de su máximo de 2021 (AgFunder, 2024).

Las causas específicas varían en cada caso, pero el patrón general ofrece una lección para los inversionistas: muchas de estas empresas fueron evaluadas con criterios del sector tecnológico (crecimiento, tamaño del mercado, calidad del equipo, narrativa) y no con criterios agronómicos y operativos (rendimiento real por unidad de superficie, costo de energía por kilo, control de plagas y enfermedades, calidad del producto, curva de aprendizaje de la producción biológica). El riesgo estaba en la biología y en la operación, y la evaluación no lo midió.

Golfo de Guayaquil, una presentación de inversión

Escenario compuesto. La empresa, el fondo y los personajes son ficticios; los mecanismos de evaluación y los errores de evidencia descritos son reales.

Un fondo de inversión de impacto con foco en América Latina evalúa una startup ecuatoriana que desarrolló un sistema de alimentación automática para camaroneras. Sensores acústicos detectan la actividad de alimentación de los camarones y un algoritmo ajusta la dosis de balanceado en tiempo real. El balanceado es uno de los mayores costos de producción del camarón, de modo que la propuesta de valor es directa: menos alimento por kilo producido.

La presentación es sólida. El equipo combina ingenieros de software y biólogos acuícolas. El piloto, hecho en tres piscinas de una camaronera durante un ciclo, muestra una mejora notable en el factor de conversión alimenticia frente al promedio histórico de la finca. La startup proyecta adopción en una fracción importante de la superficie camaronera del país en cinco años y un modelo de suscripción por hectárea.

El analista del fondo, Tomás Rivadeneira, tiene experiencia en tecnología financiera y ninguna en acuicultura. Pide los datos del piloto y recibe una hoja de cálculo con los resultados de las tres piscinas. Algo le incomoda, pero no sabe qué preguntar. Las preguntas correctas, que nadie hizo en esa ronda de evaluación, eran estas: ¿por qué esas tres piscinas y no otras?, ¿con qué se compararon exactamente?, ¿el ciclo del piloto tuvo condiciones de temperatura y salinidad parecidas al promedio histórico?, ¿cuánto varía el factor de conversión entre piscinas de la misma finca sin ninguna intervención?, ¿cuánto pagaría un camaronero por el sistema y en cuánto tiempo lo recuperaría?

Fase 2. El diagnóstico: por qué se pierde dinero invirtiendo en el agro

2.1 El manual del software no funciona con sistemas biológicos

El capital de riesgo se desarrolló con empresas de software, donde el costo marginal de servir a un cliente adicional es bajo, los productos pueden mejorarse en ciclos cortos y el crecimiento acelerado permite capturar mercados antes que la competencia. Trasladar ese manual al agro choca con cuatro diferencias estructurales.

Dimensión	Software	AgTech con componente biológico
Ciclo de iteración	Días o semanas	Un ciclo productivo: meses o un año
Variabilidad del resultado	Baja y controlable	Alta, dependiente del clima, del suelo, de la genética y del manejo
Costo de escalar	Bajo costo marginal	Requiere activos físicos, logística, servicio técnico en campo
Cliente	Decide rápido, puede probar sin riesgo	Arriesga una cosecha o un ciclo; adopta con lentitud y por evidencia de pares

La consecuencia es que una startup agrícola puede tener pocas oportunidades de validar su tecnología antes de quedarse sin capital. Cada ciclo fallido consume un año. Un inversionista que evalúa con la expectativa de iteración rápida subestima el tiempo y el capital necesarios.

2.2 El piloto sin control y la regresión a la media

El piloto de la startup de alimentación tenía tres debilidades que aparecen con frecuencia en la evidencia AgTech.

Sin grupo de control concurrente. Las tres piscinas se compararon con el promedio histórico de la finca, no con piscinas sin el sistema durante el mismo ciclo. Si ese ciclo tuvo mejores condiciones ambientales que el promedio, toda la finca habría mejorado, con o sin sistema. Es el mismo problema del contrafactual que el capítulo 6 resolvió con diferencias en diferencias.

Selección de las unidades. Si las piscinas del piloto se eligieron porque tenían problemas (alto factor de conversión en el ciclo anterior), es probable que mejoraran en el siguiente ciclo sin ninguna intervención. Este fenómeno, la regresión a la media, ocurre cuando unidades seleccionadas por valores extremos tienden a volver hacia el promedio en la siguiente medición (Barnett et al., 2005). Si se eligieron porque eran las mejor manejadas, el resultado no representa a la finca promedio.

Tamaño de muestra insuficiente. Tres piscinas en un ciclo no permiten distinguir el efecto del sistema de la variabilidad natural entre piscinas. Si el factor de conversión varía bastante entre piscinas de la misma finca sin ninguna intervención, un efecto como el reportado puede aparecer por azar.

2.3 La potencia estadística que casi nadie calcula

La pregunta que debe hacerse ante cualquier piloto es: ¿cuántas unidades se necesitaban para detectar el efecto declarado con una probabilidad razonable? Para comparar las medias de dos grupos (con y sin tecnología), una aproximación del número de unidades por grupo es:

$$n \approx \frac{2\left(z_{1-\alpha/2} + z_{1-\beta}\right)^2 \sigma^2}{\delta^2}$$

donde σ es la desviación estándar del resultado entre unidades, δ el efecto mínimo que se quiere detectar, α el nivel de significación y $1-\beta$ la potencia (Cohen, 1988). Con un nivel de significación de 5 % y una potencia de 80 %, el término entre paréntesis al cuadrado vale aproximadamente 7,85.

La implicación es directa: si la variabilidad entre piscinas es comparable al efecto que se quiere detectar, se necesitan alrededor de dieciséis piscinas por grupo. Si la variabilidad es el doble del efecto, alrededor de sesenta y tres. Un piloto de tres piscinas solo puede detectar efectos muy grandes en relación con la variabilidad natural. Cuando el efecto declarado es moderado y el piloto es pequeño, la evidencia no permite saber si el efecto existe.

2.4 Un ciclo no es una tecnología

En sistemas biológicos, el efecto de una tecnología puede cambiar con el ambiente. Una tecnología que funciona en la estación seca puede no funcionar en la lluviosa; una que funciona en una zona de salinidad alta puede no funcionar en otra. En mejoramiento genético, esta dependencia se conoce como interacción genotipo por ambiente, y el principio se aplica a cualquier tecnología agrícola. Un resultado de un ciclo en una finca demuestra que la tecnología puede funcionar en esas condiciones. No demuestra que funcione en las condiciones donde se piensa vender.

2.5 La economía unitaria escondida

Muchas startups agrícolas presentan métricas de economía unitaria construidas con supuestos de software: costo de adquisición de clientes bajo, retención alta, margen bruto alto. En el agro, estas métricas suelen estar distorsionadas por tres factores.

- Pilotos subsidiados. Los primeros clientes reciben la tecnología gratis o con descuento, y el servicio técnico lo prestan los fundadores. El costo real de instalar y mantener la tecnología en campo, con personal contratado, no aparece en las cifras.

- Retención dependiente del precio. Cuando el precio del producto agrícola cae, los productores recortan gastos, y las suscripciones tecnológicas son de los primeros gastos que se recortan. La retención observada en un año de precios altos no se mantiene en uno de precios bajos.

- Servicio en campo. Los sensores se dañan, se ensucian, pierden conectividad. El costo de mantenimiento en condiciones rurales puede ser mucho mayor que en las proyecciones.

2.6 La adopción supuesta

La proyección de adopción de la startup suponía que una fracción importante de los camaroneros adoptaría el sistema en pocos años. La adopción de tecnologías agrícolas depende sobre todo de la economía del productor: cuánto gana, cuánto arriesga y en cuánto tiempo recupera su inversión. Si el retorno para el productor no es claro, rápido y verificable por sus pares, la adopción será lenta, por buena que sea la tecnología.

2.7 El tamaño del mercado inflado

El tamaño del mercado direccionable suele calcularse como la superficie total del cultivo multiplicada por el precio de la tecnología. Ese cálculo ignora qué parte de esa superficie tiene las condiciones para adoptar (escala, conectividad, capacidad de pago, nivel técnico), qué parte ya tiene soluciones alternativas y qué parte pertenece a productores que no pueden asumir el riesgo de cambiar. El mercado alcanzable es una fracción del mercado total, y esa fracción es la que debe sostener la valoración.

Fase 3. La tesis: due diligence con la disciplina de la evidencia biológica

3.1 La jerarquía de evidencia para AgTech

El primer instrumento de la due diligence técnica es clasificar cada afirmación de la empresa según la calidad de la evidencia que la respalda. Esta jerarquía, inspirada en las escalas de evidencia de la investigación clínica y agronómica, ordena los niveles de menor a mayor confianza.

Nivel	Tipo de evidencia	Qué demuestra	Qué no demuestra
1	Resultados de laboratorio o simulación	Que el principio técnico funciona en condiciones controladas	Que funcione en campo
2	Piloto sin control concurrente	Que la tecnología puede operar en campo	Que cause la mejora observada
3	Ensayo con control concurrente en un sitio y un ciclo	Que la tecnología mejoró el resultado en esas condiciones	Que el efecto se repita en otros sitios y ciclos

Nivel	Tipo de evidencia	Qué demuestra	Qué no demuestra
4	Ensayos controlados en varios sitios y ciclos	Que el efecto es robusto a la variabilidad ambiental	El desempeño a escala comercial, con servicio real
5	Datos de clientes comerciales a escala, con comparación válida	Que el efecto y la economía se sostienen en operación real	Comportamiento en ciclos de precios extremos no observados

La regla de la due diligence es sencilla: la valoración y las condiciones de la inversión deben corresponder al nivel de evidencia alcanzado, no al nivel que la empresa promete alcanzar. Una startup con evidencia de nivel 2 no puede valorarse como si tuviera evidencia de nivel 5.

3.2 Reanalizar el piloto con datos crudos

El analista debe pedir los datos crudos de los pilotos, unidad por unidad y ciclo por ciclo, y no los resúmenes de la presentación. Con esos datos se pueden hacer cuatro verificaciones que no requieren un laboratorio:

- **Criterio de selección de las unidades.** ¿Cómo se eligieron las piscinas, parcelas o animales del piloto? ¿Qué valores tenían en el ciclo anterior?
- **Comparación válida.** ¿Hubo unidades de control en el mismo ciclo? Si no, ¿qué pasó con el resto de la finca en ese ciclo? Una estimación por diferencias en diferencias, como la del capítulo 6, corrige parte del sesgo.
- **Variabilidad natural.** ¿Cuánto varía el resultado entre unidades sin intervención? Con ese dato, el analista calcula si el piloto tenía potencia suficiente para detectar el efecto declarado.
- **Condiciones del ciclo.** ¿El clima, la temperatura, la salinidad o la presión de enfermedades fueron típicas? Las series satelitales y climáticas públicas permiten verificarlo.

Si la empresa no tiene datos crudos o no puede explicar cómo eligió sus unidades, eso también es un resultado de la due diligence.

3.3 La economía del productor primero

Antes de evaluar la economía de la startup, el analista evalúa la economía de su cliente. Para el productor que adopta la tecnología, el retorno anual esperado es:

$$ROI_{prod} = \frac{\Delta\text{Ingreso} + \Delta\text{Ahorro} - \text{Costo anual de la tecnología}}{\text{Inversión inicial del productor}}$$

y el periodo de recuperación es el tiempo que tarda el beneficio neto acumulado en igualar la inversión inicial. En el agro, una tecnología cuyo periodo de recuperación supera un ciclo productivo enfrenta una adopción lenta, porque el productor necesita ver el resultado en su propia operación antes de decidir.

El cálculo debe hacerse con el efecto de la tecnología en el nivel de evidencia disponible, con su incertidumbre, y en escenarios de precio alto y bajo del producto agrícola. Si la tecnología solo es rentable para el productor cuando los precios son altos, la startup enfrentará cancelaciones masivas en el primer año de precios bajos.

3.4 La economía de la startup con costos reales

Con la economía del productor resuelta, la economía de la startup se construye con supuestos verificables:

- Costo de adquisición de clientes que incluya el tiempo de los técnicos de campo, las demostraciones y los pilotos gratuitos, no solo el gasto de mercadeo.
- Costo de servicio por cliente con personal contratado, reemplazo de equipos y visitas en zonas rurales.
- Retención estimada por escenario de precio del producto agrícola, no por la retención observada en los primeros clientes.
- Valor de vida del cliente, calculado como el margen anual por cliente multiplicado por su permanencia esperada, ajustada por esos escenarios.

La razón entre el valor de vida del cliente y el costo de adquisición es una métrica habitual en capital de riesgo. En AgTech, su valor depende tanto de los supuestos de retención por ciclo de precios que un rango de escenarios es más informativo que una cifra única.

3.5 Valoración ajustada por hitos de evidencia

Las empresas con riesgo técnico importante pueden valorarse con un enfoque usado en biotecnología, el valor presente neto ajustado por riesgo, que pondera cada flujo de caja futuro por la probabilidad de que la empresa alcance el hito técnico necesario para generarlo (Stewart et al., 2001):

$$rVPN = \sum_{t=0}^{T} \frac{p_t \, FC_t}{(1+r)^t}$$

donde FC_t es el flujo de caja esperado en el periodo t, p_t la probabilidad acumulada de haber superado los hitos técnicos que hacen posible ese flujo y r la tasa de descuento. En AgTech, los hitos pueden definirse con la jerarquía de evidencia de la sección 3.1: pasar de un piloto sin control a un ensayo controlado, luego a varios sitios y ciclos, y finalmente a operación comercial.

Este enfoque tiene una ventaja práctica para el inversionista: permite estructurar la inversión por tramos, condicionados al cumplimiento de hitos de evidencia y no solo de ventas. El fondo entrega una parte del capital para financiar un ensayo controlado en varios sitios, y la siguiente parte solo si el ensayo confirma el efecto con el diseño acordado.

3.6 La due diligence de una empresa agroindustrial en operación

Los mismos principios se aplican cuando el objeto de la inversión o del crédito es una empresa agroindustrial en operación y no una startup. En ese caso, la due diligence técnica verifica lo que la empresa declara con las herramientas de los capítulos anteriores.

Afirmación de la empresa	Verificación técnica	Capítulo de referencia
Producción y rendimientos declarados	Series satelitales de las parcelas, balance de masa entre compras, producción y ventas	4, 6
Calidad del producto	Bio-datos por lote, índices de capacidad, historial de reclamos y rechazos	1, 13

Afirmación de la empresa	Verificación técnica	Capítulo de referencia
Origen y trazabilidad	Cobertura de trazabilidad hasta el origen, polígonos verificados	1, 8
Modelos que usa para decidir	Inventario de modelos, fichas, auditorías por subgrupo	3
Riesgo de fraude en su cadena	Índices de plausibilidad de proveedores, plan de autenticidad	4
Exposición climática y territorial	Capas de riesgo de inundación, sequía y plagas de sus unidades productivas	2, 10
Gestión de compras y precio	Concentración de proveedores, política de cobertura	13
Afirmaciones ESG	Nivel de calidad de cada dato, verificación satelital del uso del suelo	8

Esta tabla convierte el libro en una lista de verificación. Una empresa que puede responder a cada fila con datos y no con declaraciones tiene un perfil de riesgo distinto al de una empresa que solo tiene informes.

3.7 La sala de datos agrícola

La due diligence técnica requiere una sala de datos organizada para responder preguntas agronómicas, no solo financieras y legales. Además de estados financieros, contratos y permisos, una sala de datos agrícola debe contener:

- Datos crudos de todos los pilotos y ensayos, con protocolo, criterio de selección de unidades y condiciones ambientales.
- Registros productivos por unidad (parcela, piscina, lote) y por ciclo.
- Polígonos georreferenciados de las unidades productivas propias y de los proveedores principales.

- Bio-datos de calidad por lote y su método de medición.
- Fichas de los modelos que influyen en decisiones relevantes.
- Contratos de compra y venta con sus condiciones de calidad y precio.
- Registro de incidentes técnicos, reclamos y disputas, con su resolución.

Para el emprendedor, preparar esta sala de datos desde temprano tiene un efecto directo: acorta el proceso de inversión y mejora la valoración, porque reduce la incertidumbre del inversionista, el mismo mecanismo que el capítulo 2 describió para el crédito.

3.8 La startup de alimentación, reescrita

Volvamos al fondo de inversión con un proceso de due diligence técnica.

Rivadeneira incorpora al comité a una bióloga acuícola como asesora independiente. Piden los datos crudos del piloto. Descubren que las tres piscinas se eligieron porque habían tenido un mal factor de conversión en el ciclo anterior, y que el resto de la finca también mejoró en el ciclo del piloto, por condiciones de temperatura favorables. Con una estimación por diferencias en diferencias contra las demás piscinas de la finca, el efecto atribuible al sistema se reduce a una fracción del declarado, con un intervalo de confianza que incluye el cero. Con la variabilidad observada entre piscinas, el cálculo de potencia indica que se necesitan varias decenas de piscinas por grupo para detectar un efecto de ese tamaño.

El fondo no descarta la inversión. La tecnología tiene un principio técnico razonable y el equipo es competente. Pero cambia la estructura: ofrece un primer tramo de capital para financiar un ensayo controlado en tres camaroneras, con piscinas asignadas al azar a tratamiento y control, durante dos ciclos que cubran la estación seca y la lluviosa. El siguiente tramo, a una valoración mayor, se activa si el ensayo confirma un efecto mínimo acordado. El modelo financiero se rehace con costos de servicio reales y con escenarios de retención para precios bajos del camarón.

La startup acepta. Si la tecnología funciona, en dos ciclos tendrá evidencia de nivel 4, que le servirá para vender a camaroneros, para la siguiente ronda y para cualquier banco. Si no funciona, el fondo habrá arriesgado una fracción del capital para saberlo.

Fase 4. El framework de acción: cinco pasos para una due diligence técnica en AgTech

Paso	Acción concreta	Responsable	Evidencia de cumplimiento	Plazo de referencia
1. Clasificar la evidencia	Listar cada afirmación técnica de la empresa (rendimiento, ahorro, calidad, adopción) y asignarle su nivel en la jerarquía de evidencia	Analista de inversión con asesor técnico independiente	Matriz de afirmaciones con su nivel de evidencia y la prueba que la respalda	1 a 2 semanas
2. Reanalizar los pilotos con datos crudos	Solicitar datos por unidad y ciclo; verificar criterio de selección, comparación válida, potencia estadística y condiciones del ciclo; reestimar el efecto	Asesor técnico con analista de datos	Informe de reanálisis con efecto estimado, intervalo de confianza y limitaciones	2 a 4 semanas
3. Modelar la economía del productor	Calcular el retorno y el periodo de recuperación de la tecnología para el cliente típico, con el efecto reestimado y en escenarios de precio alto y bajo	Analista de inversión	Modelo de economía del productor con escenarios	2 semanas

Paso	Acción concreta	Responsable	Evidencia de cumplimiento	Plazo de referencia
4. Rehacer la economía y la valoración de la empresa	Recalcular costos de adquisición y servicio con supuestos reales; estimar retención por escenario de precios; valorar con flujos ajustados por la probabilidad de alcanzar cada hito de evidencia	Analista de inversión con el comité	Modelo financiero revisado y valoración ajustada por riesgo	2 a 3 semanas
5. Estructurar la inversión por hitos de evidencia	Condicionar los tramos de capital al cumplimiento de hitos técnicos definidos (diseño del ensayo, número de unidades, ciclos, efecto mínimo) además de los hitos comerciales	Comité de inversión	Términos de inversión con hitos de evidencia, protocolo del ensayo acordado y responsable del seguimiento	Antes del cierre de la inversión

Regla de cierre para el comité de inversión: antes de aprobar una inversión en una empresa con riesgo biológico, pregunte qué nivel de evidencia respalda la principal afirmación técnica y quién, ajeno a la empresa, revisó los datos crudos. Si la respuesta es "nivel 2" y "nadie", la valoración está pagando una promesa.

Nota del autor: la salida a bolsa y el posterior proceso de quiebra de AppHarvest, así como la caída de la inversión de capital de riesgo en tecnología agroalimentaria después de 2021, son hechos documentados públicamente; las fechas, montos y causas específicas deben confirmarse con fuentes primarias antes de la publicación. El escenario de la startup de alimentación para camaroneras es una construcción narrativa; los métodos de evaluación descritos son reales y aplicables.

Capítulo 22. La hoja de ruta: del libro a la primera campaña

Una empresa que intenta hacer todo lo de este libro al mismo tiempo no hará nada de este libro.

Esquema del capítulo

- Por qué fallan las transformaciones basadas en datos: demasiadas iniciativas, orden equivocado y pilotos que nunca escalan.
- Las dependencias entre capacidades: lo que debe existir antes de que lo siguiente sea posible.
- Un modelo de madurez, un método para priorizar y una hoja de ruta organizada por campañas productivas.

Fase 1. El gancho: dos segundos para rastrear un mango y un año para no terminar nada

Estados Unidos, 2016 y 2017

En 2016 y 2017, una gran cadena minorista de Estados Unidos probó con una empresa de tecnología un sistema de trazabilidad basado en registros distribuidos para rastrear el origen de productos frescos. En una de las pruebas, con mangos, el responsable de inocuidad alimentaria de la cadena relató que rastrear un paquete de mangos hasta su finca de origen con los métodos tradicionales había tomado casi siete días, mientras que con el nuevo sistema tomó unos pocos segundos [fuente y cifras a confirmar].

La cifra se citó durante años como prueba del potencial de la trazabilidad digital. La parte menos citada de la historia es la que explica por qué la mayoría de los sistemas de este tipo no se generalizó con la misma velocidad que la prueba: los segundos de consulta solo eran posibles porque cada eslabón de la cadena había registrado sus datos de forma completa, estandarizada y a tiempo. La tecnología de consulta resolvió la última parte del problema. La primera parte,

lograr que cientos de proveedores registraran bien sus datos todos los días, era la difícil, y no se resolvía con software.

Guayaquil, un año después de un seminario

Escenario compuesto. La empresa y los personajes son ficticios; los mecanismos de fracaso y los métodos de planificación descritos son reales.

El gerente general de una agroexportadora mediana de cacao y café vuelve entusiasmado de un seminario sobre datos y agroindustria. En la siguiente reunión de directorio presenta un plan ambicioso: trazabilidad hasta la parcela, un modelo de cadmio, un clasificador de calidad por visión artificial, un tablero ESG, un sistema antifraude, un gemelo digital del centro de fermentación y un asistente de IA para el área de calidad. El directorio aprueba un presupuesto. Se contratan tres proveedores de tecnología y se arman siete equipos de proyecto con el mismo personal de siempre.

Un año después, la gerente de calidad presenta el estado de los proyectos. El clasificador por visión artificial funciona en pruebas, pero no se usa porque no hay un registro de lotes al que asociar sus resultados. El modelo de cadmio no se pudo entrenar porque los análisis de laboratorio no están vinculados a ninguna parcela. El tablero ESG muestra cifras calculadas con factores por defecto. El gemelo digital tiene sensores instalados en dos cajones, pero nadie revisa sus datos. El asistente de IA responde preguntas sobre procedimientos desactualizados. La trazabilidad hasta la parcela, que era la base de casi todo lo demás, avanzó poco porque el equipo de campo estaba repartido en otros proyectos.

El personal está agotado y el directorio pregunta qué se obtuvo con el presupuesto. La respuesta honesta es que se compraron herramientas sin construir antes lo que esas herramientas necesitaban para funcionar.

Fase 2. El diagnóstico: por qué las transformaciones basadas en datos se estancan

2.1 Demasiadas iniciativas a la vez

El primer error es de volumen. Una empresa mediana tiene un número limitado de personas capaces de liderar cambios, y esas mismas personas operan el negocio todos los días. Cada iniciativa adicional divide su atención. Con siete proyectos simultáneos, ninguno recibe la dedicación necesaria para terminarse.

Las transformaciones organizacionales fracasan con frecuencia por razones de liderazgo y de ejecución más que por razones técnicas. Kotter (1995) identificó, a partir de su experiencia con empresas en procesos de cambio, errores repetidos como la falta de una coalición que guíe el cambio, la ausencia de resultados visibles a corto plazo y la declaración prematura de victoria. Todos ellos aparecen cuando una empresa lanza muchas iniciativas sin terminar ninguna.

2.2 El orden equivocado

El segundo error es de secuencia. Las capacidades descritas en este libro no son independientes. Un modelo de cadmio necesita análisis vinculados a parcelas. Un clasificador de calidad necesita un registro de lotes al que asociar sus resultados. Un tablero ESG con datos de alto nivel necesita polígonos de proveedores. Un gemelo digital necesita sensores calibrados y una decisión definida. Un asistente de IA necesita documentos vigentes.

Cuando una empresa construye una capacidad antes que las capacidades de las que depende, el resultado es una herramienta que funciona en pruebas y no en operación.

2.3 El purgatorio de los pilotos

El tercer error es el piloto que nunca escala. Un piloto bien hecho demuestra que una idea funciona en condiciones controladas, con un equipo dedicado y con atención de la gerencia. Escalarlo exige otras cosas: integración con los procesos diarios, personal capacitado que no pertenece al equipo del piloto, mantenimiento, presupuesto recurrente y un responsable permanente. Muchas empresas acumulan pilotos exitosos que nunca pasan a operación porque nadie

definió, antes de empezar, qué condiciones debía cumplir el piloto para escalar y quién iba a hacerse cargo después.

2.4 Tecnología sin dueño de proceso

El cuarto error es asignar las iniciativas al área de tecnología o a un proveedor externo. Los bio-datos nacen en la recepción, en el campo, en el centro de fermentación, en la planta. Si los responsables de esos procesos no son dueños de las iniciativas, los datos se registran de forma incompleta, los modelos se ignoran y los tableros no cambian ninguna decisión.

2.5 Calendario de oficina en un negocio de campañas

El quinto error es planificar en meses calendario un negocio que se organiza por campañas. Una iniciativa de trazabilidad que empieza a mitad de la cosecha principal compite con la operación en su momento de mayor carga. Un modelo que necesita datos de una campaña completa no puede validarse antes de que esa campaña termine. Una hoja de ruta que ignora el ciclo productivo fija plazos que la biología no va a respetar.

Fase 3. La tesis: construir capacidades en orden, una campaña a la vez

3.1 Un modelo de madurez para los bio-datos

El primer paso para planificar es saber dónde está la empresa. Los modelos de madurez, desarrollados originalmente para evaluar la capacidad de los procesos de desarrollo de software (Paulk et al., 1993), ofrecen una estructura útil: niveles sucesivos de capacidad, cada uno apoyado en el anterior.

Para la economía de los bio-datos, la madurez puede evaluarse en seis dimensiones, cada una con cinco niveles.

Dimensión	Nivel 0: Ausente	Nivel 1: Inicial	Nivel 2: Registrado	Nivel 3: Gestionado	Nivel 4: Optimizado
Identidad	Lotes sin identificación consistente	Lotes identificados en algunos puntos	Identidad conservada en las transformaciones principales, con composición de mezclas	Identidad hasta la parcela para la mayoría del volumen	Identidad completa, verificada y usada en tiempo real
Captura	Registros en papel dispersos	Registros digitales parciales	Captura digital con contratos de datos en los puntos críticos	Captura validada, con incertidumbre y procedencia	Captura automatizada con integridad verificable desde el origen
Modelos	Decisiones por experiencia	Análisis descriptivos ocasionales	Modelos aislados sin gobernanza	Modelos documentados, validados y monitoreados	Modelos integrados en decisiones, con mejora continua
Gobernanza	Sin responsables de datos ni de modelos	Responsables informales	Responsables designados, inventario de datos y modelos	Comité, políticas, auditoría de modelos y de datos	Gobernanza integrada en la gestión y auditada externamente
Seguridad y soberanía	Sin respaldo ni control de accesos	Respaldo básico	Respaldo aislado y segmentación inicial	Plan de continuidad probado y contratos de datos	Integridad verificable y control pleno de los datos propios y de los productores

Dimensión	Nivel 0: Ausente	Nivel 1: Inicial	Nivel 2: Registrado	Nivel 3: Gestionado	Nivel 4: Optimizado
Monetización	Los datos no cambian ninguna decisión externa	Datos usados de forma esporádica con clientes	Datos entregados a compradores o bancos a pedido	Datos incorporados en contratos de precio, crédito o seguro	Datos como activo central de la estrategia comercial y financiera

La evaluación se hace con evidencia, no con opinión: para cada dimensión, la empresa debe mostrar los registros, documentos o resultados que justifican el nivel asignado. Un resultado típico en una empresa agroindustrial mediana de la región es un nivel entre 0 y 1 en casi todas las dimensiones. Ese diagnóstico no es un fracaso: es el punto de partida.

3.2 El mapa de dependencias

El segundo paso es ordenar las capacidades según sus dependencias. Las iniciativas del libro forman una red en la que algunas son requisito de otras. Esa red puede representarse como un grafo dirigido acíclico, en el que una flecha de la capacidad A a la capacidad B indica que B necesita a A para funcionar.

Capacidad	Depende de	Capítulos
Identidad de lotes y composición de mezclas	Ninguna (es la base)	1
Registro de parcelas georreferenciadas	Identidad de proveedores	1, 8, 11
Captura digital con contratos de datos	Identidad de lotes	1
Respaldo, continuidad y control de accesos	Captura digital	7

Capacidad	Depende de	Capítulos
Modelo de contaminantes (por ejemplo, cadmio)	Parcelas, análisis vinculados a parcelas	1
Clasificador de calidad	Identidad de lotes, etiquetas validadas	1, 3
Inventario y gobernanza de modelos	Existencia de al menos un modelo	3
Índice de plausibilidad productiva (antifraude)	Parcelas, rendimientos, entregas por proveedor	4
Costo efectivo por proveedor	Identidad conservada dentro de la planta	13
Datos ESG de alto nivel	Parcelas, captura validada	8
Expediente de riesgo para crédito y seguro	Identidad, rendimientos, calidad por lote	2
Inteligencia territorial	Parcelas de muchos actores, acuerdos de datos	10
Gemelo digital	Sensores calibrados, decisión definida, gobernanza de modelos	19
Base de conocimiento con IA	Documentos vigentes, gobernanza de modelos	25

Ordenar el grafo de forma topológica, es decir, de modo que ninguna capacidad aparezca antes que aquellas de las que depende, produce una secuencia válida de implementación. La lección es inmediata: la identidad de lotes y la captura digital en los puntos críticos son la base de casi todo. En el escenario de la agroexportadora, esa base era la iniciativa con menos recursos.

3.3 Priorizar con valor, probabilidad y costo

Dentro de cada nivel de dependencia, hay más iniciativas posibles que recursos. Para elegir, cada iniciativa i se evalúa con tres estimaciones: el valor económico anual que generaría si funciona (V_i), la probabilidad de que funcione con las capacidades y el equipo disponibles (p_i) y su costo de implementación (C_i). Un índice simple de prioridad es:

$$P_i = \frac{p_i\, V_i}{C_i}$$

El valor V_i se estima con las herramientas de los capítulos anteriores: el rechazo evitado (capítulo 1), la reducción de tasa o de prima (capítulo 2), el fraude evitado (capítulo 4), la pérdida evitada en disputas (capítulo 6), el ahorro en compras (capítulo 13), el valor de la información de una decisión (capítulo 19).

Cuando el presupuesto es limitado y las dependencias son estrictas, la selección de la cartera puede formularse como un problema de la mochila con restricciones de precedencia:

$$\max_{x} \sum_{i} x_i\ p_i V_i \quad \text{sujeto a} \quad \sum_{i} x_i\, C_i \le B, \qquad x_j \le x_i \ \text{ si } j \text{ depende de } i, \qquad x_i \in \{0,1\}$$

donde x_i indica si la iniciativa se incluye y B es el presupuesto disponible para el periodo. La restricción de precedencia impide seleccionar una iniciativa sin incluir las que la hacen posible.

El cálculo no necesita ser preciso para ser útil. Su principal efecto es obligar a la gerencia a estimar el valor de cada iniciativa y a reconocer las dependencias antes de aprobar el presupuesto. Una iniciativa atractiva cuyo valor depende de tres capacidades inexistentes suele caer al final de la lista, que es donde corresponde.

3.4 La regla de las tres iniciativas

La experiencia práctica de gestión de cambios sugiere un límite: una empresa mediana puede llevar a término, en paralelo, un número pequeño de iniciativas de transformación. Una regla operativa razonable es no tener más de tres iniciativas activas al mismo tiempo, cada una con un dueño de proceso, un objetivo medible y una fecha de cierre ligada a la campaña. Una nueva iniciativa solo empieza cuando otra termina o se cancela.

La regla es arbitraria en su número exacto y estricta en su principio. Su función es proteger la capacidad de ejecución de la empresa contra el entusiasmo de su propia gerencia.

3.5 Pilotos con criterio de escalamiento definido de antemano

Cada piloto debe empezar con un documento breve que responda cuatro preguntas antes de invertir:

1. ¿Qué resultado medible debe alcanzar para considerarse exitoso?
2. ¿Con qué diseño se va a demostrar ese resultado (control, unidades, campañas), según los criterios del capítulo 21?
3. ¿Qué se necesita para operarlo a escala (personal, integración, presupuesto recurrente)?
4. ¿Quién será el dueño permanente si escala, y quién decide cancelarlo si no alcanza el resultado?

Con este documento, el final del piloto produce una de dos decisiones: escalar con recursos asignados o cancelar con una lección registrada en el sistema de conocimiento. El purgatorio de los pilotos desaparece porque nadie puede dejar un piloto abierto indefinidamente.

3.6 Roles mínimos

Una transformación basada en bio-datos no requiere un departamento grande. Requiere roles claros, que en una empresa mediana pueden ser parte de cargos existentes.

Rol	Responsabilidad	Quién lo ejerce típicamente
Patrocinador ejecutivo	Asigna recursos, resuelve conflictos entre áreas y protege la regla de las tres iniciativas	Gerente general

Rol	Responsabilidad	Quién lo ejerce típicamente
Dueño de proceso	Responde por la iniciativa en su área y por el uso de los datos y modelos en la operación	Jefe de calidad, compras, campo o planta
Administrador de datos	Mantiene los contratos de datos, la calidad del dato y el inventario	Analista de calidad o de sistemas con dedicación parcial
Dueño de modelo	Responde por cada modelo de riesgo medio o alto según el capítulo 3	El dueño del proceso donde se usa el modelo
Validador independiente	Revisa modelos y datos críticos sin haberlos desarrollado	Auditor interno, universidad o consultor externo

3.7 Una hoja de ruta organizada por campañas

La hoja de ruta se organiza por campañas productivas y no por trimestres. Una secuencia típica para una agroexportadora mediana que parte de niveles de madurez bajos puede verse así.

Periodo	Objetivo	Iniciativas (máximo tres activas)	Resultado verificable
Antes de la campaña 1	Preparar la base	Diagnóstico de madurez; diseño de la captura en recepción y mezcla; respaldo y control de accesos básicos	Diagnóstico con evidencia; contratos de datos de los puntos críticos; respaldo aislado probado
Campaña 1	Construir identidad	Identidad de lotes y composición de mezclas; registro de parcelas de los proveedores principales; costo efectivo por proveedor estratégico	Lotes con composición registrada; cobertura de parcelas del volumen principal; primer cálculo de costo efectivo

Periodo	Objetivo	Iniciativas (máximo tres activas)	Resultado verificable
Entre campañas 1 y 2	Convertir datos en valor	Primer modelo de riesgo (por ejemplo, cadmio o fermentación) con validación; índice de plausibilidad productiva; expediente de riesgo para el banco	Modelo validado con ficha; proveedores evaluados por plausibilidad; condición financiera negociada
Campaña 2	Gobernar y extender	Inventario y gobernanza de modelos; datos ESG con niveles de calidad; extensión de parcelas a proveedores indirectos y asociaciones	Modelos registrados con dueño; indicadores ESG con incertidumbre; cobertura hasta el origen aumentada
Campaña 3 en adelante	Optimizar	Gemelo digital de la decisión de mayor valor de información; base de conocimiento gobernada; participación en inteligencia territorial	Según la prueba de valor de cada iniciativa

La secuencia no es universal. Una camaronera con un problema crítico de oxígeno puede justificar un gemelo digital antes que un tablero ESG. Pero la regla de dependencias sí es universal: la identidad y la captura van primero, porque sin ellas ninguna otra iniciativa produce valor sostenido.

3.8 Medir el avance con madurez y con dinero

El avance de la hoja de ruta se mide de dos formas, y ambas se reportan al directorio en cada cierre de campaña. La primera es la madurez: el nivel alcanzado en cada dimensión, con evidencia. La segunda es el valor: el dinero que los datos movieron en decisiones de terceros (primas, tasas, rechazos evitados, fraude detectado, compras mejoradas). Una transformación que sube la madurez sin mover dinero está construyendo infraestructura sin uso. Una que mueve dinero sin subir la madurez está obteniendo resultados que no podrá sostener.

3.9 La agroexportadora, reescrita

Volvamos a Guayaquil con una hoja de ruta construida con este método.

El gerente vuelve del seminario con las mismas ideas, pero el directorio aprueba primero un diagnóstico de madurez. El resultado muestra nivel 1 en identidad, nivel 0 en modelos y en gobernanza, nivel 1 en seguridad y nivel 0 en

monetización. El mapa de dependencias deja claro que cinco de las siete ideas del seminario dependen de la identidad de lotes y del registro de parcelas.

Para la primera campaña, el directorio aprueba tres iniciativas: identidad de lotes y composición de mezclas, a cargo del jefe de acopio; registro de parcelas de los proveedores que concentran la mayor parte del volumen, a cargo del jefe de campo; y respaldo y control de accesos, a cargo del área de sistemas. Las otras cuatro ideas quedan en una lista de espera, cada una con su índice de prioridad y sus dependencias.

Al cierre de la campaña, la empresa registra composición en casi todos sus lotes y tiene polígonos para la mayor parte de su volumen. Con esos datos, entre campañas, entrena y valida un modelo de cadmio, calcula el índice de plausibilidad de sus proveedores y presenta al banco un expediente de riesgo que le permite renegociar el margen de garantía de su línea de inventario. El clasificador por visión artificial entra en la segunda campaña, cuando ya existe un registro de lotes al que asociar sus resultados, y con su ficha de modelo desde el primer día.

Al final de dos campañas, la empresa tiene menos proyectos que en la versión original, todos terminados y en operación. El directorio puede ver la madurez alcanzada y el dinero que esos datos ya movieron.

Fase 4. El framework de acción: cinco pasos para convertir este libro en una hoja de ruta

Paso	Acción concreta	Responsable	Evidencia de cumplimiento	Plazo de referencia
1. Diagnosticar la madurez con evidencia	Evaluar las seis dimensiones del modelo de madurez y justificar cada nivel con registros, documentos o resultados	Patrocinador ejecutivo con los dueños de proceso y un validador externo	Diagnóstico de madurez con evidencia por dimensión	3 a 4 semanas

Paso	Acción concreta	Responsable	Evidencia de cumplimiento	Plazo de referencia
2. Dibujar el mapa de dependencias	Listar las iniciativas candidatas y sus dependencias; ordenarlas para que ninguna empiece antes que aquellas de las que depende	Patrocinador con los dueños de proceso	Mapa de dependencias aprobado y secuencia válida de implementación	2 semanas
3. Priorizar y elegir un máximo de tres	Estimar valor, probabilidad de éxito y costo de cada iniciativa habilitada; seleccionar la cartera dentro del presupuesto, con un máximo de tres iniciativas activas	Gerencia general con finanzas	Cartera aprobada con índice de prioridad, dueño de proceso y objetivo medible por iniciativa	2 semanas
4. Escribir el criterio de escalamiento de cada piloto	Para cada iniciativa, documentar el resultado esperado, el diseño de la prueba, los requisitos para operar a escala y el dueño permanente	Dueño de proceso de cada iniciativa	Documento de criterio aprobado antes de iniciar	Antes de iniciar cada iniciativa
5. Revisar al cierre de cada campaña	Presentar al directorio la madurez alcanzada y el valor económico movido por los datos; cerrar, escalar o cancelar iniciativas; activar las siguientes de la lista	Patrocinador ejecutivo	Informe de cierre de campaña con madurez, valor y decisiones sobre la cartera	Al cierre de cada campaña

Regla de cierre para el directorio: antes de aprobar cualquier proyecto de datos, pregunte de qué capacidades depende y si esas capacidades existen hoy. Si la respuesta es no, el proyecto que corresponde aprobar es el de la capacidad que falta.

Nota del autor: la prueba de trazabilidad de mangos con registros distribuidos fue ampliamente difundida por sus participantes; las cifras de tiempo y los detalles deben confirmarse con una fuente primaria antes de la publicación. El escenario de la agroexportadora de Guayaquil es una construcción narrativa; el modelo de madurez y la hoja de ruta propuestos son una síntesis del autor basada en los capítulos de este libro y en marcos de gestión de cambio y de madurez de procesos.

Capítulo 23. El talento híbrido: quién hace todo esto

Un científico de datos que no entiende una fermentación y un agrónomo que no entiende un modelo hablan idiomas distintos. La empresa necesita a alguien que hable los dos.

Esquema del capítulo

- Por qué fallan las contrataciones de talento en datos en el agro: especialistas sin contexto, técnicos sin herramientas y nadie que traduzca entre ambos.
- Los perfiles que la economía de los bio-datos necesita y por qué casi no existen en el mercado.
- Arquitectura de desarrollo de talento: mapa de competencias, brechas medidas, formación por proyectos, el rol de traductor, comunidades de práctica y evaluación del retorno de la formación.

Fase 1. El gancho: la profesión más atractiva del siglo y el analista que renunció

Cambridge, Massachusetts, octubre de 2012

En octubre de 2012, la revista *Harvard Business Review* publicó un artículo de Thomas Davenport y D. J. Patil que describía al científico de datos como un perfil profesional nuevo y muy demandado, capaz de extraer conocimiento de grandes volúmenes de datos desordenados, y lo calificaba como el trabajo más atractivo del siglo XXI (Davenport y Patil, 2012). En los años siguientes, empresas de todos los sectores contrataron científicos de datos, crearon áreas de analítica y lanzaron proyectos de inteligencia artificial.

Con el tiempo, muchas empresas descubrieron que contratar especialistas en datos no bastaba. Los modelos que construían no llegaban a la operación porque no respondían a las preguntas del negocio, o porque nadie en el negocio sabía cómo usarlos. Diversos análisis de consultoras y académicos empezaron a describir un rol faltante: un profesional que entienda el negocio y

lo suficiente de analítica como para traducir problemas operativos en preguntas que los datos puedan responder, y resultados de modelos en decisiones que la operación pueda ejecutar [referencias sobre el rol de traductor a confirmar].

Guayaquil, un año después de una contratación

Escenario compuesto. La empresa y los personajes son ficticios; los mecanismos descritos son reales.

Una agroexportadora de cacao y café decide que necesita capacidades de datos. Contrata a un científico de datos joven y talentoso, que viene de una empresa de tecnología financiera. Le pide que construya un modelo para predecir la calidad de los lotes.

El analista trabaja con lo que encuentra: hojas de cálculo de recepción, con humedad, peso, proveedor y resultado de la prueba de corte. Construye un modelo con buen desempeño en validación. Lo presenta a la gerencia y a la jefa de calidad. La jefa de calidad pregunta si el modelo considera el tiempo de fermentación, la madurez de las mazorcas o el material genético. El analista no sabía que esas variables existían ni que importaban. Pregunta si alguien las registra. Nadie las registra de forma sistemática.

Durante meses, el analista y la jefa de calidad no logran entenderse. Él habla de variables, validación cruzada y sobreajuste; ella habla de volteos, olores, proveedores y campañas. Él no entiende por qué el proceso biológico cambia tanto entre semanas; ella no entiende por qué el modelo necesita miles de registros limpios. El modelo nunca se usa. Al año, el analista acepta una oferta de otra empresa de tecnología. La agroexportadora concluye que "los datos no funcionan en el agro".

Lo que faltó no fue talento. Fue un puente entre dos tipos de talento, y un plan para construirlo.

Fase 2. El diagnóstico: por qué el talento en datos no prospera en el agro

2.1 Especialistas sin contexto

Los profesionales formados en ciencia de datos, estadística o informática dominan los métodos, pero rara vez conocen los procesos biológicos, las prácticas agronómicas, las normas de inocuidad o la lógica comercial de las cadenas agroalimentarias. Sin ese contexto, construyen modelos con las variables disponibles y no con las variables que importan, interpretan como errores patrones que tienen explicación biológica y proponen soluciones que no se pueden aplicar en el campo. Los capítulos 3 y 21 describieron las consecuencias: modelos con buena exactitud en validación que fallan en operación.

2.2 Técnicos sin herramientas

Los profesionales del agro (agrónomos, ingenieros agroindustriales, veterinarios, técnicos de calidad) conocen los procesos y sus variables, pero su formación rara vez incluyó estadística aplicada más allá de los cursos básicos, programación, gestión de datos o fundamentos de aprendizaje automático. Saben qué medir y por qué, pero no cómo estructurar los datos para que sean analizables, ni cómo evaluar si un modelo es confiable. Dependen de otros para usar los datos que ellos mismos generan.

2.3 Nadie traduce

Entre ambos perfiles falta un rol: alguien que entienda lo suficiente del proceso para formular la pregunta correcta y lo suficiente de los métodos para evaluar la respuesta. Ese rol traduce un problema operativo ("los lotes de algunos proveedores salen sobrefermentados") en un problema analítico ("qué variables de proceso y de origen predicen la sobrefermentación, con qué datos y con qué diseño"), y luego traduce el resultado del modelo en una regla operativa ("revisar los cajones de estos proveedores en el tercer día"). Sin ese rol, el especialista y el técnico se quedan cada uno en su idioma.

2.4 El talento híbrido casi no existe en el mercado

Los profesionales que combinan formación técnica agroalimentaria con competencias en datos son escasos. Las universidades suelen formarlos en carreras separadas, y los programas que integran ambas áreas son recientes o poco comunes en la región [situación de la oferta académica en Ecuador a confirmar]. Una empresa mediana que busca contratar este perfil compite con empresas de otros sectores que pagan más y ofrecen problemas que parecen más atractivos. La consecuencia práctica es que, en la mayoría de los casos, el talento híbrido no se contrata: se forma dentro de la empresa.

2.5 La formación que no cambia nada

Cuando las empresas invierten en formación, suelen hacerlo con cursos genéricos: un taller de Excel avanzado, un curso de introducción a la inteligencia artificial, una charla sobre transformación digital. Los participantes asisten, reciben un certificado y vuelven a su trabajo sin aplicar nada. La formación desconectada de un problema real de la empresa produce conocimiento que se olvida antes de usarse.

2.6 La rotación que se lleva la inversión

El capítulo 25 describe el riesgo de perder el conocimiento que vive en una sola persona. Con el talento en datos ocurre algo similar, agravado por su alta movilidad. Si la empresa concentra toda su capacidad analítica en un especialista y este se va, se lleva los modelos, el código y el conocimiento de cómo funcionaban, y la empresa vuelve a empezar.

Fase 3. La tesis: el talento híbrido se construye por proyectos, con un mapa y con un traductor

3.1 Los perfiles que se necesitan

La economía de los bio-datos no necesita que todos sepan de todo. Necesita una combinación de perfiles con niveles distintos de competencia en el dominio agroalimentario y en datos.

Perfil	Competencia en el dominio	Competencia en datos	Función principal
Técnico de proceso con alfabetización en datos	Alta	Básica: registrar bien, leer tableros, entender incertidumbre	Genera datos de calidad y usa los resultados en la operación
Traductor	Alta	Intermedia: formular preguntas analíticas, evaluar modelos, interpretar resultados	Conecta problemas operativos con soluciones analíticas y las lleva a la operación
Analista de datos aplicado	Intermedia	Alta: estadística, programación, modelamiento	Construye y mantiene modelos, tableros y flujos de datos
Especialista o validador	Variable	Muy alta en un área (estadística, aprendizaje automático, seguridad)	Resuelve problemas complejos y valida el trabajo de otros, a menudo como recurso externo
Directivo con criterio en datos	Alta en el negocio	Básica: hacer las preguntas correctas sobre evidencia, riesgo y valor	Prioriza, financia y exige resultados medibles

Una empresa mediana no necesita tener todos los perfiles en planta. Necesita alfabetización en datos en sus técnicos y directivos, al menos un traductor interno, acceso a un analista (interno o compartido) y acceso a especialistas externos para validación y problemas complejos.

3.2 Medir la brecha de competencias

El punto de partida es un mapa de competencias: para cada rol, las competencias necesarias y su nivel requerido, y para cada persona, su nivel actual. La brecha de competencias de una persona i puede resumirse como:

$$B_i = \sum_k w_k \, \max\left(0, \; R_k - A_{i,k}\right)$$

donde R_k es el nivel requerido de la competencia k para el rol, $A_{i,k}$ el nivel actual de la persona y w_k la importancia de la competencia. La suma de las brechas del equipo muestra dónde está el déficit principal, y la distribución de las competencias críticas entre personas muestra el riesgo de concentración: si solo una persona domina una competencia crítica, la empresa tiene el mismo riesgo que el capítulo 25 describe con el maestro fermentador.

Los niveles deben evaluarse con evidencia práctica (un ejercicio, un proyecto terminado, una revisión de trabajo) y no solo con autoevaluación, que tiende a sobrestimar las competencias en datos y a subestimar las del dominio.

3.3 Formar con proyectos reales de la empresa

La formación que cambia el desempeño es la que se aplica de inmediato a un problema real. El diseño recomendado combina tres elementos:

- Un proyecto de la hoja de ruta del capítulo 22 (por ejemplo, la identidad de lotes, el primer modelo de riesgo o el costo efectivo por proveedor) como eje de la formación.
- Módulos cortos de contenido que se imparten justo cuando el proyecto los necesita: estructurar datos cuando se diseña la captura, estadística básica cuando se analiza la variabilidad, validación de modelos cuando se construye el primero.
- Acompañamiento de un especialista que revisa el trabajo, corrige errores y transfiere criterio, con una dedicación que disminuye a medida que el equipo gana autonomía.

El resultado de la formación no es un certificado, sino un proyecto terminado y en uso. El aprendizaje queda anclado en un problema que el participante entiende y en una herramienta que seguirá usando.

3.4 Formar al traductor desde dentro

El traductor es el rol más difícil de contratar y el que más rinde formarlo. El candidato natural es un profesional del dominio con curiosidad analítica: un ingeniero de calidad, un agrónomo de campo o un responsable de compras que

ya usa hojas de cálculo con soltura y que se pregunta por qué ocurren las cosas. Su formación prioriza:

- Formular preguntas analíticas a partir de problemas del negocio, con la variable a predecir, los datos necesarios y el diseño para responderla.
- Evaluar la evidencia: leer un resultado de validación, detectar sobreajuste, entender intervalos y la diferencia entre correlación y causa.
- Gobernar modelos: aplicar las fichas, auditorías y reglas de abstención del capítulo 3.
- Comunicar: explicar a la gerencia qué dice un modelo, cuánto confiar en él y qué decisión cambia.

Un traductor formado en la propia empresa conoce sus procesos, sus proveedores y su gente, y tiene más probabilidad de quedarse que un especialista externo.

3.5 Comunidades de práctica entre empresas e instituciones

Una empresa mediana difícilmente tiene suficiente masa crítica para desarrollar sola su talento en datos. Las comunidades de práctica, grupos de personas que comparten un área de trabajo y aprenden juntas a través de la interacción regular (Wenger, 1998), ofrecen una alternativa. Un gremio, una universidad o una red de empresas puede organizar una comunidad de práctica de traductores y analistas del agro: reuniones periódicas para presentar casos, revisar métodos, compartir código y plantillas, y discutir problemas comunes sin revelar información competitiva.

Las universidades tienen un papel particular. Los programas de agroindustria, agronomía y medicina veterinaria pueden incorporar módulos de datos aplicados con casos reales de empresas; las empresas pueden ofrecer proyectos de tesis y pasantías con datos reales, bajo los acuerdos de datos del capítulo 7. Los estudiantes que hacen su tesis con los datos de una empresa son candidatos naturales a traductores.

3.6 Reducir la dependencia de una persona

Para evitar que la capacidad analítica se vaya con una persona, cada modelo, flujo de datos y tablero debe cumplir las reglas de documentación del capítulo

3 y del capítulo 25: código versionado en un repositorio de la empresa, fichas de modelo, procedimientos de actualización y al menos dos personas capaces de operarlo. La métrica de riesgo es simple: el número de activos analíticos críticos que solo una persona puede mantener. Ese número debe bajar con el tiempo.

3.7 Evaluar el retorno de la formación

La formación es una inversión y debe evaluarse como tal. El modelo de Kirkpatrick propone evaluar la formación en cuatro niveles: la reacción de los participantes, el aprendizaje logrado, el cambio de comportamiento en el trabajo y los resultados para la organización (Kirkpatrick, 1994). Para la formación en datos aplicada a proyectos, los niveles tres y cuatro son medibles de forma directa: si el proyecto se terminó y se usa, y qué valor económico generó.

El retorno de la inversión en formación puede estimarse como:

$$ROI_{formacion} = \frac{V_{proyectos} - C_{formacion}}{C_{formacion}}$$

donde $V_{proyectos}$ es el valor económico generado por los proyectos ejecutados por los participantes, estimado con los métodos de los capítulos anteriores, y $C_{formacion}$ el costo total de la formación, incluido el tiempo de los participantes y del acompañamiento. La atribución del valor a la formación es imperfecta, porque el proyecto también depende de otros factores, pero es más honesta que reportar solo las horas de capacitación y los certificados entregados.

3.8 La agroexportadora, reescrita

Volvamos a Guayaquil con un plan de talento.

En lugar de contratar primero a un científico de datos, la empresa hace un mapa de competencias de su equipo de calidad, compras y campo. Identifica a una ingeniera agroindustrial del área de calidad con buen manejo de hojas de cálculo y mucha curiosidad: será la traductora. Contrata, por medio tiempo, a un analista de datos con experiencia en agroindustria, compartido con otra empresa no competidora de la misma comunidad de práctica del gremio. Y acuerda con una universidad local el acompañamiento de un especialista en estadística y la participación de dos tesistas.

El primer proyecto de formación es la identidad de lotes y la captura de las variables de fermentación, que es la base de todo lo demás. La traductora aprende a estructurar los datos mientras diseña la captura con el equipo de recepción. Cuando hay una campaña de datos, aprende a analizar la variabilidad con el especialista. En el segundo proyecto, el modelo de calidad de lotes, ella formula las preguntas, el analista construye el modelo, el especialista lo valida y la jefa de calidad lo usa. El modelo incluye las variables de fermentación, madurez y proveedor que el primer analista nunca tuvo. Al cabo de dos campañas, la empresa tiene dos modelos en operación, documentados y mantenidos por dos personas, una traductora formada que se quedó, un analista compartido y una relación estable con la universidad. Su costo es menor que el de un equipo de especialistas contratados, y su capacidad no depende de que nadie se quede para siempre.

Fase 4. El framework de acción: cinco pasos para construir el talento híbrido

Paso	Acción concreta	Responsable	Evidencia de cumplimiento	Plazo de referencia
1. Mapear competencias y brechas	Definir las competencias en dominio y en datos de cada rol; evaluar el nivel actual de cada persona con evidencia práctica; calcular brechas y riesgo de concentración	Gerencia con talento humano y un evaluador externo	Mapa de competencias, brechas por persona y lista de competencias críticas concentradas	3 a 4 semanas
2. Designar y formar al traductor	Elegir a uno o dos profesionales del dominio con curiosidad analítica como traductores; definir su plan de formación ligado a proyectos	Gerencia con el responsable del área	Traductores designados con plan de formación aprobado	2 semanas

Paso	Acción concreta	Responsable	Evidencia de cumplimiento	Plazo de referencia
3. Formar con proyectos de la hoja de ruta	Vincular cada módulo de formación a una iniciativa activa de la hoja de ruta, con acompañamiento de un especialista que disminuye con el tiempo	Traductor con especialista externo y dueños de proceso	Proyecto terminado y en uso como resultado de cada ciclo de formación	Por proyecto, alineado con las campañas
4. Unirse o crear una comunidad de práctica	Participar con otras empresas, gremios y universidades en una comunidad de práctica de traductores y analistas; ofrecer proyectos de tesis con datos reales bajo acuerdos de datos	Gerencia con gremio o universidad	Participación regular registrada y proyectos de tesis activos	2 a 3 meses
5. Reducir la dependencia y medir el retorno	Documentar y versionar todos los activos analíticos, con al menos dos personas capaces de mantener cada uno; evaluar la formación por el uso y el valor de los proyectos	Traductor con TI y gerencia	Número de activos críticos mantenidos por una sola persona en descenso; informe anual de retorno de la formación	Revisión anual

Regla de cierre para el directorio: antes de aprobar la contratación de un especialista en datos, pregunte quién en la empresa va a formular las preguntas que ese especialista debe responder y quién va a usar sus respuestas en la operación. Si nadie tiene ese rol, la primera contratación que corresponde es formar a un traductor.

Nota del autor: el artículo de Davenport y Patil de 2012 es una publicación documentada. El escenario de la agroexportadora y del científico de datos es

una construcción narrativa; los perfiles, métodos de evaluación de competencias y modelos de evaluación de la formación descritos son reales y aplicables.

Capítulo 24. Caso integrado: tres campañas de una exportadora de cacao

Las herramientas de un libro se aprenden por separado. En una empresa, se usan todas a la vez y con el mismo equipo.

Esquema del capítulo

- Por qué un caso integrado: las herramientas de los capítulos anteriores interactúan, compiten por los mismos recursos y se refuerzan entre sí.
- El punto de partida de una exportadora mediana: diagnóstico de madurez y costo de no hacer nada.
- Tres campañas de transformación: qué se hizo, en qué orden, qué funcionó, qué no y cuánto movió.

Fase 1. El gancho: un programa de calidad que se volvió un sistema y una exportadora que empezó de cero

Programa de calidad sostenible de una marca de café, desde 2003

En 2003, la empresa de café en cápsulas Nespresso, del grupo Nestlé, lanzó junto con la organización Rainforest Alliance un programa de calidad sostenible para su abastecimiento de café, conocido como Programa AAA [detalles a confirmar con fuentes primarias]. El programa combinaba criterios de calidad del grano con criterios ambientales y sociales en las fincas, asistencia técnica a los productores, pago de primas y relaciones de compra de largo plazo. La literatura académica lo ha estudiado como un ejemplo de gobernanza de una red de abastecimiento con múltiples actores, en la que la empresa compradora, los productores, las organizaciones de certificación y los proveedores intermedios coordinan estándares, información e incentivos (Alvarez et al., 2010).

Más allá de las discusiones sobre sus resultados, el programa ilustra una idea que este libro ha recorrido por partes: la calidad, la sostenibilidad, la relación con los productores y la información forman un solo sistema. Cuando se gestionan por separado, cada una compite con las demás por recursos y atención. Cuando se gestionan como un sistema, cada dato sirve para varios fines a la vez.

Cacaos del Pacífico, punto de partida

Escenario compuesto. La empresa, sus proveedores, sus clientes y los personajes son ficticios; las herramientas aplicadas son las descritas en los capítulos anteriores. Las magnitudes se presentan de forma cualitativa para no introducir cifras que no provienen de un caso real.

Cacaos del Pacífico es una exportadora mediana de cacao en grano con sede en Guayaquil. Compra a unos 900 productores, en parte de forma directa, en parte a través de cuatro acopiadores y en parte a dos asociaciones de pequeños productores. Exporta a Europa, Estados Unidos y Asia, y vende una fracción menor en el mercado nacional. Tiene un centro de acopio y fermentación propio y certificación de su sistema de gestión de calidad.

En su última campaña, la empresa sufrió tres golpes casi seguidos. Un comprador europeo rechazó un lote por cadmio fuera de su especificación, y la empresa no pudo identificar las fincas de origen. Un acopiador entregó cacao declarado como fino de aroma que resultó mezclado con otro material genético. Y su banco redujo la línea de financiamiento de inventario porque los informes de calidad mostraban más variabilidad de la esperada. El gerente general, Mateo Cedeño, convoca al directorio con una pregunta: ¿qué hacemos?

Este capítulo responde esa pregunta siguiendo a la empresa durante tres campañas.

Fase 2. El diagnóstico: el punto de partida y el costo de no hacer nada

2.1 El diagnóstico de madurez

El primer paso fue el diagnóstico de madurez del capítulo 22, con evidencia por dimensión.

Dimensión	Nivel inicial	Evidencia
Identidad	1	Los lotes se identificaban en recepción, pero la composición de las mezclas no se registraba; no había polígonos de las fincas
Captura	1	Registros digitales de peso, humedad y prueba de corte; fermentación sin registro; análisis de laboratorio sin vínculo con el origen
Modelos	0	Ningún modelo en uso; decisiones de mezcla y compra por experiencia
Gobernanza	0	Sin inventario de datos ni responsables designados
Seguridad y soberanía	1	Respaldo en un disco conectado al servidor; contratos con plataformas sin revisar
Monetización	0	Ningún dato usado para negociar precio, crédito o seguro

2.2 El costo de no hacer nada

Antes de aprobar inversiones, el directorio pidió estimar cuánto le costaba a la empresa la situación actual. Con la ecuación del valor del bio-dato del capítulo 1, el equipo identificó cuatro fuentes de pérdida y estimó su orden de magnitud con los datos de la última campaña:

- Rechazos y reclamos: el lote rechazado por cadmio, con flete, descuento y la no conformidad abierta por el comprador.
- Fraude: la prima pagada por cacao fino de aroma que no lo era.
- Costo financiero: el mayor margen de garantía y la reducción de la línea de inventario, que obligó a comprar menos en el pico de cosecha.
- Oportunidad comercial: dos compradores europeos que exigían trazabilidad hasta la parcela y con los que la empresa no podía trabajar.

La suma de estas pérdidas en una sola campaña superaba el presupuesto que la empresa estaba dispuesta a invertir en datos durante dos campañas. Ese número cambió la conversación en el directorio: la inversión dejó de ser un gasto en tecnología y pasó a ser una forma de reducir una pérdida que ya estaba ocurriendo.

2.3 El mapa de dependencias aplicado

El equipo listó todas las iniciativas que el directorio había mencionado: modelo de cadmio, sistema antifraude, trazabilidad para el reglamento europeo de deforestación, tablero ESG, un proyecto de carbono que un desarrollador había ofrecido, un clasificador de calidad por visión artificial, un gemelo digital del centro de fermentación y un asistente de IA para calidad. Con el mapa de dependencias, la mayoría resultó depender de dos capacidades que no existían: la identidad de lotes con composición de mezclas y el registro de parcelas georreferenciadas.

La prioridad quedó clara antes de discutir presupuestos.

Fase 3. La tesis aplicada: tres campañas de transformación

3.1 Antes de la campaña 1: la base y el equipo

Gobierno y talento. El directorio designó a Cedeño como patrocinador. La jefa de calidad, Valeria Mendoza, asumió como dueña del proceso de identidad y captura. Un ingeniero agroindustrial del área de compras con buen manejo de

datos fue designado traductor, con un plan de formación ligado a los proyectos (capítulo 23). La empresa se sumó a una comunidad de práctica organizada por el gremio y acordó con una universidad el acompañamiento de un especialista en estadística.

Seguridad. Antes de digitalizar más, se aisló el respaldo, se separó la red del centro de fermentación de la red administrativa y se probó una restauración completa (capítulo 7).

Contratos de datos. Se revisaron las condiciones de una aplicación de registro de entregas que usaban dos acopiadores. Una de ellas permitía al proveedor comercializar datos agregados; se renegoció.

Las tres iniciativas activas para la campaña 1 fueron: identidad de lotes con composición de mezclas, registro de parcelas de los proveedores que concentraban la mayor parte del volumen y respaldo y continuidad básicos.

3.2 Campaña 1: construir la identidad

Identidad de lotes. La recepción empezó a registrar cada entrega con el identificador del productor y cada mezcla con la proporción de cada entrega. Al principio, en la semana de mayor volumen, el registro se atrasaba y los operadores volvían al papel. Mendoza simplificó el formulario a cinco campos y asignó una persona adicional a la recepción en las semanas pico. Al cierre de la campaña, casi todos los lotes tenían su composición registrada.

Parcelas. Los técnicos de campo levantaron los polígonos de los productores directos y de los proveedores principales de los acopiadores. Con las dos asociaciones de pequeños productores, la empresa aplicó el modelo asociativo del capítulo sobre el pequeño productor: financió dos teléfonos con GPS y la capacitación de promotores comunitarios, que levantaron los polígonos de sus socios. Una de las asociaciones aceptó; la otra desconfió de entregar la ubicación de sus fincas y pidió tiempo. La empresa respetó su decisión y siguió comprándole para el mercado nacional mientras negociaban un contrato de datos.

Primer resultado comercial. Con la cobertura de parcelas alcanzada, la empresa pudo ofrecer a uno de los compradores europeos que exigían trazabilidad un primer lote con polígonos verificados contra mapas de deforestación (capítulo 8). El comprador aceptó una prueba.

3.3 Entre la campaña 1 y la campaña 2: convertir datos en decisiones

Con una campaña de datos con identidad, las siguientes tres iniciativas se activaron.

Modelo de cadmio. El equipo vinculó los análisis de cadmio existentes y nuevos con las parcelas de origen y construyó un modelo jerárquico con covariables de suelo y zona (capítulo 1). La primera validación fue decepcionante: el modelo tenía errores grandes en una zona con pocos análisis. El validador independiente recomendó no usarlo para decisiones en esa zona hasta tener más datos, y aplicar la regla de abstención del capítulo 3: los lotes con entregas de esa zona se analizaban siempre en laboratorio. En las demás zonas, el modelo permitió armar mezclas con restricción probabilística para cada comprador.

Índice de plausibilidad. Con parcelas, rendimientos esperados y entregas por proveedor, el equipo calculó el índice de plausibilidad productiva del capítulo 4. El acopiador del episodio de fraude mostraba entregas de cacao fino de aroma muy por encima de lo que podían producir las fincas registradas de sus productores. La empresa suspendió la prima a ese acopiador hasta que pudiera demostrar el origen, y el acopiador dejó de venderle. El volumen se compensó en parte con compras directas a sus antiguos productores.

Expediente de riesgo. Con la identidad de lotes, la calidad estimada por lote y el inventario en un almacén con custodia, la empresa presentó a su banco el expediente de riesgo del capítulo 2. El banco revisó el margen de garantía de la línea de inventario. La reducción del margen liberó capital para comprar más cacao en el pico de la campaña siguiente.

3.4 Campaña 2: gobernar, extender y vender mejor

Gobernanza de modelos. Con un modelo en uso y otros en camino, se creó el inventario de modelos del capítulo 3. El modelo de cadmio quedó clasificado como de riesgo alto, con ficha, dueño y monitoreo de deriva. Cuando una asociación nueva empezó a entregar desde una zona no representada, el monitoreo marcó la entrada y esos lotes se analizaron en laboratorio hasta que el modelo se recalibró.

Compliance por mercado. Un rechazo de un competidor en Asia por residuos de un plaguicida llevó a la empresa a construir su base de requisitos por mercado (capítulo 5). Encontró que una sustancia usada por varios productores tenía límites muy distintos en sus tres mercados. Entregó listas de sustancias por

destino a los productores y a los técnicos de las casas comerciales, y empezó a asignar lotes a mercados según su historial de aplicaciones.

Pronóstico de cosecha. Los técnicos iniciaron conteos de mazorcas por etapa en una muestra estratificada de fincas y marcaron frutos para estimar supervivencia (capítulo 14). En esta campaña, el pronóstico todavía tenía intervalos amplios. Aun así, la empresa usó la regla de cuantil para dimensionar sus contratos a plazo y negoció opciones de ampliación con dos compradores. Cuando la cosecha resultó algo menor de lo esperado, cumplió sin comprar al contado.

Pequeños productores. La asociación que había desconfiado firmó un contrato de datos con las cláusulas del capítulo 7: los datos pertenecen a la asociación, la empresa los usa solo para trazabilidad y calidad, y la asociación recibe cada campaña un informe de sus socios y una prima por el cacao vendido a Europa. Con eso, la asociación entró al mercado europeo.

ESG y carbono. El primer comprador europeo convirtió la prueba en un contrato anual. Pidió además datos de cobertura arbórea de las fincas. La empresa ofreció el indicador de cobertura de trazabilidad hasta el origen y la verificación satelital de uso del suelo. El desarrollador de carbono volvió con su propuesta; con el análisis del capítulo 9, la empresa y las asociaciones concluyeron que la línea base no se sostenía y prefirieron negociar con el comprador europeo una prima de *insetting* por cobertura arbórea verificada.

3.5 Campaña 3: optimizar y conservar

El gemelo digital que no se construyó todavía. El directorio volvió a preguntar por el gemelo digital del centro de fermentación. Con la prueba del valor de la información del capítulo 19, el equipo estimó que la decisión de volteo en fermentación tenía un valor de información moderado: el responsable del centro tenía buena información y los errores eran poco frecuentes. En cambio, el valor de información del pronóstico de cosecha era alto. El gemelo se pospuso y los recursos se destinaron a mejorar el pronóstico.

Conocimiento. El responsable del centro de fermentación, con más de veinte años en la empresa, anunció que se jubilaría en dos años. La empresa aplicó el mapa de conocimiento crítico y el plan de captura del capítulo 25: una sucesora en aprendizaje en pareja, sensores de temperatura en los cajones y registro de

cada decisión del experto con su explicación. Los datos de esa campaña alimentaron las primeras reglas de alerta de fermentación.

Clasificador de calidad. Con el registro de lotes funcionando y la gobernanza de modelos instalada, la empresa probó un clasificador de prueba de corte por visión artificial, en sombra durante una campaña, con auditoría por zona de origen desde el principio. El desempeño en la zona amazónica de una de las asociaciones fue menor; el equipo agregó imágenes de esa zona antes de considerar su uso para precios.

3.6 Lo que no funcionó

Un caso integrado honesto debe registrar los fracasos.

Iniciativa	Qué pasó	Lección
Captura en semana pico de la campaña 1	Los operadores volvían al papel por la carga de trabajo	El diseño de la captura debe probarse en la semana de mayor volumen, no en la de menor
Modelo de cadmio en una zona	Errores grandes por pocos datos	La abstención protege más que un modelo forzado a decidir donde no sabe
Relación con un acopiador	El acopiador se fue cuando se le suspendió la prima	El control antifraude tiene un costo comercial; conviene tener preparadas las compras directas que lo compensen
Primera propuesta a una asociación	La asociación desconfió y tardó una campaña en entrar	La soberanía del dato se negocia antes de pedir los datos, no después
Tablero ESG temprano	Se diseñó un tablero antes de tener datos de nivel alto; mostró cifras que nadie usaba	El tablero viene después del dato, no antes

3.7 El resultado después de tres campañas

Al cierre de la tercera campaña, el diagnóstico de madurez mostró avances en todas las dimensiones.

Dimensión	Inicial	Después de tres campañas
Identidad	1	3
Captura	1	3
Modelos	0	2 a 3
Gobernanza	0	3
Seguridad y soberanía	1	3
Monetización	0	3

El informe al directorio presentó además el valor movido por los datos en decisiones de terceros: el margen de garantía revisado por el banco, los contratos con compradores europeos que exigían trazabilidad, la entrada de una asociación al mercado europeo, las primas de *insetting*, los rechazos que dejaron de ocurrir y la prima que se dejó de pagar por cacao que no era lo que se declaraba. Ninguna de estas cifras dependía de una sola herramienta. Cada una dependía de la identidad de lotes y del registro de parcelas construidos en la primera campaña.

La empresa no implementó todo lo que el libro describe. No tiene un gemelo digital, no participa todavía en un sistema de inteligencia territorial y su clasificador por visión artificial sigue en prueba. Pero cada capacidad que tiene funciona, tiene un dueño y produce valor medible. Ese es el criterio de éxito de una transformación basada en datos, no el número de herramientas.

Fase 4. El framework de acción: cinco pasos para gestionar la transformación como un sistema

Paso	Acción concreta	Responsable	Evidencia de cumplimiento	Plazo de referencia
1. Cuantificar el costo de no hacer nada	Estimar las pérdidas de la última campaña atribuibles a la falta de datos (rechazos, fraude, costo financiero, oportunidades perdidas) y compararlas con la inversión propuesta	Patrocinador con finanzas	Estimación de pérdidas por fuente y comparación con la inversión	3 semanas
2. Construir primero la base común	Priorizar la identidad de lotes, el registro de parcelas y la seguridad básica antes que cualquier modelo, tablero o plataforma	Patrocinador con dueños de proceso	Iniciativas de base activas y con dueño en la primera campaña	Primera campaña
3. Encadenar las iniciativas por campañas	Activar cada iniciativa cuando sus dependencias existen, con un máximo de tres activas; cerrar, escalar o cancelar al final de cada campaña	Patrocinador con el comité	Cartera revisada al cierre de cada campaña	Por campaña
4. Registrar lo que no funcionó	Documentar en cada cierre de campaña las iniciativas que fallaron o se atrasaron, sus causas y la lección, e incorporarlas al sistema de conocimiento	Traductor con dueños de proceso	Registro de lecciones por campaña	Por campaña

Paso	Acción concreta	Responsable	Evidencia de cumplimiento	Plazo de referencia
5. Informar madurez y valor juntos	Presentar al directorio, en cada cierre de campaña, el nivel de madurez por dimensión y el valor económico movido por los datos en decisiones de terceros	Patrocinador	Informe de cierre con madurez y valor	Por campaña

Regla de cierre para el directorio: al final de cada campaña, pida dos números: cuánto subió la madurez de la empresa en datos y cuánto dinero movieron esos datos en decisiones de bancos, compradores, aseguradoras o productores. Si sube uno y no el otro, la transformación está desequilibrada. Si no sube ninguno, está detenida.

Nota del autor: el Programa AAA de Nespresso es una iniciativa documentada; sus detalles deben confirmarse con fuentes primarias antes de la publicación. Cacaos del Pacífico y todos sus actores son una construcción narrativa que integra las herramientas descritas en los capítulos anteriores; no se presentan cifras para no introducir datos que no provienen de un caso real. Si el autor dispone de un caso real documentado, puede sustituir este escenario o complementarlo con sus datos.

Capítulo 25. Knowledge Systems: que el conocimiento no se jubile con quien lo tiene

Una empresa puede tener todos los datos del mundo y aun así olvidar cómo se fermenta un buen cacao.

Esquema del capítulo

- El conocimiento que no está en ningún sistema: el saber tácito de técnicos, operadores y productores, y el riesgo de perderlo.
- Por qué fallan los manuales y los repositorios: documentos que nadie usa, lecciones que nadie registra y asistentes de IA que responden con seguridad sobre fuentes desactualizadas.
- Arquitectura de un sistema de conocimiento agroindustrial: mapa de conocimiento crítico, captura del saber tácito, conversión del criterio experto en bio-datos, bases de conocimiento con IA gobernada y aprendizaje después de cada incidente.

Fase 1. El gancho: el olfato que se fue con el maestro fermentador

Ecuador, inicios del siglo XX

A comienzos del siglo XX, Ecuador figuraba entre los principales exportadores de cacao del mundo. En las décadas de 1910 y 1920, enfermedades como la escoba de bruja y la moniliasis, junto con la caída de los precios internacionales, golpearon con fuerza la producción cacaotera del país y le hicieron perder esa posición [datos históricos y fuentes a confirmar]. La recuperación tomó décadas y obligó a reconstruir conocimiento sobre manejo sanitario, materiales genéticos y prácticas de producción.

Parte de ese conocimiento sobrevivió porque se conservó en sistemas: colecciones de germoplasma en estaciones experimentales, publicaciones técnicas, programas de mejoramiento. Otra parte, la que vivía en la práctica

diaria de quienes manejaban las haciendas, se perdió con las personas que la tenían. Es la diferencia que este capítulo trata: el conocimiento que una organización guarda en un sistema sobrevive a las personas; el que guarda solo en las personas, no.

Una exportadora de cacao en Los Ríos, un lunes de marzo

Escenario compuesto. La empresa y los personajes son ficticios; los mecanismos de pérdida y captura de conocimiento descritos son reales.

Don Efraín Mora trabajó treinta y un años en el centro de fermentación de una exportadora de cacao fino de aroma. Empezó volteando cajones y terminó dirigiendo el área. Los compradores europeos lo conocían por nombre. Cuando visitaban la planta, pedían ver sus cajones.

Don Efraín no usaba termómetro. Metía la mano en la masa, la olía, escuchaba el sonido de los granos al voltearlos. Sabía cuándo un lote necesitaba un volteo adicional por el olor a vinagre que subía del cajón y cuándo había que sacarlo antes de tiempo porque "el cacao ya está hablando". Ajustaba los tiempos según la madurez de las mazorcas que llegaban, el clima de la semana y el proveedor de origen. Nunca escribió nada de esto. Nadie se lo pidió.

En diciembre, don Efraín se jubiló. En marzo, el primer comprador europeo envió una evaluación sensorial con observaciones: el perfil floral había perdido intensidad y aparecían notas de sobrefermentación en algunos lotes. En abril llegó una segunda queja. El procedimiento escrito de fermentación de la empresa, aprobado en la última auditoría de certificación, decía: "fermentar entre cinco y siete días con volteos cada 48 horas". El nuevo responsable lo cumplía al pie de la letra. El procedimiento era correcto y no servía, porque todo lo que hacía buena la fermentación de don Efraín estaba en las decisiones que tomaba dentro de ese rango, y ninguna de esas decisiones estaba escrita.

La empresa tenía años de registros de humedad, de prueba de corte y de análisis de cadmio. Tenía un sistema de calidad certificado. No tenía el conocimiento que producía su mejor cacao.

Fase 2. El diagnóstico: por qué las organizaciones agroindustriales pierden lo que saben

2.1 Conocimiento tácito y explícito

El filósofo Michael Polanyi describió una propiedad del conocimiento humano que explica el caso de don Efraín: sabemos más de lo que podemos decir (Polanyi, 1966). Una parte importante del saber experto es tácito: se expresa en la acción, en la percepción y en el juicio, pero quien lo tiene no puede formularlo de manera completa en palabras.

Nonaka y Takeuchi (1995) desarrollaron a partir de esta distinción un modelo de creación de conocimiento organizacional basado en la conversión entre conocimiento tácito y explícito: se comparte tácito con tácito a través de la experiencia compartida, se convierte tácito en explícito mediante la articulación, se combina explícito con explícito y se vuelve a interiorizar lo explícito en la práctica. Las organizaciones que crean y conservan conocimiento gestionan de forma deliberada estas conversiones. Las que no lo hacen dependen de que las personas clave no se vayan.

En la agroindustria, la proporción de conocimiento tácito es alta. La evaluación sensorial, el manejo de procesos biológicos variables, el diagnóstico de problemas en campo y la negociación con productores dependen de criterios que se forman con años de experiencia y casi nunca se documentan.

2.2 El requisito que se cumple en papel

La norma ISO 9001:2015 incluye un requisito específico sobre el conocimiento de la organización: la empresa debe determinar el conocimiento necesario para la operación de sus procesos y para lograr la conformidad de sus productos, mantenerlo y ponerlo a disposición en la medida necesaria, y considerar cómo adquirir o acceder al conocimiento adicional cuando cambien las necesidades (ISO, 2015, apartado 7.1.6).

En la práctica, muchas organizaciones certificadas cumplen este requisito con una lista de procedimientos y registros de capacitación. La exportadora de don Efraín tenía su procedimiento de fermentación aprobado y su registro de que el personal había sido capacitado en él. Cumplía el requisito en la auditoría. No

había determinado cuál era el conocimiento que de verdad hacía la diferencia, ni quién lo tenía, ni qué pasaría si esa persona se iba.

2.3 Concentración del conocimiento crítico

En equipos de desarrollo de software se usa una expresión informal para medir este riesgo: el número de personas que tendrían que ausentarse para que un proyecto se detenga. En muchas empresas agroindustriales medianas, ese número es uno para varios procesos críticos: el maestro de fermentación, el técnico que conoce a todos los productores, el jefe de mantenimiento que sabe ajustar una máquina antigua, la persona que domina las normas de un mercado de exportación.

Este riesgo rara vez se mide y casi nunca aparece en la matriz de riesgos de la empresa. Se manifiesta cuando la persona se jubila, renuncia, se enferma o es contratada por la competencia, y para entonces ya es tarde.

2.4 Manuales que nadie usa

La respuesta habitual al riesgo de pérdida de conocimiento es escribir manuales. Los manuales fallan por tres razones frecuentes:

- Describen el qué y omiten el cuándo y el por qué. "Voltear cada 48 horas" es un qué. El conocimiento experto está en saber cuándo voltear antes, cuándo después y por qué.
- Se escriben una vez y no se actualizan. El proceso cambia, los equipos cambian, los proveedores cambian, y el manual sigue igual. Al cabo de un tiempo, el personal aprende a ignorarlo.
- No están donde se toma la decisión. El manual está en una carpeta o en un servidor; la decisión se toma frente al cajón de fermentación, en la recepción o en la finca.

2.5 Lecciones que nadie registra

Cada incidente (un lote rechazado, una disputa con un proveedor, una falla de equipo, un error de un modelo) contiene conocimiento. En la mayoría de las organizaciones, ese conocimiento se pierde porque el incidente se resuelve y nadie registra qué pasó, por qué y qué se aprendió. El siguiente incidente igual encuentra a la organización en el mismo punto.

2.6 El asistente de IA que responde con seguridad

La disponibilidad de modelos de lenguaje ha llevado a muchas organizaciones a construir asistentes que responden preguntas a partir de sus documentos internos. La técnica más común, la generación aumentada por recuperación, combina un buscador que encuentra los fragmentos relevantes de los documentos con un modelo de lenguaje que redacta la respuesta a partir de ellos (Lewis et al., 2020).

Estos asistentes resuelven el problema de acceso: el conocimiento explícito queda disponible donde se toma la decisión. Pero introducen dos riesgos. El primero es que los modelos de lenguaje pueden generar respuestas plausibles que no están respaldadas por las fuentes, un fenómeno ampliamente documentado y conocido como alucinación (Ji et al., 2023). El segundo es que el asistente responde con la misma seguridad cuando su fuente es un procedimiento vigente que cuando es un borrador de hace cinco años. Un asistente construido sobre documentos desactualizados no conserva el conocimiento: difunde con eficiencia el conocimiento equivocado.

Fase 3. La tesis: el conocimiento experto como activo que se mapea, se captura y se convierte en datos

3.1 Mapear el conocimiento crítico

El primer paso es saber qué conocimiento importa y dónde está. Un mapa de conocimiento crítico identifica, para cada proceso relevante, las decisiones que más afectan al resultado, el conocimiento necesario para tomarlas bien y las personas que lo tienen.

Para priorizar, cada elemento de conocimiento k puede calificarse con un índice de riesgo:

$$R_k = C_k \times (1 - D_k) \times U_k$$

donde C_k es la criticidad del conocimiento para el resultado (por ejemplo, de 0 a 1 según su efecto en calidad, inocuidad, costo o relación con clientes), D_k su grado de documentación y redundancia (0 si solo una persona lo tiene y no está escrito en ninguna parte; 1 si está documentado, validado y varias personas lo dominan) y U_k la urgencia (cercanía de la jubilación, riesgo de rotación o cambio

previsto en el proceso). Los elementos con mayor índice son los que la empresa debe capturar primero.

En la exportadora, un mapa hecho dos años antes habría mostrado el criterio de fermentación de don Efraín con criticidad máxima, documentación casi nula y urgencia alta por su edad. Habría estado en el primer lugar de la lista.

3.2 Capturar el saber tácito con métodos específicos

El conocimiento tácito no se captura pidiendo a la persona que escriba un manual. Requiere métodos diseñados para hacer visible el juicio experto. Cuatro de ellos son aplicables en la agroindustria.

Método	Cómo se aplica	Qué captura
Observación con pensamiento en voz alta	El experto realiza su trabajo y describe en voz alta lo que observa, lo que considera y lo que decide; se graba en audio o video	Las señales que el experto atiende y el razonamiento detrás de cada decisión (Ericsson y Simon, 1993)
Entrevista sobre decisiones críticas	Se pide al experto que reconstruya situaciones difíciles del pasado (un lote problemático, una falla) y se profundiza en qué notó, qué opciones consideró y por qué eligió una	Los criterios para casos no rutinarios, que son los que el procedimiento no cubre (Klein et al., 1989)
Aprendizaje en pareja	Un sucesor trabaja junto al experto durante un periodo definido, con objetivos de aprendizaje y evaluación	La transferencia de tácito a tácito, que ningún documento reemplaza
Comparación de casos	Se presentan al experto pares de situaciones parecidas con decisiones distintas y se le pide explicar la diferencia	Los umbrales y las reglas de decisión implícitas

El resultado de estos métodos no es un manual más largo. Es un conjunto de reglas de decisión con sus condiciones (“si el olor ácido aparece antes del segundo día y la temperatura de la masa no sube, entonces…”), de ejemplos

anotados (videos y fotografías con la decisión tomada y su razón) y de casos difíciles documentados.

3.3 Convertir el criterio experto en bio-datos

Aquí está la tesis central del capítulo, y el punto donde el libro cierra su arco. El juicio de un experto es, en términos técnicos, un clasificador entrenado durante décadas con miles de ejemplos. Sus decisiones son etiquetas de altísimo valor. Si se registran junto con los datos de los sensores, se convierten en la materia prima para los modelos descritos en el capítulo 1.

En la práctica, la captura se organiza así:

- Durante el periodo de transición, cada cajón de fermentación tiene sensores de temperatura y se registran el tiempo, el proveedor, la madurez de la mazorca y el clima.
- Cada vez que el experto decide (voltear, esperar, sacar antes), la decisión se registra con su hora y con una breve explicación grabada.
- Al final de cada lote, se registran los resultados: prueba de corte, evaluación sensorial, reclamos posteriores.

Con unas pocas campañas de este registro, la empresa obtiene un conjunto de datos en el que cada observación combina las mediciones del proceso, la decisión del experto y el resultado. Ese conjunto permite tres cosas. Primero, identificar qué variables medibles anticipan las decisiones del experto (por ejemplo, una forma particular de la curva de temperatura que precede a su decisión de un volteo adicional). Segundo, entrenar un modelo que sugiera decisiones en situaciones parecidas. Tercero, evaluar si esas decisiones efectivamente mejoraban el resultado, lo que separa el conocimiento valioso de la costumbre.

Este modelo debe gobernarse como cualquier otro modelo que influye en la calidad, con las reglas del capítulo 3: ficha, validación, monitoreo, abstención en casos fuera de su experiencia y revisión humana. Y tiene un límite que conviene aceptar: algunas señales que el experto percibe, como ciertos matices de olor, pueden no estar capturadas por los sensores disponibles. El modelo conserva la parte medible del criterio; el aprendizaje en pareja conserva el resto.

3.4 Una base de conocimiento con IA gobernada

Para el conocimiento explícito (procedimientos, normas, especificaciones de clientes, fichas técnicas, reglas de decisión capturadas, lecciones aprendidas), un asistente basado en generación aumentada por recuperación es una herramienta útil, siempre que se construya con cuatro condiciones.

Condición	Implementación	Riesgo que controla
Fuentes curadas y versionadas	Solo entran documentos aprobados, con versión, fecha, responsable y fecha de revisión; los documentos vencidos salen automáticamente	Respuestas basadas en información obsoleta
Respuesta con cita obligatoria	Cada respuesta indica el documento y la sección de donde proviene; si no hay fuente suficiente, el asistente lo dice y no responde	Respuestas inventadas presentadas como conocimiento de la empresa
Evaluación periódica	Un conjunto de preguntas con respuestas validadas por los expertos se usa para medir la exactitud del asistente antes de cada cambio y de forma periódica	Deterioro silencioso de la calidad de las respuestas
Clasificación de riesgo	El asistente se registra en el inventario de modelos del capítulo 3; si sus respuestas influyen en decisiones de inocuidad o de calidad, su nivel de riesgo y sus controles aumentan	Uso no gobernado de IA en decisiones críticas

La métrica de salud de la base de conocimiento es la proporción de procesos críticos que tienen conocimiento documentado, validado y vigente:

$$\text{Cobertura de conocimiento} = \frac{\text{decisiones críticas con conocimiento validado y vigente}}{\text{decisiones críticas identificadas en el mapa}}$$

Este indicador, revisado cada trimestre, muestra si el riesgo de pérdida de conocimiento está bajando o subiendo.

3.5 Aprender después de cada incidente

El conocimiento nuevo de una organización nace, en buena medida, de sus incidentes. La revisión después de la acción, desarrollada en el ejército de los Estados Unidos y adoptada en muchos sectores (U.S. Army, 1993), es un método simple para convertir cada incidente en conocimiento. Se responden cuatro preguntas en una reunión breve y sin búsqueda de culpables: ¿qué se esperaba que pasara?, ¿qué pasó realmente?, ¿por qué hubo una diferencia? y ¿qué se hará distinto?

En una organización agroindustrial con los sistemas descritos en este libro, la revisión tiene un insumo adicional: los datos. Un lote rechazado por cadmio (capítulo 1), un crédito reducido por un error de modelo (capítulo 3), un fraude detectado (capítulo 4), una disputa técnica (capítulo 6) o una mala decisión de compra (capítulo 13) dejan un rastro de bio-datos que permite reconstruir el incidente con precisión. La lección resultante se incorpora a la base de conocimiento como una regla, una actualización de procedimiento o un caso documentado, y se vincula con los datos que la sustentan.

3.6 El ciclo completo: datos, dinero, gobernanza y conocimiento

Este capítulo cierra el recorrido del libro y conecta sus piezas en un ciclo. Los bio-datos (capítulo 1) se convierten en dinero cuando cambian decisiones de bancos, aseguradoras, compradores e inversionistas (capítulos 2, 13 y 21). Los modelos que los procesan y las afirmaciones que se construyen con ellos requieren gobernanza (capítulos 3, 4 y 8). Las disputas y los territorios exigen métodos para inferir causas y decidir con evidencia (capítulos 6 y 10). Y todo ese sistema depende de que la organización conserve y mejore su conocimiento, incluido el de las personas que hacen el trabajo biológico que ningún sensor reemplaza.

Una organización que cierra este ciclo aprende de forma acumulativa: cada campaña deja más datos, mejores modelos y más conocimiento validado que la anterior. Una organización que no lo cierra vuelve a empezar cada vez que se va una persona clave o cambia un comprador.

3.7 La exportadora de Los Ríos, reescrita

Volvamos a la exportadora con un sistema de conocimiento en funcionamiento desde dos años antes de la jubilación de don Efraín.

El mapa de conocimiento crítico identificó su criterio de fermentación como el elemento de mayor riesgo de la empresa. La gerencia asignó a una joven ingeniera agroindustrial como sucesora, con un plan de aprendizaje en pareja de dos campañas. Durante ese tiempo, los cajones tuvieron sensores de temperatura y cada decisión de don Efraín se registró con su explicación grabada. Se hicieron entrevistas sobre los lotes difíciles de su carrera y se documentaron como casos.

Al terminar las dos campañas, el análisis de los datos mostró que buena parte de sus decisiones de volteo adicional se anticipaban por un patrón en la curva de temperatura y por el proveedor de origen, que entregaba mazorcas con distinto grado de madurez. Ese patrón se convirtió en una alerta del sistema de monitoreo de fermentación. Otra parte de sus decisiones dependía del olor y no pudo traducirse a datos de los sensores disponibles; ese criterio quedó en la sucesora, que lo había practicado junto a él durante dos años, y en los videos anotados de la base de conocimiento.

El procedimiento de fermentación se reescribió con reglas de decisión y no solo con rangos. El asistente de la base de conocimiento responde preguntas sobre fermentación citando el procedimiento vigente y los casos documentados.

Cuando don Efraín se jubila, los compradores siguen pidiendo ver los cajones. Ahora los muestra su sucesora.

Fase 4. El framework de acción: cinco pasos para construir el sistema de conocimiento de la empresa

Paso	Acción concreta	Responsable	Evidencia de cumplimiento	Plazo de referencia
1. Mapear el conocimiento crítico	Identificar las decisiones que más afectan a calidad, inocuidad, costo y relación con clientes; registrar quién tiene el conocimiento para tomarlas; calcular el índice de riesgo de cada elemento	Gerencia con jefaturas de área y talento humano	Mapa de conocimiento crítico con índice de riesgo y responsables	3 a 4 semanas
2. Capturar primero lo que está por irse	Para los elementos de mayor riesgo, aplicar observación con pensamiento en voz alta, entrevistas sobre decisiones críticas y aprendizaje en pareja con un sucesor designado	Jefatura del área con apoyo de calidad	Reglas de decisión, casos documentados y plan de aprendizaje en pareja en ejecución	Inicio inmediato; duración según el proceso (una a dos campañas)
3. Registrar las decisiones del experto como datos	En los procesos biológicos críticos, registrar cada decisión del experto con hora, mediciones del proceso y resultado posterior	Calidad con soporte técnico	Conjunto de datos con decisiones, mediciones y resultados por lote	Una o dos campañas

Paso	Acción concreta	Responsable	Evidencia de cumplimiento	Plazo de referencia
4. Construir la base de conocimiento gobernada	Reunir procedimientos, reglas de decisión, casos y lecciones en una base con versión, responsable y fecha de revisión; si se usa un asistente de IA, exigir cita de fuente, evaluarlo con preguntas validadas y registrarlo en el inventario de modelos	Calidad con TI o proveedor externo	Base de conocimiento vigente, indicador de cobertura de conocimiento y resultado de la evaluación del asistente	2 a 4 meses
5. Instalar la revisión después de cada incidente	Aplicar la revisión después de la acción a cada incidente relevante, con sus datos, e incorporar la lección a la base de conocimiento	Responsable de cada área, con seguimiento de calidad	Registro de revisiones realizadas y lecciones incorporadas	Desde el siguiente incidente

Regla de cierre para el directorio: pida la lista de las cinco personas cuya salida mañana afectaría más a la calidad o a los clientes de la empresa, y pregunte qué parte de lo que ellas saben está hoy en un sistema. La respuesta indica cuánto del valor de la empresa depende de que nadie se vaya.

Nota del autor: la crisis cacaotera ecuatoriana de inicios del siglo XX es un hecho histórico conocido; las fechas, magnitudes y fuentes deben precisarse antes de la publicación. El escenario de la exportadora de Los Ríos y de don Efraín Mora es una construcción narrativa; los métodos de captura de conocimiento, los requisitos normativos y las herramientas descritas son reales y aplicables.

Referencias bibliográficas

AgFunder. (2024). *AgFunder AgriFoodTech investment report 2024*. AgFunder. [Edición y cifras a confirmar]

Agrotoken. (s. f.). *Agrotoken* [Sitio web corporativo]. [URL y descripción a confirmar]

Akerlof, G. A. (1970). The market for "lemons": Quality uncertainty and the market mechanism. *The Quarterly Journal of Economics, 84*(3), 488–500. https://doi.org/10.2307/1879431

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements* (FAO Irrigation and Drainage Paper 56). FAO.

Alvarez, G., Pilbeam, C., & Wilding, R. (2010). Nestlé Nespresso AAA sustainable quality program: An investigation into the governance dynamics in a multi-stakeholder supply chain network. *Supply Chain Management: An International Journal, 15*(2), 165–182. [DOI a confirmar]

American Farm Bureau Federation et al. (2014). *Privacy and security principles for farm data*. American Farm Bureau Federation. [Lista de organizaciones firmantes y URL a confirmar]

Angrist, J. D., & Pischke, J.-S. (2009). *Mostly harmless econometrics: An empiricist's companion*. Princeton University Press.

Argüello, D., Chavez, E., Lauryssen, F., Vanderschueren, R., Smolders, E., & Montalvo, D. (2019). Soil properties and agronomic factors affecting cadmium concentrations in cacao beans: A nationwide survey in Ecuador. *Science of the Total Environment, 649*, 120–127. [DOI a confirmar]

Asamblea Nacional del Ecuador. (2015). *Código Orgánico General de Procesos*. Registro Oficial Suplemento 506, 22 de mayo de 2015. [Datos de publicación a confirmar]

Asamblea Nacional del Ecuador. (2021). *Ley Orgánica de Protección de Datos Personales*. Registro Oficial Suplemento 459, 26 de mayo de 2021.

[Número de Registro Oficial y artículo sobre decisiones automatizadas a confirmar]

AVSF & Ethiquable. (2025). *Para un EUDR operativo* [Nota de posición]. https://www.avsf.org/app/uploads/2025/10/Posicion-AVSF-Ethiquable-EUDR.pdf [Título exacto a confirmar]

Baranyi, J., & Roberts, T. A. (1994). A dynamic approach to predicting bacterial growth in food. *International Journal of Food Microbiology, 23*(3–4), 277–294. [DOI a confirmar]

Barnett, A. G., van der Pols, J. C., & Dobson, A. J. (2005). Regression to the mean: What it is and how to deal with it. *International Journal of Epidemiology, 34*(1), 215–220. [DOI a confirmar]

Basel Committee on Banking Supervision. (2005). *An explanatory note on the Basel II IRB risk weight functions*. Bank for International Settlements.

Berckmans, D. (2014). Precision livestock farming technologies for welfare management in intensive livestock systems. *Revue Scientifique et Technique de l'Office International des Épizooties, 33*(1), 189–196. [DOI a confirmar]

Borenstein, M., Hedges, L. V., Higgins, J. P. T., & Rothstein, H. R. (2009). *Introduction to meta-analysis*. John Wiley & Sons.

Boyd, C. E., & Tucker, C. S. (1998). *Pond aquaculture water quality management*. Kluwer Academic Publishers.

Bunting, P., Rosenqvist, A., Lucas, R. M., Rebelo, L.-M., Hilarides, L., Thomas, N., Hardy, A., Itoh, T., Shimada, M., & Finlayson, C. M. (2018). The Global Mangrove Watch: A new 2010 global baseline of mangrove extent. *Remote Sensing, 10*(10), 1669. [DOI a confirmar]

Campos-Vega, R., Nieto-Figueroa, K. H., & Oomah, B. D. (2018). Cocoa (*Theobroma cacao* L.) pod husk: Renewable source of bioactive compounds. *Trends in Food Science & Technology, 81*, 172–184. [Autores y DOI a confirmar]

Carter, M., de Janvry, A., Sadoulet, E., & Sarris, A. (2017). Index insurance for developing country agriculture: A reassessment. *Annual Review of Resource Economics, 9*, 421–438. [DOI a confirmar]

Chantarat, S., Mude, A. G., Barrett, C. B., & Carter, M. R. (2013). Designing index-based livestock insurance for managing asset risk in northern Kenya. *Journal of Risk and Insurance, 80*(1), 205–237. [DOI a confirmar]

Chavez, E., He, Z. L., Stoffella, P. J., Mylavarapu, R. S., Li, Y. C., Moyano, B., & Baligar, V. C. (2015). Concentration of cadmium in cacao beans and its relationship with soil cadmium in southern Ecuador. *Science of the Total Environment, 533*, 205–214. [DOI y lista de autores a confirmar]

Chertow, M. R. (2000). Industrial symbiosis: Literature and taxonomy. *Annual Review of Energy and the Environment, 25*, 313–337. [DOI a confirmar]

Clarke, D. J. (2016). A theory of rational demand for index insurance. *American Economic Journal: Microeconomics, 8*(1), 283–306. [DOI a confirmar]

Cochran, W. G. (1977). *Sampling techniques* (3.ª ed.). John Wiley & Sons.

Cohen, J. (1960). A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational and Psychological Measurement, 20*(1), 37–46. https://doi.org/10.1177/001316446002000104

Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2.ª ed.). Lawrence Erlbaum Associates.

Comisión Europea. (2014). *Reglamento (UE) n.º 488/2014 de la Comisión, de 12 de mayo de 2014, que modifica el Reglamento (CE) n.º 1881/2006 por lo que respecta al contenido máximo de cadmio en los productos alimenticios*. Diario Oficial de la Unión Europea, L 138.

Comisión Europea. (2020a). *Reglamento de Ejecución (UE) 2020/18 de la Comisión, de 10 de enero de 2020, relativo a la no renovación de la aprobación de la sustancia activa clorpirifós*. Diario Oficial de la Unión Europea. [Datos de publicación a confirmar]

Comisión Europea. (2020b). *Reglamento (UE) 2020/1085 de la Comisión, por el que se modifican los anexos II y V del Reglamento (CE) 396/2005 en lo que respecta a los límites máximos de residuos de clorpirifós y clorpirifós-*

metilo. Diario Oficial de la Unión Europea. [Fecha y datos de publicación a confirmar]

Comisión Europea. (2023). *Reglamento (UE) 2023/915 de la Comisión, de 25 de abril de 2023, relativo a los límites máximos de determinados contaminantes en los alimentos*. Diario Oficial de la Unión Europea, L 119.

Consejo de la Judicatura del Ecuador. (s. f.). *Reglamento del sistema pericial integral de la Función Judicial*. [Versión vigente y datos de publicación a confirmar]

Cooper, R. G. (1990). Stage-gate systems: A new tool for managing new products. *Business Horizons, 33*(3), 44–54. [DOI a confirmar]

Copa-Cogeca et al. (2018). *EU code of conduct on agricultural data sharing by contractual agreement*. Copa-Cogeca. [Lista de organizaciones firmantes a confirmar]

Cressey, D. R. (1953). *Other people's money: A study in the social psychology of embezzlement*. Free Press.

Daubert v. Merrell Dow Pharmaceuticals, Inc., 509 U.S. 579 (1993).

Davenport, T. H., & Patil, D. J. (2012). Data scientist: The sexiest job of the 21st century. *Harvard Business Review, 90*(10), 70–76.

DerSimonian, R., & Laird, N. (1986). Meta-analysis in clinical trials. *Controlled Clinical Trials, 7*(3), 177–188. [DOI a confirmar]

Doorenbos, J., & Kassam, A. H. (1979). *Yield response to water* (FAO Irrigation and Drainage Paper 33). FAO.

Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., Hoersch, B., Isola, C., Laberinti, P., Martimort, P., Meygret, A., Spoto, F., Sy, O., Marchese, F., & Bargellini, P. (2012). Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote Sensing of Environment, 120*, 25–36. [DOI a confirmar]

Dwork, C. (2006). Differential privacy. En M. Bugliesi, B. Preneel, V. Sassone e I. Wegener (Eds.), *Automata, languages and programming. ICALP 2006* (Lecture Notes in Computer Science, vol. 4052, pp. 1–12). Springer. [DOI a confirmar]

Ehrenfeld, J., & Gertler, N. (1997). Industrial ecology in practice: The evolution of interdependence at Kalundborg. *Journal of Industrial Ecology, 1*(1), 67–79. [DOI a confirmar]

Ellen MacArthur Foundation. (2013). *Towards the circular economy* (Vol. 1). Ellen MacArthur Foundation.

Ellert, B. H., & Bettany, J. R. (1995). Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. *Canadian Journal of Soil Science, 75*(4), 529–538. [DOI a confirmar]

Elliott, C. (2014). *Elliott review into the integrity and assurance of food supply networks: Final report*. HM Government.

El Oriente. (s. f.). *El precio del cacao se ubica en $ 10.204 por tonelada*. https://www.eloriente.com/articulo/el-precio-del-cacao-se-ubica-en-10204-por-tonelada/49178

Equal Employment Opportunity Commission, Civil Service Commission, Department of Labor, & Department of Justice. (1978). *Uniform guidelines on employee selection procedures* (29 CFR Part 1607).

Ericsson, K. A., & Simon, H. A. (1993). *Protocol analysis: Verbal reports as data* (ed. rev.). MIT Press.

European Network of Forensic Science Institutes. (2015). *ENFSI guideline for evaluative reporting in forensic science*. ENFSI.

FAO & OMS. (s. f.). *Codex Alimentarius: Base de datos de residuos de plaguicidas en los alimentos y piensos*. [URL a confirmar]

Federal Bureau of Investigation. (2021). *Ransomware attacks on food and agriculture sector entities* [Private Industry Notification]. [Número y fecha a confirmar]

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2019). *El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2019: Progresos en la lucha contra la pérdida y el desperdicio de alimentos*. FAO.

Food Safety Authority of Ireland. (2013, 15 de enero). *FSAI survey finds horse DNA in some beef burger products* [Comunicado de prensa]. [URL a confirmar]

Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., & Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations: A new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data, 2*, 150066. https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66

Gebru, T., Morgenstern, J., Vecchione, B., Vaughan, J. W., Wallach, H., Daumé III, H., & Crawford, K. (2021). Datasheets for datasets. *Communications of the ACM, 64*(12), 86–92. https://doi.org/10.1145/3458723

Global Food Safety Initiative. (2020). *GFSI benchmarking requirements* (versión 2020). The Consumer Goods Forum. [Versión vigente a confirmar]

Global Witness. (2020). *Beef, banks and the Brazilian Amazon*. Global Witness.

Gneiting, T., & Raftery, A. E. (2007). Strictly proper scoring rules, prediction, and estimation. *Journal of the American Statistical Association, 102*(477), 359–378. [DOI a confirmar]

Greenfield, P. (2023, 18 de enero). Revealed: More than 90% of rainforest carbon offsets by biggest certifier are worthless, analysis shows. *The Guardian*. [URL a confirmar]

Green, P. E., & Srinivasan, V. (1978). Conjoint analysis in consumer research: Issues and outlook. *Journal of Consumer Research, 5*(2), 103–123. [DOI a confirmar]

GS1. (2022). *EPCIS and CBV 2.0 standard*. GS1 AISBL.

Hakimi, S. L. (1964). Optimum locations of switching centers and the absolute centers and medians of a graph. *Operations Research, 12*(3), 450–459. [DOI a confirmar]

Halasa, T., Huijps, K., Østerås, O., & Hogeveen, H. (2007). Economic effects of bovine mastitis and mastitis management: A review. *Veterinary Quarterly, 29*(1), 18–31. [DOI a confirmar]

Hansen, M. C., Potapov, P. V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S. A., Tyukavina, A., Thau, D., Stehman, S. V., Goetz, S. J., Loveland, T. R., Kommareddy, A., Egorov, A., Chini, L., Justice, C. O., & Townshend, J. R.

G. (2013). High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *Science, 342*(6160), 850–853. https://doi.org/10.1126/science.1244693

Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., & Mekonnen, M. M. (2011). *The water footprint assessment manual: Setting the global standard*. Earthscan.

Howard, R. A. (1966). Information value theory. *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics, 2*(1), 22–26. [DOI a confirmar]

Hull, J. C. (2021). *Options, futures, and other derivatives* (11.ª ed.). Pearson.

Hyndman, R. J., & Athanasopoulos, G. (2021). *Forecasting: Principles and practice* (3.ª ed.). OTexts.

IFRS Foundation. (2023). *IFRS S1 General requirements for disclosure of sustainability-related financial information* e *IFRS S2 Climate-related disclosures*. International Sustainability Standards Board.

Institute of Internal Auditors. (2020). *The IIA's three lines model: An update of the three lines of defense*. The Institute of Internal Auditors.

Instituto Colombiano Agropecuario. (2019). [Resolución de declaratoria de emergencia fitosanitaria por *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* raza 4 tropical]. [Número y fecha a confirmar]

Instituto Ecuatoriano de Normalización. (s. f.). *NTE INEN 176. Cacao en grano. Requisitos* [Edición vigente a confirmar].

Integrity Council for the Voluntary Carbon Market. (2023). *Core carbon principles, assessment framework and assessment procedure*. ICVCM.

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2006). *2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories*. IGES.

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2019). *2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories*. IPCC.

International Auditing and Assurance Standards Board. (2024). *International Standard on Sustainability Assurance 5000: General requirements for sustainability assurance engagements*. IFAC. [Datos de publicación a confirmar]

International Electrotechnical Commission. (s. f.). *IEC 62443. Industrial communication networks — Network and system security* [Serie de normas]. IEC.

International Organization for Standardization. (1999). *ISO 2859-1:1999. Sampling procedures for inspection by attributes. Part 1: Sampling schemes indexed by acceptance quality limit (AQL) for lot-by-lot inspection*. ISO.

International Organization for Standardization. (2015). *ISO 9001:2015. Sistemas de gestión de la calidad. Requisitos*. ISO.

International Organization for Standardization & International Electrotechnical Commission. (2023). *ISO/IEC 42001:2023. Information technology — Artificial intelligence — Management system*. ISO.

Jamieson, L. F., & Bass, F. M. (1989). Adjusting stated intention measures to predict trial purchase of new products: A comparison of models and methods. *Journal of Marketing Research, 26*(3), 336–345. [DOI a confirmar]

Ji, Z., Lee, N., Frieske, R., Yu, T., Su, D., Xu, Y., Ishii, E., Bang, Y. J., Madotto, A., & Fung, P. (2023). Survey of hallucination in natural language generation. *ACM Computing Surveys, 55*(12), artículo 248. [DOI a confirmar]

Kalman, R. E. (1960). A new approach to linear filtering and prediction problems. *Journal of Basic Engineering, 82*(1), 35–45. [DOI a confirmar]

Kano, N., Seraku, N., Takahashi, F., & Tsuji, S. (1984). Attractive quality and must-be quality. *Journal of the Japanese Society for Quality Control, 14*(2), 39–48.

Kirkpatrick, D. L. (1994). *Evaluating training programs: The four levels*. Berrett-Koehler.

Klein, G. A., Calderwood, R., & MacGregor, D. (1989). Critical decision method for eliciting knowledge. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 19*(3), 462–472. [DOI a confirmar]

Koch, R. M., Swiger, L. A., Chambers, D., & Gregory, K. E. (1963). Efficiency of feed use in beef cattle. *Journal of Animal Science, 22*(2), 486–494. [DOI a confirmar]

Kotter, J. P. (1995). Leading change: Why transformation efforts fail. *Harvard Business Review, 73*(2), 59–67.

Kraljic, P. (1983). Purchasing must become supply management. *Harvard Business Review, 61*(5), 109–117.

Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., & Sihn, W. (2018). Digital twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine, 51*(11), 1016–1022. [DOI a confirmar]

Lacoste, M., Cook, S., McNee, M., Gale, D., Ingram, J., Bellon-Maurel, V., MacMillan, T., Sylvester-Bradley, R., Kindred, D., Bramley, R., Tremblay, N., Longchamps, L., Thompson, L., Ruiz, J., García, F. O., Maxwell, B., Griffin, T., Oberthür, T., Huyghe, C., … Hall, A. (2022). On-farm experimentation to transform global agriculture. *Nature Food, 3*, 11–18. [Lista completa de autores y DOI a confirmar]

Lee, H. L., Padmanabhan, V., & Whang, S. (1997). Information distortion in a supply chain: The bullwhip effect. *Management Science, 43*(4), 546–558. [DOI a confirmar]

Lewis, P., Perez, E., Piktus, A., Petroni, F., Karpukhin, V., Goyal, N., Küttler, H., Lewis, M., Yih, W., Rocktäschel, T., Riedel, S., & Kiela, D. (2020). Retrieval-augmented generation for knowledge-intensive NLP tasks. En *Advances in Neural Information Processing Systems 33*. [Páginas a confirmar]

Loan Market Association, Asia Pacific Loan Market Association, & Loan Syndications and Trading Association. (2023). *Sustainability-linked loan principles*. [Versión vigente a confirmar]

Lobell, D. B., Thau, D., Seifert, C., Engle, E., & Little, B. (2015). A scalable satellite-based crop yield mapper. *Remote Sensing of Environment, 164*, 324–333. [DOI a confirmar]

Lowder, S. K., Skoet, J., & Raney, T. (2016). The number, size, and distribution of farms, smallholder farms, and family farms worldwide. *World Development, 87*, 16–29. [DOI a confirmar]

MacDonald, R. B., & Hall, F. G. (1980). Global crop forecasting. *Science, 208*(4445), 670–679. [DOI a confirmar]

McMahan, B., Moore, E., Ramage, D., Hampson, S., & Agüera y Arcas, B. (2017). Communication-efficient learning of deep networks from decentralized data. En *Proceedings of the 20th International Conference on Artificial Intelligence and Statistics* (PMLR, vol. 54, pp. 1273–1282). [Páginas a confirmar]

Mitchell, M., Wu, S., Zaldivar, A., Barnes, P., Vasserman, L., Hutchinson, B., Spitzer, E., Raji, I. D., & Gebru, T. (2019). Model cards for model reporting. En *Proceedings of the Conference on Fairness, Accountability, and Transparency* (pp. 220–229). ACM. https://doi.org/10.1145/3287560.3287596

Moore, J. C., Spink, J., & Lipp, M. (2012). Development and application of a database of food ingredient fraud and economically motivated adulteration from 1980 to 2010. *Journal of Food Science, 77*(4), R118–R126. [DOI a confirmar]

Moran, P. A. P. (1950). Notes on continuous stochastic phenomena. *Biometrika, 37*(1/2), 17–23. [DOI a confirmar]

Naciones Unidas. (2015). *Acuerdo de París*. Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.

National Institute of Standards and Technology. (2023). *Artificial intelligence risk management framework (AI RMF 1.0)* (NIST AI 100-1). https://doi.org/10.6028/NIST.AI.100-1

National Institute of Standards and Technology. (2024). *The NIST cybersecurity framework (CSF) 2.0* (NIST CSWP 29). [DOI a confirmar]

Nonaka, I., & Takeuchi, H. (1995). *The knowledge-creating company: How Japanese companies create the dynamics of innovation*. Oxford University Press.

Openshaw, S. (1984). *The modifiable areal unit problem* (Concepts and Techniques in Modern Geography, n.º 38). Geo Books.

Page, E. S. (1954). Continuous inspection schemes. *Biometrika, 41*(1/2), 100–115. [DOI a confirmar]

Parasuraman, R., & Manzey, D. H. (2010). Complacency and bias in human use of automation: An attentional integration. *Human Factors, 52*(3), 381–410. https://doi.org/10.1177/0018720810376055

Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea. (2000). *Reglamento (CE) n.º 1760/2000, de 17 de julio de 2000, que establece un sistema de identificación y registro de los animales de la especie bovina y relativo al etiquetado de la carne de vacuno y de los productos a base de carne de vacuno*. Diario Oficial de las Comunidades Europeas, L 204.

Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea. (2005). *Reglamento (CE) n.º 396/2005, de 23 de febrero de 2005, relativo a los límites máximos de residuos de plaguicidas en alimentos y piensos de origen vegetal y animal*. Diario Oficial de la Unión Europea, L 70.

Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea. (2019). *Reglamento (UE) 2019/1009, de 5 de junio de 2019, por el que se establecen disposiciones relativas a la puesta a disposición en el mercado de los productos fertilizantes UE*. Diario Oficial de la Unión Europea, L 170.

Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea. (2022). *Directiva (UE) 2022/2464, de 14 de diciembre de 2022, por lo que respecta a la presentación de información sobre sostenibilidad por parte de las empresas*. Diario Oficial de la Unión Europea, L 322.

Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea. (2023). *Reglamento (UE) 2023/1115, de 31 de mayo de 2023, relativo a la comercialización en el mercado de la Unión y a la exportación desde la Unión de determinadas materias primas y productos derivados asociados a la deforestación y la degradación forestal*. Diario Oficial de la Unión Europea, L 150.

Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea. (2023). *Reglamento (UE) 2023/2854, de 13 de diciembre de 2023, sobre normas armonizadas para un acceso justo a los datos y su utilización (Reglamento de Datos)*. Diario Oficial de la Unión Europea.

Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea. (2024). *Directiva (UE) 2024/825, de 28 de febrero de 2024, por la que se modifican las Directivas 2005/29/CE y 2011/83/UE en lo que respecta al empoderamiento de los consumidores para la transición ecológica*. Diario Oficial de la Unión Europea.

Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea. (2024). *Reglamento (UE) 2024/1689, de 13 de junio de 2024, por el que se establecen normas armonizadas en materia de inteligencia artificial*. Diario Oficial de la Unión Europea.

Partnership for Carbon Accounting Financials. (2022). *The global GHG accounting and reporting standard. Part A: Financed emissions* (2.ª ed.). PCAF.

Paulk, M. C., Curtis, B., Chrissis, M. B., & Weber, C. V. (1993). Capability maturity model, version 1.1. *IEEE Software, 10*(4), 18–27. [DOI a confirmar]

Peryam, D. R., & Pilgrim, F. J. (1957). Hedonic scale method of measuring food preferences. *Food Technology, 11*, 9–14.

Polanyi, M. (1966). *The tacit dimension*. Doubleday.

Primicias. (2025, 23 de mayo). *Los precios posicionan al cacao como segundo producto no petrolero de exportación de Ecuador hasta marzo de 2025*. https://www.primicias.ec/economia/precios-cacao-exportaciones-ecuador-camaron-96901/

Pylianidis, C., Osinga, S., & Athanasiadis, I. N. (2021). Introducing digital twins to agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture, 184*, 105942. [DOI a confirmar]

Quiñonero-Candela, J., Sugiyama, M., Schwaighofer, A., & Lawrence, N. D. (Eds.). (2009). *Dataset shift in machine learning*. MIT Press.

Ratkowsky, D. A., Olley, J., McMeekin, T. A., & Ball, A. (1982). Relationship between temperature and growth rate of bacterial cultures. *Journal of Bacteriology, 149*(1), 1–5. [DOI a confirmar]

Rawlings, J. B., Mayne, D. Q., & Diehl, M. M. (2017). *Model predictive control: Theory, computation, and design* (2.ª ed.). Nob Hill Publishing.

Robinson, W. S. (1950). Ecological correlations and the behavior of individuals. *American Sociological Review, 15*(3), 351–357. [DOI a confirmar]

Rogers, E. M. (2003). *Diffusion of innovations* (5.ª ed.). Free Press.

Saaty, T. L. (1980). *The analytic hierarchy process*. McGraw-Hill.

Science Based Targets initiative. (2022). *Forest, land and agriculture science based target-setting guidance*. SBTi.

Silver, E. A., Pyke, D. F., & Thomas, D. J. (2017). *Inventory and production management in supply chains* (4.ª ed.). CRC Press.

Spink, J., & Moyer, D. C. (2011). Defining the public health threat of food fraud. *Journal of Food Science, 76*(9), R157–R163. [DOI a confirmar]

Stärk, K. D. C., Regula, G., Hernandez, J., Knopf, L., Fuchs, K., Morris, R. S., & Davies, P. (2006). Concepts for risk-based surveillance in the field of veterinary medicine and veterinary public health: Review of current approaches. *BMC Health Services Research, 6*, 20. [DOI a confirmar]

Stewart, J. J., Allison, P. N., & Johnson, R. S. (2001). Putting a price on biotechnology. *Nature Biotechnology, 19*(9), 813–817. [DOI a confirmar]

Suri, T., & Jack, W. (2016). The long-run poverty and gender impacts of mobile money. *Science, 354*(6317), 1288–1292. [DOI a confirmar]

Taoukis, P. S., & Labuza, T. P. (1989). Applicability of time-temperature indicators as shelf life monitors of food products. *Journal of Food Science, 54*(4), 783–788. [DOI a confirmar]

Tobler, W. R. (1970). A computer movie simulating urban growth in the Detroit region. *Economic Geography, 46*(sup1), 234–240. [DOI a confirmar]

Uber Technologies. (2018). *H3: A hexagonal hierarchical geospatial indexing system* [Software de código abierto]. [URL a confirmar]

U.S. Army. (1993). *A leader's guide to after-action reviews* (Training Circular 25-20). Department of the Army.

U.S. Department of Justice & Federal Trade Commission. (2023). *Merger guidelines*. U.S. Department of Justice y Federal Trade Commission.

U.S. Food and Drug Administration. (2022). Requirements for additional traceability records for certain foods (21 CFR Part 1, Subpart S). *Federal Register, 87*(225).

U.S. Food and Drug Administration. (s. f.). *Import refusal report*. [URL a confirmar]

Verdouw, C., Tekinerdogan, B., Beulens, A., & Wolfert, S. (2021). Digital twins in smart farming. *Agricultural Systems, 189*, 103046. [DOI a confirmar]

Wenger, E. (1998). *Communities of practice: Learning, meaning, and identity*. Cambridge University Press.

Wood, P. D. P. (1967). Algebraic model of the lactation curve in cattle. *Nature, 216*, 164–165. [DOI a confirmar]

World Health Organization. (2009). *Toxicological and health aspects of melamine and cyanuric acid: Report of a WHO expert meeting in collaboration with FAO*. World Health Organization.

World Resources Institute & World Business Council for Sustainable Development. (2004). *The greenhouse gas protocol: A corporate accounting and reporting standard* (ed. rev.). WRI y WBCSD.

World Resources Institute & World Business Council for Sustainable Development. (2011). *Corporate value chain (Scope 3) accounting and reporting standard*. WRI y WBCSD.

Zumba, L. (2026, 27 de marzo). Barry, Nestlé, Hershey's y Cargill, en el top 10 de compradores de cacao ecuatoriano. *Expreso*. https://www.expreso.ec/actualidad/economia/barry-callebaut-nestle-hershey-s-y-cargill-lideran-ranking-de-compradores-de-cacao-279666.html

Anexo A. Mapa de herramientas por capítulo

Cap.	Tema	Herramientas principales
1	Bio-datos	Definición del bio-dato, matriz de composición de mezclas, modelo jerárquico de contaminantes, optimización de mezclas con restricción probabilística, calibración NIR
2	Crédito, seguro y activos	Pérdida esperada (PD × LGD × EAD), expediente de riesgo biológico, seguro paramétrico, riesgo de base, tres capas de la tokenización
3	Gobernanza de modelos	Brecha de error por subgrupo, índice de estabilidad poblacional, kappa de Cohen, razón de impacto, predicción con abstención, tres líneas de gobierno
4	Fraude alimentario	Incentivo de precio, índice de plausibilidad productiva, huella analítica no dirigida, muestreo bayesiano basado en riesgo
5	Compliance de destino	Base de requisitos por mercado, periodo de espera por mercado, muestreo previo al embarque, asignación de lotes a mercados
6	Agricultura forense	Protocolo de 72 horas, patrones espaciales de daño, índice de Moran, cronología con NDVI, química retrospectiva, razón de verosimilitud, diferencias en diferencias
7	Soberanía y seguridad	Pérdida anual esperada, objetivos de recuperación, firma de datos en el origen, contratos de datos, aprendizaje federado, privacidad diferencial

Cap.	Tema	Herramientas principales
8	Datos ESG	Jerarquía de calidad del dato, propagación de incertidumbre, verificación satelital del uso del suelo, cobertura de trazabilidad hasta el origen
9	Carbono agrícola	Fórmula de créditos, línea base con controles, stock de carbono del suelo, acreditación conservadora, crédito frente a *insetting*
10	Inteligencia territorial	Grilla hexagonal común, evaluación multicriterio, p-mediana, vigilancia basada en riesgo, escenarios
11	Pequeño productor	Costo fijo de cumplimiento, gestión asociativa, control interno, muestreo de verificación con confianza conocida, indicadores de inclusión
12	Agua	Evapotranspiración del cultivo, balance hídrico del suelo, respuesta del rendimiento al agua, valor marginal del agua
13	Compras	Costo efectivo por unidad útil, índice de Herfindahl-Hirschman, Cpk por proveedor, matriz de Kraljic, cobertura escalonada, vendedor de periódicos
14	Pronóstico de cosecha	Conteo fenológico con muestreo estratificado, actualización por precisión, evaluación de pronósticos, compromiso por cuantil
15	Cadena de frío	Arrhenius, modelo de raíz cuadrada, vida útil restante, despacho por vida útil, exceso de consumo por tramo
16	Subproductos	Agua a retirar, balance de masa, radio económico de recolección, valor neto por ruta, inclusión máxima
17	Ganadería	Curva de lactancia, alerta por suma acumulada, consumo residual de alimento, margen individual, red de movimientos

Cap.	Tema	Herramientas principales
18	Evidencia de insumos	Experimentación en finca, metaanálisis de efectos aleatorios, intervalo de predicción, probabilidad de rentabilidad, metarregresión
19	Gemelos digitales	Modelo mecanístico, asimilación de datos, probabilidad de riesgo, regla de decisión económica, valor de la información
20	Innovación de producto	Puertas de decisión, escala hedónica, análisis de penalidades, análisis conjunto, intención de compra calibrada, modelo de Kano
21	Due diligence y VC	Jerarquía de evidencia, potencia estadística, economía del productor, valor presente ajustado por riesgo, sala de datos
22	Hoja de ruta	Modelo de madurez, mapa de dependencias, índice de prioridad, regla de tres iniciativas, hoja de ruta por campañas
23	Talento	Perfiles híbridos, brecha de competencias, rol de traductor, comunidades de práctica, retorno de la formación
24	Caso integrado	Aplicación secuencial de las herramientas en tres campañas, registro de fracasos, informe de madurez y valor
25	Conocimiento	Índice de riesgo del conocimiento, captura del saber tácito, decisiones del experto como datos, base de conocimiento gobernada, revisión después de la acción

Anexo B. Datos y referencias

La siguiente tabla reúne los datos, fechas, cifras y fuentes de texto y referencias.

Cap.	Tipo	Referencia
5	Fuente	Fuente oficial del sistema de alerta rápida para alimentos y piensos de la Unión Europea (RASFF Window).
6	Fuente	Fuente judicial o periodística sobre el caso Bader Farms contra Monsanto y BASF, Tribunal de Distrito de los Estados Unidos para el Distrito Este de Misuri.
7	Fuente	Fuente primaria sobre el ataque de ransomware a JBS en 2021 y el pago informado por la empresa, nota de la FBI de 2021.
9	Fuente	Respuesta pública de Verra a la investigación de 2023, Reglas de deducción por incertidumbre del estándar de certificación aplicable al proyecto (por ejemplo, metodologías de Verra para manejo de tierras agrícolas), reglas específicas del estándar, aplicación al mercado voluntario y a Ecuador
10	Fuente	Fuente oficial sobre la confirmación de Foc R4T en Perú, 2021, resolución y fecha confirmada
11	Fuente	Referencia sobre certificación orgánica grupal y sistemas de control interno para pequeños productores (por ejemplo, documentos de IFOAM – Organics International). Fuente oficial sobre el registro nacional de productores de cacao y café para el cumplimiento del reglamento europeo sobre deforestación (Ministerio de Agricultura y Ganadería y Agrocalidad), referencia sobre certificación grupal, sistemas de control interno, estado y alcance del registro

Cap.	Tipo	Referencia
12	Fuente	Fuente oficial sobre la crisis hídrica de Ciudad del Cabo de 2017-2018 y su efecto sobre las asignaciones agrícolas. FAO. Portal WaPOR de productividad del agua mediante teledetección: cobertura geográfica y URL.
12	Fuente	Normativa ecuatoriana vigente sobre autorizaciones de uso y aprovechamiento del agua para riego y sobre juntas de regantes detalles y cifras de cobertura para Ecuador.
14	Fuente	Fuente histórica sobre las compras soviéticas de granos de 1972 y su efecto en los precios internacionales. Fuente técnica sobre la duración del desarrollo de la mazorca de cacao desde la polinización hasta la madurez, por material genético en fuentes históricas y detalles de duración por material genético y zona.
15	Fuente	Referencia sobre la regla de despacho "primero en vencer, primero en salir" basada en vida útil restante en cadenas de frío. Marco normativo de etiquetado de alimentos procesados aplicable en Ecuador y en los mercados de destino, en lo relativo a fechas de vencimiento.
16	Fuente	Fuente sobre la proporción de la cáscara en el peso de la mazorca de cacao. Fuentes sobre los límites de inclusión de cáscara de mazorca de cacao en dietas de rumiantes y sus componentes limitantes.

Cap.	Tipo	Referencia
17	Fuente	Fuente oficial sobre el brote de fiebre aftosa de 2001 en el Reino Unido, con cifras de animales sacrificados y costos. Fuente sobre el sistema nacional de identificación y trazabilidad animal en Ecuador (Agrocalidad). Fuente sobre el umbral de recuento de células somáticas de referencia para mastitis subclínica y sobre las tablas de pago de leche por calidad vigentes en Ecuador.
18	Fuente	Normas técnicas del Comité Europeo de Normalización para la demostración de declaraciones de bioestimulantes de las plantas aplicabilidad según la normativa.
19	Fuente	Fuente histórica de la NASA sobre el uso de simuladores en la recuperación de la misión Apolo 13.
20	Fuente	Fuentes primarias sobre el cambio de fórmula de Coca-Cola en 1985 y su reintroducción. Valores de referencia de los coeficientes de calibración de la intención de compra.
21	Fuente	Fuente primaria sobre la salida a bolsa de AppHarvest (2021) y su proceso de reorganización por quiebra (2023), por ejemplo documentos presentados ante la Securities and Exchange Commission o ante el tribunal de quiebras.
22	Fuente	Fuente sobre la prueba de trazabilidad de mangos realizada en 2016-2017 por una cadena minorista estadounidense y una empresa de tecnología, con el tiempo de rastreo informado antes y después.

Cap.	Tipo	Referencia
23	Fuente	Referencias sobre el rol de traductor de analítica en las organizaciones. Información sobre la oferta académica en Ecuador que integra formación agroalimentaria y competencias en datos.
24	Fuente	Fuentes primarias sobre el lanzamiento del Programa AAA de Nespresso con Rainforest Alliance en 2003.
25	Fuente	Fuente histórica sobre la crisis cacaotera ecuatoriana de las décadas de 1910 y 1920 por escoba de bruja y moniliasis, datos históricos

Marcos Daniel Araujo Criollo
Marcos Daniel Araujo Criollo es Ingeniero Agropecuario por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE y Magíster en Gerencia de la Calidad e Innovación por la Universidad Internacional del Ecuador. Es docente investigador de la Carrera de Agroindustria de la Universidad Agraria del Ecuador.
Durante ocho años trabajó en la Agencia de Regulación y Control Fito y Zoosanitario (Agrocalidad) como técnico de registro de insumos agropecuarios e inspector fito y zoosanitario, con más de doscientas evaluaciones y auditorías, incluida la evaluación de protocolos de eficacia de plaguicidas, productos biológicos y enmiendas. Ha administrado una unidad de producción lechera y una finca de cacao, y es fundador de una empresa de alimentos.
Es auditor interno ISO 9001:2015, con formación en buenas prácticas de manufactura, HACCP y buenas prácticas agrícolas, y Formador de Formadores.

Ahmed El Salous
Ahmed El Salous es investigador y docente universitario con formación académica internacional, habiendo realizado sus estudios en países como Egipto, España y México, entre otros. A lo largo de su trayectoria profesional ha desempeñado destacados cargos académicos y de gestión, entre los que se incluyen Coordinador Académico, Director del Instituto de Investigación, Director de la Escuela de Posgrado y Decano de Facultad. Ha impartido cátedra tanto dentro como fuera del Ecuador y participa activamente como docente en programas de posgrado. Asimismo, ha dirigido y tutorizado un elevado número de investigaciones en los niveles de pregrado, maestría y doctorado, contribuyendo de manera significativa a la formación de nuevos profesionales e investigadores. Su producción académica incluye numerosas publicaciones científicas, entre ellas artículos en revistas de alto impacto, libros y capítulos de libros. Además, ha participado como ponente y asistente en diversos eventos científicos nacionales e internacionales, consolidando su experiencia, prestigio y reconocimiento en el ámbito académico y científico

ISBN: 978-9942-53-219-0



Compás
capacitación e investigación