

Reporte 2 · Tendencias en

AgTech y sistemas agroalimentarios sostenibles

02

N.º 2 de 2 / Julio de 2026



SENCI
SECRETARÍA NACIONAL DE
CIENCIA Y VALORIZACIÓN DEL
CONOCIMIENTO

ELABORADO POR

Oficina de Gestión de la Innovación
Parque Científico Tecnológico de Pando (PCTP)

ENCARGADO POR

Secretaría Nacional de Ciencia y
Valorización del Conocimiento (SENCI)



Reportes de Tendencias SENCI

N. 2 de 2 · Julio de 2026

Tendencias analizadas

- T4** Intensificación sostenible de sistemas ganaderos y lecheros
- T5** Agricultura digital, ciencia de datos e inteligencia artificial
- T6** Bioeconomía, agroalimentos y valorización de biomasa

Encargado por

Secretaría Nacional de Ciencia y Valorización del
Conocimiento (SENCI)

Presidencia de la República Oriental del Uruguay

Elaborado por

Oficina de Gestión de la Innovación

Parque Científico Tecnológico de Pando (PCTP)

Índice

1. Resumen ejecutivo	5
Propósito	6
Síntesis y hallazgos por tendencias	6
Síntesis por tendencia	7
Elementos de atención	8
2. Introducción y alcance	9
2.1 Contexto	10
2.2 Alcance temático de este reporte	10
2.3 Criterios de delimitación por tendencia	10
2.4 Delimitación entre tendencias	11
3. Marco metodológico	12
3.1 Enfoque de vigilancia estratégica integrada	13
3.2 Parámetros del reporte	13
3.3 Fuentes utilizadas	14
3.4 Alcance y limitaciones	14
4.1 Intensificación sostenible de sistemas ganaderos y lecheros (Tendencia 4)	15
4.1.1 Definición y delimitación	16
4.1.2 Estado de madurez tecnológica	17
4.1.3 Drivers de cambio y señales tempranas	19
4.1.4 Casos y desarrollos internacionales relevantes	20
4.1.5 Panorama de propiedad intelectual y mapa de actores	24
4.1.6 Panorama normativo y de estándares	26
4.1.7 Oportunidades y barreras	28
4.1.8 Implicancias para Uruguay	31
Capacidades existentes	31
Brechas identificadas	32
Ventanas de oportunidad	32
Riesgos	33
Elementos de atención	33
4.2 Agricultura digital, ciencia de datos e inteligencia artificial (Tendencia 5)	34
4.2.1 Definición y delimitación	35
4.2.2 Estado de madurez tecnológica	36
4.2.3 Drivers de cambio y señales tempranas	39
4.2.4 Casos y desarrollos internacionales relevantes	39
4.2.5 Panorama de propiedad intelectual y mapa de actores	42
4.2.6 Panorama normativo y de estándares	45
4.2.7 Oportunidades y barreras	46
4.2.8 Implicancias para Uruguay	47
Capacidades existentes	47
Brechas identificadas	48
Ventanas de oportunidad	49
Riesgos	50
Elementos de atención	50

4.3 Bioeconomía, agroalimentos y valorización de biomasa (Tendencia 6)**51**

4.3.1 Definición y delimitación	52
4.3.2 Estado de madurez tecnológica	53
4.3.3 Drivers de cambio y señales tempranas	54
4.3.4 Casos y desarrollos internacionales relevantes	55
4.3.5 Panorama de propiedad intelectual y mapa de actores	58
4.3.6 Panorama normativo y de estándares	59
4.3.7 Oportunidades y barreras	61
4.3.8 Implicancias para Uruguay	63
Capacidades existentes	63
Brechas identificadas y ventanas de oportunidad	64
Riesgos	66
Elementos de atención	66

5. Síntesis nacional integrada**67**

5.1 Infraestructura pública con fortalezas, traducción a escala incompleta	68
5.2 Capacidades habilitadoras transversales	69
5.3 Activos nacionales verificados	69
5.4 Brechas comunes	70
5.5 Áreas de convergencia entre tendencias	71
5.6 Posicionamiento internacional	73

6. Conclusiones y elementos de atención**74**

6.1 Conclusiones	75
6.2 Elementos de atención	75

7. Fuentes**79**

Referencias tendencia 4 (Intensificación sostenible de sistemas ganaderos y lecheros)	80
Fuentes de la tabla 4.1.2	85
Referencias tendencia 5 (Agricultura digital, ciencia de datos e inteligencia artificial)	87
Fuentes de la tabla 4.2.2	91
Referencias tendencia 6 (Bioeconomía, agroalimentos y valorización de biomasa)	91
Fuentes de la tabla 4.3.2	93

Anexos**95****A.1 Glosario de acrónimos y términos técnicos****96**

A.1.1 Organismos, instituciones y programas	96
Uruguay	96
Regionales e internacionales	98
A.1.2 Marcos normativos y estándares	99
A.1.3 Términos técnicos	100
A.2 Nota metodológica de las búsquedas de propiedad intelectual	101
A.2.1 Naturaleza y alcance	101
A.2.2 Fecha de corte	101
A.2.3 Asimetría entre las tres tendencias	102
A.2.4 Corpus del relevamiento de T4	102
A.2.5 Corpus del relevamiento de T6	103
A.2.6 Material suplementario disponible a solicitud	103
A.3 Mapa de actores nacionales consolidado	104
A.4 Marco normativo uruguayo aplicable al conjunto del dominio	107

1.

Resumen ejecutivo

Reporte 2 · AgTech y sistemas agroalimentarios sostenibles**Propósito**

Este es el segundo de dos reportes de tendencias que la Secretaría Nacional de Ciencia y Valorización del Conocimiento (SENCI) encargó al Parque Científico Tecnológico de Pando (PCTP), y fue elaborado por su Oficina de Gestión de la Innovación. Caracteriza tres líneas tecnológicas, identificadas junto con la SENCI, del dominio AgTech y sistemas agroalimentarios sostenibles: intensificación sostenible de sistemas ganaderos y lecheros (§4.1), agricultura digital, ciencia de datos e inteligencia artificial (§4.2), y bioeconomía, agroalimentos y valorización de biomasa (§4.3). El propósito es aportar un insumo técnico a los procesos de discusión, planificación y gestión de ciencia, tecnología e innovación coordinados por la SENCI.

Síntesis y hallazgos por tendencias

Las tres tendencias del reporte describen un patrón compartido, desarrollado en detalle en §5.1: Uruguay cuenta con una base de infraestructura y capacidades públicas que lo diferencia regionalmente —el SNIG, el campo natural sin deforestación, una matriz eléctrica mayoritariamente renovable y un nodo de investigación aplicada de alta centralidad (INIA), con mecanismos institucionalizados de validación en terreno—, pero arrastra una brecha persistente en traducir esa base a escala comercial o de sistema. No es una brecha de tecnología —las tecnologías relevantes existen y en varios casos ya están presentes en el país—, sino de integración, validación contextual y marco habilitante (desglose por tendencia en la tabla siguiente, desarrollo completo en §5.1 y §5.4).

El tema con la ventana temporal más inmediata es la combinación SNIG + campo natural sin deforestación + trazabilidad individual, teniendo en cuenta los plazos del Reglamento de Deforestación de la UE (EUDR; Reglamento UE 2023/1115, modificado por el Reglamento UE 2025/2650): sus obligaciones regirán desde el 30 de diciembre de 2026 para operadores medianos y grandes, y desde el 30 de junio de 2027 para personas físicas y micro y pequeñas empresas. La ventaja ya no es de exclusividad regulatoria —Argentina y Brasil también avanzan en identificación electrónica (§4.2.6)—, sino de profundidad operativa: dos décadas de serie histórica continua sobre una base territorial sin deforestación (desarrollo completo en §5.1 y §5.3).

Síntesis por tendencia

Tendencia	Estado global	Activos Uruguay	Brechas destacadas	Horizonte clave
T4 · Ganadería y lechería sostenibles	Selección genómica de bajo metano y resistencia al calor en expansión; Ganadería de Precisión (PLF) en consolidación; protocolos de carbono en suelos a niveles de madurez tecnológica (TRL) 5-6 globalmente	SNIG (serie continua desde 2006, la más profunda de la región), campo natural ~10 M ha sin deforestación, evaluaciones genómicas nacionales (SNP desde 2024), carne carbono-neutral certificada (LSQA), Converge/Desafío: trazabilidad animal.	Capa geoespacial de predios para EUDR; integración SNIG + genómica + bienestar (SNIG+); laboratorio para producción in vitro de embriones (IVP) certificado ausente; protocolos de monitoreo, reporte y verificación (MRV) de carbono en suelos para pastoreo extensivo	Inmediato: EUDR dic 2026. Primario: SNIG+, mercado de carbono. Señal: ganado termotolerante genómico
T5 · Agricultura digital e IA	Drones y teledetección satelital en adopción acelerada; plataformas de gestión de información de fincas (FMIS) consolidadas; IA aplicada al agro con modelos de lenguaje de gran tamaño (LLM) emergentes; gemelos digitales en demostración	Auravant (FMIS, +700.000 ha), integración INIA-EfiCarne-OptiFert-CuantAgua, Converge (living lab institucionalizado), Uruguay XXI/Mesa AgriTech, SNIG como plataforma base	Marco de datos agropecuarios e IA ausente; validación local de modelos IA entrenados en otros contextos; brecha de investigación académica sistematizada; dependencia de plataformas privadas sin marco de portabilidad	Inmediato: EUDR (trazabilidad de cadena). Primario: estándar interoperabilidad, ley de IA. Señal: gemelos digitales de sistemas pastoriles
T6 · Bioeconomía, agroalimentos y valorización de biomasa	Biorrefinerías de cuarta generación en escala piloto-demo; bioplásticos en adopción industrial; proteínas alternativas en crecimiento; biocombustibles avanzados (Combustible de aviación sostenible, SAF) en TRL 7-8 en algunos contextos	Matriz eléctrica 98 % renovable, capacidades distribuidas en UdelAR (BIOPROA, Procesos Forestales)/UTEC, Biovalor como precedente de demostración, Innovagro/FPTA, compromisos CDN3	Evidencia local antes de escalar: tecnologías globalmente maduras no validadas para corrientes de biomasa y condiciones logísticas uruguayas; ausencia de marco integrador de bioeconomía con financiamiento sostenido; Análisis de ciclo de vida (ACV) necesario para sostener afirmaciones de sostenibilidad	Primario: piloto bioenergía/biogás, plásticos biodegradables. Señal: SAF, electrocombustibles, economía del carbono de efluentes

Elementos de atención

1. **La ventana EUDR es concreta y está fechada.** Sin la capa geoespacial formal de predios ganaderos integrada con el SNIG, el cumplimiento del Reglamento de Deforestación de la UE dependerá del esfuerzo individual de cada exportador. La construcción de esa capa —que involucraría al MGAP, al SNAP y al sistema catastral— se destaca, entre estas áreas, por su ventana de tiempo acotada y su efecto transversal.
2. **La arquitectura SNIG+ se destaca por su alcance transversal y su menor dependencia externa.** Ampliar el SNIG con integración de datos genómicos, de bienestar y de manejo pastoril habilita las tres tendencias a la vez y depende poco de tecnología propietaria extranjera; en cambio, integraría datos hoy distribuidos entre productores, laboratorios, INIA y plataformas privadas, con preguntas de gobernanza —titularidad, consentimiento y ciberseguridad— cuya resolución involucraría competencias de AGESIC y MGAP (detalle en §6.2, elemento 2).
3. **Converge y «Desafío» son experiencias en funcionamiento, pero de momento no tienen el alcance de una política articulada de CTI.** Ambas reciben postulaciones internacionales y operan como plaza de validación regional para tecnologías en etapa de escalado. Ese rol de living lab no alcanza hoy a las otras dos tendencias del reporte: la ganadería y lechería sostenibles (T4) y los agroalimentos y valorización de biomasa (T6).
4. **La ausencia de una norma vinculante de IA y de datos agropecuarios limita la escalabilidad de largo plazo.** La adopción tecnológica avanza sin un estándar de interoperabilidad entre plataformas ni reglas de portabilidad de datos agropecuarios, creando dependencias difíciles de gestionar ex post.
5. **La economía del carbono agropecuario tiene activos, pero carece de protocolos validados.** El campo natural y la tercera contribución determinada a nivel nacional (CDN3) son la base; sin protocolos MRV de carbono en suelos para sistemas pastoriles extensivos, la certificación sigue siendo argumento de posicionamiento más que activo verificable.
6. **La dependencia tecnológica es un potencial riesgo sistémico a monitorear.** Conectividad LEO, maquinaria conectada y plataformas FMIS extranjeras son adopciones razonables, pero su acumulación en el tiempo puede generar dependencias difíciles de revertir. Acuerdos de portabilidad de datos y diversificación de proveedores son estrategias posibles para minimizar esos riesgos.
7. **La sostenibilidad verificable es la propuesta de valor más potente y más frágil.** La narrativa «campo natural + SNIG + trazabilidad + carbono certificado» requiere que todos los eslabones (geoespacial, MRV, SNIG+, acceso universal a la certificación) estén completos simultáneamente. Si alguno de esos eslabones queda incompleto, la propuesta pierde respaldo verificable.

2.

Introducción y alcance

2.1 Contexto

SENCI solicitó al PCTP dos reportes de tendencias, cada uno centrado en una temática estratégica para el país: el Reporte 1 desarrolla Biotecnología y salud humana y animal como entregable independiente; este documento es el Reporte 2 — AgTech y sistemas agroalimentarios sostenibles. El propósito común de ambos es identificar y caracterizar tendencias tecnológicas globales y señales emergentes, y leerlas en clave del sector productivo y de las capacidades nacionales, para convertirlas en insumos técnicos que aporten a procesos de discusión, planificación y gestión de ciencia, tecnología e innovación (CTI).

2.2 Alcance temático de este reporte

Estas tres líneas fueron seleccionadas por SENCi como foco del Reporte 2. Cada una se desarrolla en profundidad en la sección 4:

1. **Intensificación sostenible de sistemas ganaderos y lecheros** (§4.1) — tecnologías de selección genómica, nutrición de precisión, biotecnologías reproductivas, sistemas pastoriles y silvopastoriles y bienestar animal, con anclaje en la ganadería y la lechería bovina.
2. **Agricultura digital, ciencia de datos e inteligencia artificial** (§4.2) — captura de datos agropecuarios mediante sensores, drones y satélites; plataformas de gestión e interoperabilidad; modelos analíticos y de IA aplicados al agro; plataformas digitales de trazabilidad y conectividad rural; y gemelos digitales y simulación de sistemas.
3. **Bioeconomía, agroalimentos y valorización de biomasa** (§4.3) — biorrefinerías y valorización integral de biomasa, bioplásticos y biomateriales, proteínas alternativas y agroalimentos funcionales, bioenergía y biocombustibles avanzados, y química verde y bioquímicos de plataforma.

2.3 Criterios de delimitación por tendencia

Cada tendencia delimita un dominio amplio en torno a ciertos criterios que se explicitan a continuación:

- **Tendencia 4: Intensificación sostenible de sistemas ganaderos y lecheros** — sub-líneas por sistema de producción. La tendencia se aborda desde el ángulo del sistema productivo y su sostenibilidad —selección genómica, nutrición de precisión, biotecnologías reproductivas, sistemas pastoriles y silvopastoriles, y bienestar animal y trazabilidad productiva—, no desde la salud animal (vacunas y diagnóstico veterinario, que corresponde a la Tendencia 1 del Reporte 1).¹
- **Tendencia 5: Agricultura digital, ciencia de datos e inteligencia artificial** — sub-líneas por capa funcional. La tendencia se estructura en cinco capas que van desde la captura de datos hasta la simulación de sistemas: agricultura de precisión y sensoramiento remoto;

¹ Edición génica animal como adyacencia delimitada. La edición génica animal (CRISPR polled, PRLR-SLICK) se incluye únicamente como adyacencia de baja madurez (señal de frontera dentro de genómica y reproducción, TRL 3–5), no como sub-línea.

ciencia de datos agropecuarios e interoperabilidad; inteligencia artificial y aprendizaje automático; plataformas digitales, trazabilidad y conectividad rural; y gemelos digitales.²

- **Tendencia 6: Bioeconomía, agroalimentos y valorización de biomasa** — cinco sub-líneas por cadena tecnológica: biorrefinerías y valorización integral; bioplásticos y biomateriales; proteínas alternativas y agroalimentos funcionales; bioenergía y biocombustibles avanzados; química verde y bioquímicos de plataforma.³

2.4 Delimitación entre tendencias

Las tres tendencias del reporte provienen del mismo dominio de los sistemas agroalimentarios; por eso algunas tecnologías aparecen en más de una. Para evitar duplicación se demarcan por ángulo:

- **La trazabilidad digital** es la zona de mayor solapamiento entre T4 (§4.1, Sub-línea 5: bienestar animal y trazabilidad productiva mediante PLF y SNIG) y T5 (§4.2, Sub-línea 4: plataformas de trazabilidad con soporte tecnológico). El criterio de demarcación es el objeto traceable: T4 trata la trazabilidad del animal individual (monitoreo fisiológico, historial sanitario, SNIG); T5, la trazabilidad de la cadena productiva y el producto (EUDR, certificación de origen, blockchain, plataformas de mercado).
- **La IA agropecuaria** aparece tanto en T4 (predicción con modelos genómicos y sensores PLF) como en T5 (visión computacional, modelos de rendimiento, LLM de extensión). El criterio de demarcación es la escala operativa: en T4, la IA se trata como herramienta incorporada a las tecnologías del sistema productivo ganadero; en T5, la IA y la ciencia de datos se caracterizan como tendencia autónoma con su propia estructura de sub-líneas, actores y PI.
- **La valorización de biomasa ganadera y su huella ambiental** aparece en T4 (carbono, ACV de sistemas pastoriles, metano entérico como emisión a medir) y en T6 (digestión anaerobia de efluentes ganaderos, química verde desde corrientes de la industria cárnica y láctea). El criterio es el foco del tratamiento: T4 aborda la producción —la reducción de emisiones en el sistema vivo, el carbono en suelos, el bienestar del animal—; T6 aborda la valorización de los residuos y efluentes generados por ese sistema (biogás, recuperación de nutrientes, biorrefinerías).

La lectura conjunta de las tres tendencias se realiza en la síntesis nacional integrada (§5).

² Conectividad LEO como habilitador transversal. La conectividad satelital de órbita baja (LEO —Low Earth Orbit—, p. ej. Starlink) se trata como habilitador transversal a todas las sub-líneas de Tendencia 5, con desarrollo principal en la Sub-línea 4 (plataformas y conectividad rural).

³ Economía circular y sostenibilidad con tratamiento transversal. El subámbito se aborda de forma transversal (ACV/ISO 14040-44, EPD/ISO 14025, marcos de política de bioeconomía, valorización de digestato) a lo largo de las cinco sub-líneas, no como sub-línea independiente, para evitar duplicación.

3.

Marco metodológico

3.1 Enfoque de vigilancia estratégica integrada

El reporte se elabora bajo un enfoque de vigilancia estratégica integrada, alineado con la norma UNE 166006 (sistema de gestión de la vigilancia tecnológica e inteligencia competitiva), que combina tres miradas complementarias:

- **Vigilancia tecnológica:** publicaciones científicas, patentes y desarrollos emergentes.
- **Vigilancia del entorno:** marcos regulatorios, estándares y políticas públicas internacionales.
- **Vigilancia comercial y competitiva** (cuando aplica): actores y dinámicas sectoriales.

El propósito no es inventariar un dominio de forma exhaustiva, sino identificar y caracterizar tendencias tecnológicas globales y señales emergentes, y leerlas en clave del sector productivo y las capacidades nacionales, para transformarlas en insumos técnicos de decisión en materia de CTI.

Equipo de trabajo. La ejecución general del trabajo estuvo a cargo de la coordinadora de Vigilancia e Inteligencia Competitiva del PCTP, Dra. Maitia Labora. En el desarrollo participaron también los especialistas Dra. Eileen Armstrong, Qco. Ismael Noguerol y Dr. Nicolás Goycochea, con dedicación a las áreas T4, T5 y T5 respectivamente. Por parte de la Oficina de Gestión de la Innovación del PCTP, colaboraron Msc. Martina Soumastre y Msc. Laura Vera.

3.2 Parámetros del reporte

Parámetro	Definición
Horizonte temporal primario	3–7 años (mediano plazo)
Horizontes secundarios	Corto (<3 años) y largo (>7 años), etiquetados
Alcance geográfico	Global y regional (foco LATAM cuando aplica), con lente Uruguay

Estructura común de la caracterización de tendencias (§4). Las tres tendencias se desarrollan con paralelismo formal, en ocho subsecciones: definición y delimitación (4.X.1), madurez tecnológica (4.X.2), drivers y señales tempranas (4.X.3), casos internacionales (4.X.4), panorama de PI y mapa de actores (4.X.5), panorama normativo (4.X.6), oportunidades y barreras (4.X.7) e implicancias para Uruguay (4.X.8). Para garantizar uniformidad se aplicaron convenciones comunes: la madurez tecnológica (TRL) se expresa como estimación analítica con una nota metodológica común; los horizontes usan las tres bandas «ya en adopción (<3 años) / primario (3–7 años) / señal débil (>7 años)»; las tablas de casos siguen las columnas Caso · Actor · Geografía · Hito · Relevancia · Observaciones; y los cierres se redactan como «elementos de atención», no como recomendaciones.

Hallazgos y lecturas estratégicas. El reporte distingue dos tipos de afirmación. Los hallazgos son constataciones del relevamiento, respaldadas por las fuentes citadas (por ejemplo, la existencia de una capacidad, un instrumento o un producto aprobado). Las lecturas estratégicas son interpretaciones construidas a partir de esos hallazgos (por ejemplo, una posible vía de inserción internacional o una ventana de oportunidad). Estas últimas se formulan como hipótesis para la discusión, se identifican en el texto como tales y no surgen de una evaluación comparativa formal de alternativas.

Criterio de madurez y horizontes. El nivel de madurez tecnológica (TRL, escala 1–9) es una estimación analítica construida a partir de la literatura revisada a la fecha de corte; no es un dato citable ni una medición formal. Su criterio de asignación se detalla en la nota metodológica de TRL de §4.1.2, común a las tres tendencias. El horizonte de adopción se expresa en tres bandas comunes («ya en adopción», menos de 3 años; «3 a 7 años», horizonte primario del reporte; «señal débil», más de 7 años). Las estimaciones fueron homologadas a esas bandas considerando el rango de TRL y la evidencia de adopción descrita en cada tendencia, en particular la existencia de productos aprobados o comercializados. El horizonte, por lo tanto, no se deriva del TRL de forma automática: una sub-línea con TRL alto puede ubicarse en el horizonte de 3 a 7 años si una parte relevante de ella aún está en validación o escalado, y una con un rango de TRL amplio puede considerarse ya en adopción si existe uso comercial documentado. Cuando una sub-línea agrupa tecnologías de horizontes distintos, se consigna una sola banda por juicio analítico. Las bandas son un juicio analítico y no una proyección cuantitativa.

3.3 Fuentes utilizadas

Fuentes. Bases científicas (Scopus, PubMed, Dimensions), bases de patentes (Minesoft Origin, Espacenet/EPO, USPTO, WIPO PatentScope, Lens.org), organismos multilaterales y agencias regulatorias (FAO, OIE/WOAH, EMA, FDA, EFSA, USDA, OECD, según el tema), documentos de política pública y fuentes sectoriales especializadas. Para el aterrizaje nacional se sumaron fuentes oficiales uruguayas (MGAP, INIA, MIEM, AGESIC, ANII, LSQA, Uruguay XXI e instituciones académicas) y comunicación institucional verificada.

3.4 Alcance y limitaciones

- El análisis de propiedad intelectual es principalmente cualitativo y exploratorio: ofrece una lectura descriptiva del corpus de patentes relevadas (jurisdicciones, tipos de actor, dinámica y titulares de referencia), sin constituir un paisaje de patentes cuantitativo exhaustivo, un mapa de titulares sistemático ni estudios de libertad de operación.
- El reporte aborda el clima principalmente en clave de mitigación (metano entérico, carbono en suelos, compromisos de la CDN3, análisis de ciclo de vida). La adaptación —riesgo climático, gestión del agua y riego, estrés térmico a escala de sistema— no se desarrolla como dimensión propia.
- Las tres tendencias reciben un desarrollo formal equivalente en la sección 4, pero su aterrizaje nacional no es simétrico: la lectura de capacidades y elementos de atención (§5 y §6) converge sobre el complejo cárnico bovino, por ser donde se concentran los activos habilitantes que atraviesan las tres tendencias (SNIG, campo natural, EUDR, certificación de carbono). Asimismo, la cadena láctea, el complejo agrícola de secano, la adaptación climática y la gestión del agua, y la conectividad rural reciben un tratamiento comparativamente menor en la lectura de capacidades nacionales.
- El principio de que lo biobasado no acredita por sí mismo sostenibilidad (Tendencia 6) aplica transversalmente al reporte: toda afirmación sobre impacto ambiental se apoya en evidencia de ACV o se califica explícitamente como preliminar.

4.1

Intensificación sostenible de sistemas ganaderos y lecheros (Tendencia 4)

4.1.1 Definición y delimitación

La tendencia comprende cinco sub-líneas tecnológicas orientadas a incrementar la productividad y la eficiencia de los sistemas ganaderos y lecheros minimizando su impacto ambiental y mejorando el bienestar animal.

Selección genómica (SG). Metodología de mejoramiento animal en la que las decisiones de selección se basan en valores de cría estimados a partir de marcadores moleculares SNP distribuidos a lo largo del genoma (GEBV — Genomic Estimated Breeding Values; Meuwissen, Hayes & Goddard, 2001). Se inscribe en la «genómica de precisión» junto con la nutrigenómica y la farmacogenómica; su campo de operación es la selección animal a escala poblacional.

Nutrición de precisión (NP). Conjunto de estrategias y tecnologías para ajustar la oferta de nutrientes —energía, proteína, minerales, aditivos— con la mayor precisión posible, con el fin de mejorar la eficiencia productiva y reducir la huella de carbono (Beauchemin et al., 2020). Incluye aditivos antimetanogénicos (p. ej. 3-NOP/Bovaer®, Asparagopsis), formulación dinámica de dietas, espectroscopía NIR (Near-Infrared Spectroscopy) y nutrigenómica (interacción dieta-microbioma ruminal-expresión génica del hospedador; Badhan et al., 2025; Waters et al., 2025).⁴

Biotechnologías reproductivas (BR). Biotechnologías que amplían la diseminación de material genético de alto valor: inseminación artificial a tiempo fijo (IATF), transferencia de embriones (TE/MOET), producción in vitro de embriones (IVP/OPU), semen sexado, diagnóstico genómico preimplantacional (PGS) y, en el horizonte próximo, edición génica reproductiva.⁵

Sistemas pastoriles y silvopastoriles (SSP). Sistemas de producción con base forrajera predominantemente de pasturas naturales o cultivadas, con o sin componente arbóreo (Montagnini et al., 2013). Su intensificación sostenible comprende intensificación ecológica de pasturas, pastoreo rotativo, inclusión de leguminosas y multiespecie, silvopastoreo y valoración de servicios ecosistémicos (secuestro de carbono, biodiversidad, regulación hídrica; Dini et al., 2012; Sprenkle-Hyppolite et al., 2024; Amorim et al., 2023). El ACV (Análisis de Ciclo de Vida — Life Cycle Assessment) es la metodología estandarizada para cuantificar el impacto ambiental del sistema (metano entérico, óxido nitroso de suelos, CO₂ de insumos y maquinaria, y los sumideros de carbono en suelos y biomasa).⁶

Bienestar animal y trazabilidad productiva (BT). Paradigma PLF (Precision Livestock Farming) que aplica sensores, conectividad, analítica de datos e inteligencia artificial al monitoreo continuo de animales individuales: indicadores fisiológicos y comportamentales, condición corporal, detección de celo y de parto, estado de pezuñas y ubre, y detección

⁴ No debe confundirse con la suplementación energético-proteica estacional convencional (opera a nivel de rodeo y sin retroalimentación de datos en tiempo real) ni con los aditivos productivos de uso histórico (ionóforos, buffers, levaduras)

⁵ Son tecnologías habilitadoras que aceleran la diseminación de genotipos seleccionados (Seidel, 2014), sin reemplazar el proceso de selección. Su máximo potencial se realiza en combinación con la SG, en la denominada «triada de máxima ganancia genética»: OPU-IVP + semen sexado + genómica preimplantacional.

⁶ No debe confundirse con la «ganadería regenerativa», término sin definición técnica precisa y de evidencias de impacto muy variables.

precoz de cojeras y mastitis (Tuytens et al., 2022). Incluye los sistemas de trazabilidad individual: SNIG (Uruguay, obligatorio para el 100 % del rodeo bovino), NLIS (Australia) y SISBOV (Brasil, en transición hacia el PNIB).⁷

4.1.2 Estado de madurez tecnológica

La escala TRL (Technology Readiness Level, 1–9) estratifica la madurez tecnológica desde el concepto (TRL 1–2) hasta la implementación plena (TRL 9). El siguiente cuadro compara la madurez por tema y aplicación.

⁷ PLF no equivale a la agricultura de precisión en cultivos, ni a la automatización de procesos (ordeño, alimentación), ni a la identificación electrónica convencional (RFID), que registra identidad pero no estado fisiológico.

Tabla 4.1.2 — Nivel de madurez tecnológica (TRL) por sub-línea y tecnología.

HORIZONTE		ESCALA TRL · RANGO SOBRE HORIZONTE								
TECNOLOGÍA		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1. Selección genómica										
SG Holstein: producción, fertilidad, longevidad		9								
SG Angus / Hereford en sistemas de alto registro		8-9								
Índices de metano (Lactanet Canadá; Nordic Methane Index)		7-8								
Rasgos de eficiencia en pastoreo; tolerancia al calor (excepto SLICK)		5-6								
Edición génica CRISPR en rasgos productivos bovinos		3-5								
2. Nutrición de precisión										
Bovaer® (3-NOP) en sistemas confinados (+59 países)		9								
Asparagopsis (eficacia documentada; escalado limitado)		8-9								
NIR en línea; formulación dinámica de dietas TMR		7-8								
Taninos condensados; aceites esenciales; nitratos		5-6								
Nutrigenómica: personalización por microbioma ruminal		3-5								
3. Reproducción asistida										
IATF, IA convencional, TE/MOET		9								
IVP/OPU + semen sexado; IATF en carne		8-9								
PGS preimplantacional; vitrificación IVP		7-8								
Genómica preimplantacional a escala comercial		5-6								
Edición génica reproductiva; clonación somática a escala		3-5								
4. Sistemas pastoriles										
Pastoreo rotativo; pasturas mejoradas convencionales		9								
SSP tropicales; monitoreo satelital de pasturas		8-9								
Praderas multiespecie templadas; ACV <i>cradle-to-gate</i>		7-8								
MRV de carbono en suelos; silvopastoreo certificado carbono		5-6								
5. Bienestar y trazabilidad										
Wearables lechería (collar/arete); SNIG / NLIS		9								
Bolos intraruminales; BCS por cámara		8-9								
Cercado virtual (Halter) + satélite		7-8								
PLF extensivo integrado; detección de estrés por termografía		5-6								
Análisis de vocalización; bienestar positivo cuantificado		3-5								

TRL: nivel de madurez tecnológica (1 = investigación inicial; 9 = adopción consolidada).

TRL: nivel de madurez tecnológica (1 = investigación inicial; 9 = adopción consolidada).

Nota metodológica TRL (se aplica de forma idéntica en §4.2 y §4.3; el criterio de horizontes se explica en §3.2). Los niveles de madurez tecnológica (TRL, del inglés Technology Readiness Level, escala 1–9, marco NASA/EU H2020) son una estimación analítica. Se establecieron a partir de publicaciones del área y reflejan la madurez a la fecha de corte (julio 2026). Se expresan como rangos cuando la sub-línea comprende tecnologías con distintos grados de desarrollo, y corresponden al estado predominante a escala global, no a productos individuales ni a contextos particulares. Las fuentes se listan en §7, «Fuentes de la tabla 4.1.2».

Lectura transversal. La lechería estabulada o semi-intensiva concentra los TRL más altos en todos los temas: mayor retorno sobre la inversión tecnológica y datos de referencia más abundantes. El mayor rezago se observa en las aplicaciones para sistemas extensivos de pastoreo: en todos los temas, las versiones adaptadas a campo libre alcanzan un nivel de madurez tecnológica de 2 a 4 escalones más abajo que sus equivalentes en confinado. Las tecnologías de última generación (edición génica, nutrigenómica por microbioma), la ganadería de precisión para sistemas extensivos y el MRV de carbono en suelos comparten un TRL 3–5, lo que sitúa allí el próximo ciclo de innovación para los sistemas pastoriles en el horizonte 2026–2033.

4.1.3 Drivers de cambio y señales tempranas

Drivers transversales. Tres drivers (regulatorios, climáticos y de mercado) operan simultáneamente sobre las cinco sub-líneas:

- **Regulatorio. Reglamento de la UE contra la Deforestación (EUDR, 2023/1115)** —de aplicación postergada (Reglamento UE 2025/2650); rige para grandes operadores a partir del 30 de diciembre de 2026 y para micro y pequeñas empresas a partir del 30 de junio de 2027—: exige que los productos ganaderos importados a la UE demuestren ausencia de deforestación posterior al 31/12/2020 y geolocalización del predio de origen. Impacta sistemas pastoriles, trazabilidad geoespacial y sostenibilidad verificable de la cadena. Para Uruguay es a la vez exigencia y ventana de diferenciación competitiva.
- **Climático. Global Methane Pledge (COP26, 2021, firmado por Uruguay):** reducción del 30 % de las emisiones de metano respecto de 2020 para 2030. Incide en las evaluaciones genómicas de índices de metano, los aditivos antimetanogénicos, el manejo de pasturas y los análisis de ACV y CFP (MGAP, 2023; Global Methane Hub, 2023; Climate & Clean Air Coalition, 2024).
- **Económico/ mercado. Presión de los mercados de destino de alto valor (UE, Japón, Golfo Pérsico):** exigencias de sostenibilidad verificable en los protocolos de importación, que crean demanda simultánea de credenciales de bajo metano, bienestar certificado y trazabilidad hasta el predio de origen, afectando las cinco sub-líneas de forma convergente.

Señales tempranas por tema (etiquetadas según las tres bandas de horizonte establecidas)

- **Selección genómica:** la caída del costo de genotipado de SNP (de ~USD 200 en 2010 a ~USD 20–50 por animal) facilita el acceso. La Global Methane Genetics Initiative (USD 27,4 M, Bezos Earth Fund / Global Methane Hub, abril 2025) financia la incorporación de rasgos de bajo metano en evaluaciones genómicas en cuatro continentes. (Primario, 3–7 años.)
- **Nutrición de precisión:** la aprobación de Bovaer® (3-NOP) por la FDA (mayo 2024) abre el mercado estadounidense; la publicación de las guías técnicas de Pathways to Dairy Net Zero para aditivos antimetanogénicos (Durmic et al., 2025) marca el paso de la investigación a la estandarización, con protocolos MRV que son la base de los mercados de carbono ganaderos. (Ya en adopción en confinamiento; primario en pastoreo.)
- **Biotechnologías reproductivas:** en 2024, EE. UU. lideró la producción mundial de IVP y el IVP representó el 87,3 % de los embriones bovinos globales (IETS, 2024), señal de la consolidación de la producción in vitro como estándar. (Ya en adopción.)
- **Sistemas pastoriles y silvopastoriles:** los sistemas silvopastoriles emergen como opción de intensificación sostenible; el EUDR tracciona soluciones de trazabilidad, con aportes de INAC para el cumplimiento (INAC, 2024). (Primario, 3–7 años.)
- **Bienestar animal y trazabilidad productiva:** los sistemas de monitoreo remoto para ganadería extensiva (SenseHub Cow Calf de MSD; Cow.Pro) abren la ganadería de precisión (PLF) a sistemas sin confinamiento; el cercado virtual satelital de Halter (abril 2026) elimina la necesidad de infraestructura terrestre en el predio (usa Starlink direct-to-device), y el proyecto NLIS Digital (Australia) fija un estándar de trazabilidad bovina digital. (Ya en adopción / primario.)

4.1.4 Casos y desarrollos internacionales relevantes

La siguiente tabla sintetiza casos internacionales representativos de las cinco sub-líneas.

Tabla 4.1.4. Casos internacionales seleccionados.

Caso	Actor	Geografía	Hito	Relevancia para UY y la tendencia	Observaciones
Índices genómicos de eficiencia de metano	Lactanet; VikingGenetics	Canadá; Dinamarca/Finlandia/Suecia	Primera evaluación genómica rutinaria de eficiencia de metano en Holstein (Lactanet, 2023; Rojas de Oliveira et al., 2024); índice de metano para VikingHolstein (2025), extensión a otras razas en 2026	Consolida el metano como nuevo eje de selección (ClimateXChange, 2023). INIA colecta genotipos SNP desde 2024, incorporable a la selección genómica nacional. TRL 7-8, caso primario.	Basado en espectroscopía de leche; transferencia a razas de carne y a sistemas pastoriles aún por validar
Global Methane Genetics Initiative	Bezos Earth Fund / Global Methane Hub (50+ instituciones)	25 países (4 continentes)	Iniciativa de USD 27,4 M (abr-2025) para estandarizar el metano como rasgo de selección; meta -30 % entérico en 20 años	Ventana de asociación internacional. Candidato natural con genotipos ya colectados. TRL 5-6, caso primario.	Iniciativa reciente; resultados de largo plazo no demostrados
Bovaer® (3-NOP)	DSM-Firmenich y Elanco	EE. UU. / UE / +59 países	Primer aditivo antimetanogénico aprobado por la FDA (2024; DSM-Firmenich, 2024; Elanco, 2024); opinión positiva de EFSA (2021); ~30 % (leche) / ~45 % (carne)	Aditivo de referencia. Aplicable en tambos; administración en pastoreo extensivo no resuelta. TRL 9 (confinado), ya en adopción.	Reevaluación EFSA en curso (plazo original 30-jun-2026 extendido; dictamen esperado fin de 2026; autorización vigente); estudio independiente Univ. Aarhus (mayo 2026, 73 rebaños, ~27.650 vacas) no halló un patrón general de efectos negativos en rendimiento lechero, mortalidad, mastitis ni trastornos digestivos y metabólicos, aunque con variación relevante entre rebaños y preguntas sin responder (Farmers Weekly, 2026); respaldo de >150 estudios (mayormente del desarrollador)

4.1.4 Casos y desarrollos internacionales relevantes

Caso	Actor	Geografía	Hito	Relevancia para UY y la tendencia	Observaciones
Methane Tamer® (Asparagopsis taxiformis)	CH4 Global	Oceanía / LATAM	Aditivo de alga con reducciones de hasta 37,7 % en bovinos en pastoreo (Ahmed & Nishida, 2024; Meo-Filho et al., 2024; CH4 Global, 2024)	Primera alternativa con eficacia probada para sistemas extensivos, con aplicación directa en Uruguay. TRL 8-9 (escalado limitado), caso primario.	Bromoformo con posible efecto sobre la capa de ozono a gran escala; sin autorización UE/FDA
Plataforma integrada de reproducción y genómica	Vytelle	26 países	Plataforma OPU/FIV + sensores de comportamiento + genómica; tasas de preñez 48-53 % (Vytelle, 2024)	Modelo de integración reproducción-genómica sin laboratorio propio, lo que expone la brecha de laboratorio IVP certificado en Uruguay. TRL 8-9, ya en adopción.	Datos de desempeño de fuente corporativa
Semen sexado de alta concepción	SexCEL® (ABS Global-Genus); SexedULTRA® (STgenetics)	EE. UU. (global)	Tasas de concepción cercanas al 90 % respecto del semen convencional (ABS Global, 2024)	Componente de la «triada de máxima ganancia genética» (OPU-IVP + sexado + genómica). TRL 9, ya en adopción.	—
Edición génica reproductiva (polled / PRLR-SLICK)	Acceligen (Recombinetics)	EE. UU.	Primer precedente de aprobación simplificada de la FDA para ganado editado (PRLR-SLICK tolerante al calor, 2022; FDA, 2022; Cimadori et al., 2025)	Frontera de edición génica (adyacencia delimitada). TRL 3-5, señal débil (>7 años).	Marco regulatorio heterogéneo; en la UE, bajo Directiva OGM 2001/18/CE
Origin Green — SBLAS	Bord Bia	Irlanda (40+ mercados destino)	Certificación de sostenibilidad por ACV y contabilización de carbono a nivel de predio (Bord Bia, s.f.); -8 % CO ₂ /kg carne (2023; Bord Bia, 2023)	Referente de certificación de base pastoril, comparable al programa de carne carbono-neutral (LSQA). TRL 7-8, caso primario.	Métricas del propio esquema de certificación

4.1.4 Casos y desarrollos internacionales relevantes

Caso	Actor	Geografía	Hito	Relevancia para UY y la tendencia	Observaciones
Carbon Footprint Guideline (carne bovina)	Global Roundtable for Sustainable Beef (GRSB)	Global	Primer estándar global de huella de carbono de carne bovina cradle-to-gate (2022); meta –30 % para 2030 (GRSB, 2024)	Marco metodológico de referencia para MRV, con adopción por INAC relevante para la credibilidad de la carne carbono-neutral. TRL 7–8, caso primario.	Estándar metodológico, no operación productiva
Cercado virtual con collar solar GPS	Halter	Nueva Zelanda / Australia / EE. UU.	Collar solar GPS con cercado virtual; +2.000 predios, +1 M collares (Halter, 2024a, 2024b); cercado virtual vía satélite Starlink (abr-2026); sin infraestructura en el predio	Disrupción en el manejo extensivo (sin alambrado), con alto potencial para pastoreo rotativo. TRL 7–8, caso primario.	Validación de algoritmos en razas y sistemas de LATAM incompleta; la tecnología anterior usaba radiotorres propietarias en el predio, no redes celulares
Monitoreo remoto para cría extensiva (SenseHub Cow Calf)	MSD Animal Health (Allflex)	EE. UU. / 160 países	Monitoreo remoto para cría cow-calf (oct-2024); SenseHub monitorea +2 M animales (MSD Animal Health, 2024)	Primera extensión comercial de PLF a cría extensiva, aplicable al rodeo de cría en Uruguay. TRL 7–8, ya en adopción.	Datos de cobertura de fuente corporativa
Trazabilidad individual obligatoria (NLIS)	Gobierno de Australia (DAFF)	Australia	Inversión de AUD 22,5 M (2023; DAFF, 2023) para actualizar la base de trazabilidad individual obligatoria	Referencia mundial de trazabilidad; el SNIG es el sistema comparable, con la serie continua más profunda de la región. TRL 9, ya en adopción.	—

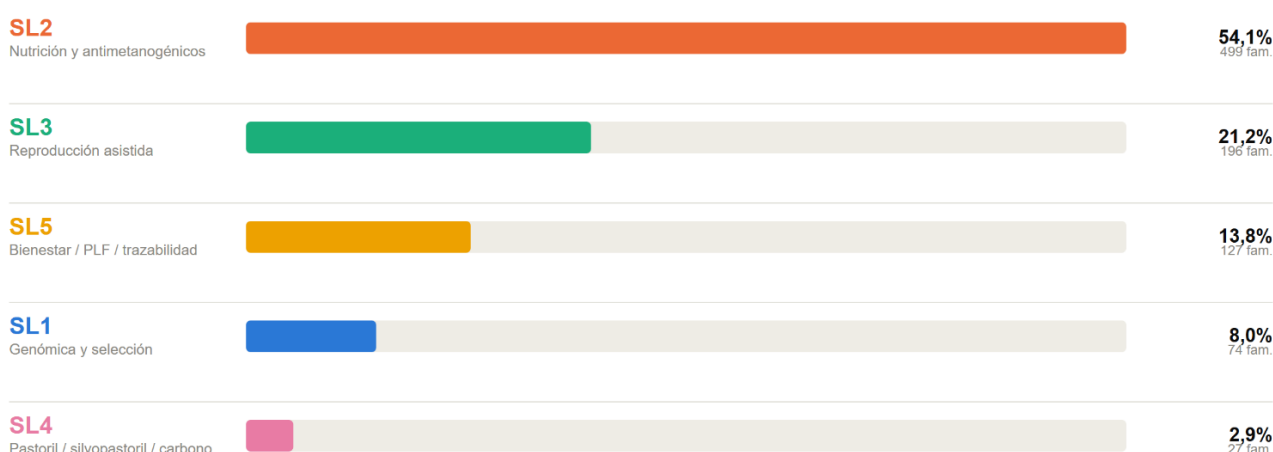
4.1.5 Panorama de propiedad intelectual y mapa de actores

Nota metodológica. Las proporciones se expresan como estructura y orden de magnitud; los conteos precisos del corpus —export bruto, corpus depurado, recuentos por titular— y el enfoque de la búsqueda se consolidan en el Anexo A.2

El panorama se construye a partir de un relevamiento propio de familias de patentes. El corpus depurado reúne del orden de ~900 familias, repartidas de forma muy despareja entre las cinco sub-líneas, con la nutrición de precisión y los aditivos antimetanológicos (SL2) como el dominio ampliamente más denso.

Tamaño del corpus por sub-línea

Familias depuradas, % sobre el corpus total (~923), de mayor a menor



Corpus depurado ≈923 familias (SL1 74 + SL2 499 + SL3 196 + SL4 27 + SL5 127) sobre un export bruto de 1.857 registros.
Fuente: relevamiento propio en Minsoft Origin, julio 2026. Elaboración propia (OGI-PCTP).

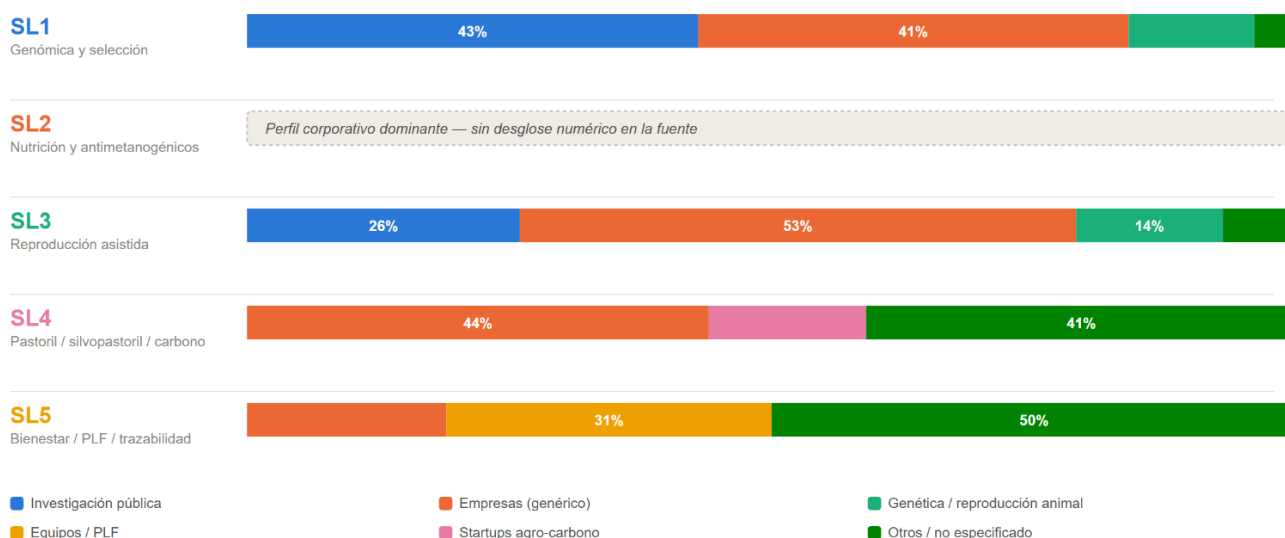
Figura 4.1.5.1. Tamaño del corpus depurado por sub-línea (% del total, ~923 familias), de mayor a menor.

Jurisdicciones más activas. Estados Unidos concentra la mayor proporción de miembros representativos —en torno a la mitad en la mayoría de las sub-líneas—, seguido de forma consistente por las solicitudes internacionales vía PCT (oficina WO) y por la vía europea (EP). Se observan especializaciones geográficas coherentes con los perfiles productivos: Australia pesa en genómica (SL1) y en la sub-línea pastoril (SL4); India aparece con fuerza en nutrición y aditivos (SL2), reflejo de una industria local activa de alimentos balanceados. Cabe una lectura prudente: la jurisdicción registrada es la oficina de publicación del miembro representativo —sesga hacia EE. UU. como destino de presentación— y no equivale al país de origen del titular; en SL1, por ejemplo, los titulares de origen chino (CAAS, China Agricultural University, Shandong, Qingdao, Northwest A&F, Jilin) tienen presencia marcada aun cuando la oficina de publicación sea US o WO.

Tipos de actor predominantes. El rasgo más informativo es que el perfil de actor cambia radicalmente entre sub-líneas:

Quién patenta: mezcla de actores por sub-línea

% de titulares por tipo, dentro de cada sub-línea. El perfil cambia radicalmente entre ellas.



En SL4 y SL5, «empresas» se descompuso a partir de los dos valores que da la fuente (total empresarial y sub-segmento); en SL1 y SL3, «otros» es el remanente hasta 100% no desglosado en el texto. SL2 no tiene desglose numérico en la fuente. Elaboración propia (OGI-PCTP) sobre Minessoft Origin, jul-2026.

Figura 4.1.5.2. Perfil de titulares clasificados por sub-línea.

SL1 (Genómica y selección): predominio de la investigación pública y académica, acompañada por un bloque empresarial heterogéneo de peso similar; las casas de genética animal stricto sensu son minoritarias. Es la sub-línea más traccionada por ciencia pública, con cola larga de titulares y sin un actor hegemónico.

SL2 (Nutrición y antimetabólicos): perfil netamente corporativo, dominado por empresas de nutrición y aditivos, con investigación pública minoritaria. Es el campo con liderazgo corporativo más nítido.

SL3 (Reproducción asistida): perfil comercial y concentrado (mayoría empresarial, con investigación pública secundaria).

SL4 (Pastoril / silvopastoril / carbono): el más atomizado (mayoría empresarial con presencia de startups de agro-carbono); corpus delgado y con solapamiento hacia agronomía vegetal y software.

SL5 (Bienestar / PLF / trazabilidad): traccionado por fabricantes de equipos (sensórica y equipamiento lechero).

Titulares de referencia

- **SL1:** Inguran/STgenetics, CAAS, ABS Global, Shandong Dairy Cattle Research Center, Agriculture Victoria.
- **SL2:** DSM-Firmenich encabeza con holgura el dominio antimetabólico, seguido de Novonesis/ N&H, Ajinomoto, CJ CheilJedang y Nutreco; en el núcleo antimetabólico específicamente aparecen además startups y centros dedicados (Ruminant Biotech, Arkeabio, Native Microbials, CSIRO/ FutureFeed).

- **SL3:** IMV Technologies lidera con claridad (equipamiento reproductivo), seguido de Inguran/ STgenetics, ABS Global, China Agricultural University, Nbryo y Vytelle.
- **SL4:** Locus y una cola de titulares con una sola familia cada uno (Vence, PGG Wrightson Seed, Lincoln University, entre otros).
- **SL5:** Lely a la cabeza, con DeLaval, Afimilk, Smartbow/Zoetis, SCR e Intervet/MSD.

Dinámica observada. Dos sub-líneas muestran un liderazgo de titular marcado —SL2 (DSM-Firmenich, consistente con su posición comercial en 3-NOP/Bovaer) y SL3 (IMV Technologies)—, mientras SL1 exhibe un patrón distribuido y de base pública y SL4 aparece fragmentado, sin actor articulador. En SL2, además, la serie temporal habilita una lectura de trayectoria creciente: las publicaciones en alcance aproximadamente se duplican hacia 2024, coincidiendo con las aprobaciones regulatorias de 3-NOP y el despliegue comercial de los primeros aditivos antimetanológicos (ya en adopción en lechería de confinamiento; validación en sistemas pastoriles aún emergente).

Se registran dos convergencias relevantes:

1. **genética reproducción** —Inguran/STgenetics y ABS Global figuran entre los primeros titulares tanto de SL1 como de SL3, señal de que la selección genómica y las biotecnologías reproductivas se protegen crecientemente como un continuo por los mismos actores—; y
2. **nutrición carbono** —titulares de agro-carbono y manejo de suelos (Locus, Loam Bio, Yara, PGG Wrightson Seed) aparecen tanto en SL2 como en SL4, lo que anticipa un espacio de patentamiento «clima-alimentación» todavía no consolidado como categoría propia—. En bienestar/trazabilidad (SL5) el patrón es de patentes mixtas hardware-software en manos de fabricantes de ordeño y sensórica.

4.1.6 Panorama normativo y de estándares

Selección genómica. El Comité Internacional de Registro Animal (ICAR) fija los estándares de recolección de datos de producción, reproducción y calidad que alimentan las evaluaciones genéticas (ICAR, 2024); Interbull e Interbeef coordinan las evaluaciones internacionales de toros lecheros y de razas de carne. En la UE, el Reglamento (UE) 2016/1012 regula la selección genómica convencional dentro del marco de reproducción animal; los organismos editados genéticamente (incluido CRISPR) caen bajo la Directiva OGM 2001/18/CE, con requisitos de evaluación de riesgo, trazabilidad y etiquetado que hacen inviable la comercialización a corto plazo, aunque una evaluación de EFSA (2025) sobre nuevas biotecnologías animales podría sentar bases para una regulación diferenciada (Cimadori et al., 2025). En EE. UU., la FDA regula los animales biotecnológicos bajo la Sección 512 de la Food, Drug, and Cosmetic Act y en 2022 emitió una determinación de bajo riesgo (low regulatory concern) para bovinos PRLR-SLICK (FDA, 2022). En LATAM persiste la heterogeneidad de los sistemas de trazabilidad, que dificulta las evaluaciones genéticas regionales conjuntas. Como tendencia emergente, las certificaciones de sostenibilidad (Bord Bia Origin Green; carne carbono-neutral en Uruguay y Paraguay) comienzan a incorporar credenciales genómicas en sus protocolos de verificación.

Nutrición de precisión y aditivos. En la UE, el Reglamento (CE) 1831/2003 exige autorización previa basada en opinión de EFSA; Bovaer® obtuvo opinión positiva en 2021 para vacas lecheras, y la Comisión solicitó una reevaluación con carácter de urgencia a partir de reportes de Dinamarca —donde la obligatoriedad de uso de Bovaer® para explotaciones convencionales de más de 50 vacas (desde enero de 2025) derivó en que ~400 de 1.600 granjas reportaran trastornos digestivos y metabólicos—, con plazo original de dictamen el 30 de junio de 2026. EFSA solicitó una extensión ante el volumen de datos recibidos (más de 70 contribuciones en consulta pública, feb–abr 2026). Un estudio independiente de la Universidad de Aarhus (mayo 2026, 73 rebaños, ~27.650 vacas), encargado por la Administración Veterinaria y Alimentaria de Dinamarca, no encontró evidencia de efectos negativos sobre rendimiento lechero, mortalidad, mastitis ni trastornos digestivos y metabólicos, aunque señaló variación relevante entre rebaños individuales y preguntas sin responder (Farmers Weekly, 2026). El dictamen definitivo de EFSA se espera para finales de 2026; la autorización UE de Bovaer® permanece vigente. Los nitratos están autorizados bajo condiciones estrictas; Asparagopsis no tiene autorización en la UE. En EE. UU., la FDA aprobó Bovaer® para vacas lecheras en lactación en mayo de 2024 (aprobación acotada a ese segmento); Asparagopsis debe transitar la vía GRAS o Food Additive Petition. En LATAM no existe marco armonizado para aditivos zootécnicos antimetanogénicos, y la falta de un protocolo MERCOSUR eleva los costos de registro. El Codex Alimentarius avanza en directrices para aditivos con función ambiental, y los estándares MRV de Pathways to Dairy Net Zero (2025) son adoptados como referencia por los esquemas de créditos de carbono (Gold Standard, Verra; World Resources Institute, 2024).

Biotechnologías reproductivas. El comercio internacional de semen y embriones se rige por los códigos sanitarios de la WOA, que fijan los requisitos de sanidad para donantes y productos de exportación (certificados de salud, ausencia de enfermedades de declaración obligatoria —IBR, BVD, brucelosis, tuberculosis— y protocolos específicos para semen sexado). La edición génica reproductiva enfrenta un mapa regulatorio heterogéneo: EE. UU. la regula como medicamento animal (vía simplificada para rasgos con equivalente natural, p. ej. PRLR-SLICK); el Reino Unido excluyó a los animales de producción de la implementación inicial de la Precision Breeding Act (nov. 2025); la UE mantiene la Directiva 2001/18/CE; y en LATAM, Argentina es pionera con un marco unificado de «producto final» (Resolución 173/2015: si no hay ADN exógeno, no se regula como OGM). El cumplimiento de las guías de ICAR es condición habilitante para el comercio internacional.

Sistemas pastoriles y estándares de carbono. El marco de referencia para el ACV es la familia ISO 14040/14044 e ISO 14067 (huella de carbono de producto); en carne bovina, el GRSB Carbon Footprint Guideline (2022) es el estándar sectorial más actualizado, compatible con la metodología FAO-LEAP y con las Directrices del IPCC. El EUDR (2023/1115) exige geolocalización de predios, datos de cobertura del suelo y declaración de diligencia debida a partir del 30 de diciembre de 2026 (grandes operadores) y junio de 2027 (micro y pequeñas empresas). El sistema irlandés Bord Bia SBLAS y el programa de Teagasc (Teagasc, s.f.) son los referentes europeos de certificación sostenible; en Nueva Zelanda, la disolución del He Waka Eke Noa (2024) es una señal de la dificultad de implementar esquemas de precio de carbono agrícola. Uruguay se articula con el marco del IPCC y la Global Research Alliance (GRA) para sus compromisos de GEI.

Bienestar y trazabilidad. La WOA establece en la Sección 7 de su Código Sanitario para los Animales Terrestres los principios de bienestar animal, con las Cinco Libertades y el marco

de los Cinco Dominios (formalizado como herramienta de evaluación en la actualización de 2024; WOA, 2024). En la UE, la Directiva 98/58/CE fija las normas mínimas de bienestar; la revisión del Reglamento de transporte (propuesta 2023; Parlamento Europeo, 2023) endurece los estándares para bovinos, aunque los procesos legislativos se han ralentizado. El EUDR exige geolocalización y diligencia debida para los productos ganaderos importados, y los protocolos WOA de comercio incluyen requisitos de identificación y rastreabilidad. Dos tendencias emergentes redefinen el campo: la soberanía de datos del productor (iniciativas como la Data Act 2023 de la UE) y la transición del bienestar negativo (Cinco Libertades) al bienestar positivo (Cinco Dominios), incorporado a los estándares WOA y a las certificaciones premium de los mercados de destino.

4.1.7 Oportunidades y barreras

Las oportunidades que aparecen como especialmente relevantes emergen de la convergencia entre tecnologías, no de cada una de forma aislada. El SNIG es la plataforma de integración que puede conectar la identificación individual con la evaluación genómica, los eventos reproductivos, los registros de manejo pastoril y las métricas de bienestar. La región converge hacia ese estándar —Argentina inició en enero de 2026 la incorporación obligatoria y Brasil despliega un cronograma 2027–2032 (§4.2.6)—, de modo que la ventaja uruguaya no está en la exclusividad sino en la profundidad de la serie y en la madurez operativa del sistema, que es lo que habilita construir sobre él. El EUDR (30 de diciembre de 2026) define la ventana de tiempo más próxima: el reglamento exige diligencia debida, legalidad de uso del suelo y geolocalización trazable de cada establecimiento, no solo ausencia de deforestación; la georreferenciación de predios ganaderos integrada al SNIG es la pieza que hoy falta para facilitar ese cumplimiento. La principal barrera transversal es la brecha entre sistemas confinados (TRL 9 en casi todas las tecnologías) y sistemas extensivos de pastoreo (2–4 niveles inferiores): con un sistema predominantemente extensivo, la adaptación de tecnologías diseñadas para confinamiento queda como una tarea que los actores privados globales no tienen incentivos para resolver.

El siguiente cuadro sintetiza los condicionantes por dimensión, con perspectiva global y foco en Uruguay (ítems separados por sub-línea).

Tabla 4.1.7. Oportunidades y barreras

Dimensión	Sub-línea	Oportunidades	Barreras
Técnico	SG	Caída del costo de genotipado; modelos de paso único (ssGBLUP; Misztal et al., 2009); IA/aprendizaje profundo para predicción multi-carácter (Džermeikaitė et al., 2025)	Poblaciones de referencia insuficientes en razas de carne; escasa fenotipación de rasgos emergentes (metano, RFI) en pastoreo (Khanal et al., 2024; Lucas et al., 2026)
	NP	3-NOP eficaz en confinado y semi-intensivo; NIR portátil abarata el análisis forrajero en campo (Maduro Dias et al., 2024)	Administración continua de 3-NOP en pastoreo extensivo no resuelta; bromoformo de Asparagopsis con posible efecto sobre la capa de ozono
	BR	IVP a campo; «triada de máxima ganancia»; vitrificación que habilita transporte global de embriones	Ausencia de laboratorio IVP certificado en Uruguay; calidad post-vitrificación aún baja
	SSP	Cercado virtual sin infraestructura; monitoreo satelital + UAV + sensores de suelo con IA; praderas multiespecie antimetanogénicas (DairyNZ, s.f.)	Incertidumbre sobre la permanencia del carbono en suelos; heterogeneidad espacial dificulta la medición (Lajtha & Silva, 2022; Jordon et al., 2024; Sanguinetti et al., 2025)
	BT	Sensores en caída de costo (>50 % en 5 años); collares solares; visión computacional; IA que reduce falsos positivos	Conectividad rural limitada; vida útil de baterías; lock-in de plataformas; validación de algoritmos incompleta en LATAM
Regulatorio	SG	Estándares ICAR/Interbull-Interbeef ya coordinan la evaluación genética internacional; Reglamento UE 2016/1012 da certidumbre a la selección convencional	Organismos editados genéticamente (CRISPR) bajo la Directiva OGM 2001/18/CE de la UE: evaluación de riesgo, trazabilidad y etiquetado constituyen una barrera relevante para la comercialización a corto plazo
	NP	EUDR como barrera de entrada para competidores sin trazabilidad; Uruguay como first mover regional	Heterogeneidad entre jurisdicciones para material genético editado y embriones
	BR	Marcos FDA/EFSA como precedente; potencial armonización Codex	Sin marco armonizado LATAM para antimetanogénicos
	SSP	EUDR premia carne sin deforestación con ACV documentado	EUDR puede excluir exportaciones sin georreferenciación; armonización LCA/MRV MERCOSUR-UE-EE. UU. incompleta

4.1.7 Oportunidades y barreras

Dimensión	Sub - línea	Oportunidades	Barreras
	BT	EUDR + revisión de bienestar de la UE valorizan trazabilidad individual y bienestar verificable	Documentación de bienestar como posible barrera no arancelaria para LATAM
Mercado	SG	Demanda de credenciales de bajo metano, bienestar y trazabilidad (UE, Japón, Golfo Pérsico)	Información asimétrica; costo de genotipación para pequeños; escasa demanda minorista que traccione la adopción
	NP	Diferenciación por genómica (carne carbono-neutral, leche verificada)	Costo-beneficio negativo sin precio de carbono suficiente; adopción limitada en extensivo
	BR	Bonos de carbono por metano verificado; mercados premium	Costos OPU-FIV elevados para medianos/pequeños; dependencia de equipamiento importado
	SSP	Demanda de genética de alto mérito; exportación de embriones certificados	Alto costo de silvopastoreo y MRV
	BT	Mercado de carne con bienestar verificado en expansión; demanda de China	sobrepeso por bienestar que no siempre compensa; menor disposición a pagar en LATAM
Capacidades	SG	Acceso a bases internacionales (Interbull/Interbeef); colaboración EMBRAPA-INIA-INTA	Déficit de bioinformáticos; infraestructura computacional insuficiente
	NP	Herramientas de formulación; bases NIR; extensión (Plan Agropecuario)	Escasa capacitación en NP pastoril; sin infraestructura de suplementación individual en extensivo
	BR	Plataformas comerciales sin laboratorio propio; oferta de IVP a campo	Escasez de laboratorios IVP certificados y de técnicos en OPU a campo; sin programa nacional de IATF
	SSP	SNIG (serie continua desde 2006) habilitante para MRV; cobertura territorial de INIA y Plan Agropecuario	Baja adopción de silvopastoreo; forestación orientada a monocultivo; sin incentivos a la conversión
	BT	INAC CertiCarnes operativo (+100 países); Fac. de Veterinaria (UdelaR) forma técnicos	Escasa adopción de PLF en cría extensiva; conectividad rural; sin indicadores de bienestar integrados al SNIG

4.1.8 Implicancias para Uruguay

Capacidades existentes

Uruguay cuenta con una combinación de activos que lo posiciona diferencialmente a nivel regional y, en algunos aspectos, global:

- **SNIG** — el Sistema Nacional de Información Ganadera aplica trazabilidad electrónica individual obligatoria al 100 % del rodeo bovino desde 2006 (más de 12 millones de animales registrados; MGAP, 2024a; IICA, 2024). Es el sistema de su tipo con mayor antigüedad y profundidad de serie histórica de la región —Argentina inició en enero de 2026 la incorporación obligatoria y Brasil la despliega entre 2027 y 2032 (§4.2.6)—, la plataforma de integración natural de las cinco sub-líneas y el activo más valioso de la cadena.
- **Campo natural** — ~10 millones de hectáreas (~55–60 % del territorio) de pastizal nativo sin deforestación posterior al 31/12/2020 (MapBiomass Uruguay, INIA/UdelaR/MA, 2023: ~9,7 M ha / 55,5 %; MA Uruguay, 2020: ~10,2 M ha / 60 %). Las estimaciones históricas más elevadas (~13 M ha, ~65 %) se basaban en fuentes anteriores a 1990; las cifras aquí utilizadas corresponden a datos satelitales y oficiales actualizados. La ausencia de deforestación reciente facilita acreditar uno de los requisitos del EUDR y es la base de los esquemas de carbono agropecuario, pero no equivale por sí sola a la certificación: el reglamento exige además diligencia debida, legalidad de uso del suelo y geolocalización trazable de cada establecimiento (§6.2).
- **Evaluaciones genómicas nacionales** — INIA coordina las evaluaciones de Aberdeen Angus, Hereford y Holando con genotipos SNP incorporados desde 2024 (INIA Uruguay, 2024a, 2024b), habilitando la selección para rasgos de producción, eficiencia y, en el horizonte próximo, sostenibilidad (bajo metano, tolerancia al calor).
- **Institucionalidad científico-técnica** — INIA, UdelaR, MGAP y Plan Agropecuario conforman un sistema de innovación articulado, con trayectoria en todos los temas del informe (FAO, 2024; INIA Uruguay, 2024d).

- **Programa de carne carbono-neutral** — certificación cradle-to-gate por LSQA que vincula el sistema de base pastoril con los mercados de sostenibilidad verificada.

El bovino uruguayo como punto de convergencia (horizonte 2028–2030). La integración de las tecnologías apunta a un escenario en el que un bovino uruguayo podría integrar: (i) genotipo conocido con GEBV para rasgos productivos, de eficiencia y de bajo metano; (ii) manejo reproductivo IATF o IVP/OPU con semen sexado y evaluado genómicamente; (iii) alimentación pastoril con suplementación de 3-NOP verificable; (iv) trazabilidad de la pastura con ACV certificado y sin deforestación; y (v) historial individual de bienestar, movimientos y eventos sanitarios en el SNIG. Esa integración constituiría una propuesta de valor sin equivalente identificado en el relevamiento realizado.

Brechas identificadas

Administración de aditivos en pastoreo: Uruguay carece de protocolos para vehicular 3-NOP en sistemas extensivos sin suplementación diaria controlada, lo que limita la reducción de metano entérico a escala de rodeo.

Infraestructura IVP: ausencia de laboratorio OPU-FIV certificado con capacidad comercial en el país (existen servicios de transferencia embrionaria tradicional, pero no un laboratorio centralizado con certificación internacional y volumen industrial). La relevancia de esta ausencia se vincula con que la producción in vitro es hoy la vía dominante de producción de embriones bovinos a nivel mundial (87,3 % en 2024; IETS, 2024) y con que su combinación con semen sexado y evaluación genómica es la que acelera la difusión de genética evaluada (§4.1.4). Sin esa capacidad local, el aprovechamiento de las evaluaciones genómicas nacionales para rasgos de sostenibilidad dependería de servicios del exterior.

Integración SNIG–genómica–bienestar: el SNIG registra trazabilidad de movimientos y eventos sanitarios/comerciales, pero no integra indicadores de bienestar fisiológico ni datos genómicos; la integración requiere una decisión de arquitectura de datos y una inversión de plataforma.

MRV de carbono en suelos: los protocolos de medición, reporte y verificación del carbono orgánico del suelo bajo pastoreo están en TRL 5–6 a nivel global; sin protocolos validados a escala predial, Uruguay no puede certificar bonos de carbono de suelos ganaderos a escala.

Ventanas de oportunidad

- **EUDR (diciembre 2026):** la georreferenciación de predios ganaderos y su integración al SNIG antes del plazo de vigencia facilitaría el cumplimiento del reglamento, que exige diligencia debida y legalidad de uso del suelo (no solo ausencia de deforestación). Uruguay reúne dos insumos de base —campo natural sin deforestación y trazabilidad individual— pero le falta la capa geoespacial formal para poder acreditarlos.
- **Global Methane Genetics Initiative:** la asociación con la iniciativa (Bezos Earth Fund / Global Methane Hub) para incorporar rasgos de bajo metano a las evaluaciones genómicas nacionales aparece como oportunidad, aprovechando los genotipos ya colectados.
- **Mercado de bonos de carbono agropecuario:** el desarrollo de protocolos MRV para la combinación «reducción de metano entérico + captura en suelos de campo natural», con base en el SNIG, situaría a Uruguay como candidato a liderar este mercado en el Cono Sur.

- **Laboratorio IVP nacional:** una articulación entre actores nacionales e internacionales para instalar al menos un laboratorio OPU-FIV certificado ICAR, integrado con la evaluación genómica, atendería la brecha de infraestructura reproductiva.
- **SNIG+:** el análisis sugiere que una arquitectura que integre SNIG, genómica, bienestar y manejo pastoril podría habilitar a la vez las tres sub-líneas, con menor dependencia de tecnología propietaria extranjera que otras opciones relevadas; su implementación abriría, en cambio, preguntas de gobernanza de datos entre productores, laboratorios, INIA y plataformas privadas (§6.2, elemento 2).

Riesgos

El riesgo principal de la tendencia es la pérdida de ventanas temporales concretas mientras persisten las brechas identificadas. Estas ventanas tienen distintos grados de acotamiento temporal, que pueden ser un insumo para la discusión de prioridades. El plazo de EUDR (diciembre de 2026) es el más próximo: ninguno de los dos insumos de base que Uruguay ya reúne puede acreditarse ante cada operador sin la capa geoespacial formal, que es el componente pendiente. La Global Methane Genetics Initiative (GMGI) atraviesa una etapa de expansión (25 países, 50+ instituciones); si la incorporación de rasgos de bajo metano a las evaluaciones genómicas nacionales no avanza en un horizonte similar, existe la posibilidad de que la asociación con la GMGI pierda parte de su oportunidad relativa. Algo parecido podría ocurrir con los protocolos de MRV de carbono en suelos: su desarrollo es una condición para poder certificar bonos de carbono ganadero a escala, y otros países de la región podrían adelantarse en ese terreno mientras no estén disponibles. Por último, la integración SNIG–genómica–bienestar (SNIG+) que el reporte propone como lectura estratégica, es la que menos depende de tecnología propietaria extranjera, aunque su implementación tendría que resolver antes preguntas de gobernanza de datos (§6.2, elemento 2); su ausencia no implica una pérdida inmediata, pero sí deja a la tendencia apoyada, por ahora, en tecnologías de proveedores internacionales (Bovaer®, Halter, Vytelle, SenseHub).

Elementos de atención

Dos frentes quedan abiertos a la fecha de corte del presente reporte. Por un lado, el dictamen de la EFSA sobre la reevaluación de Bovaer® (3-NOP) —cuyo plazo original (30 de junio de 2026) fue extendido tras recibir más de 70 contribuciones en la consulta pública, con resolución esperada para fines de 2026— eventualmente podría modificar las condiciones de uso del aditivo de referencia en la Unión Europea y, por extensión, las señales regulatorias que orientan su adopción en sistemas pastoriles. Por otro, la edición génica reproductiva (rasgos polled y PRLR-SLICK) se trató en este informe como una adyacencia delimitada —de baja madurez (TRL 3–5) y con marco regulatorio heterogéneo (en la Unión Europea, bajo la Directiva de organismos genéticamente modificados 2001/18/CE)— y no como sub-línea de la tendencia; podría justificar un análisis propio, en particular si el precedente de aprobación simplificada de la FDA (PRLR-SLICK, 2022) se extiende a otras jurisdicciones.

4.2

Agricultura digital, ciencia de datos e inteligencia artificial (Tendencia 5)

4.2.1 Definición y delimitación

La tendencia comprende el conjunto de tecnologías digitales, métodos de ciencia de datos y sistemas de inteligencia artificial (IA) aplicados a la toma de decisiones, la automatización y el monitoreo en sistemas agropecuarios, con énfasis en su impacto sobre la productividad, la eficiencia en el uso de recursos, la sostenibilidad ambiental y la trazabilidad de las cadenas productivas.

La tendencia abarca tanto las capas físicas de captura de datos —sensores, drones, satélites, maquinaria conectada— como las capas de procesamiento y análisis —plataformas de gestión, modelos analíticos, sistemas de soporte a la decisión y representaciones digitales de sistemas productivos—, y se organiza en cinco sub-líneas complementarias.

Sub-línea 1 — Agricultura de precisión y sensoramiento remoto. Incluye el conjunto de tecnologías de captura de datos a escala de parcela, lote o rodeo: sensores de suelo, ganado y ambiente (incluidos sensores portátiles de monitoreo animal —collares y tags de actividad, rumia y celo—), teledetección satelital y aérea, vehículos aéreos no tripulados (UAV/drones), sistemas de guiado con posicionamiento centimétrico (GNSS/RTK), maquinaria de aplicación variable (VRT) y plataformas de robótica agrícola.

Sub-línea 2 — Ciencia de datos agropecuarios e interoperabilidad. Refiere a la integración, estandarización y gobernanza de datos heterogéneos generados a lo largo de las cadenas productivas, incluyendo estándares de intercambio (ISO 11783/ISOBUS, AgGateway ADAPT), plataformas de gestión de información de finca (FMIS) e iniciativas de datos abiertos bajo principios FAIR (Findable, Accessible, Interoperable and Reusable).

Sub-línea 3 — Inteligencia artificial y aprendizaje automático aplicados al agro. Cubre los modelos predictivos de rendimiento, sanidad animal y vegetal, y clima; los sistemas de visión por computadora para detección de plagas y malezas; los modelos de lenguaje grande (LLM) aplicados a extensión agrícola; y los sistemas de recomendación agronómica basados en datos.

Sub-línea 4 — Plataformas digitales, trazabilidad y conectividad rural. Articula los servicios digitales orientados al productor y a la cadena: marketplaces agrícolas, sistemas de trazabilidad con soporte tecnológico (incluida la identificación electrónica individual de ganado y los marcos regulatorios que habilitan la trazabilidad vegetal, como el Reglamento UE de Deforestación), servicios de fintech rural y la infraestructura de conectividad que los hace viables —en particular las constelaciones satelitales de órbita baja (LEO) y las redes LPWAN—. ⁸

Sub-línea 5 — Gemelos digitales y simulación de sistemas agroalimentarios. Comprende los modelos digitales de fincas, parcelas y cadenas de valor, incluyendo plataformas de acoplamiento clima-cultivo como DSSAT y APSIM.

⁸ La conectividad satelital LEO (Starlink y similares), tratada en la SL4, es el habilitador transversal: su integración de fábrica en maquinaria de John Deere (JDLink Boost), CNH Industrial y Stara en 2025–2026 la convierte en condición de posibilidad para las otras cuatro sub-líneas en zonas rurales de baja cobertura. Su tratamiento centralizado en SL4 es una decisión editorial; no implica cobertura parcial de las otras sub-líneas.

4.2.2 Estado de madurez tecnológica

La agricultura digital presenta un perfil de madurez heterogéneo dentro del conjunto de sub-líneas que la componen. Esta heterogeneidad refleja la naturaleza estratificada de un dominio donde capas físicas maduras (sensores, guiado satelital) habilitan capas analíticas emergentes (IA, gemelos digitales) cuya adopción depende de una infraestructura institucional —gobernanza de datos, estándares, conectividad— que en la mayoría de los casos aún no alcanzó el mismo nivel de madurez que la tecnología que pretende soportar.

Sub-línea 1 — Agricultura de precisión y sensoramiento remoto [TRL 5–9]

Es la sub-línea con mayor amplitud de rango en la escala TRL. Los sistemas de guiado con posicionamiento centimétrico GNSS/RTK y los sensores de humedad de suelo son tecnología de mercado pleno: el guiado de precisión está incorporado como equipamiento de serie en los modelos insignia de los principales fabricantes globales, con proyecciones de que en 2026 el 40 % de las ventas de tractores incluirá estos sistemas (CHCNAV, 2025; TractorEvolution, 2025). Los drones de pulverización dirigida lideran en China —donde para 2021 se registraban más de 120.000 unidades tratando unos 71 millones de hectáreas (NATESC, citado en People's Daily Online, 2022)— y han escalado también en Estados Unidos (~6,6 millones de hectáreas en 2025; ASDC, 2025). La robótica de control de malezas alcanzó TRL 8 con casos comerciales documentados: Carbon Robotics reportó la eliminación de más de 10.000 millones de malezas en tres continentes en 24 meses de despliegue del LaserWeeder G2 (RobotToday, 2026).

En el extremo emergente, los sensores hiperspectrales portátiles y aéreos de bajo costo se encuentran en TRL 5: su miniaturización y caída de costos están documentadas en 2025, pero no hay evidencias de escalado comercial estable fuera de proyectos piloto (Ram et al., 2024; Panda et al., 2025). La teledetección satelital hiperspectral se sitúa en TRL 6: el satélite EnMAP opera desde 2022 y el proyecto HyLAP (OHB System AG, 2025) comenzó a aplicar sus datos al manejo de pasturas, pero la misión Copernicus CHIME no tiene lanzamiento previsto hasta 2029 (CEOS, s.f.).

Sub-línea 2 — Ciencia de datos agropecuarios e interoperabilidad [TRL 5–9]

Exhibe el patrón más claro de rezago institucional respecto a la madurez técnica. Las plataformas FMIS están en TRL 9: el mercado alcanzó USD 4,18 mil millones en 2024 y se proyecta a USD 10,58 mil millones en 2030 (Grand View Research, 2025). Los estándares de interoperabilidad de campo se ubican en TRL 8: AgGateway publicó el ADAPT Standard versión 1.0 en 2024, aunque un informe de Wageningen University & Research (Atik & Urdu, 2025) identificó que los subdominios de manejo de agua, comportamiento animal y analítica con IA carecen aún de estándares adecuados. La gobernanza y soberanía de datos agrícolas permanecen en TRL 5: el Data Act europeo (aplicable desde sept. 2025) y el Espacio Común Europeo de Datos Agrícolas (CEADS, activo desde abr. 2025) avanzan, pero la institucionalidad tarda en alcanzar la madurez técnica que pretende soportar.

Sub-línea 3 — Inteligencia artificial y aprendizaje automático aplicados al agro [TRL 6–8]

Perfil de madurez concentrado en TRL 6–7, zona de validación piloto activa más que de estandarización comercial. La visión computacional para detección de plagas y enfermedades es la más madura (TRL 8): modelos CNN y vision transformers alcanzan exactitudes del orden del 90 % en datasets de referencia, con aplicaciones comerciales de

bajo costo ya desplegadas (Upadhyay et al., 2025). Los sistemas de recomendación agronómica con IA se ubican en TRL 6–7; los modelos de predicción de rendimiento con ML/DL en TRL 6, con beneficios de hasta 25 % de incremento en rendimiento reportados en una revisión sistemática de 95 estudios (Ugwu et al., 2025).

Sub-línea 4 — Plataformas digitales, trazabilidad y conectividad rural [TRL 6–9]

Uruguay opera desde 2006 el Sistema Nacional de Información Ganadera (SNIG), con identificación electrónica de la totalidad del rodeo bovino, lo que coloca a los sistemas de trazabilidad regulatoria digital en TRL 9 (Larramendy et al., 2025). La conectividad LEO es el componente con el avance más disruptivo: en 2025, John Deere integró Starlink en JDLink Boost y CNH Industrial firmó acuerdo de conectividad para Case IH, New Holland y Steyr; el fabricante brasileño Stara anunció la incorporación de kits Starlink en sus vehículos autopropulsados desde el primer semestre de 2026 (Stara, 2026). La trazabilidad con blockchain permanece en TRL 6: múltiples pilotos documentados, pero los costos de implementación siguen siendo prohibitivos para pequeñas y medianas empresas.

Sub-línea 5 — Gemelos digitales y simulación de sistemas agroalimentarios [TRL 4–7]

Sub-línea con el TRL conjunto más bajo y la mayor brecha entre actividad científica y madurez de mercado. Los modelos de acoplamiento climático-agrícola (DSSAT, APSIM, WOFOST) alcanzan TRL 7 por décadas de desarrollo e integración progresiva con datos de teledetección en tiempo real (Radočaj et al., 2026). Los gemelos digitales de cultivo se ubican en TRL 5 (Morgan Pereira et al., 2026). Los gemelos de ganadería y bienestar animal se encuentran en TRL 4: el campo es descrito como «aún en su infancia» (Brown-Brandl, 2025; Abdelrahman, 2026).

Tabla 4.2.2 — Nivel de madurez tecnológica (TRL) por sub-línea y tecnología Las fuentes en las que se basaron las estimaciones de TRL de esta tabla se listan en la sección 7, en «Fuentes de la tabla 4.2.2».

HORIZONTE

■ Ya en adopción

■ 3–7 años

■ Señal débil (>7 años)

Tabla 4.2.2 — Nivel de madurez tecnológica (TRL)

TECNOLOGÍA	1	2	3	4	5	6	7	8	9
SL1 — Precisión y sensoramiento									
Guiado RTK / auto-steer									9
Sensores de humedad de suelo (IoT)									9
Drones para pulverización dirigida									9
Teledetección satelital multiespectral									9
Robots de control de malezas								8	
LiDAR aéreo (modelado 3D / biomasa)								8	
Tractores con autonomía completa supervisada							7		
Teledetección satelital hiperespectral						6			
Sensores hiperespectrales portátiles / aéreos					5				
SL2 — Ciencia de datos e interoperabilidad									
Plataformas FMIS									9
Estándares de interoperabilidad (ISOBUS/ADAPT)								8	
Infraestructuras de datos abiertos agropecuarios							7		
Gobernanza y soberanía de datos agrícolas					5				
SL3 — IA y aprendizaje automático									
Visión por computadora: plagas / enfermedades								8	
Recomendación agronómica con IA							7		
LLM / asistentes conversacionales agrícolas						6			
Predicción de rendimiento con ML/DL						6			
Fenotipado digital con IA (deep learning)						6			
SL4 — Plataformas, trazabilidad y conectividad									
Sistemas regulatorios de trazabilidad (SNIG)									9
Conectividad rural satelital LEO								8	
Pagos digitales e inclusión financiera rural							7		
Marketplaces / comercialización digital agrícola							7		
Trazabilidad con blockchain agroalimentaria						6			
SL5 — Gemelos digitales y simulación									
Modelado climático-agrícola integrado (DSSAT/APSIM)							7		
Simulación de suelo y ciclo de nutrientes						6			
Gemelos digitales de cultivo / parcela					5				
Simulación de cadenas de valor agroalimentarias					5				
Gemelos digitales de ganadería y bienestar animal				4					

4.2.3 Drivers de cambio y señales tempranas

Científico-tecnológico. La renovación de la constelación Sentinel-1 (Sentinel-1D, lanzado en noviembre de 2025) con tecnología SAR (radar de apertura sintética) otorga independencia frente a la nubosidad para la toma de imágenes satelitales (ESA, 2025). Avanza también la investigación sobre gemelos digitales de cultivo: una revisión reciente describe su evolución desde sistemas de monitoreo hacia esquemas de control autónomo de lazo cerrado a medida que se integran con datos en tiempo real (Subeesh & Chauhan, 2026). Un modelo de fusión de redes neuronales convolucionales ligeras optimizado para inferencia en dispositivos de borde alcanzó 89,5 % de exactitud y un tiempo de inferencia inferior a 10 ms por imagen en la detección de plagas (Bilal et al., 2025).

Económico / mercado. La inversión de capital de riesgo en startups de inteligencia artificial agrícola en la Unión Europea fue de solo USD 57 millones en 2024, equivalente a apenas 0,5–0,6 % del capital de riesgo total en IA de la región (OCDE, 2025). En el segmento de fenotipado digital se observa consolidación vía adquisiciones: Hiphen (Francia, más de 12 años en el mercado) adquirió a la americana SlantRange en 2023 y a la holandesa Aurea Imaging en enero de 2025 (Hiphen, 2025).

Social / ambiental. La escasez de mano de obra rural sigue siendo argumento central para la inversión en autonomía: Deere & Company (2025) cita una cifra de 2,4 millones de puestos agrícolas sin cubrir anualmente en Estados Unidos. Los asistentes de IA generativa amplían el acceso a asesoría agronómica a más de 100.000 pequeños productores, aunque persisten sesgos de género documentados en fases tempranas de despliegue (GIZ, 2025). La presión de mercados destino por trazabilidad ambiental (Consejo de la Unión Europea, 2025b) convive con brechas de alfabetización digital no resueltas entre pequeños productores.

Regulatorio. El Espacio Común Europeo de Datos Agrícolas (CEADS) pasó de fase preparatoria a despliegue operativo financiado con inicio de actividades en abril de 2025 (ILVO, 2025). La capa de software (recomendación agronómica, predicción de rendimiento, asistentes conversacionales) queda mayormente clasificada como de riesgo mínimo o limitado bajo el Reglamento de IA europeo; la maquinaria autónoma sí está sujeta a los requisitos de alto riesgo (Val, 2026).

Señales tempranas: - Integración comercial de conectividad satelital LEO en maquinaria de fábrica (CNH Industrial, 2025; Stara, 2026): señal de consolidación, no de piloto. - Clarificación regulatoria sobre el estatus de riesgo mínimo de la IA de asesoría agrícola bajo el Reglamento de IA de la UE (Val, 2026). - Kit retrofit de autonomía para tractores existentes, no solo modelos nuevos (Deere & Company, 2025): el valor del fabricante migra hacia software y servicios postventa. - Adquisiciones de startups de IA agrícola por parte de multinacionales de maquinaria (John Deere adquirió SparkAI en 03/2023; AGCO adquirió FarmFacts GmbH y NEXT Farming en 11/2023 y el 85 % de Trimble Ag en 09/2023; AGCO, 2023a, 2023b).

4.2.4 Casos y desarrollos internacionales relevantes

La siguiente tabla sintetiza casos internacionales representativos:

Tabla 4.2.4. Casos internacionales seleccionados.

Caso	Actor	Geografía	Hito	Relevancia para UY y la tendencia	Observaciones
Retrofit de autonomía en maquinaria existente	John Deere	EE. UU. (despliegue en mercados OECD)	2025: expansión de «Precision Upgrades» — autonomía supervisada en tractores 8R/9R/9RX ya vendidos, sin reemplazo de flota (Deere & Company, s.f.; DTN/Progressive Farmer, 2025)	Desplaza el valor del fabricante hacia software/servicios postventa; reduce la barrera de adopción al no exigir renovación de flota	Strine et al. (2025) concluyen que la autonomía de maquinaria no es aún competitiva en costos bajo condiciones típicas de EE. UU. (punto de equilibrio en USD 140/hora de operador); la adopción efectiva puede no seguir el ritmo del hito comercial
Robótica de deshierbe a escala comercial	Carbon Robotics	EE. UU., con unidades operando en tres continentes	LaserWeeder G2 (2025); ensayos independientes de Rutgers y Cornell (2024): reducción de biomasa de malezas ≥ 97 % y aumento de biomasa de cultivo ≥ 30 % frente a herbicida (Sosnoskie et al., 2025)	Uno de los pocos casos de robótica agrícola con evaluación experimental independiente arbitrada; caso de referencia para SL1 en el horizonte 3–7 años	Evaluación en cultivos específicos (remolacha, espinaca, arveja) de NJ/NY; escalabilidad a sistemas extensivos y a condiciones de suelo/clima diferentes no verificada
Cercado virtual y monitoreo de comportamiento en pastoreo	Halter	Nueva Zelanda, con despliegue en Australia y EE. UU.	Evaluación independiente de la función de arreo remoto hacia sala de ordeño (Verdon et al., 2024)	Único caso centrado en comportamiento de pastoreo/movimiento; complementa a smaXtec (fisiología) sin superponerse; altamente relevante para sistemas de lechería intensiva en Uruguay	Evaluación publicada en lechería intensiva de pastoreo neozelandés; aplicabilidad en sistemas extensivos o doble propósito uruguayo requiere adaptación

4.2.4 Casos y desarrollos internacionales relevantes

Caso	Actor	Geografía	Hito	Relevancia para UY y la tendencia	Observaciones
Plataforma de monitoreo de salud y reproducción ganadera (sensor + IA)	smaXtec	Austria (UE), con expansión activa a EE. UU.	2025: inversión de KKR y Highland Europe; más de 1 millón de vacas monitoreadas globalmente (OMMAX, 2025; smaXtec, s.f.)	Validación independiente replicada en al menos tres países (Austria, Kazajistán) sin vínculo comercial con la empresa; patrón de maduración de ganadería de precisión hacia plataformas comerciales con evaluación científica independiente	El sensor de pH y temperatura reticular cuenta con validación publicada (Ammer et al., 2016; Uskenov et al., 2024), pero la capa de analítica de IA sobre esos datos tiene menor documentación independiente
Infraestructura digital pública agropecuaria nacional	Gobierno de India / Digital Agriculture Mission / AgriStack	India	Aprobado en 2024 (~USD 300 M); Farmer ID y Digital Crop Survey en despliegue con acuerdos firmados en 19 estados a principios de 2026 (Government of India, 2025)	Único caso de infraestructura de datos pública habilitante de la capa de IA aplicada; tipo de caso distinto al resto (no producto comercial sino plataforma nacional)	Balkrishna et al. (2023) documentan una brecha entre la adopción a nivel corporativo/global y a nivel comunitario, matizando el relato oficial de despliegue homogéneo

Lectura transversal de los casos. En los casos de John Deere y AgriStack se señalan barreras económicas significativas de acceso a la tecnología. Strine et al. (2025) concluyen que la autonomía de maquinaria no es aún competitiva en costos bajo condiciones típicas, y Balkrishna et al. (2023) documentan que la adopción de AgriStack es desigual entre el nivel corporativo y el comunitario. En ambos casos el hito comercial es real y verificable, pero su significado para la adopción efectiva —en particular por pequeños y medianos productores— no necesariamente sigue las señales de madurez tecnológica.

En el plano pecuario, los casos de Halter y smaXtec son deliberadamente complementarios: el primero corrobora la eficacia del cercado y arreo virtual (comportamiento y movimiento del animal) y el segundo el monitoreo fisiológico interno (salud y reproducción) mediante sensor ingerible con analítica de IA. Ambos cuentan con validación independiente publicada en revistas de referencia del campo veterinario y de ciencia animal (Journal of Dairy Science y Veterinary World, respectivamente).

4.2.5 Panorama de propiedad intelectual y mapa de actores

Jurisdicciones más activas

El paisaje de propiedad intelectual presenta concentración geográfica en tres polos con dinámicas diferenciadas.

China (CNIPA): lidera en volumen absoluto —más del 60 % del total global de solicitudes en 2024—, pero con una tasa de concesión muy baja, lo que refleja un patrón estructural de volumen alto y calidad baja en extensión internacional. Principales solicitantes: XAG y Sinochem.

EE. UU. (USPTO): segundo en volumen, primero en alcance internacional y calidad de portfolio. Deere & Company y CNH Industrial concentran los portfolios más grandes del sector, con extensión sistemática vía PCT/EPO. Lideran en modelos predictivos con la mayor proporción de familias internacionales (WIPO, 2024).

Europa (EPO), con Alemania dominante: tercero en volumen, mayor densidad de innovación en autonomía. El CAGR en modelos predictivos es el más alto de todas las jurisdicciones entre 2017–2021 (WIPO, 2024). CLAAS, CNH, BASF y Bayer entre los actores sistemáticos.

Corea del Sur (KIPO): mayor eficiencia solicitudes/concesiones de la muestra, generando casi tantas patentes concedidas como EE. UU. con una fracción del volumen. Fortaleza en software de gestión de finca e IA/ML; Samsung, LG, Sony, Qualcomm y Ericsson en los top 5 de IoT/ conectividad/robótica.

Brasil (INPI): señal emergente en LATAM. Mayor CAGR en dispositivos autónomos de toda la muestra en el período 2017–2021 (WIPO, 2024), desde base baja. Uruguay no aparece como jurisdicción significativa en ningún análisis de PI del sector.

AGRICULTURA DIGITAL, CIENCIA DE DATOS E INTELIGENCIA ARTIFICIAL (TENDENCIA 5)

Tabla 4.2.5.1 — Jurisdicciones más activas en PI de agricultura digital (síntesis)

Jurisdicción	Posición / fortaleza	Actores representativos	Dinámica observada
China (CNIPA)	Líder en volumen (>60 % global); tasa de concesión muy baja	XAG (drones), Sinochem, universidades agrícolas	Crecimiento explosivo; calidad de PI limitada en extensión internacional
EE. UU. (USPTO)	Primero en alcance internacional; portfolios más sólidos	Deere & Company, CNH Industrial, Climate LLC, IBM	Crecimiento sostenido; consolidación vía adquisiciones
Europa (EPO)	CAGR más alto en modelos predictivos; calidad alta	CLAAS, BASF, Bayer, CNH, Amazonen-Werke	Liderazgo en autonomía; Alemania dominante
Corea (KIPO)	Mayor eficiencia solicitudes/concesiones	Samsung, LG, Sony KR, Ericsson KR	Diversificación hacia IA y software agrícola
Brasil (INPI)	CAGR más alto en autonomía; base baja pero creciente	Embrapa, institutos federales, startups	Señal emergente en LATAM; ecosistema en construcción

Tipos de actor predominantes

Cinco categorías con lógicas de acumulación de PI diferenciadas; su convergencia —que antes operaba en dominios separados— es el rasgo más relevante de 2020–2025.

(a) Maquinaria con división digital: Deere, CLAAS, Kubota, CNH y AGCO lideran la mayoría de subdominios, patentando horizontalmente en múltiples jurisdicciones y familias IPC (A01+G06+G01 +H04). La adquisición de Blue River Technology por Deere & Company (2017) es el caso paradigmático de consolidación de PI por integración vertical.

(b) Insumos agroquímicos con plataforma digital: BASF y Bayer encabezan el AgriTech desde insumos; Sinochem es el tercer principal solicitante global (WIPO, 2024). Combinan patentes de formulación (C07, C12) con plataformas digitales (G06Q, G06N) — convergencia que los expone al AI Act cuando sus modelos de recomendación operan en la UE.

(c) Big Tech con vertical agro: Sony, LG, Samsung, Qualcomm y Ericsson en IoT/conectividad/ robótica; IBM y NVIDIA entre los principales asignados en AgriTech. Sus patentes son mayormente adaptaciones de tecnología genérica (imágenes, 5G, nube) al agro.

(d) Startups especializadas: DJI y XAG lideran drones en CNIPA; Carbon Robotics y Ecorobotix en robótica de malezas (USPTO/EPO respectivamente). Concentran PI en un único subdominio.

(e) Academia y sector público: universidades chinas con alta presencia CNIPA pero escasa extensión internacional; Wageningen e INRAE concentran producción científica occidental relevante; Embrapa es el principal actor público en LATAM. La academia domina desproporcionadamente los subsegmentos emergentes (gemelos digitales, modelos fundacionales, gobernanza de datos).

Tabla 4.2.5.2 — Mapa cualitativo de actores por tipo y posicionamiento en PI

Tipo de actor	Actores representativos	Características de su PI
Maquinaria agrícola	Deere, CNH, CLAAS, AGCO, Kubota	Portfolio amplio, extensión global; consolidación vía adquisiciones
Insumos con plataforma digital	BASF, Bayer, Sinochem, Corteva	Convergencia formulación-software; exposición al AI Act
Big Tech con vertical agro	Sony, LG, Samsung, Qualcomm, NVIDIA, IBM	Adaptación de PI genérica; mayor presencia en IoT y robótica
Startups especializadas	DJI, XAG, Carbon Robotics, Ecorobotix, BlueWhite	PI de nicho; alta concentración en 1–2 subdominios
Academia / sector público	Wageningen, INRAE, CAU (China), Embrapa	Anticipa tendencias; escasa extensión internacional fuera de China

La convergencia maquinaria agrícola – cómputo como señal estructural

El rasgo más informativo del paisaje de PI no es la dinámica de un actor individual sino la convergencia entre la maquinaria agrícola y el cómputo. El análisis de red de patentes de Tey et al. (2024) —que cubre 1960–2021 y es la serie de largo plazo disponible— ordena la evolución del campo en cuatro fases sucesivas: «mecanización motorizada» (1960–1999), «automatización mecánica» (2000–2009), «mecanización digital» (2010–2019) y «automatización digital» (2020–2021). El pasaje a esta última fase es, precisamente, el acoplamiento de la Sección A de la clasificación (necesidades humanas, con A01 para agricultura) con la Sección G (física, cómputo y medición). El WIPO Patent Landscape Report — Agrifood (WIPO, 2024) documenta la continuidad de ese acoplamiento en el período más reciente.

Sobre esa base, los acoplamientos que aparecen con mayor regularidad en el corpus revisado son A01B/A01C con G06Q50/02 (gestión digital), G06N3 con G06T (visión computacional) y G01S con A01B/A01D (guiado autónomo). La utilidad de este criterio es discriminante: permite distinguir la innovación con anclaje agronómico real de las patentes de IA o IoT genérico que mencionan el agro sin abordarlo como dominio técnico central.

Dinámica observada: crecimiento activo con concentración creciente

El campo no está en meseta: crece en volumen total mientras se concentra en pocos actores —patrón de transición de fase emergente a consolidación. El top 10 de solicitantes concentra alrededor del 40 % de los depósitos AgriTech+FoodTech (WIPO, 2024). A ese cuadro se suma un indicio de dirección: un crecimiento del orden de 3× en cuatro años en las solicitudes de agricultura de precisión (2020–2024; Legal Advantage, 2025). Nota sobre esta cifra: Proviene de análisis comerciales de firmas de servicios de PI, no de fuentes oficiales ni arbitradas, y su base primaria no pudo verificarse. Se conserva por su valor direccional —coincide con lo que documenta el WIPO Patent Landscape Report— pero no debe usarse como dato firme.

Sobre los gemelos digitales

En materia de gemelos digitales agrícolas la producción académica es alta, pero el portfolio de PI es escaso — la ausencia de marco regulatorio dedicado reduce los incentivos para patentar. Es indicador de que el campo no alcanzó el umbral de madurez comercial que

genera carrera patentaria, y simultáneamente constituye una ventana para actores tardíos. Este patrón es consistente con el TRL 4–5 asignado en 4.2.2.

4.2.6 Panorama normativo y de estándares

El marco regulatorio se organiza en varios bloques (datos, IA y maquinaria), a los que se suman transversalmente la identificación animal y la trazabilidad ambiental. El patrón dominante en la UE es la postergación sistemática de calendarios (AI Act, EUDR) sin cambio en el fondo normativo; en LATAM, la convergencia hacia trazabilidad ganadera electrónica obligatoria avanza más rápido que la regulación de IA o de datos.

Datos. El Data Act (UE 2023/2854, aplicable desde sept. 2025) traslada el eje de «propiedad» a «control de acceso», erosionando el lock-in de las FMIS. La LGPD brasileña (2018, ANPD) es el marco de datos más maduro de la región; Argentina reforma su Ley 25.326 sin ley aprobada aún.

IA. El AI Act (UE 2024/1689) fue modificado por el Reglamento (UE) 2026/1744 (Digital Omnibus on AI), publicado el 24 de julio de 2026 y vigente desde el 27 de julio de 2026: las obligaciones aplicables a los sistemas de alto riesgo del Anexo III rigen desde el 2 de diciembre de 2027 y las del Anexo I desde el 2 de agosto de 2028. El software agronómico permanece en riesgo mínimo; gemelos digitales y PLF (Precision Livestock Farming) sin marco dedicado. Brasil lidera la región con el PL 2338/2023 (aprobado en Senado en dic. 2024, en Cámara desde 2024); Uruguay y Argentina no tienen ley de IA.

Maquinaria. El Reglamento de Máquinas (UE 2023/1230), obligatorio a partir de ene. 2027, suma software/IA como componente de seguridad. Sin equivalente Mercosur.

Trazabilidad ambiental. EUDR (2023/1115, mod. 2025/2650): nueva postergación, dic. 2026 / jun. 2027, con declaración única por cadena.

Identificación animal — convergencia regional. ISO 11784/11785 (ICAR) es el estándar de facto; familia ISO 24631 actualizada en 2025. La UE la deja voluntaria; Uruguay, Argentina y Brasil convergen hacia la obligatoriedad. Uruguay es pionero (Ley N.º 17.997, desde 2006), Argentina inició en ene. 2026 la incorporación obligatoria de terneros al destete o antes del primer movimiento (Senasa Res. 530/2025), Brasil despliega un cronograma escalonado 2027–2032.

Tabla 4.2.6 — Marco normativo y de estándares por plano y jurisdicción

Bloque regulatorio	Jurisdicción	Marco	Estado (jul. 2026)	Implicancias
Datos	UE	Data Act (2023/2854)	Aplicable sept. 2025	Rompe lock-in de FMIS; espera a que CEADS madure
	Brasil	LGPD (Ley 13.709/2018)	Vigente, ANPD activa	Marco de datos más maduro de la región
	Argentina	Ley 25.326 en reforma	Sin ley aprobada	Anteproyecto AAIP caducó (2024)
IA	UE	AI Act + Digital Omnibus	Vigente desde jul. 2026	Software agro en riesgo mínimo; maquinaria hasta ago. 2028
	Brasil	PL 2338/2023	Aprobado en Senado (dic. 2024); en Cámara	Clasificación por riesgo calcada del AI Act
	Uruguay	—	Sin ley de IA	Estrategia Nacional de Datos e IA aprobada (nov. 2024); comité estratégico con recomendaciones para una futura regulación (AGESIC, 2024)
Maquinaria	UE	Reg. 2023/1230	Obligatorio ene. 2027	IA/software = componente de seguridad, marcado CE
	Mercosur	—	Sin marco unificado	Vacío regional
Trazabilidad ambiental	UE	EUDR (2023/1115, mod. 2025/2650)	Nueva postergación: dic. 2026 / jun. 2027	Un solo operador declara por cadena
ID animal	UE	Reg. 2016/429 / Del. 2019/2035	Voluntaria	Único bloque que no avanza hacia obligatoriedad
	Uruguay	Ley N.º 17.997 (SNIG)	Obligatoria desde 2006	Pionero regional; ventana de conocimiento exportable
	Argentina	Senasa Res. 530/2025	Obligatoria desde ene. 2026 (terneros al destete o antes del primer movimiento)	Inicia convergencia con Uruguay, 20 años después
	Brasil	Plan Nac. ISO 076	Obligatoria por etapas 2027–2032	De voluntario/exportador a obligatorio total

4.2.7 Oportunidades y barreras

Los condicionantes de adopción se presentan por categoría, a modo de observaciones para la discusión y no como recomendaciones.

Tabla 4.2.7. Oportunidades y barreras

Categoría	Oportunidad	Barrera
Técnica	Convergencia de estándares maduros (ISOBUS/ADAPT, ISO 11784/11785) reduce fricción de integración multi-vendor	Calidad y disponibilidad de datos etiquetados sigue siendo cuello de botella para visión y gemelos digitales; validación a campo insuficiente fuera de piloto
Regulatoria	Marcos que avanzan (Data Act, convergencia LATAM en eID animal) dan certidumbre creciente	Fragmentación LATAM (Argentina sin ley de IA, sin marco Mercosur) y desfasaje entre calendario normativo europeo y capacidad real de cumplimiento (AI Act, EUDR)
Mercado	Consolidación de plataformas (FMIS, fenotipado) reduce fragmentación de oferta	Concentración corporativa genera asimetría entre grandes y pequeños productores; lock-in de plataforma, mitigado en la UE por el Data Act, sin equivalente en LATAM
Capacidades	LLM agrícolas y asistentes de bajo costo amplían el acceso de pequeños productores a asesoría especializada	Escasez de talento cruzado agronomía + datos; brecha digital intergeneracional entre productores
Conectividad	Conectividad LEO (Starlink y similares) resuelve el gap rural a costo decreciente	Cobertura desigual y costo de datos en zonas rurales extensivas; despliegue 5G rezagado frente a la demanda de maquinaria autónoma

4.2.8 Implicancias para Uruguay

Capacidades existentes

El Sistema Nacional de Información Ganadera (SNIG) sigue siendo el activo digital agropecuario de mayor madurez verificable: operativo desde 2006 bajo la Ley N.º 17.997, identifica electrónicamente la totalidad del rodeo bovino nacional, con más de 12 millones de animales registrados (MGAP, 2024a). Sobre esa base, el Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA) integró tres aplicaciones propias —EfiCarne (eficiencia alimenticia bovina), OptiFert (dosificación de fertilización fosfatada) y CuantAgua— en la plataforma privada Auravant, que reporta más de 700.000 hectáreas monitoreadas en Uruguay (Auravant, s.f.-a).

En financiamiento, el Fondo Sectorial Innovagro (ANII–INIA–MGAP, activo desde 2008) destinó hasta USD 5,4 millones para la convocatoria 2026 y las tres ediciones siguientes (INIA, 2026a), con líneas prioritarias que incluyen explícitamente «Tecnologías de la Información y agricultura digital» (ANII, 2026b). La edición 2025 recibió 46 perfiles en modalidad investigación y 7 en innovación; 26 de los 27 proyectos invitados a propuesta completa la presentaron (ANII, 2025).

En comunidad de innovación, Uruguay XXI posiciona el país como referente AgTech a través del espacio Agroinnova (feria Agro en Punta), con más de 60 startups presentadas en el demoday 2025 organizado junto a BID Lab, Converge, INIA, Uruguay Innovation Hub y ANII (Uruguay XXI, 2025). La CUTI sostiene una Mesa AgriTech de trabajo que conecta a la industria TIC con el sector productivo (CUTI, s.f.).

En gobernanza de datos e IA, el artículo 74 de la Ley N.º 20.212 asigna a AGESIC el diseño de la Estrategia Nacional de Datos y de Inteligencia Artificial, aprobada por el Comité Estratégico del Sector Público en noviembre de 2024 (AGESIC, 2024). La protección de datos personales se rige por la Ley N.º 18.331 (2008) bajo control de la URCDP (KPMG, 2025).

Brechas identificadas

Técnica: ausencia de validación local sistemática de modelos de aprendizaje automático entrenados en otros contextos agroclimáticos, brecha documentada transversalmente en §4.2.2 y §4.2.3.

De investigación académica sistematizada: la capacidad en agricultura digital e inteligencia artificial aplicada al agro existe en Uruguay, pero se encuentra distribuida entre varias instituciones y no se articula, en general, alrededor de una unidad universitaria con dedicación exclusiva a la temática. En la Facultad de Agronomía (UdelaR) no se identifica un departamento específico de agricultura digital o IA agropecuaria; el Departamento de Biometría, Estadística y Computación es el ámbito institucional con mayor proximidad temática, con cursos de estadística, métodos cuantitativos y diseño y análisis de experimentos, y con docentes que documentan trabajos en predicción genómica aplicada al mejoramiento animal y vegetal. En la información relevada no se identifica, sin embargo, una línea formal de agricultura digital, aprendizaje automático o manejo sitio-específico dentro del departamento.

En el repositorio Colibri de UdelaR, una búsqueda preliminar por término exacto arroja resultados acotados: 3 registros para «agricultura digital», 26 para «agricultura de precisión» —mayoritariamente trabajos finales de grado de Ingeniería Agronómica, no tesis de posgrado— y apenas 1 para «agricultura inteligente» (que es también el único resultado que combina el término «sistemas ciberfísicos»). Las cifras sugieren una producción de posgrado escasa en el tema específico; es una lectura orientativa, no un recuento exhaustivo.

En la Facultad de Ingeniería (UdelaR), el Grupo MINA (Instituto de Computación) constituye el caso más documentado de investigación en robótica aplicada al agro. El proyecto MAgro —financiado por la ANII, con participación de INIA y Duke University— desarrolla navegación autónoma mediante SLAM visual, sensores de visión 3D y aprendizaje profundo para la estimación de cantidad y calidad de cosecha en montes frutícolas, e incluye una tesis doctoral en curso sobre navegación con sensores económicos adaptados a entornos rurales (Facultad de Ingeniería, s.f.). En 2025, Marzoa Tanco et al. publicaron un compendio de divulgación que reseña este y otros proyectos del grupo en robótica para agricultura de precisión y sostenibilidad (Marzoa Tanco et al., 2025).

En UTEC, las capacidades más pertinentes se concentran en el Grupo de Investigación en Robótica e Inteligencia Artificial y el Grupo de Investigaciones Espaciales; ambos tienen agendas más amplias que la agricultura digital —robótica e IA en general el primero, teledetección e información geoespacial orientada a gestión ambiental el segundo, con publicaciones en revistas indexadas en 2023 y 2025—. GASMA aporta desde la agroecología

y la sostenibilidad; en la información relevada no se documentan proyectos específicos que lo sitúen como grupo de agricultura digital.

INIA participa en iniciativas concretas de agricultura digital: una metodología de mapeo y seguimiento de la condición de cultivos mediante imágenes satelitales (Sentinel-1, Sentinel-2, Terra) y aprendizaje automático, desarrollada como tesis de maestría con dirección de investigadores de la Facultad de Ingeniería (UdelaR) (Cal, 2022). Esto sustenta que INIA es un actor relevante en la aplicación de agricultura digital. En conjunto, la evidencia respalda una capacidad nacional significativa en agricultura digital e IA agropecuaria, distribuida entre varias instituciones y todavía insuficientemente sistematizada.

De marco normativo de IA: a julio de 2026, Uruguay no cuenta con una ley de inteligencia artificial vigente; cuenta con la Estrategia Nacional de Datos y de Inteligencia Artificial (AGESIC, 2024) y un comité estratégico del sector público con recomendaciones para una futura regulación. Fuentes periodísticas atribuyen a AGESIC trabajo sobre un proyecto normativo, aún no confirmado institucionalmente ni aprobado por el Poder Legislativo (Mordecki, citado en la diaria, 2025). Esto deja sin resolver la clasificación de riesgo de los sistemas de IA aplicados al agro en un momento en que la Unión Europea ya la resolvió en sentido exigente: los componentes de seguridad basados en IA de la maquinaria cubierta por el Reglamento de Máquinas (UE) 2023/1230 —y de los tractores agrícolas, cubiertos por el Reglamento (UE) 167/2013— quedan clasificados como sistemas de IA de alto riesgo por el artículo 6(1) del AI Act, de modo que deben cumplir acumulativamente los requisitos de la norma sectorial y los del AI Act (Val, 2026). Esa ausencia de una norma nacional vinculante no exime a los proveedores que exporten a ese mercado ni regula en sentido estricto a los que operan en el mercado interno.

Ventanas de oportunidad

Exportación de conocimiento acumulado en trazabilidad ganadera. La ventaja de Uruguay ya no es de exclusividad regulatoria: Argentina avanza hacia la obligatoriedad de identificación electrónica desde 2026 y Brasil despliega un cronograma escalonado 2027–2032, lo que confirma una convergencia regional hacia el estándar que Uruguay adoptó primero. La ventaja real reside en dos décadas de trayectoria operativa y capacidad de asesoría técnica exportable a la región. El fondo concursable «Desafío: trazabilidad animal» (ANII, MGAP, INIA & INAC, 2025) fue creado para modernizar el hardware de identificación individual del sistema y recibió 34 propuestas de empresas e instituciones de distintos países, evidencia directa de interés internacional en el sistema uruguayo como plataforma de referencia.

Programas institucionalizados de validación tipo living lab. Converge —plataforma de innovación AgTech impulsada por INIA y BID Lab, con apoyo de ANII— sostiene convocatorias anuales abiertas a empresas y emprendedores de Uruguay y América Latina para validación en terreno con especialistas de INIA (INIA, s.f.-b). «Desafío: trazabilidad animal» seleccionó en diciembre de 2025 dos proyectos —de un total de 34 postulaciones internacionales— financiados hasta UYU 5.000.000 cada uno (100 % del costo cubierto), con validación obligatoria en una estación experimental de INIA dentro de un año (ANII, MGAP, INIA & INAC, 2025). Ambos programas constituyen mecanismos institucionalizados de banco de pruebas.

Modelo de integración público-privada replicable. La incorporación de aplicaciones de INIA (EfiCarne, OptiFert, CuantAgua) en la plataforma privada Auravant ilustra una vía de bajo

costo relativo: canalizar conocimiento agronómico público a través de infraestructura tecnológica existente. Auravant reporta que su adopción inicial ocurrió en Argentina, Uruguay y Paraguay, y solo después escaló a España, Brasil y otros mercados (Auravant, s.f.-b).

Uruguay como banco de pruebas de escala manejable. La evidencia converge: Uruguay ya opera de facto en varios casos como plaza de validación regional, aunque sin una política pública que lo explicita o consolide directamente.

Riesgos

Un riesgo identificado para esta tendencia es la dependencia tecnológica creciente de plataformas extranjeras (Auravant, Starlink, proveedores de maquinaria conectada), que se acentúa en ausencia de marco normativo nacional de datos agropecuarios y de una ley de IA vigente. A esto se suma la carencia de validación local de modelos de IA agrícola en un momento en que éstos ya se integran operativamente en plataformas de uso extendido en el país, lo que expone a productores y asesores a recomendaciones sin garantía de precisión en condiciones agroclimáticas uruguayas específicas.

Elementos de atención

La conectividad rural queda como un tema a desarrollar en mayor profundidad por ser habilitadora de todas las aplicaciones de gestión remota de esta tendencia. Su tratamiento requiere articular indicadores de cobertura LEO en zonas rurales extensivas, costos reales de datos por productor y la dinámica de inversión y regulación en el país.

4.3

Bioeconomía, agroalimentos y valorización de biomasa (Tendencia 6)

4.3.1 Definición y delimitación

La tendencia comprende las tecnologías, procesos e innovaciones que transforman biomasa de origen agropecuario, forestal o acuático —incluidos subproductos, efluentes y residuos agroindustriales— en alimentos e ingredientes, materiales, moléculas químicas, combustibles, energía o nutrientes recuperados, en línea con la caracterización de las biorrefinerías (materias primas · procesos · plataformas · productos) y con el marco uruguayo de bioeconomía (Motola et al., 2022; MGAP, 2024b).

Un principio transversal ordena el análisis: el calificativo «biobasado» no acredita por sí mismo sostenibilidad. Contenido biobasado, biodegradabilidad, compostabilidad y reciclabilidad son atributos distintos, y las comparaciones ambientales requieren respaldo en Análisis de Ciclo de Vida (ACV) conforme a ISO 14040/14044 (Benavides et al., 2020; Comisión Europea, 2022; Mousavi et al., 2025).

Organización en cinco sub-líneas. El informe organiza el eje en cinco sub-líneas por cadena tecnológica:

1. **Biorrefinerías y valorización integral de biomasa** — fraccionamiento, conversión bioquímica o termoquímica, separación y recuperación de múltiples productos y coproductos.
2. **Bioplásticos, biomateriales y bioproductos industriales** — PLA, PHA, polímeros naturales, biocompuestos, nanocelulosa, lignina funcionalizada, adhesivos, resinas y recubrimientos.
3. **Proteínas alternativas y agroalimentos funcionales** — proteínas vegetales, fermentación de biomasa microbiana, fermentación de precisión, algas, micoproteínas y carne o productos acuáticos cultivados.
4. **Bioenergía y biocombustibles avanzados** — biogás y biometano, etanol celulósico, biodiésel de residuos, combustible de aviación sostenible (SAF), biohidrógeno y coprocesamiento.
5. **Química verde y bioquímicos de plataforma** — ácidos orgánicos, aminoácidos, vitaminas, aromas, pigmentos, enzimas, solventes alternativos y recuperación de fósforo o nitrógeno.

Para evitar doble contabilización temática: la producción de biogás se mantiene en bioenergía; los nutrientes o químicos definidos, en química verde; los PHA, en biomateriales; y el biocarbón, en biorrefinerías.

Constancia de alcance

- «**Alimentos funcionales y nutraceuticos**» se trata de forma acotada, con foco en proteínas alternativas y fermentación; probióticos/prebióticos, encapsulación y regulación de health claims no se desarrollan.
- «**Economía circular y sostenibilidad**» se aborda de forma transversal (ACV, EPD, marcos de política de bioeconomía, valorización de digestato), no como sub-línea independiente.

4.3.2 Estado de madurez tecnológica

La madurez se evalúa para combinaciones concretas de materia prima, proceso, producto, escala y jurisdicción. Las fuentes en que se basaron las estimaciones de TRL de esta tabla se listan en la sección 7, en «Fuentes de la tabla 4.3.2».

HORIZONTE

■ Ya en adopción

■ 3–7 años

■ Señal débil (>7 años)

Tabla 4.3.2 — Nivel de madurez tecnológica (TRL)

TECNOLOGÍA	1	2	3	4	5	6	7	8	9
SL1 — Biorrefinerías y valorización integral									
Biorrefinerías forestales y azucareras integradas (configuraciones comerciales existentes)									9
Rutas hidrotermales, lignin-first o multiproducto desde residuos (madurez variable)					5				
SL2 — Bioplásticos y biomateriales									
PLA desde azúcares/almidón convencionales (cadenas consolidadas)									9
Rutas desde residuos, lignocelulosa, lactosuero o digestato (madurez variable)					5				
Ruta CH ₄ /biogás → PHA (experimental)			3						
SL3 — Proteínas alternativas y agroalimentos funcionales									
Aislados y concentrados proteicos vegetales (p. ej. proteína de arveja)									9
Fermentación de precisión (varía según producto)						6			
Carne cultivada (barreras de escala y aprobación regulatoria)						6			
Power-to-Protein / Power-to-Vitamins (prueba de concepto)			3						
SL4 — Bioenergía y biocombustibles avanzados									
Digestión anaerobia convencional (plantas reales en operación)									9
Upgrading a biometano y ruta HEFA para SAF (configuraciones comerciales específicas)									9
Etanol 2G en complejos de caña integrados (p. ej. Raízen)									9
SL5 — Química verde y bioquímicos de plataforma									
Ácido láctico con variante circular en marcha (p. ej. Corbion)								8	
Estruvita (aplicaciones comerciales selectas)								8	
Químicos de alto valor desde digestato o residuos heterogéneos (mayormente laboratorio/piloto)					5				
CH ₄ → ectoína (demostrado en operación continua de laboratorio)				4					

Evaluación ambiental asociada a la madurez. De forma transversal a las cinco sub-líneas, la evidencia revisada muestra un cambio en el criterio con que se evalúa el desempeño ambiental de estas tecnologías: el origen biobasado de un producto deja de considerarse, por sí solo, evidencia suficiente de menor impacto ambiental. El análisis se desplaza hacia la configuración concreta del proceso que lo produce —materia prima utilizada, consumo de energía, reactivos empleados y su grado de recuperación, emisiones fugitivas, destino de los coproductos, logística y tratamiento al final de la vida útil—, evaluada con tres herramientas: el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), los balances de masa y energía, y el Análisis Tecnoeconómico (TEA) (Medina-Martos et al., 2020; Benavides et al., 2020; Augustin et al., 2024; Jacob et al., 2025).

4.3.3 Drivers de cambio y señales tempranas

La adopción de estas tecnologías responde a la interacción entre avances científico-tecnológicos, búsqueda de valor en corrientes residuales, política industrial, regulación y legitimidad social. Se priorizan señales fechadas y verificables por encima de proyecciones de mercado: un proyecto financiado, una planta piloto o una hoja de ruta indican dirección y movilización de actores, pero no demuestran por sí solos competitividad ni adopción generalizada.

Tabla 4.3.3. Drivers de cambio y señales tempranas.

Driver	Mecanismo de cambio	Señales tempranas verificables
Científico-tecnológico	Convergencia de biología sintética, fermentación, catálisis, electroquímica, captura y uso de CO ₂ , modelado e IA; integración de conversión y separación	Encuentro CORC sobre conversión de CO ₂ + IA (nov-2026); inicio de BIOLEAD para la hoja de ruta europea de biomanufactura (jun-2026); Advanced Grant del ERC a Bardow (ETH Zurich) para descubrir procesos que reemplacen materias primas fósiles; proyecto BIOCTANE (residuos→SAF); biorreactor Power-to-Protein de 200 L en CORC/Aarhus
Económico-industrial	Valorización multiproducto, sustitución de precursores fósiles e integración con activos forestales, azucareros, químicos y agroindustriales	Ruta de anilina biobasada de Covestro en planta piloto (Bio4PURDemo, feb-2025); Raízen inaugura Bonfim (may-2024, 82 M L/año de etanol 2G)
Regulatorio y de política pública	Hojas de ruta, garantías de origen, reglas de sostenibilidad y estándares de uso final reducen incertidumbre y pueden crear demanda	Hoja de Ruta del Biogás de España (mar-2022) con garantías de origen; ruta subnacional de la Generalitat Valenciana
Ambiental y circular	Presión climática, jerarquía de residuos, recuperación de fósforo y nitrógeno y exigencia de claims respaldados por ACV	RED III incorpora el uso en cascada de biomasa leñosa; literatura 2025 sobre transformación de digestato y recuperación de fósforo por estruvita, con brechas laboratorio-mercado
Social y de acceso a mercado	Demanda de ingredientes funcionales y alternativas proteicas, con escrutinio sobre precio, calidad sensorial, seguridad y etiquetado	Aceptación variable de proteínas alternativas; escalado de fermentación alimentaria (fermentador de 75.000 L, nov-2024)

Señal emergente destacada — valorización biológica de gases. Una señal científico-tecnológica transversal es el uso de gases de un átomo de carbono (CO₂, CO, CH₄) como materia prima para producir biomasa microbiana, ingredientes, biopolímeros y moléculas de mayor valor. Las plataformas Power-to-Protein y Power-to-Vitamins combinan la conversión biológica de CO₂ e H₂ con una etapa de crecimiento microbiano y han demostrado experimentalmente producción de proteína y folato; en paralelo se ha evaluado la conversión de metano/biogás hacia PHA y ectoína (Molitor et al., 2019; Schmitz et al., 2024; Cantera et al., 2017). Estas rutas amplían el concepto de biorrefinería al conectar energía renovable, carbono gaseoso y nutrientes residuales, pero la evidencia corresponde a pruebas de concepto y operaciones piloto; las barreras incluyen transferencia gas-líquido, seguridad de mezclas, costo y huella de la electricidad, productividad y requisitos regulatorios (detalle de rutas en material suplementario disponible a solicitud). (Horizonte: señal débil, >7 años.)

4.3.4 Casos y desarrollos internacionales relevantes

Los casos se seleccionan por diversidad tecnológica y geográfica, evidencia de escala y pertinencia para Uruguay, distinguiendo su grado de consolidación. Los datos corporativos acreditan fechas, capacidades o estados declarados; no se interpretan como demostración independiente de sostenibilidad u operación estable. La madurez (TRL) se consigna como estimación analítica y los horizontes usan las tres bandas establecidas.

Tabla 4.3.4. Casos y desarrollos internacionales seleccionados.

Caso	Actor	Geografía	Hito	Relevancia para UY y la tendencia	Observaciones
Plataforma de carbono renovable (etanol 2G + polímeros biobasados)	Raízen; Braskem	Brasil	Bonfim (may-2024): 82 M L/año de etanol 2G declarados; Braskem (may-2025): 275.000 t/año de etileno biobasado	Una cadena de caña con activos industriales preexistentes facilita combustibles avanzados y polímeros a escala comercial. TRL 8-9 (config. específicas), ya en adopción.	Fuentes corporativas; sin verificación de utilización efectiva, ACV independiente ni efectos territoriales sobre suelo y agua
Biodigestión de corrientes frigoríficas (Arrebeef Energía)	Arrebeef / INTA	Argentina	Biodigestor anaerobio de 5.000 m ³ sobre corrientes frigoríficas; ~7 t/día de digerido sólido; evaluación de compostaje (2024)	Caso regional conectado con la cadena cárnica (digestión anaerobia + cogeneración + uso agronómico del coproducto); proximidad productiva con Uruguay. TRL 8-9, ya en adopción.	El material no cumplía inicialmente parámetros microbiológicos para uso agronómico; sin verificación de ventas, ACV ni desempeño económico
Fermentación de precisión en infraestructura compartida	Bio Base Europe Pilot Plant; Vivici	Bélgica / Países Bajos	Fermentador demostrativo de 75.000 L (nov-2024); campaña de β -lactoglobulina a escala industrialmente relevante	Muestra el valor de una infraestructura compartida para cruzar la brecha cepa → escalado → validación regulatoria/comercial. TRL 7-8, caso primario.	Demuestra escalabilidad de una configuración; no acredita utilización sostenida, costo competitivo ni ventaja ambiental; no extrapolable a otras proteínas
Biorrefinería urbana con upgrading de biogás (URBIOFIN)	URBIOFIN (consorcio UE)	España / UE	Biorrefinería para la fracción orgánica de residuos municipales; piloto de upgrading fotosintético y conversión de CH ₄ a PHA	Integra tratamiento de residuos + upgrading de biogás + recuperación de nutrientes + bioproductos. TRL 5-6, señal débil / primario.	Escala piloto/semi-industrial; superficie, estacionalidad, ingreso de O ₂ /N ₂ al biometano, cosecha de biomasa y economía limitan la transferencia

4.3.4 Casos y desarrollos internacionales relevantes

Caso	Actor	Geografía	Hito	Relevancia para UY y la tendencia	Observaciones
Tecnología circular de downstream para ácido láctico	Corbion	Tailandia (Rayong)	Planta de ácido láctico de 125.000 t/año (finalización mecánica dic-2023; ramp-up 2024-2025); recuperación que elimina el uso de cal y el coproducto yeso	Innovación de downstream sobre una molécula madura, articulada con la cadena de PLA; no valoriza residuos como fuente de carbono. TRL 8-9, ya en adopción.	Evidencia corporativa; ramp-up ≠ operación estable; declara -30 % cuna-a-puerta pero mayor demanda energética; sin ACV independiente revisado
Etanol de segunda generación desde paja de arroz	Indian Oil Corporation	India (Panipat, Haryana)	Biorrefinería de etanol 2G de 100 kL/día con paja de arroz; capacidad de diseño: 30 M L/año y ~200.000 t de paja/año	Escalado de una ruta basada en residuos agrícolas en una economía emergente; complementa el caso brasileño. TRL 8-9, ya en adopción.	Datos corporativos; planta operó a ~30 % de capacidad en 2024 o permaneció inactiva (Informist Media, nov-2024); transferibilidad a Uruguay sujeta a disponibilidad estacional, logística, competencia por el rastrojo y ACV específico

4.3.5 Panorama de propiedad intelectual y mapa de actores

El análisis cualitativo identifica tipos de actor, geografías de protección y puntos de la cadena de valor donde se concentra la propiedad intelectual (PI); no establece un ranking global ni mide la fortaleza jurídica de carteras. Se realizaron cinco búsquedas separadas (una por sub-línea), consolidadas a nivel de familia de patentes para no sobrecontar una misma invención protegida en varias jurisdicciones (ventana principal 2019–2025, extendida a 2016 en biorrefinerías y bioenergía; se excluyeron aplicaciones farmacéuticas). Como las ecuaciones y ventanas difieren, los resultados permiten reconocer patrones relativos, no comparar volúmenes entre sub-líneas; el rezago de publicación impide leer los años recientes como contracción del campo. (Las cifras exactas del relevamiento —export bruto, corpus depurado y recuentos por titular— se consolidan en el anexo A.2.5.)

Como contraste, se realizó un benchmarking bibliométrico exploratorio en otra base de datos (cinco búsquedas diferenciadas): a orden de magnitud, la química verde y los bioquímicos de plataforma reúnen la mayor cantidad de registros (decenas de miles), seguidos por bioplásticos, bioenergía, biorrefinerías y proteínas alternativas (varios miles cada uno). Estos valores reflejan la amplitud de cada ecuación, no calidad, especialización ni intensidad de patentamiento.

Jurisdicciones y estructura general. En el corpus de patentes, Estados Unidos, la vía PCT y la Oficina Europea de Patentes (EPO) tienen mayor visibilidad en biorrefinerías y bioenergía avanzada, mientras China y Corea del Sur adquieren mayor peso relativo en química verde, proteínas y bioplásticos: un paisaje multipolar. La presencia latinoamericana entre los titulares recurrentes se concentra en Brasil; no se identificaron titulares uruguayos entre los actores de mayor recurrencia, lo que no equivale a ausencia de capacidades o invenciones nacionales (WIPO, 2024; Minesoft, 2026).

Mapa cualitativo por sub-línea (actores ilustrativos y recurrentes en el corpus; no es un ranking de calidad, libertad de operación ni sostenibilidad):

- **Biorrefinerías y valorización integral:** combinación de grupos industriales, proveedores de procesos e instituciones públicas de I+D (dsm-firmenich, Versalis/Eni, Valmet, POET, Iogen, Clariant, IFP Energies Nouvelles, INRAE, Sandia; GranBio como presencia latinoamericana más visible). La PI se concentra en pretratamientos, enzimas, organismos y valorización de fracciones.
- **Bioplásticos y biomateriales:** perfil predominantemente corporativo (LG Chem, Kaneka, BASF); la protección se concentra en formulaciones, propiedades y aplicaciones del material más que en la fermentación del monómero.
- **Proteínas alternativas y agroalimentos funcionales:** coexisten grandes empresas de alimentos e ingredientes (Nestlé, Cargill, dsm-firmenich, Unilever, Roquette) con universidades asiáticas; la fermentación de precisión y la carne cultivada aparecen con menor volumen visible. Como línea de base histórica, Augustin et al. (2024) identificaron 413 familias potencialmente relevantes (2000–2021), con protección que abarca cepas, fermentación, recuperación, purificación, funcionalidad y aplicación alimentaria.
- **Bioenergía y biocombustibles avanzados:** mayor presencia de grandes energéticas (Neste, ExxonMobil, Chevron, Shell, TotalEnergies, Eni, Petrobras), licenciantes (Honeywell UOP, Topsoe, Velocys) y actores de gases/aguas/residuos (Air Liquide, Suez, Veolia,

Anaergia). Dos polos de PI: digestión anaerobia/upgrading de biogás e hidroprocesamiento/coprocesamiento/SAF.

- **Química verde y bioquímicos de plataforma:** perfil más académico (fuerte presencia de universidades chinas; Jiangnan University recurrente); protección en cepas, enzimas, rutas fermentativas, fijación de carbono y recuperación/purificación.

Contraste con las capacidades nacionales. El relevamiento interno identificó grupos con capacidades potencialmente pertinentes —mayor transversalidad en química verde, biorrefinerías y biomateriales; menor institucionalización en proteínas alternativas— en Udelar, UTEC, IIBCE, LATU/Latitud, CTFM y otros actores sectoriales. Permite identificar interlocutores, no acredita por sí mismo infraestructura de escalado, cartera de PI ni experiencia industrial (se retoma en 4.3.8).

Candidatos a profundización cuantitativa posterior. (1) Biogás y digestión anaerobia, por su alineación con residuos agroindustriales nacionales y diversidad de actores; y (2) modelos de biorrefinería territorial o cooperativa, para mapear PI compartida, licenciamiento e infraestructura demostrativa transferible a cadenas de menor escala.

4.3.6 Panorama normativo y de estándares

El panorama combina estrategias públicas, obligaciones legales, normas técnicas, certificaciones voluntarias y mecanismos de acceso a mercado. Una estrategia orienta prioridades, una norma técnica establece un método y una certificación puede aportar evidencia de conformidad, pero ninguna sustituye la autorización del producto, los permisos de planta o las obligaciones jurídicas aplicables. La regulación puede actuar simultáneamente como driver (crea mercados y señales de demanda en SAF, biometano y biomasa certificada) y como barrera (costos de trazabilidad, auditoría y cálculo de emisiones).

El cuadro sintetiza los bloques regulatorios relevados. (El mapa regulatorio completo —128 instrumentos con fuente oficial, 52 clasificados como obligatorios y 29 como certificaciones o esquemas voluntarios— se sistematiza en material suplementario disponible a solicitud. Los conteos describen la matriz del proyecto, no el universo completo de normas, y su vigencia debe verificarse antes de usarla para decisiones regulatorias o comerciales.)

Tabla 4.3.6. Panorama normativo.

Bloque regulatorio	Instrumentos principales	Implicancia estratégica
Orientación estratégica	Uruguay: Estrategia Nacional de Bioeconomía Sostenible (Plan de Acción 2024-2026) y Estrategia Nacional de Economía Circular. UE: marco estratégico de bioeconomía 2025	Alinean agendas de innovación, inversión, circularidad y escalado, pero no habilitan por sí solos productos, plantas ni claims ambientales
Uruguay — residuos y envases	Ley 19.829 (Gestión Integral de Residuos); Ley 17.849 y Decreto 260/007 (envases); requisitos nacionales y MERCOSUR según producto y contacto con alimentos	Condicionan la disponibilidad y valorización legal de residuos, la responsabilidad posconsumo y las habilitaciones. La condición de residuo/subproducto/insumo requiere verificación por corriente y uso
Uruguay — energía y agrocombustibles	Política Energética 2005-2030; Ley 18.195 y Decreto 523/008 (agrocombustibles); líneas prospectivas de la CDN3 hacia 2035	Desde 2022, mínimo obligatorio de alcohol carburante en naftas del 8,5 % y sin mínimo de biodiésel. Aumentar bioetanol, reincorporar biodiésel o incorporar green diesel son propuestas, no obligaciones vigentes
Bioenergía, biometano y SAF	RED III, ReFuelEU Aviation y CORSIA; esquemas ISCC EU e ISCC CORSIA según mercado y materia prima	Definen elegibilidad, trazabilidad, cadena de custodia y cálculo de GEI. Las certificaciones no son intercambiables (ISCC PLUS no sustituye la prueba RED ni la elegibilidad CORSIA). Hay corrientes como el sebo con potencial certificable
Biomateriales, envases y claims	Reglamento (UE) 2025/40 (PPWR), reglas de contacto con alimentos, Directiva (UE) 2024/825, ISO 14021; esquemas voluntarios (ISCC PLUS)	Distingue contenido biobasado, contenido reciclado, biodegradabilidad, compostabilidad y reciclabilidad. El balance de masa no demuestra contenido físico por unidad, ni un atributo equivale a un ACV favorable
Alimentos e ingredientes novedosos	Reglamento (UE) 2015/2283 (Novel Food) y guías de EFSA; marco GRAS (EE. UU.); Reglamento Bromatológico Nacional y normativa MERCOSUR	La evaluación comienza en cepa y sustrato (identidad, modificación genética, impurezas, downstream, alergenicidad, uso previsto, etiquetado). La seguridad del microorganismo no equivale a autorización del ingrediente
Aguas residuales y valorización de efluentes (Uruguay)	Decreto 226/025 (gestión de aguas residuales: vertido, reúso y disposición en terreno)	Condiciona directamente las opciones de valorización de efluentes agroindustriales; la recuperación de materia/energía/agua/nutrientes no exime del cumplimiento de autorizaciones y estándares
Digestato y nutrientes recuperados	Reglamento (UE) 2019/1009 (productos fertilizantes) y marcos nacionales	La existencia de categorías no convierte cualquier digestato en fertilizante comercializable: depende de control de entradas, sanitización, estabilidad, patógenos, metales, trazabilidad y conformidad
Bioinsumos agropecuarios (Uruguay)	Decreto 42/025 (Plan Nacional de Bioinsumos 2025-2029)	Marco de política y fortalecimiento regulatorio para biofertilizantes, inoculantes, control biológico y bioestimulantes; no es autorización general: cada producto debe demostrar eficacia, identidad, calidad, inocuidad y registro
ACV, huellas y reporte	ISO 14025:2026 (EPD), ISO 14040/14044 (ACV), ISO 14067 (huella de carbono), PEF, CSRD/ESRS, ISCC Carbon Footprint	Los claims requieren unidad funcional, límites, asignación, energía, emisiones fugitivas y fin de vida explícitos. Una huella certificada no constituye un ACV multicriterio ni demuestra superioridad ambiental

Declaraciones Ambientales de Producto (EPD) y oportunidad para biomateriales. Las EPD son declaraciones basadas en ACV, verificadas de forma independiente (ISO 14025:2026). En el International EPD System, la mayoría de las EPD corresponde a productos de construcción; en la consulta filtrada por Uruguay se identificaron seis EPD, todas de productos de madera para construcción (Uruply/LUMIN y Arboreal), sin declaraciones nacionales para bioplásticos, químicos biobasados, alimentos, fertilizantes recuperados o bioenergía. La concentración en construcción señala una vía para explorar elementos constructivos de base biológica (madera, fibras, nanocelulosa, lignina, biocompuestos), incorporando desde el diseño la caracterización técnica, el ACV y la eventual EPD; la declaración ambiental no sustituye ensayos de resistencia, comportamiento higrotérmico, reacción al fuego, emisiones o durabilidad (ISO, 2026; EPD International, 2026a, 2026b, 2026c; Mousavi et al., 2025).

Mapa regulatorio en movimiento. El PPWR será aplicable con carácter general desde el 12 de agosto de 2026 (con obligaciones de cronograma posterior); el alcance de la CSRD y de los ESRS fue modificado en 2025–2026; y la European Biotech Act continúa como propuesta legislativa, sin sustituir el procedimiento vigente de Novel Food. El mapa regulatorio se plantea como un mapa vivo de vigilancia, cuya utilidad depende de la revisión periódica de textos consolidados y requisitos del mercado de destino.

4.3.7 Oportunidades y barreras

Las oportunidades se formulan como ventanas condicionadas. En las cinco sub-líneas, la viabilidad depende de la combinación entre materia prima disponible, escala, estabilidad del proceso, infraestructura, demanda u offtake, regulación, trazabilidad y evidencia ambiental y tecnoeconómica. La condición biobasada o el uso de un residuo no garantizan por sí mismos menor impacto, rentabilidad ni circularidad: los resultados dependen de energía, transporte, reactivos, recuperación y purificación, emisiones fugitivas, calidad de coproductos y del producto convencional efectivamente sustituido. La reducción del riesgo de escalado se asocia con una secuencia por etapas —caracterización de la corriente; balance de masa y energía; validación piloto; TEA y ACV con sensibilidad; verificación regulatoria; acuerdo de suministro y offtake; demostración en condiciones representativas—, que ayuda a evitar activos sin materia prima estable, producto especificado o comprador.

Tabla 4.3.7. Oportunidades y barreras

Sub-línea	Ventanas de oportunidad	Barreras
Biorrefinerías y valorización integral	Fraccionamiento de biomasa forestal, arrocería y agroindustrial; integración de digestión anaerobia, carbonización hidrotermal, lignina, biochar y coproductos; aprovechamiento de corrientes de bajo valor	Variabilidad y logística de biomasa; energía, agua, reactivos y solventes; inhibidores; recuperación y purificación; escala mínima; mercados simultáneos; competencia con usos existentes
Bioplásticos y biomateriales	Materiales forestales de mayor valor, nanocelulosa, lignina, biocompuestos, aislantes, paneles, revestimientos; packaging funcional y nichos. La concentración de EPD en construcción abre una vía técnica-ACV-declaración	Precio y escala; desempeño mecánico, al fuego y en vidas útiles largas; humedad y durabilidad; homologación; consumo energético del downstream; infraestructura real de reciclaje/compostaje; riesgo de greenwashing
Proteínas alternativas y agroalimentos funcionales	Ingredientes funcionales, fermentación de precisión, biomasa microbiana, microalgas y valorización de subproductos; foco en productos de mayor valor antes que proteínas masivas	Costo de sustratos y energía; aireación y transferencia de masa; estabilidad de cepas; escalado; recuperación y secado; perfil sensorial; alergenicidad; aceptación; Novel Food/GRAS; acceso a fermentadores piloto
Bioenergía y biocombustibles avanzados	Captura y uso de biogás en industrias cárnicas, lácteas, bebidas, textiles y agropecuarias; codigestión y aprovechamiento térmico in situ; biogás de rellenos y lagunas (sujeto a verificación); upgrading a biometano con demanda estable; SAF y etanol 2G como vigilancia	CAPEX y costo financiero; variación de caudal y carga; H ₂ S, humedad y calidad del gas; seguridad; medición; conexión con demanda térmica/eléctrica; contratos; fugas de metano; gestión del digestato; certificación
Química verde y bioquímicos de plataforma	Recuperación de fósforo y nitrógeno, acondicionamiento de digestatos, ácidos grasos volátiles y de cadena media, ácido láctico residual, enzimas, biosurfactantes y biochar; integración con plantas de tratamiento y cadenas agroindustriales	Corrientes diluidas y heterogéneas; inhibidores y contaminantes; separación y purificación intensivas; especificación comercial constante; recuperación de reactivos; patógenos y metales; regulación y mercado de salida

Tensión transversal de sostenibilidad. El uso de biomasa puede desplazar usos existentes o aumentar la demanda de tierra, agua, energía y nutrientes; los bioplásticos pueden no reciclarse ni biodegradarse en condiciones reales; la fermentación y el downstream pueden dominar el consumo energético; los digestatos pueden transferir patógenos o contaminantes. Por ello, la evaluación requiere explicitar la unidad funcional, los límites, el carbono biogénico, las emisiones fugitivas, la asignación de coproductos y el escenario de sustitución, con ACV desde etapas tempranas; cuando no hay evidencia suficiente, la incertidumbre forma parte explícita de la evaluación.

4.3.8 Implicancias para Uruguay

Capacidades existentes

Uruguay dispone de un marco público explícito para bioeconomía, economía circular y gestión de residuos, y en 2025 el 98 % de la generación eléctrica fue de origen renovable. Estas condiciones pueden actuar como habilitadores para bioprocesos y materiales con consumo eléctrico relevante, pero no demuestran por sí mismas competitividad ni menor impacto: la evaluación depende de los consumos reales de electricidad y calor, la logística, las emisiones fugitivas, el rendimiento de conversión y los productos efectivamente sustituidos.

Alineación con la política climática nacional. La CDN3 refuerza la pertinencia de actuar sobre las fuentes de metano técnicamente capturables, la gestión de residuos y su valorización hacia vectores energéticos (Línea estratégica 5.3, descarbonización de la industria). En 2022 el metano representó el 57,5 % de las emisiones nacionales sin considerar Tierras (91,78 % en Agricultura, Silvicultura y Otros Usos de la Tierra; 7,57 % en Desechos): el peso de la fermentación entérica limita cuánto es recuperable por digestión anaerobia, pero otorga pertinencia a efluentes, estiércoles confinados, residuos orgánicos y tratamientos industriales donde la captura es técnicamente posible.

Capacidades y actores nacionales (relevamiento preliminar). El mapa interno identifica capacidades distribuidas entre UdelaR —en particular el Instituto de Ingeniería Química (IIQ), con el grupo BIOPROA (tratamiento anaerobio, biogás, biohidrógeno, remoción de nutrientes) y el grupo de Ingeniería de Procesos Forestales (biorrefinerías forestales, lignina, hemicelulosas); la Facultad de Química/DETEMA (biocatálisis, química verde, modelado); y las Facultades de Ciencias y Agronomía—, UTEC (sistemas bioelectroquímicos, ácidos carboxílicos, recuperación de fósforo, electrofermentación de suero de queso), LATU/Latitud, INIA, IIBCE, CTFM y CTAguá. INAC aparece como interfaz sectorial por sus capacidades de información, trazabilidad y articulación con la industria frigorífica (subproductos: grasas, huesos, sangre). La identificación permite reconocer interlocutores; la infraestructura de escalado y la disponibilidad efectiva deben verificarse por proyecto.

Bioenergía y biorrefinería como configuración integrada. La digestión anaerobia es madura a nivel internacional, pero su despliegue en Uruguay es acotado y heterogéneo en escala, medición, continuidad y uso del gas. La evidencia otorga mayor relevancia a los pilotos y demostradores medidos que a la mera adquisición de equipos. La evaluación integrada (tratamiento de efluentes + autoconsumo térmico + captura/quema de metano + recuperación de nutrientes + coproductos) vincula directamente bioenergía con biorrefinerías y química verde: una misma intervención puede resolver una carga ambiental y generar energía, nutrientes o moléculas de mayor valor. Como línea de base, el proyecto PNUD URU/18/G31 (2020) caracterizó nueve establecimientos con sistemas anaerobios y estimó, para 2018, una captación del 17,8 % del metano de efluentes industriales frente a una meta nacional del 30 % (cifras históricas, a actualizar).

Señales recientes de infraestructura gasífera. Durante 2025 se informó un acuerdo UTE–Pan American Energy para importar gas natural de Vaca Muerta por el Gasoducto Cruz del Sur (respaldo de la generación térmica en Punta del Tigre), y en 2026 una propuesta de planta de compresión y distribución en Paysandú (en evaluación ambiental). Para el

biometano la implicancia es ambivalente: el desarrollo de capacidades de acondicionamiento, medición, compresión y consumo industrial de gas podría facilitar aplicaciones futuras de biometano, pero un mayor acceso a gas fósil importado y de menor costo eleva la exigencia económica de los proyectos nacionales. Una evaluación del biometano centrada solo en el costo deja fuera la reducción de emisiones fugitivas, el tratamiento de residuos, la seguridad de suministro y el riesgo de consolidar infraestructura fósil de larga duración.

Diversificación de vectores y señal SAF. La Política Energética 2005-2030 enmarca la diversificación de la matriz; la CDN3 identifica para análisis el aumento de bioetanol, la reincorporación de biodiésel, el coprocesamiento de grasas y aceites y el green diesel. Como señal temprana, Uruguay XXI informó en marzo de 2026 el proyecto NovaSAF-1 en Durazno (Syzygy Plasmonics + Estancias del Lago; biogás de residuos de la lechería + electricidad renovable SAF mediante reactores foto-activados; inversión anunciada de USD 60 M, 350.000 gal/año, operación prevista para 2028; acuerdo de offtake con Trafigura firmado). A julio de 2026 no constituye evidencia de operación comercial ni de reducción efectiva de emisiones; es una señal para vigilar la conversión de biogás/biometano hacia combustibles líquidos, tratando al biogás como precursor y no solo como producto final.

Instrumentos habilitantes. Existe un precedente de articulación —el proyecto Biovalor (2014-2020): ocho proyectos demostrativos, >USD 600.000 de apoyo, >USD 1,7 M de inversión privada, tratamiento de ~100.000 t/año de residuos—, cuya lección transferible es el mecanismo (convocatoria competitiva, cofinanciamiento, acompañamiento técnico, datos y retroalimentación a la política), no una tecnología particular. El financiamiento nacional es por etapas y complementario (ANII, FPTA de INIA, Oportunidades Circulares de ANDE, Fondo Industrial), sin un fondo único para toda la trayectoria; su efectividad depende de la correspondencia entre instrumento, contraparte, cofinanciamiento y TRL.

Brechas identificadas y ventanas de oportunidad

Las brechas y capacidades preliminares a resolver se presentan integradas con las ventanas de oportunidad, por sub-línea, en la tabla a continuación.

Tabla 4.3.8. Ventanas con base nacional, capacidades y brechas por sub-línea.

Sub-línea	Ventana con base nacional	Capacidades y brechas preliminares a resolver
Biorrefinerías	Configuraciones ancladas en biomasa forestal, cáscara de arroz y corrientes agroindustriales residuales, con uno o dos coproductos y demanda identificable; biorrefinerías territoriales	Capacidades en caracterización de biomasa, fraccionamiento, procesos bio/termoquímicos y ACV (UdelaR — BIOPROA, Procesos Forestales, Química/DETEMA—, UTEC, LATU/Latitud, INIA). A validar: integración a escala piloto, caracterización de corrientes, pretratamiento y calidad de coproductos, compradores, y viabilidad técnica/económica/ambiental (balances, TEA, ACV)
Biomateriales	Materiales de base biológica desde madera, fibras, lignina, nanocelulosa y residuos, para construcción, envases, recubrimientos y compuestos; la base forestal y las EPD de madera son antecedentes	Brecha principal: pasar de material a producto homologado (desempeño, durabilidad, escala, ACV, eventual EPD). Nodos: Procesos Forestales, CTFM, LATU/Latitud, otros grupos de UdelaR y UTEC
Proteínas alternativas	Ingredientes funcionales, aprovechamiento de subproductos y fermentaciones de nicho, antes que producción masiva indiferenciada	Capacidades en alimentos, sensometría, biotecnología y separación; brechas de escalado, downstream, inocuidad, regulación, perfil sensorial y comprador industrial. Facultades de Química y Ciencias aportan microbiología y selección de microorganismos (a validar infraestructura y escalado)
Bioenergía	Valorización energética de residuos y efluentes de las cadenas láctea, cárnica, porcina, forestal y agroindustrial (metano, digestión anaerobia, autoconsumo térmico, cogeneración; upgrading a biometano donde haya escala y demanda); el valor suele depender del autoconsumo térmico, la mitigación de emisiones y la gestión ambiental más que de vender electricidad	Experiencia operativa y académica (BIOPROA en digestión anaerobia/biogás; UTEC en valorización de residuos). Brechas: caracterización territorial de corrientes, medición de gas y emisiones, demanda energética, gestión de digestatos y viabilidad económica. Agronomía e INAC apoyan la identificación de corrientes
Química verde	Recuperación de nutrientes, digestatos acondicionados, ácidos carboxílicos, enzimas y rutas bioelectroquímicas con corrientes locales; ruta más consistente cuando responde primero a una necesidad local de tratamiento/fertilización y luego demuestra producto comercial, a evaluar contra el Decreto 226/025 y el Plan Nacional de Bioinsumos (§4.3.6)	Capacidades experimentales (electrofermentación en UTEC; recuperación biológica de nutrientes en BIOPROA; biocatálisis y química verde en Química/DETEMA; eficacia agronómica en Agronomía). La ventana comercial depende de concentración, pureza, separación, estabilidad, cumplimiento regulatorio, TEA, ACV y existencia de mercado

Riesgos

El riesgo principal no es dejar de adoptar todas las tecnologías emergentes, sino no generar evidencia nacional suficiente para seleccionar cuáles merecen escalarse. Por un lado, se puede llegar a mantener residuos y efluentes en usos de bajo valor, fragmentar capacidades y aumentar la dependencia de soluciones importadas no adaptadas; el riesgo opuesto es escalar prematuramente y crear activos sin suministro, comprador o conformidad regulatoria.

Elementos de atención

Se registran como elementos de atención, sin carácter prescriptivo:

- **Cartera acotada de demostradores** en condiciones reales, con medición de costos, calidad, emisiones, gobernanza de las corrientes y rutas de mercado, como vía para generar evidencia nacional antes de decidir escalados.
- **Configuración integrada bioenergía–biorrefinería–química verde** (una intervención que resuelva una carga ambiental y genere energía, nutrientes o moléculas), en lugar de un enfoque limitado a una sola tecnología.
- **Línea de ACV comparativos** para las principales corrientes residuales y configuraciones, con datos uruguayos (matriz energética, transporte, insumos, emisiones fugitivas, coproductos, fin de vida), para priorizar, reformular o descartar alternativas antes de invertir a mayor escala.
- **Verificación de corrientes** (caudal/masa, concentración, humedad, estacionalidad, usos actuales, logística): la disponibilidad teórica no equivale a suministro aprovechable, y las estimaciones preliminares sin inventario nacional trazable solo sirven como insumo exploratorio.

5.

Síntesis nacional integrada

5.1 Infraestructura pública con fortalezas, traducción a escala incompleta

El hallazgo que aparece como patrón compartido en las tres tendencias: todas convergen en describir un país con una base de infraestructura pública y de capacidades institucionales diferenciadora a nivel regional, pero con una brecha persistente en la traducción de esa base a escala comercial o de sistema.

- En ganadería y lechería (§4.1), el activo de mayor madurez es el SNIG, junto con el campo natural sin deforestación relevante para el EUDR (detalle de ambos en §5.3). La brecha no es de conocimiento: es de integración (SNIG sin datos genómicos ni de bienestar), de protocolos (MRV de carbono en suelos aún en TRL 5–6 global) y de infraestructura (ausencia de laboratorio IVP certificado).
- En agricultura digital (§4.2), el activo más maduro es también el SNIG, reconocido como la plataforma digital agropecuaria de mayor madurez verificable en el país; junto con las barreras de adopción, el relevamiento identifica como especialmente relevantes la ausencia de un marco nacional de datos agropecuarios y de IA, la escasa validación local de modelos entrenados en otros contextos agroclimáticos, y la limitada investigación académica sistematizada en el área.
- En bioeconomía (§4.3), Uruguay dispone de una matriz eléctrica mayormente renovable (detalle en §5.3), de una política climática que compromete reducciones en metano y gestión de residuos, de capacidades distribuidas en universidades y centros de investigación, y de un precedente de instrumento de demostración (Biovalor). La brecha es de evidencia nacional suficiente para seleccionar antes de escalar: tecnologías globalmente maduras no están necesariamente validadas para las corrientes de biomasa, condiciones logísticas y estructuras de costos uruguayas.

Esta asimetría —infraestructura pública fuerte, traducción a escala incompleta— aparece como una característica estructural del sistema. A diferencia del Reporte 1, donde la brecha principal era de manufactura biológica a escala industrial, en el Reporte 2 la brecha es más difusa: se expresa en arquitecturas de datos no integradas, marcos normativos incompletos, instrumentos de financiamiento fragmentados y escasez de evidencia local antes de invertir.

El país cuenta con una base existente que ya funciona en varios eslabones (ver §5.3): más que partir de cero, el desafío que se observa a lo largo del reporte es de conexión, integración y sostenimiento de lo que ya existe.

5.2 Capacidades habilitadoras transversales

Cuatro capacidades atraviesan más de una tendencia y funcionan, por eso, como plataformas de sistema antes que como activos de un dominio. El SNIG aparece en las tres, con un rol distinto en cada una: trazabilidad productiva y convergencia tecnológica en §4.1 (Sub-línea 5); activo digital de mayor madurez verificable en §4.2.8; y referencia de gobernanza de datos con potencial para articular trazabilidad de biomasa en §4.3 —su expansión hacia «SNIG+» (integrando genómica, bienestar y manejo pastoril) es la decisión de arquitectura de alcance transversal identificada en el reporte y la que menos depende de tecnología propietaria extranjera, aunque no de decisiones de gobernanza de datos (§6.2, elemento 2)—. El INIA es la institución de mayor centralidad: coordina evaluaciones genómicas y el relevamiento de razas en §4.1; opera la integración con Auravant y lidera Converge y «Desafío: trazabilidad animal» en §4.2; y participa en financiamiento sectorial y en la articulación de corrientes de biomasa en §4.3. El campo natural sustenta el sistema ganadero de §4.1, da sentido a las tecnologías de gestión de pasturas en §4.2 (Sub-línea 1 y Sub-línea 4), y es corriente de biomasa y sumidero de carbono para §4.3 —es el activo territorial que atraviesa el reporte y le da su ancla geográfica más específica—. Los instrumentos de financiamiento por etapas (Innovagro, FPTA, Oportunidades Circulares, Fondo Industrial) son, a la vez, una característica del sistema y un área de mejora común a las tres tendencias, retomada en §5.4. El detalle operativo de estos activos —y la evidencia de que ya funcionan hoy— se desarrolla a continuación, en §5.3.

5.3 Activos nacionales verificados

El conjunto analizado revela activos verificados que ya operan y que son la base concreta sobre la que pueden construirse las convergencias del §5.5. Esta subsección detalla los activos que se mencionan de forma abreviada en el resto del reporte:

- **SNIG:** operativo desde 2006, trazabilidad electrónica individual obligatoria del 100 % del rodeo bovino, 12 millones de animales registrados —la serie más profunda de la región, con Argentina iniciando en 2026 y Brasil desplegando entre 2027 y 2032. No es un proyecto: es infraestructura pública en funcionamiento, y su diferencial regional es la antigüedad y la continuidad de la serie, no la exclusividad (§4.2.8).
- **Campo natural sin deforestación:** ~10 millones de hectáreas de pastizal nativo sin deforestación posterior al 31/12/2020 (MapBiomass Uruguay, INIA/UdelaR/MA, 2023: ~9,7 M ha / 55,5 %; MA Uruguay, 2020: ~10,2 M ha / 60 %). Facilita acreditar el requisito de no deforestación del EUDR, pero no equivale a la certificación: el reglamento exige además diligencia debida, legalidad de uso del suelo y geolocalización trazable de cada establecimiento (§6.2, elemento 1). La trazabilidad individual del rodeo sobre campo natural no deforestado es la combinación que da su especificidad al caso uruguayo: no es la trazabilidad por sí sola —hacia la que la región converge— sino su coincidencia con una base territorial de pastizal nativo que no requiere demostrar conversión reciente.
- **Evaluaciones genómicas nacionales:** INIA coordina las evaluaciones de Aberdeen Angus, Hereford y Holando con genotipos SNP incorporados desde 2024, habilitando la selección para rasgos de producción, eficiencia y sostenibilidad (bajo metano, tolerancia al calor) en el horizonte próximo.

- **Programa de carne carbono-neutral:** certificación cradle-to-gate por LSQA que vincula el sistema de base pastoril con los mercados de sostenibilidad verificada. Es evidencia de que la cadena «campo natural + trazabilidad individual + certificación de emisiones» ya tiene producto comercial.
- **Auravant + EfiCarne, OptiFert, CuantAgua:** la integración de modelos de INIA en una plataforma privada de gestión agropecuaria (FMIS), con más de 700.000 hectáreas monitoreadas en Uruguay, es el caso nacional más documentado de agricultura digital en funcionamiento.
- **Programa Converge y convocatoria «Desafío: trazabilidad animal»:** mecanismos institucionalizados de validación en terreno (living lab) para tecnologías AgTech, con convocatorias anuales abiertas internacionalmente y financiamiento hasta la validación. «Desafío» recibió 34 postulaciones de distintos países y financia el 100 % del costo de validación para los seleccionados.
- **Matriz eléctrica mayormente renovable** (98 % en 2025): condición habilitante para bioprocesos con consumo eléctrico relevante y para el argumento ambiental de la bioeconomía, aunque no garantiza por sí misma competitividad ni menor impacto sin respaldo en ACV.

5.4 Brechas comunes

Las tres tendencias tropiezan con familias de brecha relacionadas, aunque no idénticas:

- **Brecha de validación contextual.** La brecha más transversal: las tres tendencias documentan tecnologías globalmente maduras cuyos resultados en condiciones uruguayas —sistemas extensivos de pastoreo, corrientes de biomasa locales, contexto agroclimático específico— no están validados. En §4.1, es la administración de aditivos antimetanogénicos en pastoreo extensivo y los protocolos MRV de carbono en suelos; en §4.2, es la validación de modelos de IA entrenados en otros contextos; en §4.3, es la validación de configuraciones de biorrefinerías y bioenergía en condiciones reales antes de escalar.
- **Brecha de arquitectura de datos.** El SNIG registra identidad y trazabilidad de movimientos y eventos, pero no integra datos genómicos, bienestar fisiológico ni manejo pastoril; la ausencia de un marco nacional de datos agropecuarios y de un estándar de interoperabilidad entre plataformas (FMIS, SNIG, registros de INIA) limita la funcionalidad del conjunto. Esta brecha afecta especialmente a T4 y T5.
- **Brecha de marco normativo.** A julio de 2026, Uruguay no cuenta con una ley de inteligencia artificial vigente, con un estándar nacional de interoperabilidad de datos agropecuarios, ni con un protocolo oficial de MRV para carbono en suelos ganaderos. Estas ausencias no bloquean la adopción tecnológica en el corto plazo, pero sí limitan la escalabilidad y la certidumbre de largo plazo para inversores y actores privados.
- **Brecha de adaptación climática.** Las tres tendencias abordan el clima casi exclusivamente en clave de mitigación —metano entérico, carbono en suelos, CDN3, ACV, mercados de carbono— y muy poco en clave de adaptación. Es una asimetría que el reporte registra, porque el mayor choque reciente del sistema agroalimentario uruguayo

fue de adaptación, no de mitigación: la sequía de 2022-2023 —con emergencia agropecuaria vigente entre octubre de 2022 y diciembre de 2023— produjo pérdidas estimadas por OPYPA en USD 1.175 millones, repartidas entre agricultura de secano (USD 490 M), ganadería de carne (USD 440 M), praderas (USD 145 M) y lechería (USD 100 M) (MGAP-OPYPA, 2023). Varias de las tecnologías que el reporte caracteriza —teledetección y monitoreo de pasturas y agua (§4.2), gemelos digitales y modelado clima-cultivo (§4.2, Sub-línea 5), genética de tolerancia al calor (§4.1)— son también tecnologías de adaptación, pero el reporte no las lee en esa clave.

5.5 Áreas de convergencia entre tendencias

Zonas donde dos o más tendencias se cruzan y abren oportunidades específicas:

- **La sostenibilidad verificable como propuesta de valor exportadora.** La demanda global de productos agropecuarios con atributos de sostenibilidad certificados —carbono-neutral, sin deforestación, con bienestar animal verificado— cruza las tres tendencias: T4 (carne y leche de bajo metano con ACV y trazabilidad individual); T5 (datos digitales que hacen posible la certificación a escala y a bajo costo); y T6 (valorización de residuos que cierra el ciclo y mejora el perfil ambiental). La convergencia no es conceptual: ya tiene producto comercial (§5.3) y una ventana de tiempo definida (EUDR diciembre 2026). Lo que todavía no está articulado es su tratamiento como propuesta de sistema.
- **El SNIG como columna vertebral digital del agro uruguayo.** Además del rol descrito en §5.2, la expansión hacia SNIG+ es, entre las brechas identificadas, la que menos depende de tecnología propietaria extranjera —aunque no de resolver antes su gobernanza de datos (§6.2, elemento 2)— y la que, al resolverse, habilitaría la lectura integrada de las tres tendencias en un mismo sistema de información.
- **La economía del carbono agropecuario como mercado emergente integrador.** Los mercados de bonos de carbono y los pagos por servicios ecosistémicos cruzan T4 (reducción de metano entérico + secuestro de carbono en suelos de campo natural) y T6 (captura de metano de efluentes, biogás como sustitución de combustibles fósiles). La CDN3 de Uruguay compromete reducciones en ambas fuentes. Con protocolos de MRV validados y el SNIG como registro, Uruguay reuniría los activos para posicionarse como referente regional en la monetización de servicios ecosistémicos ganaderos. La magnitud efectiva de esa oportunidad depende de que existan protocolos de MRV validados: sin ellos

no hay activo negociable, cualquiera sea el tamaño potencial del mercado (§6.2, elemento 5).

- **El modelo living lab como ventaja de proceso.** Los mecanismos Converte y «Desafío: trazabilidad animal» (T5; detalle en §5.3) son la expresión más consolidada de un modelo de validación en terreno que podría extenderse a T4 (validación de tecnologías de pastoreo sostenible) y T6 (pilotos demostrativos de bioenergía y biorrefinería). Uruguay opera de facto como plaza de validación regional, sin que el reporte identifique una política de CTI que articule esa función explícitamente.

La Figura 5.1 representa estas convergencias en conjunto: las cuatro capacidades habilitadoras transversales (§5.2) que alimentan las tres tendencias, y las cuatro áreas donde estas se cruzan.

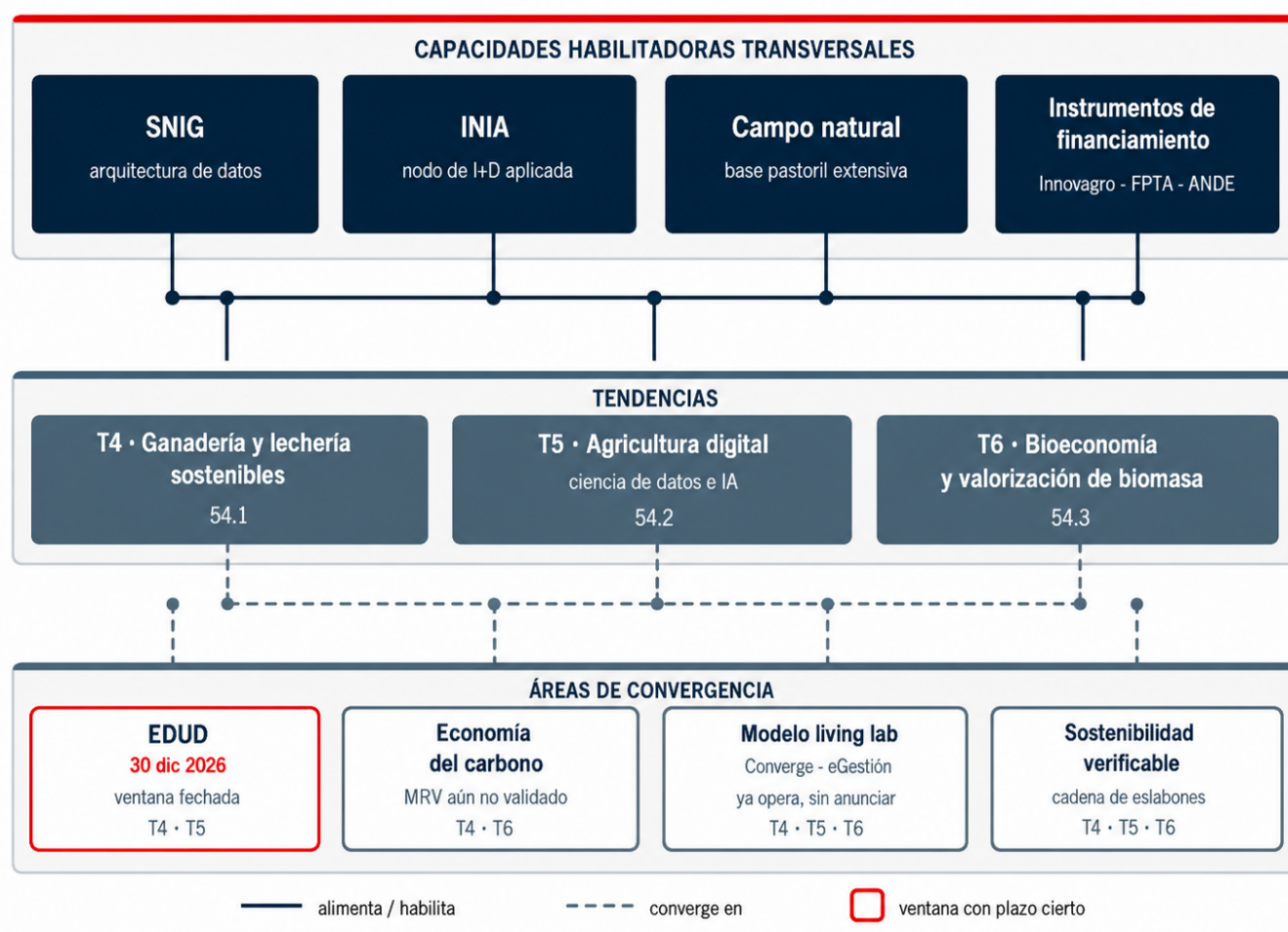


Figura 5.1. Áreas de convergencia entre las tres tendencias del Reporte 2 y las capacidades habilitadoras del sistema agroalimentario nacional
Elaboración: OGI-PTCP, 2026.

Figura 5.1. Áreas de convergencia entre las tres tendencias del Reporte 2 y las capacidades habilitadoras del sistema agroalimentario nacional.

El mapa de actores nacionales consolidado y el marco normativo uruguayo aplicable al conjunto del dominio se encuentran en los Anexos A.3 y A.4, por su extensión y su carácter de referencia más que de análisis.

5.6 Posicionamiento internacional

Dónde participa hoy Uruguay. Referente regional en trazabilidad electrónica individual del ganado bovino, adoptada con dos décadas de anticipación respecto del inicio de Argentina (2026) y el cronograma de Brasil (2027–2032); participante en iniciativas internacionales de mejora de la ganadería sostenible (evaluaciones Interbull/Interbeef, Global Methane Genetics Initiative, programa de carne carbono-neutral LSQA); plaza de validación abierta a actores de toda la región a través de Converge y «Desafío» (§5.3); y destinatario activo de estándares y marcos de la UE (EUDR, Data Act, AI Act, Reglamento de Máquinas) que moldean las condiciones de acceso a mercados y la gobernanza de datos.

Posiciones singulares del país. Tres combinaciones no tienen, hasta donde releva este reporte, un equivalente regional de igual madurez: la del SNIG con el campo natural sin deforestación (§5.1, §5.3), del lado de la producción animal; la del modelo living lab institucionalizado —Converge + «Desafío» (§5.3)—, que posiciona al país de facto como plaza de validación regional aunque el rol todavía no se enuncie como estrategia; y la de la matriz eléctrica mayormente renovable (§5.3), una condición favorable para bioprocesos y manufactura con consumo eléctrico significativo, en la medida en que el análisis de ciclo de vida del proceso respalde esa ventaja (§4.3.8).

Posibles lecturas de inserción. Más que competir con los grandes volúmenes de producción o desarrollar tecnología de punta propia en todos los frentes, la lectura de conjunto habilita distintos ejes posibles de inserción de Uruguay en el sistema de innovación agroalimentario global. Se dejan planteados como insumo para la discusión de SENCI, no como una hoja de ruta cerrada:

1. Un perfil de producción sostenible verificable (carne y leche carbono-neutras, campo natural certificado, trazabilidad individual): activo ya construido, al que le faltaría completar la capa geoespacial y los protocolos de MRV.
2. Un perfil de prestador de servicios de validación regional (living lab): activo emergente, que hoy no se encuentra enunciado explícitamente como estrategia de posicionamiento.
3. Un posible nodo de convergencia entre datos, trazabilidad y sostenibilidad verificable: posición que solo emerge de la integración de las tres tendencias y que ningún actor aislado podría ocupar por sí solo.

Los elementos de atención que se desprenden de esta lectura se desarrollan en la sección 6.

6

Conclusiones y elementos de atención

6.1 Conclusiones

La síntesis de §5 encuentra, al leer las tres tendencias en conjunto, una base de infraestructura y capacidades públicas que diferencia a Uruguay a nivel regional —SNIG, campo natural, matriz eléctrica renovable, INIA, mecanismos de validación en terreno como Converge y «Desafío: trazabilidad animal» (§5.1, §5.3)— y una brecha compartida de integración, no de tecnología, entre esa base y su traducción a escala comercial o de sistema (§5.4). El asunto con la ventana temporal más inmediata —la combinación SNIG + campo natural sin deforestación + trazabilidad individual frente a la ventana que abre el Reglamento de Deforestación de la UE (EUDR)— ya se presentó en §1 y se desarrolla en §5.1 y §5.3; no se repite aquí. El instrumento Biovalor (T6) ilustra el mismo patrón desde otro ángulo: el mecanismo —convocatoria competitiva, cofinanciamiento, seguimiento de datos— es más transferible que la tecnología en sí (§5.4).

Lo que aporta esta sección es la lectura hacia adelante: los activos, los instrumentos y las instituciones ya existen; lo que el reporte registra como oportunidad de mejora es su articulación: integración de la arquitectura SNIG+, definición del marco de datos e IA, validación de los protocolos de MRV de carbono y consolidación del modelo living lab como posible estrategia de posicionamiento (§5.4, §5.5). Todo ello dentro de una ventana de tiempo concreta: la agenda EUDR marca diciembre de 2026 como hito de mercado, mientras el ecosistema AgTech regional se ordena en el mismo período.

6.2 Elementos de atención

Los elementos se presentan ordenados desde el más inmediato en términos de ventana de acción hasta el más estructural en términos de horizonte e impacto. No constituyen recomendaciones prescriptivas; son observaciones para la discusión.

1. La ventana EUDR es concreta y tiene plazo.

El Reglamento de Deforestación de la UE (Reglamento UE 2023/1115, modificado por el Reglamento UE 2025/2650) hará exigibles sus obligaciones desde el 30 de diciembre de 2026 para operadores medianos y grandes, y desde el 30 de junio de 2027 para personas físicas y micro y pequeñas empresas.

La obligación de diligencia debida recae sobre el operador que introduce el producto en el mercado de la UE o lo exporta desde ella, no sobre cada lote embarcado desde el país de origen: ese operador presenta una declaración de diligencia debida antes de la puesta en el mercado, y aguas abajo solo el primer operador o comerciante debe conservar los números de referencia de esas declaraciones. Para la carne bovina, el reglamento exige acreditar que el producto no proviene de tierras deforestadas después del 31/12/2020 y aportar la geolocalización de todos los establecimientos en los que el ganado fue mantenido. En la

práctica, el requisito se traslada por vía contractual al exportador uruguayo, que debe poder aportar esa información.

Algunas cifras: En 2025 el sector cárnico uruguayo exportó USD 3.328 millones, de los cuales la Unión Europea representó cerca de USD 700 millones (~21 %), con un crecimiento del 81 % respecto del año anterior (INAC, 2026). Ese es el flujo directamente expuesto al cumplimiento del EUDR. No implica que ese valor se pierda si la capa geoespacial no está lista —el cumplimiento puede resolverse operador por operador—, pero sí que el costo de transacción de hacerlo de forma fragmentada recae sobre el segmento de mayor valor unitario de la exportación cárnica, y en el destino que más creció.

Uruguay reúne la base: el campo natural no deforestado es un activo real, y el SNIG permite la trazabilidad individual del bovino a su predio. La brecha no es de activo, sino de capa geoespacial: a julio de 2026, no existe un registro formal público de polígonos de predios ganaderos integrado con el SNIG. Sin esa capa, el cumplimiento documental de la EUDR depende del esfuerzo individual de cada exportador, con el riesgo de asimetrías y costos de transacción innecesarios. La construcción de esa capa —que involucraría al MGAP, al SNAP y al sistema catastral— se destaca, dentro del conjunto de elementos de este reporte, por su ventana de tiempo acotada y su efecto transversal sobre las tres tendencias.

2. La arquitectura SNIG+ se destaca por su alcance transversal y su menor dependencia externa.

El SNIG es la infraestructura digital agropecuaria de mayor madurez del país y de la región. Ampliarlo hacia un SNIG+ —con integración de datos genómicos, bienestar fisiológico y manejo pastoril en tiempo real— se destaca, dentro del reporte, como una decisión de arquitectura de datos especialmente relevante por su mayor alcance transversal: habilita la selección genómica para rasgos de sostenibilidad (§4.1), reduce el costo de certificación de la trazabilidad de cadena (§4.2), y provee la base de datos para protocolos de MRV de carbono en suelo y del hato (§4.3). Es además, entre las brechas identificadas, la que menos depende de tecnología propietaria extranjera: la infraestructura base (el SNIG) es pública, pero los datos a integrar no lo son en su totalidad —hoy están distribuidos entre productores, laboratorios privados, INIA y plataformas FMIS—, de modo que la interoperabilidad es tanto un tema de gobernanza como de titularidad de datos, no solo de capacidad técnica.

Una eventual ampliación requeriría definir un estándar nacional de interoperabilidad de datos agropecuarios entre el SNIG, las plataformas FMIS privadas (Auravant, etc.) y los registros de INIA, con AGESIC como actor clave para la gobernanza. Antes de resolver la interoperabilidad técnica, la arquitectura tendría que responder preguntas que el reporte deja abiertas para la discusión, no resueltas: quién es titular de cada dato —el productor, el laboratorio, la plataforma privada o el Estado—; bajo qué consentimiento se comparte; con qué finalidad se reutiliza; qué garantías de ciberseguridad protegen un repositorio ampliado; y qué incentivos tendrían productores y plataformas privadas para aportar sus datos a un estándar común. Postergar esa decisión podría tener un costo compuesto: cada año sin estándar es, potencialmente, un año más de datos que se acumulan en sistemas no interoperables.

Alcance de la decisión. El perímetro de las cadenas que quedarían cubiertas por una arquitectura SNIG+ combina, en valor exportado 2025, los USD 3.328 millones del sector

cárnico (INAC, 2026) y los USD 962,7 millones de la cadena láctea (INALE, 2026). Del lado de las contrapartes, la concentración juega a favor: la lechería tiene una industria dominante —Conaprole, con 76,6 % del valor exportado (MGAP-OPYPA, 2025)— y la cadena cárnica un interlocutor sectorial establecido en INAC. La concentración puede facilitar la coordinación en el nivel industrial, aunque la gobernanza del estándar deberá contemplar también al conjunto de productores, laboratorios y plataformas involucrados. El reporte no estima el costo de la inversión: hacerlo requiere un relevamiento técnico específico que excede una vigilancia tecnológica.

3. El modelo living lab uruguayo ya opera en algunos casos, sin encontrarse enunciado de forma explícita como estrategia

El programa Converge y la convocatoria «Desafío: trazabilidad animal» (INIA + ANII + BID Lab) constituyen la expresión más consolidada de un modelo de validación en terreno —living lab— que ya funciona y que tiene demanda internacional: la convocatoria «Desafío» recibió 34 postulaciones de distintos países (§4.2.8). El mismo mecanismo es aplicable a tecnologías de T4 (validación de aditivos antimetanogénicos en pastoreo extensivo, pulsadores en ordeño robotizado, collares de precisión) y de T6 (pilotos demostrativos de bioenergía, verificación de biorrefinerías de pequeña escala).

La observación es que este modelo ya es una ventaja de proceso —Uruguay como plaza de validación regional— pero no se encuentra a la fecha enunciado explícitamente como política de CTI, ni tiene una coordinación formal entre las convocatorias existentes, ni se proyecta a las otras tendencias.

4. La ausencia de norma vinculante de IA y de datos agropecuarios limita la escalabilidad, no la adopción inicial.

A julio de 2026, Uruguay no cuenta con una ley de inteligencia artificial vigente y no tiene un estándar nacional de interoperabilidad de datos agropecuarios. Esto no impide que Auravant opere sus 700.000 hectáreas, ni que los modelos EfiCarne-OptiFert-CuantAgua funcionen, ni que INIA integre genotipos SNP. Lo que limita es la escalabilidad y la certidumbre para la inversión privada a largo plazo: sin un marco de responsabilidad sobre los datos generados por sensores y plataformas privadas en predios agropecuarios, sin reglas de portabilidad y acceso entre plataformas, y sin un marco de IA que regule el uso de modelos de decisión en contextos agropecuarios, la adopción masiva de tecnologías digitales crea dependencias de plataformas privadas (principalmente extranjeras) difíciles de gestionar ex post.

La Estrategia Nacional de Datos y de Inteligencia Artificial, aprobada por el Comité Estratégico del Sector Público en noviembre de 2024 (AGESIC, 2024), es la plataforma para incorporar explícitamente el dominio agropecuario.

5. La economía del carbono agropecuario tiene activos, pero no tiene protocolos.

Los mercados de carbono y los pagos por servicios ecosistémicos (PSE) son una intersección real entre T4 (reducción de metano entérico + secuestro en suelos de campo natural) y T6 (captura de metano de efluentes ganaderos, biogás como sustitución de fósiles, balance ambiental de biorrefinerías). La CDN3 de Uruguay compromete reducciones en ambas fuentes. Los activos —campo natural, SNIG, evaluaciones genómicas con rasgo de metano, instrumentos de demostración en biogás— están disponibles.

Lo que falta son protocolos de MRV (monitoreo, reporte y verificación) de carbono en suelos ganaderos validados para el extensivo pastoril uruguayo. El propio marco global está en transición: Verra desactivó en mayo de 2024 la metodología VM0026 de manejo sostenible de pastizales —la referencia histórica del segmento— y orienta los proyectos hacia la VM0032, de alcance más acotado (ajuste de fuego y pastoreo); Gold Standard opera una metodología marco de carbono orgánico del suelo con módulos por práctica. A julio de 2026 ninguna de esas vías está validada para sistemas pastoriles extensivos de base natural, con alta incertidumbre en la permanencia del carbono en suelos sometidos a variabilidad climática. Sin protocolos nacionales validados —lo cual requiere parcelas de largo plazo, no solo pilotos de campaña—, las certificaciones de carbono de carne o de suelos pastoriles siguen siendo un argumento de posicionamiento más que un activo verificable. El desarrollo de esos protocolos es un trabajo de varios años, lo que amplía la brecha entre su eventual inicio y su disponibilidad efectiva.

6. La dependencia tecnológica es un potencial riesgo sistémico

Las tres tendencias describen adopción creciente de tecnologías cuya cadena de provisión es enteramente externa: conectividad LEO (Starlink, sin alternativa nacional a su escala), maquinaria conectada (marcas internacionales con datos en servidores propietarios), plataformas FMIS privadas sin mandato de portabilidad de datos, y modelos fundacionales de IA (LLM agropecuarios) entrenados y ofrecidos desde centros de datos extranjeros.

Esta dependencia no es evitable ni necesariamente problemática en el corto plazo: no parece razonable, por escala, que Uruguay desarrolle infraestructura equivalente (conectividad satelital, modelos fundacionales). Acuerdos de portabilidad de datos entre plataformas, un marco de responsabilidad sobre los datos agropecuarios generados en suelo uruguayo, y diversificación deliberada de proveedores son elementos que atenuarían el riesgo sin requerir que Uruguay desarrolle infraestructura propia. La política de datos agropecuarios (elemento 4) es también, en ese sentido, una vía de gestión de la dependencia tecnológica.

7. La sostenibilidad verificable es la propuesta de valor más potente, pero muestra algunos desafíos

La narrativa más potente vinculada a las tendencias revisadas —«carne y leche sostenibles verificables, producidas en campo natural sin deforestación, con trazabilidad individual y huella de carbono certificada»— presenta algunos desafíos en términos de respaldo actual: requiere que simultáneamente (i) la capa geoespacial EUDR esté completa (elemento 1), (ii) los protocolos de MRV de carbono estén validados (elemento 5), (iii) el SNIG+ integre datos genómicos y de bienestar (elemento 2), y (iv) la cadena de certificación sea accesible no solo para los grandes exportadores sino para el conjunto del sistema.

Si alguna de esas piezas falta, la narrativa de sostenibilidad verificable pierde cohesión y queda como argumento de posicionamiento sin respaldo técnico completo.

Fuentes

Las referencias se encuentran organizadas por tendencia (§4.1, §4.2 y §4.3) en formato APA 7.^a edición y ordenadas alfabéticamente. Se optó por esa disposición —en lugar de una lista maestra al cierre— para que cada tendencia pueda leerse, revisarse y citarse de forma autónoma. Las secciones de integración (§1, §5 y §6) no incorporan fuentes propias: se construyen sobre el material ya verificado y citado en el §4, de modo que toda referencia del reporte es localizable en una de esas tres listas.

Composición del corpus documental. Las tres listas reúnen 148 referencias: 65 en la Tendencia 4, 62 en la Tendencia 5 y 21 en la Tendencia 6, entre publicaciones científicas, patentes y bases de propiedad intelectual, marcos normativos y agencias regulatorias, documentos de política pública e institucionales, e informes sectoriales y de organismos internacionales. Adicionalmente, se consignan 46 fuentes específicas que respaldan las estimaciones de TRL de las tablas 4.1.2, 4.2.2 y 4.3.2 (23, 5 y 18 respectivamente), listadas aparte por no estar citadas en el cuerpo del texto.

Referencias tendencia 4 (Intensificación sostenible de sistemas ganaderos y lecheros)

ABS Global. (2024). Sexed semen with proven fertility — SexCEL. <https://www.absglobal.com/services/sexcel/>

Ahmed, E., & Nishida, T. (2024). The anti-methanogenic efficacy of *Asparagopsis armata*: Could it be attributable solely to its bromoform content? *Animal Feed Science and Technology*, 318, 116118. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2024.116118>

Amorim, H. C. S., Ashworth, A. J., O'Brien, P. L., Thomas, A. L., Runkle, B. R. K., & Philipp, D. (2023). Temperate silvopastures provide greater ecosystem services than conventional pasture systems. *Scientific Reports*, 13(1), 18658. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-45960-0>

Badhan, A., Wang, Y., Terry, S. A., et al. (2025). Invited review: Interplay of rumen microbiome and the cattle host in modulating feed efficiency and methane emissions. *Journal of Dairy Science*, 108(6), 5489–5501. [https://www.journalofdairyscience.org/article/S0022-0302\(25\)00216-4/fulltext](https://www.journalofdairyscience.org/article/S0022-0302(25)00216-4/fulltext)

Barboza, N. (2025). Cadena láctea: situación y perspectivas. En *Anuario OPYPA 2025*. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, Oficina de Programación y Política Agropecuaria. <https://descargas.mgap.gub.uy/OPYPA/Anuarios/Anuarioopya2025/CP/6/CP6web/CP6Cadenalactea.pdf>

Beauchemin, K. A., Ungerfeld, E. M., Eckard, R. J., & Wang, M. (2020). Review: Fifty years of research on rumen methanogenesis: Lessons learned and future challenges for mitigation. *Animal*, 14(S1), s2–s16. <https://doi.org/10.1017/S1751731119003100>

Bezos Earth Fund & Global Methane Hub. (2025, 8 de abril). Bezos Earth Fund and Global Methane Hub launch \$27.4M initiative to breed low-methane livestock across four continents. <https://www.globenewswire.com/news-release/2025/04/08/3057415/0/en/bezos-earth-fund-and-global-methane-hub-launch-27-4m-initiative-to-breed-low-methane-livestock-across-four-continents.html>

Bord Bia. (2023). Progress update report 2023 — Origin Green. <https://www.origingreen.ie/globalassets/bb-progress-report-2023-002.pdf>

- Bord Bia. (s.f.). Sustainable Beef and Lamb Assurance Scheme (SBLAS). Recuperado el 10 de julio de 2026, de <https://www.bordbia.ie/farmers-growers/get-involved/become-quality-assured/sustainable-beef-and-lamb-assurance-scheme-sblas/>
- CH4 Global. (2024, octubre). Whole Asparagopsis seaweed much more effective than bromoform alone in reducing cattle methane emissions, study finds. <https://ch4global.com/2024/10/21/whole-asparagopsis-seaweed-much-more-effective-than-bromoform-alone-in-reducing-cattle-methane-emissions-study-finds/>
- Cimadori, M., Di Concetto, A., & Grieger, K. (2025). The protection of selectively bred and gene edited farm animals under EU law. *European Journal of Risk Regulation*. <https://ges.research.ncsu.edu/wp-content/uploads/2025/03/Cimadori-et-al.-Gene-edited-animals-2025.pdf>
- Climate & Clean Air Coalition. (2024). Uruguay reduces livestock emissions while increasing productivity in a CCAC-supported pilot project. <https://www.ccacoalition.org/news/uruguay-reduces-livestock-emissions-while-increasing-productivity-ccac-supported-pilot-project>
- DairyNZ. (s.f.). Emissions4Pasture. <https://www.dairynz.co.nz/research/science-projects/emissions4pasture/>
- Department of Agriculture, Fisheries and Forestry (DAFF), Australia. (2023). NLIS Database Uplift Project. Australian Government. <https://www.agriculture.gov.au/biosecurity-trade/market-access-trade/national-traceability/nlis-database-uplift-project>
- Dini, Y., Gere, J., Briano, C., Manetti, M., Juliarena, P., Picasso, V., Gratton, R., & Astigarraga, L. (2012). Methane emission and milk production of dairy cows grazing pastures rich in legumes or rich in grasses in Uruguay. *Animals*, 2(2), 288–300. <https://doi.org/10.3390/ani2020288>
- DSM-Firmenich. (2024). Methane-reducing feed ingredient Bovaer® ready for US market launch. <https://our-company.dsm-firmenich.com/en/our-company/news/press-releases/2024/methane-reducing-feed-ingredient-bovaer-ready-for-us-market-launch.html>
- Durmic, Z., Duin, E. C., Bannink, A., Belanche, A., Carbone, V., Carro, M. D., Crüsemann, M., Fievez, V., Garcia, F., Hristov, A., Joch, M., Martinez-Fernandez, G., Muetzel, S., Ungerfeld, E. M., Wang, M., & Yáñez-Ruiz, D. R. (2025). Feed additives for methane mitigation: Recommendations for identification and selection of bioactive compounds to develop antimethanogenic feed additives. *Journal of Dairy Science*, 108(1), 302–321. <https://doi.org/10.3168/jds.2024-25045>
- Džermeikaitė, K., Šidlauskaitė, M., Antanaitis, R., & Anskienė, L. (2025). Enhancing genomic selection in dairy cattle through artificial intelligence: Integrating advanced phenotyping and predictive models to advance health, climate resilience, and sustainability. *Dairy*, 6(5), 50. <https://doi.org/10.3390/dairy6050050>
- EFSA Panel on Genetically Modified Organisms. (2025). New developments in biotechnology applied to animals: An assessment of the adequacy and sufficiency of current EFSA guidance for animal risk assessment. *EFSA Journal*, 23(8), e9566. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2025.9566>
- Elanco. (2024). Elanco announces FDA has completed review of Bovaer®, first-in-class methane-reducing feed ingredient, for U.S. dairy industry. <https://www.elanco.com/us/newsroom/press-releases/elanco-announces-fda-has-completed-review-of-bovaer-first-in-class-methane-reducing-feed-ingredient-for-u-s-dairy-industry>

- European Food Safety Authority. (2021). Safety and efficacy of a feed additive consisting of 3-nitrooxypropanol (Bovaer® 10) for ruminants for milk production and reproduction. EFSA Journal, 19(11), e06905. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8603004/>
- FAO. (2024). Better livestock production improves family well-being and acts against climate change in Uruguay. <https://www.fao.org/newsroom/story/Better-livestock-production-improves-family-well-being-and-acts-against-climate-change-in-Uruguay/en>
- Farmers Weekly. (2026). Doubts persist after Bovaer study finds no clear impact. <https://www.fwi.co.uk/livestock/health-welfare/doubts-persist-after-bovaer-study-finds-no-clear-impact>
- FDA. (2022). Risk assessment summary — V-006378 PRLR-SLICK cattle [Determinación de bajo riesgo]. U.S. Food and Drug Administration. <https://www.fda.gov/media/155706/download>
- Global Methane Hub. (2023, 17 de mayo). Major livestock producing countries commit to mitigate methane in agriculture. <https://www.globalmethanehub.org/2023/05/17/major-livestock-producing-countries-commit-to-mitigate-methane-in-agriculture/>
- Global Roundtable for Sustainable Beef (GRSB). (2024). GRSB 2024: How cattle countries around the world are reporting beef sustainability. Beef Central. <https://www.beefcentral.com/news/grsb-2024-how-cattle-countries-around-the-world-are-reporting-beef-sustainability/>
- Halter. (2024a, agosto). Halter's virtual fencing technology launches in the US. AgTech Navigator. <https://www.agtechnavigator.com/Article/2024/08/16/Halter-s-virtual-fencing-technology-launches-in-the-US/>
- Halter. (2024b). Virtual fencing and pasture management. <https://www.halterhq.com/>
- INIA Uruguay. (2024a). Evaluación genómica de la raza Aberdeen Angus. <https://inia.uy/noticias/evaluacion-genomica-de-la-raza-aberdeen-angus>
- INIA Uruguay. (2024b). Evaluación genómica de la raza Holando. <https://www.inia.uy/index.php/evaluacion-genomica-de-la-raza-holando>
- INIA Uruguay. (2024d). Intensificación sostenible de la ganadería extensiva uruguaya, 2019–2024. <https://inia.uy/proyectos/intensificacion-sostenible-de-la-ganaderia-extensiva-uruguaya-2019-2024>
- Iniciativa MapBiomass Uruguay. (2023). MapBiomass Uruguay: Mapa de cobertura y uso del suelo 2022 [Factsheet, Colección 1]. INIA, Universidad de la República y Ministerio de Ambiente. https://uruguay.mapbiomas.org/wp-content/uploads/sites/6/2023/12/Factsheet_MapBiomass_Uruguay-col-1.pdf
- Instituto Internacional de Cooperación para la Agricultura. (2024). Traceability, a source of pride for Uruguay's livestock subsector. <https://iica.int/en/press/news/la-trazabilidad-el-orgullo-de-la-ganaderia-uruguaya-2/>
- Instituto Nacional de Carnes. (2024). Uruguay beef: Compliance with EUDR. <https://www.inac.uy/innovaportal/file/26975/1/uruguay-beef---eudr.pdf>

- Instituto Nacional de Carnes. (2026a). Anuario estadístico 2025. <https://www.inac.uy/innovaportal/file/26288/1/anuario-estadistico-2025.pdf>
- Instituto Nacional de la Leche. (2026). Estadísticas de la cadena láctea: remisión y exportaciones 2025. INALE. <https://www.inale.org/estadisticas/>
- International Committee for Animal Recording. (2024). ICAR guidelines for the recording of production, health and other data in animals [Guidelines, secciones 1–23]. ICAR. Recuperado el 30 de julio de 2026, de <https://www.icar.org/index.php/publications-technical-materials/>
- International Embryo Technology Society. (2024). 2024 statistics of embryo production and transfer in domestic farm animals. https://www.iets.org/Portals/0/Documents/Public/Committees/DRC/IETS_Data_Retrieval_Report_2024.pdf
- Jordon, M. W., et al. (2024). A restatement of the natural science evidence base concerning grassland management, grazing livestock and soil carbon storage. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 291, 20232669. <https://doi.org/10.1098/rspb.2023.2669>
- Khanal, P., Johnson, J., Gouveia, G., Utsunomiya, A. T. H., Ross, P., & Deeb, N. (2024). Genomic evaluation of residual feed intake in US Holstein cows: Insights into lifetime feed efficiency. *Frontiers in Genetics*, 15, 1462306. <https://doi.org/10.3389/fgene.2024.1462306>
- Lactanet. (2023, 21 de marzo). Introducing methane efficiency! Lactanet Canada. <https://lactanet.ca/en/introducing-methane-efficiency/>
- Lajtha, K., & Silva, L. C. R. (2022). Grazing cattle, well-managed or not, is unlikely to increase soil carbon sequestration. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119(33), e2203408119. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9335331/>
- Lucas, K. R. G., Johnson, J. R. R., Khanal, P., Deeb, N. J., Ross, P., & Kebreab, E. (2026). Improving feed efficiency with the EcoFeed index reduces greenhouse gas emissions in dairy cattle. *Journal of Dairy Science*, 109(4), 4087–4097. <https://doi.org/10.3168/jds.2025-27149>
- Maduro Dias, C. S. A. M., Nunes, H., & Borba, A. (2024). Near-infrared spectroscopy in animal nutrition: Historical insights, technical principles, and practical applications. *Analytica*, 5(4), 481–498. <https://doi.org/10.3390/analytica5040033>
- Meo-Filho, P., Ramirez-Agudelo, J. F., & Kebreab, E. (2024). Mitigating methane emissions in grazing beef cattle with a seaweed-based feed additive: Implications for climate-smart agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 121(50), e2410863121. <https://doi.org/10.1073/pnas.2410863121>
- Meuwissen, T. H. E., Hayes, B. J., & Goddard, M. E. (2001). Prediction of total genetic value using genome-wide dense marker maps. *Genetics*, 157(4), 1819–1829. <https://doi.org/10.1093/genetics/157.4.1819>
- Ministerio de Ambiente, Uruguay. (2020). El estado del campo natural en el Uruguay. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/2021-08/El%20Estado%20del%20Campo%20Natural.pdf>
- Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, Oficina de Programación y Política Agropecuaria. (2023). Anuario OPYPA 2023: impacto de la sequía 2022–2023 en el sector agropecuario. MGAP. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/comunicacion/publicaciones/anuario-opypa-2023>
- Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. (2023). Uruguay presentó en Roma el documento «Emisiones de metano en la ganadería y arroz». <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca>

ca/comunicacion/noticias/uruguay-presento-roma-documento-emisiones-metano-ganaderia-arroz

Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. (2024a). Sistema Nacional de Información Ganadera (SNIG). MGAP. Recuperado el 30 de julio de 2026, de <https://www.snig.gub.uy/>

Misztal, I., Legarra, A., & Aguilar, I. (2009). Computing procedures for genetic evaluation including phenotypic, full pedigree, and genomic information. *Journal of Dairy Science*, 92(9), 4648–4655. <https://doi.org/10.3168/jds.2009-2064>

Montagnini, F., Ibrahim, M., & Murgueitio, E. (2013). Silvopastoral systems and climate change mitigation in Latin America. *Bois et Forêts des Tropiques*, 316, 3–16. <https://drflorenciamontagnini.wordpress.com/wp-content/uploads/2015/03/montagnini-et-al-2013-sps-climate-mitigation.pdf>

MSD Animal Health. (2024, octubre). Allflex Livestock Intelligence SenseHub Cow Calf launch. <https://www.merck-animal-health-usa.com/producers/cattle/allflex-livestock-monitoring/>

Parlamento Europeo. (2023). Revision of EU legislation on animal welfare: Protection of animals during transport. Legislative Train Schedule. <https://www.europarl.europa.eu/legislative-train/theme-a-european-green-deal/file-revision-of-eu-legislation-on-animal-welfare>

Pathways to Dairy Net Zero. (2025). Guidelines released for research and implementation of feed additives to reduce ruminant methane emissions. <https://pathwaystodairynetzero.org/news/guidelines-released-for-research-and-implementation-of-feed-additives-to-reduce-ruminant-methane-emissions/>

Sanguinetti, L., Sanguinetti, V. M., Remnant, J., Orsel, K., Ganshorn, H., Tang, M., & Lhermie, G. (2025). A scoping review on the impact of rotational grazing in beef cattle systems on greenhouse gas emissions, soil health, plant diversity, and plant productivity parameters. *Canadian Journal of Animal Science*, 105, 1–17. <https://doi.org/10.1139/cjas-2025-0010>

Seidel, G. E. (2014). Update on sexed semen technology in cattle. *Animal*, 8(1), 1–5. <https://doi.org/10.1017/S1751731114000202>

Sprenkle-Hyppolite, S., Croll, D., Ryan, C., & Byers, E. (2024). Updated silvopasture mitigation potential in Project Drawdown (v1.2). Project Drawdown. <https://drawdown.org/explorer/deploy-silvopasture>

Teagasc. (s.f.). Teagasc — Agriculture and Food Development Authority. <https://teagasc.ie/>

Tuytens, F. A. M., Molento, C. F. M., & Benaissa, S. (2022). Twelve threats of precision livestock farming (PLF) for animal welfare. *Frontiers in Veterinary Science*, 9, 889623. <https://doi.org/10.3389/fvets.2022.889623>

VikingGenetics. (2025). New Nordic Methane Index to reduce cow emissions by 20%. <https://www.vikinggenetics.us/news/nordic-methane-index>

Vytelle. (2024). Accelerating genetic selection in cattle by maximizing IVF investment. <https://vytelle.com/accelerating-genetic-selection-in-cattle-by-maximizing-ivf-investment/>

Waters, S. M., Roskam, E., Smith, P. E., et al. (2025). International Symposium on Ruminant Physiology: The role of rumen microbiome in the development of methane mitigation strategies for ruminant livestock. *Journal of Dairy Science*, 108(7), 7591–7606. <https://doi.org/10.3168/jds.2024-25778>

WOAH. (2024). Terrestrial Animal Health Code, Section 7: Animal welfare (10.^a ed., 10 de junio de 2024). https://www.woah.org/fileadmin/Home/eng/Health_standard_s/tahc/2023/chapitre_aw_introduction.pdf

World Resources Institute (WRI). (2024). Cutting cattle methane through feed additives: Lessons from early adoption and the road ahead. <https://www.wri.org/technical-perspective/cattle-methane-inhibitors-early-adoption-next-steps>

Fuentes de la tabla 4.1.2

Estas referencias respaldan la estimación de TRL de tecnologías específicas de la Tabla 4.1.2 que no quedó incorporada a la lista alfabética anterior.

Angel, T. R., & Mahendran, S. A. (2024). Comparison of manual and automated body condition scoring of commercial dairy cattle. *Veterinary Record*, e4535. <https://doi.org/10.1002/vetr.4535>

Bernabucci, G., Evangelista, C., Girotti, P., Viola, P., Spina, R., Ronchi, B., Bernabucci, U., Basiricò, L., Turini, L., Mantino, A., Mele, M., & Primi, R. (2025). Precision livestock farming: An overview on the application in extensive systems. *Italian Journal of Animal Science*, 24(1), 859–884. <https://doi.org/10.1080/1828051X.2025.2480821>

Bó, G. A., Huguenine, E., de la Mata, J. J., Núñez-Olivera, R., Baruselli, P. S., & Menchaca, A. (2018). Programs for fixed-time artificial insemination in South American beef cattle. *Animal Reproduction*, 15(Supl. 1), 791–801. <https://doi.org/10.21451/1984-3143-AR2018-0025>

Bó, G., Baruselli, P., Menchaca, A., & Mapletoft, R. (2019). Evolution of synchronization protocols and use of fixed time artificial insemination in beef cattle in South America. *Clinical Theriogenology*, 11(3), 255–263. <https://doi.org/10.58292/ct.v11.9497>

Colombi, D., Perini, F., Bettini, S., Mastrangelo, S., Abeni, F., Conte, G., Marletta, D., Cassandro, M., Bernabucci, U., Ciampolini, R., & Lasagna, E. (2024). Genomic responses to climatic challenges in beef cattle: A review. *Animal Genetics*, 55(6), 854–870. <https://doi.org/10.1111/age.13474>

Gouveia, C., Huyser, C., Egli, D., & Pepper, M. S. (2020). Lessons learned from somatic cell nuclear transfer. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(7), 2314. <https://doi.org/10.3390/ijms21072314>

Hart, K. J., Jones, H. G., Waddams, K. E., Worgan, H. J., Zweifel, B., & Newbold, C. J. (2019). An essential oil blend decreases methane emissions and increases milk yield in dairy cows. *Open Journal of Animal Sciences*, 9(3), 259–267. <https://doi.org/10.4236/ojas.2019.93022>

IICA. (2023). XII Congreso Internacional de Sistemas Silvopastoriles. <https://iica.int/es/events/xii-congreso-internacional-de-sistemas-silvopastoriles/>

INIA Uruguay. (s.f.). Plataforma de visualización y seguimiento forrajero satelital en campo natural. <https://inia.uy/tecnologias/plataforma-visualizacion-seguimiento-forrajero-satelital-en-campo-natural>

Lamanna, M., Bovo, M., & Cavallini, D. (2025). Wearable collar technologies for dairy cows: A systematized review of the current applications and future innovations in precision livestock farming. *Animals*, 15(3), 458. <https://doi.org/10.3390/ani15030458>

Mogas, T., García-Martínez, T., & Martínez-Rodero, I. (2024). Methodological approaches in vitrification: Enhancing viability of bovine oocytes and in vitro-produced embryos. *Reproduction in Domestic Animals*, 59(S1), e14623. <https://doi.org/10.1111/rda.14623>

- Nasir, M., Rodríguez-Prado, M., Simoni, M., Martín-Orúe, S. M., Pérez, J. F., & Calsamiglia, S. (2025). Optimizing essential oil mixtures: Synergistic effects on cattle rumen fermentation and methane emission. *Animals*, 15(14), 2105. <https://doi.org/10.3390/ani15142105>
- Piñeiro-Vázquez, A. T., Canul-Solís, J. R., Alayón-Gamboa, J. A., Chay-Canul, A. J., Ayala-Burgos, A. J., Aguilar-Pérez, C. F., Solorio-Sánchez, F. J., & Ku-Vera, J. C. (2015). Potencial de los taninos condensados para reducir las emisiones de metano entérico y sus efectos en producción de rumiantes. *Archivos de Medicina Veterinaria*, 47(3), 263–272. <https://www.scielo.cl/pdf/amv/v47n3/art02.pdf>
- Plan Agropecuario. (2024). Innovación en sistemas silvopastoriles. *Revista Plan Agropecuario*. <https://revista.planagro.uy/index.php/2024/09/27/innovacion-en-sistemas-silvopastoriles/>
- Salek, F., Guest, A., Johnson, C., Kastelic, J. P., & Thundathil, J. (2025). Factors affecting the success of ovum pick-up, in vitro production and cryopreservation of embryos in cattle. *Animals*, 15(3), 344. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC11815730/>
- Siachos, N., Lennox, M., Anagnostopoulos, A., Griffiths, B., Neary, J., Smith, R. F., & Oikonomou, G. (2023). Development and validation of a fully automated 2-dimensional imaging system generating body condition scores for dairy cows using machine learning. *Journal of Dairy Science*. <https://doi.org/10.3168/jds.2023-23894>
- Silvestri, G., Canedo-Ribeiro, C., Serrano-Albal, M., Labrecque, R., Blondin, P., Larmer, S. G., Marras, G., Tutt, D. A. R., Handyside, A. H., Farré, M., Sinclair, K. D., & Griffin, D. K. (2021). Preimplantation genetic testing for aneuploidy improves live birth rates with in vitro produced bovine embryos. *Cells*, 10(9), 2284. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8465548/>
- SmaXtec. (2024). Early detection for dairy cows with bolus technology. <https://www.smaxtec.com/en/>
- SwissInfo. (s.f.). Lanzan un plan de monitoreo de pastoreo para reducir las emisiones en Sudamérica. <https://www.swissinfo.ch/spa/lanzan-un-plan-de-monitoreo-de-pastoreo-para-reducir-las-emisiones-en-sudamerica/89987861>
- Verma, S., Akpensuen, T. T., Wolfram, S., et al. (2024). Investigating the efficacy of purified tannin extracts from underutilized temperate forages in reducing enteric methane emissions in vitro. *Scientific Reports*, 14, 12578. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-63434-9>
- Williams, S. R. O., Hannah, M. C., Eckard, R. J., Wales, W. J., & Moate, P. J. (2020). Supplementing the diet of dairy cows with fat or tannin reduces methane yield, and additively when fed in combination. *Animal*, 14(S3), s464–s472. <https://doi.org/10.1017/S1751731120001032>
- Woodward, S. L., Waghorn, G. C., & Laboyrie, P. G. (2004). Condensed tannins in birdsfoot trefoil (*Lotus corniculatus*) reduce methane emissions from dairy cows. *Proceedings of the New Zealand Society of Animal Production*, 64, 160–164. <https://www.nzsap.org/proceedings/2004/condensed-tannin-s-birdsfoot-trefoil-lotus-corniculatus-reduce-methane-emissions>
- Zhao, X., Zhang, S., & Zhang, Y. (2025). Tannin-based strategies for mitigating greenhouse gas emissions through nitrogen and carbon metabolism in ruminants. *Agriculture*, 15(21), 2234. <https://doi.org/10.3390/agriculture15212234>

Referencias tendencia 5 (Agricultura digital, ciencia de datos e inteligencia artificial)

- Abdelrahman, M., Issa, S., Elsayed Ali, M., Alotaibi, J., & Alshanbari, F. (2026). From machine learning to digital twin integration for livestock production and research. *Frontiers in Veterinary Science*, 13, 1744053. <https://doi.org/10.3389/fvets.2026.1744053>
- AGCO Corporation. (2023a). AGCO to acquire Trimble Ag assets and technologies through a joint venture focused on next-generation precision Ag technology [Comunicado de prensa]. <https://investors.agcocorp.com/news-releases/news-releases-details/agco-acquire-trimble-ag-assets-and-technologies-through-joint>
- AGCO Corporation. (2023b). AGCO continues technology transformation to become an industry leader in smart farming solutions [Comunicado de prensa]. <https://investors.agcocorp.com/news-releases/news-releases-details/agco-continues-technology-transformation-become-industry-leader>
- Agencia de Gobierno Electrónico y Sociedad de la Información y del Conocimiento. (2024). Inteligencia artificial. AGESIC. <https://www.gub.uy/agencia-gobierno-electronico-sociedad-informacion-conocimiento/tematica/inteligencia-artificial>
- Agencia Espacial Europea. (2025). Copernicus Sentinel-1D and Sentinel-5A provide first images. Comisión Europea, EU Space Programme. https://defence-industry-space.ec.europa.eu/copernicus-sentinel-1d-and-sentinel-5a-provide-first-images-marking-important-advances-earth-and-2025-11-26_en
- Agencia Nacional de Investigación e Innovación. (2025). Informe de cierre — Evaluación de proyectos Innovagro 2025. ANII. https://anii.org.uy/upcms/files/llamados/informecierre/1761670971_informe-cierre-evaluacion-proyectos-innovagro-20251020.pdf
- Agencia Nacional de Investigación e Innovación, Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria, & Instituto Nacional de Carnes. (2025). Desafío: trazabilidad animal [Fondo concursable]. ANII. <https://anii.org.uy/apoyos/innovacion/495/desafio-trazabilidad-animal/>
- Agencia Nacional de Investigación e Innovación. (2026b, 26 de febrero). MGAP, INIA y ANII lanzan convocatoria del Fondo Sectorial Innovagro 2026. <https://www.anii.org.uy/noticias/388/mgap-inia-y-anii-lanzan-convocatoria-del-fondo-sectorial-innovagro-2026/>
- American Spray Drone Coalition. (2025). 2025 U.S. Agricultural Spray Drone Industry Survey [Reporte de impacto]. <https://americanspraydronecoalition.com/wp-content/uploads/2026/01/2025-ASDC-Impact-Survey-Results.pdf>
- Ammer, S., Lambertz, C., & Gauly, M. (2016). Is reticular temperature a useful indicator of heat stress in dairy cattle? *Journal of Dairy Science*, 99(12), 10067–10076. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-11282>
- Atik, C., & Urdu, D. (2025). Bridging the interoperability gap in digital agriculture: Insights from policy, practice, and standards [Informe técnico]. Wageningen University & Research. <https://edepot.wur.nl/696641>
- Auravant. (s.f.-a). Tres apps para mejorar la producción agropecuaria. Auravant Blog. Recuperado el 27 de julio de 2026, de <https://www.auravant.com/blog/agricultura-de-precision/tres-app-para-mejorar-la-produccion-agropecuaria/>

- Auravant. (s.f.-b). «Queremos que Auravant sea la plataforma líder de agricultura digital en Europa y Latinoamérica» [Entrevista]. *madri+d*. Recuperado el 27 de julio de 2026, de <https://www.madrimasd.org/queremos-que-auravant-sea-plataforma-lider-agricultura-digital-en-europa-latinoamerica>
- Balkrishna, A., Pathak, R., Kumar, S., Arya, V., & Singh, S. K. (2023). A comprehensive analysis of the advances in Indian digital agricultural architecture. *Smart Agricultural Technology*, 5, 100318. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2023.100318>
- Bilal, M., Shah, A. A., Abbas, S., & Khan, M. A. (2025). High-performance deep learning for instant pest and disease detection in precision agriculture. *Food Science & Nutrition*, 13(9), e70963. <https://doi.org/10.1002/fsn3.70963>
- Brown-Brandl, T. M., & Tao, J. (2025). ASAS-NANP Symposium: mathematical modeling in animal nutrition: harnessing real-time data and digital twins for precision livestock farming. *Journal of Animal Science*, 103. <https://doi.org/10.1093/jas/skaf138>
- Cal, A. (2022). Metodología automática para mapeo y seguimiento de la condición de cultivos agrícolas durante la zafra a partir de imágenes satelitales y aprendizaje automático en Uruguay [Tesis de maestría, dir. P. Musé, codir. J. Preciozzi]. INIA. <https://inia.uy/metodologia-automatica-para-mapeo-y-seguimiento-de-la-condicion-de-cultivos-agricolas-durante-la>
- Cámara Uruguaya de Tecnologías de la Información. (s.f.). AgriTech — Mesa de trabajo. CUTI. Recuperado el 27 de julio de 2026, de <https://cuti.org.uy/mesas/agritech/>
- CEOS. (s.f.). Sentinel CHIME-A satellite mission summary. CEOS EO Handbook Database. Recuperado el 8 de agosto de 2026, de <https://database.eohandbook.com/database/missionsummary.aspx?missionID=1047>
- CHCNAV. (2025). RTK technology in precision agriculture [Nota técnica]. CHC Navigation.
- CNH Industrial. (2025). CNH and Starlink announce satellite connectivity partnership [Via Satellite, comunicado de prensa corporativo, mayo de 2025].
- Consejo de la Unión Europea. (2025b). Deforestation regulation: Council and Parliament agree to postpone application dates [Comunicado de prensa, diciembre de 2025]. <https://www.consilium.europa.eu>
- Deere & Company. (2025). John Deere reveals new autonomous machines & technology at CES 2025 [Comunicado de prensa]. PRNewswire. <https://www.prnewswire.com/news-releases/john-deere-reveals-new-autonomous-machines--technology-at-ces-2025-302342436.html>
- Deere & Company. (s.f.). Precision Upgrades. Recuperado en julio de 2026 de <https://www.deere.com/en/technology-products/precision-ag-technology/precision-upgrades/>
- Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit. (2025, diciembre). Disrupting agricultural advisory: The rise of generative AI tools for smallholder farmers [Informe]. <https://www.bmz-digital.global/wp-content/uploads/2025/12/Gates-Foundation-GIZ-and-CLEAR-Global-2025.-Disrupting-agricultural-advisory-utilizing-generative-AI.pdf>
- DTN / Progressive Farmer. (2025, 12 de marzo). John Deere's next-generation perception system brings autonomy to tillage. <https://www.dtnpf.com/agriculture/web/ag/equipment/article/2025/03/12/john-deeres-next-generation-system>

- Facultad de Ingeniería, Universidad de la República. (s.f.). Navegación de robots en entornos agropecuarios para la estimación de cantidad y calidad de cosecha frutícola utilizando visión 3D y aprendizaje profundo [Proyecto MAgro, Grupo MINA]. <https://www.fing.edu.uy/es/node/51897>
- Government of India, Press Information Bureau. (2025). Digital Agriculture Mission: Tech for transforming farmers' lives. <https://www.pib.gov.in/PressReleaselframePage.aspx?PRID=2051719>
- Grand View Research. (2025). Farm management software market size, share & trends analysis report. Grand View Research Inc.
- Hiphen. (2025, junio). Hiphen acquires Aurea Imaging. Hiphen Blog.
- Instituto de Bienestar e Investigación Animal de Flandes. (2025). 15 landen bouwen gemeenschappelijke Europese landbouw dataspace. <https://ilvo.vlaanderen.be/en/news/15-landen-bouwen-gemeenschappelijk-europese-landbouw-dataspace>
- Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria. (2026a). Convocatoria a proyectos para el Fondo Sectorial Innovagro. <https://www.inia.uy/noticias/convocatoria-proyectos-par-a-el-fondo-sectorial-innovagro>
- Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria. (s.f.-b). Converge — Living lab institucionalizado.
- KPMG Uruguay. (2025). Inteligencia artificial con principios: Hacia una regulación equilibrada [Monitor legal]. https://assets.kpmg.com/content/dam/kpmg/uy/pdf/Monitor/MS_100625_1111.pdf
- la diaria. (2025, 11 de noviembre). Gobierno uruguayo impulsa una ley de regulación de la inteligencia artificial para «equilibrar las fuerzas» entre las grandes corporaciones y los ciudadanos. <https://ladiaria.com.uy/futuro/articulo/2025/11/gobiern-o-uruguayo-impulsa-una-ley-de-regulacion-de-la-inteligencia-artificial-para-equilibrar-las-fuerzas-entre-las-grandes-corporaciones-y-los-ciudadanos/>
- Larramendy, P., Pitta, H., Ferreira Rivaben, I., Motta, M., Peloché, D., Pintos, M., Sabia, L., & Courdin, V. (2025). Digitalization in Uruguayan agriculture: Digital technologies in livestock, dairy, and crop production. *Agrociencia Uruguay*, 29, e1531. <https://doi.org/10.31285/AGRO.29.1531>
- Legal Advantage. (2025, mayo). Cultivating innovation: The landscape of agricultural patents. Legal Advantage Blog. <https://legaladvantage.net/2025/05/cultivating-innovation-on-the-landscape-of-agricultural-patents/>
- Marzoa Tanco, M., Trinidad Barnech, G., Benavides, F., & Tejera, G. (2025). Integrating advanced robotics for precision agriculture and sustainability: A MINA efforts divulgation compendium. *Agrociencia Uruguay*, 29, e1528. <https://doi.org/10.31285/AGRO.29.1528>
- Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. (2024a). Sistema Nacional de Información Ganadera (SNIG). MGAP. Recuperado el 30 de julio de 2026, de <https://www.snig.gub.uy/>
- Morgan Pereira, P. H., Costa Piazza, G., Usman, K., Da Silveira, L. S. C., Cella Ceriotti, V., De Souza Pazin, Y., & Pignaton De Freitas, E. (2026). Digital twins in agriculture: A systematic literature review on modeling, semantics, and interoperability. *Smart Agricultural Technology*, 14, 102283. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2026.102283>
- OHB System AG. (2025). Hyperspectral future: Satellite data for smart agriculture [Proyecto HyLAP, con DLR]. <https://www.ohb.de/en/news/hyperspectral-future-satellite-data-for-smart-agriculture>
- OMMAX. (2025). KKR invests in smaXtec to accelerate global growth and US expansion. https://www.ommax.com/en_en/insights/newsroom/kkr-invests

ts-in-smartec-to-accelerate-global-growth-and-us-expansion

- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos. (2025). AI in agriculture: Progress in implementing the European Union coordinated plan on artificial intelligence (Vol. 2). OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/3ac96d41-en>
- Panda, D., Mohanty, S., Das, S., Senapaty, J., Sahoo, D. B., Mishra, B., Baig, M. J., & Behera, L. (2025). From spectrum to yield: Advances in crop photosynthesis with hyperspectral imaging. *Photosynthetica*, 63(2), 196–233. <https://doi.org/10.32615/ps.2025.012>
- People's Daily Online. (2022, 1 de julio). China's agricultural drones cover 71 million hectares in 2021. <http://en.people.cn/n3/2022/0701/c90000-10117605.html>
- Radočaj, D., Šiljeg, A., Marinović Jerolimov, D., & Jurišić, M. (2026). Advancing crop simulation through integration with remote sensing and digital twins: A review. *Agriculture*, 16(4), 417. <https://doi.org/10.3390/agriculture16040417>
- Ram, B. G., Oduor, P., Igathinathane, C., Howatt, K., & Sun, X. (2024). A systematic review of hyperspectral imaging in precision agriculture: Analysis of its current state and future prospects. *Computers and Electronics in Agriculture*, 222, Article 109037. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109037>
- RobotToday. (2026, marzo). Weeding and crop management robots market report. RobotToday.
- smaXtec. (s.f.). About us. Recuperado en julio de 2026 de <https://www.smaxtec.com/en/about-us/>
- Sosnoskie, L. M., Bill, K., Butler-Jones, A., Bouchelle, W. M., & Besançon, T. E. (2025). Deep learning-based laser weed control compared to conventional herbicide application across three vegetable production systems. *Pest Management Science*, 81(8), 4169–4176. <https://doi.org/10.1002/ps.8912>
- Stara. (2026, junio). Autopropulsados Stara incorporarán conectividad Starlink de fábrica desde 2026. Basenor.
- Strine, J., Fiechter, C., & Lowenberg-DeBoer, J. (2025). The economics of US row crop production with large-scale autonomous machines. *Smart Agricultural Technology*, 12, 101599. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.101599>
- Subeesh, A., & Chauhan, N. (2026). Agricultural digital twin for smart farming: A review. *Green Technologies and Sustainability*, 4(2), 100299. <https://doi.org/10.1016/j.grets.2025.100299>
- Tey, Y. S., Brindal, M., Wong, S. Y., Ardiansyah, Ibragimov, A., & Yusop, M. R. (2024). Evolution of precision agricultural technologies: A patent network analysis. *Precision Agriculture*, 25(1), 376–395. <https://doi.org/10.1007/s11119-023-10076-y>
- TractorEvolution. (2025, diciembre). Tractors 2026 [Informe de mercado]. TractorEvolution.
- Ugwu, O. P.-C., Ogenyi, F. C., Alum, E. U., Eze, V. H. U., Basajja, M., Ugwu, J. N., Ugwu, C. N., Ejemot-Nwadiaro, R. I., Okon, M. B., Egba, S. I., & Ejim, U. D. (2025). Implementing artificial intelligence and machine learning algorithms for optimized crop management: A systematic review on data-driven approach to enhancing resource use and agricultural sustainability. *Cogent Food & Agriculture*, 11(1), Article 2569982. <https://doi.org/10.1080/23311932.2025.2569982>
- Upadhyay, A., Chandel, N. S., Singh, K. P., Chakraborty, S. K., Nandede, B. M., Kumar, M., & Elbeltagi, A. (2025). Deep learning and computer vision in plant disease detection: A comprehensive review of techniques, models, and trends in precision agriculture. *Artificial Intelligence Review*, 58(3). <https://doi.org/10.1007/s10462-024-11100-x>

- Uruguay XXI. (2025). Uruguay se prepara para ser un hub AgTech que impulsa el futuro del agro. <https://www.uruguayxxi.gub.uy/es/noticias/articulo/uruguay-se-prepara-para-ser-un-hub-agtech-que-impulsa-el-futuro-del-agro/>
- Uskenov, R., Issabekova, S., Mukhanbetkaliyeva, A., Akibekov, O., & Zhagipar, F. (2024). Digital technologies in dairy cattle breeding to improve the reproductive function of cows and heifers: A case study in Northern Kazakhstan. *Veterinary World*, 17(10), 2385–2397. <https://doi.org/10.14202/vetworld.2024.2385-2397>
- Val, I. L. (2026). The EU AI Act and the food system: How the European Union AI Act applies to agrifood. *European Journal of Risk Regulation*, 17(1), 329–349. <https://doi.org/10.1017/err.2025.10058>
- Verdon, M., Hunt, I., & Rawnsley, R. (2024). The effectiveness of a virtual fencing technology to allocate pasture and herd cows to the milking shed. *Journal of Dairy Science*, 107(8), 6161–6177. <https://doi.org/10.3168/jds.2023-24537>
- World Intellectual Property Organization. (2024). Patent landscape report: Agrifood. WIPO. <https://doi.org/10.34667/tind.49840>

Fuentes de la tabla 4.2.2

Estas referencias respaldan la estimación de TRL de tecnologías específicas de la Tabla 4.2.2 que no quedó incorporada a la lista alfabética anterior.

- USDA Economic Research Service. (2024, diciembre). America's farms and ranches at a glance. United States Department of Agriculture.
- Hirigoyen Domínguez, A. (2021). Application of satellite images and LiDAR data for modeling and inventory of Eucalyptus spp in Uruguay: Doctoral thesis abstract. *Agrociencia Uruguay*, 25(Supl.), Artículo e1521. <https://doi.org/10.31285/AGRO.25.1521>
- Tan, S., Pei, J., Zou, Y., Fang, H., Wang, T., & Huang, J. (2025). Improving rice yield prediction with multi-modal UAV data: Hyperspectral, thermal, and LiDAR integration. *Geo-spatial Information Science*. <https://doi.org/10.1080/10095020.2025.2535524>
- Uribeetxebarria, A., Castellón, A., Elorza, I., & Aizpurua, A. (2022). Intra-plot variable N fertilization in winter wheat through machine learning and farmer knowledge. *Agronomy*, 12(10), Artículo 2276. <https://doi.org/10.3390/agronomy12102276>
- Samreen, T., Tahir, S., Arshad, S., Kanwal, S., Anjum, F., Nazir, M. Z., & Sidra-Tul-Muntaha. (2023). Remote sensing for precise nutrient management in agriculture. *Environmental Sciences Proceedings*, 23(1), Artículo 32. <https://doi.org/10.3390/environsciproc2022023032>

Referencias tendencia 6 (Bioeconomía, agroalimentos y valorización de biomasa)

- Augustin, M. A., Hartley, C. J., Maloney, G., & Tyndall, S. (2024). Innovation in precision fermentation for food ingredients. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 64(18), 6218–6238. <https://doi.org/10.1080/10408398.2023.2166014>
- Benavides, P. T., Lee, U., & Zarè-Mehrjerdi, O. (2020). Life cycle greenhouse gas emissions and energy use of polylactic acid, bio-derived polyethylene, and fossil-derived polyethylene. *Journal of Cleaner Production*, 277, 124010. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124010>
- Cantera, S., Lebrero, R., Rodríguez, E., García-Encina, P. A., & Muñoz, R. (2017). Continuous abatement of methane coupled with ectoine production by *Methylobacterium alcaliphilum* 20Z in stirred tank

- reactors: A step further towards greenhouse gas biorefineries. *Journal of Cleaner Production*, 152, 134–141. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.123>
- Circular Bio-based Europe Joint Undertaking. (2026). Amendment 1 Work Programme 2026 (Governing Board Decision CBE-GB-4/26). https://www.cbe.europa.eu/system/files/2026-05/1st%20AM%20CBE%20JU%20AWP%202026%20_Adopted%20%281%29.pdf
- Comisión Europea. (2022). EU policy framework on biobased, biodegradable and compostable plastics (COM(2022) 682 final). https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CEL_EX:52022DC0682
- EPD International. (2026a, 11 de mayo). International EPD System reaches 20,000 EPDs and 3,000 clients worldwide. <https://www.environdec.com/news/ies-20000-epds-and-3000-clients>
- EPD International. (2026b). EPD Library: Organisation country — Uruguay. <https://www.environdec.com/library?c=UY>
- EPD International. (2026c). What is an Environmental Product Declaration? <https://www.environdec.com/services/what-is-epd>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2011). The Global Bioenergy Partnership sustainability indicators for bioenergy. <https://www.fao.org/in-action/global-bioenergy-partnership/programme-of-work/working-areas/gbep-sustainability/en>
- IEA Bioenergy. (2025). Programme of Work and Budget 2025–2027. IEA Bioenergy Technology Collaboration Programme. <https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2025/07/Programme-of-Work-and-Budget-2025-2027.pdf>
- Informist Media. (2024, noviembre). Ethanol Plans: Govt's 2G ethanol plans in limbo as sole IOC Panipat plant lies inactive. <https://informistmedia.com/MoneyWire/22664/Ethanol-Plans-Govt-s-2G-ethanol-plans-in-limbo-as-sole-IOC-Panipat-plant-lies-inactive>
- International Organization for Standardization. (2026). ISO 14025:2026 — Environmental statements and programmes for products — Environmental product declarations (EPDs). ISO.
- Jacob, S., Kundu, D., Chintagunta, A. D., Kumar N. S., S., Samanta, P., Mahata, C., Dey, S., Shibirathna, R. G., Barathi, A., Kumar, S., Wang, Z., & Goel, G. (2025). Anaerobic digestion-derived digestate valorization: Green chemistry innovations for resource recovery and reutilization. *Green Chemistry*, 27, 7472–7505. <https://doi.org/10.1039/D5GC01053E>
- Medina-Martos, E., Istrate, I. R., Villamil, J. A., Gálvez-Martos, J. L., Dufour, J., & Mohedano, Á. F. (2020). Techno-economic and life cycle assessment of an integrated hydrothermal carbonization system for sewage sludge. *Journal of Cleaner Production*, 277, 122930. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122930>
- Minesoft. (2026). Origin [Base de datos de patentes]. Minesoft Ltd. <https://minesoft.com/platform/minesoft-origin/> (búsquedas realizadas: julio de 2026).
- Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. (2024b). Estrategia Nacional de Bioeconomía Sostenible. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/comunicacion/publicaciones/estrategia-nacional-bioeconomia-sostenible>
- Molitor, B., Mishra, A., & Angenent, L. T. (2019). Power-to-protein: Converting renewable electric power and carbon dioxide into single cell protein with a two-stage bioprocess. *Energy & Environmental Science*, 12, 3515–3521. <https://doi.org/10.1039/C9EE02381J>

- Motola, V., Giuliano, A., de Jong, E., Mossberg, J., & Shmorhun, M. (2022). Global biorefinery status report 2022. IEA Bioenergy Task 42. <https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2022/09/IEA-Bioenergy-Task-42-Global-biorefinery-status-report-2022-220712.pdf>
- Mousavi, S., Brown, T., & Malmshiemer, R. W. (2025). Sustainable bioplastic products for building applications: Recent trends and future opportunities — A systematic review. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 19, 2609–2630. <https://doi.org/10.1002/bbb.70005>
- Schmitz, L. M., Kreitli, N., Obermaier, L., Weber, N., Rychlik, M., & Angenent, L. T. (2024). Power-to-vitamins: Producing folate (vitamin B9) from renewable electric power and CO₂ with a microbial protein system. *Trends in Biotechnology*, 42(12), 1691–1714. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2024.06.014>
- World Intellectual Property Organization. (2024). Patent landscape report: Agrifood. WIPO. <https://doi.org/10.34667/tind.49840>

Fuentes de la tabla 4.3.2

Estas referencias respaldan la estimación de TRL de tecnologías específicas de la Tabla 4.3.2 que no quedó incorporada a la lista alfabética anterior.

- TotalEnergies Corbion. (2019, 9 de septiembre). TotalEnergies Corbion celebrates the opening of its 75,000 tons per year bioplastics plant. <https://totalenergies-corbion.com/totalenergies-corbion-celebrates-the-opening-of-its-75000-tons-per-year-bioplastics-plant/>
- Acedos, M. G., Gómez-Pérez, P., Espinosa, T., Abarca, C., Ibañez, B., & Ruiz, B. (2022). New efficient meta-fermentation process for lactic acid production from municipal solid waste. *Microbial Cell Factories*, 21, 233. <https://doi.org/10.1186/s12934-022-01960-9>
- Bühlmann, C. H., Mickan, B. S., Tait, S., Batstone, D. J., & Bahri, P. A. (2023). Lactic acid production from food waste at an anaerobic digestion biorefinery: Effect of digestate recirculation and sucrose supplementation. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 11, 1177739. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1177739>
- Abraham, E., Cherpak, V., Senyuk, B., ten Hove, J. B., Lee, T., Liu, Q., & Smalyukh, I. I. (2023). Highly transparent silanized cellulose aerogels for boosting energy efficiency of glazing in buildings. *Nature Energy*, 8, 381–396. <https://doi.org/10.1038/s41560-023-01226-7>
- Rech, A., Chiuidea, R., Colmo, C., Rossi, G., Nicholas, P., Tamke, M., Thomsen, M. R., & Daugaard, A. E. (2022). Waste-based biopolymer slurry for 3D printing targeting construction elements. *Materials Today Communications*, 33, 104963. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.104963>
- López, J. C., Arnáiz, E., Merchán, L., Lebrero, R., & Muñoz, R. (2018). Biogas-based polyhydroxyalkanoates production by *Methylocystis hirsuta*: A step further in anaerobic digestion biorefineries. *Chemical Engineering Journal*, 333, 529–536. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.09.045>
- Roquette. (2021, 17 de noviembre). Roquette opens world's largest pea protein plant. <https://www.roquette.com/press-releases/opening-world-largest-pea-protein-plant>
- International Energy Agency. (2020). Outlook for biogas and biomethane: Prospects for organic growth. IEA. <https://www.iea.org/reports/outlook-for-biogas-and-biomethane-prospects-for-organic-growth>
- IEA Bioenergy Task 37. (2025). Implementation of anaerobic digestion facilities in the food and beverage industry. https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2025/03/IEA-Bioenergy-Task-37-Food-and-Beverage_20250302.pdf

- Neste. (2025, 9 de abril). Neste started producing sustainable aviation fuel (SAF) at its renewables refinery in Rotterdam, the Netherlands. <https://neste.com/news/neste-started-producing-sustainable-aviation-fuel-saf-at-its-renewables-refinery-in-rotterdam-the-netherlands>
- Wang, J., Liu, S., Feng, K., Lou, Y., Ma, J., & Xing, D. (2025). Anaerobic digestion of lignocellulosic biomass: Process intensification and artificial intelligence. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 210, 115264. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115264>
- Marín, D., Méndez, L., Suero, I., Díaz, I., Blanco, S., Fdz-Polanco, M., & Muñoz, R. (2022). Anaerobic digestion of food waste coupled with biogas upgrading in an outdoors algal-bacterial photobioreactor at pilot scale. *Fuel*, 324, 124554. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124554>
- Raízen. (2024, 24 de mayo). Raízen inaugura maior planta de Etanol de Segunda Geração do mundo. <https://www.raizen.com.br/sala-de-imprensa/raizen-inaugura-maior-planta-de-etanol-de-segunda-geracao-do-mundo>
- Corbion. (2021, 22 de abril). Corbion to boost lactic acid production capacity while maintaining emissions level. <https://www.corbion.com/media/press-release/2214675>
- Corbion. (2025). Annual report 2024. https://www.corbion.com/-/media/corbion/files/annual-reports/corbion_annual_report_2024.pdf
- Yan, Y., Kallikazarou, N. I., Nisiforou, O., Shang, Q., Fu, D., Antoniou, M. G., & Fotidis, I. A. (2025). Phosphorus recovery through struvite crystallization from real wastewater: Bridging gaps from lab to market. *Bioresource Technology*, 427, 132408. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2025.132408>
- Hwang, Y.-H., Kim, S., Kim, C., et al. (2025). Survey on the global technological status for forecasting the industrialization timeline of cultured meat. *Foods*, 14(24), 4222. <https://doi.org/10.3390/foods14244222>
- Azaizeh, H., Abu Tayeh, H. N., Schneider, R., Klongklaew, A., & Venus, J. (2020). Production of lactic acid from carob, banana and sugarcane lignocellulose biomass. *Molecules*, 25(13), 2956. <https://doi.org/10.3390/molecules25132956>

A

Anexos

Reporte 2 · AgTech y sistemas agroalimentarios sostenibles

A.1 Glosario de acrónimos y términos técnicos

Qué hace este anexo. Reúne, para una audiencia de decisores no especialistas, las siglas y los términos técnicos empleados en el Reporte 2, con su desarrollo. Cuando la sigla proviene del inglés, se indica el término original en cursiva. Los acrónimos se desarrollan además en su primera mención en el cuerpo (§4), conforme a la convención del §3.2.

A.1.1 Organismos, instituciones y programas

Uruguay

Sigla	Desarrollo
AGESIC	Agencia de Gobierno Electrónico y Sociedad de la Información y del Conocimiento
ANDE	Agencia Nacional de Desarrollo
ANII	Agencia Nacional de Investigación e Innovación
ARIA	Grupo de robótica e inteligencia artificial aplicada (UTEC)
BIOPROA	Grupo de Biotecnología de Procesos para el Ambiente (Instituto de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Udelar)
Biovalor	Proyecto de valorización de residuos agroindustriales (MIEM–MVOTMA–MGAP–ONUDI–FMAM, 2014-2020)
CDN3	Contribución Determinada a Nivel Nacional, tercera revisión (compromiso climático de Uruguay)
CTBC	Centro Tecnológico en Bioeconomía Circular
Converge	Plataforma de innovación AgTech impulsada por INIA y BID Lab, con apoyo de ANII
CUTI	Cámara Uruguaya de Tecnologías de la Información
FPTA	Fondo de Promoción de Tecnología Agropecuaria (INIA)
IIBCE	Instituto de Investigaciones Biológicas Clemente Estable
IIQ	Instituto de Ingeniería Química (Facultad de Ingeniería, Udelar)
INAC	Instituto Nacional de Carnes
INIA	Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria
Innovagro	Fondo Sectorial de Innovación Agropecuaria (ANII–INIA–MGAP)

Sigla	Desarrollo
LATU	Laboratorio Tecnológico del Uruguay (y su unidad de servicios, Latitud)
LSQA	Organismo de certificación, validación y verificación con sede en Uruguay
MA	Ministerio de Ambiente
MGAP	Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca
MIEM	Ministerio de Industria, Energía y Minería
Oficina de Gestión de la Innovación	Oficina de Gestión de la Innovación (PCTP)
PCTP	Parque Científico Tecnológico de Pando
SENCI	Secretaría Nacional de Ciencia y Valorización del Conocimiento (organismo solicitante del reporte)
SNAP	Sistema Nacional de Áreas Protegidas
SNIG	Sistema Nacional de Información Ganadera
UdelaR	Universidad de la República
URCDP	Unidad Reguladora y de Control de Datos Personales
UTE	Administración Nacional de Usinas y Trasmisiones Eléctricas
UTEC	Universidad Tecnológica del Uruguay

Regionales e internacionales

Sigla	Desarrollo
BID Lab	Laboratorio de Innovación del Banco Interamericano de Desarrollo
CNIPA	Administración Nacional de Propiedad Intelectual de China (China National Intellectual Property Administration)
EFSA	Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (European Food Safety Authority)
EMBRAPA	Empresa Brasileña de Investigación Agropecuaria
EPO	Oficina Europea de Patentes (European Patent Office)
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
FDA	Administración de Alimentos y Medicamentos de Estados Unidos (Food and Drug Administration)
ICAR	Comité Internacional de Registro Animal (International Committee for Animal Recording)
IETS	Sociedad Internacional de Tecnología Embrionaria (International Embryo Technology Society)
INPI	Instituto Nacional de Propiedad Industrial (Brasil)
INTA	Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (Argentina)
Interbull / Interbeef	Servicios de evaluación genética internacional de razas lecheras y de carne, dependientes de ICAR
IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
ISO	Organización Internacional de Normalización
KIPO	Oficina Coreana de Propiedad Intelectual (Korean Intellectual Property Office)
MERCOSUR	Mercado Común del Sur
OECD / OCDE	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos
SENASA	Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria (Argentina)
USDA	Departamento de Agricultura de Estados Unidos
USPTO	Oficina de Patentes y Marcas de Estados Unidos
WIPO / OMPI	Organización Mundial de la Propiedad Intelectual
WOAH	Organización Mundial de Sanidad Animal (ex OIE)

A.1.2 Marcos normativos y estándares

Sigla	Desarrollo
AI Act	Reglamento (UE) 2024/1689, modificado por el Reglamento (UE) 2026/1744
CORSIA	Esquema de compensación y reducción de carbono para la aviación internacional (OACI)
CSRD / ESRS	Directiva de reporte de sostenibilidad corporativa de la UE y sus normas de aplicación
Data Act	Reglamento (UE) 2023/2854 de datos
EPD	Declaración Ambiental de Producto (Environmental Product Declaration), ISO 14025
EUDR	Reglamento (UE) 2023/1115 de productos libres de deforestación, modificado por el Reglamento (UE) 2025/2650
GRAS	Reconocido generalmente como seguro (Generally Recognized As Safe), vía regulatoria de la FDA
ISCC	Certificación Internacional de Sostenibilidad y Carbono (International Sustainability and Carbon Certification)
ISO 11784/11785	Normas de identificación por radiofrecuencia de animales
ISO 14040/14044	Normas de análisis de ciclo de vida
ISO 14067	Norma de huella de carbono de producto
ISOBUS	Estándar de comunicación entre tractor e implementos (ISO 11783)
LGPD	Ley General de Protección de Datos (Brasil)
Novel Food	Reglamento (UE) 2015/2283 sobre nuevos alimentos
PPWR	Reglamento (UE) 2025/40 de envases y residuos de envases
RED III	Directiva (UE) de energías renovables, tercera revisión
Reglamento de Máquinas	Reglamento (UE) 2023/1230

A.1.3 Términos técnicos

Sigla o término	Desarrollo
3-NOP	3-nitrooxipropanol, aditivo antimetanogénico (nombre comercial Bovaer®)
ACV	Análisis de Ciclo de Vida (Life Cycle Assessment)
ADAPT	Estándar de intercambio de datos agrícolas de AgGateway
APSIM / DSSAT	Plataformas de modelado y simulación de sistemas de cultivo
Biorrefinería	Instalación que transforma biomasa en múltiples productos (energía, materiales, moléculas) mediante procesos integrados
CAGR	Tasa de crecimiento anual compuesta (Compound Annual Growth Rate)
CPC / IPC	Clasificación Cooperativa de Patentes y Clasificación Internacional de Patentes
CRISPR	Sistema de edición génica basado en repeticiones palindrómicas cortas agrupadas y regularmente interespaciadas
Familia de patentes	Conjunto de documentos de patente que protegen una misma invención en distintas jurisdicciones
Fermentación de precisión	Uso de microorganismos diseñados para producir un ingrediente específico (por ejemplo, una proteína láctea)
FMIS	Sistema de gestión de información de finca (Farm Management Information System)
FTO	Libertad de operación (Freedom-to-Operate)
GEBV	Valor de cría estimado genómicamente (Genomic Estimated Breeding Value)
GEI	Gases de efecto invernadero
GNSS / RTK	Sistema global de navegación por satélite y corrección cinemática en tiempo real (posicionamiento centimétrico)
IA	Inteligencia artificial
IATF	Inseminación artificial a tiempo fijo
IVP / OPU / FIV	Producción <i>in vitro</i> de embriones, aspiración folicular (ovum pick-up) y fecundación in vitro
LEO	Órbita terrestre baja (Low Earth Orbit), aplicada a constelaciones satelitales de conectividad
LLM	Modelo de lenguaje de gran tamaño (Large Language Model)
ML / DL	Aprendizaje automático (machine learning) y aprendizaje profundo (deep learning)
MRV	Monitoreo, reporte y verificación (de emisiones o remociones de carbono)
NIR	Espectroscopía de infrarrojo cercano (Near-Infrared Spectroscopy)
PHA / PLA	Polihidroxialcanoatos y ácido poliláctico (bioplásticos)

Sigla o término	Desarrollo
PI	Propiedad intelectual
PLF	Ganadería de precisión (Precision Livestock Farming)
PRLR-SLICK	Variante genética asociada a pelaje corto y mayor tolerancia al calor en bovinos
SAF	Combustible de aviación sostenible (Sustainable Aviation Fuel)
SNP	Polimorfismo de nucleótido único (Single Nucleotide Polymorphism), marcador molecular
TEA	Análisis tecnoeconómico (Techno-Economic Assessment)
TRL	Nivel de madurez tecnológica (Technology Readiness Level), escala 1-9
UAV	Vehículo aéreo no tripulado (Unmanned Aerial Vehicle), dron
VRT	Tecnología de aplicación de dosis variable (Variable Rate Technology)

A.2 Nota metodológica de las búsquedas de propiedad intelectual

Qué hace este anexo. Describe cómo se construyeron los panoramas de propiedad intelectual (PI) de las secciones 4.1.5 (T4), 4.2.5 (T5) y 4.3.5 (T6), con qué alcance y con qué límites. No reproduce las ecuaciones de búsqueda ni los conteos por consulta —que quedan como respaldo interno del proyecto—; su objetivo es dar trazabilidad al lector sobre el alcance del ejercicio.

A.2.1 Naturaleza y alcance

El análisis de PI del reporte es cualitativo, conforme a lo acordado con SENCI (§3.4). Busca caracterizar jurisdicciones, tipos de actor, titulares de referencia y dinámicas de protección; no cuantifica de forma exhaustiva, no mide la fortaleza jurídica de las carteras y no constituye un análisis de libertad de operación (FTO). En consecuencia, las proporciones se expresan como estructura y orden de magnitud, no como conteos cerrados, y la titularidad y el estado legal reflejan el momento de la consulta.

A.2.2 Fecha de corte

La fecha de corte general del reporte es julio de 2026. Las búsquedas de patentes se ejecutaron en julio de 2026; el benchmarking bibliométrico de contraste de T6, en junio de 2026; y las estimaciones de madurez tecnológica (TRL) de T4 corresponden a junio de 2026. El panorama normativo (§4.X.6 y §A.4) se cerró en julio de 2026.

A.2.3 Asimetría entre las tres tendencias

Las tres subsecciones de PI no se construyeron con el mismo método, y conviene tenerlo presente al compararlas:

Tendencia	Base del panorama de PI
T4 · Ganadería y lechería	Relevamiento propio (julio 2026): cinco búsquedas, una por sub-línea, con depuración manual documento a documento
T6 · Bioeconomía	Relevamiento propio (julio 2026): cinco búsquedas, una por sub-línea, consolidadas a nivel de familia; más un benchmarking bibliométrico exploratorio en Scopus (junio 2026) como contraste
T5 · Agricultura digital	Sin relevamiento propio. Se apoya en el WIPO Patent Landscape Report — Agrifood (WIPO, 2024) como fuente primaria, complementado con literatura y análisis sectoriales secundarios

A.2.4 Corpus del relevamiento de T4

Cifras del relevamiento en Minesoft Origin (julio 2026), que sostienen la lectura cualitativa de 4.1.5.

Sub-línea	Export bruto	Corpus depurado	Perfil dominante	Titular líder
SL1 · Genómica y selección	216	~74	Investigación pública; fuerte presencia china	Inguran/STgenetics (5)
SL2 · Nutrición y antimetanológicos	1.070	~499	Corporativo/aditivos; núcleo antimetanológico ~233	DSM-Firmenich (27)
SL3 · Reproducción asistida	385	~196	Comercial, concentrado	IMV Technologies (16)
SL4 · Pastoril / silvopastoril / carbono	57	~27	Fragmentado; startups de agro-carbono	Locus (3)
SL5 · Bienestar / PLF / trazabilidad	129	~127	Fabricantes de equipos lecheros	Lely (14)

Corpus depurado total: del orden de 900 familias.

Recuentos por titular (familias en el corpus depurado; sin recuento exhaustivo): - SL1: Inguran/STgenetics (5), CAAS (4), ABS Global (3), Shandong Dairy Cattle Research Center (3), Agriculture Victoria (2). - SL2: DSM-Firmenich (27), Novonesis/N&H (14), Ajinomoto (10), CJ CheilJedang (8), Nutreco (7); núcleo antimetanológico: Ruminant Biotech, Arkeabio, Native Microbials y CSIRO/FutureFeed (~6 cada uno). - SL3: IMV Technologies (16), Inguran/STgenetics (8), ABS Global (7), China Agricultural University (4), Nbryo (4), Vytelle (3). - SL4: Locus (3) y una cola de titulares con una sola familia cada uno. - SL5: Lely (14), DeLaval (5), Afimilk (4), Smartbow/Zoetis (3), SCR (3), Intervet/MSD (3).

Serie temporal de SL2 (publicaciones en alcance por año): 70 (2022), 77 (2023), 149 (2024), 143 (2025); 2026 en curso. Es la única sub-línea para la que se construyó la serie por año, razón por la cual el cuerpo no afirma tendencia temporal sobre las restantes.

A.2.5 Corpus del relevamiento de T6

Cifras del relevamiento en Minesoft Origin (julio 2026), que sostienen la lectura cualitativa de 4.3.5.

Sub-línea	Export bruto	Corpus depurado	Perfil dominante	Títular líder
B1 · Biorrefinerías y valorización integral	2.856	~1.471	Industrial/energético + I+D pública europea-norteamericana; nodo LATAM fuerte (GranBio, #4)	dsm-firmenich (~38)
B2 · Bioplásticos y biomateriales	9.824	~8.634	Corporativo puro; empuje industrial coreano	LG Chem (~190)
B3 · Proteínas alternativas y agroalimentos funcionales	20.013	~10.645	Híbrido: grandes alimentarias + bloque académico chino	Nestlé (~317, consolidando sus dos entidades)
B4 · Bioenergía y biocombustibles avanzados	43.393	~4.456	Grandes petroleras + licenciantes de tecnología + gestión de biogás/residuos; cola fragmentada (14 % titulares individuales)	Neste (~63)
B5 · Química verde y bioquímicos de plataforma	49.360	~5.223	Académico, fuertemente chino; complementado por fermentación de aminoácidos	Jiangnan University (~205)

Corpus depurado total: del orden de 30.400 familias

A.2.6 Material suplementario disponible a solicitud

El relevamiento de T6 generó material sistematizado que, por extensión, no se adjunta a este informe pero está disponible a solicitud de SENCI:

Ref.	Contenido
MS-1	TRL detallado de rutas de valorización de digestato
MS-2	Rutas de valorización biológica de gases (CO ₂ , CO, CH ₄)
MS-3	Relevamiento ampliado de casos internacionales
MS-6	Mapa regulatorio: 128 instrumentos con fuente oficial, 52 clasificados como obligatorios y 29 como certificaciones o esquemas voluntarios

Los conteos de MS-6 describen la matriz construida para el proyecto, no el universo completo de normas aplicables, y su vigencia debe verificarse antes de usarla para decisiones regulatorias o comerciales.

A.3 Mapa de actores nacionales consolidado

Qué hace este anexo. Traslada aquí, por su extensión y su carácter de referencia, el mapa de actores que en 5.1–5.5 se lee como sistema. Las tres tendencias nombran a sus actores por separado; leídos en conjunto, se ordenan en un mapa único que hace visible quién hace qué y, sobre todo, qué actores atraviesan más de una tendencia.

Política, regulación y coordinación (sector público).

Actor	Función en el sistema	Tendencia(s)
MGAP (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca)	Operación y regulación del SNIG; coordinación de trazabilidad ganadera; articulación con EUDR; Innovagro (cofundador)	T4, T5
AGESIC (Agencia de Gobierno Electrónico y Sociedad de la Información)	Estrategia Nacional de Datos e IA (Art. 74 Ley 20.212); gobernanza de datos agropecuarios	T5, T4
MIEM	Marco de economía circular, política energética e instrumentos de innovación industrial	T6
ANDE (Agencia Nacional de Desarrollo)	Fondo Oportunidades Circulares; articulación de proyectos de bioeconomía	T6
INAC	Trazabilidad cárnica, CertiCarnes, interfaz con la industria frigorífica; identificación de corrientes de subproductos	T4, T5, T6
INALE (Instituto Nacional de la Leche)	Estadística e información de la cadena láctea; articulación público-privada del sector; interlocutor natural para la trazabilidad y los datos de lechería	T4, T5

Investigación e infraestructura habilitadora.

Actor	Función en el sistema	Tendencia(s)
INIA	Evaluaciones genómicas nacionales; plataformas digitales (Auravant/EfiCarne-OptiFert-CuantAgua); programa Converge y convocatoria «Desafío: trazabilidad animal»; FPTA; investigación en pasturas y nutrición	T4, T5, T6
ANII (Agencia Nacional de Investigación e Innovación)	Fondo Sectorial Innovagro; «Desafío: trazabilidad animal»; financiamiento de I+D e innovación	T4, T5, T6
UdelaR (BIOPROA/IIQ, Procesos Forestales, Química/DETEMA, IIBCE, Agronomía, Veterinaria)	Investigación en digestión anaerobia, biogás y biohidrógeno (BIOPROA); biorrefinerías forestales (Procesos Forestales); biocatálisis y química verde (DETEMA); base de ciencias agrarias	T4, T6
UTEC	Sistemas bioelectroquímicos, ácidos carboxílicos, recuperación de fósforo, electrofermentación, monitoreo territorial (ARIA, Unidad de Monitoreo Terrestre, GASMA)	T5, T6
LATU / Latitud	Ensayos, certificación de materiales y procesos agroindustriales	T6
CTFM	Tecnología de la madera	T6

ANEXOS

Industria, empresas y plataformas (sector privado y mixto).

Actor	Función en el sistema	Tendencia(s)
Auravant	Plataforma FMIS líder; integra modelos de INIA; >700.000 ha monitoreadas en Uruguay; expansión a España, Brasil y otros	T5
LSQA	Certificación de carne carbono-neutral; referencia para la trazabilidad ambiental del sistema ganadero	T4, T6
Conaprole	Principal industria láctea del país: 76,6 % del valor exportado de lácteos y 71,1 % de la leche remitida a planta (MGAP-OPYPA, 2025). Contraparte ineludible para la adopción de PLF, trazabilidad láctea y valorización de suero	T4, T5, T6
Estancias del Lago	Segundo exportador lácteo (10,8 % del valor exportado); socio del proyecto NovaSAF-1 de SAF a partir de biogás de la lechería, y por lo tanto el punto donde la cadena láctea se cruza con la bioeconomía	T4, T6
BID Lab	Cofundador de Converge; apoyo al ecosistema AgTech latinoamericano	T5
CTBC (Centro Tecnológico en Bioeconomía Circular)	Articulación de proyectos de bioeconomía circular	T6
NovaSAF-1	Proyecto piloto de SAF a partir de biogás y energía renovable (Durazno; anunciado 2026, en evaluación)	T6
Uruguay XXI	Posicionamiento del país como referente AgTech; Agroinnova; >60 startups presentadas en 2025	T5
CUTI (Mesa AgriTech)	Articulación industria TIC - sector productivo	T5

Lectura del mapa. Cinco rasgos emergen del conjunto:

- (i) INIA y ANII son los dos nodos de mayor centralidad, presentes en las tres tendencias con roles distintos;
- (ii) el SNIG es el activo de infraestructura de mayor centralidad, con MGAP como operador;
- (iii) el sistema combina instituciones de investigación robustas con un ecosistema empresarial AgTech emergente pero real (Auravant, startups de Uruguay XXI);
- (iv) la bioenergía y la bioeconomía son las que tienen capacidades más fragmentadas y la menor concentración de actores privados con escala; y
- (v) la cadena láctea es el subsistema con mayor concentración industrial del mapa —Conaprole concentra tres cuartas partes del valor exportado—, lo que la convierte, a la vez, en la adopción tecnológica de decisión más concentrada y en el punto único de falla más evidente del conjunto.

Una asimetría del propio reporte. El aterrizaje nacional de las tres tendencias converge sobre el complejo cárnico bovino (5.1, 5.3). Las otras dos cadenas del dominio quedan comparativamente menos desarrolladas, pese a tener peso propio y perfiles de adopción distintos:

- **Lechería.** Exportó USD 962,7 millones en 2025, con una remisión récord de 2.207 millones de litros (INALE, 2026), y a la vez atraviesa una reestructura persistente: los productores

lecheros pasaron de 3.873 en 2016 a 3.042 en 2025, y los remitentes a industria de 2.716 a 1.995, con una caída del número de tambos del 2,6 % anual acumulativo y una superficie lechera que descendió de ~780.000 a ~675.800 hectáreas (MGAP-OPYPA, 2025). Es el subsistema donde las tecnologías de mayor TRL del §4.1 —PLF, wearables, ordeñe robotizado, aditivos antimetanogénicos administrados en ración— son directamente aplicables, y donde la concentración industrial permitiría desplegarlas a escala con pocas contrapartes. El reporte lo caracteriza en el plano tecnológico global pero no desarrolla esa lectura nacional.

- **Agricultura de secano.** Es el adoptante natural de la mayor parte de las tecnologías de §4.2 —guiado RTK, dosis variable, teledetección, FMIS, robótica de malezas—, y fue el subsector más golpeado por la sequía 2022-2023 (USD 490 millones de pérdidas; MGAP-OPYPA, 2023). El reporte ancla su lectura de agricultura digital en el SNIG, es decir en la ganadería, y deja el complejo agrícola con un tratamiento marginal.

A.4 Marco normativo uruguayo aplicable al conjunto del dominio

Qué hace este anexo. Traslada aquí el cuadro normativo consolidado de 5.1–5.5, por su extensión y su carácter de referencia más que de análisis.

Ámbito	Instrumento / marco uruguayo	Autoridad	Estado y observación
Trazabilidad ganadera individual	Ley N.º 17.997 (2006) — SNIG obligatorio para el 100 % del rodeo bovino	MGAP	Vigente y operativo. Brecha: no integra datos genómicos ni de bienestar fisiológico
Certificación de sostenibilidad y acceso al mercado europeo	EUDR (Reglamento UE 2023/1115, modificado por el Reglamento UE 2025/2650); aplicación: 30 de diciembre de 2026 (operadores medianos y grandes) y 30 de junio de 2027 (personas físicas y micro y pequeñas empresas)	UE (la obligación recae sobre el operador que introduce el producto en el mercado de la UE; condiciona al exportador uruguayo por vía contractual)	Vigente. Uruguay reúne las condiciones (campo natural + SNIG) pero requiere completar la capa geoespacial formal de predios ganaderos
Gobernanza de datos e IA	Art. 74, Ley N.º 20.212 (AGESIC, Estrategia Nacional de Datos e IA); Ley N.º 18.331 (protección de datos)	AGESIC / URCDP	Estrategia Nacional aprobada (nov. 2024). Proyecto de ley de IA en elaboración; a julio de 2026, sin ley de IA vigente
Política climática y compromisos de metano	CDN3 (Contribución Determinada a Nivel Nacional, 3.ª revisión); metas de reducción de metano entérico y de residuos	MVOTMA / MGAP	Vigente. Marco de referencia para los mercados de carbono, pero sin protocolos MRV validados a escala predial para carbono en suelos ganaderos
Bioeconomía y residuos	Decreto N.º 226/025 (gestión de residuos sólidos); Plan Nacional de Bioinsumos; Plan Nacional de Bioenergía	MVOTMA / MIEM	Instrumentos activos. Sin fondo único ni marco integrador de bioeconomía con financiamiento sostenido
Interoperabilidad de datos agropecuarios	Sin estándar nacional dedicado; referencia: ISO 11783/ISOBUS, AgGateway ADAPT (internacionales)	AGESIC / MGAP (por definir)	Vacío relativo: ausencia de estándar nacional de interoperabilidad entre plataformas FMIS, SNIG y registros de INIA

Lectura del marco. El perímetro normativo nacional cubre los pilares esenciales —trazabilidad ganadera, compromiso climático, protección de datos— pero muestra tres zonas de anticipación pendiente: (i) un marco de IA y datos agropecuarios que dé certidumbre a la inversión privada en plataformas digitales; (ii) protocolos de MRV de carbono en suelos validados para el contexto pastoril uruguayo; y (iii) un marco integrador de bioeconomía que articule los instrumentos de financiamiento existentes. La ausencia de marco también es un hallazgo: a diferencia del Reporte 1 (donde los reguladores ya habilitaban y evaluaban), en el Reporte 2 la anticipación normativa parece más una condición de habilitación de inversiones que una emergencia regulatoria inmediata.

www.pctp.org.uy



CAMINO SARAVIA S/N - PANDO
C.P. 91000 - CANELONES, URUGUAY
(+598) 22920984 · INFO@PCTP.ORG.UY



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY



Ministerio
de Industria
Energía y Minería



Gobierno de
Canelones



Cámara de
Industrias
del Uruguay