

ISBN: 978-9942-609-66-3

REPRODUCCIÓN ANIMAL y BIOTECNOLOGÍAS REPRODUCTIVAS en ESPECIES ZOOTÉCNICAS



OSCAR DARWIN CRIOLLO SALINAS

DEBBIE SHIRLEY CHÁVEZ GARCÍA

JASMIN ESMERALDA BENÍTEZ MORA

NÉSTOR VICENTE ACOSTA LOZANO

JEFFERSON RAÚL VARAS AGUILLÓN

JULIO CÉSAR VILLACRES MATÍAS

WILMER WAGNER ALCÍVAR GUADAMUD

VÍCTOR ALVARO TUALOMBO MASABANDA

Instituto de Investigaciones
Transdisciplinarias Ecuador - BINARIO

EDITORIAL BINARIO

Mgs. Susgein Julissa Miranda Cansing

Directora ejecutiva

Lcdo. Wilfrido Rosero Chávez

Gerente operaciones generales

Dra. Sherline Chirinos

Directora de publicaciones y revistas

Lcda. Greguis Reolón Ríos

Directora de marketing y RRSS

La revisión técnica de los documentos correspondió a especialistas expertos en el área.

ISBN:

978-9942-609-66-3

1era. Edición febrero 2026

Edición con fines educativos no lucrativos

Hecho en Ecuador

Diseño y Tipografía: Greguis Reolón Ríos

Reservados todos los derechos. Está prohibido, bajo las sanciones penales y el resarcimiento civil previstos en las leyes, reproducir, registrar o transmitir esta publicación, íntegra o parcialmente, por cualquier sistema de recuperación y por cualquier medio, sea mecánico, electrónico, magnético, electroóptico, por fotocopia o por cualquier otro, sin la autorización previa por escrito al Instituto de Investigaciones Transdisciplinarias Ecuador (BINARIO).

Instituto de Investigaciones
Transdisciplinarias Ecuador - BINARIO

Cel.: +593 99 571 2751

<http://www.binario.com.ec>





AUTORES

Oscar Darwin Criollo Salinas

Debbie Shirley Chávez García

Jasmin Esmeralda Benítez Mora

Néstor Vicente Acosta Lozano

Jefferson Raúl Varas Aguillón

Julio César Villacres Matías

Wilmer Wagner Alcívar Guadamud

Víctor Alvaro Tualombo Masabanda

En el vasto y dinámico escenario de la producción animal contemporánea, la reproducción no es un evento puramente biológico; ocupa el papel central y neurálgico de toda la estructura zootécnica. Se presenta como el proceso esencial para asegurar la continuidad de las especies, pero, más allá de la supervivencia, es el pilar maestro sobre el cual descansan los programas de mejoramiento genético, la conservación de la biodiversidad y la sostenibilidad económica de los sistemas agropecuarios globales. En un mundo que demanda eficiencia y respeto por los recursos naturales, la reproducción animal se convierte en el lenguaje con el que escribimos el futuro de nuestra seguridad alimentaria.

Entender y manejar la vida desde sus fundamentos neuroendocrinos hasta el uso de biotecnologías avanzadas implica una ventaja científica y competitiva incalculable. Este texto, titulado Reproducción animal y biotecnologías reproductivas en especies zootécnicas, articula el conocimiento biológico con la gestión técnica. Se presenta como una herramienta de consulta crítica para estudiantes, docentes, investigadores y expertos que se dedican a optimizar los sistemas de reproducción animal.

El propósito es ofrecer un recurso de consulta actualizado que atienda a las necesidades del entorno zootécnico. El libro examina minuciosamente los procesos endocrinos y fisiológicos esenciales como paso previo al examen de tecnologías reproductivas de vanguardia. Esta perspectiva asegura que se integren los fundamentos científicos y las innovaciones del sector, convirtiendo asuntos complejos en información técnica necesaria para una gestión eficiente de la reproducción animal.

La obra es una invitación a mirar el futuro. Al abordar desde la precisión del diagnóstico hasta las tendencias impulsadas por la era digital, el libro asegura su relevancia en el tiempo. Es, en esencia, un tributo al rigor académico puesto al servicio del progreso humano, diseñado para inspirar una gestión de los recursos animales que sea técnica en su ejecución, científica en su fundamento y profundamente ética en su propósito.

Los autores



AUTORES



OSCAR DARWIN CRIOLLO SALINAS

Doctor en Medicina Veterinaria y Zootecnia

ocriollo46@gmail.com

Formación académica como Doctor en Medicina Veterinaria y Zootecnia, Magíster en cirugía de tejidos blandos en pequeñas especies, diplomados en cirugía avanzada de tejidos blandos, cirugía oncológica, Docente en ciencias veterinarias como fisiología, biología y producción animal, Director de la Clínica Veterinaria Wolf, Gerente de INSVAL Instituto del Valle, su desempeño y experiencia laboral destaca actividades en clínica con especies domésticas y en campo con especies de producción, transmitiendo siempre el respeto a la naturaleza y sobre todo el bienestar animal, con buenas prácticas veterinarias.



DEBBIE SHIRLEY CHÁVEZ GARCÍA

Médica Veterinaria Zootecnista

dchavez@upse.edu.ec

Universidad Estatal Península de Santa Elena

Magíster en Clínica y Cirugía, doctoranda de Medicina Veterinaria en la Universidad Central de las Villa Marta Abreus - Cuba, Docente/Investigador UPSE, participa en proyectos I+D de investigación. Investigadora acreditado para realizar actividades de investigación en el Ecuador con fines de conservación, de producción y reproducción de animales autóctonos como bovinos, caprino, aves, cerdos y exóticos de la Península de Santa Elena, participa en REDES de colaboración con varias universidades, autora y coautora de diversas publicaciones en revistas de alto impacto Scopus, Scielo y Latindex, autora de libros de relevancia del área veterinaria, de producción pecuaria, y educación. H.a participado en eventos nacionales e internacionales del área pecuaria de animales de interés zootécnico con temática especializada en: sistemas de producción pecuario, sistemas de alimentación alternativa y Recursos Zoogenéticos domésticos.



JASMIN ESMERALDA BENÍTEZ MORA

Doctora en Medicina Veterinaria y Zootecnia

jbenitez2294@upse.edu.ec

Universidad Estatal Península de Santa Elena

Graduada en la Universidad Técnica de Cotopaxi, con Maestría en Clínica y Cirugía Canina de la Universidad Agraria del Ecuador. Cuenta con experiencia como Inspectora Sanitaria en centros de faenamientos de aves y especies mayores por más de 20 años y como Médica Veterinaria en el GADMCLL. Es propietaria de un Consultorio Veterinario y actualmente se desempeña como Docente en la Universidad Estatal Península de Santa Elena. Ha colaborado en Proyectos de capacitación con la ESPOL, SECAP y fue técnica de campo en el MAG de la Provincia de Santa Elena.



NÉSTOR VICENTE ACOSTA LOZANO

Ingeniero Zootecnista

nacosta@upse.edu.ec

Universidad Estatal Península de Santa Elena

Ingeniero Zootecnista, Diploma Superior en Pedagogía de la Educación Técnica y Profesional, Máster en Producción Animal, mención Nutrición y Alimentación Animal. Doctor en Ciencias Veterinarias (Ph.D). Docente Universitario en la Universidad Estatal Península de Santa Elena, Rector de la Universidad Estatal Península de Santa Elena, publica artículos científicos en revistas de alto impacto Scopus y Latindex, escribe libros de relevancia, ha participado en diferentes eventos nacionales e internacionales del área pecuaria, director de proyectos de investigación I+D, colaborador en redes de investigación de Ecuador.



JEFFERSON RAÚL VARAS AGUILLÓN

Doctor en Medicina Veterinaria y Zootecnista

jvarasaguillon@yahoo.com / jefferson.varas@agrocalidad.gob.ec

**Agencia de Regulación y Control Fito y Zoonosanitario Agrocalidad
Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí ESPAM MFL**

Doctor en Medicina Veterinaria y Zootecnia, graduado de la Universidad Agraria de la Habana, año 2008, estudiante de alto rendimiento académico del Instituto de Ciencia Animal ICA – Cuba en investigación sobre Nutrición y Manejo de Terneros en el trópico, Alumno Ayudante de las asignaturas Histología y Morfofisiología Animal, Magíster en Zootecnia de la Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí ESPAM MFL, experiencia privada en porcinos, bovinos, equinos y Sistemas de Gestión de Calidad. Docente ocasional medio tiempo en Universidad Agraria del Ecuador y ESPAM MFL, Veterinario en el Servicio Oficial del Ecuador.



JULIO CÉSAR VILLACRES MATÍAS

Ingeniero Agropecuario

jvillacres@uagraria.edu.ec

Universidad Agraria del Ecuador

Docente investigador de la universidad Agraria del Ecuador, en las áreas de producción animal, nutrición animal, Pastos y Forrajes, Costos de producción, Análisis de Costos; productor independiente de bovinos de carne y leche, productor de Ganado porcinos, Técnico en explotación de borregos tipo Peli buey, administrador IMPLEMENTFARM. Empresa de ventas, asistencias técnicas y capacitación para el sector agropecuario.



WILMER WAGNER ALCÍVAR GUADAMUD

Médico Veterinario

wwalcivar@yahoo.es / wwalcivar@espam.edu.ec

Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí ESPAM MFL

Médico Veterinario y Abogado de los Juzgados y Tribunales del Ecuador, Magíster en Producción y Nutrición Animal en la Escuela Superior Politécnica del Ejército, actualmente Docente a Tiempo Completo y Coordinador de la Maestría en Medicina Veterinaria Mención Salud y Reproducción de Especies Productivas en la Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López (ESPAM MFL). En el servicio Veterinario Oficial del Ecuador destacó el trabajo como Líder de Sanidad Animal en el Proyecto de Erradicación de Fiebre Aftosa (PEFA) y Director Distrital Tipo B en Agrocalidad Manabí.



VICTOR ALVARO TUALOMBO MASABANDA

Médico Veterinario Zootecnista

victortualombo29@gmail.com

Veterinaria Boston

Soy Médico Veterinario nacido en la Parroquia de Salinas de Guaranda el 29 de abril de 1992, mi infancia pase rodeado de animales de granja, desde ahí mostraba un gran interés por la naturaleza y bienestar de los animales, me gradué en el año 2016, donde dedique todos mis conocimientos al cuidado y bienestar de animales de compañía, participando en campañas de esterilización para control poblacional de caninos y felinos de la ciudad de Quito. Pude estudiar un Posgrado en Medicina Veterinaria mención Clínica y Cirugía de Pequeñas especies.

ÍNDICE

PRÓLOGO	4
ÍNDICE DE TABLAS	11
ÍNDICE DE FIGURAS	13
INTRODUCCIÓN	15
CAPÍTULO I. FUNDAMENTOS DE LA REPRODUCCIÓN ANIMAL Y REGULACIÓN ENDOCRINA	19
Principios biológicos de la reproducción en especies zootécnicas.....	20
Mecanismos hormonales y control endocrino de la función reproductiva	26
Control endocrino en la reproducción estacional y no estacional.....	34
Interacciones neuroendocrinas y su impacto en la fertilidad.....	42
Bases genéticas y moleculares de la reproducción animal	48
La frontera de la precisión molecular	54
CAPÍTULO II. DIAGNÓSTICO Y EVALUACIÓN REPRODUCTIVA	57
Métodos clínicos de evaluación reproductiva.....	57
Técnicas de imagen y laboratorio.....	63
Evaluación de la fertilidad en hembras	68
Evaluación de la fertilidad en machos.....	75
Herramientas de monitoreo y registros reproductivos	80
CAPÍTULO III. TÉCNICAS REPRODUCTIVAS CONVENCIONALES Y BIOTECNOLOGÍA EN HEMBRAS	86
Inseminación artificial.....	86
Transferencia de embriones	94
Criopreservación y manejo de gametos.....	99
Fertilización in vitro y producción de embriones	110

CAPÍTULO IV. BIOTECNOLOGÍAS REPRODUCTIVAS EN MACHOS Y AVANCES GENÉTICOS. 115

Biotecnología seminal	115
Manipulación genética aplicada a la reproducción	120
Clonación y reproducción asistida	124
Producción de animales transgénicos.....	129
Avances en reproducción aviar	133

CAPÍTULO V. PATOLOGÍA REPRODUCTIVA, ÉTICA Y TENDENCIAS FUTURAS 137

Trastornos del ciclo estral.....	137
Patologías reproductivas en machos.....	141
Bioseguridad y sanidad reproductiva	145
Ética y bienestar animal en biotecnología reproductiva	149
Fronteras tecnológicas e innovación en la ciencia de la reproducción	152

REFERENCIAS 155

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Diferenciación morfológica y funcional de las gónadas femeninas en las principales especies de interés zootécnico.....	20
Tabla 2. Mecanismos y señales bioquímicas de reconocimiento materno de la preñez en especies domésticas.....	25
Tabla 3. Parámetros fisiológicos y eventos endocrinos comparados en hembras de especies zootécnicas clave	26
Tabla 4. Dinámica de retroalimentación en el eje reproductivo.....	28
Tabla 5. Contraste funcional entre las prostaglandinas F2 α y E2 en la reproducción.....	31
Tabla 6. Comparativa de la regulación endocrina por sexo en especies zootécnicas.....	33
Tabla 7. Dinámica del fotoperiodo y respuesta pineal en especies domésticas	35
Tabla 8. Efectos del estrés calórico en el eje reproductivo.....	38
Tabla 9. Estrategias biotecnológicas para el control de la estacionalidad y el ambiente ..	41
Tabla 10. Impacto de los mediadores neuroendocrinos en la eficiencia reproductiva.....	45
Tabla 11. Comparación de estrategias de manejo y sus fundamentos neuroendocrinos .	47
Tabla 12. Determinantes genéticos y moleculares en la eficiencia reproductiva	50
Tabla 13. Impacto de la condición corporal (CC) en los parámetros reproductivos clave .	59
Tabla 14. Parámetros biométricos testiculares y su interpretación en el examen de aptitud reproductiva.....	62
Tabla 15. Capacidades diagnósticas de la ultrasonografía Modo-B y Doppler en reproducción animal	65
Tabla 16. Parámetros de evaluación para el monitoreo de la salud reproductiva en grandes especies	71
Tabla 17. Parámetros de referencia en la evaluación andrológica de especies zootécnicas.....	76
Tabla 18. Indicadores básicos para la evaluación de la reproductividad y rentabilidad en la gestión de la ganadería moderna	82

Tabla 19. Procedimientos de inseminación artificial en bovinos y equinos	90
Tabla 20. Especificaciones técnicas y biológicas de la inseminación artificial en ovinos, caprinos y porcinos.....	93
Tabla 21. Factores que intervienen en la eficiencia de la transferencia de embriones bovinos.....	98
Tabla 22. Técnica de congelación lenta y vitrificación.....	101
Tabla 23. Parámetros fisiológicos y composición comparada del eyaculado en especies zootécnicas.....	117
Tabla 24. Marcadores moleculares y genes candidatos asociados a rasgos reproductivos en especies zootécnicas.....	121
Tabla 25. Indicadores de éxito reproductivo según la técnica de producción embrionaria	128
Tabla 26. Eficiencia de transmisión del transgén vía gametos masculinos.....	131
Tabla 27. Impacto de las biotecnologías reproductivas en el macho aviar	135
Tabla 28. Clasificación fisiopatológica del anestro en especies zootécnicas y sus mecanismos de inhibición neuroendocrina	139
Tabla 29. Indicadores de eficiencia biológica y financiera derivados de patologías uterinas.....	141
Tabla 30. Niveles de control y bioseguridad en centros de producción de material genético.....	146
Tabla 31. Marco legal y entidades internacionales que regulan la bioseguridad en el ámbito de la reproducción animal.....	149

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estructura regional del oviducto aviar y cronología de la formación del huevo.	22
Figura 2. Estimulación fotoperiódica y respuesta productiva en aves	36
Figura 3. Relación entre la eficiencia reproductiva y la reserva folicular en hembras zootécnicas	73
Figura 4. Clasificación morfológica de embriones.....	96
Figura 5. Esquema de protocolo de IATF en bovinos.....	107
Figura 6. Técnicas de recolección de ovocitos en bovinos.....	112
Figura 7. Clasificación de agentes crioprotectores según su permeabilidad celular y mecanismos de mitigación del daño térmico	118
Figura 8. Aplicaciones estratégicas de la edición génica mediante el sistema CRISPR/Cas9 en la eficiencia reproductiva y adaptativa de especies zootécnicas.....	123
Figura 9. Ejes de investigación para la mejora de la fertilidad post-descongelación en aves de producción	134



INTRODUCCIÓN



INTRODUCCIÓN

La vida se manifiesta como una secuencia ininterrumpida de mensajes químicos y biológicos cuyo propósito último es la sobrevivencia. En el ámbito de las especies zootécnicas, la reproducción ha dejado de percibirse como un conjunto de eventos fisiológicos para transformarse en un complejo engranaje donde el ser humano, a través de la ciencia, asume el papel de un intérprete estratégico. Este papel invita armonizar el respeto por la integridad biológica con las demandas de la productividad sostenible. Las biotecnologías reproductivas en este marco, no representa herramientas de intervención aisladas, más bien conforman un lenguaje sofisticado que permite un diálogo profundo con la fisiología y la herencia, salvaguardando la soberanía alimentaria y el legado genético de las especies.

Reproducción Animal y Biotecnologías Reproductivas en Especies Zootécnicas surge con el interés de ser un puente, entre el rigor del laboratorio y la realidad del campo. Bajo estas reflexiones, la organización de este texto no responde a una sucesión lineal de temas, al contrario, es una trama de conocimientos en constante interacción, diseñado para que cada capítulo establezca un diálogo con el anterior, bajo la premisa que ninguna técnica alcanza su eficiencia sin un fundamento fisiológico.

El viaje académico inicia con el capítulo I referido al examen de la regulación endocrina y los fundamentos biológicos. En este se examinan los mecanismos hormonales y el control neuroendocrino de la función reproductiva en varias especies zootécnicas, evaluando la ciclicidad estacional y la que no es estacional. En esta fase, el receptor y la hormona crean el marco conceptual de la existencia. Se enfatiza en este punto la labor de las neuronas de kisspeptina como supervisores del desarrollo sexual y la influencia del entorno sobre la homeostasis reproductiva. En este contexto, la melatonina cumple la función de conectar los ritmos biológicos diarios con la estacionalidad anual. El capítulo finaliza con un análisis de las bases moleculares. En este análisis, la proteómica aplicada al semen y la epigenética se muestran como herramientas determinantes para desentrañar la fertilidad en su nivel estructural más profundo.

Estos fundamentos son la base del capítulo II, dedicado al diagnóstico y la evaluación, donde el conocimiento teórico se traslada a la praxis clínica. La capacidad de auscultar la vida con precisión milimétrica se extiende desde la semiología clásica hasta la ultrasonografía Doppler, permitiendo la exploración minuciosa del funcionamiento vascular y el microambiente uterino. En esta sección se analiza la fertilidad de manera completa, desde el examen de la viabilidad

fetal y la fisiopatología del anestro en las hembras, hasta el Examen de Aptitud Reproductiva (EAR) en los machos. En este caso, el sistema CASA y el diagnóstico molecular potencian el análisis convencional, ya que son instrumentos que determinan la arquitectura de la calidad del espermatozoide. Por último, el capítulo completa el ciclo de la gestión contemporánea al incorporar ecosistemas digitales y la supervisión en tiempo real. Con esto, convierte los datos reproductivos en el combustible estratégico para mejorar la genética y la rentabilidad económica de la empresa zootécnica.

El núcleo operativo y clímax de esta obra se despliega en las fronteras de la intervención biotecnológica. Las técnicas de reproducción avanzadas y tradicionales en la hembra son exploradas a fondo en el Capítulo III, donde se muestra que los protocolos de sincronización de celos y la inseminación artificial son los elementos centrales para una producción eficiente. También discute tanto la fertilización *in vitro* y la transferencia de embriones como métodos para multiplicar material genético, así como el papel destacado de la administración de bancos de germoplasma y a la criopreservación. Así, el capítulo establece un vínculo entre la manipulación fisiológica, por medio del control hormonal de la ovulación y la preservación de la biodiversidad zootécnica, asegurando que los recursos genéticos sean viables a lo largo del tiempo.

El Capítulo IV examina la vanguardia de las biotecnologías en machos y los cambios radicales en la genética, así como la manipulación genómica la cual transforma el procesamiento y la criopreservación seminal. Los límites de la selección racial y la resistencia productiva se redefinen gracias a los sistemas CRISPR, que permiten realizar edición génica, igual que la selección asistida por marcadores moleculares. La clonación y la transgénesis, hitos de la biotecnología contemporánea, se examinan en este segmento, considerando con precisión el mecanismo de integración hereditaria. La innovación en la reproducción aviar, que introduce la idea innovadora de machos sustitutos a través de células germinales primordiales (PGCs), es un aspecto definido. De esta manera, se establece una dialéctica entre la innovación molecular y los métodos de difusión tradicionales, proporcionando una perspectiva futura acerca de cómo estos instrumentos moldean el futuro del avance genético global y la seguridad alimentaria.

La síntesis crítica de la patología reproductiva, la bioseguridad y la sanidad, factores que funcionan como el filtro necesario para el éxito de cualquier intervención clínica, cierra este recorrido con el Capítulo V. El texto examina las patologías uterinas y los trastornos de la función folicular, así como las enfermedades del aparato reproductor masculino. El control

de zoonosis y la normativa internacional se incorporan como elementos de la salud pública veterinaria. Además, se tratan la ética y el bienestar de los animales de manera transversal, considerándolos no como limitaciones, sino como principios deontológicos que orientan el desempeño en la profesión. Por último, el libro examina las fronteras tecnológicas y cómo la nanotecnología y la inteligencia artificial tienen el potencial de cambiar la relación con las especies zootécnicas. Proporciona una perspectiva holística sobre el futuro de la reproducción en un mundo que exige eficiencia, sostenibilidad y respeto por la vida.

Para sustentar este corpus académico, la obra se apoya en un andamiaje bibliográfico, actualizados y de alto impacto. Esta rigurosa validación respalda cada protocolo, al tiempo que invita al lector a sumergirse en las fuentes originales, convirtiendo el libro en un recurso de consulta dinámico y vigente.



CAPÍTULO I

**FUNDAMENTOS DE LA
REPRODUCCIÓN ANIMAL Y
REGULACIÓN ENDOCRINA**

CAPÍTULO I.

FUNDAMENTOS DE LA REPRODUCCIÓN ANIMAL Y REGULACIÓN ENDOCRINA

Oscar Darwin Criollo Salinas, Debbie Shirley Chávez García, Jasmin Esmeralda Benítez Mora, Néstor Vicente Acosta Lozano, Jefferson Raúl Varas Aguillón, Julio César Villacres Matías, Wilmer Wagner Alcívar Guadamud y Víctor Alvaro Tualombo Masabanda.

La reproducción animal se posiciona como la columna principal sobre la cual gravita la sostenibilidad y el éxito en los sistemas pecuarios. En el marco de la zootecnia moderna, la eficiencia reproductiva se sitúa más allá de la simple generación de descendencia; representa un fenómeno integral que determina la viabilidad económica de las unidades de producción, salvaguarda la seguridad alimentaria global y dicta el ritmo del progreso genético (1). Este ciclo biológico, de naturaleza intrincada, depende de un equilibrio preciso entre un estado nutricional óptimo, una sanidad rigurosa y un entorno que garantice el bienestar animal, permitiendo que cada individuo manifieste su máximo potencial genético.

El presente capítulo profundiza en los principios biológicos y en los complejos mecanismos neuroendocrinos que orquestan la vida reproductiva en especies de interés zootécnico, tales como bovina, ovina, caprina, porcina, equinos y aves. El estudio y comprensión detallada de cómo interactúan las estructuras anatómicas con la fisiología sistémica y las señales químicas es una premisa indispensable para el ejercicio profesional moderno. Solo a través de este conocimiento es posible la implementación exitosa de biotecnologías reproductivas avanzadas, tales como la inseminación artificial, la transferencia de embriones o la fertilización in vitro, las cuales están diseñadas para optimizar los índices de fertilidad y maximizar la tasa de natalidad en condiciones de campo (2).

La sección detalla cómo están organizados los sistemas reproductores, tanto a nivel funcional como estructural, y establece las comparaciones biológicas esenciales entre especies. El flujo de hormonas y el papel del eje hipotálamo-hipófisis-gonadal se analizan como el sistema central de coordinación que regula los ciclos estrales en las hembras y los procesos de espermatogénesis en los machos.

Finalmente, se aborda la capacidad de adaptación de la reproducción frente a un entorno cambiante. Se analiza la influencia de variables externas, como el fotoperiodo y el estrés térmico, para comprender cómo los animales ajustan su fisiología a los ritmos climáticos. El

capítulo concluye en la vanguardia del conocimiento científico haciendo una breve referencia a las bases genéticas y moleculares que subyacen a la fertilidad animal. La evaluación de la regulación epigenética y la expresión genética proporcionar una perspectiva integral, brindando a veterinarios y estudiantes herramientas para el análisis e intervención en el terreno. El objetivo es optimizar los procesos vitales y la productividad reproductiva de los animales, estableciendo una transición eficaz entre el conocimiento científico y las demandas de la práctica profesional.

Principios biológicos de la reproducción en especies zootécnicas

La comprensión de la reproducción en las especies de interés zootécnico exige un análisis exhaustivo de la base estructural que sustenta la vida. Este apartado no se limita a una descripción estática de la morfología, en su lugar, profundiza en la correlación funcional entre la anatomía y la fisiología, estableciendo el marco conceptual necesario para la intervención biotecnológica avanzada. La reproducción se manifiesta como una sinfonía biológica, donde los sistemas de conducción, los órganos glandulares y el microambiente celular convergen con absoluta precisión para permitir la génesis de una nueva vida (3).

Anatomía y fisiología del aparato reproductor de la hembra

El sistema reproductor femenino en los mamíferos domésticos constituye una unidad funcional sofisticada, responsable de la producción de ovocitos, la facilitación de la fecundación y el mantenimiento de la gestación. Los ovarios se erigen como las gónadas primarias, ejerciendo una dualidad esencial: la función citogénica, encargada de la maduración de los óvulos, y la función endocrina, mediante la síntesis de esteroides sexuales (estradiol y progesterona) que regulan el comportamiento y el ambiente uterino (2).

La morfología ovárica es un testimonio de la especialización evolutiva y presenta variaciones significativas entre especies, como se detalla en la tabla 1.

Tabla 1. *Diferenciación morfológica y funcional de las gónadas femeninas en las principales especies de interés zootécnico*

Especie	Morfología ovárica	Características distintivas
Bovinos / Ovinos	Oval o almendrada	Presencia de folículos y cuerpos lúteos proyectados hacia la superficie

Suinos (Porcinos)	Lobulada (racimo)	Naturaleza politoca; múltiples folículos en desarrollo simultáneo
Equinos	Arriñonada	Presencia de la fosa de ovulación, único punto de liberación del gameto

Nota. Adaptado de Dyce et al (4)

Las variaciones en la estructura ovárica entre especies, además de determinar la capacidad de ovulación simple o múltiple, también condicionan el abordaje técnico mediante palpación rectal y el diagnóstico ecográfico en campo.

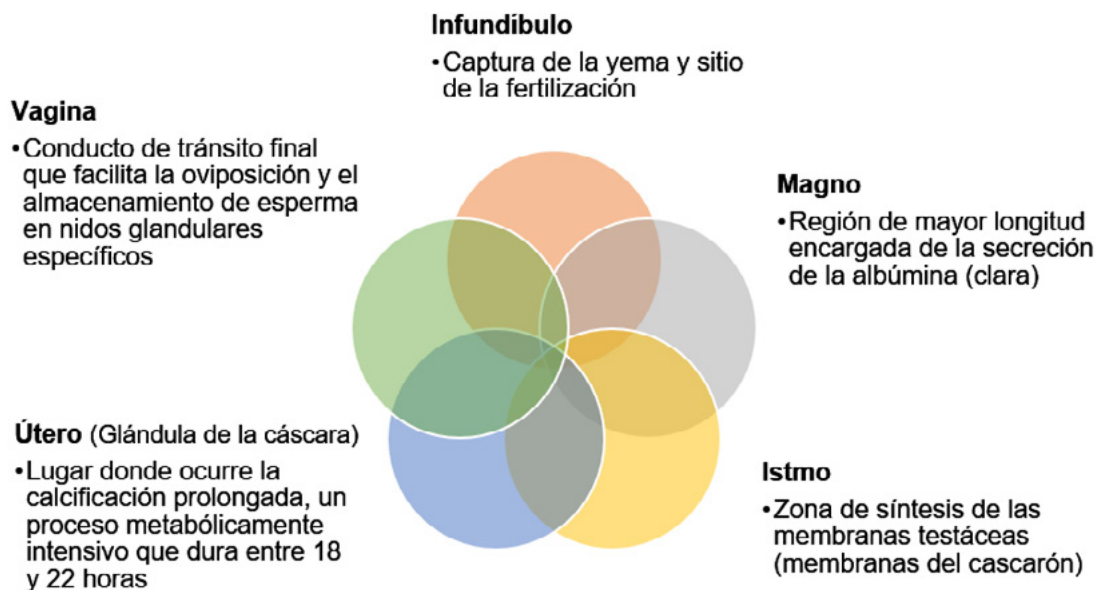
Las trompas uterinas, también llamadas oviductos, se localizan en la transición hacia el útero y están compuestas por el istmo, el ampulla y el infundíbulo. El evento crucial de la fertilización tiene lugar en el ampulla, después de que los gametos se encuentran. A pesar de que el útero en los mamíferos domésticos tiene una estructura bicornual, las proporciones del cuerpo y los cuernos uterinos se diferencian notablemente dependiendo de las adaptaciones reproductivas específicas de cada grupo. Mientras que en la cerda los cuernos uterinos son extensos y flexuosos para albergar camadas numerosas, en la yegua el cuerpo uterino es prominente, reflejando su condición de especie monotoca (2). Finalmente, el cérvix actúa como un centinela físico y químico; su estructura interna, compuesta por anillos cartilaginosos en rumiantes o pliegues longitudinales en equinos, garantiza la inviolabilidad del ambiente uterino durante la gestación.

El sistema reproductivo en las aves y sus particularidades

La reproducción aviar se aparta de los patrones mamíferos mediante adaptaciones evolutivas orientadas a la oviparidad y la reducción del peso corporal para el vuelo. La gallina doméstica presenta una asimetría funcional característica: la atrofia del lado derecho del tracto reproductivo, manteniendo únicamente el ovario y el oviducto izquierdos como órganos activos. El ovario aviar se organiza bajo una jerarquía folicular estricta, donde los folículos se disponen en un ordenamiento de madurez decreciente, similar a un racimo de frutos dorados (5).

El oviducto aviar es una estructura de alta especialización dividida en cinco regiones funcionales que configuran la formación del huevo, como se puede observar en la figura 1.

Figura 1. Estructura regional del oviducto aviar y cronología de la formación del huevo



Nota: Adaptado de Sturkie (5); Sauveur (6)

Anatomía y fisiología del aparato reproductor del macho

En el macho, el sistema reproductivo opera como un centro de producción masiva y constante de gametos, diseñado para el transporte efectivo de la información genética. Los testículos, situados fuera de la cavidad abdominal en la mayoría de las especies de interés productivo, actúan como fábricas termorreguladas. La «espermátogénesis» ocurre bajo el amparo de las células de Sertoli, mientras que la producción de andrógenos recae en las células de Leydig (7).

El escroto y el plexo pampiniforme desempeñan un papel determinante en el mantenimiento de una temperatura testicular inferior a la corporal (entre 2°C y 6°C menos), condición sine qua non para preservar la viabilidad espermática y la integridad del ADN. Tras su formación, los espermatozoides se trasladan al epidídimo, el centro logístico donde adquieren la motilidad progresiva y la capacidad de fertilización.

La secreción del plasma seminal es responsabilidad de las glándulas anexas, que son: próstata, vesículas seminales y glándulas bulbouretrales. Este medio líquido, que posee concentraciones elevadas de fructosa, sistemas amortiguadores y complejos enzimáticos, es un elemento esencial para proteger la viabilidad celular frente al entorno vaginal y proporcionar el sustrato metabólico necesario para la motilidad del espermia. La magnitud de estas glándulas varía drásticamente: el berraco posee glándulas bulbouretrales de gran volumen para producir eyaculados masivos, mientras que el toro se distingue por un volumen seminal reducido, pero con una densidad de población espermática excepcionalmente elevada (3) (7).

Hormonas y control neuroendocrino de la reproducción

La organización sistemática de los procesos fisiológicos descritos en párrafos anteriores no constituye un evento azaroso ni aislado; muy por el contrario, responde a una intrincada y sofisticada red de mensajeros químicos que conforman en su conjunto el eje hipotálamo-hipófisis-gónada (HHG). Este sistema opera como un auténtico centro de control jerárquico y bidireccional, donde la hormona liberadora de gonadotropinas (GnRH), sintetizada por neuronas especializadas en los núcleos hipotalámicos, ejerce el papel de señal maestra. Su liberación pulsátil hacia el sistema porta-hipofisario es el latido que marca el ritmo reproductivo, estimulando a las células gonadotropas de la adenohipófisis para la secreción coordinada de dos glicoproteínas fundamentales como lo son la hormona folículo estimulante (FSH) y la hormona luteinizante (LH) (3) (2).

a FSH es el principal regulador del desarrollo de los gametos. En la hembra, su función es llevar a cabo el reclutamiento de los folículos y avanzar hacia las etapas antrales, evitando así la atresia ovárica. La FSH resulta esencial para conservar la espermatogénesis en el macho, ya que actúa sobre las células de Sertoli, que proporcionan protección y nutrición a las líneas celulares germinales dentro de los túbulos seminíferos. Por su parte, la hormona luteinizante (LH) desempeña un rol ejecutivo y determinante: en la hembra, su incremento masivo desencadena la cascada enzimática de la ovulación, mientras que en el macho promueve la síntesis de testosterona en las células de Leydig, asegurando tanto la libido como la integridad funcional de todo el tracto reproductivo (7) (8).

Dinámica del ciclo estral y el diálogo esteroideo

La progresión del ciclo estral se fundamenta en un diálogo bioquímico constante y sutil entre estas gonadotropinas hipofisarias y los esteroides secretados por las gónadas. El estradiol, producido por las células de la granulosa en los folículos dominantes, actúa como una señal de madurez; no solo induce los cambios conductuales del celo (receptividad sexual), sino que, al alcanzar un umbral de concentración crítico, transforma la retroalimentación negativa en una retroalimentación positiva sobre el hipotálamo y la hipófisis.

Este fenómeno biológico culmina en el pico preovulatorio de la hormona luteinizante, un evento de precisión quirúrgica que desencadena la ruptura folicular y la subsecuente liberación del ovocito hacia el oviducto (2) (7).

Tras la ovulación, el tejido folicular remanente experimenta una metamorfosis conocida como luteinización, dando origen al cuerpo lúteo. Esta glándula transitoria asume el control del sistema mediante la secreción de progesterona, la hormona del reposo reproductivo y centinela de la gestación. La progesterona domina la fase lútea, ejerciendo una potente retroalimentación negativa que bloquea el pico de la hormona luteinizante y prepara el endometrio uterino para el reconocimiento materno. Bajo su influencia, el útero se convierte en un ambiente nutritivo y silente, condición indispensable para la supervivencia del embrión antes de su implantación (3) (2).

El mecanismo de reinicio: Luteólisis y reconocimiento materno

Cuando la fecundación no ocurre o el embrión no logra desarrollarse, el sistema reproductivo debe reiniciarse para ofrecer una nueva oportunidad de concepción. Este proceso se desencadena ante la ausencia de una señal de reconocimiento materno de la preñez. En los rumiantes, por ejemplo, esta señal es el interferón-tau, una proteína sintetizada por el trofoblasto embrionario que comunica al organismo materno la presencia de vida (2) (8).

Si esta señal no es detectada, la homeostasis reproductiva activa una secuencia de eventos regresivos. El endometrio uterino, al no percibir la presencia del embrión, comienza la secreción pulsátil de prostaglandina [$F_{2\alpha}$ ($PGF_{2\alpha}$)]. Esta hormona actúa como un mensajero local de alta precisión que utiliza un ingenioso sistema de transporte: el mecanismo de contracorriente arterio-venosa. Mediante este sistema, la prostaglandina se transfiere directamente desde la vena uterina hacia la arteria ovárica sin pasar por la circulación general, evitando así su degradación en los pulmones y asegurando que llegue con toda su potencia al ovario (1) (7).

Una vez en el ovario, la prostaglandina $F_{2\alpha}$ ($PGF_{2\alpha}$) ejerce su función principal, la luteólisis. Este proceso consiste en la regresión física y funcional del cuerpo lúteo, la glándula que hasta ese momento mantenía los niveles elevados de progesterona. Al colapsar el cuerpo lúteo, las concentraciones de progesterona caen drásticamente, lo que elimina el freno hormonal sobre el hipotálamo y permite que el ciclo estral recomience, orquestando el crecimiento de nuevos folículos para un próximo celo (2) (8).

Este evento de «reinicio del sistema reproductivo» solo se posterga si ocurre el reconocimiento materno de la preñez. Como se observa en la tabla 2, la naturaleza ha diseñado estrategias divergentes para un mismo fin: proteger el cuerpo lúteo. Mientras que en los rumiantes la señal es una proteína específica (Interferón-tau), en la cerda el estradiol actúa como el mediador

clave, y en la yegua, el contacto físico del embrión con el endometrio mediante su constante movimiento es el factor determinante para la continuidad de la gestación (2) (8).

El éxito del reconocimiento materno representa el hito biológico primordial de la gestación. Este proceso exige una sincronía absoluta entre el ritmo de desarrollo del embrión y la fase de receptividad del endometrio.

Tabla 2. *Mecanismos y señales bioquímicas de reconocimiento materno de la preñez en especies domésticas*

Especie	Señal de reconocimiento	Mecanismo de acción principal	Período crítico (días post-ovulación)
Bovinos (Vaca)	Interferón-tau (IFN- τ)	Inhibe la síntesis de receptores de oxitocina en el endometrio, bloqueando así la cascada de liberación pulsátil de PGF2 α	16 - 17 días
Suinos (Cerda)	Estradiol (Estrógenos)	Redirige la secreción de PGF2 α hacia el lumen uterino (vía exocrina) para su degradación enzimática, impidiendo su transporte hacia el ovario	11 - 12 días
Equinos (Yegua)	Movilidad embrionaria	El embrión debe recorrer todo el útero múltiples veces al día para distribuir una señal (aún no plenamente identificada) que bloquee la luteólisis	12 - 14 días

Nota. Adaptado de Senger (2); Bearden et al (8)

Si esta comunicación falla, ya sea por un retraso embrionario o una ventana de sensibilidad endometrial alterada, el útero liberará de manera inadvertida la prostaglandina [F2 α (PGF2 α)], lo que resulta en la regresión del cuerpo lúteo, la pérdida del concepto y el reinicio inmediato del ciclo estral.

En la especie porcina, la detección por parte de la madre de que está embarazada está determinada por un elemento cuantitativo particular: la presencia de al menos dos embriones en cada cuerno del útero. Para lograr el umbral de estrógenos que provoca la reorientación de la prostaglandina (PGF2 α) hacia la vía exocrina (lumen uterino), es esencial esta presencia mínima. Este procedimiento previene la luteólisis, garantizando que el cuerpo lúteo perdure y que la preñez se conserve.

Análisis comparativo de la fisiología reproductiva

Para la implementación exitosa de cualquier técnica de manejo reproductivo, es imperativo reconocer que cada especie posee un «reloj biológico» con parámetros específicos. La tabla 3 ofrece una síntesis de las variables endocrinas y fisiológicas que diferencian a los principales grupos zootécnicos, permitiendo una visión comparada indispensable para el diagnóstico clínico y la intervención biotecnológica.

Tabla 3. *Parámetros fisiológicos y eventos endocrinos comparados en hembras de especies zootécnicas clave*

Característica	Bovinos	Porcino	Equinos	Ovinos
Tipo de ciclo	Poliéstrico Continuo	Poliéstrico Continuo	Poliéstrico Estacional (Día largo)	Poliéstrico Estacional (Día corto)
Duración del ciclo (días)	21	21	21-22	17
Duración del estro	12-18 horas	48-72 horas	5-7 días	24-36 horas
Momento de ovulación	10-15 h post-estro	36-44 h post-inicio	1-2 días antes fin estro	Final del estro
Tipo de placenta	Cotiledonaria	Difusa	Difusa	Cotiledonaria

Nota. Adaptado de Chacón et al (3); Senger (2)

Los tiempos y clasificaciones que se presentan en la tabla 3 son valores promedio; factores como la nutrición, el fotoperiodo y el estrés térmico pueden inducir variaciones significativas en la expresión del estro y la duración de las fases del ciclo, como se verá posteriormente.

Mecanismos hormonales y control endocrino de la función reproductiva

La gobernanza de la función reproductiva en las especies de interés zootécnico no debe entenderse como una sucesión lineal y simplista de eventos fisiológicos, sino más bien como un entramado dinámico, muy complejo, de señales moleculares y circuitos de retroalimentación bidireccional. Este sistema opera bajo la regulación del eje hipotálamo-hipófisis-gónada (HHG), el cual actúa como una unidad de procesamiento central que integra estímulos de diversa naturaleza. La precisión con la que este eje modula la liberación de neuropéptidos y esteroides permite que el organismo animal decodifique y traduzca señales ambientales, tales como la disponibilidad nutricional, el estrés metabólico y los ritmos circadianos, en respuestas biológicas concretas que aseguran la continuidad de la especie (7) (2).

El diseño funcional de este control reside en la naturaleza pulsátil de la Hormona Liberadora de Gonadotropinas (GnRH). Este decapeptido, sintetizado por neuronas especializadas en los núcleos preóptico y arciforme del hipotálamo, no se vierte al torrente sanguíneo general, sino que es secretado hacia el sistema portal hipotálamo-hipofisario. La frecuencia y la amplitud de estos pulsos de GnRH dictan el código que la adenohipófisis debe decodificar para secretar, de manera diferencial, las gonadotropinas: la hormona folículo estimulante (FSH) y la hormona luteinizante (LH) (9). Un desajuste mínimo en esta cadencia neuroendocrina puede precipitar el cese de la actividad cíclica, conduciendo a anestros profundos o disfunciones foliculares que impactan directamente en la eficiencia productiva de la unidad ganadera (10).

Dinámica folicular y la cascada bioquímica de la ovulación

El ovario no es un órgano estático, sino un escenario de constante remodelación tisular. La función ovárica está definida por la «dinámica de ondas foliculares», un proceso de reclutamiento, selección y dominancia que ocurre de manera rítmica durante la mayor parte de la vida de la hembra. Cada onda se inicia con la emergencia de una cohorte de folículos antrales que responden a un incremento transitorio en las concentraciones basales de FSH. Este incremento es el catalizador que rescata a un grupo de folículos de la reserva pool de la atresia y los impulsa hacia un crecimiento acelerado (1).

A medida que la cohorte progresa, la competencia intraovárica se intensifica. El folículo que logra expresar una mayor cantidad de receptores para FSH y, posteriormente, desarrolla receptores para LH en las células de la granulosa, es el que alcanza la jerarquía de folículo dominante. Este protagonista biológico ejerce un control endocrino sobre sus pares mediante la secreción de inhibina y concentraciones crecientes de estradiol (E_2). Estas sustancias viajan hacia la hipófisis para suprimir la secreción de FSH, provocando que los folículos subordinados, carentes de una sensibilidad suficiente para sobrevivir con niveles bajos de gonadotropinas, entren en regresión o atresia (11) (12).

La regulación de la actividad gonadal depende de un diálogo molecular ininterrumpido donde la intensidad y el sentido de la señal varían según el estado fisiológico del animal. Este control se instrumenta mediante circuitos de retroalimentación que permiten al sistema nervioso central monitorear la madurez folicular o la eficiencia espermatogénica. Con el fin de sistematizar estas interacciones, la tabla 4 detalla la dinámica de retroalimentación del eje reproductivo, identificando las hormonas, sus tejidos diana y las consecuencias biológicas derivadas de su fluctuación plasmática.

Tabla 4. *Dinámica de retroalimentación en el eje reproductivo*

Hormona	Tejido Blanco	Tipo de Feedback	Efecto Fisiológico Principal
GnRH	Adenohipófisis	Estimulación	Síntesis y liberación de LH y FSH
Estradiol (Bajo)	Hipotálamo / Hipófisis	Negativo	Supresión de FSH; control del reclutamiento
Estradiol (Alto)	Centro de Sobrecarga	Positivo	Inducción del pico preovulatorio de LH
Progesterona	Hipotálamo	Negativo	Bloqueo de la GnRH; mantenimiento de la quiescencia
Inhibina	Adenohipófisis	Negativo (Selectivo)	Inhibición específica de la secreción de FSH
Testosterona	Hipotálamo / Hipófisis	Negativo	Regulación de la frecuencia de pulsos de LH

Nota. Adaptado de Senger (2); Galina y Valencia (7)

En la tabla 4 se describe la jerarquía del control endocrino, resaltando la dualidad funcional de moléculas como el estradiol, cuya respuesta varía de inhibitoria a estimuladora dependiendo del umbral de concentración y el tejido efector. Esta plasticidad hormonal es el fundamento biológico que permite la transición entre las fases del ciclo estral. Asimismo, se evidencia el papel de la progesterona y la testosterona como agentes de estabilidad homeostática, los cuales, mediante un feedback negativo persistente, regulan la frecuencia de los pulsos de GnRH para evitar la sobreestimulación de las gónadas.

La culminación o clímax de la fase folicular es la ovulación, un fenómeno que trasciende la simple ruptura de un tejido. Es una cascada bioquímica inflamatoria magistralmente ejecutada. Cuando los niveles de estradiol superan un umbral crítico por un tiempo determinado (generalmente entre 12 y 24 horas), se activa el centro de sobrecarga hipotalámico, disparando el pico preovulatorio de LH. Esta oleada hormonal desencadena una serie de eventos intramurales:

- 1. Activación enzimática:** Se promueve la síntesis de activador del plasminógeno y metaloproteinasas, las cuales degradan el colágeno de la túnica albugínea en el estigma ovárico (9).

- 2. Modulación de prostaglandinas:** Hay un aumento local de $\text{PGF}_{2\alpha}$ y PGE_2 , que incrementan la presión intrafolicular y estimulan las contracciones de la musculatura lisa del ovario.
- 3. Reanudación meiótica:** El ovocito, que se encontraba detenido en el dictioteno de la profase I, completa su primera división meiótica, preparándose para la eventual fertilización (12).

La rotura folicular permite que el complejo cúmulo-ovocito sea capturado por las fimbrias del infundíbulo, mientras que el remanente folicular inicia una transformación fenotípica inmediata hacia tejido lúteo.

Fases del ciclo estral y la transición a la dominancia lútea

El ciclo estral de las especies zootécnicas es un reflejo de la alternancia entre la hegemonía de los estrógenos y la supremacía de la progesterona. La fase folicular (proestro y estro) es el periodo de preparación para la cópula. El estradiol actúa como un potente agente mitogénico, induciendo la hiperplasia del endometrio y aumentando el flujo sanguíneo hacia el tracto reproductivo mediante la liberación de óxido nítrico. Durante el estro, la relajación del cuello uterino y la secreción de moco cervical con propiedades reológicas específicas (baja viscosidad y alta filancia) no solo facilitan el transporte espermático, sino que actúan como una barrera inmunológica selectiva (2) (8).

Posterior a la ovulación, el sistema entra en la fase lútea (metaestro y diestro), donde el cuerpo lúteo (CL) se convierte en el centro de control. Las células de la granulosa y de la teca experimentan una hipertrofia e hiperplasia para formar las células lúteas grandes y pequeñas, respectivamente. La progesterona (P_4) secretada por el CL es el pilar de la homeostasis gestacional. Su función es dual, por un lado, induce la diferenciación glandular del endometrio para la producción de histótrofo y, por otro, ejerce un bloqueo neuroendocrino que impide la manifestación de un nuevo estro, manteniendo el sistema en un estado de espera biológica hasta que se confirme la presencia o ausencia de un embrión (13).

En especies como la bovina, ovina y porcina, si el útero no detecta la presencia de señales trofoblásticas (como el interferón tau o el estradiol, según la especie), el endometrio inicia la síntesis pulsátil de $\text{PGF}_{2\alpha}$. Este agente luteolítico destruye la integridad vascular y celular del cuerpo lúteo, provocando una caída drástica de la progesterona que permite el reinicio de

un nuevo ciclo estral, garantizando que la hembra tenga una nueva oportunidad de quedar gestante en el menor tiempo posible (14).

Rol de los eicosanoides en la transición folículo-lútea

En el ecosistema reproductivo, las prostaglandinas $PGF_{2\alpha}$ y PGE_2 actúan como interruptores biológicos que deciden el destino de las estructuras ováricas. Aunque químicamente son similares, sus efectos suelen ser antagónicos o complementarios dependiendo del momento del ciclo.

A. Prostaglandina $F_{2\alpha}$ ($PGF_{2\alpha}$): El regulador del tiempo lúteo

La $PGF_{2\alpha}$ es el principal agente de control temporal del ciclo estral. Su función primordial es la luteólisis, un proceso de autodestrucción programada del cuerpo lúteo.

- **Mecanismo de acción:** El útero, si no se identifica la presencia de un embrión, libera $PGF_{2\alpha}$ en pulsos que afectan directamente al ovario. Como resultado, la circulación de sangre en el cuerpo lúteo disminuye drásticamente y se producen procesos de muerte celular programada mediada por caspasas, lo que provoca la interrupción de la síntesis de progesterona (12).
- **Importancia zootécnica:** La síntesis industrial de análogos de esta hormona es un avance en la producción animal, ya que posibilita la sincronización del comportamiento reproductivo y la aplicación a gran escala de la inseminación artificial a tiempo fijo (IATF).

B. Prostaglandina E_2 (PGE_2): El facilitador de la vida y el parto

Mientras que la $PGF_{2\alpha}$ destruye, la PGE_2 suele proteger o preparar.

- **En el folículo:** Actúa en sinergia con la LH para aumentar la presión hidrostática dentro del folículo maduro, facilitando la expulsión del ovocito.
- **En el reconocimiento de la preñez:** En algunas especies, como la equina, la PGE_2 es vital para el transporte del embrión a través del oviducto.
- **En el cérvix:** Durante el parto, la PGE_2 promueve la degradación de las fibras de colágeno (maduración cervical), permitiendo que el cuello uterino se dilate lo suficiente para el paso del feto, actuando de forma opuesta a la progesterona que lo mantenía sellado (8) (14).

La tabla 5 ilustra el contraste funcional entre la prostaglandina $F_{2\alpha}$ ($PGF_{2\alpha}$) y el estradiol (E_2) dentro de la cascada reproductiva.

Tabla 5. *Contraste funcional entre las prostaglandinas F_{2α} y E₂ en la reproducción*

Atributo	Prostaglandina F _{2α} (PGF _{2α})	Prostaglandina E ₂ (PGE ₂)
Acción Vascular	Vasoconstrictora (Isquemia lútea)	Vasodilatadora (Hiperemia folicular)
Efecto en el Cuerpo Lúteo	Luteolítica (Degradación)	Luteotrópica (Sostenimiento en ciertas fases)
Efecto en el Miometrio	Contracción potente	Modulación y relajación cervical
Papel Clínico	Sincronización de celos e inducción del parto	Maduración del cérvix y soporte embrionario

Nota. Adaptado de Hunter (11); Palma (10)

La información suministrada en la tabla 5 permite diferenciar la especialización de los eicosanoides en la fisiología reproductiva. Se observa que la armonía del ciclo estral depende del equilibrio entre estas dos moléculas; una predominancia prematura de *PGF_{2α}* resultaría en la pérdida de la gestación, mientras que una deficiencia de *PGE₂* impediría eventos críticos como la ovulación o la correcta dinámica del parto. Este balance es el que los profesionales de la zootecnia manipulan para optimizar los índices de natalidad en el hato.

Regulación endocrina de la espermatogénesis y cinética testicular

A diferencia de la ciclicidad que define a la hembra, el control endocrino en el macho se rige por un estado de equilibrio tónico, cuya finalidad es sostener una producción ininterrumpida de gametos sin las fluctuaciones drásticas de la fase lútea o folicular. La espermatogénesis es un proceso de diferenciación celular que transcurre en el compartimento tubular del testículo, un nicho biológico protegido por la barrera hematotesticular que previene el reconocimiento inmunológico de las células germinales haploides (3) (13).

La hormona luteinizante (LH) desempeña un rol de primer orden al interactuar con receptores de membrana acoplados a proteína G en las células de Leydig, situadas en el intersticio testicular. Esta señalización activa la cascada del AMP cíclico, que culmina en la translocación de colesterol hacia la membrana mitocondrial interna, paso limitante para la síntesis de testosterona. La testosterona es la responsable de la expresión del fenotipo masculino y la conducta de monta, no obstante, su función más determinante paracrina, dado que se propaga por los túbulos seminíferos y, en cantidades significativas, funciona como el combustible metabólico primordial para el avance de la meiosis I y II. (9) (14).

Paralelamente, la FSH ejerce su mandato sobre las células de Sertoli, las cuales actúan como auténticas arquitectas y reguladoras del epitelio germinal. Bajo el influjo de la FSH, estas células sintetizan la Proteína Ligadora de Andrógenos (ABP), cuya función es retener la testosterona intratesticular para evitar que su concentración caiga por debajo de los niveles requeridos para la espermatocitogénesis. Además, las células de Sertoli son responsables de la producción de inhibina, una glicoproteína que viaja sistémicamente para ejercer una retroalimentación negativa específica sobre la adenohipófisis, regulando la liberación de FSH y, por ende, el número de células germinales que inician el proceso de maduración (8) (13).

La culminación de este proceso es la espermiogénesis, donde las espermatidas sufren una metamorfosis morfológica que incluye la formación del acrosoma, la condensación del núcleo y el desarrollo del flagelo. Este proceso no sería posible sin la interacción coordinada de andrógenos y gonadotropinas, cuya estabilidad garantiza que un semental sea capaz de producir miles de espermatozoides por segundo de manera constante durante su vida útil (14).

Interacciones de retroalimentación y homeostasis reproductiva sistémica

La estabilidad del sistema reproductivo en las especies zootécnicas depende de una red de biosensores que ajustan la producción hormonal en tiempo real. Este fenómeno, conocido como homeostasis reproductiva, evita el agotamiento de los recursos biológicos y asegura que la función sexual sea compatible con el estado de salud general del animal. La comunicación se fundamenta en circuitos de retroalimentación (feedback) que operan en niveles de respuesta corta y larga.

En el macho, el sistema es predominantemente negativo. La testosterona circulante actúa sobre el hipotálamo y la hipófisis para inhibir la frecuencia de los pulsos de GnRH y LH. Si los niveles de testosterona caen, el freno desaparece, permitiendo que las gonadotropinas aumenten para estimular nuevamente al testículo. Esta autorregulación mantiene un nivel basal de hormonas que sostiene la espermatogénesis sin inducir una desensibilización de los receptores (7) (9).

En la hembra, el sistema es mucho más complejo debido a su carácter dual. Durante la mayor parte del ciclo estral, el estradiol y la progesterona ejercen una retroalimentación negativa sobre la liberación de GnRH, manteniendo el sistema en una fase de crecimiento folicular controlado o de quietud lútea. Sin embargo, el centro de sobrecarga (surge center) del hipotálamo posee una sensibilidad única, cuando el estradiol alcanza niveles máximos en ausencia de progesterona, el feedback se invierte y se vuelve positivo. Esta respuesta masiva es la llave que libera el pico de LH, indispensable para la ovulación. La progesterona, por su parte, actúa

como el regulador maestro de la ciclicidad; mientras esté presente en niveles elevados, el eje se encuentra en un estado de refractariedad, impidiendo que cualquier estímulo exógeno o endógeno provoque una ovulación prematura que interrumpa una posible gestación (2), (12).

La comprensión integral de la endocrinología comparada exige un análisis pormenorizado de las divergencias funcionales entre ambos sexos. El ejemplar macho muestra un comportamiento endocrino invariable que tiene como objetivo la producción abundante de gametos, mientras que el sistema reproductor femenino sigue un patrón de ciclos y cambios ováricos regulares. Las fluctuaciones en los patrones de liberación hormonal, las funciones específicas de las gonadotropinas y los procesos de autorregulación que aseguran la estabilidad reproductiva se detallan en la Tabla 6.

Tabla 6. *Comparativa de la regulación endocrina por sexo en especies zootécnicas*

Característica	Hembra (Sistema Cíclico)	Macho (Sistema Tónico)
Patrón de GnRH	Pulsátil con picos masivos preovulatorios	Pulsos tónicos constantes (cada 4-6 h)
Rol de la LH	Ovulación y mantenimiento del cuerpo lúteo	Síntesis de testosterona (Células de Leydig)
Rol de la FSH	Selección y dominancia folicular	Soporte de células de Sertoli y ABP
Hormona de Feedback	Estradiol (+ y -) y Progesterona (-)	Testosterona (-) e Inhibina (-)
Consecuencia Falla	Anestro, quistes ováricos o mortalidad embrionaria	Descenso de la libido y oligospermia

Nota. Adaptado de Bearden et al. (8); Galina y Valencia (7)

La comparación que se ha presentado en la tabla 6 ilustra la especialización funcional del eje hipotálamo-hipófisis-gónada según el dimorfismo sexual. Se destaca que, si bien es cierto que ambos sexos dependen de las mismas señales basales (GnRH, LH y FSH), la sensibilidad de los centros hipotalámicos a los esteroides gonadales (particularmente la capacidad de la hembra para generar una retroalimentación positiva), marca la pauta de la eficiencia reproductiva. Las fallas o alteraciones en estos mecanismos no solo comprometen la fertilidad individual, sino que también representan los principales desafíos que enfrentan las biotecnologías reproductivas, las cuales buscan superar mediante la implementación de protocolos de sincronización y manipulación hormonal.

Control endocrino en la reproducción estacional y no estacional

La evolución ha dotado a las especies zootécnicas de mecanismos adaptativos sofisticados que permiten sincronizar la actividad reproductiva con los periodos del año más favorables para la supervivencia de la progenie. Esta estrategia biológica, conocida como estacionalidad reproductiva, no debe interpretarse como un evento azaroso, sino más bien, como un diálogo orquestado entre el entorno y el sistema neuroendocrino, donde cada elemento responde y se ajusta en armonía para asegurar la reproducción en el momento más propicio (15). En su esencia, se fundamenta en la capacidad del animal para percibir señales ambientales (señales químicas, térmicas y lumínicas) y traducirlas en un lenguaje hormonal que el organismo pueda ejecutar. En la producción pecuaria moderna, el desafío radica en descifrar estos mecanismos para mitigar sus efectos limitantes, permitiendo una oferta constante de alimentos a pesar de las fluctuaciones naturales que dicta el calendario solar (16).

Mecanismos de la estacionalidad y el papel de la melatonina

El principal regulador de la estacionalidad en los mamíferos es el fotoperiodo, entendido como la proporción relativa entre las horas de luz y oscuridad en un ciclo de 24 horas. Este estímulo luminoso actúa como una brújula temporal que guía la fisiología del animal. El proceso se inicia cuando la retina capta los fotones, enviando una señal eléctrica a través del tracto retinohipotalámico hacia el núcleo supraquiasmático (NSQ) del hipotálamo (17). El NSQ, que actúa como el reloj biológico central, procesa esta información y proyecta la señal hacia la glándula pineal a través de una vía polisináptica que involucra al sistema nervioso simpático.

La glándula pineal actúa como un transductor neuroendocrino que se especializa en la producción de melatonina (N-acetil-5-metoxitriptamina). La secreción del indol tiene lugar únicamente en condiciones de escotofase (falta de luz), lo que establece la regulación del ritmo circadiano. La duración del tiempo de oscuridad se puede medir con exactitud a través de la persistencia de sus niveles en el plasma, que actúan como un mensajero químico que codifica la temporalidad biológica del animal. Esta señalización hormonal no solo informa al organismo sobre la cronología externa, sino que modula la armonía entre el entorno y el reloj interno, permitiendo que la fisiología animal se sincronice con las fluctuaciones del calendario solar (18).

- **Transducción de la señal:** En especies denominadas reproductores de día corto, como los ovinos y caprinos, la melatonina actúa como un potente catalizador de la actividad reproductiva. Durante el otoño e invierno, el incremento en la duración de la señal de melatonina interactúa con neuronas especializadas en la «pars tuberalis» de la hipófisis.

- **Regulación de las hormonas tiroideas:** En este punto, la melatonina modula la expresión de la enzima deiodinasa tipo 2 (DIO2) y tipo 3 (DIO3), las cuales regulan las concentraciones locales de triyodotironina (T3) en el hipotálamo (19).
- **Reactivación del eje GnRH:** Este intrincado proceso neuroquímico reduce la sensibilidad del hipotálamo al “feedback” negativo del estradiol. Al liberarse de este freno, las neuronas productoras de GnRH recuperan su frecuencia pulsátil, desencadenando la actividad cíclica ovárica o la máxima capacidad espermatogénica en el macho (20).

La respuesta neuroendocrina a las fluctuaciones del fotoperiodo no es uniforme entre las diversas especies de interés zootécnico; responde, por el contrario, a una especialización evolutiva que dicta el éxito de la concepción y la supervivencia de las crías. Esta divergencia fisiológica se manifiesta en la manera en que la señal de la melatonina es interpretada por el eje hipotálamo-hipófisis-gónada, ya sea como un estímulo activador o un freno inhibitorio. En la tabla 7, se especifica la clasificación de las principales especies domésticas según su estrategia reproductiva y su respuesta específica a la señal pineal.

La clasificación como reproductores de día corto o día largo está intrínsecamente ligada a la duración de la fase de oscuridad. En los pequeños ruminantes, la secreción prolongada de melatonina reduce la sensibilidad del hipotálamo al feedback negativo de los esteroides, mientras que, en los équidos, dicha prolongación mantiene el estado de anestro estacional.

Tabla 7. *Dinámica del fotoperiodo y respuesta pineal en especies domésticas*

Especie	Estrategia Reproductiva	Estación de Pico Actividad	Respuesta a la Melatonina
Ovino (<i>Ovis aries</i>)	Día corto	Otoño / Invierno	Estimula la secreción de GnRH
Caprino (<i>Capra hircus</i>)	Día corto	Otoño / Invierno	Induce la ciclicidad estacional
Equino (<i>Equus ferus caballus</i>)	Día largo	Primavera / Verano	Inhibe la actividad del eje H-H-G
Bovino (<i>Bos taurus</i>)	No estacional (Poliéstrico)	Todo el año	Influencia moduladora menor

Nota. Adaptado de Malpoux et al. (15); Rosa y Bryant (19)

En especies poliéstricas continuas, si bien la melatonina no dicta la ciclicidad, ejerce roles moduladores en procesos periféricos y de termorregulación.

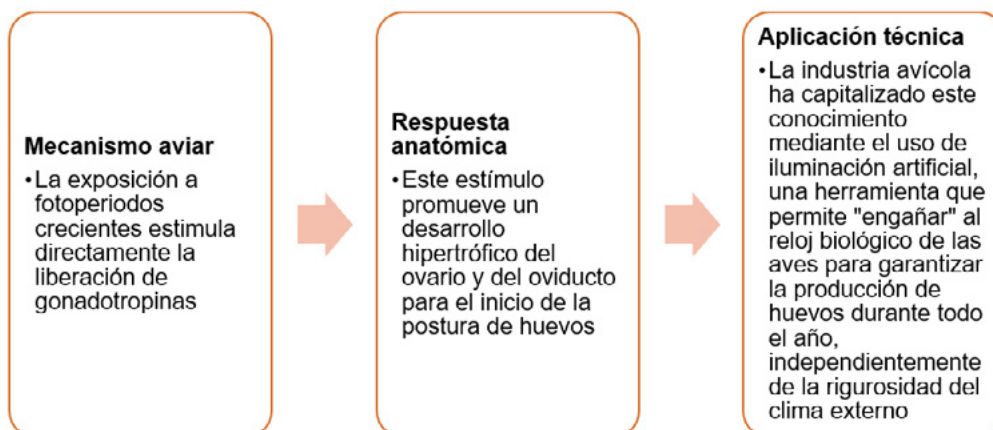
Adaptaciones en especies de día largo y el estado de quiescencia

A diferencia de los pequeños rumiantes, otras especies han evolucionado para aprovechar la abundancia de recursos de la primavera. Los equinos y las aves domésticas se clasifican como reproductores de día largo. En la yegua, el incremento de las horas de luz tras el solsticio de invierno provoca una reducción en la duración de la secreción de melatonina, lo que actúa como el disparador biológico para la reactivación del eje hipotálamo-hipófisis-gónada (21).

Durante los meses de invierno, estas especies entran en un estado de anestro estacional. Este periodo no es simplemente una pausa, pues se presenta como una estructura de resistencia biológica caracterizada por una quiescencia ovárica casi total. En este estado, aunque existen ondas de crecimiento folicular, los folículos no logran alcanzar el tamaño preovulatorio ni la madurez final debido a un soporte insuficiente de hormona luteinizante (LH). Esta carencia de LH es la consecuencia directa de una baja frecuencia en los pulsos de GnRH, mantenida por el control inhibitorio que ejercen las señales de fotoperiodo corto (22).

En las aves, el mecanismo de percepción es todavía más fascinante y directo. A diferencia de los mamíferos, las aves poseen fotorreceptores profundos en el hipotálamo. Estos son capaces de detectar la luz que atraviesa los tejidos craneales y el tejido cerebral. La figura 2 muestra de manera esquemática la conexión entre el estímulo de la luz, el crecimiento del aparato reproductor y su utilización en la producción avícola.

Figura 2. Estimulación fotoperiódica y respuesta productiva en aves



Nota: Adaptado de Dawson et al (23); Galan et al (24)

Dinámica reproductiva en especies no estacionales y señales metabólicas

Los bovinos y porcinos son clasificados académicamente como especies poliéstricas continuas, una denominación que sugiere una capacidad intrínseca para mantener ciclos reproductivos

ininterrumpidos a lo largo del año. Sin embargo, esta clasificación es una simplificación que a menudo ignora la sutil pero persistente influencia del entorno. En estas especies, la domesticación y una selección genética intensiva han logrado atenuar el control rígido del fotoperiodo, pero no han erradicado la vulnerabilidad del eje reproductivo ante factores críticos como el balance energético y el confort térmico (24) (25).

En las hembras bovinas y porcinas, la regulación endocrina ha evolucionado hacia un modelo de control metabólico-dependiente. Aquí, el hipotálamo actúa como un centro de integración donde convergen señales periféricas que informan sobre el estado nutricional del animal.

- **El papel de la Leptina e Insulina:** Estas moléculas sirven como señales de la condición metabólica y de la disponibilidad de energía. La leptina, que proviene de los adipocitos, y la insulina, cuya secreción está relacionada con la glucemia, ejercen una regulación permisiva en las neuronas Kiss1 (neuronas productoras de kisspeptina). Este sistema garantiza que el funcionamiento del eje reproductivo dependa de reservas nutricionales apropiadas (26)
- **La cascada de Kisspeptina:** Las neuronas de kisspeptina son los directores de orquesta que estimulan la secreción pulsátil de GnRH. Si las reservas energéticas son insuficientes, los niveles de estas hormonas caen, silenciando la señal de kisspeptina y, por ende, bloqueando la actividad del eje hipotálamo-hipófisis-gónada, independientemente de la duración del día (27).

Este mecanismo asegura que la gestación (un proceso metabólicamente costoso) solo se inicie cuando el organismo garantiza la viabilidad nutricional de la madre y el feto.

Impacto del estrés calórico: La estacionalidad secundaria

Aunque el fotoperiodo no dicta el ciclo en bovinos y porcinos, el estrés calórico surge como el principal factor de una estacionalidad secundaria o anestro de verano. Cuando las temperaturas ambientales superan la zona termoneutra del animal, se desencadena una respuesta neuroendocrina de emergencia mediada por la activación del eje hipotálamo-hipófisis-adrenal (HHA).

- **Elevación del cortisol y progesterona adrenal:** El estrés térmico induce una liberación sistémica de glucocorticoides. El cortisol posee un efecto inhibitorio directo sobre la amplitud y frecuencia de los pulsos de LH, lo que impide el pico preovulatorio necesario para la ovulación (28)

- **Deterioro de la calidad ovocitaria:** El incremento de la temperatura interna afecta la maduración de los folículos. Los ovocitos expuestos a hipertermia sufren daños en su citoesqueleto y una fragmentación del ADN mitocondrial, lo que se traduce en una caída drástica de las tasas de concepción y un aumento de la mortalidad embrionaria temprana (29)
- **El Fenómeno en porcinos:** El síndrome de infertilidad de verano, que es un rasgo genético heredado del jabalí (*Sus scrofa*), se manifiesta en la especie porcina. En la transición estacional hacia el otoño, se observa que la tasa de ovulación y el tamaño de la camada disminuyen, mientras que el intervalo entre el destete y el estro aumenta. La disminución paulatina del fotoperiodo (30) (31), sumada al estrés térmico, agrava este cuadro clínico.

El impacto del estrés calórico no se limita a un órgano aislado, sino que desregula de manera sistémica el eje reproductivo. Como se detalla en la tabla 8, las altas temperaturas ambientales desencadenan una cascada de fallas endocrinas que inician en el hipotálamo y culminan en el entorno uterino, comprometiendo severamente la eficiencia reproductiva del ganado.

Tabla 8. *Efectos del estrés calórico en el eje reproductivo*

Componente del Eje	Efecto Fisiológico	Consecuencia Productiva
Hipotálamo	Reducción en la liberación de GnRH	Ausencia de celo (Anestro)
Hipófisis	Menor sensibilidad a GnRH; reducción de LH	Fallas en la ovulación
Ovario / Testículo	Alteración de la esteroidogénesis	Baja calidad de gametos
Útero	Reducción del flujo sanguíneo y aumento de citoquinas	Muerte embrionaria

Nota, Adaptado de: Wolfenson y Roth (28); De Rensis y Scaramuzzi (29)

La tabla 8 muestra la alteración endocrina multidimensional causada por el estrés térmico. Se destaca la inhibición de la secreción pulsátil de GnRH y LH, lo que altera la dinámica folicular y la ovulación. Asimismo, el compromiso del flujo sanguíneo uterino y el desequilibrio en la esteroidogénesis actúan como factores determinantes en la baja tasa de concepción y el incremento de la mortalidad embrionaria temprana.

Influencia ambiental en el macho y el confort térmico

El control endocrino indirecto del ambiente no se limita a la hembra. En los machos de todas las especies zootécnicas, el testículo es un órgano extremadamente sensible a las fluctuaciones térmicas. La exposición a altas temperaturas ambientales compromete la integridad de la barrera hemato-testicular y altera la síntesis de testosterona por las células de Leydig.

Este desequilibrio hormonal afecta la calidad del eyaculado de manera estacional, aumentando la proporción de espermatozoides con anomalías morfológicas, como alteraciones en la cola y gotas citoplasmáticas, mientras que reduce la capacidad de movimiento progresivo (32). Las tecnologías de control climático y la gestión del confort térmico son tácticas biotecnológicas esenciales; su objetivo es estabilizar la síntesis de testosterona y salvaguardar la viabilidad reproductiva ante las variaciones en el entorno.

Intervenciones biotecnológicas para la modulación de la estacionalidad reproductiva

El conocimiento científico y avance en la comprensión de los mecanismos neuroendocrinos que regulan los ritmos biológicos ha facilitado el diseño de estrategias biotecnológicas orientadas a la manipulación precisa del ciclo reproductivo. Más que una contraposición a la fisiología natural de la especie, estas intervenciones actúan como moduladores exógenos que permiten la sincronización de los periodos de fertilidad con las exigencias del mercado.

Mediante la optimización de estas ventanas temporales, es posible paliar los baches de producción estacionales, garantizando un flujo constante de leche, carne y fibra, lo cual es fundamental para la estabilidad económica de los sistemas de producción pecuaria (33).

Manipulación del fotoperiodo en la industria equina

En la industria equina, el manejo del fotoperiodo tiene como objetivo principal adelantar el inicio de la estación reproductiva, que se presenta naturalmente en primavera en las zonas de latitudes templadas. Esta biotecnología favorece que los neonatos se obtengan cerca del 1 de enero, lo cual les otorga una ventaja competitiva significativa en términos de su desarrollo ponderal y maduración osteomuscular en comparación con otros potros en situaciones de exhibición y competencia (34).

- **Protocolos en yeguas:** Se implementa el suministro de luz artificial (completando 14-16 horas de luz total diaria). Este estímulo, iniciado durante el solsticio de invierno, inhibe la producción de melatonina en la glándula pineal, lo que elimina el freno

inhibitorio sobre el hipotálamo y permite la reactivación del eje Hipotálamo-Hipófisis-Gonadal (H-H-G) (35).

Adaptación del manejo lumínico en regiones ecuatoriales

A diferencia de las latitudes templadas donde el fotoperiodo es el principal sincronizador reproductivo, en países como Ecuador, la variación de las horas de luz a lo largo del año es prácticamente insignificante. No obstante, el uso de regímenes de iluminación controlada sigue siendo una herramienta estratégica en la industria equina de alta competencia para estandarizar las fechas de nacimiento.

- **El desafío del Punto Cero (Ecuador):** En el entorno ecuatorial, las yeguas suelen presentar una ciclicidad continua o baches reproductivos más ligados a la nutrición y el estrés térmico que a la luz. Sin embargo, para cumplir con los estándares de registros internacionales (donde los potros cumplen años el 1 de enero o el 1 de julio), se emplean protocolos de luz artificial para inducir una superovulación temprana o garantizar la reactividad del eje hipotálamo-hipófisis-gonadal (H-H-G) en épocas específicas (36).
- **Protocolos adaptados:** Aunque no se experimenta un solsticio de invierno marcado, se aplican regímenes de 14 a 16 horas de luz total para asegurar niveles basales mínimos de melatonina. Esto evita la fase de anestro funcional que puede aparecer por factores ambientales locales, permitiendo que el desarrollo físico del potro sea óptimo frente a ejemplares nacidos en climas estacionales (37).
- **Protocolos en aves:** La estimulación con luz de espectro específico activa los fotorreceptores hipotalámicos, permitiendo que aves de postura mantengan niveles elevados de GnRH y LH, evitando el cese de la producción durante los días cortos del invierno (38).

Farmacología de la oscuridad: Implantes de melatonina

En pequeños rumiantes (ovinos y caprinos), la administración de melatonina exógena es la estrategia predilecta para inducir la actividad reproductiva durante el anestro estacional (días largos). Los implantes subcutáneos de liberación lenta simulan un estado de "noches largas" permanentes para el sistema neuroendocrino (39).

- **Efecto Primante:** La melatonina reduce la sensibilidad del hipotálamo al efecto inhibitorio de los estrógenos, lo que desencadena un aumento en la frecuencia de los pulsos de GnRH.

- **Sincronización:** Esta técnica permite agrupar los partos en épocas de mayor disponibilidad forrajera o en momentos de alta demanda de mercado para el cordero o el cabrito (40).

Biotecnologías de confort térmico y modulación metabólica

Para las especies no estacionales como el ganado lechero y porcino, la biotecnología se enfoca en la mitigación del estrés ambiental. La implementación de sistemas de enfriamiento evaporativo (ventiladores y nebulizadores) no es solo una medida de bienestar; es una intervención endocrina que reduce los niveles de cortisol sistémico, protegiendo la pulsatilidad de la LH y la viabilidad del ovocito (28).

La unión de la intervención técnica con la fisiología aplicada es el núcleo principal de la producción animal actual. Conforme a esta premisa, la aplicación de metodologías que controlan la señalización neuroendocrina permite al veterinario sobrepasar las limitaciones biológicas naturales, mejorando los índices reproductivos por medio del manejo de elementos metabólicos y ambientales. Las biotecnologías más relevantes para el manejo de la estacionalidad y la reducción de los efectos adversos del medioambiente en el sistema endocrino se describen con detalle en la Tabla 9.

Tabla 9. Estrategias biotecnológicas para el control de la estacionalidad y el ambiente

Estrategia	Especie objetivo	Fundamento endocrino	Resultado esperado
Implantes de Melatonina	Ovinos / Caprinos	Simulación de fotoperiodo corto	Inducción de celo en primavera
Luz Artificial (16L:8D)	Equinos	Inhibición de la melatonina pineal	Adelanto de la temporada de monta
Control de Espectro Lumínico	Aves	Activación de fotorreceptores profundos	Mantenimiento de la postura anual
Sistemas de Enfriamiento	Bovinos / Porcinos	Reducción de Cortisol y ACTH	Mejora en la tasa de concepción estival
Suplementación con Grasas Bypass	Bovinos	Aumento de Insulin-like Growth Factor (IGF-1)	Reactivación ovárica post-parto

Nota. Adaptado de: Chemineau et al. (41); Malpoux et al. (15); Wolfenson et al. (28)

Para optimizar la reproducción, las intervenciones técnicas descritas en la tabla 9 funcionan según una lógica de mimetismo fisiológico. La estabilidad endocrina se garantiza mediante

la precisión nutricional y el control térmico, mientras que la fototerapia y los implantes están relacionados con la liberación de GnRH a través de la melatonina-pineal. Estas medidas en conjunto reducen el estrés sistémico y fomentan la producción de IGF-1 un elemento esencial para que el hato sea eficiente a nivel reproductivo y metabólico.

Convergencia entre fisiología y gestión biotecnológica

En conclusión, el control neuroendocrino de la reproducción constituye uno de los ejemplos más sofisticados de adaptación biológica y plasticidad fenotípica. Este sistema opera bajo una jerarquía de estímulos ambientales donde la preeminencia del regulador depende del nicho ecológico: mientras que en latitudes templadas el fotoperiodo actúa como el principal marcapasos biológico, en las regiones tropicales y en especies poliéstricas, el estatus metabólico y la homeostasis térmica asumen el rol de moduladores críticos del éxito reproductivo.

La biotecnología contemporánea ha conseguido descifrar estas vías de señalización, convirtiendo la fisiología en protocolos de intervención con una gran precisión. La zootecnia contemporánea estabiliza la elaboración de proteínas animales a través de la regulación de la melatonina y el alivio de la cascada esteroidea (cortisol y ACTH) que provoca el estrés. Con este modelo, la ciclicidad reproductiva supera las restricciones estacionales y se establece como una variable controlable, garantizando así la rentabilidad económica y la seguridad alimentaria.

Interacciones neuroendocrinas y su impacto en la fertilidad

La fertilidad en las especies de interés zootécnico se ubica más allá de la simple función gonadal; representa, en última instancia, la manifestación fenotípica de una compleja y sofisticada red de señales procesadas e integradas por el sistema nervioso central (SNC). Este estrato de regulación, definido como el control neuroendocrino, opera como un tamiz biológico que autoriza o restringe la función reproductiva en estricta consonancia con la homeostasis interna y la percepción sensorial del entorno (2).

Hipotálamo como transductor biológico

el hipotálamo actúa como un transductor biológico competente, dotado de la capacidad excepcional de decodificar estímulos neurales de naturaleza heterogénea, tales como la percepción de riesgo, el dolor, los estados de saciedad o la complejidad de las interacciones sociales, para transmutarlos en una sinfonía química de liberación pulsátil. A fin de preservar

la continuidad de la especie, esta estructura orquesta una respuesta endocrina que actúa como un puente entre la percepción sensorial y la ejecución gonadal.

La resiliencia reproductiva, que se refiere a la habilidad del organismo de mantener su eficacia biológica frente a las alteraciones estocásticas del medio ambiente, es el centro de la productividad en varios modelos de explotación. La estabilidad de estos mecanismos de transducción neuroendocrina asegura que el potencial genético se exprese en una descendencia viable, lo que permite reducir el efecto de las variaciones medioambientales que afectan a la homeostasis del sujeto.

La orquesta hipotalámica: El papel integrador de las neuronas de kisspeptina

En el núcleo de esta intrincada red de comunicaciones se ubica un sistema de péptidos cuya caracterización reciente ha revolucionado la endocrinología comparada, las kisspeptinas. Estas moléculas, originadas primordialmente en el núcleo arcuato (ARC) y el área preóptica (APO) del hipotálamo, actúan como las directoras de orquesta del eje reproductivo, ocupando la cúspide de la jerarquía endocrina (42).

Las neuronas de kisspeptina poseen una plasticidad receptora asombrosa, permitiéndoles monitorizar una vasta gama de señales metabólicas y ambientales. Entre sus principales características destacan:

- **Integración metabólica:** Son sensibles a los niveles de leptina circulante, actuando como sensores de las reservas energéticas del animal. Una baja condición corporal silencia la expresión del gen *KISS1*, deteniendo el eje reproductivo por falta de sustento energético (43).
- **Retroalimentación esteroidea:** Estas neuronas funcionan como el sensor primario que deja a las gónadas comunicar al sistema nervioso central la condición del ciclo estral, ya que expresan receptores para progesterona y estrógenos.
- **Modulación del estrés:** Presentan una alta sensibilidad a las concentraciones elevadas de glucocorticoides; este mecanismo fisiopatológico subyace a la interrupción de la ciclicidad cuando el individuo se somete a condiciones de distrés crónico.

La función primordial de estas neuronas es la estimulación directa y potente de las neuronas secretoras de la Hormona Liberadora de Gonadotropinas (GnRH). Al descargar sus señales sobre el sistema porta hipofisario, las kisspeptinas dictan la frecuencia y amplitud de los pulsos de GnRH. En consecuencia, cualquier disrupción en la síntesis de kisspeptina actúa como

un cortafuegos biológico, induciendo un estado de quiescencia reproductiva para proteger la integridad del individuo ante condiciones adversas (3).

El antagonismo del estrés: Activación del eje hipotálamo-hipófisis-adrenal (HHA)

Uno de los desafíos más formidables para la zootecnia moderna es la gestión del estrés, un fenómeno que desencadena una respuesta neuroendocrina diametralmente opuesta a la fertilidad. Cuando el animal percibe un estresor, ya sea de naturaleza física (termocontrol deficiente, lesiones) o psicológica (transporte, ruptura de vínculos sociales o jerarquías agresivas), el hipotálamo inicia una cascada defensiva mediante la liberación de la hormona liberadora de corticotropina (CRH) (44).

Esta señal moviliza a la adenohipófisis para la secreción de ACTH, la cual, a su vez, comanda a las glándulas adrenales para la producción sistémica de cortisol. Aunque el cortisol es vital para la supervivencia inmediata, su presencia crónica actúa como un veneno sutil para la reproducción:

- 1. A nivel central:** Reduce drásticamente la frecuencia de los pulsos de GnRH al interferir con la señalización de las kisspeptinas.
- 2. A nivel hipofisario:** Disminuye la sensibilidad de las células gonadotropas a la GnRH, resultando en una secreción deficiente de LH y FSH (45).
- 3. A nivel gonadal:** Bloquea los receptores de LH y altera la esteroidogénesis, comprometiendo el desarrollo del folículo dominante o la maduración espermática (46).

En la práctica clínica, esta interferencia se manifiesta con una crudeza notable. En bovinos de leche de alta producción, el estrés crónico es un precursor directo de la formación de folículos quísticos y fallas de ovulación, dado que el pico preovulatorio de LH es secuestrado por el aumento de glucocorticoides (47). En los machos, el estrés agudo no solo suprime la libido por la acción de opioides endógenos como las -endorfinas, sino que también induce vasoconstricción testicular, elevando la temperatura local y degradando la calidad del eyaculado.

La complejidad de estas rutas de señalización y su susceptibilidad ante factores externos se sintetizan en la tabla 10, donde se pueden observar los mecanismos mediante los cuales los estímulos ambientales y de manejo se traducen en mediadores hormonales específicos. Este análisis permite comprender cómo la intervención en puntos clave del eje neurobiológico puede mitigar los efectos deletéreos del entorno o, por el contrario, potenciar las respuestas fisiológicas naturales para optimizar el rendimiento reproductivo en las unidades de producción.

Tabla 10. Impacto de los mediadores neuroendocrinos en la eficiencia reproductiva

Factor de Influencia	Respuesta Nerviosa	Mediador Hormonal Primario	Impacto en la Fertilidad
Estrés Crónico / Agudo	Activación del eje HHA	Cortisol / CRH	Bloqueo del pico de LH y anovulación
Presencia del Macho	Estimulación Vomeronasal	Kisspeptinas / GnRH	Sincronización natural del estro (Efecto Macho)
Déficit Nutricional	Sensación de Inanición	Baja Leptina / Neuropeptido Y	Anestro profundo y retraso de la pubertad
Manejo Aversivo	Activación Sistema Límbico	Opioides Endógenos	Supresión de testosterona y baja libido
Bienestar Térmico	Homeostasis Hipotalámica	Optimización de GnRH	Mejora en la tasa de concepción estival

Nota. Adaptado de Mills et al. (48); Patel et al. (49)

La tabla 10 muestra la dicotomía entre los estímulos que actúan como disruptores o como facilitadores de la función reproductiva. Se enfatiza el rol del cortisol y los opioides endógenos como inhibidores del pulso de GnRH, en contraste con la acción de las kisspeptinas estimuladas por feromonas. Este balance endocrino es determinante para la transición del anestro a la ciclicidad y para el mantenimiento de la libido en machos, subrayando que la eficiencia reproductiva es altamente dependiente del estatus neurofisiológico del individuo.

Dinámica de los factores psicosociales: Comunicación feromonal y el sistema vomeronasal

La interacción entre individuos de la misma coespecie no constituye un evento puramente social, sino que ejerce un control neuroendocrino determinante sobre la capacidad reproductiva. En las especies zootécnicas, la comunicación química a través de feromonas representa un canal de información privilegiado que conecta el entorno social directamente con el eje hipotalámico. Estas señales volátiles son detectadas primordialmente por el órgano vomeronasal (OVN), el cual transmite la información hacia el bulbo olfatorio accesorio y, desde allí, hacia el sistema límbico y el hipotálamo (50).

Un exponente clásico de esta sofisticada interacción es el denominado efecto macho en pequeños rumiantes. La introducción estratégica de un carnero o un macho cabrío en un grupo

de hembras que se encuentran en anestro estacional o social desencadena una cascada de eventos neurobiológicos:

- **Respuesta inmediata:** Se produce una descarga súbita de kisspeptinas que estimula la liberación pulsátil de GnRH.
- **Consecuencia endocrina:** Este incremento en la frecuencia de pulsos de LH induce la ovulación en un alto porcentaje de las hembras en un periodo de 48 a 72 horas (51).

Este fenómeno demuestra que el sistema nervioso puede ser estimulado positivamente para romper estados de quiescencia hormonal sin recurrir a la farmacología sintética, siempre que se garantice una atmósfera social adecuada. No obstante, esta comunicación es bidireccional. Así como existen estímulos facilitadores, el hacinamiento y las jerarquías sociales desequilibradas operan como potentes inhibidores.

En sistemas de producción porcina, por ejemplo, las cerdas subordinadas en gestación grupal experimentan una liberación sostenida de catecolaminas y cortisol. Esta respuesta neuroendocrina altera la hemodinámica uterina, reduciendo el flujo sanguíneo hacia el endometrio y elevando la síntesis de citoquinas proinflamatorias, lo que resulta en una mayor incidencia de reabsorción embrionaria y una disminución de la viabilidad de la camada (52).

Estrategias de optimización de la fertilidad desde la perspectiva del bienestar animal

La comprensión profunda de estas interacciones ha fomentado el diseño de estrategias de manejo que consideran al animal no como un ente biológico aislado, sino como un sistema integrado donde la psique influye directamente en la gónada. El bienestar animal, bajo esta luz, deja de ser un imperativo ético para convertirse en una herramienta biotecnológica de precisión.

El diseño de instalaciones que minimicen el estrés de manejo, la implementación de protocolos de movimiento silencioso y la mitigación de ruidos estridentes en áreas críticas (como las salas de ordeño o los centros de inseminación) poseen un fundamento endocrino inobjetable. Al preservar niveles basales de cortisol, se salvaguarda la integridad de los pulsos de GnRH y se asegura una señalización lútea estable, vital para el reconocimiento materno de la preñez (44).

De igual manera, la zootecnia contemporánea está explorando la modulación nutricional del sistema nervioso. La suplementación con precursores de la serotonina (como el L-triptófano) o el uso de antioxidantes específicos busca reducir el impacto del estrés oxidativo sobre las

neuronas hipotalámicas. Estas intervenciones actúan como escudos químicos que protegen la sensibilidad del eje reproductivo ante los desafíos ambientales (53).

La transición de los conceptos neurofisiológicos hacia la aplicabilidad técnica en la unidad de producción se consolida mediante la implementación de estrategias de manejo con base científica. La tabla 11 presenta una comparación de diversas intervenciones biotecnológicas y ambientales, destacando el mecanismo endocrino subyacente que facilita convertir una acción de manejo en un resultado reproductivo tanto medible como predecible.

Tabla 11. *Comparación de estrategias de manejo y sus fundamentos neuroendocrinos*

Estrategia de manejo	Objetivo productivo	Mecanismo de acción	Beneficio en la fertilidad
Exposición al Macho	Sincronización de celos	Activación de neuronas KISS1 por feromonas	Reducción del intervalo entre partos
Enfriamiento Evaporativo	Mitigación de estrés calórico	Reducción de la liberación de CRH y ACTH	Aumento de la calidad del oocito
Manejo de Baja Estridencia	Estabilidad del celo	Inhibición de la liberación de catecolaminas	Mejora en la tasa de concepción
Suplementación con Triptófano	Modulación del temperamento	Aumento de niveles centrales de Serotonina	Reducción de fallas relacionadas con el estrés durante el manejo

Nota. Adaptado de Wiltbank et al. (54); Moberg y Mench (44); Hansen (55)

La información que se presenta en la tabla 11 detalla cómo la manipulación del entorno y la nutrición actúan como moduladores de la jerarquía hormonal. Se destaca que la efectividad de estas estrategias radica en su capacidad para reducir la actividad del eje hipotálamo-hipófisis-adrenal (HHA) y potenciar la secreción pulsátil de las gonadotropinas. Para que el sistema nervioso de un individuo pueda procesar un estado de equilibrio homeostático, lo cual es indispensable para que las especies con interés zootécnico puedan manifestar su máximo potencial reproductivo, es necesario integrar estos protocolos. La fertilidad no es un proceso biológico desconectado de la percepción sensorial y cognitiva en términos del bienestar animal; más bien, la eficiencia reproductiva se manifiesta fenotípicamente como un sistema nervioso que percibe un ambiente seguro y estable desde el punto de vista fisiológico. La capacidad de la zootecnia para manipular estas señales, ya sea a través de la biotecnología o del manejo ambiental, define la frontera entre un sistema productivo estancado y uno de alta eficiencia.

El cerebro, en última instancia, es el que envía la orden química necesaria para perpetuar la especie y garantizar la seguridad alimentaria (56).

Bases genéticas y moleculares de la reproducción animal

La reproducción animal, abordada tradicionalmente desde una perspectiva fisiológica y endocrina, encuentra su fundamento último en el genoma y en los complejos mecanismos de regulación molecular que orquestan cada evento biológico. Aunque la fertilidad ha sido clasificada históricamente como un rasgo de baja heredabilidad ($h^2 < 0.10$), sugiriendo un predominio del efecto ambiental, la emergencia de las ciencias ómicas ha transformado este paradigma. Estas disciplinas han revelado que la variabilidad reproductiva responde a una intrincada sinfonía de señales moleculares, modificaciones epigenéticas y variaciones genéticas precisas que, hasta ahora, permanecían ocultas a los métodos de evaluación convencionales (57) (58).

La eficiencia reproductiva no es, en modo alguno, un evento aleatorio; por el contrario, resulta de la interacción dinámica entre el potencial genético del individuo y el entorno que lo rodea.

En la actualidad, el estudio de las bases genéticas en especies de interés zootécnico no se limita a la selección de individuos con fenotipos superiores. Se extiende hacia la comprensión de las patologías moleculares subyacentes que dictan la mortalidad embrionaria, la subfertilidad y la capacidad de resiliencia ante el cambio climático (59). Este apartado profundiza en cómo los polimorfismos de nucleótido único (SNPs), la expresión diferencial de genes y las modificaciones epigenéticas actúan como los hilos invisibles que sostienen la productividad en las explotaciones pecuarias modernas.

Genes de efecto mayor y arquitectura molecular del eje reproductivo

La identificación de genes con efectos determinantes sobre la fertilidad ha marcado un hito en la biotecnología reproductiva. A diferencia de los rasgos cuantitativos gobernados por cientos de genes de efecto menor, ciertos rasgos de alta relevancia zootécnica, como la prolificidad, están bajo el control de «genes de efecto mayor».

- **La superfamilia del TGF- y la tasa de ovulación:** En el ámbito de la producción ovina, la danza molecular de la foliculogénesis está regida por la superfamilia del factor de crecimiento transformante beta (TGF-beta). Específicamente, los genes del

Factor de diferenciación de crecimiento 9 (GDF9) y la proteína morfogenética ósea 15 (BMP15) actúan como reguladores paracrinicos críticos entre el ovocito y las células de la granulosa (60).

- Ciertas mutaciones puntuales en estos genes alteran la sensibilidad de los receptores a la hormona folículo estimulante (FSH).
- Este fenómeno, lejos de ser perjudicial en estados de heterocigosis, provoca una mayor tasa de maduración folicular, traduciéndose en un incremento dramático de la tasa de ovulación y la consecuente obtención de partos múltiples en razas tradicionalmente monotocas (61).
- **El Receptor de estrógenos (ESR) en la porcicultura:** En la especie porcina, la eficiencia reproductiva se ha vinculado estrechamente con el gen del receptor de estrógenos (ESR). Los polimorfismos presentes en este locus se han establecido como marcadores moleculares de referencia para la elección de líneas maternas. Su importancia se encuentra en su impacto directo sobre la habilidad del útero para contener camadas hiperprolíficas sin que esto afecte el vigor de los neonatos (62).
- **Determinantes moleculares del reconocimiento materno:** Más allá de la ovulación, el éxito reproductivo depende de la capacidad del embrión para establecer una comunicación efectiva con el endometrio materno. En los rumiantes, el interferón tau (IFN- τ) constituye la principal señal antiluteolítica que favorece la implantación y el mantenimiento del embarazo. La regulación genética de la síntesis de esta proteína, así como la expresión de transportadores de glucosa (GLUT) en el endometrio, son factores críticos que influyen en dicho proceso (63) (64). Los individuos que presentan una respuesta molecular más robusta en estos aspectos muestran una menor incidencia de pérdida embrionaria temprana, uno de los principales factores que generan pérdidas económicas en la industria bovina.

El esquema de la eficiencia reproductiva no responde a un evento biológico aislado, puesto que proviene de la interacción coordinada entre loci específicos y mecanismos de regulación epigenéticos. Para facilitar la comprensión de esta red de señales, la tabla 12 presenta los principales determinantes genéticos y moleculares que, de acuerdo con investigaciones recientes, dictan el éxito de la función gonadal y la supervivencia embrionaria en las especies zootécnicas de mayor impacto productivo (65) (66) .

Tabla 12. *Determinantes genéticos y moleculares en la eficiencia reproductiva*

Mecanismo / Gen	Especie principal	Función biológica molecular	Impacto zootécnico directo
GDF9 / BMP15	Ovinos	Regulación paracrina de la proliferación de la granulosa	Incremento de prolificidad y tasa de ovulación
ESR1 (Receptor de Estrógenos)	Porcinos	Modulación de la sensibilidad uterina y señalización estrogénica	Aumento significativo del tamaño de la camada
Interferón-tau (IFN- τ)	Rumiantes	Inhibición de la liberación pulsátil de PGF2 α	Reducción de la mortalidad embrionaria temprana
HSP70 (Proteínas de Choque Térmico)	Bovinos	Protección celular contra el estrés oxidativo y térmico	Mantenimiento de la fertilidad en condiciones tropicales
Metilación del ADN	Todas las especies	Silenciamiento o activación de genes vía modificaciones epigenéticas	Programación fetal y salud de la descendencia

Nota. Adaptado de Amandykova et al. (65); Suhendro et al. (66); Feng et al. (67)

La tabla 12 explica la configuración y molecular que regula la eficiencia reproductiva en la producción pecuaria. Se observa una jerarquía funcional que abarca desde el control de la tasa de ovulación mediante factores de crecimiento transformante (GDF9/BMP15), hasta el reconocimiento materno-fetal mediado por el IFN- τ , esencial para la viabilidad embrionaria en rumiantes. La inclusión de la metilación del ADN y las proteínas HSP70 resalta la transición hacia un enfoque de precisión, donde la modulación epigenética y la termotolerancia definen la adaptabilidad fenotípica y la robustez de la progenie en escenarios de cambio climático.

Epigenética: El puente dinámico entre el ambiente y el genoma

La epigenética representa uno de los cambios de paradigma más profundos en la reproducción animal moderna. Se define como el estudio de las modificaciones que alteran la actividad de los genes sin modificar la secuencia del ADN original; es decir, la partitura genética permanece igual, pero la forma en que se interpreta cambia (68). Estos mecanismos operan como interruptores moleculares que activan o silencian genes específicos en respuesta al entorno, como la nutrición o el clima (67) (69). En la producción animal, este fenómeno es fundamental, pues explica por qué individuos con un potencial genético similar pueden manifestar rendimientos

reproductivos drásticamente diferentes, demostrando que el manejo ambiental puede dejar una huella biológica heredable en la productividad (70).

- **Mecanismos de regulación molecular:**

La organización epigenética se sostiene principalmente sobre tres pilares, la metilación del ADN (adición de grupos metilo en las islas CpG), la modificación de histonas (como la acetilación y fosforilación) y la acción de micro-ARNs (71). En el contexto reproductivo, estos procesos permiten que el genoma "recuerde" condiciones de estrés térmico o nutricional, ajustando la expresión de genes clave en el eje hipotálamo-hipófisis-gónada.

- **La programación fetal y su impacto productivo**

El concepto de programación fetal, derivado de la Hipótesis de Barker y adaptada a la producción animal, postula que el ambiente intrauterino, durante ventanas críticas del desarrollo embrionario, actúa como un determinante epigenético de la trayectoria fisiológica de la descendencia. Este fenómeno se sustenta en la plasticidad del desarrollo, un mecanismo biológico que permite al feto realizar ajustes adaptativos en respuesta a estímulos maternos o ambientales (como la nutrición o el estrés térmico). No obstante, estos ajustes biológicos, priorizados por el organismo fetal para garantizar la viabilidad inmediata en un entorno adverso, suelen desencadenar un compromiso funcional o trade-off a largo plazo. Estas modificaciones epigenéticas y metabólicas, aunque adaptativas en el útero, resultan desajustadas para las exigencias de la vida postnatal, lo que se traduce en un detrimento de parámetros zootécnicos fundamentales, tales como la precocidad sexual, la calidad de la canal y la eficiencia en la conversión alimenticia (72) (73). A continuación, se analizan dos de los escenarios más representativos de este fenómeno en la producción comercial:

Restricción nutricional y reserva folicular

Se ha documentado que deficiencias proteico-energéticas durante el primer tercio de la gestación en bovinos y ovinos alteran la metilación de genes implicados en la ovogénesis fetal. Como consecuencia, las hembras nacidas de madres mal nutridas presentan una reserva folicular disminuida y una pubertad retrasada, limitando su vida útil en el hato (73).

Estrés térmico y marcas epigenéticas

El estrés calórico materno afecta el flujo sanguíneo placentario, pero, además, induce cambios en el epigenoma de las células germinales del feto. Estudios recientes sugieren que estas

cicatrices moleculares pueden persistir incluso en la segunda generación (efectos transgeneracionales), manifestándose como una capacidad espermatogénica reducida en los machos o una menor tasa de concepción en las hembras (67).

Impronta genómica y biotecnologías de reproducción asistida (ART)

La impronta genómica constituye un fenómeno epigenético especializado en el cual la expresión de ciertos genes ocurre de forma monoalélica, dependiendo exclusivamente de su origen parental (materno o paterno). Este proceso de silenciamiento selectivo es vital para el desarrollo embrionario y placentario, pero exhibe una vulnerabilidad crítica ante las condiciones de manipulación *in vitro*.

- **El síndrome de la cría grande (LOS) y la disrupción epigenética:** La transferencia nuclear de células somáticas (clonación) y la producción de embriones *in vitro* (PIVE), que son biotecnologías, pueden sufrir fallos en el mantenimiento de las marcas de metilación cuando se alejan del ambiente fisiológico oviductal. La hipometilación del gen IGF2R (receptor del factor de crecimiento insulínico tipo 2) es un ejemplo representativo. Cuando se pierde el control sobre este freno de crecimiento, se produce el síndrome de la cría grande (Large offspring syndrome), que se manifiesta con distocias severas, fallas en varios órganos y gigantismo fetal. Hallazgos recientes enfatizan que la composición de los medios de cultivo y el estrés mecánico actúan como moduladores que pueden comprometer la integridad epigenética del blastocisto (74).
- **Selección epigenética y zootecnia de precisión:** Por encima de las posibles desviaciones fenotípicas asociadas a las biotecnologías reproductivas, como los errores de impronta o el crecimiento desmedido, el desciframiento de estos mecanismos está impulsando el concepto de «selección epigenética». A diferencia de la selección genética tradicional, basada en la frecuencia de alelos, esta estrategia propone el manejo deliberado del ambiente de los progenitores (nutrición de precisión y mitigación de factores estresantes) para inducir marcas moleculares favorables en la descendencia.

Este enfoque busca optimizar el fenotipo sin alterar la secuencia del ADN, potenciando la expresión de genes asociados a la salud inmunológica y la eficiencia metabólica (70). En este contexto, la identificación de firmas epigenéticas específicas permite desarrollar animales con una mayor capacidad de adaptación a entornos desafiantes, consolidando una producción más resiliente y alineada con los objetivos de la zootecnia de precisión (75).

Selección genómica y marcadores moleculares de fertilidad

La integración de la genética cuantitativa con la biología molecular ha dado lugar a la era de la selección genómica, transformando radicalmente los esquemas de mejora en especies zootécnicas. Esta tecnología se ubica más allá de las limitaciones de las evaluaciones tradicionales, que dependían de la observación de la progenie para estimar el valor genético de un reproductor, un proceso que en rasgos reproductivos de baja heredabilidad podía tardar años (76).

- **El valor genómico estimado de cría (GEBV):**

El Valor Genómico Estimado de Cría (GEBV) representa una evolución en la selección artificial. A través de microarrays o chips de ADN, se identifican miles de polimorfismos de nucleótido único (SNPs) distribuidos en el genoma, lo que permite predecir el mérito genético de un ejemplar desde su nacimiento, sin esperar a que exprese el rasgo o tenga descendencia. Esta herramienta es especialmente valiosa para mejorar caracteres de baja heredabilidad, difíciles de seleccionar mediante métodos tradicionales, como la eficiencia reproductiva, la precocidad sexual y la resistencia inmunológica ante enfermedades como la metritis (77).

- **Arquitectura de los rasgos complejos:**

A diferencia de los genes de efecto mayor, la fertilidad es un rasgo poligénico. La selección genómica captura el efecto acumulativo de estas pequeñas variaciones, permitiendo una ganancia genética acelerada. En el ganado lechero, por ejemplo, la aplicación de GEBVs ha logrado revertir la correlación negativa histórica entre la producción de leche y la fertilidad, identificando linajes que sobresalen en ambos parámetros simultáneamente (78).

Proteómica seminal

Si bien la genómica define el potencial hereditario de un ejemplar, la proteómica permite evaluar su ejecución biológica en tiempo real. En la reproducción masculina, los parámetros seminológicos convencionales, como la motilidad, morfología y concentración espermática, suelen ser insuficientes para garantizar la tasa de concepción en campo. En este escenario, el análisis del proteoma del espermatozoide y del plasma seminal emerge como una herramienta diagnóstica avanzada. La identificación de biomarcadores proteicos específicos no solo explica las fallas de fertilidad idiopática, sino que permite identificar fenotipos de superfertilidad, optimizando la selección de reproductores de alto valor (79).

- **Biomarcadores de funcionalidad espermática**

El plasma seminal ha dejado de ser considerado un simple medio de transporte para ser reconocido como un complejo fluido biológico compuesto por proteínas que regulan la capacitación espermática, la interacción con el epitelio del tracto reproductivo femenino y la fecundación (79). Dentro de este proteoma, destacan biomarcadores específicos:

- **Osteopontina y Proteínas Ligadoras de Heparina (HBP):** Estas proteínas son marcadores críticos de fertilidad. Concentraciones elevadas en el eyaculado se vinculan directamente con una mayor capacidad de los espermatozoides para la unión a la zona pelúcida y un incremento en las tasas de concepción en programas de inseminación artificial (79) (80).
- **Proteínas de Choque Térmico (HSPs):** Funcionan como chaperonas moleculares que estabilizan las estructuras proteicas y protegen la integridad del ADN espermático frente al estrés térmico y osmótico. Su presencia es un factor determinante para la supervivencia celular durante la criopreservación, proceso esencial en la industria biotecnológica (80).

Hacia el diagnóstico molecular de la subfertilidad

La subfertilidad masculina representa un desafío para la industria reproductiva, ya que a menudo se manifiesta en individuos con espermigramas que cumplen con los estándares convencionales de motilidad y morfología. Sin embargo, la ausencia o expresión aberrante de proteínas clave en el plasma seminal revela fallas funcionales a nivel molecular. La identificación de estas firmas proteicas permite a los centros de mejoramiento genético y biotecnología realizar una selección más rigurosa, descartando reproductores que, pese a su apariencia microscópica normal, presentarían bajas tasas de éxito en programas de inseminación artificial sistemática o transferencia de embriones (81) (82).

La frontera de la precisión molecular

Para concluir este primer capítulo del libro, se aborda la frontera tecnológica de la biotecnología reproductiva, la edición genómica. Este bloque examina cómo la precisión molecular permite no solo seleccionar el mejor ADN disponible, sino corregirlo o mejorarlo para enfrentar los desafíos de la producción animal del siglo XXI.

Perspectivas de la edición génica en la reproducción zootécnica

La implementación de la tecnología CRISPR/Cas9 (Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats) ha marcado un hito de precisión quirúrgica en el campo de la ingeniería genética animal. A diferencia de las técnicas de transgénesis tradicionales, cuya integración del material genético era aleatoria y menos eficiente, la edición génica permite realizar modificaciones dirigidas en locus específicos. Esto facilita la eliminación de alelos deletéreos o la inserción de variantes de alto valor biológico sin perturbar la integridad del patrimonio genético del individuo (83) (84).

- **Termotolerancia y resiliencia climática:** Un avance innovador es la edición del gen SLICK (receptor de la prolactina, PRLR) en razas bovinas de alta especialización láctea. Mediante CRISPR, se ha logrado introducir el fenotipo de pelo corto y liso, característico de razas tropicales y criollas, en linajes Holstein. Esta modificación permite que los ejemplares mantengan su eficiencia productiva y reproductiva bajo condiciones de estrés térmico severo, previniendo el colapso de la fertilidad asociado a la hipertermia uterina (85).
- **Machos subrogados y diseminación génica:** La edición génica ha viabilizado el concepto de padres sustitutos mediante el silenciamiento del gen NANOS2, esencial para el mantenimiento de las células madre espermátogónicas. Los machos resultantes poseen testículos anatómicamente funcionales, pero carecen de línea germinal propia. Al actuar como nichos celulares vacíos, pueden ser colonizados con células madre de reproductores de élite, permitiendo que un macho convencional produzca gametos con la genética de un ejemplar superior. Esta tecnología optimiza la diseminación de genética de alto valor en regiones donde la logística de la inseminación artificial es limitada (86).

Las bases moleculares y genéticas presentadas son el sustrato esencial de la fisiología reproductiva actual. Entender esta jerarquía, que va desde los genes de efecto mayor como el GDF9 hasta las alteraciones epigenéticas moduladas por el entorno, permite una administración predictiva y correctiva que supera el análisis fenotípico tradicional. La transición hacia una biotecnología de precisión, que combina la genómica, la proteómica y la edición de genes, proporciona los instrumentos necesarios para construir sistemas productivos sostenibles y resilientes. Por lo tanto, el éxito en la zootecnia consiste en la habilidad de descifrar este código molecular y mejorar su expresión a través de una gestión técnica especializada.



CAPÍTULO II

**DIAGNÓSTICO Y EVALUACIÓN
REPRODUCTIVA**

CAPÍTULO II.

DIAGNÓSTICO Y EVALUACIÓN REPRODUCTIVA

Víctor Alvaro Tualombo Masabanda, Oscar Darwin Criollo Salinas, Debbie Shirley Chávez García, Jasmin Esmeralda Benítez Mora, Néstor Vicente Acosta Lozano, Jefferson Raúl Varas Aguillón, Julio César Villacres Matías y Wilmer Wagner Alcívar Guadamud.

El éxito de la gestión zootécnica moderna reside, en lo fundamental, en la capacidad de transformar la observación clínica minuciosa en datos objetivos y cuantificables que permitan la toma de decisiones estratégicas de alta precisión. Una perspectiva integral que estudia la viabilidad biológica del animal ha reemplazado el enfoque tradicional de diagnóstico reproductivo. El examen clínico tradicional se ha actualizado con tecnologías avanzadas de imagenología y marcadores moleculares, lo que permite a los profesionales entender el estado fisiológico interno del paciente. Esta combinación de técnicas permite una interpretación exacta del ciclo estral y la gestación, lo que garantiza una intervención técnica más efectiva y fundamentada en datos objetivos.

Este capítulo examina las herramientas metodológicas fundamentales para identificar el estatus fisiológico de los reproductores, permitiendo no solo la detección precoz de patologías que comprometen la fertilidad, sino también el pronóstico certero del rendimiento productivo en hatos y rebaños. La excelencia en la producción animal contemporánea exige que el profesional actúe como un intérprete de la homeostasis, capaz de predecir el comportamiento reproductivo antes de que las ineficiencias se traduzcan en pérdidas económicas (3).

Métodos clínicos de evaluación reproductiva

La evaluación clínica es el cimiento ineludible del examen de aptitud reproductiva (EAR) y representa el punto de convergencia entre la formación académica del profesional y la realidad biológica del ejemplar. La semiología clínica sigue siendo la base esencial de la medicina veterinaria, a pesar del progreso de las tecnologías digitales y de la inteligencia artificial. Esta rama del conocimiento posibilita incluir los descubrimientos tecnológicos en el contexto sistémico de la persona. Para que un diagnóstico reproductivo sea excelente, es necesario tener una perspectiva holística, admitiendo que la función reproductiva es una actividad biológica de calidad excepcional, cuya manifestación depende estrictamente de la homeostasis nutricional y del estado sanitario del animal. Por consiguiente, el examen clínico no se limita a los

órganos genitales; se extiende a la interpretación de señales sutiles que el cuerpo emite sobre su capacidad para perpetuar la especie (3) (87) (88).

Examen físico general y la relevancia de la condición corporal

Antes de proceder con la exploración minuciosa de los órganos diana, resulta imperativo ejecutar un examen físico sistémico que determine la robustez y vitalidad del ejemplar. En este escenario, la evaluación de la Condición Corporal (CC) se instituye como el biomarcador no invasivo más elocuente de la endocrinología reproductiva. La CC no es, de modo alguno, una apreciación estética; funciona como un espejo del balance energético y, por ende, de la disponibilidad de sustratos metabólicos que actúan como mensajeros hacia el eje hipotálamo-hipófisis-gonadal (89).

En los sistemas de producción de alta exigencia, tales como la lechería especializada, la transición hacia el postparto representa un desafío metabólico crítico. Una pérdida drástica de masa grasa en este periodo se traduce en una cascada bioquímica donde los ácidos grasos no esterificados (NEFAs) y los cuerpos cetónicos inundan el torrente sanguíneo. Estas moléculas, lejos de ser solo fuentes de energía, ejercen un efecto citotóxico directo sobre el ovocito en desarrollo y el tejido folicular, silenciando los pulsos de la hormona liberadora de gonadotropinas (GnRH) (87) (2).

Para el clínico, la palpación técnica de las reservas adiposas en las apófisis transversas lumbares, la base de la cola y las estructuras óseas de la pelvis proporciona una escala objetiva de predicción. Un ejemplar con una CC deficiente se encuentra, metafóricamente, en un invierno metabólico, donde el organismo prioriza la supervivencia individual sobre la inversión reproductiva.

La CC es un determinante dinámico de la fertilidad del rebaño, no estático. Sirve como una escala para cuantificar la capacidad metabólica del animal ante procesos exigentes, por ejemplo, la ovulación y el crecimiento del folículo dominante. La adecuada categorización de la CC posibilita al especialista pronosticar la reacción ante el estro y garantizar la preservación del embrión, comprendiendo que solo un equilibrio energético positivo hace posible que el potencial reproductivo se exprese en su totalidad. A fin de establecer un marco de referencia práctico y comparativo entre las principales especies de interés zootécnico, se presenta la tabla 13 en la que se detalla las escalas sugeridas, los umbrales críticos de intervención y las consecuencias directas de un balance energético negativo sobre el desempeño reproductivo.

Tabla 13. Impacto de la condición corporal (CC) en los parámetros reproductivos clave

Especie	Escala Sugerida	Punto crítico de Intervención	Consecuencia Reproductiva de la Baja CC
Bovinos (Leche)	1 a 5	< 2.5	Anestro profundo, incremento de días abiertos y menor tasa de concepción al primer servicio.
Bovinos (Carne)	1 a 9	< 4.0	Retraso en la pubertad de novillas y prolongación del anestro postparto.
Ovinos/Caprinos	1 a 5	< 2.0	Reducción de la tasa de ovulación (tasa de melliperas) y mayor mortalidad embrionaria.
Equinos	1 a 9	< 5.0	Irregularidad en los ciclos estrales y baja receptividad al semental.

Nota. Adaptado de Roche et al. (89); Richards et al. (90)

Los valores que se muestran en la tabla 13 representan los umbrales fisiológicos mínimos para garantizar la ciclicidad y la fertilidad en condiciones de producción comercial. Es fundamental considerar que la interpretación de la CC debe ser ajustada según la etapa productiva (por ejemplo, transición, pico de lactancia o periodo de secado), ya que las desviaciones significativas de estos puntos críticos desencadenan cascadas endocrinas que priorizan la homeostasis basal sobre la eficiencia reproductiva. El monitoreo seriado de estos índices constituye, por tanto, una estrategia de medicina preventiva de alta precisión.

Clarificación metodológica de los indicadores de CC

Para una correcta interpretación de la evaluación metabólica, se requiere definir los dos ejes vectoriales que componen el análisis de la condición corporal en la clínica reproductiva:

- **Escala sugerida:** Representa el sistema de gradación numérica estandarizado y validado para cada especie, el cual permite transformar una apreciación subjetiva en un dato cuantitativo. Mientras que en la industria láctea y en pequeños rumiantes se prefiere la escala de 1 a 5 por su practicidad operativa, en la ganadería de carne y en la clínica equina se opta por la escala de 1 a 9. Esta última ofrece una sensibilidad granulométrica superior para identificar variaciones sutiles en los depósitos de tejido adiposo subcutáneo sobre regiones anatómicas clave como las costillas, el lomo y la fosa isquiorrectal (2) (89).

- **Punto crítico de intervención:** Se define como el umbral fisiológico mínimo por debajo del cual la probabilidad de éxito reproductivo disminuye drásticamente. Este valor actúa como una frontera biológica; una vez que el ejemplar desciende de este puntaje, el organismo activa mecanismos de conservación energética que inhiben la secreción pulsátil de GnRH. En consecuencia, el diagnóstico de un animal en su punto crítico no solo advierte sobre un riesgo nutricional, sino que predice un estado de anestro metabólico o una baja calidad ovocitaria que invalidaría cualquier protocolo de biotecnología reproductiva (3) (90).

Palpación rectal y semiología del tracto tubular en grandes especies

En especies de gran talla, particularmente en bovinos y equinos, la palpación transrectal se consagra como la técnica diagnóstica de referencia debido a su inmediatez, bajo costo y alta fidelidad diagnóstica. Este procedimiento no es una maniobra mecánica, es un ejercicio de destreza propioceptiva avanzada, donde el clínico debe ver con las manos a través de las paredes del recto.

- **En el bovino:** La exploración del tracto reproductivo inicia con la identificación del cuello uterino, que es el punto de partida para examinar la morfología de los cuernos uterinos. El tono uterino, o la consistencia del útero, es una señal indirecta pero exacta del perfil hormonal de un animal. Un útero firme y turgente indica que hay una alta concentración de estrógenos, característica de la etapa folicular. Por otro lado, un útero relajado o flácido señala que existe un cuerpo lúteo funcional (progesterona) o, si no es el caso, una condición de anestro debido a la inactividad ovárica (3) (91).
- **Signos positivos de gestación:** Uno de los signos más tempranos de gestación es el deslizamiento de las membranas fetales, que se percibe por medio del método de pellizco. El protocolo requiere que, a medida que avanza el desarrollo gestacional, se identifiquen la vesícula amniótica, el feto y los placentomas (unidades funcionales de intercambio que se forman por la unión de las carúnculas maternas con los cotiledones fetales). Estos resultados corroboran la integridad biológica del proceso.
- **En el equino:** A diferencia del bovino, la palpación en la yegua demanda una sensibilidad extrema para detectar los cambios dinámicos en el cérvix. Bajo la influencia de la progesterona, el cérvix equino se torna una estructura tubular rígida y hermética, mientras que, en el estro, se relaja y aplana contra el piso de la pelvis, una metamorfosis necesaria para el transporte espermático (91) (92).

Evaluación externa y particularidades diagnósticas en especies no rectables

En aquellas especies donde las dimensiones anatómicas o la fragilidad tisular imposibilitan la exploración transrectal manual, como ocurre en porcinos, pequeños rumiantes y camélidos sudamericanos, el diagnóstico clínico se desplaza hacia la interpretación de indicadores externos y maniobras semiológicas indirectas. En estos escenarios, el ojo clínico debe agudizarse para decodificar el comportamiento y los cambios morfológicos que anuncian el estatus reproductivo.

- **Detección de la receptividad en porcinos:** En la cerda, el diagnóstico del estro trasciende la inspección física para convertirse en un análisis conductual. El reflejo de inmovilidad o respuesta de presión lumbar, exacerbado por la presencia feromonal del macho (efecto berraco), constituye el signo clínico cardinal de la oleada preovulatoria de LH. Este fenómeno se ve respaldado por la inspección de la vulva, donde el edema y la hiperemia (consecuencias de la vasodilatación inducida por los estrógenos) sirven como marcadores visuales de la proximidad de la ovulación (93).
- **Examen del macho y biometría testicular en pequeños rumiantes:** En ovinos y caprinos, la evaluación de la aptitud reproductiva del macho adquiere un protagonismo vital. La medición de la circunferencia escrotal no es un dato aislado; es un predictor lineal de la masa del parénquima testicular y, por ende, de la capacidad de producción espermática diaria y la precocidad sexual de las hijas. La palpación debe ser sistemática para corroborar que la textura fibroelástica sea normal y que no existan adherencias en la cola del epidídimo, un lugar clave donde los gametos alcanzan su madurez. La existencia de nódulos o asimetrías es un signo clínico que alerta sobre procesos inflamatorios como la epididimitis o la orquitis. Estos hallazgos resultan esenciales en el caso de la infección por *Brucella ovis*, porque una enfermedad no detectada puede reducir significativamente los índices de preñez y la salud reproductiva del rebaño (94).

La evaluación objetiva del potencial andrológico no puede fundamentarse únicamente en la libido, sino que requiere la cuantificación de estructuras que guardan una correlación alométrica con la capacidad espermatogénica. La biometría testicular, y específicamente la circunferencia escrotal, constituye el indicador fenotípico más fiable para estimar el volumen de parénquima funcional y, por ende, la producción diaria de espermatozoides. Con el propósito de estandarizar los criterios de selección de sementales, en la tabla 14 se presentan los parámetros de referencia y la interpretación clínica de las mediciones testiculares en las

principales especies de interés zootécnico, sirviendo como guía para el diagnóstico de la aptitud reproductiva del macho.

Tabla 14. *Parámetros biométricos testiculares y su interpretación en el examen de aptitud reproductiva*

Especie	Parámetro Evaluado	Valor de Referencia (Adulto)	Relevancia Clínica
Bovino (Bos taurus)	Circunferencia Escrotal	> 34 cm	Correlación positiva con volumen seminal y morfología normal.
Ovino	Circunferencia Escrotal	> 30 cm	Indicador de capacidad de servicio y resistencia al estrés térmico.
Caprino	Consistencia Testicular	Fibroelástica	La flacidez sugiere degeneración testicular o estrés nutricional.
Porcino	Ancho Testicular (Total)	> 10 cm	Refleja la eficiencia de la espermatogénesis en sistemas de IA.

Nota. Adaptado de Boeta et al. (95); Choudhary et al. (96)

Los valores de referencia expresados en la tabla 14 corresponden a animales que han alcanzado la madurez sexual y se encuentran en condiciones óptimas de nutrición. Hay que considerar que la circunferencia escrotal es un carácter altamente heredable; por tanto, su uso como criterio de selección además de garantizar la eficiencia del semental evaluado, también se asocia genéticamente con una menor edad a la pubertad en sus descendientes hembras. Cualquier desviación negativa respecto a estos estándares debe interpretarse como una señal de alerta que amerita una evaluación histopatológica o una revisión de los protocolos de manejo nutricional.

Inspección de la salud reproductiva en el contexto avícola

El enfoque clínico en las aves de postura y reproductoras pesadas difiere sustancialmente del modelo mamífero, orientándose hacia una semiología de indicadores anatómicos externos que operan como ventanas al funcionamiento del ovario y el oviducto. En la industria avícola moderna, donde el rendimiento por lote es la métrica de éxito, la capacidad de identificar aves no productivas mediante métodos físicos es una competencia técnica esencial.

El examen de la cloaca proporciona información inmediata sobre la actividad del eje reproductivo. Una cloaca húmeda, amplia, elástica y de coloración pálida indica que la hembra

está en fase activa de puesta; en cambio, una cloaca seca, contraída y pigmentada refleja una inactividad funcional que disminuye la eficiencia del sistema alimentario. Además, la medición de la distancia pélvica (entre los huesos del pubis) y la distancia entre el pubis y el esternón permite evaluar el desarrollo del sistema reproductivo hipertrofiado. Un ave en funcionamiento presenta una apertura que facilita el paso frecuente de huevos, mientras que una estrechez ósea sugiere un desarrollo folicular nulo o una regresión del oviducto (97).

Integración de la anamnesis y bioseguridad en el acto diagnóstico

Ninguna intervención diagnóstica puede considerarse completa si no se basa en una anamnesis exhaustiva y se lleva a cabo de acuerdo con las normas de bioseguridad. Desde su paridad hasta los registros de monta o inseminación, el recorrido reproductivo del animal funciona como una guía para entender lo que se ha observado en la exploración. Esta visión integral posibilita comprender que los descubrimientos actuales son el fruto de sucesos anteriores, convirtiendo la evaluación en una herramienta para la gestión estratégica.

Un profesional experimentado comprende que la palpación de un útero con dimensiones aumentadas puede interpretarse como una involución uterina fisiológica en una hembra con 15 días de postparto, o como una endometritis clínica si el animal supera los 30 días tras el parto. Asimismo, la seguridad diagnóstica depende de la correcta sujeción del animal y del uso de instalaciones que minimicen el estrés; la liberación de cortisol debida a un manejo brusco no solo pone en riesgo la integridad física del operario, sino que puede alterar la motilidad uterina y la presentación de los signos clínicos, sesgando la realidad biológica del reproductor (3) (98).

Técnicas de imagen y laboratorio

El diagnóstico reproductivo contemporáneo ha ido más allá de la simple exploración táctil, sustentándose en una transformación profunda impulsada por la integración de tecnologías de imagen avanzadas y metodologías analíticas de alta precisión (99). Estos avances permiten hoy llevar a cabo un análisis pormenorizado del aparato reproductor con una claridad que antes no era posible. Esta perspectiva sustituye las valoraciones subjetivas del tacto rectal por información objetiva y comprobable. El empleo de biomarcadores hormonales, el análisis del flujo sanguíneo por medio de Doppler y el ultrasonido de alta resolución posibilitan que el clínico cambie de un diagnóstico empírico a una medicina reproductiva auténtica y precisa. Estas herramientas no solo amplían las capacidades sensoriales del clínico, sino que también actúan como microscopios in vivo, facilitando la intervención en procesos biológicos complejos a nivel celular y optimizando la gestión de la fertilidad en los sistemas de producción intensiva.

La física del ultrasonido y su aplicación en la orquestación ovárica

La ultrasonografía reproductiva se basa en el fenómeno piezoeléctrico, que consiste en que los cristales concretos ubicados en el transductor funcionan como convertidores de energía. Estos elementos convierten los impulsos eléctricos en ondas mecánicas de alta frecuencia que atraviesan los planos tisulares para mostrar su estructura interna. (100). El comportamiento de estas ondas al colisionar con interfaces de diversas densidades, fenómeno conocido como impedancia acústica, genera ecos que el procesador digital decodifica en una cartografía bi-dimensional en escala de grises.

En la conformación anatómica del aparato reproductor, la ecogenicidad se manifiesta mediante un espectro de tonalidades modulado por el contenido hídrico y la densidad proteica de los tejidos. Los fluidos, tales como el líquido folicular, el moco cervical o el fluido alantoi-deo, poseen una naturaleza anecoica (propiedad de los medios que, al ser atravesados por el sonido sin generar rebote, no producen ecos); en virtud de su incapacidad para reflejar las ondas sonoras, estos se proyectan como regiones de una oscuridad absoluta en la pantalla del ecógrafo.

En contraposición, con el propósito de diferenciar las estructuras funcionales, los tejidos de mayor densidad, como el parénquima del cuerpo lúteo, el estroma ovárico o las estructuras óseas fetales, exhiben una gradación que oscila entre grises intensos y blancos brillantes, categorizándose técnicamente como estructuras hipereicoicas (101). Esta diferenciación visual es el eje fundamental que permite al clínico discernir entre procesos fisiológicos normales y alteraciones patológicas con una precisión milimétrica.

Los transductores de alta frecuencia (7.5 a 10 MHz) son sofisticados y permiten, con una precisión milimétrica, el monitoreo de la dinámica folicular. Esta resolución diagnóstica posibilita distinguir el folículo dominante e igualmente examinar su viabilidad a través del análisis de la integridad de la pared folicular y la translucidez (anecogenicidad) del líquido antral. Estos parámetros son esenciales para determinar la condición de salud del ovocito y la capacidad esteroidogénica del folículo. La ultrasonografía se convierte así en un centinela de la vida:

- **Diagnóstico de precocidad:** Permite la identificación de la gestación en estadios donde la palpación rectal es silente.
- **Vitalidad embrionaria:** Facilita la observación del latido cardíaco en bovinos entre los días 26 y 28 post-servicio, un hito fisiológico que confirma la viabilidad del concepto (102) (103).

- **Mitigación de pérdidas:** Actúa como herramienta de diagnóstico ante la mortalidad embrionaria temprana, permitiendo el reinicio inmediato de los protocolos de sincronización y reduciendo los días abiertos en el hato.

Ultrasonografía Doppler: El pulso de la funcionalidad vascular

El avance más trascendental en la imagenología reproductiva de la última década es, incuestionablemente, la incorporación de la tecnología Doppler. Esta técnica se fundamenta en el cambio de frecuencia que experimentan las ondas sonoras al reflejarse en elementos en movimiento, específicamente los eritrocitos que transitan por el torrente vascular (104). En la zootecnia moderna, el Doppler color y el Doppler de potencia (Power Doppler) han dejado de ser herramientas experimentales para convertirse en indicadores fidedignos de la funcionalidad lútea.

La importancia de esta tecnología radica en la correlación íntima entre la angiogénesis del tejido lúteo y su capacidad esteroideogénica. Una irrigación robusta es el reflejo directo de una síntesis eficiente de progesterona, la hormona encargada de salvaguardar el ambiente uterino para el embrión.

La evaluación diagnóstica en medicina veterinaria ha evolucionado significativamente gracias a la incorporación de tecnologías de imagen avanzadas. En el campo de la biotecnología reproductiva, la ultrasonografía posibilita un seguimiento exhaustivo de los sucesos fisiológicos y patológicos basado en una interpretación exacta de sus distintas modalidades. A diferencia de la ecografía convencional (Modo-B), que se limita a detectar alteraciones en términos morfométricos y estructurales, los instrumentos funcionales, como el Doppler, proporcionan una perspectiva dinámica del estado endocrino y la hemodinámica vascular de un ejemplar. La tabla 15 presenta de manera sistemática las diferencias críticas entre ambas tecnologías y cómo estas afectan la precisión del diagnóstico.

Tabla 15. *Capacidades diagnósticas de la ultrasonografía Modo-B y Doppler en reproducción animal*

Parámetro de Evaluación	Ultrasonografía Modo-B (Convencional)	Ultrasonografía Doppler (Funcional)
Enfoque Diagnóstico	Evaluación de la morfología y estructura anatómica	Evaluación de la fisiología y perfusión sanguínea
Evaluación del Cuerpo Lúteo	Basada en el tamaño y la ecogenicidad del parénquima	Basada en el área de vascularización y flujo sanguíneo

Detección de No-Preñez	Efectiva a partir del día 28-30 (Bovinos)	Identificación de atresia vascular temprana (día 20-22)
Diagnóstico en Machos	Identificación de anomalías estructurales (quistes, fibrosis)	Evaluación de resistencia vascular e inflamación aguda

Nota. Adaptado de Brito y Macías (102); Kidd et al (103); Lüttgenau & Bollwein (104)

El análisis que se muestra en la tabla 15, subraya la transición del diagnóstico morfológico estático (Modo-B) hacia la evaluación hemodinámica (Doppler). Esta evolución tecnológica permite una detección de la no-preñez más temprana y precisa, optimizando la toma de decisiones clínicas y la eficiencia reproductiva mediante el análisis del flujo sanguíneo lúteo y testicular.

Perfiles hormonales y biomarcadores

Si la ultrasonografía representa la dimensión macroscópica y funcional del diagnóstico clínico, el laboratorio proporciona su validación molecular definitiva. Actualmente, la cuantificación de mensajeros químicos ha dejado de ser solo una herramienta complementaria para consolidarse como un pilar de certeza diagnóstica. En este contexto, la determinación de progesterona (P_4) en suero o leche sigue siendo el método más reconocido y confiable, considerado el «estándar de oro» para monitorizar la actividad cíclica del organismo y la funcionalidad del cuerpo lúteo.

Sin embargo, los avances en la ciencia y han permitido desplazar las fronteras del conocimiento hacia la identificación de señales moleculares específicas que el concepto (el embrión en desarrollo) emite durante la gestación. Esto ha abierto la posibilidad de detectar una gestación de manera más temprana y con mayor precisión, gracias a la medición de estos biomarcadores específicos (105) (106).

El desarrollo de ensayos de inmunoabsorción ligado a enzimas (ELISA) para la detección de Glicoproteínas Asociadas a la Preñez (PAGs) ha optimizado la gestión reproductiva de los hatos a nivel global. Estas proteínas, sintetizadas de forma exclusiva por las células binucleadas del trofoblasto embrionario, son secretadas al torrente sanguíneo materno tras la implantación. Su cuantificación a partir del día 28 en rumiantes constituye un diagnóstico de alta especificidad que minimiza la variabilidad interobservador y los errores operativos asociados a los métodos manuales, permitiendo una estandarización sistemática en grandes poblaciones animales (107).

En la medicina equina, el monitoreo de la Gonadotropina Coriónica Equina (eCG), secretada por las copas endometriales, se consolida como el protocolo de referencia entre los días 40 y 100 de gestación (108). Más allá de las aplicaciones en animales domésticos, la endocrinología de laboratorio representa la única vía viable para el manejo de especies silvestres o de zoológico. En estos escenarios, donde la sujeción física supone un riesgo vital tanto para el ejemplar como para el operario, la cuantificación de estrógenos totales y metabolitos de progesterona en matrices no invasivas (orina y heces) permite una vigilancia reproductiva ética y segura. Esta precisión diagnóstica facilita, a su vez, el refinamiento de los protocolos farmacológicos, asegurando que la administración de hormonas exógenas coincida con la máxima densidad de receptores tisulares para garantizar una respuesta fisiológica óptima.

Histopatología y citología: El escrutinio del microambiente uterino

Existen escenarios de subfertilidad donde la anatomía macroscópica y los niveles hormonales aparentan normalidad, pero el éxito reproductivo es esquivo. Es aquí donde la biopsia endometrial y la citología uterina actúan como un lente que revela la salud del microambiente celular.

La biopsia endometrial posee una relevancia capital en la clínica equina de alto valor zootécnico. El empleo del sistema de clasificación de Kenney y Doig permite al profesional emitir un pronóstico basado en la arquitectura tisular, identificando cambios degenerativos que a menudo son irreversibles (108).

- **Fibrosis periglandular:** Actúa como una barrera mecánica y funcional que asfixia las glándulas endometriales, comprometiendo la producción de “leche uterina” esencial para la nutrición del embrión antes de la placentación.
- **Endometritis crónica:** La infiltración de linfocitos y células plasmáticas revela una batalla inmunológica persistente que torna el útero en un ambiente hostil para el reconocimiento materno de la preñez.

Paralelamente, la citología uterina mediante el uso del cepillo citológico (cytobrush) se ha afianzado como la técnica predilecta para el diagnóstico de la endometritis subclínica en el ganado lechero (109). Esta patología representa una amenaza silenciosa: a falta de secreciones purulentas visibles, la presencia de una proporción elevada de neutrófilos polimorfonucleares (PMN) en el lumen es suficiente para sabotear las tasas de concepción (109). La implementación de estas técnicas permite al médico veterinario y al zootecnista emitir un pronóstico realista, evitando inversiones costosas en biotecnologías reproductivas en ejemplares con daño

estructural permanente (110). Esta capacidad de discriminación es lo que define, en última instancia, la eficiencia económica y biológica de la empresa pecuaria moderna.

Evaluación de la fertilidad en hembras

La evaluación de la fertilidad en la hembra de interés zootécnico va más allá de la simple confirmación diagnóstica del estado de preñez y se convierte en un análisis integral de su eficiencia biológica. Este proceso se define, como la capacidad biológica intrínseca del animal para coordinar y completar con éxito la compleja secuencia de eventos fisiológicos que garantizan la descendencia, desde la selección y maduración folicular, pasando por la ovulación y la concepción, hasta alcanzar el reconocimiento materno de la gestación y el desarrollo fetal adecuado (111) (112).

En el contexto de la producción moderna, la hembra actúa como un atleta metabólico de alto rendimiento, cuya fisiología experimenta una intensa presión productiva que lleva a los nutrientes desde las funciones vitales hasta la síntesis de leche o el desarrollo del feto. Para proteger la eficiencia biológica, es necesario que la evaluación de su fertilidad se convierta en un seguimiento minucioso de la homeostasis endocrina y del funcionamiento íntegro del aparato reproductivo. Bajo esta óptica, cualquier desbalance en la partición de nutrientes actúa como un sismo silencioso; una perturbación imperceptible en su fase inicial que, al erosionar los pilares del equilibrio neuroendocrino, termina por derrumbar la estabilidad reproductiva y la rentabilidad del hato (113) (114).

Diagnóstico de gestación avanzado y monitoreo de la viabilidad fetal

En la actualidad, el diagnóstico de gestación ha evolucionado de un simple proceso de verificación a un recurso táctico determinante para la gestión del tiempo en las unidades de producción. Esta evolución facilita una toma de decisiones ágil que minimiza los periodos de inactividad reproductiva y maximiza la rentabilidad del sistema. El objetivo primordial de esta práctica es la identificación quirúrgica de las hembras no gestantes para mitigar el impacto económico de los días abiertos. No obstante, la disciplina ha madurado hacia un enfoque cualitativo. El diagnóstico reproductivo se ha ampliado y ahora incluye la determinación del sexo fetal y la evaluación de la viabilidad del producto (115).

La identificación del sexo fetal, realizada mediante la localización precisa del tubérculo genital (usualmente entre los días 55 y 70 en el bovino), otorga a las empresas pecuarias la capaci-

dad de anticipar el mercado, planificando la reposición de vientres o la comercialización de animales con un valor agregado predeterminado (116). Sin embargo, la evaluación clínica no debe ser un evento estático, debe ser una vigilancia dinámica de la vida intrauterina.

- **Flujometría Doppler:** El uso de esta tecnología en la arteria uterina y los vasos umbilicales permite a los clínicos detectar estados de insuficiencia placentaria antes de que se manifiesten signos clínicos de pérdida (117) (5).
- **Monitoreo del CTUP:** En la medicina equina, la medición del grosor de la unidad útero-placentaria (Combined Thickness of the Uterus and Placenta) resulta vital para la detección precoz de la placentitis.
- **Intervención Oportuna:** Una CTUP que excede los rangos fisiológicos para la edad gestacional delata un cuadro de edema e inflamación, lo cual permite al profesional instaurar terapias con progestágenos y antibióticos, salvaguardando así la inversión genética del criadero antes de que ocurra la expulsión irreversible del feto (118).

Fisiopatología del Anestro y dinámicas de reactivación ovárica

El anestro se define como un estado de inactividad ovárica caracterizado por la ausencia de manifestaciones conductuales de estro y la interrupción de la dinámica folicular cíclica. En el ámbito de la producción animal, este fenómeno constituye el principal factor limitante de la eficiencia reproductiva, ya que prolonga los intervalos entre partos y reduce la longevidad productiva del hato (47).

Desde una perspectiva clínica y fisiopatológica, se requiere una diferenciación taxonómica entre las diversas presentaciones del anestro:

1. **Anestro Fisiológico:** Incluye estados naturales como el prepuberal, el gestacional y el estacional (regulado por el fotoperiodo en especies poliéstricas estacionales). En estos casos, el eje hipotálamo-hipófisis-gonadal (HHG) responde a señales biológicas programadas (119).
2. **Anestro patológico o disfuncional:** Este se asocia a fallos en la señalización neuroendocrina. Sus etiologías más comunes son:
 - **Balance energético negativo (BEN):** Donde la deficiencia de metabolitos como la glucosa y hormonas como la leptina e IGF-1 inhiben la secreción pulsátil de la GnRH (Hormona liberadora de gonadotropina) (119).

- **Anestro por amamantamiento:** Mediado por el estímulo neurogénico de la succión y el vínculo materno-filial, que incrementa los niveles de opioides endógenos, bloqueando la liberación de LH (Hormona luteinizante) necesaria para la ovulación (47) (119).

Estrategias de reactivación del ciclo reproductivo en animales que presentan anestro

Cuando un animal entra en anestro, significa que ha dejado de mostrar los signos normales de actividad reproductiva, como el ciclo estral. Esto puede deberse a múltiples causas, incluyendo alteraciones hormonales, nutricionales o ambientales. Para devolver al animal su capacidad reproductiva, es necesario implementar estrategias de reactivación que aborden las causas subyacentes y restablezcan la función hormonal y fisiológica del aparato reproductor.

Enfoque multifactorial

El proceso requiere un abordaje multifactorial, es decir, que combine varias intervenciones complementarias para ser efectivo. Las principales estrategias incluyen:

- **Optimización nutricional:**

La optimización nutricional actúa como el motor metabólico de la reproducción, ya que el estado energético es el principal modulador de la actividad endocrina. Cuando el animal enfrenta deficiencias nutricionales, se activa un mecanismo de supervivencia que prioriza el mantenimiento vital sobre la función reproductiva, provocando una caída en los niveles de glucosa, insulina e IGF-1 que inhibe directamente la secreción pulsátil de GnRH. Como explican Butlery (120) y Bisinotto (121), entre otros investigadores, la recuperación del equilibrio metabólico mediante el aporte estratégico de energía y nutrientes no solo restaura las reservas corporales, sino que envía señales químicas positivas al hipotálamo para reactivar el eje reproductivo, permitiendo que el sistema retome la dinámica folicular y la ciclicidad estral de manera fisiológica.

- **Protocolos de inducción hormonal:**

La finalidad principal de estos protocolos es reproducir externamente los picos hormonales que se producen de manera natural a lo largo del ciclo reproductivo, con el fin de provocar la reactivación de la actividad ovárica. Se logra una regulación exacta del eje hipotálamo-hipófisis-gonadal, lo que permite promover la ovulación y el crecimiento folicular, a través de la

utilización de análogos de la hormona liberadora de gonadotropinas (GnRH) o dispositivos intravaginales cargados con progesterona. Tal como proponen Wiltbank et al. (54), esta manipulación farmacológica permite sincronizar la liberación hormonal y restablecer la pulsatilidad necesaria de las gonadotropinas, facilitando así que la hembra abandone el estado de anestro y reinicie su ciclo estral de manera controlada y eficiente.

En síntesis, la reactivación del ciclo reproductivo depende de una sinergia absoluta donde la optimización nutricional garantiza el sustrato metabólico necesario, mientras que los protocolos hormonales actúan como el disparador fisiológico para romper la inactividad ovárica. Al restaurar el equilibrio metabólico, se eliminan los bloqueos energéticos sobre el hipotálamo, permitiendo que el uso de dispositivos de progesterona y análogos de GnRH emule con éxito la pulsatilidad natural de las gonadotropinas. Esta integración multifactorial, respaldada por las investigaciones de Butler y Smith (120), Wiltbank et al (54) y Bisinotto et al (121), junto a otros autores, asegura que el sistema endocrino no solo reciba la señal de reinicio, sino que tenga la capacidad biológica para sostener el crecimiento folicular y la ovulación, logrando así una transición eficiente del anestro a la ciclicidad productiva.

La monitorización de la eficiencia reproductiva en la hembra bovina requiere un enfoque integral que vaya más allá de la simple detección del estro. La utilización de la tabla 16 facilita sistematizar la relación entre el fenotipo del animal y su estado fisiológico. La evaluación conjunta de indicadores clínicos, como la Condición Corporal (CC), y biomarcadores metabólicos (glucosa, NEFAs, IGF-1) es fundamental para predecir la capacidad de la vaca para reanudar la ciclicidad posparto y sostener una preñez temprana (120) (122) (121).

Tabla 16. *Parámetros de evaluación para el monitoreo de la salud reproductiva en grandes especies*

Indicador	Parámetro de evaluación	Relevancia clínica
Recuento de Folículos Antrales (RFA)	Cantidad de folículos de 2-8 mm	Predictor de reserva ovárica y respuesta a superovulación
Grosor Útero-Placentario (CTUP)	Milímetros (mm) según edad gestacional	Diagnóstico precoz de placentitis y riesgo de aborto en equinos
Beta-hidroxibutirato (BHB)	Concentración en sangre (mmol/L)	Indicador de cetosis subclínica y compromiso de la calidad del ovocito

Puntuación del Tracto Reproductivo (PTR)	Escala del 1 (inmaduro) al 5 (cíclico)	Selección de novillas para ingreso a temporada de monta
--	--	---

Nota: Adaptado de Peter et al. (47); Bisinotto et al. (121); Ferguson (123)

La tabla 16 ofrece un resumen de los parámetros críticos para el diagnóstico de la aptitud reproductiva. Los indicadores clínicos (como la escala de condición corporal y la descarga vulvar) ofrecen una evaluación macroscópica del balance energético y la salud uterina (124). Por su parte, los indicadores metabólicos reflejan el microambiente endocrino necesario para el crecimiento folicular y la calidad del ovocito. La desviación de estos rangos fisiológicos es un predictor temprano de anestro patológico y mortalidad embrionaria.

Pronóstico del potencial reproductivo y selección de reemplazos

La capacidad de vaticinar el rendimiento futuro de una hembra, previo a su inserción en los ciclos productivos, constituye uno de los pilares más vanguardistas de la zootecnia de precisión. En este contexto, el recuento de folículos antrales (RFA) se presenta como un biomarcador de fidelidad incuestionable. Mediante la aplicación de ultrasonografía transrectal de alta frecuencia, el clínico cuantifica la población de folículos antrales pequeños (2-8 mm), los cuales actúan como un espejo de la reserva ovárica total del individuo (125).

La robustez de la evidencia científica contemporánea vincula un RFA elevado con parámetros de fertilidad superior (120) (126). Esta relación no se limita a ser numérica, ya que simboliza el eje alrededor del cual rotan la capacidad biotecnológica de los animales y la longevidad productiva. El potencial endocrino y la habilidad de resistencia del sistema reproductivo frente a la intervención asistida se manifiestan en el tamaño del reservorio folicular, según lo indica la figura 3. La puntuación del tracto reproductivo (PTR) es, además, una herramienta diagnóstica que resulta muy práctica para la elección de novillas de reemplazo. Esta metodología combina la medición morfométrica de los cuernos uterinos con el reconocimiento de las estructuras ováricas (cuerpos lúteos o folículos dominantes) para establecer objetivamente la madurez sexual. El sistema clasifica a los ejemplares de 1 (inmadurez absoluta) a 5 (ciclicidad activa con un cuerpo lúteo presente). Los profesionales aseguran que únicamente los animales que estén fisiológicamente aptos se expongan al servicio si la PTR se aplica entre 30 y 60 días antes de que empiece la temporada de monta.

Figura 3. Relación entre la eficiencia reproductiva y la reserva folicular en hembras zootécnicas

Reserva ovárica	Eficiencia en biotecnologías	Criterio de descarte
<ul style="list-style-type: none"> • Una mayor población folicular se correlaciona con niveles elevados de la hormona antimülleriana (AMH), lo que sugiere una vida útil reproductiva más longeva y una menor tasa de atresia folicular 	<ul style="list-style-type: none"> • Las hembras con alto RFA demuestran una respuesta significativamente más vigorosa a los protocolos de superovulación y una mayor tasa de recuperación de ovocitos viables para la fertilización "in vitro" 	<ul style="list-style-type: none"> • Por el contrario, aquellas hembras con un RFA reducido suelen presentar un desarrollo folicular errático y una propensión a fallas en la concepción, lo que justifica su exclusión temprana para optimizar los recursos del hato

Nota: Adaptado de Ireland et al (124); Mossa et al (127); Hernández y Díaz (128)

Esta selección estratégica no solo maximiza la tasa de preñez al primer servicio, sino que también cimienta las bases de la rentabilidad a largo plazo mediante una longevidad productiva superior (129).

Evaluación del entorno uterino y reconocimiento de la preñez

La fecundación, que es la unión del óvulo y el espermatozoide, no marca el final de la fertilidad femenina. En realidad, el desafío más grande y la parte más complicada del proceso empiezan tras esta unión. La receptividad endometrial, que es la capacidad del útero para recibir al embrión, y el diálogo molecular, una conversación química continua entre la madre y el nuevo ser, son factores determinantes para el éxito del procedimiento.

- **El Diálogo molecular: La señal de supervivencia**

Para que la gestación prospere, el embrión debe avisar que está allí. Si no lo hace, el cuerpo de la madre asumirá que no hay embarazo y destruirá el cuerpo lúteo para buscar un nuevo celo.

- **El Mensajero (Interferón tau):** Cerca del día 15 o 16 del ciclo, el embrión comienza a secretar una proteína llamada Interferón tau (IFN- τ). Esta señal (sustancia) es fundamental para el reconocimiento maternal de la presencia del embrión, ya que inhibe la expresión de receptores de oxitocina en el útero, lo que ayuda a mantener la gestación y prevenir la luteólisis (64).
- **Bloqueo de las prostaglandinas:** Cuando se bloquean los receptores de prostaglandinas, se impide la liberación de una hormona llamada prostaglandina F 2α (PGF 2α). Esta hormona es fundamental para que el cuerpo lúteo (una estructura

en el ovario que produce progesterona) se degrade o desaparezca. Sin la acción de la PGF2 α , el cuerpo lúteo no se desintegra y sigue produciendo progesterona, la hormona que ayuda a mantener el embarazo. Según la literatura, inhibir la acción de la PGF2 α es una estrategia utilizada en medicina veterinaria y humana para evitar que el cuerpo lúteo se destruya, con el fin de conservar el embarazo en ciertas intervenciones y manejos reproductivos (130).

- **Mortalidad embrionaria temprana:** Si este diálogo falla (porque el embrión crece lento o el útero es hostil), ocurre la muerte embrionaria entre los días 15 y 18. Esta es la pérdida reproductiva más costosa, ya que el productor a menudo ni siquiera se entera de que hubo una concepción.
- **Diagnóstico ultra-temprano:** El avance de la biotecnología reproductiva ha permitido identificar que el interferón tau (IFN- τ), la principal señal de reconocimiento materno del embrión en rumiantes, posee una capacidad de señalización que trasciende el entorno uterino para alcanzar el sistema circulatorio. Este fenómeno biológico fundamenta el desarrollo de pruebas moleculares basadas en los genes estimulados por interferón (ISGs), los cuales actúan como biomarcadores de gestación en las células mononucleares de la sangre periférica. El mecanismo operativo se basa en que estas células sanguíneas reaccionan ante el IFN- τ embrionario activando perfiles genéticos específicos, lo que permite detectar la presencia de un embrión viable incluso antes de que sea identificable mediante ultrasonografía convencional. En términos prácticos, esta metodología representa una forma de monitoreo molecular que intercepta la comunicación endocrina del embrión con la madre, ofreciendo una ventaja diagnóstica crucial para optimizar los ciclos reproductivos en la ganadería moderna (131).

- **El Desafío del entorno hostil**

Incluso un embrión sano puede fracasar si el claustro materno no es el adecuado. Procesos como la endometritis subclínica (una inflamación leve pero persistente del útero) alteran el ambiente químico, haciendo que el útero ignore la señal del embrión y desencadene la regresión del cuerpo lúteo.

En conclusión, el éxito reproductivo exige del profesional veterinario, una visión integral que combine la semiología clínica clásica, el monitoreo preciso de los indicadores metabólicos y

la interpretación de las complejas señales moleculares que definen el éxito o el fracaso de la vida en el claustro materno.

Evaluación de la fertilidad en machos

La evaluación de la fertilidad en el semental, denominada formalmente como Examen de aptitud reproductiva (EAR), se establece como una de las piedras angulares en la gestión biotecnológica de las explotaciones zootécnicas contemporáneas. Mientras que la hembra aporta una descendencia limitada por ciclo biológico, el macho ejerce un impacto demográfico y genético masificado; un solo individuo es capaz de determinar el destino reproductivo de cientos o miles de hembras a través de la monta natural o la inseminación artificial. En consecuencia, la identificación de un ejemplar con fertilidad subóptima no representa únicamente una pérdida económica inmediata, sino que actúa como un cuello de botella que compromete el progreso genético y la resiliencia del hato a largo plazo (132).

La andrología veterinaria moderna ha evolucionado desde la inspección empírica de la conducta de monta hacia un análisis multidimensional. Este enfoque integra la arquitectura macro y microscópica de las gónadas, la dinámica cinética de las poblaciones espermáticas y el estudio de los componentes bioquímicos del plasma seminal, los cuales actúan como el vehículo metabólico indispensable para la supervivencia celular en el tracto femenino.

El examen de aptitud reproductiva (EAR) y el análisis morfométrico

El protocolo del examen de aptitud reproductiva no debe interpretarse como una fotografía estática, sino como una evaluación dinámica del potencial biológico del macho. El proceso se inicia con una exploración física sistémica, donde la integridad de los órganos de los sentidos y el sistema locomotor son priorizados. Un semental con visión deficiente o patologías podales crónicas verá limitada su capacidad de detección de estros y su habilidad para completar la cópula, independientemente de su calidad seminal (133).

Dentro de este examen, la morfometría testicular se presenta como el indicador indirecto más potente de la capacidad espermatogénica. Existe una correlación alométrica positiva y significativa entre el volumen del parénquima testicular y la producción diaria de espermatozoides. En rumiantes, la circunferencia escrotal es la medida predilecta debido a su alta repetibilidad y heredabilidad. Un incremento en la circunferencia escrotal sugiere una mayor densidad de túbulos seminíferos y células de Sertoli, las nodrizas de la espermatogénesis, pero además se

ha vinculado genéticamente con una precocidad sexual más acentuada en las hijas de dichos sementales (134).

La elastografía y el Doppler son usados en la medicina de precisión actualmente para analizar la elasticidad y la circulación de la arteria testicular, lo que permite superar las restricciones de la palpación manual. Un testículo saludable presenta una resistencia vascular estable y una ecogenicidad uniforme. En cambio, las modificaciones en la densidad de los tejidos (ya sean muy blandos o duros) son marcadores críticos de enfermedades. Estas herramientas posibilitan que el médico identifique errores en la producción de esperma mucho antes de que aparezcan en un análisis convencional de eyaculado:

- **Fibrosis y calcificaciones:** Secuelas de procesos inflamatorios (orquitis) que reducen el área funcional del testículo.
- **Degeneración testicular:** Caracterizada por una pérdida de turgencia, a menudo vinculada a estrés calórico o disruptores endocrinos.
- **Adherencias escrotales:** Fenómenos que anulan el mecanismo de termorregulación del plexo pampiniforme, induciendo una hipertermia intratesticular que desencadena la apoptosis de las células germinales y la fragmentación del ADN espermático (135).

Estándares morfométricos y funcionales en sementales

La interpretación de los hallazgos andrológicos se realizan bajo un criterio de estandarización que considera las particularidades fisiológicas de cada especie. Aunque el examen de aptitud reproductiva sigue una metodología universal, los umbrales de aceptabilidad para variables como la circunferencia escrotal y los perfiles de motilidad varían significativamente entre rumiantes, équidos y porcinos. Con el fin de establecer un modelo de referencia técnico, la tabla 17 detalla los estándares morfométricos y cualitativos fundamentales que se utilizan para certificar a un reproductor como apto. Estos parámetros no son independientes; constituyen la base biológica sobre la que se asienta el potencial de fecundación, estableciendo una conexión intrínseca entre la calidad seminal y física del macho y la viabilidad económica del sistema.

Tabla 17. *Parámetros de referencia en la evaluación andrológica de especies zootécnicas.*

Especie	Circunferencia Escrotal Mínima (cm)	Motilidad Progresiva (%)	Morfología Normal (%)	Indicador de Eficiencia
Bovinos (Toros)	30 - 34 (según edad)	> 30 - 50	> 70	Correlación con precocidad de las hijas.

Ovinos (Carneros)	30 - 36	> 60	> 80	Alta capacidad de servicio en monta estacional
Porcinos (Berracos)	Evaluación de ancho/largo	> 70	> 75	Determinante en dosis para IA multicatéter.
Equinos (Padrillos)	Ancho total > 8	> 60	> 60	Sensibilidad elevada al estrés por transporte

Nota. Adaptado de: Chenoweth y Lorton (133); van der Horst y Maree (136)

Los valores presentados en la tabla 17 representan los umbrales mínimos recomendados para sementales sexualmente maduros bajo condiciones de manejo estándar.

La circunferencia escrotal en bovinos es altamente dependiente de la edad y la raza, siendo un indicador clave para la selección de precocidad sexual en la descendencia. Los parámetros de motilidad y morfología aquí descritos se fundamentan en evaluaciones mediante microscopía de contraste de fase y sistemas computarizados (CASA). El cumplimiento de estos mínimos no garantiza la fertilidad absoluta, pero reduce significativamente el riesgo de subfertilidad en programas de monta natural e inseminación artificial.

Análisis seminal computarizado (CASA) y la arquitectura de la calidad espermática

La transición de la microscopía óptica convencional, basada en la estimación subjetiva del observador, hacia el análisis seminal asistido por computadora (CASA), ha marcado un hito en la andrología de precisión. Esta tecnología no solo elimina el sesgo humano, sino que descompone el movimiento espermático en una serie de vectores cinemáticos que actúan como firmas biológicas del potencial fertilizante de la célula (137).

El sistema CASA captura la trayectoria de la cabeza espermática a altas velocidades, permitiendo la cuantificación de parámetros que definen la capacidad del espermatozoide para navegar el complejo microambiente del tracto reproductivo femenino. Entre los indicadores de mayor relevancia clínica se encuentran:

- **Velocidad Curvilínea (VCL):** Mide la distancia total recorrida por la cabeza sobre su trayectoria real. Una VCL elevada es a menudo un preludio de la hiperactivación, estado fisiológico necesario para penetrar el cúmulus oóforo.

- **Velocidad de Progresión Lineal (VSL):** Calcula el desplazamiento en línea recta entre el inicio y el final del rastro. Es la métrica del “avance efectivo” hacia el sitio de fecundación.
- **Amplitud del Desplazamiento Lateral de la Cabeza (ALH):** Refleja el vigor del batido flagelar. Un ALH desproporcionado puede indicar una motilidad ineficiente o una maduración incompleta en el epidídimo (7, 8).

Más allá de la cinética, la evaluación de la morfología espermática mediante tinciones diferenciales, como la Eosina-Nigrosina o el frotis de Papanicolaou modificado, permite un diagnóstico etiológico de la subfertilidad (92) (138). Las anomalías se categorizan según su origen y gravedad:

- **Defectos primarios:** Se gestan durante la espermatogénesis en el parénquima testicular. Alteraciones como las cabezas piriformes, microcefalia o piezas intermedias engrosadas suelen ser irreversibles y sugieren un fallo profundo en la arquitectura del ADN o en el aparato centriolo-flagelar (139).
- **Defectos secundarios:** Emergen durante el tránsito por el epidídimo o debido a un choque térmico durante la manipulación del eyaculado. La presencia de gotas citoplasmáticas distales, aunque común en machos jóvenes, debe ser monitoreada, ya que su persistencia indica una falla en la maduración bioquímica necesaria para la interacción con la zona pelúcida (133).

Funcionalidad de membrana y diagnóstico molecular avanzado

En la zootecnia de grandes especies, el diagnóstico espermático contemporáneo establece que la normalidad morfológica del semental no es un predictor absoluto de su fertilidad real en campo. Bajo este paradigma, se han puesto en práctica pruebas funcionales, como el Test de Hinchamiento Hipoosmótico (HOST), que es una herramienta diagnóstica crucial para certificar eyaculados destinados a la inseminación artificial y la criopreservación (140) (141).

El HOST examina la integridad bioquímica, así como la habilidad de regulación osmótica de la membrana plasmática. Cuando se expone a un gradiente hipoosmótico, un espermatozoide con membrana funcional facilita que el agua fluya de manera controlada hacia el citosol. Este aumento de presión hidrostática tiene como consecuencia fenotípica el enrollamiento típico de la parte final de la cola, lo cual señala una estructura celular adecuada para los procesos de capacitación y fertilización. Por el contrario, la ausencia de esta respuesta revela una membrana bioquímicamente inerte, incapaz de regular el transporte activo y de soportar procesos fisiológicos críticos como la capacitación y la reacción acrosomal (3) (142).

Complementando esta evaluación, en la vanguardia del diagnóstico molecular se sitúa el estudio de la fragmentación del ADN espermático (143). Se ha evidenciado que sementales con parámetros óptimos de movilidad y morfología pueden presentar niveles elevados de daño cromatínico. Este fenómeno actúa como un factor disruptor silente: aunque no impide necesariamente la fecundación, constituye una de las causas primarias de mortalidad embrionaria temprana, dado que un genoma paterno comprometido resulta incapaz de sostener las divisiones celulares tras la activación del genoma embrionario (144).

Evaluación de la libido y capacidad de servicio: El componente psicofisiológico

La excelencia en los parámetros espermáticos resulta irrelevante para el sistema productivo si el semental carece del impulso psicosexual necesario para efectuar la monta o si posee impedimentos mecánicos que obstaculicen la intromisión. En este contexto, la libido se define como el deseo o impulso sexual regulado por el eje hipotálamo-hipófisis-gonadal y modulado por el sistema dopaminérgico central. Es un rasgo con un componente genético significativo, cuya expresión está estrechamente ligada a los niveles de testosterona circulante y a la experiencia previa del animal (145).

Es muy importante que el clínico diferencie con rigor entre la libido (el deseo) y la capacidad de servicio (la habilidad física para completar el acto). Un macho puede manifestar un cortejo intenso y un interés persistente en las hembras en estro, pero fallar en la culminación de la cópula debido a patologías del sistema musculoesquelético o anomalías anatómicas del aparato reproductor:

- **Patologías del sistema locomotor:** La espondilitis, la artritis tarsiana o las afecciones podales actúan como barreras físicas dolorosas. En sistemas de monta natural extensiva, donde el semental debe recorrer grandes distancias y soportar su peso sobre los miembros posteriores durante el salto, estas condiciones reducen drásticamente la tasa de preñez acumulada (146).
- **Desviaciones peneanas y frenillos:** Problemas como el pene en espiral (desviación lateral) o la persistencia del frenillo prepucial impiden la intromisión vaginal efectiva, a pesar de que la libido permanezca intacta.
- **Capacidad de servicio:** Su evaluación se realiza en pruebas de campo estandarizadas para medir el tiempo de reacción, la tasa de saltos con eyaculación y la eficacia del comportamiento de cortejo bajo una ventana de tiempo definida (147) (148).

Factores disruptores: Estrés calórico y equilibrio metabólico

La resiliencia reproductiva del macho se ve constantemente desafiada por factores ambientales y nutricionales que pueden inducir una subfertilidad transitoria o permanente. El estrés calórico es, quizás, el disruptor más crítico en regiones tropicales y subtropicales. El aumento de la temperatura ambiental por encima del umbral termo-neutral del animal satura el mecanismo de enfriamiento del plexo pampiniforme, incrementando la temperatura testicular (149) (150). El efecto del estrés térmico no solo afecta la movilidad del espermatozoide, además también causa daños directos en su ADN por medio de procesos oxidativos. Estos daños son duraderos, dado que el ciclo de producción de nuevos espermatozoides toma cerca de 60 días. Asimismo, la alimentación tiene un papel determinante; si faltan minerales fundamentales como el selenio y el zinc, no se logra una maduración adecuada. Por otro lado, contaminantes como la zearalenona funcionan como estrógenos falsos, lo que confunde el cuerpo y modifica la liberación de la hormona GnRH; esto interfiere con la producción habitual de esperma). Esta interferencia hormonal reduce la secreción de LH y, por ende, la síntesis de testosterona intratesticular, resultando en una atrofia funcional del epitelio germinal (151).

En conclusión, la evaluación contemporánea del semental ha ido más allá del diagnóstico morfológico para cristianizar en un análisis integral de la bioseguridad reproductiva. Al combinar la precisión del sistema CASA, la profundidad del diagnóstico molecular y la observación etológica, el profesional veterinario no solo certifica la capacidad actual del macho, sino que asegura la estabilidad económica y el avance genético de la explotación ganadera.

Herramientas de monitoreo y registros reproductivos

La arquitectura de gestión de la información reproductiva se ha posicionado como el sistema nervioso central de la empresa pecuaria contemporánea. Mientras que el diagnóstico individual opera en el plano de la intervención clínica, similar a la atención de un síntoma aislado, el monitoreo sistémico, sustentado en registros meticulosos y analítica digital, permite disecionar con rigor científico el comportamiento de la población en su conjunto. Esta vigilancia estratégica no solo facilita la identificación temprana de «cuellos de botella operativos», sino que proyecta la sustentabilidad financiera del sistema mediante la modelización de escenarios económicos basados en flujos de datos en tiempo real (152) (153).

En un mercado globalizado y de alta competitividad, donde la optimización de recursos constituye la moneda de cambio exigida, la rentabilidad zootécnica ha dejado de ser un subproducto de la fertilidad biológica aleatoria. Por el contrario, se ha transformado en el resultado de una

gestión de negocio precisa, cuya finalidad es la minimización de costos por unidad producida y la maximización del mérito genético poblacional (154). Con el propósito de alcanzar estos estándares de eficiencia, la integración de herramientas digitales se vuelve imperativa para transformar la biología del animal en un activo estratégico.

Monitoreo y sistemas de identificación electrónica

La piedra angular de cualquier sistema de monitoreo riguroso reside en la identificación inequívoca del individuo. La transición histórica desde los métodos visuales rudimentarios, como el tatuaje o los dispositivos plásticos, hacia los sistemas de Identificación por Radiofrecuencia (RFID) ha permitido desterrar el error humano, ese ruido que solía contaminar la recolección de datos en campo. En este sentido, la evolución hacia sistemas de Identificación por Radiofrecuencia (RFID) no solo implica una mejora técnica, significa también, un requisito para la gestión de precisión en hatos de gran escala, donde la individualización de cada evento reproductivo garantiza la integridad del sistema de datos (152).

- **Sistemas de identificación electrónica:** El empleo de bolos ruminales y microchips, conforme a los estándares actuales de identificación por radiofrecuencia (RFID), asegura una trazabilidad integral. Esta tecnología funciona como un registro automatizado que vincula hitos reproductivos y clínicos con el historial genealógico, minimizando la pérdida de información (155).
- **Mitigación de riesgos genéticos:** Esta precisión es esencial para controlar la consanguinidad, ya que evita la depresión endogámica, que pone en peligro el vigor híbrido y la viabilidad biológica de las poblaciones (156).
- **Cumplimiento Normativo:** Facilita la adhesión a protocolos de bioseguridad internacionales, donde la biografía de cada ejemplar debe ser rastreable a lo largo de toda la cadena de valor.

Indicadores de desempeño y su arquitectura financiera

La interpretación de la fertilidad poblacional demanda el uso de Indicadores clave de desempeño que actúen como brújulas para la gerencia. Históricamente, el Intervalo entre partos (IEP) ha dominado la narrativa reproductiva; no obstante, su naturaleza retrospectiva lo condena a ser una autopsia de eventos pasados, limitando la capacidad de maniobra inmediata (153).

Bajo una visión proactiva, la gestión moderna prioriza la tasa de preñez a los 21 días. Este indicador dinámico actúa como un termómetro de la rapidez del embarazo, combinando

con elegancia dos variables esenciales: el índice de concepción y la eficacia en la detección del estro (157).

La eficacia de la gestión reproductiva no puede estar atada a percepciones subjetivas; requiere de una métrica rigurosa que traduzca los eventos biológicos en datos auditables. En este sentido, la selección de los Indicadores clave de desempeño define la capacidad de respuesta de la gerencia. Mientras algunos indicadores ofrecen una mirada retrospectiva, otros actúan como radares de tiempo real. En la tabla 18 se presenta un resumen de indicadores básicos para monitorear y mejorar la eficiencia reproductiva en la ganadería, impactando directamente en la rentabilidad de la explotación. La gestión adecuada de estos parámetros permite optimizar recursos y maximizar beneficios económicos y la continuidad del ciclo productivo.

Tabla 18. *Indicadores básicos para la evaluación de la reproductividad y rentabilidad en la gestión de la ganadería moderna*

Indicador	Definición técnica	Horizonte de análisis	Impacto en la rentabilidad
Intervalo Entre Partos (IEP)	Tiempo transcurrido entre dos partos consecutivos.	Retrospectivo (Largo plazo)	Bajo (Detección tardía de ineficiencias)
Tasa de Preñez (21 días)	Proporción de hembras elegibles que gestan en un ciclo de 21 días.	Dinámico (Corto plazo)	Muy Alto (Optimiza la curva de producción de leche/carne)
Días abiertos	Período entre el parto y la concepción confirmada.	Operativo	Medio-Alto (Define el costo de mantenimiento improductivo)
Tasa de Concepción	Porcentaje de servicios que resultan en gestación confirmada.	Diagnóstico	Alto (Mide la calidad del semen y la técnica de IA)

Nota. Adaptado de Galvão et al. (157); Britt et al. (152); Henschion et al. (154)

La tabla 18 ilustra la jerarquización de los indicadores según su capacidad de incidencia financiera. Se destaca que, si bien el Intervalo entre partos (IEP) es un referente histórico de estabilidad, la tasa de preñez a los 21 días se consolida como el motor de la rentabilidad moderna. Esto se debe a que permite una intervención dinámica sobre la fertilidad poblacional, minimizando el impacto de los días abiertos y optimizando la eficiencia del inventario biológico. La sinergia entre estos valores establece la base para una toma de decisiones basada en evidencia científica.

En este escenario, una tasa de preñez optimizada funciona como un catalizador en términos económicos, disminuyendo significativamente los días abiertos. Cada día que una hembra permanece no gestante después del tiempo de espera voluntario se traduce en una fuga silenciosa de capital, vinculada a la conservación de animales cuya productividad no justifica su costo metabólico.

Ecosistemas digitales y monitoreo en tiempo real

Las estructuras de gestión basadas en la nube han reemplazado los registros manuales, que antes eran propensos a perder datos y a la entropía, gracias al avance hacia una ganadería de precisión (158). En este paradigma moderno, las plataformas de software reproductivo superan su propósito original como almacenes de información, convirtiéndose en centros de procesamiento analítico. Estos sistemas convierten grandes flujos de variables biológicas y productivas en directrices estratégicas que mejoran el funcionamiento diario del hato.

La convergencia de estas plataformas con arquitecturas de sensores, como los implantes intra-ruminales, los acelerómetros y los dispositivos para el monitoreo cervical, ha provocado una transformación paradigmática en la detección del estro, superando las restricciones que presenta la inspección ocular humana (159). Estas herramientas funcionan como sistemas de vigilancia continua, que pueden codificar los más pequeños cambios en los patrones de comportamiento y posibilitan una interpretación objetiva de los indicadores fisiológicos que ocurren antes de la ovulación.

- **Cinética del comportamiento:** La telemetría posibilita el reconocimiento de un aumento en la locomoción y depresión correspondiente en los períodos de rumia, que son biomarcadores confiables de las fases estral y proestral (160).
- **Alertas de precisión:** Los sistemas, utilizando esquemas de aprendizaje automático, transforman la signología motora en alertas inmediatas para terminales móviles (161). Esto le da al profesional la capacidad de realizar la inseminación artificial durante el período de máxima fertilidad.
- **Mitigación del celo silencioso:** Esta técnica se vuelve especialmente relevante en ejemplares de gran valor genético, en los que un balance energético negativo tiende a suprimir la expresión del celo. El monitoreo automatizado posibilita que la tasa de detección, que estaba limitada al 70%, supere los límites inherentes a la inspección convencional (162).

Análisis de datos como combustible del progreso genético

La sistematización histórica de los registros reproductivos es la base para el avance genético de la población. Factores como la longevidad funcional, facilidad del parto y la regularidad de los ciclos estrales superan su uso en la gestión inmediata y se convierten en insumos para las evaluaciones genómicas actuales. Estos datos posibilitan una estimación más exacta de los valores genéticos, lo que hace posible elegir progenitores que aseguren descendencia con más eficacia reproductiva (163).

La compañía de zootecnia tiene la capacidad de determinar los reproductores cuya superioridad no se basa solo fenotípica, también en una estructura genómica que puede transmitir una alta fertilidad a su descendencia, gracias a la aplicación de Valores Genéticos Estimados (EBVs) y el estudio de análisis de pruebas de progenie (164). Desde una perspectiva macro-económica, el registro meticuloso de datos posibilita la realización de análisis de sensibilidad. Dichas simulaciones matemáticas evidencian que pequeñas variaciones en la tasa de preñez afectan exponencialmente la optimización del margen neto de la explotación.

Finalmente, la optimización de la eficiencia reproductiva no es un evento aislado o aleatorio, puesto que resulta de una sinergia entre la fisiología endocrina del ejemplar, la precisión del diagnóstico clínico y el rigor científico en el procesamiento de datos. Debido a esto, la rentabilidad se convierte en el resultado planificado de una administración que ha podido transformar los datos empíricos en activos estratégicos de conocimiento para la toma de decisiones (151) (154).



CAPÍTULO III

**TÉCNICAS REPRODUCTIVAS
CONVENCIONALES Y
BIOTECNOLOGÍA EN HEMBRAS**

CAPÍTULO III.

TÉCNICAS REPRODUCTIVAS CONVENCIONALES Y BIOTECNOLOGÍA EN HEMBRAS

Wilmer Wagner Alcívar Guadamud, Víctor Alvaro Tualombo Masabanda, Oscar Darwin Criollo Salinas, Debbie Shirley Chávez García, Jasmin Esmeralda Benítez Mora, Néstor Vicente Acosta Lozano, Jefferson Raúl Varas Aguillón y Julio César Villacres Matías.

La reproducción asistida en hembras de especies zootécnicas es un área que está en continua evolución, donde se entrelazan la práctica clínica y la investigación biotecnológica. Estas técnicas han hecho posible el avance de la población y la conservación genética, así como una mejora en la eficiencia reproductiva.

El desarrollo de métodos aplicables a la reproducción en la hembra, demuestra que se está en búsqueda de sistemas productivos más exactos y sostenibles. La biotecnología, al fusionarse con la experiencia veterinaria, redefine los límites de la intervención reproductiva y presenta escenarios que unen el bienestar animal, la eficiencia técnica y perspectiva estratégica de producción.

Inseminación artificial

La inseminación artificial se ha consolidado como una de las biotecnologías reproductivas más empleadas en la cría de animales. Su utilización en hembras de especies zootécnicas se debe a la necesidad de mejorar la eficiencia reproductiva, disminuir los peligros sanitarios y acelerar el avance genético. La técnica brinda beneficios en el control poblacional y la bioseguridad al posibilitar el uso de semen de machos escogidos sin requerir contacto directo. La inseminación artificial se incorpora como un instrumento estratégico en la producción pecuaria, enlazando la investigación científica con las prácticas veterinarias. Esto favorece tanto la sostenibilidad como la competitividad de los sistemas productivos.

La inseminación artificial se define como el conjunto de procedimientos biotecnológicos mediante los cuales el ser humano interviene en el proceso reproductivo para facilitar el encuentro gamético. Esta técnica consiste en el depósito instrumental de espermatozoides en el tracto reproductivo de la hembra, sustituyendo el coito natural por un sistema mediado por instrumentos. De este modo, se logra la fecundación sin la necesidad de interacción física entre el macho y la hembra, permitiendo un control antropogénico total sobre cada una de las fases del ciclo reproductivo (165).

Historia y evolución de la técnica

La evolución de la inseminación artificial se divide en cuatro periodos importantes. La primera, de base fisiológica, dirigida por Ivanow en Rusia, quien mejoró la recolección de semen a través de vaginas artificiales. Esto posibilitó que un único eyaculado de semental tuviera la capacidad de fertilizar a varias hembras (166). La era de la criopreservación fue la segunda fase, la cual se inició en 1949, cuando Polge, Smith y Parkes descubrieron las cualidades crioprotectoras del glicerol de manera accidental pero científica. Este descubrimiento fue revolucionario porque posibilitó la conservación inacabable y el transporte transcontinental del material genético de élite (166).

La tercera fase está relacionada con la tecnificación de la deposición, en la que se normalizó el método rectovaginal en bovinos, logrando que las tasas de concepción superaran el 50% en circunstancias controladas. En última instancia, se está en una época de la IA de precisión, que se distingue por el empleo de semen sexado a través de citometría de flujo y por la incorporación de sensores para medir actividad, con el fin de detectar automáticamente el estro (166). En esta etapa compleja, la inteligencia artificial deja de ser un método aislado y se transforma en una parte de la administración de datos genómicos, donde los reproductores son seleccionados con base en marcadores moleculares que tienen alta heredabilidad para características relacionadas a la salud y a la producción.

Para comprender la complejidad de la inseminación artificial, se requiere examinar el comportamiento de los gametos en el tracto reproductivo femenino. En contraste con el apareamiento natural, en el que la deposición seminal es generalmente vaginal o cervical (según la especie), la inseminación artificial tiene como objetivo perfeccionar el arribo de espermatozoides al lugar donde se produce la fertilización, por medio de una deposición intrauterina o en el interior del útero.

Este bypass anatómico modifica la interacción inicial entre las defensas de la hembra y el semen. Cuando el inóculo es recibido por el útero, se produce una reacción inflamatoria fisiológica temporal que se distingue por la infiltración de polimorfonucleares (PMN). La finalidad de esta reacción es eliminar los espermatozoides que sobran, las bacterias que se introducen durante el procedimiento y los residuos del diluyente (167). En la inseminación artificial, la cantidad de esperma por dosis es mucho menor que en un eyaculado natural. Por esto, el método debe ser muy preciso para garantizar que una población adecuada de espermatozoides funcionales

llegue a los reservorios oviductales antes de que la vida media celular o la respuesta inmune interfieran con la fertilización

Por otro lado, el transporte no es solamente dependiente de la fuerza del espermatozoide, también depende de la contracción del miometrio, que las prostaglandinas presentes en el plasma seminal (o que se añaden al diluyente) inducen, así como de la liberación de oxitocina cuando el tracto genital se estimula. De este modo, la inseminación artificial se establece como un procedimiento en el cual la exactitud clínica del operador tiene que estar coordinada con la condición endocrina de la hembra, asegurando un entorno uterino receptivo y una ventana temporal adecuada para el encuentro gamético.

La técnica ha avanzado en las décadas más recientes hacia protocolos que son más precisos y eficaces. La inseminación a tiempo fijo (IATF), que está fundamentada en la sincronización hormonal del ciclo estral, ha hecho posible el avance sobre las dificultades que se relacionan con la detección de celo en campo, lo cual ha mejorado las tasas de preñez en bovinos y ha optimizado el rendimiento económico de los sistemas de carne y leche. La inseminación laparoscópica ha aparecido como una opción para sobrepasar los obstáculos anatómicos del cérvix en rumiantes menores, alcanzando índices de concepción por encima del 60 % incluso con semen congelado (168).

La inseminación artificial también se ha ajustado a programas de conservación de razas locales y especies silvestres. Su implementación ayuda a preservar la diversidad genética y a afrontar los retos que surgen debido a la presión medioambiental y la disminución de hábitats. En esta línea, la técnica ha ido más allá de su función original como instrumento de producción y se ha transformado en un recurso estratégico para el manejo de la biodiversidad (169).

Procedimientos en bovinos y equinos

Para implementar la inseminación artificial en animales de gran tamaño, se requiere un conocimiento total de la anatomía topográfica y una comprensión profunda de la dinámica folicular. Los métodos para la deposición del semen varían significativamente, a pesar de que su objetivo final es el mismo, debido a la fisiología del estro y a la estructura del tracto genital.

Bovinos

En el ámbito de la zootecnia bovina, la inseminación artificial se ha institucionalizado como un componente operativo estándar tanto en explotaciones lecheras como cárnicas (170). La técnica rectocervical predomina como la metodología de elección, fundamentada en la ca-

nalización de una pipeta a través del canal cervical bajo la dirección táctil proporcionada por la palpación transrectal. La optimización de los índices de concepción en este procedimiento está supeditada a una formación técnica rigurosa, dado que la manipulación precisa de la arquitectura del tracto resulta esencial para el éxito del protocolo (171).

El material genético del macho se acondiciona en unidades de criopreservación (pajuelas) con un volumen de 0,25 o 0,5 ml. Este procedimiento comprende la preservación a temperaturas criogénicas en nitrógeno líquido y la dilución. El protocolo de reactivación térmica requiere una homeostasis rigurosa, con frecuencia estandarizada a 37 °C durante medio minuto, porque la integridad estructural y la capacidad de sobrevivir del espermatozoide son muy sensibles a las variaciones de temperatura. Al mismo tiempo, la implementación de la IATF, mediante la manipulación farmacológica del ciclo estral, ha mitigado las deficiencias inherentes a la detección visual del estro, optimizando la homogeneidad reproductiva del hato (172). Los índices de concepción en la especie bovina, que oscilan entre el 55 % y el 65 %, dependen de una interacción que abarca factores múltiples, como son la calidad del plasma seminal, la exactitud de los procedimientos de sincronización hormonal y el estado metabólico-fisiológico del útero (173).

Equinos

En la especie equina, la biotecnología reproductiva enfrenta desafíos intrínsecos debido a la susceptibilidad del espermatozoide a la criolesión, lo que prioriza el empleo de material seminal en estado fresco o refrigerado (174). El protocolo normativo es la inseminación intrauterina, técnica que implica la deposición del inóculo directamente en el lumen del cuerpo uterino mediante canalización cervical (175). Este abordaje incrementa sustancialmente la probabilidad de concepción al mitigar la resistencia de las barreras anatómicas y optimizar la cinética espermática dentro del tracto. La eficacia del procedimiento está supeditada a una sincronía rigurosa con el evento ovulatorio, gestionada a través de monitoreo ultrasonográfico seriado y farmacología hormonal. Mientras que las tasas de concepción con semen fresco varían entre 60 y 70 %, las del semen congelado suelen ser menores al 40 %, lo que restringe su aplicación en planes de reproducción equina (176). No obstante, en años recientes, los progresos en técnicas de vitrificación y crioprotectores han demostrado resultados alentadores.

La eficacia de la inseminación artificial depende en gran medida del tipo de especie y de la tecnología utilizada. Bajo esta premisa la tabla 19 ilustra la manera en que la sensibilidad

celular al choque térmico y las variables anatómicas determinan las pautas de manejo en campo. reproductivo en cada sistema de producción.

Tabla 19. *Procedimientos de inseminación artificial en bovinos y equinos*

Especie	Técnica principal	Tipo de semen	Tasa de concepción	Factores críticos
Bovinos	Rectocervical (pipeta guiada por palpación rectal)	Congelado en pajuelas	55–65 %	Calidad seminal, sincronización del celo (IATF), capacitación técnica
Equinos	Intrauterina (pipeta transcervical)	Fresco/ refrigerado (congelado menos frecuente)	60–70 % (fresco) <40% (congelado)	Detección precisa de ovulación, sensibilidad a criopreservación, manejo posinseminar

Nota: Adaptado de Herrera et al (172); Echevarría (176)

Aplicación en ovinos, caprinos y porcinos

La implementación de la inseminación artificial en ovinos, caprinos y porcinos ha requerido innovaciones tecnológicas para superar barreras biomecánicas y fisiológicas distintos a los observados en grandes especies.

Ovinos

La morfología del cérvix, que se caracteriza por la existencia de prominentes anillos fibrocartilaginosos (usualmente entre cinco y siete) no están dispuestos concéntricamente, lo cual crea un canal tortuoso que dificulta el cateterismo transcervical profundo en la mayor parte de las razas (177).

A causa de esta restricción anatómica, la inseminación con semen criopreservado, de viabilidad y motilidad reducidas tras la descongelación, suele realizarse mediante laparoscopia. Desde una perspectiva clínica, este procedimiento permite la deposición del semen directamente en el lumen de los cuernos uterinos, evitando que los espermatozoides deban atravesar la barrera cervical, donde la fagocitosis y el atrapamiento mecánico reducirían drásticamente las probabilidades de fertilización (13). El éxito de la intervención depende de la inspección quirúrgica de la turgencia uterina y la detección de cuerpos lúteos como signos de un celo funcional (178). Esta técnica permite alcanzar tasas de fertilidad superiores al 70% con semen congelado, cifras inalcanzables mediante la vía cervical convencional, consolidándose como

la biotecnología de elección para la difusión de material genético de alto valor en núcleos de selección ovina (179).

Caprinos

Aunque la anatomía cervical caprina presenta una configuración menos tortuosa que la ovina, permitiendo el acceso transcervical mediante la técnica de fijación del cérvix con espéculo vaginal, el éxito de la inseminación artificial está condicionado a la compleja interacción entre factores ambientales y el eje hipotálamo-hipófisis-gonadal (HHG).

A diferencia de otras especies zootécnicas, en la cabra, la glándula pineal juega un significativo papel transductor en su reproducción de día corto. La razón es que la secreción de melatonina durante la noche afecta a las neuronas de la pars tuberalis para regular la liberación de kisspeptina, el secretagogo principal de la GnRH (Hormona Liberadora de Gonadotropinas). El anestro estacional es un obstáculo biológico para la inseminación artificial en latitudes con una estacionalidad marcada. Por ello, para tener éxito fuera de temporada, se requiere manipular el fotoperiodo o recurrir a implantes de melatonina con el objetivo de reactivar la pulsatilidad de la GnRH y, por ende, también la de las hormonas folículo-estimulante (FSH) y luteinizante (LH) (180).

Desde la perspectiva del procedimiento clínico, la permeabilidad cervical en las cabras alcanza su punto más alto durante el pico estrogénico del estro. En esta etapa, el estradiol además de provocar que las fibras colágenas del cérvix se relajen, también cambia la disposición del moco cervical y lo convierte en una red de canales fluidos que favorecen el paso de los espermatozoides (180).

No obstante, la aplicación de semen criopreservado requiere una exactitud rigurosa en el tiempo a causa de la corta vida de los espermatozoides después de ser descongelados, que se calcula entre 6 y 8 horas con capacidad fecundante efectiva; por esta razón, lo ideal es llevar a cabo la inseminación entre las 12 y las 24 horas siguientes a la detección del estro, o bajo protocolos de tiempo fijo que garanticen que coincidan con la ventana viabilidad del ovocito, que es extremadamente breve (180).

Porcino

La arquitectura del tracto reproductivo de la cerda, con un cérvix de almohadillas pulvinares en forma de sacacorchos, ha evolucionado para convertirse en el lugar natural donde se deposita

el semen (181). No obstante, la inseminación artificial post-cervical (IAPC) ha modificado este paradigma con un sistema de doble cánula que posibilita que el catéter interno avance hacia el cuerpo uterino sin causar traumas, imitando así el rápido transporte de esperma facilitado por las contracciones del miometrio (182). La IAPC, desde la biología celular, es transformadora porque modifica el balance inmunológico tras la inseminación. La colonización del istmo oviductal no se ve comprometida cuando el inóculo se coloca directamente en el útero, ya que tanto la carga antigénica como el volumen (30-40 mL) disminuyen, lo que a su vez reduce la infiltración de neutrófilos y la leucocitosis reactiva (182).

La eficacia de este método depende en gran medida de una sincronización precisa con el suceso periovulatorio, que generalmente tiene lugar durante la última parte del estro. Para mejorar la ventana de inseminación, el manejo clínico debe dar prioridad a indicadores como la viscosidad del moco y la hiperemia vulvar. Esto garantiza que los espermatozoides conserven su habilidad de capacitación y reacción acrosómica a lo largo de una longevidad metabólica ajustada por dilución (183).

Por último, la IAPC tiene que asegurar una señalización sólida para que la madre reconozca la gestación. Este proceso depende de la secreción embrionaria de estradiol entre los días 11 y 12, lo cual desvía la prostaglandina F₂ α hacia un camino exocrino. Esta técnica garantiza una tasa de paso transuterino ideal que posibilita sostener la prolificidad propia de las líneas genéticas contemporáneas, rebasando los 12-14 nacimientos totales a través de una señalización embrionaria eficaz y bien distribuida, aunque se empleen dosis menores (183).

En la tabla 20 se presentan la aplicación de la inseminación artificial en ovinos, caprinos y porcinos, lo cual permite identificar las diferencias en el sistema y la superación de las barreras anatómicas específicas que condicionan el éxito biotecnológico en estas especies.

Ventajas y desventajas

La aplicación de la inseminación artificial en las especies zootécnicas se ha establecido como un pilar de la bioseguridad desde la perspectiva de la medicina poblacional, superando incluso la visión de la optimización de los índices reproductivos. Al suprimir el coito, se interrumpe la transmisión horizontal de patógenos con tropismo por el tracto reproductivo, tales como *Campylobacter fetus venerealis* y *Tritrichomonas foetus*.

Tabla 20. Especificaciones técnicas y biológicas de la inseminación artificial en ovinos, caprinos y porcinos

Espece	Técnica principal	Tipo de semen	Tasa de concepción	Factores críticos
Ovinos	Laparoscopia (deposición intrauterina directa)	Congelado (pajuelas o pellets)	60–75 %	Superación de la barrera inmunomecánica cervical, sincronización hormonal y ayuno pre-quirúrgico
Caprinos	Transcervical (asistida con espéculo)	Refrigerado o Congelado	45–60 %	Control neuroendocrino de la estacionalidad (fotoperiodo), ventana de viabilidad del ovocito y efecto macho
Porcinos	Post-cervical (IAPC) con sonda flexible	Fresco/ Refrigerado (15–17°C)	80–90 %	Sincronización periovulatoria, reducción de la leucocitosis reactiva y señalización del reconocimiento materno

Nota: Adaptado de Hidalgo et al. (179); Seillant et al. (180); Alfonso (183)

En la monta natural, estos agentes provocan endometritis transitoria y muerte embrionaria temprana que suelen cursar sin detección clínica (170). Asimismo, la técnica facilita el control estricto de enfermedades sistémicas y zoonóticas de declaración obligatoria, garantizando la inocuidad del material genético introducido mediante procesos de lavado y la adición de antibióticos específicos en los diluyentes (176).

No obstante, los desafíos inherentes a la criobiología y la manipulación de los gametos representan obstáculos críticos. Un factor restrictivo es el daño iatrogénico durante el manejo post-descongelación, donde variaciones térmicas mínimas pueden desencadenar la peroxidación lipídica de la membrana plasmática espermática. Bajo estas condiciones, aunque la motilidad masal parezca aceptable, las tasas de concepción declinan debido a que el estrés oxidativo compromete la estabilidad del ADN y la integridad acrosomal (184). Por ello, el éxito de los protocolos de IATF o de la detección de estro en bovinos requiere un dominio profundo de la endocrinología y la dinámica folicular, evitando así la inseminación de hembras con quistes foliculares o en estado de anestro profundo.

Desde el punto de vista biológico y genético, la expansión masiva de la inseminación artificial carente de una estrategia genómica fundamentada, puede resultar contraproducente. Una presión de selección excesiva sobre un número limitado de sementales favorece la depresión

por consanguinidad (*inbreeding depression*), lo que incrementa la expresión de alelos recesivos deletéreos y reduce la plasticidad fenotípica de las poblaciones ante fluctuaciones ambientales (185). En contextos específicos como el de Ecuador, factores como el estrés calórico tropical y la hipoxia hipobárica altoandina ejercen un impacto epigenético adverso; estas variables alteran el flujo sanguíneo uterino y la competencia ovocitaria, gestando un ambiente uterino hostil que compromete el reconocimiento materno de la gestación y limita la eficiencia biológica de la biotecnología, incluso ante una ejecución técnica impecable (186).

Transferencia de embriones

La transferencia de embriones es una biotecnología reproductiva de segunda generación que se basa en la replicación del potencial genético de hembras donantes, (alto mérito), mediante el rescate de estructuras embrionarias y su posterior deposición en el tracto reproductivo de hembras receptoras. Estas últimas funcionan como incubadoras biológicas o soportes gestacionales hasta que el parto termina (187). La transferencia de embriones, a diferencia de la inseminación artificial que se enfoca en difundir la superioridad del padre, posibilita optimizar tanto el índice de reemplazo como la intensidad de selección desde el lado materno, lo cual produce una disminución notable en el intervalo generacional en las especies zootécnicas (187).

Desde el punto de vista fisiológico, la transferencia de embriones se convierte en un protocolo endocrino de gran complejidad, alejándose así, de simple procedimientos mecánicos. El éxito de su método se basa en una sincronización exacta del diálogo entre el embrión y la madre, en la que el microambiente uterino de la receptora tiene que reproducir con precisión el estado cronológico y hormonal del donante. La transferencia de embriones no reemplaza la inseminación artificial como método de difusión masiva debido a estas exigencias de concordancia sumado a las dificultades técnicas impuestas por la superovulación y logística clínica. Sin embargo, la transferencia de embriones se establece como una herramienta estratégica para asegurar el progreso en términos genéticos, posibilitando que las cualidades destacadas de individuos de élite se transmitan con una eficacia biológica mucho mayor a la que se logra a través de la reproducción natural (178).

Obtención de embriones

La producción de estructuras embrionarias viables depende de la gestión estratégica de la dinámica folicular en las hembras donantes. El propósito principal es fomentar el desarrollo y la ovulación posterior de un grupo de folículos que, en condiciones fisiológicas normales, hubieran experimentado atresia debido a la dominancia folicular. La superovulación (SOP) es

un fenómeno que se basa en la administración externa de gonadotropinas, utilizando principalmente Gonadotropina Coriónica Equina (eCG) o Hormona Folículo-Estimulante (FSH) de origen porcino. (188).

La respuesta ovárica al protocolo de SOP muestra una notable variación entre individuos, que está determinada por el número de folículos antrales disponibles al inicio de la inducción. La aplicación de esquemas que emplean progestágenos y ésteres de estradiol hace más fácil la ablación de la dominancia o el surgimiento simultáneo de un grupo folicular, garantizando que el tratamiento con FSH coincida con el momento en que hay mayor competencia celular. Como la vida media de la FSH es corta (5 horas para los bovinos), se tiene que administrar en forma decreciente cada 12 horas a lo largo de un lapso de 4 días. Este régimen busca emular la pulsatilidad endógena y prevenir riesgos de sobreestimulación, los cuales podrían comprometer la captura del ovocito o derivar en la anovulación de folículos persistentes (189).

Técnicas de recolección y recuperación (Flushing)

La recogida de estructuras embrionarias se realiza normalmente entre el sexto y el octavo día después de la inseminación. Durante este periodo, el embrión ha terminado su paso por el oviducto hacia la luz del útero, llegando hasta los estadios de blastocisto o mórula. Para especies zootécnicas, como los caballos y el ganado bovino, el estándar clínico es la limpieza del útero no quirúrgica. Esta técnica supone la canalización cervical con una sonda de Foley de dos o tres vías; su colocación en la base del cuerno uterino se dirige y verifica a través de palpación transrectal (190).

El método de flushing utiliza una solución tampón de fosfato (PBS) que se complementa con albúmina sérica bovina (BSA), polímeros sintéticos y sustancias antimicrobianas para mantener los embriones en el medio acuoso. El inóculo se recupera a través de un flujo retrógrado que desemboca en un sistema de filtración especializado. Este filtro tiene una porosidad de 70 micras y, mientras retiene las estructuras embrionarias (191), permite filtrar el fluido. La eficiencia de este procedimiento es sumamente sensible a variables fisiológicas, debido a la excesiva tonicidad del miometrio o la viscosidad del moco cervical pueden obstruir el retorno del medio. Por ello, se necesita una manipulación atraumática que prevenga la síntesis de prostaglandinas proinflamatorias, las cuales comprometerían la integridad de los embriones y la viabilidad del entorno uterino.

Tras la recuperación, las estructuras se identifican mediante microscopía estereoscópica y categorizadas siguiendo los protocolos internacionales de la Sociedad Internacional de

Tecnologías Embrionarias (IETS). Esta tipificación representa el eje diagnóstico para la toma de decisiones clínicas, permitiendo decidir entre la transferencia inmediata en fresco, el sometimiento a procesos de criopreservación o el descarte definitivo de la estructura (192). Los dos parámetros principales, el estadio de desarrollo (numérico) y la calidad morfológica (alfabética), se observa en la figura 4.

Esta categorización tiene un carácter predictivo, los embriones de Grado 1 son más resistentes a la vitrificación y muestran índices de implantación por encima del 60% en receptoras que están bien sincronizadas. En cambio, la transferencia de embriones de Grado 3 generalmente se limita a las transferencias en fresco. Esto se debe a que su habilidad para reexpandirse después de ser descongelados es limitada, debido a la fragilidad de sus membranas celulares y el desequilibrio en sus bombas iónicas (192).

Figura 4. *Clasificación morfológica de embriones*

<p>Estadio de desarrollo</p> <ul style="list-style-type: none">• Se numera del 1 al 9, siendo los más comunes para transferencia el 4 (mórula), 5 (blastocisto temprano), 6 (blastocisto) y 7 (blastocisto expandido).
<p>Calidad morfológica</p> <ul style="list-style-type: none">• Grado 1 (Excelente/Bueno): Embrión simétrico, con blastómeros de tamaño uniforme, color y textura consistentes. Presenta menos del 10% de fragmentación celular.• Grado 2 (Regular): Presenta irregularidades moderadas en la masa celular interna o en el trofoblasto, con fragmentación de entre el 10% y el 30%.• Grado 3 (Pobre): Defectos severos en la morfología, masa celular interna escasamente definida y fragmentación del 30% al 50%. Su viabilidad post-transferencia es significativamente menor.• Grado 4 (Muerto o degenerado): Ovocitos no fecundados o embriones cuya estructura celular se ha colapsado

Nota: Adaptado de Iñamagua (193)

Métodos de transferencia en bovinos

La transferencia de embriones en el bovino ha progresado hacia la normalización de técnicas no quirúrgicas, basadas en el entendimiento exacto de la comunicación endocrina entre el embrión y la madre. La aptitud de la hembra receptora para crear un microambiente uterino que apoye el desarrollo embrionario temprano y el reconocimiento materno de la gestación, no solo la calidad del embrión recuperado, determina si la técnica es exitosa (194).

Ahora bien, para que un embrión se implante, es fundamental que la edad del embrión (días después de la fecundación) esté sincronizada con el estado lúteo de la madre receptora. Aunque

esta ventana de transferencia normalmente admite un margen de error de ± 24 horas, se logran los mejores resultados cuando el día del ciclo estral de la receptora coincide exactamente con la edad del embrión (normalmente en el día 7) (194).

Técnica de transferencia

El procedimiento de transferencia se lleva a cabo por vía transcervical, usando un aplicador o pistolete que tiene una pajuela con el embrión. Es importante aplicar una anestesia epidural caudal (lidocaína al 2%) para reducir el estrés y evitar las contracciones uterinas que se generan por la manipulación rectal. Esto simplifica la manipulación del cérvix, además que disminuye la liberación de oxitocina, lo que podría causar la expulsión del embrión o lesiones en el endometrio (194).

Después de atravesar el cérvix, el aplicador se orienta hacia el cuerno uterino que está del mismo lado que el ovario donde se encuentra el cuerpo lúteo (CL). La colocación del embrión debe hacerse con mucho cuidado en el tercio superior del cuerno (punta del cuerno). Esta aproximación ipsilateral es crítica ya que la señalización del interferón- tau (μ -IFN), que es secretado por el trofoblasto del embrión, tiene que tener un efecto paracrino en el endometrio cercano para suprimir la producción pulsátil de prostaglandina $F2\alpha$ ($PGF2\alpha$). De esta manera, se previene la luteólisis y se garantiza que la preñez continúe (194).

En este contexto, es necesario que el endometrio permanezca intacto en el lugar de deposición. Si se produce un traumatismo mecánico durante el paso del pistolete, provoca una reacción inflamatoria (endometritis iatrogénica) que modifica el pH del líquido uterino y pone en marcha la migración de polimorfonucleares, lo cual conlleva a la muerte del embrión. Por tal motivo, se aconseja utilizar catéteres de transferencia con punta protegida o envainada en animales que tienen un cérvix tortuoso o que son difíciles de manipular.

Hay que tener en cuenta, que, si se produce un traumatismo mecánico durante el paso del pistolete, provoca una reacción inflamatoria (endometritis iatrogénica) que modifica el pH del líquido uterino y pone en marcha la migración de polimorfonucleares, lo cual conlleva a la muerte del embrión. Es por esta razón que la integridad del endometrio en el sitio de deposición es vital. En tal sentido, se aconseja utilizar catéteres de transferencia con punta protegida o envainada en animales que tienen un cérvix tortuoso o que son difíciles de manipular.

La eficacia de la transferencia embrionaria en el ganado bovino depende de la administración estricta de factores críticos que combinan la destreza técnica y el estado fisiológico del recep-

tor. Para asegurar una sincronía adecuada del interferón-tau y que la madre reconozca con éxito el embarazo, es preciso controlar elementos como la sincronía lútea y la exactitud en la colocación del embrión. En la tabla 21 se presentan los parámetros que regulan este proceso.

Tabla 21. Factores que intervienen en la eficiencia de la transferencia de embriones bovinos

Variable técnica	Requerimiento óptimo	Impacto fisiológico
Sincronía receptora-embrión	± 24 horas	Alineación del diálogo embrión-endometrio
Localización del CL	Ipsilateral a la deposición	Bloqueo efectivo de la luteólisis paracrina
Diámetro del CL	> 17 - 20 mm	Garantía de niveles de Progesterona (P4) suficientes (>3 ng/mL)
Trauma endometrial	Nulo (Punta protegida)	Evita la síntesis de PGF _{2α} y falla de preñez
Sitio de deposición	Tercio craneal del cuerno	Optimización del microambiente para la nidación

Nota: Adaptado de Flórez (195)

Aplicación en otras especies zootécnicas

A pesar de que el protocolo bovino representa el modelo a seguir, la transferencia de embriones, ésta ha sido adaptada para ajustarse a las particularidades anatomo-fisiológicas de otras especies, las cuales tienen retos biológicos únicos.

En la especie equina, transferencia de embriones es un recurso para conseguir que las hembras tengan descendencia en competiciones deportivas. La yegua, a diferencia de los rumiantes, no responde adecuadamente a los protocolos de superovulación (SOP), lo que normalmente resulta en la recuperación de un único embrión por ciclo (196). Por lo que es un aspecto significativo que el embrión sea recuperado antes del día 9, dado que a partir de este momento comienza a crecer considerablemente y también se le forma una cápsula glicoproteica, lo cual complica su manipulación y criopreservación.

En las cabras y ovejas, la limitación técnica se debe principalmente a la estructura tortuosa del cérvix, lo cual requiere que tanto para la deposición embrionaria como para la recuperación

se utilicen métodos laparoscópicos o quirúrgicos. La transferencia de embriones es un elemento necesario para la difusión de germoplasma de razas especializadas y la conservación de recursos zoogenéticos nativos en este campo (197).

En la especie porcina, en cambio, la transferencia de embriones presenta un alto grado de complejidad debido a que los embriones son muy sensibles a las variaciones de temperatura, lo cual está relacionado con una elevada densidad lipídica citoplasmática. Además, la eficacia del procedimiento depende de la transferencia de un inóculo en gran cantidad (al menos 12-15 estructuras), condición necesaria para provocar el reconocimiento materno de la gestación (198). Para contrarrestar el mecanismo luteolítico de la hembra, este proceso depende de la secreción luminal de estrógenos embrionarios.

Indicadores de desempeño y eficiencia biotecnológica

Para evaluar un programa de transferencia de embriones, es preciso integrar sistemáticamente variables tanto diagnósticas como operativas. Más que la obtención inicial de estructuras, se cuantifica la viabilidad del protocolo a través de las tasas de preñez confirmada y los índices de partos. La eficiencia a nivel global se basa en tres parámetros:

- **Tasa de recuperación:** porcentaje que existe entre las estructuras embrionarias obtenidas y la cantidad de cuerpos lúteos (CL) hallados en la hembra donante.
- **Estatus morfológico:** la clasificación embrionaria determina la competencia biológica posterior a la transferencia; los embriones de Grado 1 y Grado 2 son los únicos que garantizan tasas de preñez viables desde el punto de vista comercial.
- **Competencia de la receptora:** para que la implantación tenga éxito, es básico contar con un cuerpo lúteo que tenga una capacidad esteroideogénica adecuada y un diámetro morfométrico funcional para poder sostener los niveles de progesterona (P4) necesarios para el soporte durante el embarazo.

Criopreservación y manejo de gametos

La criopreservación es una técnica biotecnológica para la detención reversible del metabolismo celular lo que hace posible conservar indefinidamente recursos genéticos utilizando temperaturas criogénicas (-196°C en nitrógeno líquido). Dentro del campo de la producción animal, este procedimiento funciona como un vector estratégico para diseminar material de gran valor, proteger razas en peligro y disminuir los intervalos entre generaciones.

La viabilidad del biosistema en este estado se fundamenta en la vitrificación del solvente intracelular, proceso que previene la nucleación de cristales de hielo y protege la ultraestructura de membranas y organelas (199). Por lo que, la manipulación de gametos y embriones demanda un dominio estricto de la criobiología (rama de la biología que estudia los efectos producidos por las bajas temperaturas en células, tejidos, órganos y organismos de seres vivo) particularmente en lo referente a la cinética de permeabilidad y la homeostasis osmótica. La efectividad de la técnica se fundamenta en la integridad morfológica después de la descongelación y determinar la capacidad funcional y el restablecimiento del funcionamiento fisiológico después de interactuar con agentes crioprotectores (CPAs), que son los que regulan las propiedades coligativas y disminuyen la toxicidad térmica en las células (199).

Técnicas de congelación de ovocitos y embriones

La criopreservación de células y complejos multicelulares, como los ovocitos y los embriones, que tienen un gran tamaño volumétrico y un alto contenido lipídico, está sujeta a una estricta regulación de la cinética del flujo de agua a través de la membrana. La conservación de estas estructuras en la biotecnología aplicada a especies zootécnicas se basa en dos paradigmas que son termodinámicamente opuestos: la vitrificación y la congelación convencional. Estas técnicas tienen un enfoque muy distinto para evitar el daño criogénico.

Congelación lenta (Equilibrio)

La congelación lenta o por equilibrio se basa en un enfriamiento programado (normalmente de 0.3 a 0.5 °C/min). Su fundamento biofísico es la deshidratación celular progresiva, la cual ocurre debido al aumento de la osmolaridad extracelular después de la nucleación del disolvente. En esta etapa, crioprotectores que son permeables, como el glicerol o el etilenglicol, se propagan hacia la parte intracelular, reemplazando el agua libre con el fin de bajar la temperatura de congelación y dar estabilidad estructural a la bicapa lipídica (200).

Las ventajas de esta metodología se distinguen por optimizar la seguridad celular, ya que se estipula que los niveles de CPA estén entre 1.0 y 1.5 M; esto evita que haya daños metabólicos debido a la toxicidad de solutos. Mientras que su principal limitación se asocia a la necesidad de contar con infraestructura criogénica programable y el riesgo inherente de daño mecánico supeditado a la formación de hielo en el espacio extracelular, factor que compromete la integridad física de las células (199).

Vitrificación (No equilibrio)

La vitrificación representa un avance disruptivo en la criobiología de ovocitos, estructuras cuya extrema termosensibilidad demanda métodos que prescindan de la cristalización (201). El procedimiento provoca un cambio de fase hacia una condición sólida no cristalina, que se consigue mediante la saturación con CPAs a concentraciones del 30-40% y velocidades de descenso térmico por encima de los 10,000° C/min (199). La aplicación de esta metodología en embriones con elevado contenido lipídico, característicos de las especies equina y porcina, depende críticamente de la arquitectura de los dispositivos de soporte.

Herramientas como el Cryotop o las pajuelas abiertas optimizan el intercambio térmico gracias a su escasa masa volumétrica, lo que asegura que el solvente intracelular llegue a la vitrificación sin poner en riesgo la viabilidad de las organelas delicadas a los lípidos (199).

Para la selección de metodología de criopreservación, se necesita un análisis cuidadoso de las variables biofísicas y los requerimientos fisiológicos de cada muestra. Un paradigma se basa en la regulación cinética del descenso térmico para lograr un equilibrio osmótico, mientras que el otro confía en la modificación de la viscosidad del medio con el fin de provocar una transición hacia una fase sólida no cristalina. En la tabla 22 se resumen las diferencias técnicas esenciales entre la vitrificación y la congelación convencional, proporcionando una comparación de su composición química, necesidades tecnológicas y aplicabilidad en función de la sensibilidad celular de las especies zootécnicas relevantes.

Tabla 22. Técnica de congelación lenta y vitrificación

Parámetro	Congelación lenta	Vitrificación
Concentración de CPA	Baja (1.0 - 2.0 M)	Alta (5.0 - 8.0 M)
Riesgo de cristalización	Elevado (Intra y extracelular)	Nulo (Estado vítreo)
Tiempo de ejecución	2 a 3 horas	Minutos
Equipamiento	Congelador programable requerido	Manual / Soportes mínimos
Especies preferentes	Bovinos (embriones in vivo)	Porcinos, Equinos, Ovocitos

Nota: Adaptado de Herrán (199)

La criobiología del óvulo: un desafío específico

El ovocito presenta retos técnicos más complejos que el embrión debido a su intrínseca inestabilidad estructural. El huso meiótico, que es parte de la arquitectura del citoesqueleto,

muestra una vulnerabilidad grave a los cambios de temperatura. Si se despolimeriza, puede provocar segregaciones cromosómicas inadecuadas y, por ende, aneuploidías después de la fecundación. Además, el enfriamiento criogénico suele provocar que los gránulos corticales sufran exocitosis (proceso mediante el cual la célula expulsa sustancias) al exterior antes de tiempo, lo que causa que la zona pelúcida se endurezca (202). Esta modificación de la matriz extracelular obstaculiza la penetración espermática convencional, lo que hace necesaria la Inyección Intracitoplasmática de Espermatozoides (ICSI) para garantizar que el proceso sea viable en diferentes especies zootécnicas.

Bancos de germoplasma animal

Las infraestructuras especializadas que se crean para proteger colecciones biológicas ex situ y que tienen como objetivo la preservación de la biodiversidad relacionada con la producción agroalimentaria se conocen como bancos de germoplasma animal. Estas unidades aseguran la viabilidad fenotípica y genotípica del material almacenado a través de protocolos de gestión técnica avanzada, lo cual representa un activo científico esencial para el fortalecimiento de la seguridad alimentaria y la investigación genómica. Su funcionalidad permite que se fortalezcan las líneas animales que se caracterizan por su resistencia, rusticidad y eficiencia en términos de producción (203). Funciona como una defensa contra la erosión genética que proviene de incorporar germoplasma extranjero, de alterar los sistemas de producción o del incremento en la población. Estos lugares protegen el patrimonio biológico ante amenazas de gran magnitud, como las enfermedades transfronterizas y los fenómenos climáticos extremos, garantizando que la reserva genética necesaria para la adaptación futura de la ganadería permanezca inalterada.

La administración de un banco de germoplasma conforme a las normas de la FAO (204), se basa en tres ejes principales, rastreo completo de los documentos, la viabilidad biológica prospectiva y la integridad estructural de las muestras. Desde un punto de vista estructural, el acervo se divide en dos categorías:

- **Colecciones activas:** cuyo objetivo es el movimiento dinámico de materiales para investigación y programas de mejora (205).
- **Colecciones de base:** cuyo propósito es la custodia permanente de la diversidad genética con protocolos de acceso limitado (205).

La introducción de sistemas de telemetría y tecnologías RFID para la supervisión de niveles criogénicos ha disminuido considerablemente los errores en las operaciones. No obstante,

existe el reto de la estabilidad epigenética (mecanismos moleculares que regulan la expresión génica sin modificar la secuencia de nucleótidos del ADN); los datos más recientes indican que una criopreservación por un tiempo largo puede cambiar los perfiles de metilación del ADN, lo cual exige llevar a cabo auditorías biológicas regulares para asegurar que el potencial genético guardado sea fiel (205).

Protocolos de descongelación y viabilidad

El proceso de descongelación es otra etapa para la supervivencia celular. En esta etapa, el fenómeno de la recristalización se presenta como la mayor amenaza en términos biofísicos, pues, un aumento de temperatura no óptimo o demasiado latente posibilita que los núcleos de hielo residuales se fusionen, lo que conduce a la creación de macrocristales. Estos tienen la habilidad mecánica de desgarrar la ultraestructura de las membranas internas y los orgánulos del citoplasma cuando se expanden, lo que pone en peligro la viabilidad del biosistema de manera irreversible (206).

Cinética de rehidratación

En embriones que han sido sometidos a congelación lenta, la cinética de rehidratación empieza por un choque térmico controlado en baño maría a 37 °C (durante 10 a 20 segundos), después se quita el crioprotector (CPA) de manera gradual. Este procedimiento es crucial para controlar la presión osmótica; si se realiza una transferencia directa a un medio isotónico, se produciría una corriente de agua masiva y repentina a través de la membrana celular, lo que causaría una lisis celular debido a un aumento del volumen sin control. En cuanto a la vitrificación, el éxito del procedimiento se basa en una desvitrificación ultrarrápida (más de 20.000° C/min) (207). Para que el estado vítreo no sufra la nucleación de cristales de hielo antes de llegar a la fase líquida, es imprescindible esta cinética acelerada para atravesar la zona con temperatura crítica.

Evaluación de la viabilidad post-descongelación

La eficacia de los protocolos de criopreservación se cuantifica a través de una rigurosa evaluación post-descongelación. La morfología descriptiva se concentra en la arquitectura celular y examina la compactación del embrioblasto, así como la falta de fragmentación o vacuolización en el espacio perivitelino. Se utilizan, en el área funcional, evaluaciones de actividad enzimática y exclusión (por ejemplo, la prueba de FDA) (207) que corroboran el funcionamiento del metabolismo mitocondrial y el sistema de membranas. Sin embargo, el parámetro crucial para elegir los embriones que se van a transferir es la competencia de reexpansión. La facultad

del embrión de restablecer la presión hidrostática en su cavidad blastocélica en un periodo de 2 a 4 horas después del procedimiento representa el estándar dorado para anticipar si va a tener éxito la gestación.

Aplicaciones en conservación genética

La criopreservación de biosistemas germinales es una estrategia de custodia contra la erosión de la variabilidad genómica. En el ámbito de la zootecnia moderna, la administración de recursos genéticos no trata solo de conservar taxones en peligro, pues se establece como la conservación de linajes superiores que poseen determinantes genéticos para resistir a enfermedades tropicales y una eficiencia metabólica mejorada. Esta perspectiva asegura que existan alelos esenciales para que las poblaciones de animales se adapten a nuevos retos bióticos y abióticos, garantizando la persistencia de los programas de selección bajo criterios sostenibles (208).

Rescate de Recursos Zoogenéticos (RZG)

La creación de bio-repositorios criogénicos, que posibilitan la recuperación de las poblaciones fundadoras a partir del germoplasma conservado, es la manera en que se lleva a cabo el rescate de los Recursos Zoogenéticos (RZG). La transferencia de embriones criopreservados es una de las estrategias más relevantes (209) para disminuir la deriva genética en taxones con censos críticos y aumentar el tamaño efectivo de la población (N_e). Esta táctica facilita la expansión del patrimonio genético sin tener que mover animales vivos, lo cual mejora la eficiencia logística y evita los riesgos epidemiológicos típicos de trasladar ganado a través de fronteras.

Integración en programas de selección genómica

La convergencia entre la criobiología y la arquitectura genómica ha redefinido los paradigmas de la mejora zootécnica. La combinación de la vitrificación con la biopsia embrionaria en estadios de blastocisto posibilita en la actualidad que el desarrollo se detenga mientras se lleva a cabo la secuenciación del ADN. Esta técnica permite elegir embriones exclusivamente en función de perfiles de polimorfismos de nucleótido simple (SNPs) relacionados con características altamente heredables, como la composición tisular del canal o el rendimiento lácteo (210). Esta estrategia, llamada diagnóstico genético preimplantacional (PGT), mejora la presión de selección, disminuye significativamente el intervalo entre generaciones y favorece el avance genético acumulativo.

Manejo técnico y bioseguridad en el almacenamiento

Los protocolos de bioseguridad que incluyan la potencial permanencia de patógenos en el nitrógeno líquido se requiere gestionar técnicamente los bancos de germoplasma. La prevención de la contaminación cruzada se lleva a cabo en la actualidad mediante sistemas de vitrificación cerrada y la instauración de lapsos de cuarentena biológica para las muestras que ingresan. La preservación rigurosa de la cadena de frío por debajo de la isoterma de transición vítrea (alrededor de $-130\text{ }^{\circ}\text{C}$) es un elemento necesario en la integridad del material (207). Cualquier excursión térmica que supere este valor crítico provoca una transición de fase, lo que posibilita la reorganización de las moléculas y el daño a los tejidos, lo cual pone en riesgo la estabilidad del espécimen a largo plazo.

Sincronización de celos

La implementación de la IATF y la optimización de los ciclos productivos son posibles gracias a la supervisión del ciclo estral y de la ovulación, la cual representa una herramienta estratégica cuyo impacto supera la logística básica. El control farmacológico del eje hipotálamo-hipófisis-gonadal es la base del éxito operativo de estas biotecnologías. Con esta acción, se puede guiar la dinámica folicular para lograr una condición fisiológica homogénea en un grupo de animales, lo cual asegura que el evento reproductivo sea predecible.

Métodos hormonales de sincronización

Los protocolos de sincronización funcionan a través de dos vías: la vía folicular, que se ocupa del desarrollo del folículo dominante, y la vía luteolítica, que está enfocada en hacer que el cuerpo lúteo retroceda. La integración de estos procedimientos tiene como objetivo simular el reinicio del periodo proestral del ciclo, creando las condiciones requeridas para que la ovulación sea sincrónica y efectiva.

Regulación de la fase lútea mediante Prostaglandinas

Para manejar el ciclo estral, es indispensable tener control exógeno del cuerpo lúteo a través de $\text{PGF}_2\alpha$ y sus análogos. Su funcionamiento depende de la existencia de un CL maduro, lo que limita su periodo de eficacia en los bovinos a las dos semanas que van desde el día 5 hasta el día 17 (211). Cuando la luteólisis es inducida, la disminución de P_4 provoca que se secreten GnRH en pulsos, lo que a su vez activa la etapa terminal folicular. La ventana de 2 a 5 días para la aparición del celo, que depende del desarrollo folicular previo, es la principal restricción de este método. Con el fin de reducir esta variabilidad, se han unificado los protocolos para

la doble dosis con un espacio entre ellas de 11-14 días, lo que aumenta la posibilidad de que todas las hembras tengan un tejido lúteo susceptible a ser lisado (212).

Control folicular y ovulatorio: El papel de la GnRH

La aplicación de GnRH en biotecnologías reproductivas posibilita la estandarización del comienzo de las ondas foliculares a través de la inducción de un pico de LH. Este pico causa que ocurra la ovulación o luteinización del folículo dominante. Cuando se elimina el efecto de ese folículo, una nueva cohorte puede aparecer en un plazo de 48 horas. El eje del control neuroendocrino es el protocolo Ovsynch, el cual es el siguiente: la primera inyección de GnRH restablece la dinámica folicular, la inyección de PGF₂α destruye el cuerpo lúteo y la última inyección de GnRH asegura una ovulación programada y exacta (213).

Progestágenos y dispositivos intravaginales

La regulación del ciclo a través de progestágenos radica en crear una fase lútea artificial que bloquea el pico preovulatorio de LH, conservando así el sistema en un estado temporal de quiescencia ovulatoria. Esta biotecnología se distingue por su habilidad para provocar la ciclicidad en hembras que no son cíclicas, al funcionar como un cebador del eje reproductivo (214). La fase folicular se inicia cuando el dispositivo es retirado, ya que se produce una súbita falta de progesterona. Con el fin de optimizar la precisión, estos esquemas incorporan sales de estradiol, que estandarizan la aparición de la nueva onda folicular y mejoran los índices de sincronización de la ovulación final.

Inducción de la ovulación con Gonadotropinas (eCG)

La Gonadotropina Coriónica Equina (eCG) es otro componente relevante en los protocolos biotecnológicos que se utilizan en sistemas de producción extensiva o en áreas tropicales, donde existe una alta probabilidad de escasez de nutrientes. La eCG, por su prolongada vida media y su doble capacidad bioactiva (parecida a LH y FSH), mejora la tasa de ovulación y favorece el desarrollo del folículo dominante (215). Esta intervención estimula la ovulación, pero, además, aumenta el tamaño del cuerpo lúteo subsecuente, lo que a su vez eleva la producción de progesterona endógena, sustancia fundamental para la viabilidad del embarazo en sus etapas tempranas.

Protocolos en bovinos y pequeños rumiantes

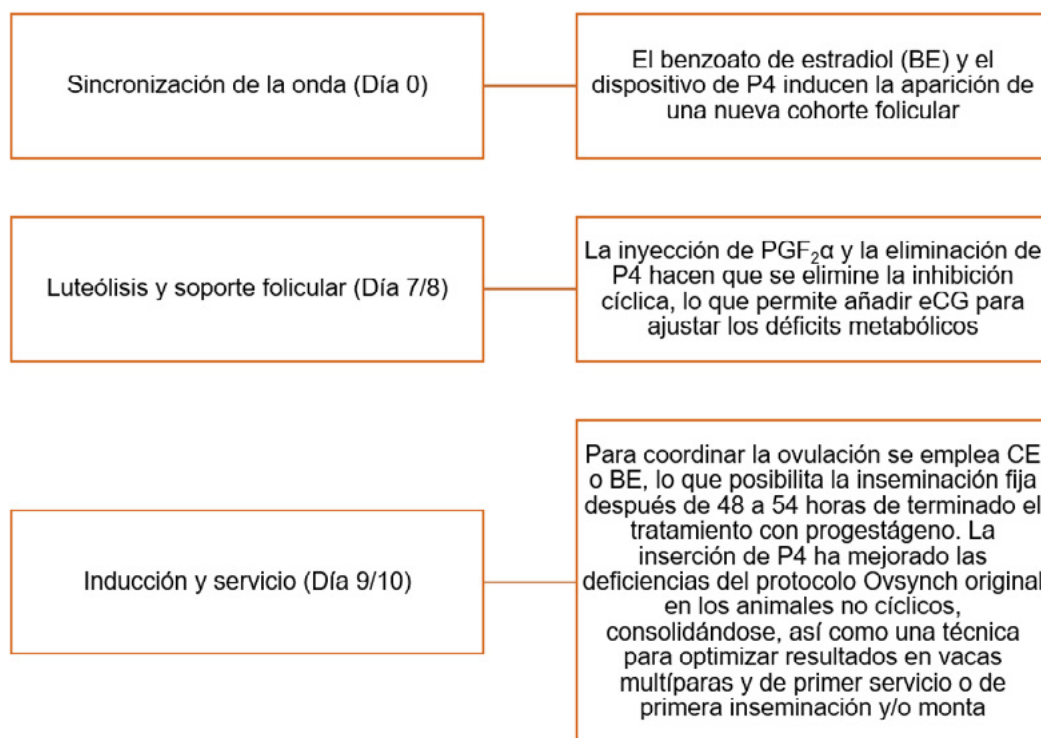
La implementación de biotecnologías hormonales en especies zootécnicas ha evolucionado desde métodos elementales para identificar el estro hasta la sincronización periódica de la

ovulación. Esta modificación de paradigma hacia la IATF es impulsada por la urgencia de optimizar el desempeño reproductivo y genético en los rumiantes. El éxito de esta transición se basa en la capacidad de los protocolos modernos para sincronizar el inicio de la onda folicular y el pico de LH. Esto elimina la incertidumbre del diagnóstico manual y garantiza que la inseminación ocurra en el momento fisiológico con mayor receptividad.

Protocolos en bovinos: El estándar de la IATF

El manejo de la reproducción bovina contemporánea se basa en el uso de P4 y estradiol para controlar la dinámica folicular. El modelo predominante se divide en etapas críticas (figura 5).

Figura 5. Esquema de protocolo de IATF en bovinos



Nota: Adaptado de Guillén et al (216)

Protocolos en pequeños rumiantes: desafíos de la estacionalidad

Los protocolos, por la estacionalidad de los pequeños rumiantes, tienen como objetivo tanto inducir el celo en periodos anéstricos como sincronizar la época de cría, por ende, se estructuran a partir de tres ejes:

- **Control de la estacionalidad:** intervenciones concebidas con el propósito de neutralizar el impacto que tiene el fotoperiodo en el eje hipotalámico.

- **Optimización de progestágenos:** pasar de protocolos largos a esquemas cortos (5-7 días) para mejorar la salud de la vagina y la calidad del entorno uterino.
- **Estimulación biopsicosocial:** aplicación del efecto macho como un estimulador de LH, lo cual hace posible disminuir la carga hormonal exógena cuando se combina con progesterona previa. En caprinos, en particular, la dependencia del cuerpo lúteo durante el embarazo establece un patrón técnico, la administración de PGF2 α es obligatoria para asegurar una luteólisis eficaz, sin importar en qué fase del ciclo estral se comience el protocolo.

La validación científica de estas estrategias resalta que, bajo condiciones reproductivas, los métodos biotécnicos, como el efecto carnero y la estimulación nutricional, tienen una potencia similar a las gonadotropinas para inducir el estro. Además, en la actualidad es posible un manejo eficiente de ovejas de pelo gracias a que se han perfeccionado los protocolos basados en la sinergia entre prostaglandinas y GnRH, lo que permite la eliminación de progestágenos exógenos en algunos casos (217), (218).

Aplicación en porcinos y equinos

En los cerdos y en los caballos, la fisiología del ciclo requiere tácticas distintas a las de los rumiantes, debido a que el control lúteo no es el eje central. Las estrategias se enfocan principalmente en la administración de la fase folicular y en predecir con precisión el instante de ovulación.

Sincronización en porcinos

En el sector porcino, el destete actúa como un mecanismo fisiológico que propicia la aparición del celo en un periodo de 4 a 7 días y en el uso estratégico de hormonas para la gestión de reemplazos, tal como se indican a continuación:

- **Control de nulíparas:** Al suministrar Altrenogest por vía oral durante 18 días, se produce un estro predecible (de 5 a 8 días después del tratamiento) (219), lo que posibilita la sincronización cronológica de las primerizas con el resto del hato.
- **Optimización en múltiparas:** La utilización de eCG después del destete promueve la actividad folicular, lo que disminuye el tiempo de recuperación al celo en circunstancias ambientales desfavorable (219).
- **Sincronización de la ovulación:** La ovulación puede concentrarse, lo que hace más sencillo el paso hacia protocolos de inseminación única, si se emplean inductores

como la triptorelina o Gonadotropina Coriónica Humana (hCG) (219). Esas intervenciones son necesarias para conservar la continuidad de las bandas de producción y para optimizar la eficacia reproductiva total del sistema.

Particularidades en equinos: predicción y control de la ovulación

La yegua, por ser poliéstrica estacional y tener una fase estral que dura de 5 a 7 días, requiere de métodos reproductivos especializados. El manejo biotecnológico en equinos se enfoca en controlar de manera temporal el ciclo estral mediante dos fases clave:

- **Sincronización del estro:** aplicada a través de PGF2 α , es eficaz solo si hay un cuerpo lúteo con madurez fisiológica (día 5 después de la ovulación), lo que provoca que el celo regrese entre 2 y 4 días (220).
- **Inducción de la ovulación:** encaminada a reducir el período de fertilidad. La ruptura folicular se produce, cuando hay un folículo de 35 mm y un edema uterino grado 2, entre las 36 y las 48 horas después de la administración de análogos de GnRH o hCG. Con el fin de racionalizar la utilización de material genético valioso y garantizar que la inseminación tenga lugar durante el periodo de mayor viabilidad del ovocito, estas herramientas son fundamentales para la medicina equina actual (220).

Impacto en programas de inseminación

La incorporación de métodos de inseminación artificial a tiempo fijo (IATF) y protocolos de sincronización ha transformado la eficacia biológica y la rentabilidad de las unidades productivas. El rendimiento de estas biotecnologías se evalúa a través de índices de productividad superando aquella visión solo de la tasa de concepción (221).

- **Seguridad reproductiva:** Al eliminar el obstáculo que supone la detección visual de celos, se logra un aumento en la tasa de preñez al principio de la temporada.
- **Control cronológico:** Reducir el tiempo entre partos y la cantidad de días abiertos, lo que incrementa la productividad de las hembras en el sistema, especialmente en las lecherías especializadas.
- **Difusión genética:** La monta natural haría muy difícil el uso de sementales probados por inseminación artificial en sistemas extensivos, lo que permitiría un avance significativo en la calidad de la descendencia. En términos generales, la gestión reproductiva basada en programación y precisión hace que la competitividad de la compañía ganadera aumente.

Fertilización in vitro y producción de embriones

La fertilización in vitro es el progreso más revolucionario en comparación con la transferencia de embriones convencional. A diferencia de los métodos in vivo, que dependen de la respuesta irregular a la superovulación para ser eficaces, la fertilización in vitro estandariza tanto la fecundación como el desarrollo embrionario inicial en condiciones de laboratorio muy controladas. Esta biotecnología supera indudablemente la replicación, posibilitando que se recupere el mérito genético en hembras con problemas reproductivos, prepúberes o gestantes. Además, optimiza la eficiencia seminal al posibilitar que una sola dosis de alto valor pueda fertilizar ovocitos de diferentes procedencias. La matriz tecnológica para la edición genómica y el diagnóstico genético preimplantacional es, hoy en día, la fertilización in vitro, la cual se sitúa a la vanguardia de la optimización animal.

Principios y procedimientos básicos

La producción de embriones in vitro se organiza en tres fases críticas y sucesivas que tratan de replicar el microambiente del tracto reproductivo femenino. El éxito de esta biotecnología está supeditado a la sincronización entre el desarrollo del ovocito, la capacitación del espermatozoide y el apoyo metabólico en las primeras etapas.

Maduración *in vitro*: dinámica de la competencia ovocitaria

La fase en la que el ovocito adquiere la capacidad necesaria para ser fecundado y para que el embrión sea viable es conocida como maduración. Este fenómeno se presenta en dos niveles que se complementan: la maduración nuclear, que incluye la progresión meiótica desde la vesícula germinal hasta la Metafase II (MII), lo cual conlleva a la eliminación del primer cuerpo polar; y la maduración citoplasmática, que se distingue por una reestructuración de las organelas y por la producción de precursores como el glutatión, fundamental para descondensar el espermatozoide (222). La capacidad de estas células está relacionada con su origen folicular; los folículos que tienen un diámetro entre 3 y 8 mm son los que suministran ovocitos con el mayor potencial para evolucionar hacia la etapa de blastocisto.

Fecundación *in vitro* y dinámica de la capacitación espermática

La fase de capacitación espermática, la cual se lleva a cabo en el laboratorio mediante soluciones enriquecidas con heparina, es necesaria para realizar la fecundación in vitro. El procedimiento se fundamenta en los siguientes pilares técnicos.

- **Modificación de membrana:** la heparina provoca que el colesterol salga y el calcio entre, lo cual activa la hiperactivación del espermatozoide (223).
- **Penetración de la zona pelúcida:** la movilidad hiperactivada posibilita la entrada al ovocito a través de la reacción acrosómica (223).
- **Control de la carga seminal:** para reducir la polispermia, la medida estándar es ajustar a 1×10^6 espermatozoides/ml. En especies como el cerdo, donde los mecanismos de bloqueo de la poliespermia no funcionan correctamente, esta precisión es crucial; esto supone uno de los retos más grandes para producir embriones de manera eficaz (223).

Cultivo in vitro

Después de la creación del cigoto, se comienza a cultivar en medios que contienen sustratos energéticos como lactato, glucosa, piruvato y aminoácidos.

Este proceso se lleva a cabo en una atmósfera controlada (con un 5% de O_2 y un 5% de CO_2) que fue diseñada para reducir el estrés oxidativo. En este periodo, el embrión experimenta las primeras divisiones celulares o clivajes y se enfrenta a la crucial "interrupción del desarrollo", que se relaciona con la activación del genoma embrionario entre las 8 y 16 células en los bovinos (224). El procedimiento concluye con éxito con la creación del blastocisto en torno al séptimo día de cultivo, cuando el embrión llega a su madurez para ser transferido o criopreservado.

Producción de embriones in vitro en bovinos

La fertilización in vitro y la transferencia de embriones en bovinos tienen más éxito que en otras especies de interés zootécnico debido hay dos factores, como lo son la estandarización de criterios técnicos al manejar y aspirar ovocitos, y las propiedades biológicas del embrión bovino (225). Este último tiene una elevada tolerancia al estrés que resulta del cultivo fuera del tracto reproductivo, lo que hace más fácil su manejo y escalabilidad comercial.

Técnicas de recolección: OPU frente a ovarios de matadero

Para recuperar los complejos cúmulo-ovocito (COCs), estructuras esenciales en las que las células del cúmulo proporcionan al gameto femenino el soporte metabólico requerido, hay dos estrategias principales como se observan en la figura 6:

Figura 6. *Técnicas de recolección de ovocitos en bovinos*

Aspiración folicular transvaginal con guía de ecografía (OPU)	Aspiración de ovarios de matanza
<ul style="list-style-type: none">•Es el procedimiento preferido para los donantes con un alto valor genético. Posibilita la recolección de ovocitos de vacas vivas, aun en el primer trimestre del embarazo o en animales prepúberes. La técnica permite una repetición sobresaliente, haciéndose cada quince días, lo que maximiza la producción de embriones por donante al año	<ul style="list-style-type: none">•Principalmente empleada para la investigación, la producción a gran escala de bajo costo o la recuperación de material genético de hembras sacrificadas. Aunque posibilita la obtención de un alto número de COCs, la calidad es menos homogénea por no existir control sobre el estado fisiológico de la donante

Nota: Adaptado de Quispe et al (226)

Sistemas de cultivo y medios secuenciales

La biotecnología ha creado dos métodos de cultivo porque las necesidades metabólicas del embrión varían a lo largo de su desarrollo. Para imitar el movimiento natural del sistema reproductivo, los medios secuenciales modifican su composición química para estar en línea con las etapas de clivaje (del día 1 al 4) y la creación del blastocisto (del día 5 al 7) (227). Por otro lado, los sistemas de un solo paso tienen como base el uso selectivo de nutrientes por el embrión en un medio enriquecido. La preservación de la homeostasis es el principal beneficio de este sistema, porque con él se impide el estrés que proviene del paso de los embriones a nuevas placas, lo cual asegura condiciones estables (227).

Dinámica morfo-cinética y criterios de selección del embrión bovino

Es importante comprender la cronología del desarrollo in vitro para garantizar el éxito en la reproducción. El primer clivaje tiene lugar entre 24 y 30 horas después de la fecundación, dando inicio al proceso. Durante la activación de su genoma, el embrión pasa por un bloqueo del desarrollo potencial entre las etapas de 8 y 16 células (210). Si el embrión es competente, se convertirá en una mórula compacta al día 5 y luego en un blastocisto al día 7. La categorización cualitativa se basa en las pautas globales de la IETS, que clasifica los embriones según su morfología y simetría (228). Para los programas de transferencia o criopreservación avanzada, solo se recomiendan los grados 1 y 2.

Implementación de semen sexado en programas de FIV

La integración del semen sexado en los procedimientos de fecundación in vitro ha cambiado los métodos de elección en las explotaciones ganaderas lecheras. En la inseminación artificial

convencional, el empleo de dosis sexadas se relaciona con una fertilidad baja a causa de la escasa concentración de espermatozoides y del deterioro celular que implica el proceso de sexado (210). Sin embargo, la FIV mejora este recurso porque solo necesita una cantidad mínima de espermatozoides por ovocito. Esta ventaja posibilita la producción de descendencia de un solo sexo, con niveles de eficacia técnica que se asemejan a los logrados utilizando semen convencional.

Avances en otras especies zootécnicas

Suponer que los protocolos biotecnológicos son universales es un error conceptual. Existen elementos que dificultan la transferencia de procedimientos entre especies, como el contenido lipídico de los gametos (que modifica la resiliencia a nivel celular), la sensibilidad a las fluctuaciones en la temperatura y las rutas fisiológicas específicas de la fecundación. Estos elementos requieren estrategias particulares y para cada especie zootécnica.

Particularidades de la reproducción asistida en diversas especies de interés zootécnico

En la especie equina, la refractariedad del ovocito a la fecundación in vitro convencional, debido a la imperatividad de superar la barrera de la zona pelúcida, ha posicionado a la Inyección Intracitoplasmática de Espermatozoides (ICSI) como la única vía resolutive; técnica que optimiza el uso de plasma seminal de baja calidad o de sementales post-mortem (229).

El reto en el modelo porcino es la polispermia persistente, resultado de un error en el bloqueo cortical in vitro. Las estrategias actuales se centran en modificar el microambiente utilizando fluidos oviductales sintéticos y ajustando la carga de esperma.

En ovinos y caprinos, la técnica de elección es la aspiración folicular por laparoscopia (LOPU), cuyos resultados fluctúan según el fotoperiodo (estacionalidad) y la respuesta individual a la terapia con FSH.



CAPÍTULO IV

**BIOTECNOLOGÍAS REPRODUCTIVAS
EN MACHOS Y AVANCES GENÉTICOS**

CAPÍTULO IV.

BIOTECNOLOGÍAS REPRODUCTIVAS EN MACHOS Y AVANCES GENÉTICOS

Julio César Villacres Matías, Wilmer Wagner Alcívar Guadamud, Víctor Alvaro Tualombo Masabanda, Oscar Darwin Criollo Salinas, Debbie Shirley Chávez García, Jasmin Esmeralda Benítez Mora, Néstor Vicente Acosta Lozano y Jefferson Raúl Varas Aguillón.

En la zootecnia contemporánea, el enfoque de selección ha cambiado del fenotipo a la maximización del potencial biológico masculino, lo cual se ha establecido como el principal impulsor del flujo genético. Hoy en día, el potencial de aumentar el impacto de genotipos superiores está en la exactitud de las biotecnologías que se utilizan para manipular células germinales, lo cual supera las restricciones del apareamiento natural. La incorporación de disciplinas como la proteómica ha sustituido la visión tradicional sobre la fertilidad por una comprensión integral del genoma y la estructura espermática.

La biotecnología masculina contemporánea se enfoca en optimizar la resiliencia genómica y la cinética celular frente a los protocolos *ex vivo*, lo que posibilita el manejo de variables complejas como la resistencia al choque térmico y la integridad de la cromatina. Esta área interdisciplinaria requiere que el experto tenga un dominio de los métodos de transmisión genética altamente precisos, los cuales redefinen, a través de la intervención tecnológica en machos, las fronteras de la productividad y la preservación de la biodiversidad en el sector agropecuario.

Biotecnología seminal

La biotecnología seminal, considerada la base de la reproducción asistida, busca mantener la estabilidad a nivel genético y la viabilidad funcional del espermatozoides controlando el nicho extracelular. En el caso de las especies zootécnicas, la necesidad de comprender en detalle las interdependencias bioquímicas y la dinámica celular que se producen entre los agentes crioprotectores o diluyentes y las proteínas del plasma seminal es obligatoria cuando el eyaculado pasa a medios de soporte exógenos (230). Para garantizar que el potencial fertilizante no se vea alterado por las exigencias del procesamiento biotecnológico, es fundamental gestionar adecuadamente el microambiente.

Recolección y procesamiento de semen

En la conservación de la capacidad reproductiva, la obtención del material germinal representa el primer estadio crítico. En esta fase, el método de recolección incluye tanto los aspectos

logísticos como en establecer la firma bioquímica del eyaculado. En el caso de las especies bovina y equina, la aplicación de la vagina artificial (VA) es el patrón a seguir para imitar los índices térmicos y barométricos fisiológicos, lo cual mejora la densidad celular y limita la dilución por secreciones anexas innecesarias (231). Por el contrario, la electroeyaculación provoca una respuesta secretora glandular exacerbada, a pesar de ser útil en medicina de campo o en personas con problemas locomotores. Este fenómeno conduce a un aumento en el volumen seminal, pero con una densidad espermática disminuida y una osmolaridad modificada, elementos que ponen en peligro la estabilidad del plasma seminal (231).

Después de ser obtenido, el eyaculado atraviesa un cambio crítico marcado por estrés térmico y oxidativo inmediato. El protocolo de procesamiento inicial debe estar concebido para contrarrestar la peroxidación lipídica, un suceso al que el espermatozoide es inherentemente vulnerable por la densidad de ácidos grasos poliinsaturados en su estructura membranosa. En este momento, la biotecnología de diluyentes juega un papel significativo ya estos sistemas restringen la expansión volumétrica, pero además funcionan como matrices multifactoriales con el propósito de mantener la viabilidad celular frente al deterioro químico y ambiental (232).

- **Regulación del equilibrio ácido-base:** Para contrarrestar la oscilación del pH, es básico el uso de sistemas tampón altamente eficaces como el HEPES (ácido hidroxietil-piperazina-etanosulfónico), el TES (ácido N-tris-metil-2-aminoetano sulfónico) o el Tris (tris-hidroximetil-aminometano) (233). Estos agentes amortiguadores orgánicos compensan la acidificación del entorno que resulta de la formación de ácido láctico, un subproducto del metabolismo glucolítico interno del gameto.
- **Modulación de la presión osmótica:** Los glúcidos (fructosa, glucosa) desempeñan dos funciones: primero, como sustratos energéticos para la creación de ATP (adenosín trifosfato) por medio de la fosforilación oxidativa, garantizando de esta manera el movimiento flagelar; y segundo, como agentes osmóticos que preservan la tonicidad celular. Esto previene cambios peligrosos en el volumen, tales como la plasmólisis o el edema.
- **Preservación de la arquitectura de membrana:** La incorporación de LDL (lipoproteínas de baja densidad), ya sea a través de lecitinas vegetales de última generación o por medio de fracciones de vitelo aviar, es clave para estabilizar la bicapa lipídica. Estas macromoléculas se incorporan a la membrana espermática, disminuyendo el daño estructural que resulta del impacto térmico y la transición de fase de los fosfolípidos al bajar la temperatura.

La aplicación del método de dilución fraccionada ha mostrado una efectividad más alta para proteger el potencial de membrana mitocondrial, un indicador de la vitalidad celular. La disminución del choque osmótico se produce cuando se lleva a cabo una integración progresiva del diluyente, lo que hace más sencillo regular los canales iónicos y mantener la homeostasis de calcio intracelular (234). Cuando se rompe este balance iónico, se inicia un proceso de capacitación iatrogénica o criocapacitación, el cual anula el potencial fecundante del gameto antes de tiempo. Por lo tanto, la identificación de las características fisiológicas específicas de cada especie es un elemento determinante para el éxito de cualquier protocolo biotecnológico. La fase de recolección no es la única que se ve afectada por esta variabilidad metabólica, también determina la creación de medios de soporte que pueden reproducir el perfil bioquímico original, cuyos sustratos energéticos y valores de referencia se encuentran organizados en la tabla 23.

Tabla 23. *Parámetros fisiológicos y composición comparada del eyaculado en especies zootécnicas*

Espece	Volumen (ml)	Concentración (10 ⁶ cél/ml)	Principal sustrato energético	pH
Bovino	46300	800 - 2,000	Fructosa / Sorbitol	6.7 - 7.0
Equino	30 - 150	150 - 500	Ergotionina / Fructosa	7.2 - 7.6
Porcino	150 - 500	200 - 300	Inositol / Fructosa	7.2 - 7.5
Ovino	0.5 - 2	2,000 - 5,000	Fructosa	5.9 - 7.3

Nota: Adaptado de Allende y Arisnabarreta (234)

Criopreservación de semen en diferentes especies

El procedimiento de criopreservación representa la etapa más frágil en términos biofísicos cuando se trata del manejo del semen, lo que obliga al material biológico a pasar por una fase acuosa que produce una presión extrema tanto osmótica como mecánica. La regulación de la cinética del agua y la habilidad de los crioprotectores para estabilizar las membranas son factores que determinan si el espermatozoide sobrevive en este contexto (206). Por lo tanto, el protocolo es eficaz para controlar la curva de enfriamiento y para neutralizar los efectos nocivos relacionados con la creación de cristales de hielo dentro de las células y con la deshidratación osmótica.

Dinámica de la Criolesión y Crioprotección

La temperatura baja somete al espermatozoide a un estrés de fase, en el que la fluidez de la membrana plasmática se reduce significativamente entre los 5°C y los 15°C. Esta alteración de la conformación lipídica afecta tanto la integridad estructural como la homeostasis iónica (235). Dos grupos de compuestos forman la estrategia de crioprotección como se observa en la figura 7.

Figura 7. Clasificación de agentes crioprotectores según su permeabilidad celular y mecanismos de mitigación del daño térmico

Crioprotectores que son permeables (por ejemplo, glicerol, DMSO y etilenglicol)

- Moléculas de peso molecular bajo que reducen el punto en el que se forma el hielo y favorecen una deshidratación controlada del citoplasma, evitando así la degradación de la estructura de los organelos por medio de cristalización intracelular. Aun cuando el glicerol es común en protocolos bovinos, requiere una administración estricta porque puede tener un impacto citotóxico en la función mitocondrial

Crioprotectores no permeables (glúcidos, proteínas, polímeros)

- Solutos que funcionan en el espacio extracelular y establecen un gradiente osmótico, lo cual posibilita la exósmosis de agua y genera una biopelícula periférica que brinda protección

Nota: Adaptado de Serpa y De la Cruz (236)

Dinámica de congelación y especificidad de especie

La velocidad del enfriamiento, que debe adaptarse a las características biofísicas de cada especie, está estrechamente relacionada con la efectividad de la criopreservación. Aunque el semental bovino soporta reducciones controladas a través de protocolos automatizados, los porcinos y equinos enfrentan problemas más grandes a causa de su debilidad estructural (237). La membrana del espermatozoide porcino, que se distingue por tener una densidad de colesterol reducida, necesita un tratamiento térmico precautivo y la eliminación de elementos perjudiciales en el plasma.

En cambio, en la especie equina se trata la distinción entre buenos y malos congeladores a través de la estabilización del potencial redox utilizando enzimas antioxidantes (238). Simultáneamente, la vitrificación se presenta como una opción para los rumiantes pequeños, en la que el paso a un estado vítreo impide que se formen cristales de hielo y mejora la integridad celular por medio de velocidades extremas de enfriamiento (238).

Evaluación de la calidad post-descongelación

La validación del plasma germinal criopreservado ha superado el análisis microscópico subjetivo para convertirse en una caracterización multiparamétrica que tiene la capacidad de predecir,

con mayor precisión, la posibilidad de fertilidad in vivo (239). La motilidad progresiva, aunque es un indicador de la actividad metabólica, no es suficiente para garantizar que la célula sea competente en la reacción acrosómica o que su arquitectura genómica permanezca estable.

En este contexto, el análisis seminal asistido por computadora (CASA) ha eliminado la parcialidad del operador y ha establecido como estándar la evaluación cinética. Estos sistemas permiten la cuantificación de descriptores críticos del movimiento, como la linealidad (LIN), la amplitud del desplazamiento lateral de la cabeza (ALH) y la velocidad curvilínea (VCL). La hiperactivación, una condición fisiológica que es importante cerca del complejo cúmulo-ovocito, se caracteriza por un perfil de VCL alto y una LIN baja; sin embargo, si se presenta inmediatamente después de la descongelación de forma iatrogénica, puede ser perjudicial (240).

Por otra parte, el método de citometría de flujo, que es el estándar referencial para evaluar la calidad del semen, tiene la capacidad multiparamétrica de descomponer la fisiología espermática a nivel molecular. Esta herramienta emplea marcadores fluorescentes para establecer con exactitud estadística las variables que determinan el éxito de la preñez (241):

- **Viabilidad y arquitectura de membrana:** Utilizar el yoduro de propidio (PI) y sondas como la SYBR-14 posibilita distinguir de manera rigurosa entre células que son funcionalmente íntegras y las que presentan un daño en su estructura.
- **Bioenergética mitocondrial:** La utilización del fluorocromo JC-1 posibilita la cuantificación del potencial de membrana mitocondrial, que es un marcador directo de la capacidad energética del gameto.
- **Cromatografía y estabilidad del ADN:** El índice de fragmentación del ADN se mide a través de experimentos como TUNEL o SCSA. La importancia de este parámetro se debe que, aunque es una cromatina inestable y no necesariamente evita la fecundación, sí es un factor clave en la mortalidad temprana del embrión.

Aplicaciones en programas de inseminación

La difusión a gran escala de sementales de alto mérito, gracias a la introducción de biotecnologías seminales en los sistemas de producción animal, hace posible que el progreso genético sea más amplio. El éxito de estos programas depende de la precisión en el manejo de la dosis y el tiempo de inseminación. Los hitos en esta área incluyen:

- **Optimización por IATF:** La inseminación de grandes grupos de hembras en períodos determinados es posible gracias a la combinación de la farmacología reproductiva y la

criopreservación, lo cual asegura una logística eficaz y una optimización del intervalo entre los partos (242).

- **Dosis reducidas y posicionamiento anatómico:** La biotecnología moderna posibilita que, a través de una navegación profunda en el tracto reproductivo, se logre mejorar la cantidad de espermatozoides por inseminación. Esta técnica incrementa la cantidad de descendencia que se obtiene con cada recolección seminal exitosa.
- **Sexado de gametos:** a citometría de flujo permite discriminar la masa de ADN, lo que posibilita escoger espermatozoides X o Y (243). Esta tecnología ha transformado la producción animal, lo que facilita dirigirla hacia la obtención de machos o hembras en función del propósito zootécnico, pese a los retos que implica el estrés oxidativo durante el procedimiento.

Manipulación genética aplicada a la reproducción

En la actualidad la reproducción animal emplea la genética molecular para superar los límites de la selección fenotípica tradicional. Cuando se centra en la intervención directa del genoma, se consigue que los índices de progreso genético mejoren y que el lapso entre generaciones disminuya considerablemente (244). Esta habilidad biotecnológica es indispensable para mejorar variables con baja heredabilidad y alta complejidad, como la aptitud reproductiva, que ha sido gestionada de manera ineficiente a lo largo de la historia a través de métodos convencionales de selección. Así, la genética molecular amplía las perspectivas de productividad al posibilitar un temprano reconocimiento del verdadero mérito genético.

Selección asistida por marcadores moleculares

La técnica de selección asistida por marcadores moleculares consiste en encontrar variaciones en el ADN asociadas con loci (posiciones físicas del genoma) de rasgos cuantitativos (QTL) que afectan la fisiología reproductiva de manera directa (245). A diferencia de los índices de producción cárnica o láctea, las características vinculadas a la fertilidad presentan un carácter poligénico complejo, lo cual hace más difícil su optimización a través de métodos fenotípicos tradicionales. En esta situación, los marcadores moleculares ofrecen un valor estratégico superior al brindar una evaluación objetiva de la carga genética que impacta el éxito reproductivo, sin importar las variaciones medioambientales que tienden a ocultar el verdadero potencial biológico (246).

El empleo de polimorfismos de un solo nucleótido (SNPs) y marcadores de microsatélites ha permitido que el mapeo de genes relevantes en la eficiencia reproductiva avance significati-

vamente. Detectar polimorfismos en los genes del receptor de estrógenos (ESR) y de la subunidad beta de la hormona folículo-estimulante (FSHB) es un avance significativo en el ámbito porcino (247). Estos marcadores permiten seleccionar cerdas tempranamente, utilizando como criterio su habilidad para producir grandes camadas. La identificación de variaciones en los genes BMP15 y GDF9 (TGF- β) constituye un progreso revolucionario en la cría ovinos. Estas variaciones en el material genético posibilitan ejercer un control biotecnológico sobre la dinámica del folículo, mejorando así la tasa de ovulación y la frecuencia de partos múltiples bajo criterios de selección genética (248).

La selección asistida por marcadores moleculares en lugar de reemplazar los registros de campo, los mejora al incorporar un nivel molecular a la selección. La detección de alelos relacionados con la persistencia reproductiva posibilita una gestión proactiva de la reposición, desechando aquellos animales con perspectivas de rendimiento inadecuadas antes de que produzcan costos innecesarios de mantenimiento. Sin embargo, la efectividad de esta herramienta está vinculada intrínsecamente al fenómeno del desequilibrio de ligamiento (246). Por lo tanto, para evitar errores en la estimación del mérito genético, requiere que la transferencia de marcadores entre poblaciones raciales distintas se acompañe de una validación estadística que garantice la cercanía funcional y física del marcador con el gen responsable.

El empleo estratégico de marcadores moleculares posibilita la predicción de características fisiológicas complejas y favorece una selección temprana que se basa en la arquitectura genética del individuo. Desde la regulación del desarrollo embrionario hasta el control de la tasa de ovulación, estos genes candidatos son objetivos esenciales para optimizar la fertilidad comercial. En la tabla 24 se muestran los marcadores más representativos, así como sus efectos moleculares registrados, de manera comparativa.

Tabla 24. *Marcadores moleculares y genes candidatos asociados a rasgos reproductivos en especies zootécnicas*

Especie	Gen Candidato	Rasgo Reproductivo Asociado	Efecto Molecular
Bovino	LRRTM1	Fertilidad de la hembra	Regulación del desarrollo embrionario temprano
Porcino	ESR1	Tamaño de camada	Incremento en el número de lechones nacidos vivos
Ovino	BMP15 (FecX)	Tasa de ovulación	Regulación de la sensibilidad folicular a la FSH

Equino	DMRT3	Coordinación y precocidad	Influencia indirecta en la madurez reproductiva
Aves	VIP	Pausa en la postura	Control de la secreción de prolactina y cloques

Nota: Adaptado de Paredes et al (249); Fioretti (250)

LRRTM1: Leucine Rich Repeat Transmembrane Neuronal 1; **ESR1:** Estrogen Receptor 1; **BMP15:** Bone Morphogenetic Protein 15 (también conocido como factor de crecimiento y diferenciación 9B); **DMRT3:** Doublesex and Mab-3 Related Transcription factor 3; **VIP:** Vasoactive Intestinal Peptide.

Genómica aplicada a la reproducción

La transición hacia la genómica funcional ha hecho posible manejar densidades enormes de polimorfismos, mejorando así los programas de selección genómica (GS). Esta metodología posibilita calcular los valores genómicos estimados de cría (GEBV) con una confianza sin igual para rasgos de baja heredabilidad, que a menudo son ocultados por el entorno en procesos convencionales (251). La genómica establece un nuevo criterio para la selección de machos, cambiando la validación por progenie, que es costosa y toma tiempo, por un perfil de ADN que se obtiene al momento del nacimiento (252).

La detección de haplotipos deletéreos es un elemento necesario de esta aplicación para el seguimiento de la salud reproductiva a nivel poblacional. La genómica masiva ha ofrecido una solución técnica para disminuir la tasa de abortos recurrentes y la mortalidad embrionaria en razas de alto valor comercial, al identificar alelos que causan fallos gestacionales en homocigosis.

Edición genética y CRISPR en animales domésticos

La arquitectura del sistema CRISPR/Cas9 (*Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats*) ha modificado la manipulación genética en animales domésticos al proporcionar a la biotecnología una habilidad para editar de manera precisa y localizada (253). La edición por medio de CRISPR posibilita la reconfiguración interna del ADN mediante sustitutos o eliminaciones de bases con un control intenso, a diferencia de los procedimientos convencionales de transferencia génica, que conducían a integraciones imprecisas en el genoma. Esta mutagénesis dirigida se diferencia de la transgénesis clásica por su capacidad de mejorar rasgos fenotípicos complejos sin necesidad de introducir material genético extraño, abriendo nuevas fronteras en la corrección de defectos reproductivos hereditarios (254).

En la dimensión reproductiva, el sistema CRISPR se ha posicionado como una herramienta de vanguardia con aplicaciones de alto impacto, tales como se observan en la figura 8.

Figura 8. Aplicaciones estratégicas de la edición génica mediante el sistema CRISPR/Cas9 en la eficiencia reproductiva y adaptativa de especies zootécnicas

Inducción de la pubertad y control del ciclo	Mediante la edición de los receptores de kisspeptina, orientada a optimizar la madurez sexual en genotipos de crecimiento lento
Generación de animales (Padres Sustitutos)	A través de la ablación del gen <i>NANOS2</i> , se generan machos estériles que actúan como huéspedes para el trasplante de células madre espermatozógenas de ejemplares élite. Esta técnica permite que animales rústicos, con alta resiliencia tropical, diseminen material genético de alto mérito
Resiliencia térmica:	La edición del gen <i>SLICK</i> ha permitido mejorar la termo tolerancia en razas lecheras, blindando la viabilidad del ovocito ante el estrés calórico

Nota: Adaptado de Escobar (255); Mueller y Van (256); Ostos (257)

No obstante, la biotecnología contemporánea se enfoca en mejorar los sistemas de administración de CRISPR y garantizar que los cambios sean traspasados a la descendencia de manera estable y segura.

Riesgos y beneficios de la intervención genómica

Las habilidades de los métodos de selección tradicionales se ven sobrepasadas ampliamente por las ventajas de la intervención genómica moderna, que son la corrección de haplotipos letales (conjuntos de variantes genéticas que se heredan en bloque y que, en homocigosis, comprometen la viabilidad fetal) y la aceleración del progreso genético. Sin embargo, para evitar peligros biológicos emergentes vinculados a la mutagénesis dirigida, es preciso tratar este potencial disruptivo con precaución técnica. Con el fin de asegurar que la eliminación de enfermedades hereditarias suceda en un ambiente de integridad genómica, se requiere ejecutar un estudio completo sobre las consecuencias para la población (258). En este contexto, la intervención genética se convierte en un componente crucial de la reproducción asistida, siempre que su puesta en práctica esté apoyada por reglas científicas que aseguren la salud y diversidad de las futuras generaciones.

Análisis de efectos fuera de objetivo

Uno de los retos técnicos más difíciles que se presentan al implementar CRISPR/Cas9 es el análisis de efectos fuera del objetivo, ya que es posible que se generen mutaciones accidentales

en loci, es decir, en sitios o ubicaciones genómicas específicas, que, debido a su homología secuencial con la guía de ARN (sgRNA), son reconocidos erróneamente por la enzima Cas9 (259). Estos cambios no deseados pueden afectar la salud de los animales y su capacidad para reproducirse, en la medida que interfieren con las rutas metabólicas esenciales o con los genes que suprimen tumores. Por lo tanto, para validar la bioseguridad de la muestra editada se requiere secuenciar el genoma completo (WGS). Esta herramienta de alta resolución posibilita una auditoría minuciosa de la arquitectura genómica, asegurando que no haya variantes deletéreas antes de incluir a los individuos en programas de selección y cría (259).

Erosión de la diversidad genética

Aunque la selección genómica mejora el avance de los genes, su uso excesivo puede provocar que la biodiversidad molecular se erosione. La dependencia excesiva de linajes particulares con GEBV altos suele aumentar la tasa de consanguinidad, lo que reduce el tamaño efectivo de la población (N_e) (163). Las consecuencias de este estrechamiento genético incluyen la fijación de alelos dañinos y una reducción en la plasticidad fenotípica, que es un rasgo clave para sobrevivir en condiciones climáticas inestables. Por lo tanto, la intervención genómica contemporánea tiene que lograr un balance entre el mantenimiento de una base genética suficientemente amplia para asegurar la viabilidad futura de la raza y el aumento de las características productivas.

Clonación y reproducción asistida

La sinergia entre la biología molecular y la embriología en el campo de la zootecnia alcanza su cumbre con la clonación. Desde el punto de vista biotecnológico, este proceso es la producción de entidades biológicas con un solo genotipo a partir de un antepasado común, lo que garantiza una coincidencia total en términos genotípicos (260). La clonación establece un modelo de preservación genómica completa, permitiendo el traslado de fenotipos sobresalientes sin las limitaciones de la segregación mendeliana, mientras que los métodos tradicionales de reproducción asistida se basan en la variabilidad que resulta de la recombinación alélica.

Básicamente, este método posibilita la manipulación genómica con gran precisión y el análisis de los factores epigenéticos durante la reconstrucción del embrión. La búsqueda de homogeneidad genética ha impulsado en el sector zootécnico la creación de sistemas para generar clones que cumplan con los requerimientos científicos y productivos (260). Las aplicaciones actuales abarcan la mejora genética acelerada, el mantenimiento de especies amenazadas y la biomedicina. El avance de esta área requiere, al mismo tiempo, una evaluación crítica

de las implicaciones culturales y éticas, asegurando que la innovación en tecnología esté en consonancia con las normas de seguridad biológica y bienestar.

Fundamentos de la clonación animal

La clonación en zootecnia se fundamenta en la Transferencia Nuclear de Células Somáticas (SCNT), que posibilita que un núcleo diferenciado alcance la totipotencialidad a través del ooplasma de un ovocito en metafase II (95). La habilidad de una célula de generar un organismo completo, que incluya tanto los tejidos del cuerpo embrionario como los anexos extraembrionarios (por ejemplo, el saco vitelino y la placenta) que son necesarios para su subsistencia, se denomina totipotencialidad (261). Este proceso, que se desarrolla en el contexto de la SCNT, necesita que el genoma transferido abandone su perfil transcripcional anterior para reactivar el programa de desarrollo integral. Para que este protocolo sea efectivo y la viabilidad embrionaria sea posible más adelante, son esenciales la integridad técnica y la calidad de la reprogramación.

Preparación del citoplasto (Ovocito receptor)

La selección y la calidad del ovocito receptor son los pilares de la efectividad del procedimiento. Este debe haber culminado su maduración meiótica hasta la fase de Metafase II, por medio de protocolos in vivo o in vitro. El ovocito se transforma en un citoplasto funcional mediante el proceso de enucleación, que implica la eliminación del material genético endógeno, es decir, el primer cuerpo polar y el huso acromático (262). Es necesario llevar a cabo esta maniobra reduciendo al mínimo la pérdida de volumen citoplasmático, debido a que este espacio contiene las mitocondrias y las proteínas que remodelan la cromatina, las cuales son básicos para el desarrollo embrionario temprano (3).

Selección y preparación del carioplasto (Célula donante)

La producción de carioplastos se basa, por lo general, en la utilización de linajes somáticos. En particular, los fibroblastos fetales o adultos son reconocidos debido a su plasticidad bajo condiciones de cultivo. La fase del ciclo celular de la célula donante está relacionada con la eficacia de la SCNT. En este sentido, la bibliografía especializada destaca la necesidad inducir un estado de quiescencia (fase G0/G1) (263). Esta transición, que se lleva a cabo normalmente restringiendo los factores de crecimiento (privación del suero), garantiza una disposición estructural del ADN que es compatible con la maquinaria de replicación después de la recons-

trucción embrionaria. De esta manera, se reduce el peligro de anomalías cromosómicas en las primeras divisiones mitóticas o clivajes.

Fusión y activación ovocitaria

La electrofusión, un método que utiliza micro-pulsos de alto voltaje para fusionar el carioplasto en el citoplasma receptor, se usa para optimizar la transferencia nuclear en especies domésticas (264). Después de que la célula es colocada en el espacio perivitelino, una descarga eléctrica causa que se reorganizan los lípidos y esto posibilita la fusión de las dos unidades biológicas. Al mismo tiempo, ese estímulo actúa como un inductor fisiológico de la activación ovocitaria, imitando la señalización bioquímica de la fecundación para iniciar el desarrollo del embrión.

Dado que la estimulación física normalmente no es suficiente para replicar las fluctuaciones de calcio intracelular causadas por una fecundación fisiológica, se implementan protocolos adicionales de activación química. Estos métodos utilizan ionóforos de calcio, así como inhibidores de la síntesis proteica, como la cicloheximida o inhibidores de quinasas, como la 6-dimetilaminopurina (6-DMAP). El objetivo principal de esta intervención es propiciar una disminución eficaz del Factor Promotor de la Maduración (MPF) (264) lo que permite el tránsito del núcleo reprogramado a la fase S (de síntesis de ADN) y asegura que comience la embriogénesis.

Reprogramación epigenética

Más que la habilidad operativa, el éxito de la clonación radica en la eficacia con que la maquinaria citoplasmática lleva a cabo la reprogramación epigenética. Constituir un perfil transcripcional de carácter embrionario requiere borrar las huellas genómicas de la célula somática, en especial las modificaciones post-traduccionales de las histonas y la metilación del ADN. Una reprogramación fallida conduce a una manifestación anómala de genes ortólogos que son fundamentales para la placentación y la organogénesis, elementos que están detrás de los altos índices de mortalidad prenatal y neonatal (265). En la actualidad, el descubrimiento de estos procesos moleculares es lo que hace posible el paso de una clonación experimental a una herramienta biotecnológica sólida en esquemas de selección genética.

Casos de clonación en bovinos y ovinos

La utilización de transferencia nuclear en especies zootécnicas es actualmente un método sofisticado para asegurar características de mérito genético superior. En el ámbito bovino, la clonación busca principalmente duplicar reproductores que tengan un alto valor en términos

genéticos y cuya producción seminal o inmunocompetencia ante enfermedades endémicas justifique la inversión operativa. Según investigaciones recientes, aunque la eficiencia biológica (que se mide como la tasa de natalidad sobre los embriones transferidos) oscila entre el 5% y el 15%, los individuos que logran superar la etapa neonatal tienen niveles reproductivos y productivos semejantes a los de sus donantes nucleares (266)

La SCNT, que ha sido la precursora histórica de estos progresos en la especie ovina, se ha combinado con la edición genética para crear modelos biorreactores y biomédicos animales (267). Esta sinergia biotecnológica facilita la creación de ovejas alteradas que expulsan proteínas recombinantes de alto valor terapéutico por medio de la glándula mamaria, lo que sitúa a esta especie como una plataforma clave para el sector farmacéutico (268). Sin embargo, la diversidad cualitativa de los ovocitos obtenidos, ya sea por aspiración folicular in vivo (OPU) o por recuperación de ovarios en rastro, es el mayor obstáculo para estandarizar estos procedimientos en pequeños rumiantes.

Conservación de recursos zoogenéticos

La SCNT se establece como un instrumento biotecnológico de salvaguarda para conservar los recursos zoogenéticos en la zona andina. En este ecosistema, especies como el ganado Criollo y los ovinos locales han desarrollado adaptaciones genómicas específicas a la hipoxia hipobárica y al estrés térmico. Estas adaptaciones pueden ser recuperadas por medio de la clonación en aquellos individuos que presentan problemas reproductivos debido a la senescencia o a trastornos obstructivos (269). Incorporar líneas celulares somáticas criopreservadas en los bancos de germoplasma es un soporte genético básico ante sucesos epizooticos devastadores. Además, la clonación interespecífica (iSCNT) se presenta como una opción estratégica que utiliza ovocitos de especies domésticas filogenéticamente próximas para recibir núcleos de taxones en peligro, lo cual reduce la erosión de la biodiversidad local.

Para evaluar la competitividad de la SCNT en el ámbito de las tecnologías de reproducción asistida, se debe examinar los indicadores de rendimiento en comparación con métodos como la Fertilización In Vitro. El éxito de esta última depende de la sinergia biológica de la fecundación, en tanto que la SCNT afronta el reto de la reprogramación nuclear asistida. Esta diferencia en el origen biológico del embrión se manifiesta en la supervivencia embrionaria y las tasas de preñez a término, variables que se analizan en la tabla 25.

Tabla 25. Indicadores de éxito reproductivo según la técnica de producción embrionaria

Parámetro de evaluación	Fertilización In Vitro (IVF)	Transferencia Nuclear (SCNT)	Observaciones técnicas
Tasa de Clivaje (División)	70% - 85%	60% - 75%	La SCNT depende de la activación química/eléctrica exitosa
Desarrollo a Blastocisto	30% - 45%	15% - 25%	Refleja fallos en la reprogramación epigenética temprana
Tasa de Preñez (Día 30-45)	40% - 55%	15% - 30%	La SCNT presenta mayores pérdidas embrionarias iniciales
Nacidos Vivos / Embriones TR	35% - 45%	3% - 12%	La SCNT es afectada por anomalías placentarias y el síndrome LOS
Viabilidad Neonatal	Alta (>90%)	Moderada/Baja (50-70%)	Los clones requieren cuidados intensivos en las primeras 48 horas

Nota: Adaptado de Vázquez et al (267); Vargas (260); Ehab et al (270)

Limitaciones técnicas y biológicas

La SCNT tiene limitaciones graves en su escalabilidad a causa de las ineficacias sistémicas biológicas, que se originan por una reprogramación epigenética insuficiente. El síndrome de descendencia de gran tamaño es la barrera clínica más importante. Esta entidad fenotípica se distingue por la hidropesía, el gigantismo fetal y la visceromegalia (en particular, la cardiomegalia y la hepatomegalia), así como por un engrosamiento inusual del cordón umbilical (271). Desde el punto de vista molecular, el LOS se origina de la modificación de los genes con impronta, como el IGF2R.

El estrés inherente a la SCNT, en contraste con la expresión monoalélica fisiológica de la fecundación natural, provoca una disminución de la metilación específica y, como resultado, una placentación anómala. En el caso de los clones bovinos, esto significa que disminuye la cantidad de placentomas, pero su volumen aumenta como compensación. Esto afecta negativamente al intercambio metabólico y provoca hipoxia fetal y mortalidad perinatal (272).

Dilemas éticos y bienestar animal

La SCNT plantea dilemas éticos profundos, que se enfocan principalmente en el bienestar animal debido a las elevadas tasas de mortalidad y morbilidad neonatal. El costo biológico de las hembras receptoras es alto, puesto que proviene de los procedimientos quirúrgicos de transferencia y obtención, además de las complicaciones obstétricas relacionadas con el desarrollo asíncrono del clon, tales como distocias por macrosomía fetal (273).

Desde el punto de vista bioético, la replicación a gran escala de genotipos de élite pone en peligro la biodiversidad molecular, debido a que reduce la capacidad adaptativa de las poblaciones ante retos climáticos o crisis sanitarias (274). En América y Asia, la legislación se basa en la seguridad del producto final y en la equivalencia sustancial, el cual es biológicamente indistinguible de lo convencional. Por otro lado, la Unión Europea sostiene una postura estricta de precaución sobre productos derivados de clones (275).

Por otra parte, la convergencia sinérgica con la edición genómica a través del sistema CRISPR/Cas9 es lo que define el horizonte de la clonación. Esta integración posibilita ir más allá de la simple replicación genotípica y avanzar hacia una mayor precisión en las intervenciones quirúrgicas antes de la SCNT. Algunos usos actuales incluyen la inserción de loci que brindan resistencia a la tuberculosis bovina o la eliminación de genes que producen proteínas lácticas alergénicas (276). A la vez, se respalda la optimización de la eficiencia técnica por medio de modulaciones en el entorno de cultivo con inhibidores de histona desacetilasa, como el Scriptaid. Estos agentes permiten una reestructuración más efectiva de la cromatina al elevar los índices de reprogramación y acercar el desempeño de la SCNT a los niveles comerciales de la Fertilización In Vitro (FIV) (277).

Producción de animales transgénicos

La creación de ejemplares transgénicos representa un cambio radical con respecto a los métodos tradicionales de mejoramiento genético. La transgénesis permite la inserción intencionada de secuencias de ADN exógeno, llamadas transgenes, en el genoma receptor. Esto da lugar a fenotipos nuevos que no existían previamente en el acervo genético de la especie, lo cual es diferente con respecto a la selección clásica, que se ve limitada por la variabilidad intraespecífica (278). Dentro del ecosistema de las biotecnologías reproductivas del macho, éste se presenta como la unidad funcional clave para propagar estas variantes. Sus gametos funcionan como vectores biológicos de alta fidelidad, asegurando que la información genética programada sea transferida a la descendencia.

Principios de la transgénesis

La biotecnología animal integra un espectro de tecnologías diseñadas para instrumentalizar la potencialidad celular mediante modificaciones selectivas y programadas. En este ámbito, la transgénesis se define como el conjunto de protocolos destinados a la alteración permanente y heredable del genoma, ya sea mediante la adición, deleción o edición dirigida de loci específicos (279). Para garantizar la transmisión germinal, es necesario que el constructo

génico, que está formado por el gen de interés y elementos reguladores como potenciadores y promotores, se incorpore al genoma del hospedador de manera duradera. Gracias al avance de estas técnicas, se ha podido pasar de la microinyección pronuclear, que era limitada por su baja eficiencia y tendencia al mosaicismo, a métodos que aseguran una expresión espacio-temporal exacta en el tejido y estadio fisiológico necesarios.

En el ámbito de las biotecnologías reproductivas masculinas, se han desarrollado métodos que emplean la fisiología de las células germinales para generar individuos fundadores.

- **Transferencia de genes mediada por espermatozoides (SMGT):** explota la afinidad bioquímica de la membrana plasmática espermática para asociarse con ADN exógeno y transportarlo hacia el ooplasma durante la singamia. Las proteínas de superficie con dominios que se acoplan al ADN en la zona cefálica del gameto hacen posible este proceso. Después de que el constructo se internaliza a nivel nuclear, se incorpora en el genoma del cigoto posterior a la fecundación (279). Aunque es una estrategia que tiene un carácter mínimamente invasivo en comparación con la microinyección, su eficacia biotecnológica depende de la integridad del semen y de la utilización de coadyuvantes como la electroporación o los nanotransportadores, que protegen el material genético frente a la actividad de las nucleasas seminales.
- **Transfección de células madre espermatogoniales (SSCs):** Una de las fronteras biotecnológicas con mayor proyección es la manipulación de las células madre espermatogoniales (SSCs) (280). Este protocolo contempla el aislamiento de nichos de células troncales del parénquima testicular, ya sea de individuos prepúberes o adultos, seguido de su expansión *in vitro* y transfección con el constructo transgénico. Después de ser editadas, estas SSCs se reimplantan en el epitelio seminífero de un receptor que ha sido sometido a la ablación de su línea germinal con anterioridad (es decir, está inmunodeprimido o es estéril). A este tipo de animal se le llama quimera germinal, y su valor principal radica en que puede generar espermatozoides con el transgén durante toda su vida reproductiva. La inseminación o la monta natural pueden ser utilizadas para propagar con facilidad los cambios genéticos en el rebaño, gracias a este método. Esto mejora en gran medida los índices de herencia del atributo seleccionado, lo que posibilita que las mejoras genéticas se establezcan con mayor rapidez y eficacia en la descendencia.
- **Vectores virales y sistemas de transporte:** representa un salto cualitativo en la eficiencia de la transgénesis, fundamentado en la capacidad de estos agentes para fran-

quear las barreras nucleares e integrar secuencias exógenas de forma permanente. La transducción lentiviral, a diferencia de los métodos de transfección química, asegura que el constructo esté presente en todo el cuerpo del organismo resultante cuando se realiza en estadios embrionarios iniciales o líneas germinales. No solamente se eleva la tasa de éxito en la adquisición de fundadores con este método, sino que también se mejora la estabilidad transcripcional, disminuyendo así las posibilidades de que el transgén sea inactivado por mecanismos defensivos a nivel celular (281).

Mecánica de integración y fidelidad de la transmisión hereditaria

La funcionalidad de un semental transgénico depende de dos factores que establecen su valor zootécnico.

- **Tasa de integración genómica:** logra su eficacia máxima a través de la utilización de vectores lentivirales. Estos sistemas biotecnológicos emplean la habilidad de infección de viriones modificados para transportar el ADN exógeno e implantarlo de forma permanente en el genoma del hospedador, un proceso facilitado por la actividad catalítica de la enzima integrasa. En cambio, las metodologías como la SMGT tienden a dar lugar a integraciones aleatorias, lo que aumenta el peligro de mosaicismo somático y germinal (282).
- **Fidelidad de la transmisión hereditaria a la F1:** se refiere a la capacidad del macho para liberar el transgén de forma constante. En los protocolos de trasplante de SSCs, esta probabilidad es mayor debido a que la repoblación del epitelio germinal con células editadas asegura una descendencia genéticamente uniforme, lo cual facilita la fijación del rasgo en el hato. (283).

Para comprender cómo el macho integra estas biotecnologías, la tabla 26 sistematiza la eficiencia de transducción y la fidelidad de transmisión según el protocolo de intervención germinal aplicado.

Tabla 26. *Eficiencia de transmisión del transgén vía gametos masculinos*

Técnica aplicada	Tasa de integración genómica	Probabilidad de transmisión (F1)	Observaciones técnicas
SMGT Convencional	5% - 15%	Variable (Mosaicismo)	Requiere lavado seminal estricto para evitar toxicidad

Trasplante de SSCs	40% - 60%	Alta (Estable)	Produce espermatozoides portadores de forma constante
Vectores Lentivirales	70% - 90%	Muy Alta	Riesgo de integración en sitios genómicos indeseados

Nota: Adaptado de Singh y Azmal (284); Rojas et al (285)

Aplicaciones en especies zootécnicas

La implementación de la transgénesis en especies de interés para la zootecnia ha evolucionado desde el modelado biomédico hasta la mejora de rasgos de importancia económica. En la industria bovina, el estudio se ha centrado en las modificaciones del perfil proteico lácteo; se ha conseguido que los sementales originales transmitan transgenes que codifican para la lactoferrina y la lisozima humanas. Estos avances tienen como objetivo aumentar la inmunocompetencia intestinal de la descendencia y crear alimentos nutracéuticos con mejores características bacteriostáticas (276). Al mismo tiempo, la edición genómica de la vía de la miostatina ha hecho posible inducir fenotipos de hipertrofia muscular, lo que ha mejorado la tasa de conversión alimenticia y alterado la composición del tejido hacia una disminución de la grasa intramuscular.

En tanto, la ingeniería genética ha logrado avances notables en la mejora de la eficiencia digestiva y la reducción del impacto medioambiental en la industria porcina. La creación de líneas porcinas transgénicas que expresan la enzima fitasa en su saliva es un modelo paradigmático. Esta alteración posibilita que el fósforo fítico incluido en las dietas a base de gramíneas se desdoble, lo que mejora la biodisponibilidad de minerales (286). En términos ecológicos, esta innovación disminuye la carga de fósforo en las excreciones de forma significativa, lo que reduce el peligro de eutrofización de acuíferos y establece a la biotecnología como un instrumento esencial para garantizar la sostenibilidad de los sistemas de producción intensiva.

Impacto en la productividad y resistencia

Utilizar sementales como vehículos para propagar resistencia genética es la estrategia más avanzada para enfrentar las crisis de sanitarias a nivel mundial. En este marco, se han desarrollado líneas porcinas que son resistentes al virus del Síndrome Reproductivo y Respiratorio Porcino (PRRS) gracias a la incorporación de casetes de interferencia de ARN (RNAi), lo cual

ha permitido la interrupción molecular de la replicación viral (287). El semental modificado transmite esta capacidad de inmunidad hereditaria a su descendencia, lo que reduce la dependencia de quimioterapéuticos y biológicos. La creación de gallos transgénicos con señuelos de ARN (decoy molecules) (288) en la industria avícola posibilita la inhibición de la replicación del virus de la influenza aviar. Cuando estos machos se suman a los núcleos de selección de líneas puras, se crea una barrera profiláctica estructural que protege la bioseguridad del sector

Avances en reproducción aviar

La biotecnología utilizada en la avicultura científica ha movido su centro de investigación hacia la línea germinal masculina, aprovechando los beneficios deterministas que presenta el genotipo ZZ para homogenizar la descendencia. Esta perspectiva habilita al gallo para funcionar como un vector biológico esencial para la modificación genética y la protección de la biodiversidad. De esta manera, la manipulación de precursores celulares se posiciona como el método más utilizado para fusionar la fecundidad convencional con la innovación zootécnica compleja y la bioseguridad genética (289).

Biología de Células Germinales Primordiales (PGCs) y machos sustitutos

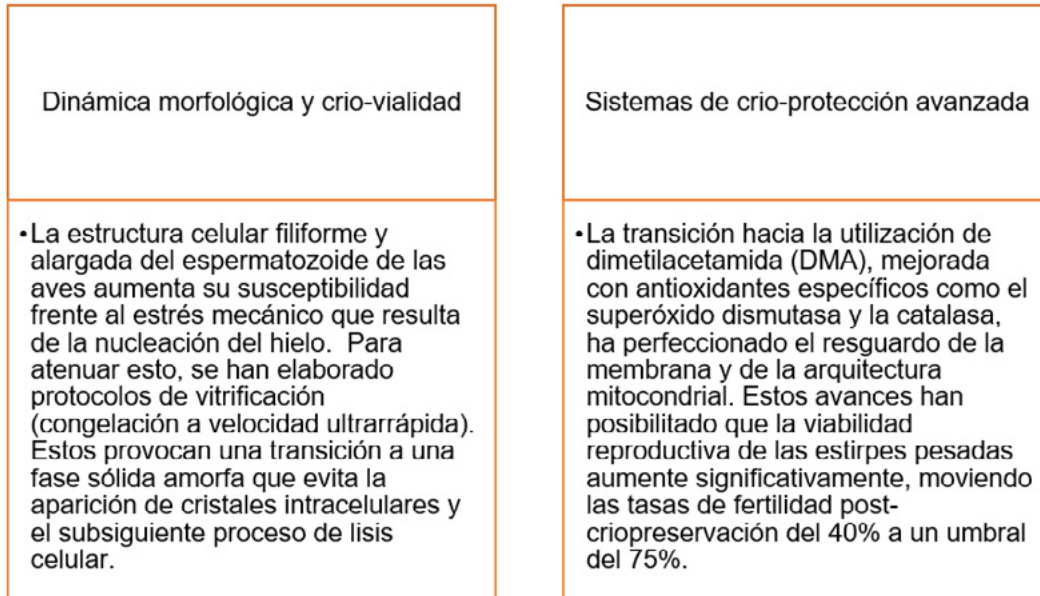
El uso de células germinales primordiales (PGCs) es un progreso en la generación de machos sustitutos para el sector avícola. (290). Esta técnica posibilita que las células precursoras de espermatozoides se transfieran desde embriones con un alto valor hacia receptores cuya línea germinal DDX4 está genéticamente silenciada. Este método de quimerismo germinal genera machos que tienen la capacidad de transmitir una carga genética diferente a su fenotipo propio (291).

Esta biotecnología, además de ser eficiente en términos reproductivos, se establece como una táctica para preservar los recursos zoogenéticos que están en riesgo de desaparecer. Facilita la ampliación de estirpes puras sin las restricciones infraestructurales y logísticas que exigen las poblaciones fundadoras convencionales.

Criopreservación de semen aviar

El gameto masculino aviar, por el contrario de los modelos fisiológicos que se ven en los rumiantes, tiene una sensibilidad crítica tanto a la citotoxicidad de los crioprotectores tradicionales como al choque térmico. Un caso significativo es el glicerol, que tiene un efecto anticonceptivo nocivo si no se elimina de manera exhaustiva antes de la inseminación artificial (292). Los dos ejes principales de las líneas de investigación actuales se observan en la figura 9

Figura 9. Ejes de investigación para la mejora de la fertilidad post-descongelación en aves de producción



Nota: Adaptado de Zambrano (293); Villaverde (292)

Innovaciones en inseminación artificial y diseminación genética

La optimización del mérito genético del semental aviar sobrepasa la alteración de la línea germinal y requiere que se apliquen protocolos de inseminación artificial muy precisos para incrementar el índice de descendencia por cada eyaculado. En la avicultura tecnificada, la inseminación intravaginal profunda ha sido el avance de la inseminación artificial (294). Esta técnica utiliza catéteres especializados con el objetivo de introducir el material seminal delante de la unión uterovaginal, lo que permite un acceso directo a los túbulos en los que se almacena el esperma (SST, por su acrónimo en inglés). Cuando se colonizan de forma eficaz estos reservorios biológicos, se disminuye la dosis mínima infectiva de espermatozoides, lo cual mejora el índice de hembras cubiertas por cada eyaculado de élite (294).

Además, la incorporación de tecnologías de citometría de flujo y visión artificial de bajo costo está transformando la evaluación del semen in situ. Antes de la transferencia, estas herramientas posibilitan el monitoreo dinámico del potencial bioenergético (actividad mitocondrial) y de la estabilidad del genoma (integridad del ADN) en el esperma (295). Esta estricta selección asegura que solo los sementales que presentan una capacidad de fertilización competitiva mayor se mantengan en las líneas de selección masal, lo que mejora notablemente la efectividad de los programas para optimizar el material genético.

Edición genética en el macho

El uso del sistema CRISPR/Cas9 en la línea germinal masculina, concretamente en células germinales primordiales o espermatogonias (PGCs), está modificando las tácticas de bioseguridad de la industria avícola (296). Por medio de la edición exacta de loci genéticos concretos, se están creando linajes que poseen una resistencia inherente a enfermedades con un alto impacto económico, como la enfermedad de Gumboro (bursitis infecciosa) y la leucosis aviar. La intervención en el macho tiene como ventaja competitiva su naturaleza de sexo homogamético (ZZ); este aspecto biológico permite que la fijación de las variantes genéticas editadas en los grupos comerciales ocurra con mayor rapidez y sea más predecible desde el punto de vista estadístico (296).

Con el fin de resumir las innovaciones estudiadas la tabla 27 detalla el efecto de las biotecnologías reproductivas aplicadas a los machos en la estructura de producción del sector avícola.

Tabla 27. *Impacto de las biotecnologías reproductivas en el macho aviar*

Tecnología	Objetivo principal	Ventaja estratégica	Eficiencia / Impacto
Trasplante de PGCs	Recuperación Genética	Permite usar machos comunes para producir semen de élite	Alta (90-100% descendencia del donante)
Criopreservación (DMA)	Biobancos de Germoplasma	Facilita el transporte global de genética superior sin mover aves vivas	Moderada (75% fertilidad post-descongelación)
Edición CRISPR/Cas9	Resistencia a Patógenos	Protección hereditaria contra virus de alto impacto económico	Permanente en la línea germinal
IA Profunda	Dilución de Dosis	Maximiza el número de crías por cada eyaculado del semental	Aumento de 5x en el uso de dosis

Nota: Adaptado de Toalombo et al (290); Zambrano (293); Khwatenge y Nahashon (297); Bajaña (298)



CAPÍTULO V

**PATOLOGÍA REPRODUCTIVA,
ÉTICA Y TENDENCIAS FUTURAS**

CAPÍTULO V.

PATOLOGÍA REPRODUCTIVA, ÉTICA Y TENDENCIAS FUTURAS

Jefferson Raúl Varas Aguillón, Julio César Villacres Matías, Wilmer Wagner Alcívar Guadamud, Víctor Alvaro Tualombo Masabanda, Oscar Darwin Criollo Salinas, Debbie Shirley Chávez García, Jasmin Esmeralda Benítez Mora y Néstor Vicente Acosta Lozano.

En su sentido más amplio, la salud reproductiva se refiere a un estado de competencia biológica ideal para la perpetuación de linajes puros en un marco de viabilidad económica. En este contexto, las patologías reproductivas se posesionan como un eje científico en el cual es necesario entender a fondo tanto la endocrinopatía como la respuesta inmune. Sin embargo, la habilidad de manipulación gamética actual requiere que un marco bioético sólido regule el avance científico en el que el bienestar animal se considera un componente relevante de la biotecnología. Por lo tanto, la perspectiva futura del sector fusiona la bioseguridad tradicional con los avances digitales y moleculares, definiendo un criterio técnico que puede alinear la demanda de producción con la integridad ética y la soberanía genética.

Trastornos del ciclo estral

La eficacia reproductiva se basa en la integridad del ciclo estral, lo cual requiere una estricta coordinación de los mecanismos neuroendocrinos. Las enfermedades que generan anovulación, asincronía folicular o persistencia lútea tienen que ser examinadas con una perspectiva integradora, teniendo en cuenta que la salud reproductiva es el producto de la intersección entre la presión sanitaria del ambiente y el estado metabólico. Estos desórdenes, más que ser simples irregularidades del aparato genital, muestran un compromiso sistémico que deteriora el rendimiento funcional del útero. Por lo tanto, es básico examinar estas desviaciones para identificar los errores en el establecimiento de la preñez y la subsiguiente perpetuación del valor genético del espécimen.

Alteraciones en la selección folicular

En términos de salud, el desarrollo folicular sigue un patrón estricto, sin embargo, cualquier inconveniente en este proceso puede provocar la aparición de quistes ováricos. Un quiste folicular es, en términos técnicos, una estructura que no ovula y persiste por más de diez días, llegando a medir más de 20 mm en bovinos. Suele presentarse al mismo tiempo que no hay un cuerpo lúteo activo. La causa fisiopatológica principal se encuentra en que no se produce el pico de LH requerido, debido a una deficiencia en la cascada endocrina que ocurre antes

de la ovulación (299). Esto se debe a una respuesta inadecuada de la glándula hipófisis a los estímulos hormonales, así como a irregularidades en el mecanismo de retroalimentación del estradiol.

La categorización de los quistes ováricos se basa en su perfil hormonal y en cómo afectan la conducta reproductiva. Los quistes foliculares, que son de naturaleza estrogénica, son los principales causantes del comportamiento de ninfomanía y del estro errático. Por el contrario, los quistes luteales tienen una capa de tejido luteinizado que produce progesterona, lo cual genera un bloqueo del ciclo que se presenta como anestro prolongado (300). La retención funcional del cuerpo lúteo, que sucede cuando no hay señal de $\text{PGF2}\alpha$ procedente del útero, se da en paralelo a estas estructuras. Por lo general, este fenómeno está relacionado con trastornos del endometrio de baja intensidad que afectan el transporte o la biosíntesis de prostaglandinas, lo cual impide que ocurra la cascada de regresión lútea y, por ende, la reanudación posterior de la actividad folicular (299).

En la producción de cerdos, las irregularidades en la ciclicidad suelen presentarse como estros que se alargan o son irregulares desde el punto de vista cronológico, debido a la exposición a micotoxinas (la zearalenona es especialmente importante en términos clínicos). Esta molécula tiene una similitud estructural con los estrógenos naturales, lo que posibilita que compita por los receptores celulares y altere los mecanismos de retroalimentación en el eje hipotalámico (301). En esta situación, el uso de la ultrasonografía Doppler se ha convertido en un método diagnóstico muy preciso que posibilita el análisis hemodinámico y la observación de cómo está vascularizada la estructura ovárica. Esta valoración funcional es determinante para prescribir protocolos terapéuticos específicos, ya sea a través de la inducción ovulatoria con GnRH o por medio de análogos de prostaglandinas para la regresión del tejido luteal (302).

Infertilidad y anestro

La infertilidad, que es la imposibilidad de llevar a cabo una gestación satisfactoria después de la inseminación o la monta, es un síntoma habitual de anestro o inactividad ovárica. Este fenómeno debe ser analizado en el contexto, separando los períodos de inactividad biológica normal de las condiciones patológicas que surgen del manejo o la alimentación (303). El Balance Energético Negativo (BEN) es el factor que influye en el anestro posparto persistente, y este último representa uno de los principales retos en la ganadería moderna. La producción de leche crea una competencia por nutrientes que causa un déficit que afecta directamente al

hipotálamo, lo cual reduce la pulsatilidad de GnRH y obstaculiza la etapa final del desarrollo folicular, lo que imposibilita que se vuelva a la ciclicidad.

La pérdida de embriones antes del día 25 es un factor significativo en la infertilidad de las especies zootécnicas; este suceso está determinado por un microambiente uterino hostil, causado por niveles de progesterona que no son óptimos. Si el tejido lúteo no asegura un nivel apropiado de progesterona, el útero conserva la habilidad de manifestar receptores de oxitocina que, al ser estimulados, inducen la liberación pulsátil de PGF 2α (304). Este proceso luteolítico prematuro corta la gestación en sus primeras etapas, lo que impide que el embrión produzca la señal bioquímica requerida para el reconocimiento materno y la supresión del ciclo estral.

Para entender los estados de quiescencia ovárica, es necesario un análisis sobre la relación entre la gestión del hato y las reacciones fisiológicas. La tabla 28 categoriza las manifestaciones más relevantes del anestro patológico y sus raíces etiológicas. Como se observa, en los modelos de producción que se basan en el pastoreo, el anestro de origen nutricional se ha consolidado como la principal limitación.

Tabla 28. Clasificación fisiopatológica del anestro en especies zootécnicas y sus mecanismos de inhibición neuroendocrina

Clasificación del anestro	Etiología dominante	Mecanismo fisiopatológico
Anestro nutricional	Déficit de glucosa e insulina	Supresión de leptina; inhibición de pulsos de GnRH/LH
Anestro por lactancia	Estímulo del amamantamiento	Elevación de opioides endógenos; bloqueo de la liberación de GnRH
Anestro por estrés térmico	Hipertermia ambiental	Alteración de la dominancia folicular y daño al ovocito

Nota: Adaptado de Senger (2); Carrion (305); Castaño et al (306)

En este contexto, la falta de precursores glucogénicos altera las vías de señalización molecular que tienen la responsabilidad de transmitir al centro regulador hipotalámico el estado de las reservas energéticas (2). Simultáneamente, en especies tales como la ovina y la porcina, el anestro por lactancia, mediado por el arco reflejo de amamantar, crea una retroalimentación negativa que, a pesar de que protege la recuperación física de las madres desde un punto de vista evolutivo, en la industria tecnificada requiere protocolos farmacológicos para mejorar el intervalo entre los partos (305). Por último, las secuelas del estrés térmico no es

una simple inhibición funcional, pues ocasiona perjuicios duraderos en la competencia del ovocito que se mantienen incluso después de interrumpir el estímulo térmico (306). Este fenómeno destaca la relevancia de las infraestructuras para enfriar y regular térmicamente el ambiente, especialmente en ecosistemas con elevados niveles de humedad y radiación, como el litoral ecuatoriano.

Infecciones uterinas y ováricas

Se considera que la colonización de bacterias en el útero es un suceso que ocurre casi de manera inherente al puerperio inmediato. Sin embargo, el paso a una condición patológica se evidencia cuando la microbiota persistente excede la habilidad de los mecanismos de defensa locales para eliminarla. En este contexto, la endometritis clínica se determina a partir de la presencia de exudado purulento intrauterino por medio de vaginoscopia. En cambio, la endometritis subclínica, que es más prevalente, se detecta exclusivamente mediante el análisis citológico, el cual muestra una infiltración extrema de polimorfonucleares neutrófilos (PMN) sin signos clínicos externos (307).

Las enfermedades endometriales tienen un carácter crónico y a menudo progresan hacia una piómetra, que es una afección patológica en la cual el exudado purulento queda retenido en el lumen uterino debido a la influencia de un cuerpo lúteo persistente. Esta estructura endocrina impide la producción de prostaglandinas endógenas, lo que mantiene el cérvix ocluido y crea un ambiente anaeróbico que favorece la multiplicación de bacterias Gram negativas, como *Escherichia coli*, y de *Trueperella pyogenes*. La sinergia bacteriana no solamente afecta de manera negativa la competencia ovocitaria con el desplazamiento de lipopolisacáridos (LPS) hacia el tejido ovárico, también altera la expresión génica proinflamatoria a nivel local (308).

La pérdida zootécnica causada por infecciones reproductivas se expresa principalmente en la degradación de las métricas de fertilidad colectiva. El aumento de los días abiertos es el principal elemento que altera el intervalo entre partos desplazando la curva de producción y afecta la tasa de reemplazo. La continuidad de estos desórdenes cíclicos exige un estudio exhaustivo de las variables operativas y financieras, porque cada día que hay demora en la concepción supone un aumento en los gastos de mantenimiento sin retorno productivo. La tabla 29 detalla los efectos que tienen en términos económicos y operativos la existencia de trastornos cíclicos e infecciones en una unidad de producción.

Tabla 29. *Indicadores de eficiencia biológica y financiera derivados de patologías uterinas*

Indicador	Impacto por patología	Consecuencia económica
Días abiertos	Incremento de 20 a 40 días por endometritis	Aumento en costos de alimentación y pérdida de lactancias
Tasa de descarte	Eliminación prematura por infertilidad permanente	Pérdida de valor genético y aumento en costos de reemplazo
Costo por concepción	Incremento en dosis de semen y servicios veterinarios	Elevación del costo operativo por animal gestante

Nota: Adaptado de Suarez y Martínez (309); Bustillo y Melo (310)

Patologías reproductivas en machos

La capacidad reproductiva de las granjas zootécnicas está muy relacionada con la habilidad de fecundar del semental, una variable que a menudo se deja de lado en favor de los criterios para seleccionar a las hembras. Las anomalías patológicas en el aparato genital masculino no solamente disminuyen la fertilidad en sí misma, pues también funcionan como factores de riesgo sanitario y financiero para todo el sistema (311). Es por ello que, investigar estas afecciones requiere entender la fisiología testicular y de los procesos moleculares que intervienen en la espermatogénesis, empezando por el estudio de las disfunciones gonadales intrínsecas

Alteraciones en la espermatogénesis

El proceso biológico de la espermatogénesis es altamente especializado, y su integridad está sujeta a la regulación homeostática del eje hipotálamo-hipófisis-testículo (HHT). Cuando este equilibrio endocrino se rompe, la calidad del semen desmejora. Esto se observa clínicamente a través de casos de azoospermia, oligospermia o una prevalencia patológica de teratozoospermia (312). Aunque la etiología se clasifica en niveles infra-testiculares, testiculares y pre-testiculares, las enfermedades de origen exclusivamente gonadal conforman los contextos más difíciles para el diagnóstico y pronóstico del experto en reproducción animal.

La degeneración testicular, que se considera la patología gonadal más complicada, supone un retroceso funcional del parénquima, lo cual puede tener un impacto en la producción de testosterona y anula la espermatogénesis. La descompensación oxidativa es el mecanismo subyacente, el exceso de especies reactivas de oxígeno (ROS) excede las defensas enzimáticas locales, lo que provoca una serie de peroxidaciones lipídicas (313). Este fenómeno causa no sólo

una alteración en la estructura de la membrana espermática, sino que también provoca que el ADN quede fragmentado, lo cual conlleva a un daño irreversible del potencial fecundante.

La degeneración testicular comienza con la vacuolización citoplasmática de las células de Sertoli, desde el punto de vista histopatológico, y continúa con la exfoliación hacia el lumen del túbulo seminífero de estadios no maduros de la línea germinal. La hialinización de la membrana basal y una fibrosis intersticial progresiva son causadas por la cronicidad del insulto patológico; estos cambios estructurales son el último estadio de la enfermedad, lo que resulta en un daño testicular irreversible. La detención de la maduración, que se refiere a la interrupción de la citodiferenciación en las etapas de espermatocitos o espermátidas, generalmente es provocada por deficiencias de micronutrientes críticos (en particular selenio y zinc), los cuales son decisivos para mantener estable el genoma durante la división celular (313).

Infecciones del aparato reproductor

La importancia de las infecciones reproductivas en machos se debe a su capacidad para propagarse por vía venérea y a su efecto en la calidad sanitaria de las dosis de semen. Los machos normalmente presentan situaciones subclínicas que hacen difícil su detección a tiempo, en contraste con la respuesta clínica perceptible en las hembras frente a fallas en la gestación. Este fenómeno los transforma en portadores no intencionados de patógenos, lo que aumenta el riesgo de contagio sistémico y resalta la importancia de llevar a cabo monitoreos sanitarios exhaustivos en las instalaciones de inseminación y en las unidades de monta natural (314).

Los trastornos inflamatorios más graves que pueden presentarse en el sistema reproductor del hombre son la orquitis y la epididimitis. En las especies rumiantes, la causa suele estar vinculada a ciertos patógenos como *Brucella abortus* y *Corynebacterium pseudotuberculosis* (315), que causan daño granulomatoso. La integridad de la barrera hemato-testicular corre peligro cuando hay daño en los tejidos, lo que permite que antígenos espermáticos sean expuestos al sistema inmunológico. Cuando se pierde el aislamiento biológico, surge una reacción en cadena autoinmune que se distingue por la producción de anticuerpos antiespermáticos. Estos anticuerpos causan que los gametos se aglutinen y obstaculizan de manera irreversible los procesos de unión y reconocimiento con la zona pelúcida del ovocito (315).

La vesiculitis seminal representa otro desafío patológico en los sistemas donde la población es muy densa y en los centros de biotecnología reproductiva (316). La piospermia, que es la presencia de exudado leucocitario en el semen, descompensa el microambiente del plasma seminal y modifica tanto su equilibrio osmótico como su potencial de hidrógeno (pH). Este

ambiente hostil disminuye la fuerza del esperma y pone en peligro las membranas acrosomales, que son cruciales para la fecundación. Es preciso subrayar que *Histophilus somni*, es un patógeno cuya presencia ha sido subestimada y que afecta la calidad del semen destinado a la congelación (317).

Malformaciones congénitas

El desarrollo morfológico del tracto genital depende de una serie compleja de diferenciación sexual que tiene lugar en cascada, la cual puede ser interrumpida por agentes teratogénicos externos o por factores genéticos (318). Dado que estas malformaciones del desarrollo a menudo tienen un sustrato hereditario, requieren una revisión exhaustiva durante los exámenes andrológicos y ginecológicos. Detectar estas modificaciones en fases tempranas es una táctica de bioseguridad genética para evitar que se mantengan las características no deseadas en los planes de mejora zootécnica.

El criptorquidismo es la anomalía de migración testicular más frecuente dentro de las fallas del desarrollo gonadal. El encierro del testículo en la cavidad interna anula su función exocrina porque el microambiente hipertérmico impide el ciclo espermatogénico; sin embargo, la producción de testosterona se mantiene, lo que permite que el macho conserve su fenotipo y conducta sexual (318). La importancia de esta enfermedad va más allá de la capacidad reproductiva individual. Debido a su naturaleza hereditaria, se debe descartar rigurosamente a los portadores para proteger la integridad genética del ganado.

Por otro lado, una de las alteraciones del desarrollo que tiene mayor impacto en la selección zootécnica es la hipoplasia testicular. La hipoplasia, a diferencia de los procesos degenerativos, se caracteriza por la existencia de una insuficiencia intrínseca de células germinales primordiales en el órgano, lo que imposibilita que la gónada desarrolle su tamaño y capacidad funcional fisiológica (319). Se ha registrado una relación cercana entre la aberración cromosómica específica y el tamaño testicular en núcleos genéticos de razas adaptadas, como el Blanco Orejinegro (BON). Este descubrimiento respalda el uso obligatorio de análisis de cariotipo en sementales élite para asegurar la estabilidad del genoma en su descendencia (319).

De igual manera, las anomalías morfológicas en el pene y el prepucio, como la persistencia del frenillo o las desviaciones de tipo ventral o espiral, representan obstáculos mecánicos para el coito fisiológico. Aunque la medicina veterinaria posibilita que estas patologías se solucionen a través de cirugía, su causa congénita desaconseja que estos individuos continúen en programas de reproducción (320). La transmisión hereditaria continúa siendo un riesgo a pesar de la

corrección estética, por lo que la recomendación técnica estándar es excluir estos ejemplares para impedir que los defectos anatómicos se perpetúen en la línea de monta natural.

Factores ambientales y tóxicos

El ambiente circundante ejerce una modulación determinante sobre la homeostasis gonadal; por lo tanto, el potencial reproductivo del semental no se define solo a partir de su genotipo o morfología. Los agentes externos tienen la capacidad de provocar situaciones de subfertilidad, ya sean crónicas o reversibles, en los modelos de producción actuales. El estrés térmico y la interacción con disruptores químicos son de los más relevantes, por su capacidad para modificar la fisiología de los testículos, funcionando como elementos limitantes en la manifestación del mérito genético del animal.

En este contexto, la sensibilidad térmica de la espermatogénesis es una restricción biológica en la reproducción del macho. Para la cinética celular de los testículos, es esencial mantener un gradiente térmico entre 2 °C y 6 °C por debajo de la temperatura somática (321). La saturación de los sistemas de termorregulación, en particular la túnica dartos, el músculo cremáster y el mecanismo de intercambio contracorriente del plexo pampiniforme, provoca que la espermiogénesis falle en ambientes subtropicales y tropicales, como los que se encuentran en diferentes áreas de Ecuador (322). La cromatina se ve afectada en su estructura por este procedimiento, que está regulado por la expresión de proteínas de choque térmico (HSP), y aumenta el riesgo de teratozoospermia, con predominancia de malformaciones en la pieza intermedia y formas cefálicas piriformes.

Por otro lado, las micotoxinas, sobre todo la zearalenona (ZEA) que proviene de *Fusarium*, son un elemento de riesgo crucial en la nutrición zootécnica entre los agentes tóxicos con efectos reproductivos. La ZEA funciona como un disruptor endocrino que compite por los lugares de unión de los receptores de estradiol en el eje hipotálamo-hipófisis-testículo (HHT), debido a su similitud estructural con los estrógenos naturales (323). Esta interferencia a nivel molecular reduce la producción de testosterona, lo que provoca síntomas de feminización secundaria, una disminución del diámetro escrotal y un deterioro notable de la libido en machos reproductores porcinos y bovinos.

Asimismo, el riesgo de necrosis tisular que presentan los metales pesados, al ser expuestos de manera sistémica, supone una amenaza inminente para la espermatogénesis. El cadmio y el plomo se interponen en la homeostasis mineral al reemplazar el zinc, que es un cofactor en los sistemas de enzimas de protección genómica (324). Como resultado, la barrera de defensa

antioxidante se interrumpe, lo que deja a los espermatozoides expuestos a una grave alteración oxidativa mientras están en tránsito por el epidídimo. Esto pone en riesgo su viabilidad y su integridad membranosa antes de que se produzca la eyaculación.

Bioseguridad y sanidad reproductiva

Una responsabilidad sanitaria inherente acompaña a la revolución del avance genético por medio de técnicas asistidas. Dentro de este paradigma, se redefine la bioseguridad reproductiva como un sistema para mitigar los riesgos biológicos que provienen de la manipulación y transferencia de embriones y gametos. Este sistema tiene como objetivo asegurar la seguridad total del material biológico, equilibrando el mantenimiento de la viabilidad celular con la conservación del estado sanitario de los rebaños ganaderos que participan en los programas de mejora, excede incluso los protocolos de higiene estándar (325).

Es por tal razón que la bioseguridad no debe entenderse como un conjunto de medidas discrecionales, sino que se caracteriza por ser un sistema técnico basado en tres pilares como lo son la prevención de la difusión de enfermedades en el animal, la salvaguarda del germoplasma contra contaminantes químicos y físicos y la preservación de la salud humana frente a agentes patógenos transmisibles. La normalización de estos procedimientos bajo estándares globales es importante para un país como Ecuador, que tiene un ecosistema considerable, con el objetivo de asegurar la sostenibilidad de la salud animal y el acceso a mercados internacionales.

Protocolos de prevención de enfermedades

El control riguroso de las vías de entrada de patógenos y la separación en compartimentos son las bases para prevenir enfermedades en los centros destinados a la mejora genética. Los protocolos de gran complejidad diferencian entre los elementos estructurales (los activos físicos y el diseño de flujos) y los operativos (los protocolos de biogestión y la gestión cotidiana). La integración de los dos niveles de bioseguridad es la garantía técnica requerida para certificar procesos de obtención y conservación del material biológico (326).

Ahora bien, la profilaxis sanitaria se basa principalmente en el tamizaje diagnóstico especializado y la cuarentena estratégica. Antes de ser incluidos en los protocolos de recolección, los sementales y donantes deben estar aislados rigurosamente (30 a 60 días). Es necesario llevar a cabo análisis seriados de síndromes reproductivos, como IBR, DVB, leucosis y tuberculosis (327), así como de patologías de notificación obligatoria en esta etapa. La serología convencional ha sido reemplazada por técnicas de PCR en los centros de alta complejidad, debido a

que estas son más efectivas para detectar individuos portadores en etapas de latencia viral, lo cual asegura una sensibilidad diagnóstica más elevada.

Por otro lado, la operatividad profiláctica en los centros de inseminación artificial está centrada en la vigilancia microbiológica del semen. Aunque la incorporación de cócteles antibióticos (lincomicina-espectinomicina, tilosina y gentamicina) en los diluyentes es el protocolo habitual, sin embargo, el modelo actual está cambiando hacia una disminución táctica de los antimicrobianos (328). Esta tendencia tiene como objetivo reducir la presión de seleccionar cepas resistentes, reemplazando la dependencia química por protocolos de higiene rigurosos en el área de recolección y procesamiento. De esta manera, se asegura que el germoplasma sea inocuo sin perjudicar la eficacia terapéutica a largo plazo.

En la tabla 30 se observan los niveles de control requeridos para asegurar que un centro de reproducción conserve una condición sanitaria de calidad.

Tabla 30. Niveles de control y bioseguridad en centros de producción de material genético

Nivel de control	Acciones específicas	Objetivo sanitario
Control de ingreso	Arcos de desinfección, cambio de ropa, limitación de visitas	Impedir que patógenos externos ingresen a través de fómites
Vigilancia de donantes	Control clínico diario y análisis diagnósticos cada tres meses	Detección temprana de eliminadores de patógenos en semen/ovocitos
Gestión de efluentes	Tratamiento químico de aguas residuales y desechos biológicos	Evitar la recirculación de patógenos y el deterioro del medioambiente
Estandarización de insumos	Empleo de medios de cultivo y diluyentes certificados que no contengan patógenos	Asegurar la inocuidad biológica y química del material que ha sido criopreservado

Nota: Adaptado de Ministerio de Agricultura (329)

La bioseguridad reproductiva también se pone en riesgo cuando los vectores de transmisión son el personal técnico o los insumos mismos. La introducción accidental de microorganismos contaminantes en las maniobras de micromanipulación uterina tiene el potencial de provocar graves cuadros inflamatorios, como la endometritis subclínica o aguda, que pueden anular la receptividad del embrión (326). En este contexto, la formación técnica en protocolos de higiene y desinfección de materiales multiuso es una acción de control de riesgos necesaria para salvaguardar la tasa de preñez y el rendimiento del núcleo genético.

Control de zoonosis en reproducción animal

En la práctica de la biotecnología reproductiva, el personal está expuesto a matrices biológicas (como exudados vaginales, líquidos alantoideos, eyaculados y sangre) que actúan como vectores de agentes zoonóticos muy virulentos. En este contexto, la vigilancia epidemiológica se convierte en una necesidad de seguridad laboral que supera incluso, la dimensión estrictamente de la salud animal. Enfermedades como la leptospirosis, la brucelosis y la fiebre Q es un reto ya que su aparición asintomática en el ganado oculta el peligro de contagio al ser humano, donde a menudo se convierten en enfermedades crónicas que afectan múltiples sistemas (330).

Por ejemplo, si *Brucella* spp. permanece en los órganos reproductivos, el manejo de animales infectados se torna una amenaza inminente para el facultativo. A pesar de que son sustanciales para el avance genético, técnicas biotecnológicas como la OPU tienen un riesgo latente de aerosolización de patógenos. La barrera física es la prioridad de la normativa de bioseguridad reproductiva actual, que se logra al utilizar regularmente un equipo especializado de protección personal (331). Dado que la prevención de la brucelosis es esencial para mantener el capital humano en los centros de reproducción, es necesario proteger herméticamente las mucosas y los conductos respiratorios cuando se manipulan membranas placentarias o fetales.

También, en entornos de humedad relativa alta, la persistencia de *Leptospira* en las áreas donde se manejan sementales requiere estrictos protocolos de bioseguridad a nivel ambiental. Como la bacteria se expulsa de forma intermitente por el riñón, es necesario que el análisis epidemiológico en los centros reproductivos sea minucioso. La combinación de la amplificación de ADN por PCR con la técnica de aglutinación microscópica (MAT) hace posible la detección de portadores subclínicos que logran evadir los análisis convencionales (330). Esta vigilancia es una barrera sanitaria para salvaguardar la integridad del centro y evitar que los trabajadores que participan en el manejo de muestras biológicas estén expuestos ocupacionalmente.

Manejo sanitario en programas reproductivos

El éxito de los métodos de reproducción animal que son muy complejos depende de la reducción de contaminantes abióticos (factores fisicoquímicos como partículas de polvo, compuestos volátiles o residuos químicos) y bióticos (agentes vivos como bacterias, virus y hongos). El manejo de la salud en programas de fecundación *in vitro* y transferencia de embriones tiene que asegurar niveles de esterilidad parecidos a los del quirófano, no solamente durante el tratamiento de gametos, también al tratar a la hembra receptora (332). La estructura de con-

trol se segmenta estratégicamente en la bioseguridad del medio y el mantenimiento de una atmósfera controlada en el laboratorio, garantiza que la cadena de asepsia requerida para el desarrollo embrionario continúe.

La multiplicación de microorganismos ubicuos, como las bacterias saprófitas y los hongos, en el ambiente del laboratorio afecta la embriogénesis porque altera el pH de los medios y provoca procesos de fragmentación celular. La bioseguridad operativa requiere que se efectúe una limpieza programada y estricta de los sistemas de almacenamiento criogénico, las incubadoras de CO₂ y las campanas de flujo laminar. Los tanques de nitrógeno líquido son un aspecto crucial de la biovigilancia.

Así mismo, con el fin de garantizar un ambiente uterino libre de agentes patógenos, se necesita la gestión sanitaria de las receptoras en los programas de transferencia de embriones. Para evitar la translocación de bacterias al lumen uterino, es obligatorio el uso de insumos desechables y una limpieza estricta del área vulvoperineal antes de abordar el cuello uterino (333). Cuando se rompe esta barrera aséptica, se producen reacciones inflamatorias que ponen en peligro la viabilidad del embrión. Esto puede resultar en la muerte embrionaria temprana y, por ende, en un daño económico para el programa de mejora.

Normativas internacionales y marcos regulatorios

El control de enfermedades infectocontagiosas en el comercio global de germoplasma depende de la adhesión a los estándares internacionales de la Organización Mundial de Sanidad Animal (OMSA) (334). Este instrumento se emplea como herramienta técnica y legal que regula la certificación de los centros responsables de la producción de material genético. Según estas normas, para garantizar la seguridad y rastreabilidad del material que se exporta, se requiere gestionar las unidades productivas bajo supervisión oficial; esto implica que no debe haber patógenos específicos para poder enviar semen y embriones al extranjero.

De acuerdo con las pautas de la IETS, el procesamiento de embriones in vivo e in vitro a través de lavados seriados se ha establecido como el estándar de oro para la bioseguridad en el comercio global (335). La degradación proteolítica ayudada por tripsina, en combinación con el efecto de dilución mecánica de los lavados sucesivos, asegura que la zona pelúcida permanezca libre de adherencias virales o bacterianas y se conserve íntegra desde el punto de vista sanitario. Este protocolo posibilita el intercambio de material genético entre fronteras, con estrictas garantías, lo que reduce la posibilidad de propagar patógenos de notificación obligatoria como el virus de la fiebre aftosa.

La Agencia de Regulación y Control Fito y Zoonosanitario o AGROCALIDAD, es la autoridad encargada de aplicar e implementar los estándares internacionales en el territorio ecuatoriano. Los protocolos de la institución establecen que la introducción de material genético, ya sea semen o embriones, tiene que estar respaldada por un Certificado Sanitario de Exportación (336). Este documento asegura que los reproductores donantes han realizado esquemas de diagnóstico específicos en laboratorios acreditados, garantizando así la convergencia normativa con las pautas del mercado global de biotecnología reproductiva y de la Comunidad Andina. Las regulaciones más relevantes sobre la bioseguridad se resumen en la tabla 31.

Tabla 31. *Marco legal y entidades internacionales que regulan la bioseguridad en el ámbito de la reproducción animal*

Organismo	Documento de Referencia	Aplicación Primaria
OMSA	Código Sanitario (Animales Terrestres)	Reglamento de certificación sanitaria para la exportación de materiales biológicos
IETS	Manual de Procedimientos Técnicos	Protocolos para descontaminación (de tripsina) y valoración de la calidad del embrión
AGROCALIDAD	Resoluciones de Control Zoonosanitario	Habilitación de centros genéticos locales y homologación de normativas en Ecuador
FAO	Directrices de Gestión de Germoplasma	Reglamento técnico para la conservación fuera de su hábitat de los genomas de especies que tienen importancia zootécnica

Adaptado de: OMSA (334); AGROCALIDAD (336); FOA (337)

Ética y bienestar animal en biotecnología reproductiva

Aunque la biotecnología aplicada ha acelerado el avance genético en la industria animal, tener la capacidad de incidir en los procedimientos reproductivos más básicos conlleva una gran responsabilidad ética. En la zootecnia, la bioética debe ser vista como un mecanismo de control que engloba análisis de eficiencia, pero también se concentra en la sostenibilidad moral. Es muy importante este marco de referencia para que el uso de biotecnologías sea compatible con la integridad ética de las ciencias veterinarias modernas y con la protección de la vida.

Consideraciones éticas en biotecnología reproductiva

A fin de clarificar los términos, es inevitable revisar conceptos básicos de bioética y ética en el marco la biotecnología reproductiva. La idea de ética se basa en una dicotomía lingüística

proveniente del griego, *éthos* (épsilon), que alude al hábito o la costumbre, y *êthos* (eta), que denota el carácter o modo de ser. La dependencia mutua, estudiada por Aristóteles, indica que la conducta ética no es un acontecimiento accidental, sino el producto de una praxis habituada. La ética, considerada una ciencia especulativo-normativa, se percibe como una herramienta práctica para la toma de decisiones y el manejo de la vida moral. La ética demanda, además de la descripción de las acciones, una reflexión racional acerca de la legitimidad de los actos humanos. En el ámbito de la biotecnología, esta disciplina funciona como un filtro que cuestiona cualquier moralidad establecida y asegura que la actuación del experto no solo sea eficaz desde un punto de vista técnico, sino también defendible a partir de una valoración lógica (274).

Por otro lado, en el contexto de las ciencias de la vida, la bioética se presenta como un estudio sistemático del comportamiento humano en diálogo con la moralidad. Esta definición clásica enfatiza que la manipulación biológica y el cuidado de la salud no son neutrales desde el punto de vista axiológico; al contrario, requieren una supervisión ética constante. Por otra parte, la visión personalista describe la bioética como una recopilación de mandatos que resguardan y fomentan la vida en los campos de la biotecnología y la biomedicina (338). Esta perspectiva argumenta que el desarrollo científico no tiene sentido si no está basado en la dignidad ontológica. Dentro de este la medicina veterinaria aplicada a la reproducción se convierte en una disciplina que, priorizando el valor intrínseco de los procesos vitales sobre la gestión técnica indiscriminada, persigue una concordancia entre la eficacia productiva y la integridad biológica.

En este marco, el avance hacia una zootecnia de gran precisión, reabierto el debate sobre hasta dónde debe llegar la intervención del ser humano. Surge un dilema ético, si la modificación de características con fines económicos compromete el propósito de las especies implicadas. Esta perspectiva analítica indica que la exploración de resistencia patológica o rendimiento cárnico no debe separarse de una reflexión sobre la sustentabilidad moral y el respeto por la naturaleza inherente de los animales que están bajo biotecnologías reproductivas (339).

Los efectos pleiotrópicos colaterales son el principal foco de atención en la bioingeniería animal: se puede traducir la búsqueda de eficacia productiva en fenotipos patológicos o en una disminución del fitness biológico. El principio de precaución establece que la práctica técnica debe estar subordinada a un control normativo riguroso y a un acuerdo social que valore su relevancia más allá del mercado, dada la ausencia de certeza completa sobre las implicaciones genómicas. La salvaguarda de la propiedad intelectual en relación con la vida animal, por otro

lado, representa retos significativos para la soberanía alimentaria y puede restringir el acceso a la tecnología en situaciones de desarrollo.

Además, la protección de la propiedad intelectual sobre los recursos genéticos supone desafíos para la soberanía alimentaria, como se explicó anteriormente, crea desigualdades que podrían limitar el acceso a la tecnología. La situación específica que vive Ecuador está regida por el Servicio Nacional de Derechos Intelectuales (SENADI), dentro del contexto del Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos (340), también conocido como Código Ingenios. Esta ley tiene como objetivo proteger el patrimonio genético del país y al mismo tiempo fomentar la innovación biotecnológica, estableciendo restricciones concretas a la patentabilidad de los procesos biológicos naturales y las formas de vida.

Bienestar animal en prácticas reproductivas

El bienestar, en la producción animal actual, se describe como una condición de equilibrio biológico que protege las necesidades fisiológicas y el repertorio etológico del individuo. La gestión de este bienestar se lleva a cabo a través de las cinco libertades, que son los fundamentos para disminuir las reacciones al estrés y aumentar la eficacia biotecnológica: 1) asegurar la seguridad nutricional (no padecer hambre o sed), 2) brindar comodidad térmica y física en alojamientos ergonómicos, 3) mantener la integridad sistémica mediante el tratamiento y prevención de enfermedades, 4) permitir la expresión natural del comportamiento, y 5) proteger la homeostasis emocional (no experimentar angustia ni miedo) (341). En este marco, la ética profesional exige que cualquier intervención busque conservar la dignidad biológica y erradicar el sufrimiento iatrogénico (que es el daño, alteración o efecto negativo en la salud que se produce como resultado de una intervención médica, ya sea por acción u omisión), aun si ello implica un sacrificio humanitario frente a un pronóstico clínico desfavorable.

En el ámbito de las biotecnologías reproductivas, este concepto multidimensional, que incluye la competencia etológica y la integridad fisiológica, confronta retos decisivos. El mayor desafío es el de reducir los efectos dañinos vinculados a procedimientos invasivos. La aspiración folicular transvaginal guiada por ultrasonido, es un caso ejemplar, a pesar de ser una técnica estandarizada, tiene riesgos intrínsecos de hemorragia local, inflamaciones y crisis agudas (342). Por lo tanto, su viabilidad ética depende de si se aplican de manera estricta a los protocolos farmacológicos de anestesia y analgesia para asegurar la estabilidad del donante.

Además, la producción de embriones in vitro está asociada con riesgos fenotípicos concretos, entre ellos el síndrome del ternero grande (343). La salud del binomio madre-cría se ve seria-

mente comprometida por sus manifestaciones, que abarcan gestaciones largas, distocias y una tasa alta de mortalidad neonatal; esto pone de manifiesto un fracaso en la supervisión ética del proceso reproductivo. Es una necesidad técnica la optimización permanente de las variables nutricionales y ambientales en el laboratorio, dada esta realidad. Disminuir la aparición de irregularidades epigenéticas (cambios en los patrones de metilación del ADN y la expresión genética que no cambian la secuencia de nucleótidos, pero sí afectan el desarrollo del embrión) (344), asegura que el progreso genético sea compatible con la salud y la viabilidad biológica de las crías.

Fronteras tecnológicas e innovación en la ciencia de la reproducción

El cambio hacia una zootecnia fundamentada en la analítica de precisión y el conocimiento ha modificado el rol de la clínica reproductiva, enfocándola en la gestión de enormes cantidades de datos y el seguimiento a nivel molecular. Según esta perspectiva, la reproducción es vista como un flujo de información biológica que, al incorporar la biología de sistemas, posibilita una mejora sin igual de los parámetros reproductivos (345). Estas herramientas tecnológicas no suplantán el trabajo del clínico; al contrario, mejoran su habilidad para responder a los retos estructurales y biológicos que enfrenta la agricultura moderna.

Inteligencia artificial en reproducción animal

La inteligencia artificial se ha vuelto un elemento fundamental en la gestión reproductiva moderna gracias a la transición hacia la ganadería inteligente (346). La capacidad del Deep Learning para analizar grandes volúmenes de datos procedentes de sensores portátiles posibilita predecir etapas fisiológicas claves con una precisión superior a la que logran las técnicas tradicionales (347). Estos sistemas expertos identifican cambios sutiles en la fisiología y la etología del animal, lo que posibilita que la intervención a través de IATF se lleve a cabo en el momento biológico más adecuado.

La tecnología de visión por computadora utilizada en la imagenología reproductiva ha modificado la manera de evaluar el tracto genital, haciendo posible una evaluación precisa de la morfología folicular y la ecogenicidad. (348). Al mismo tiempo, en la etapa de laboratorio, la inteligencia artificial permite detectar los embriones con mejor capacidad de implantación mediante el análisis del desarrollo dinámico de estos. Estos sistemas, al identificar asincronías en la división celular, eligen el material biológico con el potencial genómico más elevado, lo que mejora la eficacia de las biotecnologías de transferencia embrionaria y optimiza la utilización de recursos escasos (348).

Nanotecnología aplicada a la fertilidad

La nanotecnología se caracteriza por la manipulación intencionada de la materia a nivel atómico y molecular, enfocándose en materiales cuya dimensión es menor a los 100 nm. Estas nanoestructuras, ya sean naturales o creadas por el ser humano, presentan características fisicoquímicas exclusivas que están íntimamente ligadas a su composición de elementos. En las ciencias veterinarias, esta materia representa un avance revolucionario con usos diversos que van desde el tratamiento de enfermedades infecciosas y degenerativas hasta la mejora de los índices reproductivos y el fortalecimiento del control sobre la inocuidad alimentaria (349). Aunque tiene un gran potencial, la evidencia científica actual todavía está en una etapa emergente.

La aplicación de estas tecnologías en las ciencias reproductivas ha hecho que se reemplacen los métodos tradicionales de selección celular por técnicas con precisión a nivel molecular. La purificación de muestras seminales mediante nanodispositivos magnéticos específicos garantiza que se eliminen los espermatozoides con ADN fragmentado o membranas dañadas, lo que mejora la calidad del material criopreservado (350). El empleo de nanotransportadores para la liberación de GnRH o prostaglandinas también estabiliza la reacción farmacológica, lo que permite protocolos de sincronización más efectivos que minimizan el efecto del manejo intensivo sobre la respuesta biológica y el bienestar animal.

La utilización de biosensores fundamentados en puntos cuánticos o nanoestructuras de carbono para el diagnóstico in situ (point-of-care) es un relevante avance. Estos sistemas permiten la detección ultrasensible de esteroides gonadales en matrices biológicas fáciles de obtener, como lo son la saliva o la leche (estradiol o progesterona). Esta tecnología proporciona al facultativo la habilidad de examinar en tiempo real el desempeño del cuerpo lúteo o la cercanía del pico ovulatorio. Al mismo tiempo, la incorporación de nanocrioprotectores en los protocolos de vitrificación está reduciendo la aparición de cristales intracelulares de hielo y mejorando la viabilidad después de descongelar los ovocitos, que son estructuras con una criotolerancia que normalmente se ve afectada por su alto contenido lipídico (351).

Avances en biología molecular y epigenética

La epigenética es el foco de la comprensión de la eficiencia reproductiva en especies que son relevantes para la zootecnia, dado que se analizan las modificaciones funcionales hereditarias que no requieren alteraciones en la secuencia de nucleótidos. Hay una sólida evidencia acerca de cómo las biotécnicas de reproducción asistida y el ambiente gestacional generan cambios

epigenéticos que afectan tanto el desarrollo del embrión como la fortaleza del recién nacido (352). Al analizar estos procesos, se pueden reconocer marcadores moleculares de receptividad uterina. Esto posibilita la optimización de los índices de preñez al establecer con exactitud la ventana para la transferencia de embriones que poseen un alto mérito genético.

El progreso en la transcriptómica y la proteómica brinda una visión pormenorizada de la comunicación bidireccional entre el endometrio y el concepto. El análisis de los exosomas y el microARN que contienen ha mostrado, en este marco, que el embrión tiene la habilidad de señalar su reconocimiento materno durante las fases preimplantacionales. La vigilancia de estas vesículas extracelulares a través de fluidos uterinos representa una frontera prometedora en términos diagnósticos para la detección temprana de pérdidas embrionarias que no son detectables por procedimientos convencionales (353). Esto posibilita la intervención, ya sea dietética o farmacológica, con el propósito de disminuir la mortalidad embrionaria y mejorar la eficacia reproductiva total en el hato.

Futuro de la reproducción en especies zootécnicas

La edición de genes precisa remodelará los estándares de productividad en un contexto de independencia técnica que se proyecta a partir del desarrollo de la reproducción animal. La edición de bases nitrogenadas, que sobresale por su seguridad y especificidad más altas en comparación con la técnica CRISPR tradicional, permite eliminar variantes genéticas no deseadas sin poner en peligro el genoma (354). Esta herramienta es un factor para el desarrollo de linajes que resistan el estrés térmico causado por el calentamiento global en áreas como Ecuador, posibilitando una adaptación biológica más rápida que la que podrían conseguir los métodos de selección tradicionales en un corto periodo de tiempo (355).

En la próxima década, la gametogénesis in vitro se afianzará como método para obtener células germinales a partir de precursores somáticos, lo que marcará la biotecnología reproductiva (356). Esta habilidad, que podría llamarse manufactura de gametos, transforma la selección animal al posibilitar que los seres vivos con fenotipo superior se reproduzcan antes de alcanzar su madurez sexual, lo que mejora el rendimiento genético por unidad de tiempo. La aplicación de Blockchain en este ambiente tecnológico asegura una gobernanza total de los datos, lo que reduce las amenazas de fraude en los registros de calidad. Este escudo digital es básico para situar material genético de gran valor en mercados internacionales que tienen exigencias muy altas en lo que se refiere al monitoreo y procedencia (357).

REFERENCIAS

1. Hafez E. Anatomy of Male Reproduction. En Hafez E, Hafez B. Reproduction in Farm Animals. 7th ed. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins; 2000. p. 3-13.
2. Senger P. Pathways to Pregnancy and Parturition. 3rd ed. Redmond: Current Conceptions Inc; 2012.
3. Chacón L, Martínez W, Valbuena D. La biotecnología aplicada en la reproducción bovina México: Corporación Universitaria de Ciencias Aplicadas y Ambientales; 2013.
4. Dyce K, Sack W, Wensing C. Anatomía Veterinaria. 4th ed. Ciudad de México: Editorial Médica Panamericana; 2012.
5. Sturkie P. Turkie's Avian Physiology. 7th ed. Scanes C, Dridi S, editores. San Diego: Academic Press; 2022.
6. Sauveur B, de Reviere M. Reproducción de las aves. 1st ed. Madrid : Mundi Prensa Libros; 1992.
7. Galina C, Valencia J. Reproducción de los animales domésticos. 3rd ed. México: Editorial Limusa, S.A.; 2008.
8. Bearden H, Fuquay J, Willard S. Applied Animal Reproduction. 6th ed. Upper Saddle River : Pearson Prentice Hall; 2004.
9. Knobil E, Neill J. Knobil and Neill's Physiology of Reproduction. 4th ed. Plant T, Zeleznik A, editores. San Diego: Academic Press; 2014.
10. Palma G. Biotecnología de la Reproducción. 2nd ed. Buenos Aires, Argentina: Reprobio / Repro Biotec.; 2008.
11. Hunter R. Physiology of the Graafian Follicle and Ovulation. 1st ed. Cambridge: Cambridge University Press; 2003.
12. Niswender G, Juengel J, Silva P, Rollyson M, McIntush E. Mecanismos que controlan la función y la vida del cuerpo lúteo. *Physiol Rev.* 2000; 80(1): p. 1-29.
13. Amann R, Schanbacher B. Physiology of male reproduction. *J Anim Sci.* 1983; 57(Suppl 2.): p. 380-403.

14. Barth A, Oko R. Morfología anormal de los espermatozoides bovinos. 1st ed. Ames: Prensa de la Universidad Estatal de Iowa; 1989.
15. Malpaux , B , Thiéry J, Chemineau P. Melatonin and the seasonal control of reproduction. *Reprod Nutr Dev.* 1999; 39(3): p. 355-66..
16. Chemineau P, Guillaume D, Migaud M, Thiéry J, Pellicer-Rubio M, Malpaux B. Estacionalidad de la reproducción en mamíferos: mecanismos reguladores íntimos e implicaciones prácticas. *Reprod Domest Anim.* 2008; 43(Suppl 2).
17. Reiter R. The melatonin rhythm: both a clock and a calendar. *Experientia.* 1993; 49(8): p. 654-64.
18. Goldman B. Sistema fotoperiódico de mamíferos: propiedades formales y mecanismos neuroendocrinos de la medición del tiempo fotoperiódico. *J Biol Rhythms.* 2001; 16(4): p. 283-301.
19. Rosa H, Bryant M. Estacionalidad de la reproducción en ovejas. *Small Ruminant Res.* 2003; 48(3): p. 155-71.
20. Goodman R, Inskeep K. Control neuroendocrino del ciclo ovárico de la oveja. En Knobil E, Neill J, editores. *The Physiology of Reproduction.* 2nd ed. New York: Raven Press ; 1994. p. 659-709.
21. Nagy P, Guillaume D, Daels P. Estacionalidad en las yeguas. *Anim Reprod Sci.* 2000; 60(61): p. 245-62.
22. Sharp P. Regulación fotoperiódica de la reproducción estacional en aves. *Ann NY Acad Sci.* 2005; 1040: p. 89-99.
23. Dawson A, King V, Bentley G, Nicholls T. Photoperiodic control of seasonal reproduction in birds. *J Biol Rhythms.* 2001; 6(4): p. 365-80.
24. Galan L, Solcan G, Solcan C. The Influence of Different Light Spectra on Broiler Chicken Endocrine Systems and Productivity. *Animals.* 2025; 15(21): p. 3209.
25. Díaz R, Granados L, Román S, Aguilar K, Caicedo A. Adaptaciones fisiológicas e indicadores termorreguladores del estrés térmico en sistemas de producción bovina. *Preprints.* 2025;; p. 10335.
26. Blache D, Zhang S, Martin G. Dynamic and sensory feedback in the neuroendocrine control of reproduction in sheep. *Reprod Nutr Dev.* 2006; 46(4): p. 379-90..

27. Roa J, Aguilar E, Dieguez C, Pinilla L, Tena-Sempere M. Nuevas fronteras en la fisiología de la kisspeptina/GPR54 como guardianes fundamentales de la función reproductiva. *Front Neuroendocrinol.* 2008; 29(1): p. 48-69..
28. Wolfenson D, Roth Z, Meidan R. Reproducción alterada en bovinos sometidos a estrés térmico: aspectos básicos y aplicados. *Anim Reprod Sci.* 2000; 60(61): p. 535-47.
29. De Rensis F, Scaramuzzi R. Estrés por calor y efectos estacionales sobre la reproducción en la vaca lechera: una revisión. *Theriogenology.* 2003; 60(6): p. 1139-51.
30. Pallás R. Factores que afectan la fertilidad y prolificidad en el ganado porcino. *Taurus.* 2008; 10(39): p. 26-38.
31. Pouly J, Ouziel L, Gremeau A, De Mouzon J, Janny L, Vignancour S, et al. Factores que afectan la tasa acumulada de nacidos vivos en ciclos de FIV. Análisis retrospectivo de una cohorte de 1001 parejas. *Gynecol Obstet Fertil.* 2012; 40(4).
32. Espimosa R, Cordova A. Efecto del estrés calórico y el estrés oxidativo en la función espermática de los mamíferos. *Revista Complutense de Ciencias Veterinarias.* 2018; 12(1): p. 27-39.
33. Kumar A, Dwivedi S. Reproductive Biotechnology in Livestock Improvement. *Vigyan Varta.* 2025; 6(3): p. 286-297.
34. McKinnon A, Squires E, Vaala W, Varner D. Reproducción equina. 2nd ed. McKinnon A, Squires E, Vaala W, editores. Ames: Wiley-Blackwell; 2011.
35. Guillaume D. The effect of light on the reproductive activity of mares. En McKinnon A, Squires E, Vaala W, editores. *Equine Reproduction.* 2nd ed. Ames: Wiley-Blackwell; 2011. p. 1722-31.
36. Agualongo I. Influencia del comportamiento reproductivo por acción del fotoperiodo en yeguas que habitan en la zona ecuatorial. Universidad Técnica de Babahoyo , Facultad de Ciencias Agropecuarias.
37. Hurtado D. Efecto del fotoperíodo en los animales domésticos de reproducción estacional, una revisión bibliográfica. Universidad de San Sebastián , Facultad de Ciencias de la Naturaleza. Escuela de Medicina Veterinaria.
38. Lewis P, Danisman R, Gous R. Respuestas fotoperiódicas de pollos de engorde. I. Crecimiento, comportamiento alimentario, rendimiento de carne de pechuga y crecimiento testicular. *Br Poult Sci.* 2009; 50(6): p. 657-66..

39. Canto F, Abecia J, Laviña A, Macías A, Martín E. Usos alternativos de melatonina exógena para mejorar aspectos fisiológicos y productivos de ovejas y corderos de raza Rasa Aragonesa. Informe Técnico. FEAGA.
40. Gaunand A, Chemineau P, Dufourny L, Fatet A, Pellicer-Rubio M. Control of animal reproduction in small ruminants: seasonality - photoperiod. Technical Report auto-saisine 2014 15 hal-01607726. Hal- Open science. 2020; 15: p. hal-01607726.
41. Chemineau P, Bodin L, Migaud M, Thiéry J, Malpaux B. Neuroendocrine and genetic control of seasonal reproduction in sheep and goats. *Reprod Domest Anim.* 2010; 45(Suppl 3): p. 42-9.
42. Clarke H, Dhillon W, Jayasena C. Revisión completa sobre la kisspeptina y su papel en los trastornos reproductivos. *Endocrinol Metab (Seoul).* 2015; 30(2): p. 124-41..
43. Navarro V, Tena M. Kisspeptinas y el control neuroendocrino de la reproducción. *Front Biosci (Schol Ed).* 2011; 3(1): p. 267-275.
44. Moberg G, Mench J. *The Biology of Animal Stress: Basic Principles and Implications for Animal Welfare.* 1st ed. New York: CABI Publishing; 2000.
45. Rahman A. Efecto del estrés térmico en la producción, reproducción, salud y posibles estrategias de mitigación de las vacas lecheras. *Journal of Applied and Advanced Research.* 2023; 8: p. 1-13.
46. Crowe M, Williams E. Triennial Lactation Symposium: Effects of stress on postpartum reproduction in dairy cows. *J Anim Sci.* 2012; 90(5): p. 1722-7.
47. Peter A, Vos P, Ambrose D. Postpartum anestrus in dairy cattle. *Theriogenology.* 2009; 71(9): p. 1333-42.
48. Mills E, Tsoutsouki J, Pierret A, Comninou A, Dhillon W. The Neuroendocrine Regulation of Reproductive Behavior and Emotional Control by Kisspeptin. *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism.* 2025; 110(6): p. e1747–e1758.
49. Patel A, Koysombat K, Pierret A, Young M, Comninou A, Dhillon W, et al. Kisspeptin in functional hypothalamic amenorrhea: Pathophysiology and therapeutic potential. *Annals of the New York Academy of Sciences.* 2024; 1540(1): p. 21-46.
50. Rekwot P, Ogwu D, Oyedipe E, Sekoni V. El papel de las feromonas y la bioestimulación en la reproducción animal. *Anim Reprod Sci.* 2001; 65((3-4)): p. 157-70.

51. Abecia J, Forcada F, González A. Hormonal control of reproduction in small ruminants. *Anim Reprod Sci.* 2012; 130(3-4): p. 173-179.
52. Soede N, Langendijk P, Kemp B. Reproductive cycles in pigs. *Anim Reprod Sci.* 2011; 124((3-4)): p. 251-8..
53. Rahman M, Thomas P. Restoration of tryptophan hydroxylase functions and serotonin content in the Atlantic croaker hypothalamus by antioxidant treatment during hypoxic stress. *Front Neurosci.* 2014; 8: p. 130 10.3389/fnins.2014.00130..
54. Wiltbank M, Lopez H, Sartori R, Sangsritavong S, Gümen A. Changes in reproductive physiology of lactating dairy cows due to elevated steroid metabolism. *Theriogenology.* 2006; 65(1): p. 17-29.
55. Hansen P. Effects of heat stress on mammalian reproduction. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci.* 2009; 364(1534): p. 3341-3350.
56. Broom D. *Domestic Animal Behaviour and Welfare.* 5th ed. Wallingford: CABI.; 2015.
57. Hansen P. Fisiología reproductiva de la vaca lechera sometida a estrés térmico: implicaciones para la fertilidad y la reproducción asistida. *Anim Reprod.* 2019; 16(3): p. 497-507..
58. Pinu F, Beale D, Paten A, Kouremenos K, Swarup S, Schirra H, et al. Biología de sistemas e integración multiómica: Perspectivas de la comunidad investigadora en metabolómica. *Metabolitos.* 2019; 9(4): p. 76..
59. Bora S. Applications of Genomic Selection in Animal Breeding; Challenges and Opportunities. *Open Access Journal of Microbiology & Biotechnology.* 2023; 8(2): p. 1-7.
60. Knight P, Glister C. Miembros de la superfamilia TGF-beta y desarrollo del folículo ovárico. *Reproduction.* 2006; 132(2): p. 191-206.
61. Fountas S, Petinaki E, Bolaris S, Kargakou M, Dafopoulos S, Zikopoulos A, et al. The Roles of GDF-9, BMP-15, BMP-4 and EMMPRIN in Folliculogenesis and In Vitro Fertilization. *J.Clin. Medicina.* 2024; 13: p. 3775.
62. Short T, Rothschild M, Southwood O, McLaren D, de Vries A, van der Steen H, et al. Efecto del locus del receptor de estrógeno en las características reproductivas y productivas de cuatro líneas de cerdos comerciales. *J Anim Sci.* 1997; 75(12): p. 38-42..
63. Spencer T, Bazer F. Conceptus signals for establishment and maintenance of pregnancy.. *Reprod Biol Endocrinol.* 2004 ; 2: p. 49..

64. Lonergan P, Forde N. Interacción materno-embriónica que conduce al inicio de la implantación de la gestación en el ganado. *Animal*. 2014; 8(Supl. 1): p. 64-69.
65. Amandykova M, Orazymbetova Z, Kapassuly T, Kozhakhmet A, Khamzina S, Iskakov K, et al. Detection of genetic variations in the GDF9 and BMP15 genes in Kazakh meat-wool sheep. *Arch Anim Breed*. 2023; 66(4): p. 401-409.
66. Suhendro I, Noor R, Jakaria J, Priyanto R, Manalu W, Andersson G. Association of heat-shock protein 70.1 gene with physiological and physical performance of Bali cattle. *Vet World*. 2024; 17(1): p. 17-25.
67. Feng X, Li C, Zhang H, Zhang P, Shahzad M, Du W, et al. Heat-Stress Impacts on Developing Bovine Oocytes: Unraveling Epigenetic Changes, Oxidative Stress, and Developmental Resilience. *Int J Mol Sci*. 2024; 25(9): p. 4808.
68. González O, Toro M, Bach A. Pasado, presente y futuro de la epigenética aplicada a la ganadería. *Front Genet*. 2015; 6: p. 305.
69. Satheesha G, Nagaraja R, Yathish H, Jayashree R, Kotresh A, Sahadev A, et al. Una revisión sobre la epigenética: importancia en la cría y producción ganadera. *Rev. Int.J.Curr. Microbiol.App.Sci*. 2020; 9(6): p. 2319-7706.
70. Sindhu , P , Magotra ASV, Chaudhary P. Unravelling the impact of epigenetic mechanisms on offspring growth, production, reproduction and disease susceptibility. *Zygote*. 2024; 32(3): p. 190-206..
71. Wang M, Ibeagha-Awemu E. Impacts of Epigenetic Processes on the Health and Productivity of Livestock. *Front Genet*.. 2021; 11: p. 613636.
72. Li C, Maloney C, Cropley J, Suter C. Programación epigenética mediante la nutrición materna: moldeando las generaciones futuras. *Epigenomics*. 2010; 2(4): p. 539-49.
73. Caton J, Crouse M, Dahlen C, Ward A, Diniz W, Hammer C, et al. Revisión: Suministro de micronutrientes, programación del desarrollo y suplementación estratégica en ganado rumiante. *Animal*. 2025; 19(Supplement 2.): p. 101563.
74. Sirar M. Influencia de la fertilización in vitro y el cultivo de embriones sobre los constituyentes epigenéticos del embrión y sus posibles consecuencias en el modelo bovino. *Revista de orígenes del desarrollo de la salud y la enfermedad*. 2017; 8(4): p. 1-7.

75. Aravindh S, Silpa M, Voggu S, Rebez E, Kalaignazhal G, Srinivas M, et al. Mecanismos epigenéticos asociados con la adaptación del ganado al estrés térmico. *Biology (Basel)*. 2025; 14(9): p. 1154..
76. Weigel K, Chasco A, Pacheco H, Sigdel A, Guinan F, Lauber M, et al. Selección genómica en ganado lechero: impacto y contribución a la mejora de la fertilidad bovina. *Teriogenología Clínica*. 2024;; p. 16.
77. Meuwissen T, Hayes B, Goddard M. Selección genómica: un cambio de paradigma en la cría animal. *Animal Frontiers*. 2016; 6(1): p. 6-14.
78. Ánge P, Cardona H, Cerón M. Genómica en la producción animal. *Rev. Colombiana cienc. Anim.* 2013; 5(2): p. 518,2013.
79. Druart X, de Graaf S. Proteomas del plasma seminal y fertilidad de los espermatozoides. *Anim Reprod Sci.* 2018; 194: p. 33-40.
80. Ugur M, Guerreiro D, Moura A, Memili E. Identificación de biomarcadores de fertilidad de toros mediante genómica funcional.. *Anim Reprod.* 2022; 19(1): p. e20220004..
81. Killian G, Chapman D, Rogowski L. Proteínas asociadas a la fertilidad en el plasma seminal de toros Holstein. *Biología de la Reproducción*. 1993; 49(6): p. 1202–1207.
82. Chacón L, Yepes G, Cardozo J, Rueda F, Castillo V, Torres A, et al. Proteínas plasmáticas seminales asociadas con la fertilidad de toros Brahman en el trópico bajo colombiano. *Trop Life Sci Res.* 2023; 34(3): p. 259-277.
83. Iftikhar S, Irfan M, Naveed A, Rehman A, Umar Marri M, Usman M, et al. Edición genética mediada por CRISPR/CAS9 para mejorar el crecimiento y la eficiencia alimentaria del ganado. *Revista de Ciencias Médicas y de la Salud*. 2025; 2(4).
84. Wang S, Qu Z, Huang Q, Zhang J, Lin S, Yang Y, et al. Application of Gene Editing Technology in Resistance Breeding of Livestock. *Life (Basel)*.. 2022; 12(7): p. 1070.
85. Cuellar C, Amaral T, Rodriguez P, Ongaratto F, Martinez D, Labrecque R, et al. Consecuencias de la edición genética de PRLR sobre la termotolerancia, el crecimiento y la reproducción masculina en el ganado. *FASEB Bioadv.* 2024; 6(8): p. 223–234.
86. Ciccarelli M, Giassetti M, Miao D, Oatley M, Robbins C, Lopez B, et al. Espermatogénesis derivada de donantes tras el trasplante de células madre en machos estériles knockout de NANOS2. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 2020; 117(39): p. 24195-24204.

87. de la Cruz L. Sistema Reproductor. En García A. Fisiología Veterinaria. 9788473606448th ed. Madrid,; Tébar Flores, S.L; 2018.
88. Hernández J. Fisiología Clínica de la Reproducción de Bovinos Lecheros. Primera edición, ed. México: Universidad Nacional Autónoma de México; 2016.
89. Roche J, Friggens N, Kay J, Fisher M, Stafford K, Berry D. Revisión por invitación: Puntuación de la condición corporal y su asociación con la productividad, la salud y el bienestar de las vacas lecheras. J Dairy Sci. 2009; 92(12): p. 5769-5801.
90. Richards M, Wettemann R, Spicer L, Morgan G. Nutritional anestrus in beef cows: effects of body condition and ovariectomy on serum luteinizing hormone and insulin-like growth factor-I. Biol Reprod. 1991; 44(6): p. 961-6.
91. Youngquist R, Threlfall W. Current Therapy in Large Animal Theriogenology. 2nd ed. St. Louis: Saunders Elsevier; 2006.
92. Porras A. Examen de la capacidad reproductiva del semental. En Porras A, Páramo R. Manual de prácticas de reproducción animal. Primera edición ed. México: UNAM; 2009. p. 90-106.
93. Knox R. Breeding Management of Pigs. [Online].; 2021. Acceso 22 de enero de 2026. Disponible en: <https://www.msdevetmanual.com/management-and-nutrition/management-of-reproduction-pigs/breeding-management-of-pigs>.
94. Noakes D, Parkinson T, Inglaterra G. Reproducción y obstetricia veterinaria. 10th ed. Londres. Reino Unido: Saunders, un sello de Elsevier Limited; 2019.
95. Boeta M, Balcázar A, Cerbón J, Hernández J, Hernández J, Páramo R, et al. Fisiología reproductiva de los animales domésticos. Segunda edición ed. México: UNAM; 2023.
96. Choudhary K, Kavya , K , Jerome , A , Sharma R. Advances in reproductive biotechnologies. Vet World. 2016; 9(4).
97. Leeson S, Summers J. Commercial Poultry Nutrition. 3rd ed. Guelph, Ontario, Canadá: Universidad de Nottingham. University Books; 2008.
98. Broom D, Fraser A. Broom and Fraser's domestic animal behaviour and welfare. 6th ed. Wallingford: CABI Publishing; 2021.
99. Guerra Y. Análisis del uso de la Ultrasonografía Doppler Color y Power en Vacas Preñadas Para Validar si Existe Correlación de la Irrigación del Cuerpo Lúteo con la Gestación

Bovina. Universidad de Santander, Facultad de Ciencias Agropecuarias. Medicina Veterinaria y Zootecnia.

100. DesCôteaux L, Colloton J, Gnemmi G, editores. Practical Atlas of Ruminant and Camelid. Reproductive Ultrasonography. Primera edición ed. Ames, Iowa: Wiley-Blackwell; 2010.
101. Fricke P, Ricci A, Giordano J, Carvalho P. Methods for and Implementation of Pregnancy Diagnosis in Dairy Cows. *Vet Clin North Am Food Anim Pract.* 2016; 32(1): p. 165-80..
102. Brito F, Macías. Ecografía Doppler y su aplicación en programas reproductivos en ganado bovino. *Revista de Ciencias Agropecuarias ALLPA.* 2025; 8(16): p. 234-245.
103. Kidd J, Lu K, Frazer M. Atlas of Equine Ultrasonography, 2nd Edition: Wiley-Blackwell; 2022.
104. Lüttgenau J, Bollwein H. Evaluation of bovine luteal blood flow by using color Doppler ultrasonography. *Reprod Biol.* 2014; 1(2): p. 103-9..
105. Sultana J, Paul S, Arafath M, Alam M, Hossain M, Moniruzzaman M. Early pregnancy detection in ruminants: challenges and innovations. *J Reprod Dev.* 2025; 71(5): p. 238-248.
106. Casano A, Menchetti L, Trabalza-Marinucci M, Riva F, De Matteis G, Brecchia , et al. Gene expression of pregnancy-associated glycoproteins-1 (PAG-1), interferon-tau (IFNt) and interferon stimulated genes (ISGs) as diagnostic and prognostic markers of maternal-fetal cellular interaction in buffalo cows. *Theriogenology.* 2023; 209: p. 89-97.
107. Barbato O, Menchetti L, Brecchia G, Barile V. Using Pregnancy-Associated Glycoproteins (PAGs) to Improve Reproductive Management: From Dairy Cows to Other Dairy Livestock. *Animals (Basel).* 2022; 12(16): p. 2033.
108. Dascanio J. Perineal Conformation Evaluation. En Dascanio J, McCue P. *Equine Reproductive Procedures.*: Wiley-Blackwell; 2014. p. 14-17.
109. Pascottini O, LeBlanc S. Modulación de la función inmune en el parto del útero bovino.. *Theriogenología.* 2020; 150: p. 193-200.
110. Reátegui J, Arenas E, Fernández F, Rinaudo A. Impacto de la endometritis subclínica en el rendimiento reproductivo de las vacas lecheras. *Spermova.* 2015 ; 5(1): p. 15–19.
111. Ungerfeld R. *Reproducción de animales domésticos:* edra; 2020.
112. Pohler K, Geary T, Atkins J, Perry G, Jinks E, Smith M. Follicular determinants of pregnancy establishment and maintenance. *Cell Tissue Res.* 2012; 349(3): p. 649-64..

- 113.** Butler S, Moore S. Genetic control of reproduction in dairy cows under grazing conditions. *Anim. Reprod.* 2018; 15(1): p. 933-939.
- 114.** Sammad A, Khan M, Abbas Z, Hu L, Ullah Q, Wang Y, et al. Principales alteraciones metabólicas nutricionales que influyen en el sistema reproductivo de las vacas lecheras posparto. *Metabolitos.* 2022; 12(1): p. 60.
- 115.** Sice M, Gómez Á, Gomis J. Presente y futuro del diagnóstico de gestación en el ganado bovino. *Anales de Veterinaria de Murcia.* 2022; 36: p. 19–32..
- 116.** Quintela L, Barrio M, Peña A, Becerra J. Use of ultrasound in the reproductive management of dairy cattle. *Reproduction in Domestic Animals.* 2012; 47(s3): p. 34–44..
- 117.** Herzog K, Bollwein H. Aplicación de la ecografía Doppler en la reproducción del ganado.. *Reprod Domest Anim.* 2007; 42(Suppl 2.): p. 51-8.
- 118.** Slovis N, Browne N, Bozorgmanesh R. Point-of-Care Diagnostics in Equine Practice *Vet Clin North Am Equine Pract.* 2020; 36(1): p. 161-171.
- 119.** Lopera R. Anestro en bovinos revisión bibliográfica. Universidad Cooperativa de Colombia, Facultad De Medicina Veterinaria Y Zootecnia.
- 120.** Butler W, Smith R. Interrelaciones entre el balance energético y la función reproductiva posparto en ganado lechero. *J Dairy Sci.* 1989; 72(3): p. 767-83..
- 121.** Bisinotto R, Greco L, Ribeiro E, Martinez N. Influencias de la nutrición y el metabolismo en la fertilidad de las vacas lecheras.. *Animal Reproduction.* 2012; 9(3): p. 260-272.
- 122.** Walsh S, Williams , E , Evans A. Una revisión de las causas de la baja fertilidad en vacas lecheras de alta producción de leche. *Anim Reprod Sci.* 2011 ; 123(3-4): p. 127-38.
- 123.** Ferguson J. Postpartum factors and fertility in dairy cows. *Clinical Theriogenology.* 2020; 12(3): p. 1-17.
- 124.** Ireland J, Smith G, Scheetz D, Jimenez-Krassel F, Folger J, Ireland J, et al. ¿Importa el tamaño en las hembras? Una visión general del impacto de la alta variación en la reserva ovárica en la función ovárica y la fertilidad, la utilidad de la hormona antimülleriana como marcador diagnóstico de fertilidad y las causas de la variaci. *Reprod Fertil Dev.* 2011; 23(1): p. 1-14.
- 125.** Zangirolamo A, Souza A, Bergano L, Sánchez T, da Silva N, Seneda M. Recuento de folículos antrales en bovinos: Ventajas, desafíos y datos controvertidos en IA y producción de embriones. *Taurus.* 2019; 21(81): p. 4-14.

126. Wiltbank M, Gümen A, Sartori R. Clasificación fisiológica de las condiciones anovulatorias en el ganado. *Theriogenology*. 2002; 57(1): p. 21-52..
127. Mossa F, Jiménez-Krassel F, Folger J, Irlanda J. Evidencia de que la alta variación en el recuento de folículos antrales durante las ondas foliculares está relacionada con alteraciones en la producción de andrógenos ováricos en el ganado. *Reproducción*. 2010; 140(5): p. 713-720.
128. Hernández K, Díaz L. Incidencia de la condición corporal en la dinámica folicular en hembras bovinas. Universidad Cooperativa de Colombia, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia.
129. Holm D, Thompson P, Irons P. The value of reproductive tract scoring as a predictor of fertility and production outcomes in beef heifers. *J Anim Sci.* 2009; 87(6): p. 1934-40.
130. Blesson C, Sahlin L. Prostaglandin E and F receptors in the uterus. *Receptors & Clinical Investigation*. 2014; 1(4): p. 127-138.
131. Yoshino H, Kizaki K, Hirata T, Iga K, Matsuda H, Tadayuki Y, et al. Interferon-stimulated gene expression in peripheral blood leukocytes as a predictive marker of embryonic status in Japanese Black cows transferred during the peri-implantation period. *Veterinary Sciences*. 2023; 10(7): p. 408.
132. Hansen P. Current and future assisted reproductive technologies for mammalian farm animals. *Adv Exp Med Biol*. 2014; 752: p. 1-22.
133. Chenoweth P, Lorton S. *Animal Andrology: Theories and Applications*. 1st ed. Oxfordshire: CABI; 2014.
134. Hopper R. *Bovine Reproduction*. 2nd ed. Hoboken: Wiley-Blackwell; 2021.
135. Pozor M. Aplicaciones diagnósticas de la ultrasonografía en el tracto reproductivo del semental. *Theriogenology*. 2005; 64(3): p. 505-9..
136. van der Horst G, Maree L. Evaluación de la motilidad espermática mediante el análisis de esperma asistido por computadora (CASA). *Methods Mol Biol*. 2025; 2897: p. 219-234..
137. Amann R, Waberski D. Análisis de esperma asistido por computadora (CASA): capacidades y desarrollos potenciales. *Theriogenology*. 2014; 81(1): p. 5-17.e3.
138. Chenoweth P, Brito L, Peter A, Waberski D, Althouse G, Aurich C, et al. Revisión de laboratorio de andrología: evaluación de la morfología espermática. *Teriogenología Clínica*. 2024; 16: p. 16.

- 139.** Barth A, Perry E, Hamilton L, Sutovsky P, Oko R. Abnormal morphology of bovine spermatozoa. 2nd ed. Cham, Switzerland: Springer.; 2025.
- 140.** Zubair M, Ahmad M, Jamil H. Review on the screening of semen by hypo-osmotic swelling test. *Andrologia*. 2015; 47(7): p. 744-50.
- 141.** Cakir C, Kuspinar G, Ganiyev A, Aslan K, Kasapoglu I, Kilicarlan H, et al. Reliability of hypo-osmotic swelling test on fresh and frozen-thawed ejaculated or testicular immotile sperm: A sibling oocyte study. *Eur J Obstet Gynecol Reprod Biol.* ; 293: p. 132-141.
- 142.** Ribas J, García A, Fernández A, Amengual J, Prada E, Cortés A, et al. Comprehensive analysis of sperm DNA fragmentation by five different assays: TUNEL assay, SCSA, SCD test and alkaline and neutral Comet assay. *Andrology*. 2013; 1(5): p. 715-22.
- 143.** Abah K, Ligocka Z, Itodo J, Ameh G, Partyka A, Nizanski W. Association between sperm DNA fragmentation and fertility parameters in farm animals: a systematic review and meta-analysis. *BMC Vet Res..* 2025; 21(1): p. 204..
- 144.** Glina S. Sperm DNA fragmentation testing: When and why? *Translational Andrology and Urology*. 2017; 6(Suppl 4): p. S504–S505.
- 145.** Menegassi S, Peripolli V, Canozzi M, Barcellos J. Libido y habilidades de servicio de toros de ganado Cebú. *Semina: Ciências Agrárias*. 2021; 42(5): p. 3057-3064..
- 146.** Barth A, Waldner C. Factors affecting breeding soundness classification of beef bulls examined at the Western College of Veterinary Medicine. *Can Vet J..* 2002; 43(4): p. 274-84.
- 147.** Chenoweth P. Bull libido/serving capacity. *Vet Clin North Am Food Anim Pract.* 1997; 13(2): p. 331-344.
- 148.** Pearson J. A review: Breeding behavior and management strategies for improving reproductive efficiency in bulls. *Animal Reproduction Science*. 2024; 273: p. 107669.
- 149.** Barragán A, Avendaño L, Hernández J, Pérez R, Correa A, Mellado M, et al. Termorregulación y respuestas reproductivas de carneros bajo estrés por calor. Revisión. *Rev Mex Cienc Pecu.* 2021; 12(3): p. 910-131.
- 150.** Mazlishah M, Hashim N, Mohamad N, Roslan M. Mazlishah, M; Impacto del estrés térmico en el rendimiento reproductivo y fisiológico de carneros Barbados Blackbelly bajo diferentes sistemas de manejo en los trópicos. *Research Square*. 2025.

151. Liu F, Brewster C, Gilmour S, Henman D, Smits R, Luxford B, et al. Relación entre la ingesta energética, el rendimiento del crecimiento y la composición corporal en cerdos seleccionados por su bajo espesor de grasa dorsal. *Journal of Animal Science*. 2021 ; 99 (12): p. 342.
152. Britt J, Cushman R, Dechow C, Dobson H, Humblot P, Hutjens M, et al. Invited review: Learning from the future—A vision for dairy farms and cows in 2067. *Journal of Dairy Science*. 2018; 101(5): p. 3722-3741.
153. De Vries A. Economic trade-offs between genetic improvement and longevity in dairy cattle. *J Dairy Sci*. 2017; 100(5): p. 4184-4192.
154. Henchion M, Regan Á, Beecher M, MackenWalsh Á. Developing ‘Smart’ Dairy Farming Responsive to Farmers and Consumer-Citizens: A Review. *Animals (Basel)*. 2022; 2(3): p. 360.
155. Caja G, Carné S, Salama A, Ait-Saidi A. State-of-the-art of electronic identification techniques and applications in goats. *Small Ruminant Research*. 2014 ; 121(1): p. 40-50..
156. Falconer D, Mackay T. *Introducción a la genética cuantitativa*. Third Ed. ed.: Longman; 1989.
157. Galvão K, Federico P, De Vries A, Schuenemann G. Economic comparison of reproductive programs for dairy herds using estrus detection, timed artificial insemination, or a combination. *J Dairy Sci*.. 2013; 96(4): p. 2681-2693..
158. Garro R, Tallarico G. Ganadería de precisión: innovaciones tecnológicas que agregan valor a la ganadería. *IDIA21*. 2022; 1: p. 21-27.
159. Freitas P, Selli A, Lodi D, Merlos A. Applications of livestock monitoring devices and machine learning algorithms in animal production and reproduction: an overview. *Animal Reproduction*. 2023; 20(2).
160. Alves C, Dantas N, de Araújo H. Automated Systems for Estrous and Calving Detection in Dairy Cattle. *AgriEngineering*. 2022; 4(2): p. 475-482.
161. Lachman J, López A. Innovación, habilidades y nuevas áreas de conocimiento en sectores tecnológicos emergentes: el caso de la Agricultura y Ganadería de Precisión. *Pymes, Innovación y Desarrollo*. 2018; 6(3): p. 60-85.

- 162.** Lascano S, Rivera L, Balarezo L, Castañeda J. Evaluación de algoritmos de aprendizaje automático en la detección de celos silentes en ganaderías de leche de la provincia de Pichincha. *Innova Science Journal*. 2025; 3(3): p. 336-355.
- 163.** Cobeña C, Cobeña D, Davies J, Cobeña M. Impacto de la selección genética en la mejora de la reproducción y producción en ganado bovino de leche y carne. *South Florida Journal of Development*. 2025; 6(10): p. 1-16.
- 164.** Benalcazar A. Estimación de valores de cría y DEPs, para predictores de calidad de carcasa evaluados in vivo por ultrasonido en bovinos de raza Nelore de la hacienda Caleta Same, Esmeraldas, Ecuador. Universidad Central del Ecuador , Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia.
- 165.** Instituto de Educación Superior Tecnológico Huando. Reproducción animal e inseminación artificial..
- 166.** Hernández J, Benítez M, Gómez A, Moreno L. Inseminación artificial animal: historia y evolución: Universidad Tecnocientífica del Pacífico S.C; 2017.
- 167.** Guevara C. Actualización en los protocolos de inseminación artificial a tiempo fijo(IATF) en bovinos. Universidad Cooperativa de Colombia , Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia.
- 168.** Kang T, Lai I, Shen P. Laparoscopic artificial insemination in small ruminants: Technological integration, economic evaluation, and future perspectives. *Frontiers in Veterinary Science*. 2025;; p. 1667887.
- 169.** Rebolledo P, Wong Y, Veraguas D, Echeverry D, Cartes D, Aguilera C. Avances y desafíos en las técnicas de inseminación artificial para la conservación de rumiantes silvestres: una revisión. *Austral journal of veterinary sciences*. 2025;; p. e5705.
- 170.** Laboratorio de Reproducción y Diagnóstico de Enfermedades Abortifacientes (LABRY-DEA). Manual de inseminación artificial de la hembra bovina. Universidad Nacional de Tucumán, Facultad de Agronomía y Zootecnia.
- 171.** Nava C, Romero J, Díaz R, López A. Inseminación artificial en bovinos. *Revista Ciencia*. 2023; 75(3): p. 1375–1388.
- 172.** Herrera D, Veliz K, Jaramilo J. Progresos en la gestión reproductiva del ganado bovino mediante una revisión bibliográfica. *Innova Science Journal*. 2023; 1(4): p. 37-47.

173. Syah H, Yekti A, Utami P, Isnaini N, Susilawati T. Effect of artificial insemination timing on conception rate in lactating Holstein-Friesian cows. *World's Veterinary Journal*. 2024; 14(4): p. 529-535.
174. Cabeza J, Gambini A. Advancements and challenges in in vitro reproductive technologies for the conservation of equine species. *Teriogenología Salvaje*. 2023; 2.
175. Centro Nacional de Referencia Zootécnica Equina (CENRE). La aplicación de técnicas de reproducción asistida en el Sector Equino en España. Informe técnico. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.
176. Echevarría M. Actualización en técnicas de reproducción asistida en equinos. Uruguay: Universidad de la República, Facultad de Veterinaria.
177. Chàvez B. Inseminación artificial en ganado ovino. Ecuador: Universidad Agraria del Ecuador, Facultad de Medicina Veterinaria Y Zootecnia.
178. Montoya M. Biotecnología reproductiva en animales. Perú: Universidad Nacional San Luis Gonzaga, Facultad Medicina Veterinaria y Zootecnia.
179. Hidalgo G, Rodríguez J, Chango R, Mavarez M, Morales R, Rodríguez M, et al. Inseminación intrauterina por laparoscopia en ovejas mestizas west african utilizando semen dorper congelado en pajuelas y pellets. *Revista Científica*. 2015; XXV(5): p. 395-401.
180. Seillant C, Verano M, Telésforo A. Inseminación Artificial. En Soto A, Gómez M, Seillant C. *Reproducción en ovinos y caprinos*: Universidad Nacional de La Plata (EDULP); 2024. p. 51-80.
181. Trujillo MSH, Gutiérrez O. *Reproducción del cerdo: una visión práctica*: Universidad Nacional Autónoma de México; 2019.
182. Compagnoni V, Tittarelli C, Williams S. Inseminación Artificial en la especie porcina: dosis inseminante en relación al lugar de deposición. *Analecta Veterinaria*. 2019; 39(2).
183. Alfonso O. Técnicas empleadas en programas de inseminación artificial en porcinos. Universidad Francisco de Paula Santander, Facultad de Ciencias Agrarias y del Ambiente.
184. Rios M. Factores que afectan la eficiencia reproductiva de hembras bovinas (*Bos Taurus Indicus*) como receptoras de embriones. Universidad Cooperativa de Colombia, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia.

- 185.** Giretti M, Reumann A. Protocolos de Inseminación Artificial a Tiempo Fijo (IATF) alternativos al uso de estradiol en bovinos de carne. Universidad Nacional de Río Negro.
- 186.** Yáñez D, Barbona I, López J, Moyano J, Quinteros R, Tonato J, et al. Posibles factores que afectan la tasa de gestación de vacas en la Amazonia ecuatoriana. *Spermova.* ; 6 (2): p. 144–147.
- 187.** Morejón M, Guanga D, Solano J, Tigre A. Revisión corta: mejoramiento genético en especies de animales mediante la tecnología de transferencia de embriones (TTE). *Revista Ciencia UNEMI.* 2025; 18(49): p. 185 - 189.
- 188.** Soria M, Soria C, Méndez S, Argudo D, Serpa G, Torres C, et al. Valoración de dos protocolos de superovulación para la producción de embriones en vacas Holstein. *Revista de Producción Animal.* 2018; 30(2): p. 52-56.
- 189.** Bo G, Vera A, Barajas J, Tibulo A, Mapletoft R. Avances en los protocolos de sincronización y superovulación de donadoras de embriones bovinos. *Spermova.* 2018; 8(2): p. 147-156.
- 190.** Zambrano F, Arteaga F, Mendieta D. Dos protocolos de superovulación en donantes de embriones en vacas mestizas en el trópico. *La Técnica.* 2020;(23): p. 33-44.
- 191.** Hernández S. Actualización de protocolos de transferencia de embriones a tiempo. Revisión de literatura. Universidad Cooperativa de Colombia, Facultad de Ciencias de la Salud, Medicina Veterinaria y Zootecnia.
- 192.** Gibbons A, Cueto M. Manual de transferencia de embriones en ovinos y caprinos. Area de Investigación en Producción Animal , Grupo de Reproducción.
- 193.** Iñamagua L. Producción de embriones in vitro de vacas Holstein estimuladas con FSH-rb. Universidad Católica de Cuenca, Medicina Veterinaria.
- 194.** Britos A, Acosta T, Román R, Giménez F, Domínguez R. Manual de transferencia de embriones. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.
- 195.** Flórez O. Factores que afectan la eficiencia reproductiva y los bajos índices de preñez de la hembra receptora en un programa de transferencia de embriones bovinos en Colombia. Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Escuela De Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente.

- 196.** Marenzi M. Aspectos operativos en transferencia embrionaria equina y análisis del potencial de la tecnología de criopreservación. Universidad Católica Argentina, Facultad de Ciencias Agrarias.
- 197.** Resendiz O, Martínez R, Mejias V, Hernández J. Evaluación de dos protocolos para transferencia de embriones en ovejas Obispo de la Montaña de Guerrero, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*. 2022; 9(1): p. e2847.
- 198.** Luchetti C, Salamone D, Lombardo D. Transferencia embrionaria quirúrgica y no quirúrgica en porcinos: experiencia inicial. En: V Jornadas Internacionales Instituto de Investigación y Tecnología en Reproducción Animal (INITRA).; 2017 p. 8-10.
- 199.** Herrán G. Criopreservación de gametos y embriones en animales domésticos. Universidad Cooperativa de Colombia , Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia.
- 200.** Do V, Walton S, Catt S. Cryopreservation of in vitro-produced bovine embryos by vitrification: In pursuit of a simplified, standardized procedure that improves pregnancy rates to promote cattle industry use. *Biotechnology in Animal Husbandry*. 2020; 36(3): p. 251-270.
- 201.** Hernández J, Moreno L, Navarro M, Ambriz D, Rodríguez J. Ventajas de la vitrificación con relación a la congelación en eyaculados de ovino. *Revista de Salud Animal*. 2018; 40(1): p. 1-7.
- 202.** Estudillo E, Jiménez A, Bustamante P, Palacios C, Velasco I, López A. Cryopreservation of Gametes and Embryos and Their Molecular Changes. *Int J Mol Sci*. 2021; 22(19): p. 10864.
- 203.** González C, Jiménez H, Rugeles L, Bejarano D. Banco de germoplasma animal para la alimentación y la agricultura. *Agrosavia*.
- 204.** Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Normas para bancos de germoplasma de recursos fitogenéticos para la alimentación y la agricultura..
- 205.** Jiménez H, Velazquez J, Neira E, Bejarano D. Estado actual del Banco de Germoplasma Animal en Colombia: organización y manejo. *Archivos Latinoamericanos de Producción Animal*. 2021; 29(3-4): p. 151-162.

- 206.** Díaz N, López P. Protocolos de criopreservación de semen bovino. Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad Ciencias de la Salud. Programa Medicina Veterinaria y Zootecnia.
- 207.** Balcázar A, Bieta M. Superovulación y transferencia de embriones. En Rangel L, Hernández J. Fisiología reproductiva de los animales domésticos.: Universidad Autónoma de México; 2023. p. 321-346.
- 208.** Arangure J, Rincón X, roman R. Aplicacion de la Genetica molecular en la Produccion Animal. Revista Ecuatoriana de Ciencia Animal. 201; 1(1).
- 209.** Araya I, Sevilla F, Gonzáles J, Matamoros K, Valverde A. La criopreservación del germoplasma de especies ganaderas: Un paso hacia la sostenibilidad. Agronomía Mesoamericana. 2025; 36: p. 61375.
- 210.** García F. Biotecnología embrionaria: Transferencia de embriones en ganado vacuno. Universidade de Santiago de Compostela, Facultad de Veterinaria.
- 211.** Aréchiga C, Cortés Z, Hernández P, Flores G, Rochín F, Ruiz E. Revisión: Función y regresión del cuerpo lúteo durante el ciclo estral de la vaca. Abanico veterinario. 2019; 9: p. e924.
- 212.** Ochoa E. Efecto de la permanencia del dispositivo con progesterona y dosis adicional de prostaglandina sobre la dinámica folicular y tasa de preñez en vacas lecheras sincronizadas con el protocolo CO-SYNCH. Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Agropecuarias.
- 213.** Rodríguez , R , Chavarría I, Meza C, Alvarado A, Morales J. Eficiencia reproductiva de Ovsynch + CIDR en vacas Holstein bajo un esquema de inseminación artificial a tiempo fijo en el norte de México. Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias. 2018; 9(3): p. 507-517.
- 214.** Zapata S, Ruíz L. Efectividad del dispositivo intravaginal en su primer y segundo uso en inseminación artificial a tiempo fijo en bovinos Girolando. Universidad Tecnológica de Pereira.
- 215.** Aragunde R. Aplicación de ecg en diferentes momentos dentro de un protocolo de inducción de la ovulación en vacas de carne en anestro con cría al pie. Uruguay: Universidad de la República, Facultad de Veterinaria.
- 216.** Guillén M, Herrera J, Arroyo C, Rojas S, Molina R. Evaluación de protocolos de sincronización para inseminación artificial con y sin estrógenos en novillas. Nutrición Animal Tropical. 2024; 19(1): p. 91-124.

- 217.** Kırbaş M, Köse M, Bülbül B, Dursun Ş, Demirci U, Erduran H, et al. Sincronización del estro mediante progesterona+diferentes gonadotropinas o rubor+efecto carnero en época reproductiva en ovejas. *Revista MVZ Córdoba*. 2025; 30(2): p. e3570.
- 218.** Ávila B, García E, Molina P, Peralta J, Sánchez M. Sincronización del estro en ovejas de pelo mediante protocolo basado en prostaglandinas + GnRH. *CienciaUAT*. 2019; 13(2): p. 141-151.
- 219.** Martí D. Sincronización y ovulación en la especie porcina. Universitat de Lleida.
- 220.** McCue P. Equine Reproductive Procedures. En *EmbryoCollection*. Dascanio, J; McCue, P.: John Wiley & Sons, Inc; 2014. p. 165-169.
- 221.** López S. Práctica empresarial Hacienda san Juan de cañas: Comparación de 2 protocolos de inseminación artificial a término fijo con diferentes inductores de ovulación en vacas Brahman y Senepol. Unilasallista Corporación Universitaria, Facultad de Ciencias Agropecuarias.
- 222.** Mancheno C, Campoverde D, Mancheno P, Llerena C. Maduración in vitro de ovocitos, análisis y perspectivas en la reproducción animal. *Dominio de las Ciencias*. 2024; 10(1): p. 1221-1237.
- 223.** De León R, González R, Flores K. Efecto del método de capacitación espermática bovina sobre la concentración y tasa de fertilización in vitro. *Ciencia Agropecuaria*. 2021;(33): p. 64-75.
- 224.** Rodríguez W. Estandarización de procedimientos para la producción in vitro de embriones ovinos en el laboratorio de reproducción animal en el centro académico Guatiguará – Piedecuesta. Universidad Cooperativa de Colombia , Facultad de Medicina Veterinaria.
- 225.** Trejo F, Reyes H, Rosales J, Bautista Y, Ruiz M, González A. Producción de embriones in vitro en bovinos de razas de carne, bajo condiciones de trópico seco: efecto de raza. *Archivos Latinoamericanos de Producción Animal*. 2023; 31(Supl.1): p. 61-65.
- 226.** Quispe C, Ancco E, Solano J, Unchupaico I, Mellisho E. Capacidad de desarrollo embrionario de ovocitos de bovino recuperados vía ultrasonografía y de ovarios de matadero. *Rev Inv Vet Perú*. 2018; 29(4): p. 1114-1121.
- 227.** Ferré L, Kjelland M, Strøbech L, Hyttel P, Mermillod P, Ross P. Reseña: Avances recientes en la producción in vitro de embriones bovinos: historia y métodos de la biotecnología reproductiva. *Animal*. 2020; 14(5): p. 991-1004.

- 228.** Thibier M, Perry G. IETS management of the challenges associated with embryo pathogen interaction. *Reprod Fertil Dev.* 2023; 36(2): p. 16-26.
- 229.** Hernández O. Técnicas de reproducción asistida en caballos: la fecundación in vitro. Universidad de Zaragoza, Departamento de Patología Animal, Área de Medicina y Cirugía Animal.
- 230.** Domínguez R, Sánchez F, López J. Manual de biotecnologías reproductivas y conservación de germoplasma; 2020.
- 231.** Arias C. Manual de procedimientos para la colecta y evaluación de la calidad seminal, de semen fresco y refrigerado de los reproductores del criadero san Antonio en Manizales – Caldas. Bucaramanga: Universidad Cooperativa de Colombia, Facultad de Medicina Veterinaria.
- 232.** Valverde A, Barquero V, Carvajal V. Biotecnología aplicada al estudio de la movilidad del semen porcino. *Agronomía Mesoamericana.* 2021; 32(2): p. 662-680.
- 233.** Pérez I. Ácido-base: el equilibrio entre la química y práctica clínica. *Arch Neurocién.* 2014; 19(3): p. 164-165.
- 234.** Allende R, Arisnabarreta E. Fisiología espermática, producción de semen y evaluación de la calidad seminal..
- 235.** Kopeika J, Thornhill A, Khalaf Y. The effect of cryopreservation on the genome of gametes and embryos: principles of cryobiology and critical appraisal of the evidence. Actualización sobre reproducción humana. 2014; 21(2): p. 209–227.
- 236.** Serpa E, De la Cruz F. Eficacia de tres protocolos de criopreservación de espermatozoides equinos con diferentes velocidades de enfriamiento sobre la calidad espermática postdescongelación. UCUENCA, Facultad de Ciencias Agropecuarias.
- 237.** Molano D, Lombana H. Fundamentos y métodos para la dilución y congelación de semen en bovinos. Universidad Cooperativa de Colombia, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia.
- 238.** Yáñez I, Catalán J, Rodríguez J, Miró J, Yeste M. Advances in sperm cryopreservation in farm animals: Cattle, horse, pig and sheep. *Animal Reproduction Science.* 2022; 246: p. 106904.

- 239.** D Arbaiza M, Cabrera P. Efecto de la criopreservación espermática en la fragmentación del ADN, viabilidad, y parámetros cinéticos en toros Brown Swiss. *Revista Colombiana de Ciencia Animal - RECIA*. 2021; 13(1): p. e787, 2021.
- 240.** Valverde A, Madrigal M. Sistemas de análisis computadorizado de semen en la reproducción animal. *Agron. Mesoam*. 2018; 29(2): p. 469-484.
- 241.** Salinas P. Citometría de flujo y sexaje de espermatozoides en animales. *Int. J. Med. Surg. Sci*. 2016; 3(3): p. 893-902.
- 242.** Dias S, Carvalho J, Várzea J, Martins M. Inseminación artificial de tiempo fijo en ganado extensivo. *Millenium*. ; 2(13): p. 23-28.
- 243.** Castaño F, Guimarães J, Da Costa E, Cardona J, Gómez V, Ramírez C. Semen sexado a través de citometría de flujo y centrifugación por gradiente de concentración. *Revista de Medicina Veterinaria*. ;(36): p. 121-133.
- 244.** Picardi L. Los pasos de la genética animal en el siglo XXI. *Ciencia e Investigación*. 2017; 67(1): p. 43-47.
- 245.** Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Métodos de mejora genética en apoyo de una utilización sostenible. Estado de la cuestión en la gestión de los recursos zoogenéticos. En *La segunda evaluación del estado de los recursos zoogenéticos mundiales para la alimentación y la agricultura*..
- 246.** Méndez L, Salinas M. Marcadores Moleculares en Gametos. Universidad Cooperativa de Colombia, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia.
- 247.** Domínguez J, Medellín A, Aguilar N, Jahuey F, Rodríguez F. Definición y análisis del panel de polimorfismos de nucleótido simple a utilizar en pruebas de paternidad para tres razas de bovinos. *Revista mexicana de ciencias pecuarias*. 2021; 12(3): p. 987-995.
- 248.** Carvajal A, Levicoy D, de la Barra R. Uso de marcadores genéticos para aumentar la prolificidad en ovinos. *Instituto de Investigaciones Agropecuarias*.
- 249.** Paredes F, Trejo D, Herrera E, Arellano W, Rodríguez F, Sifuentes A. La identificación de genes candidatos para rasgos de la reproducción en ganado utilizando un enfoque de redes de interacciones funcionales. *Revista mexicana de ciencias pecuarias*. 2020; 11(3): p. 894-904.

- 250.** Fioretti C. Sitio Argentino de Producción Animal. [Online].; s/f. Acceso 20 de enero de 2026. Disponible en: https://www.produccion-animal.com.ar/genetica_seleccion_cruzamientos/bovinos_de_carne/85-marcadores-geneticos.pdf.
- 251.** Amaya A, Martínez R, Cerón M. Evaluaciones genéticas en bovinos por medio del uso del mejor predictor lineal insesgado genómico en una etapa. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*. 2019; 21(1): p. 19-31.
- 252.** Peralta E, Suárez N, San Miguel J. La selección genómica. *Vaca Pinta*. 2019;(14): p. 88-96.
- 253.** Martínez N, Melero S, Marqués M, Bayón Y. Aplicaciones del sistema CRISPR-Cas9 a la modificación genética en animales domésticos. *Ambiociencias*. 2020; 17: p. 32-45.
- 254.** Higuera M, Mínguez C. Edición genética veterinaria: principios y aplicaciones del CRISPR en animales. Universidad Católica de Valencia , Facultad de Veterinaria y Ciencias Experimentales.
- 255.** Escobar S. Estudio del sistema kisspeptina y su papel en el inicio de la pubertad de la lubina europea (*Dicentrarchus labrax*): efecto de la restricción calórica en machos. *AquaTIC*. 2016;(45): p. 16-17.
- 256.** Mueller M, Van Eenennaam A. El poder sinérgico de la selección genómica, las tecnologías de reproducción asistida y la edición genética para impulsar el mejoramiento genético del ganado. *CABI Agric Biosci3*. 2022; 13.
- 257.** Ostos M. Reseña del “Gen SLICK” en bovinos criollos tropicales. Universidad de Ciencias Ambientales y Aplicadas , Facultad de Ciencias Agropecuarias.
- 258.** Biblioteca del Congreso Nacional. Mejoramiento genético animal y preservación de los recursos zoo genéticos. Chile: Departamento de Estudios, Extensión y Publicaciones.
- 259.** Urban W, Kropacz M, Łach M, Jankowska A. CRISPR-Cas9 in the Tailoring of Genetically Engineered Animals. *Current Issues in Molecular Biology*. 2025; 47(5): p. 330.
- 260.** Vargas J. Avances, técnicas y aplicación de la Clonación en Bovinos. Universidad Cooperativa de Colombia, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia.
- 261.** Portillo L, Santacruz F. Totipotencia celular: Una revisión y aplicación del concepto. *Scientia-CUCBA*. 2004; 6(1-2): p. 13-18.

- 262.** Delgado R. Maduración in vitro de ovocitos en metafase II de vacas post mortem a través de la técnica de fijación. Universidad Nacional Agraria La Molina, Escuela de Posgrado. Maestría en Producción Animal.
- 263.** Cortez J, Segura G, Murga N. Impacto de la reprogramación celular (células de fibroblastos y cúmulos) en la producción de clones bovinos. *Revista Veterinaria*. 2021; 32(2): p. 216–220.
- 264.** Lagutina I, Ponce D, Díaz R, Castañeda F, Mesías I, Galli C, et al. Clonación de vacas adultas por transferencia nuclear con células de la granulosa mural ovárica. *Spermova*. 2019; 9(1): p. 19 - 27.
- 265.** Triantaphyllopoulos K, Ikononopoulos I, Bannister A. Epigenetics and inheritance of phenotype variation in livestock. *Epigenetics & Chromatin*. 2016; 9(31).
- 266.** Constante M. Impacto de la clonación de embriones en los parámetros genómicos reproductivos en bovinos de carne (*Bos taurus*) mantenidos en ambiente tropical. Universidad Técnica de Cotopaxi, Maestría en Ciencias Veterinarias.
- 267.** Vázquez R, Ambríz D, Trejo A, Navarro M. Estado actual de la clonación de ovinos. En Trejo A, Ambríz D, Navarro M, Vargas B. *Avances en la Reproducción y Conservación de Mamíferos Domésticos y Silvestres.*: Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa; 2023. p. 125-142.
- 268.** García M. Animal breeding in the age of biotechnology: The investigative pathway behind the cloning of Dolly the sheep?. *History and Philosophy of the Life Sciences*. 2015; 37(3): p. 282-304.
- 269.** Ahumada M. Etnozootecnia y conservación de recursos zoogenéticos. Universidad Católica de Córdoba, Facultad de Ciencias Agroperecuaria.
- 270.** Ehab S, Alshammari M, Abdelazim A, Assiri A. El ovocito de mamífero: un centro central para la reprogramación celular y la pluripotencia. *Stem Cells and Cloning: Advances and Applications*. 2025; 18: p. 15-34.
- 271.** Mangiavacchi P, Caldas M, Mendonça M, Rumpf R, Lemos P, Alves C, et al. Multi-locus DNA methylation analysis of imprinted genes in cattle from somatic cell nuclear transfer. *Theriogenology*. 2022; 186: p. 95-107.

- 272.** Czernik M, Toschi P, Iuso D, Zacchini F. 39 Placenta abnormalities in sheep somatic cell clones at 20 days of gestation. *Reproduction, Fertility and Development*. 2014; 27(1): p. 112.
- 273.** Mahatthanadull S, Thanaboripat D. *Animal Biotechnology and Ethical Issues*. *Current Applied Science and Technology*. 2021; 21(2): p. 408-417.
- 274.** Girón G. Las fronteras éticas de las aplicaciones biotecnológicas. *Apuntes de bioética*. 2018; 1(1): p. 104-114.
- 275.** Bilański G. Clonación de mamíferos: regulación y participación pública en Argentina y Reino Unido. *Revista CTS*. 2020; 15(44): p. 43-70.
- 276.** Flores C. Avances en la genética del ganado bovino y las tendencias de investigación actual. *Horizon Nexus Journal*. 2024; 2(1): p. 31-45.
- 277.** Qu P, Wang Y, Zhang C. Insights into the roles of sperm in animal cloning. *Stem Cell Res Ther*. 2020; 11(65).
- 278.** Gibbons A, Bevacqua R, Fernández R, Pereyra F, Cueto M, Bruno M, et al. Transgénesis: una moderna biotecnología reproductiva en animales de interés zootécnico. *RIA. Revista de Investigaciones Agropecuarias*. 2014; 40(2): p. 141-144.
- 279.** Marqués M, Baro M, Nicolás S, Bayón Y. Biotecnología animal: Transgénesis en animales de granja. *Ambiociencias*. 2014;(12): p. 34-47.
- 280.** Yoon M, Jung H. Transplantation of Spermatogonial Stem Cells in Stallions. *Journal of Animal Science and Technology*. 2024; 66(4).
- 281.** Binsila B, Tomcy A, Krishnappa B, Arangasamy A, Ramachandran N, Selvaraju S. Avances y desafíos biotecnológicos actuales en el cultivo y trasplante de células madre espermatogoniales en animales. *The Indian Journal of Animal Reproduction*. 2025; 46(2): p. 10-16.
- 282.** Min Gim G, Jang G. Perspectivas sobre la aplicación de la edición genómica al ganado. *J Vet Sci*. 2024; 25(1): p. e10.
- 283.** Ossa G, López J, Garcés J. Heredabilidad y tendencias genéticas para caracteres del crecimiento en bovinos criollos. *Archivos Latinoamericanos de Producción Animal*. 2021; 29(34).
- 284.** Singh P, Azmal S. Impact of CRISPR-Cas9-Based Genome Engineering in Farm Animals. *Ciencias Veterinarias*. 2021; 8(7): p. 122.

- 285.** Rojas J, Rojas E, Ugarte C, Strandberg E. Tecnologías de mejoramiento genético en animales. El Bovino criollo. Una alternativa ante el cambio climático. 2018;(1): p. 45-63.
- 286.** Gadea J, Navarro S, Piñero C, Quintero M, Crespo S, Romero J, et al. La edición genética porcina como herramienta de control de las enfermedades vírales porcinas. Suis. 2024;(209): p. 20-23.
- 287.** Marinone A, Kaiser G, Hozbor F, Mucci N. Biotécnicas reproductivas en la especie porcina: pasado, presente y futuro. RIA. 2018; 44(2): p. 25-38.
- 288.** Pym R. Métodos genéticos para mejorar el rendimiento en condiciones subóptimas. En Pym R. Genética y cría de aves de corral en los países en desarrollo.; 2010.
- 289.** Saavedra K. Avances científicos recientes en la calidad de vida de los animales en la producción avícola. Horizon Nexus Journal. 2023; 1(4): p. 1-15.
- 290.** Toalombo P, Andino P, Arboleda L, Santillán D, Santillán J. Procesos y caracterización del manejo productivo de un grupo genético de gallinas criollas, Riobamba, Ecuador. Ciencias del Agro, Ingeniería, y Tecnología. 2024;(42).
- 291.** Choi H, Han Y, Han J. Un procedimiento paso a paso para producir quimeras germinales en pollo mediante trasplante de células. Journal of Visualized Experiments. 2025;(226).
- 292.** Villaverde S. Obtención, almacenamiento y morfometría de espermatozoides aviares: aplicación para la caracterización y criopreservación de espermatozoides de especies silvestres. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Veterinaria.
- 293.** Zambrano C. Valoración de tres dilutores en la criopreservación de semen de gallos de riña. Ecuador: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias Pecuarias.
- 294.** Ramón M, Garzón J. Evaluación de la inseminación artificial en gallinas criollas ecuatorianas. Revista Científica Arbitrada Multidisciplinaria PENTACIENCIAS. 2025; 7(5): p. 127-143.
- 295.** Novillo A. Evaluación de la fertilidad de gallinas criollas inseminadas con esperma de gallo criopreservado con 8% de glicerol. Universidad Católica de Cuenca, Medicina Veterinaria.
- 296.** Oishi I, Yoshii K, Miyahara D. Targeted mutagenesis in chicken using CRISPR/Cas9 system. Sci Rep. 2016; 6(1): p. 23980.

- 297.** Khwatenge C, Nahashon S. Recent Advances in the Application of CRISPR/Cas9 Gene Editing System in Poultry Species. *Frontiers in Genetics*. 2021;; p. 627714.
- 298.** Bajaan A. La inseminación artificial en aves: un enfoque biotecnológico. Universidad Técnica de Babahoyo, Facultad de Ciencias Agropecuarias.
- 299.** Chamba H, Benítez E, Pesántez M. Factores predisponentes para la enfermedad quística ovárica bovina y su efecto en la eficiencia reproductiva. *Revista de Medicina Veterinaria*. 2017;(35): p. 17-28.
- 300.** Guzmán M. La importancia de los quistes ováricos en la ganadería de leche bovina. Universidad Cooperativa de Colombia, Facultad de Ciencias de la Salud, Medicina Veterinaria y Zootecnia.
- 301.** Falceto M, Ausejo R, Dahmani Y, Bonastre C, Mitjana O. Utilidad del estudio del aparato genital de las cerdas y verracos eliminados en granjas y centros de inseminación. *Sitio Argentino de Producción Animal*.
- 302.** Bolarín A, Lopes T. Estacionalidad y función ovárica en cerdas cíclicas: herramientas de control. *Suis*. 2022;; p. 20-25.
- 303.** Ramírez L. Anestro post parto influenciado por factores como la nutrición y alimentación. Universidad Cooperativa de Colombia, Facultad de Ciencias de la Salud, Medicina Veterinaria y Zootecnia.
- 304.** Toala R, Sosa P, Burgos D, Roller F. Pérdida de la preñez en la hembra bovina y estrategias para mejorar la eficiencia en los programas de reproducción asistida. *La Técnica Revista de las Agrociencias*. 2024; 14(1): p. 1-11.
- 305.** Carrion P. Parámetros reproductivos de mayor importancia en ganadería porcina. Universidad Técnica de Babahoyo, Facultad Ciencias Agropecuarias.
- 306.** Castaño F, Rugeles C, Betancur C, Ramírez C. Impacto del estrés calórico sobre la actividad reproductiva en bovinos y consideraciones para mitigar sus efectos sobre la reproducción. *Revista Biosalud*. 2014; 13(2): p. 84-94.
- 307.** Luzbel R, Vanina L, Jaureguiberry M, Dominguez G, Migliorisi L, Albarracín D, et al. Endometritis subclínica en vacas de Tambo: diagnóstico, prevalencia e impacto sobre la eficiencia reproductiva. *SPERMOVA*. 2014; 4(2): p. 105-111.

- 308.** Molina R, Matthew L. La inflamación uterina afecta el desempeño reproductivo de las vacas lecheras: una revisión. *Agronomía Mesoamericana*. 2018; 29(2): p. 449-468.
- 309.** Suarez V, Martínez G. Consecuencias reproductivas y sanitarias de los abortos bovinos en la cuenca lechera del Valle de Lerma, Salta, Argentina. *Sección Ciencias veterinarias*. 2021; 20(2): p. 68-76.
- 310.** Bustillo J, Melo J. Parámetros reproductivos y eficiencia reproductiva en ganado bovino. Universidad Cooperativa de Colombia, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia.
- 311.** Instituto Nacional Tecnológico (INATEC). Manejo productivo y reproductivo en bovinos, ovinos, caprinos y equinos..
- 312.** Zepeda L. Embriología del sistema reproductor. En Anzaldúa S, Zepeda L. *Embriología Veterinaria*.: Universidad Nacional Autónoma de México; 2023. p. 224-251.
- 313.** Nuñez R. Organización y endocrinología del aparato reproductor masculino. En Stornelli M, Luzbel R. *Manual de reproducción de animales de producción y compañía*.: Universidad Nacional de la Plata ; 2016. p. 90-104.
- 314.** Palma J, Castellón J, Guharay F. Manejo zoonosanitario de ganado bovino..
- 315.** Valdivia J. Vida intracelular de *Corynebacterium pseudotuberculosis*. Tesis Doctoral. Universidad de las Palmas de Gran Canaria , Instituto Universitario de Sanidad Animal y Seguridad Alimentaria.
- 316.** Scheeren V, Sancler Y, El-Sheikh H, Kastelic J, Alvarenga M, Papa F. Update on Seminal Vesiculitis in Stallions. *Journal of Equine Veterinary Science*. 2020; 94: p. 103234.
- 317.** Aguilar F, Suárez F, Tirgo F. Histofilosis en bovinos: microbiología, epidemiología y patología. *Veterinaria Mexico OA*. 2024; 11: p. 1-12.
- 318.** Nuñez R, Stornelli M. Enfermedades reproductivas del macho. En Stornelli M, Luzbel R. *Manual de reproducción de animales de producción y compañía*.: Universidad Nacional de la Plata; 2016. p. 289-313.
- 319.** Vispo P, Stahringer R, Prieto N. Informe memoria de actividad grupo reproducción y sanidad animal 2016: Seguimiento y evaluación de toros (Código Prod.: 3913 - Código Act.: 11305). Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA).

- 320.** Acevedo C. Evaluación de la aptitud reproductiva en toros de la ganadería Maracaibo de la raza Brahman y sus cruces. Universidad Cooperativa de Colombia, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia.
- 321.** Fornies F. Impacto de las micotoxinas en la producción porcina. Universidad Nacional Río Negro , Escuela de Veterinaria y Producción Agroindustrial.
- 322.** Pimbosa D, Escaleras. J. Toxicología de Micotoxinas en la Producción Animal: Estrategias de Mitigación y Nuevas Alternativas Terapéutica. Arandu UTIC. 2025; 12(1): p. 2470–2492.
- 323.** Zhang G, Feng S, Wang J, Han D, Yan L. Zearalenona: una micotoxina con diferente efecto tóxico en las células de la granulosa de animales domésticos y de laboratorio. *Frontiers in Genetics*. 2018; 9: p. 667.
- 324.** Polo C, Lacera A, Polo J. Intoxicación de animales por metales pesados: Estudio de casos clínicos. *Divulgación Científica Veterinaria*.
- 325.** Callejo A. Bioseguridad en las granjas de Producción de leche de Vaca. *Producción Animal*. 2016;(294): p. 58- 64.
- 326.** Mata V, Acedo E, Pinelli A. Bioseguridad. Limpieza y desinfección.. En Castillo S, Ruíz R, Hernández J, Gasa J. *Manual de Buenas Prácticas de Producción Porcina. Lineamientos generales para el pequeño y mediano productor de cerdos.: Red Porcina Iberoamericana.*; 2012. p. 14-25.
- 327.** Agrocalidad. Instructivo para los procesos de certificación y recertificación de predios libres de brucelosis y tuberculosis bovina. Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca.
- 328.** Morales B. Manejo del plan de bioseguridad en un plantel porcino de la provincia de el Oro. Universidad Técnica de Machala, Facultad de Ciencias Agropecuarias Medicina Veterinaria y Zootecnia.
- 329.** Ministerio de Agricultura Servicio Agrícola y Ganadero. Sistema oficial de bioseguridad en establecimientos pecuarios manual bioseguridad en establecimientos porcinos industriales. Chile .
- 330.** Rodríguez E, Calvo L. Zoonosis emergentes epidémicas y pandémicas consideraciones de actualidad. *Artículo Científico de la Organización Colegial Veterinaria Española*. 2020;(1): p. 3-37.

331. Cárdenas Z. La brucelosis bovina y sus factores de riesgo: evaluación a nivel mundial y en Colombia. Universitat Autònoma de Barcelona , Facultt de Veternària.
332. Martínez V. Manejo Reproductivo, Bioseguridad y Principales Enfermedades en Granjas Porcícolas en los Estados de Guanajuato y San Luis Potosí. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.
333. Fernández J. Plan sanitario integral aplicado a explotaciones de ganado vacuno. Vaca Pinta. 2024;(48): p. 112-122.
334. Organización Mundial de Sanidad Animal (OMSA). Código Sanitario para los Animales Terrestres..
335. Loor D, Macias J. Técnicas in vivo e in vitro sobre calidad y viabilidad de embriones en bovinos. Revista Científica Arbitrada Multidisciplinaria PENTACIENCIAS. 2025; 7(1): p. 274-282.
336. Agrocalidad. Manual de procedimientos para el registro de operadores. República del Ecuador: Ministerio de Agricultura y Ganadería.
337. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Genética animal..
338. Moreno M. Biotecnología, ética y sociedad: Monografía técnica M3856121; 2025.
339. Graeff N, Jongsma K, Johnston J, Hartley S, Bredenoord A. The ethics of genome editing in non-human animals: a systematic review of reasons reported in the academic literature. Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci. 2019; 374(1772): p. 20180106.
340. Asamblea Nacional de la Nación. Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación. República del Ecuador.
341. Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria. Manual de bienestar animal: Un enfoque práctico para el buen manejo de especies domésticas durante su tenencia, producción, concentración, transporte y faena (Versión 1). Sitio Argentino de Producción.
342. Ormandy E, Dale J, Griffin. Ingeniería genética de animales: cuestiones éticas, incluidas las preocupaciones sobre el bienestar. The Canadian Veterinary Journal. 2011; 52(5): p. 544-550.
343. Aragonés P, Bermúdez I, Ortiz I, Sánchez J, Madrigal M. Aspectos relacionados con la fertilización in vitro (FIV) en bovinos, una revisión bibliográfica. Revista AgroInnovación en el Trópico Húmedo. 2022; 3(1): p. 52-61.

344. Sánchez J. Aplicación práctica de los conocimientos de la epigenética en granjas de vacuno lechero. *Vaca Pinta*. 2025;(50): p. 164-170.
345. Jair R. Ganadería de precisión, una revisión a los avances dentro de la avicultura enfocados a la crianza de pollos de engorde. *Prisma Tecnológico*. 2023; 14(1): p. 38-48.
346. Chávez N, González R, Marrero Y, González L. la inteligencia artificial en la reproducción bovina. *Ciencias Universitarias*. 2024; 22: p. 1-5.
347. Lascano S, Rivera L, Balarezo L. Sensores inteligentes y técnicas de machine learning para la detección del estrés en ganado bovino. *Science Journal*. 2025; 3(3): p. 366-355.
348. El-Halim H. Integración de tecnologías de reproducción asistida e inteligencia artificial para optimizar la fertilidad y la selección genética en la producción ganadera. *Mansour Discover Applied Sciences*. 2025; 7(1143): p. 1-18.
349. Cervera B, Sánchez D, Zamudio A, Guevara S. Importancia de la nanotecnología en las ciencias veterinarias. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*. 2023; 7(1): p. 9549-9561.
350. Andino L, Frías O, Chucuyan C, Sánchez J. Nanotecnología Aplicada a la Salud Animal: Avances, Potencial y Retos. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*. 2025; 8(6): p. 1752-11768.
351. Morales L, Ponce A, Becerri C, Canseco R. In vitro: desarrollo de embriones de ganado lechero tropical criopre-servados mediante vitrificación o congelación lenta. *Revista Biológico Agropecuaria Tuxpan*. 2024; 12(2): p. 95-107.
352. Coutinho V, Lyko F. Rapid Epigenetic Adaptation in Animals and Its Role in Invasiveness. *Integrative and Comparative Biology*. 2020; 60(2): p. 267–274.
353. Gurunathan S, Kang M, Song H, Hoi Kim J. The role of extracellular vesicles in animal reproduction and diseases. *Journal of Animal Science and Biotechnology*. 2022; 13(62): p. 1-23.
354. Blanco J, Romero J, Montilla M. Fijación biológica de nitrógeno y producción bovina en ambientes tropicales. *Ciencia y Agricultura*. 2023; 20(3): p. 16684.
355. González C, Gómez T, Galindo F. Recursos naturales y uso de las tierras ganaderas en el trópico. En González E, Dávalos J. Estado del arte sobre investigación e innovación

tecnológica en ganadería bovina tropical. México: Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT); 2015. p. 38-47.

- 356.** Botigelli R, Gultinan C, Braz R, Denicol A. Gametogénesis in vitro a partir de células madre embrionarias en especies ganaderas: avances recientes, oportunidades y desafíos a superar. *Journal of Animal Science*. 2023; 101: p. skad137.
- 357.** Grasso D, Castillo A, Castillo F, Castro C. Casos de uso de blockchain en las cadenas de valor agropecuarias. América Latina y el Caribe. Banco Interamericano de Desarrollo.



ISBN: 978-9942-609-66-3

