

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
FACULTAD DE MEDICINA VETERINARIA Y ZOOTECNIA

**FACTORES QUE AFECTAN LA CAPACIDAD REPRODUCTIVA DEL  
VERRACO:  
ESTUDIO DE REVISIÓN**

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**MÉDICA VETERINARIA ZOOTECNISTA**

PRESENTA:

**ROSA ELENA BALLADARES GÓMEZ**

Asesores:

MVZ. MCV. ROBERTO GUSTAVO MARTÍNEZ GAMBA

MVZ. MC. SUSANA ESPINOSA HERNÁNDEZ



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## **DEDICATORIA**

*A mis padres*

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis padres y hermanos:

**Eudoxia Gómez Sánchez, Daniel Balladares del Carmen, Valentín, Javier, Elizabeth y Daniel Saúl Balladares Gómez.**

Gracias por su confianza y apoyo.

A mis asesores:

**Roberto Gustavo Martínez Gamba y Susana Espinosa Hernández.**

Gracias por compartir conmigo sus conocimientos y amistad, y por ser un ejemplo a seguir.

A mis hermanos de camada:

**Ana Villegas, Adriana Almaraz, Alejandra Herrera, Angélica Martínez, Erick Guerrero.**

Gracias por brindarme su amistad y por ser un apoyo durante el camino que recorrimos juntos.

A mi *alma mater*:

**Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, UNAM**

Gracias por la enseñanza de calidad que me brindo.

	<b>Páginas</b>
<b>RESUMEN</b>	1
<b>INTRODUCCIÓN</b>	2
<b>CAPÍTULO I. FISIOLÓGÍA DEL VERRACO</b>	4
<b>1.1. Introducción</b>	4
<b>1.2. Diferenciación y desarrollo testicular</b>	4
<b>1.3. Espermatogénesis</b>	8
<b>1.4. Maduración espermática en epidídimo</b>	12
1.4.1. Transito espermático en epidídimo	13
1.4.2. Características del esperma de la cola del epidídimo	15
<b>1.5. Endocrinología</b>	17
1.5.1. Hormona Liberadora de Gonadotropinas (GnRH)	17
1.5.2. Gonadotropinas	18
1.5.3. Inhibina	19
1.5.4. Andrógenos	19
1.5.4.1. Testosterona	20
1.5.5. Estrógenos	21
1.5.6. Factores de Crecimiento	22

<b>1.6. Pubertad</b>	26
1.6.1. Mecanismo hormonal que controla la presentación de la pubertad	27
1.6.2. Factores que afectan la presentación de la pubertad	27
<b>1.7. Transporte y capacitación de los espermatozoides</b>	28
<b>CAPÍTULO II. GENÉTICA DEL VERRACO</b>	33
<b>2.1. Introducción</b>	33
<b>2.2. Características a seleccionar</b>	33
2.2.1. Características del semen	37
2.2.1.1 Cantidad de Semen	39
2.2.1.2. Espermatozoides totales por eyaculado	40
2.2.2. Comportamiento de apareamiento y libido	40
2.2.3. Comportamiento de entrenamiento	41
2.2.4. Fertilidad	42
<b>2.3. Métodos de selección</b>	43
2.3.1. Selección Visual	43
2.3.2. Medición del rendimiento individual	44
2.3.3. Valor Estimado de Cruzamiento (EVB) y Mejor Selección Lineal Insesgada (BLUP)	44
2.3.4. Pruebas de genética molecular	46
<b>2.4. Alteraciones genéticas que afectan la reproducción</b>	52
<b>CAPÍTULO III. EFECTO DEL MEDIO AMBIENTE SOBRE LOS SEMENTALES</b>	55
<b>3.1. Introducción</b>	55
<b>3.2. Temperatura y humedad</b>	55

3.2.1. Choque térmico	57
3.2.2. Efecto del choque térmico sobre los parámetros reproductivos	59
3.2.3. Sistema Convencional (CONV) y Sistema de Enfriamiento por Evaporación (EVAP)	64
<b>3.3. Fotoperiodo</b>	66
<b>3.4. Instalaciones</b>	72
3.4.1. Ambiente Social	72
3.4.2. Alojamiento	73
<b>CAPÍTULO IV. NUTRICIÓN DEL VERRACO</b>	77
<b>4.1. Introducción</b>	77
<b>4.2. Nutrición y alimentación del futuro semental</b>	77
<b>4.3. Papel de los nutrientes sobre la actividad reproductiva del semental</b>	79
<b>4.3.1. Energía</b>	79
4.3.1.1. Mantenimiento	79
4.3.1.2. Crecimiento	82
4.3.1.3. Reproducción	83
4.3.1.4. Termorregulación	83
<b>4.3.2. Proteínas</b>	84
<b>4.3.3. Vitaminas</b>	88
4.3.3.1. Vitamina E	89
4.3.3.2. Biotina	91
4.3.3.3. Vitamina C	92

<b>4.3.4. Minerales</b>	93
4.3.4.1. Calcio (Ca) y Fosforo (P)	93
4.3.4.2. Selenio (Se)	94
4.3.4.3. Zinc (Zn)	97
<b>4.4. Principales ingredientes usados para la formulación de alimentos balanceados en cerdos</b>	99
4.4.1. Fuentes de energía	99
4.4.2. Fuentes de proteína	99
4.4. 3. Fuentes de vitaminas y minerales	99
4.4.4. Aditivos no nutricionales	100
<b>4.5. Suplementación de la dieta del verraco</b>	100
4.5.1. L-carnitina	100
4.5.2. Ácidos grasos Omega-3	103
<b>CAPÍTULO V. TÓXICOS</b>	107
<b>5.1. Introducción</b>	107
<b>5.2. Micotoxinas</b>	107
5.2.1. Zearalenona	109
5.2.2. Ocratoxinas	116
5.2.3. Fumonisinias	119
<b>5.3. Especies reactivas de Oxígeno (Radicales libres)</b>	121
5.3.1. Estrés oxidativo	121
5.3.2. Preservación del semen	124
5.3.3. Antioxidantes	126

<b>CAPITULO VI. ENFERMEDADES DEL VERRACO</b>	130
<b>6.1. Introducción</b>	130
<b>6.2. Enfermedades virales</b>	130
6.2.1. Virus del Síndrome Respiratorio y Reproductivo Porcino (PRRSV)	130
6.2.2. Circovirus porcino tipo 2 (PCV2)	136
6.2.3. Enfermedad del Ojo Azul	139
6.2.4. Virus de la enfermedad de Aujeszky	140
6.2.5. Parvovirus Porcina (PPV)	142
<b>6.3. Enfermedades bacterianas</b>	145
6.3.1. Infecciones ascendentes	145
6.3.2. Infecciones sistémicas	146
<b>6.4. Contaminación bacteriana del semen</b>	147
<b>CAPITULO VII. TERAPIA HORMONAL</b>	152
<b>7.1. Introducción</b>	152
<b>7.2. Hormona liberadora de gonadotropinas (GnRH)</b>	152
<b>7.3. Gonadotropina Corionica Humana (hGC)</b>	154
<b>7.4. Testosterona</b>	155
<b>7.5. Prostaglandina F2<math>\alpha</math> (PGF2<math>\alpha</math>)</b>	156
<b>7.6. Productos hormonales</b>	164
<b>CONCLUSIONES</b>	165
<b>LITERATURA CITADA</b>	166

## LISTA DE CUADROS

	<b>Pagina</b>
<b>1.1.</b> Comparación de las frecuencias de las fases pre-meiotica, meiotica y post-meiotica y la duración de la espermatogénesis en diferentes especies.	9
<b>1.2.</b> Principales sustancias que participan en el mantenimiento estructural de los testículos.	23
<b>1.3.</b> Principales sustancias que participan en la regulación de la espermatogénesis y en la supervivencia celular.	24
<b>1.4.</b> Principales sustancias que regulan la muerte celular programada (apoptosis).	26
<b>1.5.</b> Relación verraco: cerda en base al método de apareamiento.	32
<b>2.1.</b> Estimaciones de heredabilidad ( $h^2$ ) para características del semen de verraco.	37
<b>2. 2.</b> Media y desviación estándar (D.E) de los rasgos incluidos en los modelos animal (MA) 1-4.	38
<b>2.3.</b> La media y error estándar de la posta y la línea genética en la proporción de verracos que no pudieron ser entrenados para su colección.	42
<b>2.4.</b> Principales causas de reemplazo de los verracos en unidades de IA.	46

<b>2.5.</b> Locus de Rasgos Cualitativos (QTLs) para características reproductivas del verraco.	52
<b>3.1</b> Medias de cuadrados mínimos de las características calidad del semen de verraco.	61
<b>3.2.</b> Porcentaje de fertilidad después de someter a verracos a estrés térmico.	62
<b>3.3.</b> Características del semen y otros parámetros en el sistema convencional (CONV) y el sistema de enfriamiento por evaporación (EVAP) en postas de sementales.	65
<b>3.4.</b> Efecto del tipo de piso sobre la calidad del semen en postas con control de la temperatura ambiente.	74
<b>3.5.</b> Efecto de la cama sobre la calidad del semen en postas con control de la temperatura ambiente.	75
<b>3.6.</b> Efecto del tipo de división del corral sobre la calidad del semen en postas con control de la temperatura ambiente.	76
<b>4.1.</b> Determinación de la energía de mantenimiento en función del peso vivo (expresado en Kcal de energía metabolizable por día).	81
<b>4.2.</b> Requerimientos energéticos para un verraco adulto.	84
<b>4.3.</b> Requerimientos proteicos para un verraco adulto.	86
<b>4.4.</b> Requerimientos de proteína y aminoácidos de un verraco en producción en base al NRC (1998).	87
<b>4.5.</b> Requerimientos de vitaminas para el verraco reproductor.	89

<b>4.6.</b> Efectos del selenio y la vitamina E sobre la calidad espermática de verracos adultos y en la tasa de fertilización de las cerdas.	96
<b>4.7.</b> Requerimientos de minerales para los verracos.	98
<b>4.8.</b> Producción de espermatozoides totales por eyaculación con una dieta suplementada o no con ácidos grasos omega-3.	105
<b>5.1.</b> Las reservas de espermatozoides del testículo y del epidídimo ( $\times 10^9$ ) y la producción espermática diaria (PED) de los verracos púberes expuestos a FB <sub>1</sub> en la dieta.	121
<b>6.1.</b> Signos clínicos después de la infección natural o experimental con el virus de PRRS en verracos.	132
<b>6.2.</b> Efecto en la calidad seminal en verracos infectados con el virus de PRRS.	134
<b>6.3.</b> Periodo de tiempo máximo de excreción de PRRSV reportado para diferentes secreciones corporales en cerdos.	134
<b>6.4.</b> Virus de importancia en semen porcino y el riesgo de transmisión a través de la monta directa y/o inseminación artificial.	144
<b>6.5.</b> Fuentes de contaminación bacteriana de semen de porcino diluido.	148
<b>7.1.</b> Concentraciones hormonales y características del comportamiento sexual en verracos con implante falso y solución salina, verracos con implante de GnRHa y solución salina y verracos con implante de GnRHa tratados con PGF <sub>2</sub> $\alpha$ .	157
<b>7.2.</b> Productos hormonales comerciales de uso en cerdos, disponibles en el mercado.	164

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pagina</b>
1. Espermatogénesis en el verraco.	12
2. Tránsito espermático en epidídimo.	17
3. Pirámide de genética porcina.	34

## **RESUMEN**

**BALLADARES GÓMEZ ROSA ELENA.** FACTORES QUE AFECTAN LA CAPACIDAD REPRODUCTIVA DEL VERRACO: ESTUDIO DE REVISIÓN. Bajo la asesoría de los MVZ. MCV. Roberto Gustavo Martínez Gamba y MVZ. MC. Susana Espinosa Hernández.

Debido a que actualmente la información sobre el verraco, se encuentra dispersa en una gran cantidad de artículos científicos, boletines técnicos, libros, sitios web, etc., en el presente trabajo de tesis se recopila, revisa y resume la información relacionada con los factores que afectan el desempeño reproductivo del verraco, con la finalidad de que sirva como una referencia teórica para la optimización en el manejo del verraco en las producciones porcinas. Este trabajo está dirigido a Médicos Veterinarios Zootecnistas, estudiantes de la carrera de Medicina Veterinaria y Zootecnia, carreras afines y técnicos pecuarios. La presente tesis está dividida en 7 capítulos donde se abarcan temas relevantes como la fisiología del verraco, genética del verraco, efecto del medio ambiente sobre los sementales, nutrición del verraco, tóxicos, enfermedades del verraco y terapia hormonal.

## INTRODUCCIÓN

En el proceso reproductivo se encuentran involucrados varios elementos, como lo son la hembra, el verraco, el ambiente y los operadores. Cada uno de estos elementos interactúan y afectan el proceso de fertilización, por lo que si alguno de ellos se ve alterado da como resultado una baja en la eficiencia de la empresa porcina.

El éxito o fracaso de las operaciones para optimizar la reproducción, juegan un papel importante en el logro de las metas de producción de una granja comercial. Los parámetros productivos como el promedio de lechones nacidos totales y promedio de partos por cerda al año, están íntimamente ligados al logro o al fracaso de estas metas, que se verán reflejadas en los costos de producción.

El verraco contribuye con el 50% del material genético de cada camada, por lo que tiene una gran relevancia en la respuesta reproductiva de su progenie, respuesta que se ve reflejada en la fertilidad y en la prolificidad de estos últimos.

Con la implementación de la inseminación artificial (IA) como la principal tecnología reproductiva en el sector porcino, la selección de verracos que produzcan consistentemente eyaculados de alta calidad es crucial para las empresas porcinas, lo anterior, con el fin de asegurar la producción de un alto número de dosis de semen por eyaculado con buena capacidad de fertilización. Por lo tanto, un mejor conocimiento de los factores que afectan el desempeño reproductivo del verraco ayudará a mejorar la eficiencia de los verracos.

A pesar de que el verraco es un elemento fundamental en el proceso reproductivo y de su importancia en la fertilidad de la piara, el estudio del verraco ha recibido escasa atención y la mayoría de la información disponible referente a los sementales, se encuentra dispersa en una gran cantidad de artículos científicos, boletines técnicos, libros, etc. Por lo que en este trabajo de tesis se recopila, revisa y resume la información relacionada con los factores que afectan la capacidad reproductiva del verraco.

## **CAPÍTULO I.**

### **FISIOLOGÍA DEL VERRACO**

#### **1.1.INTRODUCCIÓN**

El proceso reproductivo del verraco es básico para el buen funcionamiento de una empresa porcina o de un centro de transferencia genética, por lo tanto es fundamental conocer los principales aspectos de la fisiología reproductiva del macho para poder tomar decisiones adecuadas sobre el manejo de este tipo de animal. Los principales aspectos fisiológicos que se deben conocer son: la espermatogénesis, la maduración en epidídimo, el transporte y capacitación de los espermatozoides, la endocrinología o las interrelaciones hormonales y la presentación de la pubertad. A continuación se describen cada uno de dichos aspectos.

#### **1.2.DIFERENCIACIÓN Y DESARROLLO TESTICULAR**

Durante el desarrollo embrionario, antes de la diferenciación sexual, las células germinales primordiales, que se originan en el epiblasto proximal, migran de la base del alantoides a través del mesenterio intestinal y llegan a poblar la cresta genital. Poco después, esas células colonizan las gónadas primitivas indiferenciadas que comienzan a transformarse en gonocitos. Las células pre-Sertoli son el primer tipo de células somáticas en diferenciarse en los testículos. Estas células probablemente se originan en el epitelio celómico y sus precursores se cree que expresan la determinación del sexo masculino con el gen *Sry* en el brazo corto del cromosoma Y. <sup>1</sup>

Las células de Sertoli juegan un papel crucial dirigiendo la determinación morfológica de los testículos, la cual ocurre en el cerdo al día 27. Las otras células somáticas del testículo son las células mioides peritubulares, las células endoteliales, fibroblastos y las células de Leydig. Aunque su origen preciso no está del todo establecido, se cree que penetran en la cresta genital por el conducto mesonéfrico, probablemente bajo la influencia de factores producidos por los precursores de células de Sertoli. Sin embargo, pocas células de Leydig se originan en esta región, lo que sugiere que las células mesenquimales presentes en la gónada indiferenciada también dan lugar a este tipo de células.<sup>2</sup>

La interacción morfológica entre las células germinales, células precursoras de las células de Sertoli y las células mioides peritubulares resulta en la formación de cordones seminíferos, y representan los eventos necesarios para el desarrollo normal de la espermatogénesis y para la inhibición de la progresión de la meiosis de los gonocitos, como ocurre en las hembras. En este aspecto, las células de Sertoli en mamíferos, juegan un papel fundamental en la diferenciación y desarrollo de la función testicular.<sup>1</sup>

El desarrollo del tracto reproductivo del macho y las características sexuales secundarias son regulados por los esteroides secretados por las células de Leydig fetales, las cuales son estimuladas por la hormona adrenocorticotrópica. En términos generales, la diferenciación de las células de Leydig y de las células de Sertoli, así como la formación de cordones seminíferos, son los principales cambios estructurales que se producen en las gónadas masculinas y estos eventos son cruciales para la función del aparato reproductor del macho.<sup>1</sup>

Aunque las células de Sertoli en mamíferos proliferan activamente durante el periodo fetal, los mecanismos regulatorios responsables de la proliferación son desconocidos. Sin embargo, se sabe que en mamíferos la hormona folículo estimulante (FSH) es el principal factor responsable de la proliferación de las células de Sertoli en la etapa postnatal, mientras que la hormona triyodotironina (T3) es responsable por el cambio de estas células de la mitosis a la condición de no-mitótico que ocurre antes de la pubertad.<sup>3</sup>

En cerdos, el primer período postnatal de proliferación de las células de Sertoli ocurre del nacimiento al primer mes de edad, cuando el número de células de Sertoli por testículo incrementa varias veces, mientras que otro notable aumento de las células se lleva a cabo entre el tercer y cuarto mes de edad. Estos períodos de mayor importancia de la proliferación de células de Sertoli coinciden con los más altos niveles de FSH en plasma y la sextuplicación de los cordones/túbulos seminíferos.<sup>2,4</sup>

En todas las especies de mamíferos investigadas hasta la fecha, incluyendo a los cerdos, se ha observado la nula proliferación de las células de Sertoli después de la pubertad. En cerdos, la mayoría de estos eventos son considerados como buenos marcadores morfológicos y funcionales de la diferenciación de las células de Sertoli, que tienen lugar del tercer al cuarto mes de edad.<sup>2,4</sup>

Ya que cada célula de Sertoli es capaz de soportar sólo un número relativamente fijo de células germinales de un modo específico por especie, el número total de células de Sertoli por testículo establecido durante el desarrollo testicular finalmente determina la magnitud del tamaño de los testículos y la producción espermática. En este sentido, todas

las condiciones en las que se ve afectada la actividad proliferativa de las células de Sertoli influyen en el número de espermatozoides por testículo.<sup>4</sup>

En los cerdos, el desarrollo de las células de Leydig consiste en una primera fase que ocurre durante el periodo fetal temprano y está relacionado con el desarrollo del tracto genital del macho, una segunda fase perinatal con destacada proliferación de células de Leydig y una tercera fase tiene lugar al comienzo de la pubertad a la edad adulta y es responsable del desarrollo de las características sexuales secundarias y del mantenimiento funcional de los órganos y estructuras andrógeno-dependientes, como las glándulas sexuales accesorias y la espermatogénesis.<sup>2</sup>

El aumento del peso corporal y testicular y la producción espermática probablemente requieren de más esteroides y células de Leydig por cada testículo. Una característica particular del cerdo, es la destacada proliferación de células de Leydig durante la segunda fase (perinatal). A pesar de que se desconoce la explicación funcional de estos hallazgos, esta información contrasta con los modelos normalmente estudiados, las células de Leydig en cerdos no están del todo diferenciadas al nacimiento.<sup>2</sup>

Con base en varios parámetros, como el peso testicular, evolución de la espermatogénesis, diámetro tubular, la liberación de las primeras espermátidas del epitelio seminífero y los niveles de testosterona en plasma, la pubertad y madurez sexual en la mayoría de las razas de cerdos tienen lugar entre las 20 y 32 semanas de edad. Durante el desarrollo testicular en cerdos, se ha observado una correlación positiva entre el número total de células de Sertoli, células de Leydig y células germinales por testículo, además de la correlación existente entre la FSH plasmática y los niveles de testosterona.<sup>2</sup>

### 1.3.ESPERMATOGÉNESIS

La espermatogénesis y su regulación son similares en todos los mamíferos,<sup>5</sup> aunque específicamente el proceso de espermatogénesis en verracos, se compone de tres fases morfológica y funcionalmente distintas:

- Fase Espermatogonial (proliferativa o mitótica)
- Fase Espermatocitaria (meiotica)
- Fase Espermiogénica (diferenciación)

Los cerdos presentan cuatro clases de espermatogonias:

- Espermatogonia indiferenciada tipo A [A único ( $A_s$ ), A par ( $A_{pr}$ ), A alineado ( $A_{al}$ )].
- Espermatogonia diferenciada tipo A ( $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ ,  $A_4$ ).
- Espermatogonia intermedia (In).
- Espermatogonia tipo B.<sup>2</sup>

Los espermatocitos primarios en el cerdo presentan un notable aumento de tamaño, el cual es seguido por una disminución dramática en el tamaño de las células durante la espermiogénesis de tal manera que, debido a los cambios en la cromatina y en la condensación nuclear, el volumen nuclear después de la espermiación logra solo el 2% del volumen inicial (disminuye de 500 a  $10 \mu\text{m}^3$ ).<sup>2,6</sup>

La eficiencia de la espermatogénesis en el verraco es alta, pues una espermatogonia atraviesa por 10 divisiones mitóticas antes de su diferenciación en un espermatocito; de este modo, la mayoría de las especies de mamíferos, producen diariamente de 4 a 40 millones de espermatozoides por gramo de tejido testicular.<sup>2,7</sup>

Como en todos los demás mamíferos, las células germinales en los cerdos se organizan en asociaciones específicas llamadas fases, estas asociaciones celulares pueden ser identificadas en la base de espermatoцитos y una de espermátides; la fase meiótica (meiosis I y meiosis II) y la fase postmeiótica (después de completar la meiosis hasta la espermiación) con dos generaciones de espermátidas y una de espermatoцитos. En verracos, cada ciclo espermatogénico dura de 8.6 a 9 días, mientras que la duración total de la espermatogénesis dura alrededor de 40 días, como resultado de aproximadamente 2 semanas por cada fase de la espermatogénesis (Cuadro 1.1).<sup>2,7</sup>

**Cuadro 1.1.** Comparación de las frecuencias de las fases pre-meiótica, meiótica y post-meiótica y la duración de la espermatogénesis en diferentes especies.

<b>Especie</b>	<b>Pre meiótica (%)</b>	<b>Meiótica (%)</b>	<b>Post meiótica (%)</b>	<b>Duración del ciclo (días)</b>	<b>Duración total de la espermatogénesis</b>
<b>Toro</b>	60.0	12.8	27.2	13.5	60.8
<b>Búfalo</b>	64.8	9.2	26.0	8.6	38.7
<b>Carnero</b>	52.7	7.2	40.1	10.6	47.7
<b>Cabra</b>	49.1	10.7	40.2	10.6	47.7
<b>Verraco*</b>	<b>28.3</b>	<b>11.7</b>	<b>60.0</b>	<b>8.6</b>	<b>38.7</b>
	<b>31.4</b>	<b>12.1</b>	<b>56.5</b>	<b>9.0</b>	<b>40.5</b>
<b>Jabalí</b>	35.2	14.4	50.4	9.0	40.5
<b>Garañón</b>	35.0	15.8	49.2	12.2	54.9
<b>Burro</b>	33.0	19.3	47.7	10.5	47.2
<b>Conejo</b>	48.4	11.0	40.6	10.9	49
<b>Perro</b>	37.4	11.5	51.1	13.6	61.2
<b>Gato</b>	45.5	17.6	36.9	10.4	46.8
<b>Rata</b>	23.7	5.7	70.6	12.9	58.0
<b>Ratón</b>	21.8	10.5	67.7	8.6	38.7
<b>Hámster</b>	25.8	7.5	66.7	8.7	39.2
<b>Hombre</b>	51.8	6.8	41.5	16.0	72

\*Diferentes rangos dados al verraco. Tomado de:<sup>2</sup>

Las células de Sertoli se estabilizan en la etapa prepuberal, mientras que las células germinales aumentan durante la fase post-puberal. En forma general el radio entre espermatogénesis y células de Sertoli muestra un mayor valor en animales de 12 meses de edad; en este momento las células de Sertoli desempeñan varias funciones importantes en la espermatogénesis como el soporte y la nutrición de las células germinales en desarrollo, compartimentación de los túbulos seminíferos por uniones estrechas para proporcionar un entorno protegido para el desarrollo de las células germinales, liberación final del espermatozoide hasta el lumen tubular, la secreción de líquido, proteínas y varios factores de crecimiento, fagocitosis de células germinales degenerándose o del exceso de citoplasma restante de los espermatozoides liberados. Las células de Sertoli también son clave en la mediación de las acciones de FSH y LH estimuladas por la producción de testosterona en los testículos. A los 9 meses de vida las células de Sertoli muestran un aumento en la capacidad de soporte, en este momento se estabilizan.<sup>8</sup>

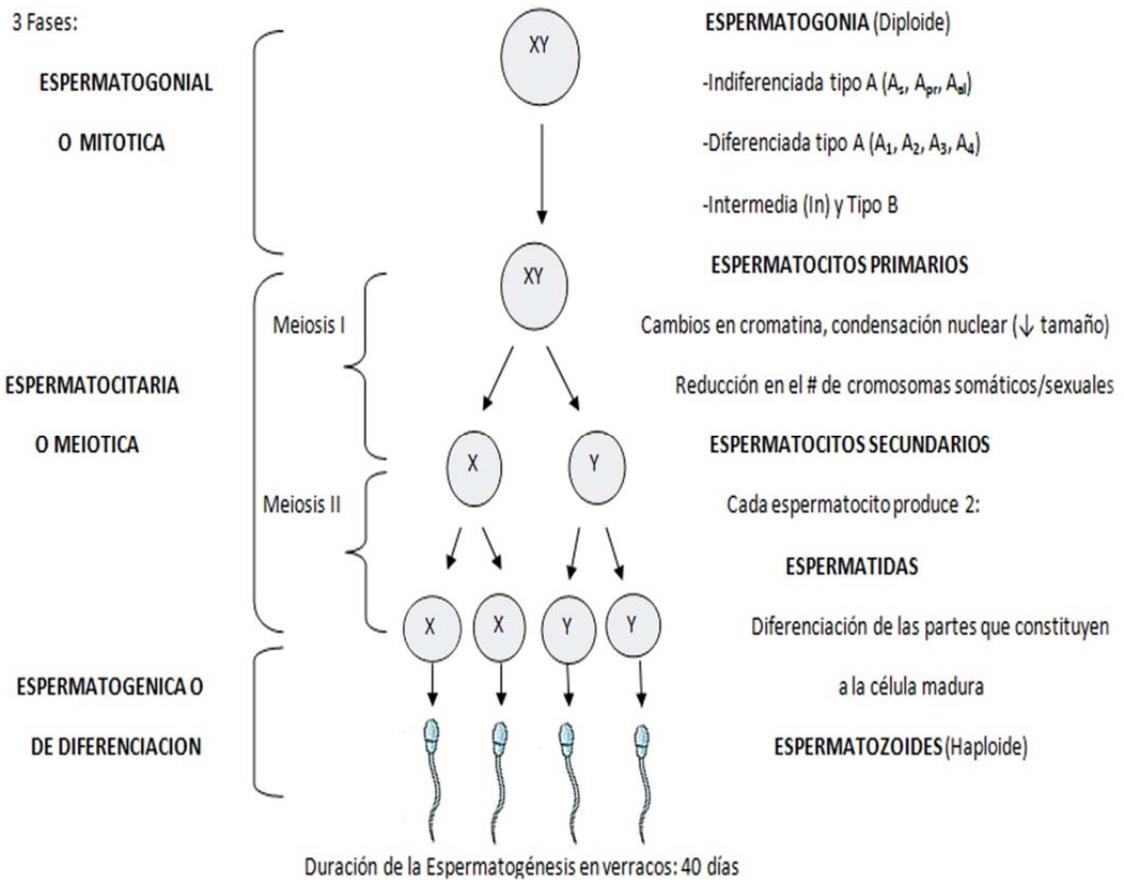
Durante el desarrollo testicular, el balance entre células de Sertoli y células de Leydig así como la interacción entre diferentes tipos de células germinales, son fundamentales para hacer posible que los testículos adultos realicen sus funciones tanto endocrinas y exocrinas. Por ejemplo, las células mioideas peritubulares son funcionalmente muy importantes para el desarrollo del proceso espermatogénico y junto con las células de Sertoli son responsables de la formación de la lamina basal y por la producción de factores moduladores específicos de las células de Sertoli necesarios para la espermatogénesis en animales adultos. Además de los esteroides, las células de Leydig secretan otros factores, incluyendo la  $\beta$ -endorfina que puede estar involucrada en la función y proliferación de las células de Sertoli. También, inhibina B, la cual regula la secreción hipofisiaria de FSH, y

es producida principalmente por las células de Sertoli bajo la influencia de las células germinales.<sup>5,9</sup>

Debido a que el número total de células de Sertoli establecido durante el desarrollo testicular dicta la magnitud de la producción espermática en animales sexualmente maduros, la mayor eficiencia de la espermatogénesis resulta de la combinación de una mayor capacidad de apoyo de células germinales por parte de las células de Sertoli y de un mayor número de células de Sertoli por gramo de testículo. Específicamente en cerdos, su alta eficiencia espermática es resultado principalmente de la corta duración de la espermatogénesis y la alta eficiencia de las células de Sertoli.<sup>2,6</sup>

La mayoría de los verracos comerciales tienen semen maduro a los 6 meses de edad y la espermatogénesis comienza aproximadamente a los 115 días de edad y se establece totalmente a los 180 días.<sup>10</sup>

El mayor peso testicular se correlaciona con las células secretoras en el testículo, por lo que un número elevado de células de Leydig es necesario para secretar altos niveles de testosterona. El peso de los testículos es un indicador útil del aumento de la eficiencia reproductiva de los verracos.<sup>10</sup>



**Figura 1.** Espermatogénesis en el verraco.

#### 1.4. MADURACIÓN ESPERMÁTICA EN EPIDÍDIMO

Las etapas finales de la diferenciación de los espermatozoides se producen fuera de la gónada. El epidídimo es el órgano donde los espermatozoides maduran y adquieren su capacidad fertilizadora. Durante el transito en el epidídimo, los espermatozoides experimentan muchos cambios y la mayoría de los espermatozoides son almacenados en la cola del epidídimo hasta la eyaculación. Si bien los espermatozoides al salir de los

testículos no son capaces de fertilizar un ovocito, se conoce que los espermatozoides de la cola del epidídimo son maduros y tienen la capacidad para fertilizar.<sup>11</sup> Así, la aparición de los primeros espermatozoides fisiológicamente normales en la cola del epidídimo puede ser un indicio de la aparición de la pubertad en los machos.<sup>10</sup>

Las características de los espermatozoides en la cabeza, cuerpo y cola del epidídimo, del segundo al sexto mes de edad se han observado con claras diferencias en las características funcionales y morfológicas entre las tres regiones del epidídimo. Los cerdos con 60% de motilidad progresiva, 70% de espermatozoides vivos y 15% de anomalías morfológicas se pueden considerar con un espermiograma maduro.<sup>10</sup>

#### **1.4.1. Transito espermático en el epidídimo**

Cuando el espermatozoide abandona el testículo ya posee una serie de macromoléculas que forman parte de la membrana plasmática y al pasar por el epidídimo dichas moléculas se pierden o alteran, mientras que simultáneamente adquiere otras. Los espermatozoides sufren una serie de cambios secuenciales durante su tránsito por el epidídimo; estos cambios de tipo morfo-fisiológicos, metabólicos y bioquímicos comprenden la condensación nuclear, la formación y desarrollo del acrosoma, la teca perinuclear, la vaina fibrosa y la gota citoplasmática, además de los componentes de la membrana plasmática, se conocen como maduración epididimaria y son necesarios para que los espermatozoides se conviertan en células competentes para la fertilización y sean almacenadas en la porción distal del epidídimo.<sup>2, 11</sup>

El conducto epididimal que se deriva del conducto mesonéfrico, es un conducto largo y muy enrollado, con una longitud total en verracos de aproximadamente de 50-100

m. Este órgano está dividido morfológicamente en un segmento inicial, cabeza, cuerpo y cola. En los cerdos, la cabeza, cuerpo y cola del epidídimo pueden ser subdivididos en cuatro, tres y dos segmentos, respectivamente.<sup>2, 11</sup>

En todos estos segmentos, el ducto epididimal está recubierto por un epitelio compuesto por células principales y basales, aunque también están presentes en este conducto en segmentos específicos otras células, como las apicales, estrechas y células en halo (linfocitos intraepiteliales). Juntas, estas células ejercen varias funciones importantes que son necesarias para la función del epidídimo: secreción y absorción de proteínas, endocitosis, actividad secretora que acidifica el fluido luminal, defensa inmunológica, fagocitosis y producción de antioxidantes (células basales).<sup>2, 11</sup>

El tiempo de tránsito espermático a través del epidídimo, oscila entre 5 a 16 días en muchas especies de mamíferos. En el caso del cerdo, el valor medio obtenido para esta especie es entre 9 y 11 días. También, en general el tiempo requerido para la maduración espermática dentro de la cabeza y el cuerpo oscila entre 2 a 5 días, lo que significa que, en cerdos sólo unos pocos días son necesarios para activar el potencial fertilizante del esperma. En contraste, el tiempo de tránsito del esperma a través de la cola del epidídimo difiere en gran medida entre especies, que va desde 4 a 14 días en machos sexualmente descansados.<sup>12</sup> Este intervalo es mucho más corto en machos que eyaculan diariamente comparados con aquellos que son sexualmente inactivos.<sup>2, 12</sup>

En contraste, en la cola las contracciones de las células de músculo liso que rodea el conducto del epidídimo ocurren sólo cuando son estimuladas y el movimiento del esperma a través de la cabeza y cuerpo del epidídimo se produce principalmente por las

contracciones peristálticas continuas de estas fibras musculares. También, la cola del epidídimo es la región de almacenamiento del esperma donde el conducto del epidídimo se dilata y el tránsito de esperma es más lento por el colapso de los conductos deferentes. Esta región tiene un sistema de efectores neuromusculares para reclutar a los espermatozoides durante la eyaculación. En este aspecto, la mayor parte de la actividad del epitelio de la región debe participar en el mantenimiento de un entorno adecuado para los espermatozoides que están concentrados en el lumen del conducto del epidídimo.<sup>2</sup>

#### **1.4.2. Características del esperma de la cola del epidídimo**

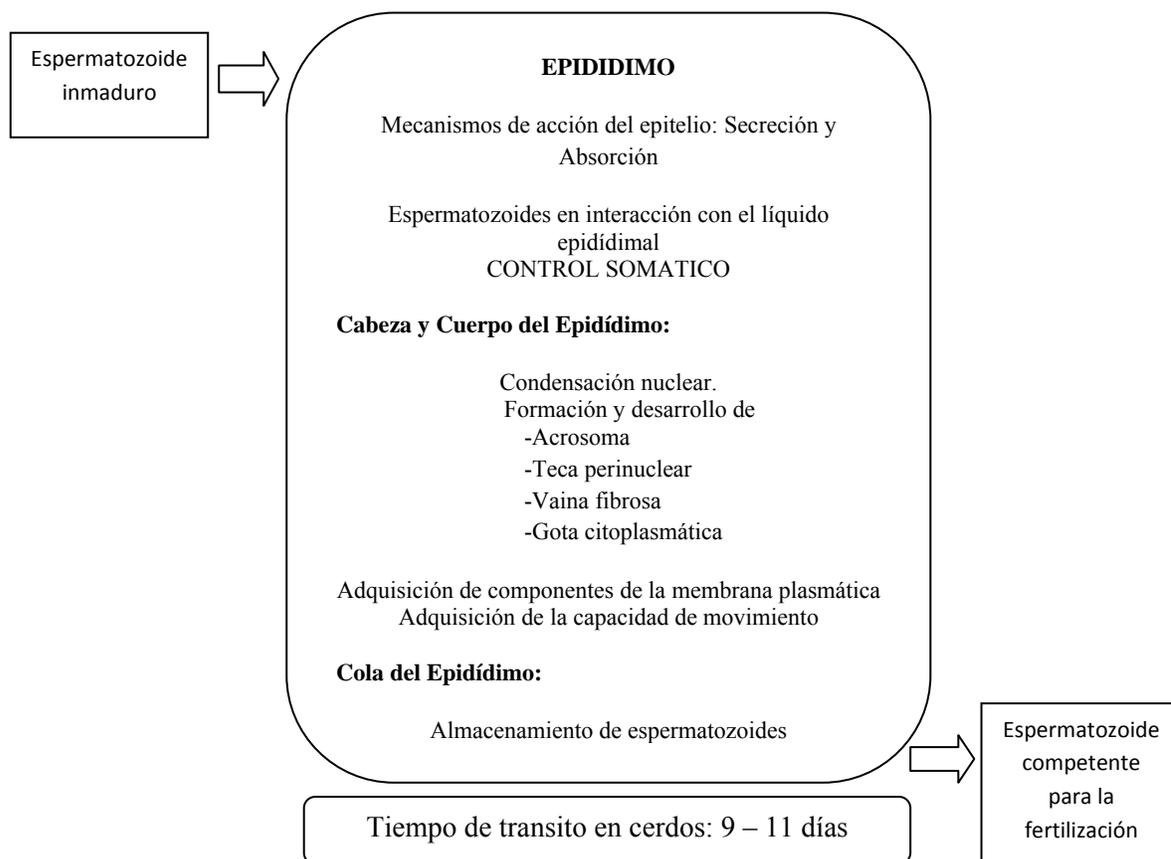
Las muestras de esperma de la cola del epidídimo de cerdos evaluados a los dos meses de edad, presentan 9% de motilidad espermática, 18% de espermatozoides viables y 31% de espermatozoides anormales en la cabeza del epidídimo, mientras que los valores correspondientes fueron 31.7, 52 y 10.7%, a los tres meses de edad, respectivamente. A los dos meses de edad, en la cola del epidídimo, los valores fueron 27.5% de motilidad espermática, 44.7% de espermatozoides viables y 17% de espermatozoides anormales, los cuales cambiaron a 73.3%, 75.2% y 6.2%, a los tres meses de edad, respectivamente. La concentración espermática en el fluido de la cola del epidídimo a los 2, 3 y 6 meses de edad fue de 2255, 3685 y 4325 millones/ml, respectivamente.<sup>10</sup>

Durante la eyaculación los espermatozoides se mezclan con secreciones epididimarias para ser transportados por medio de diferentes conductos hacia la uretra, donde se van a mezclar con las secreciones de diferentes glándulas accesorias antes de ser finalmente eyaculados.<sup>13</sup> Estas secreciones provenientes del epidídimo, próstata, vesículas seminales y glándulas bulbouretrales componen el plasma seminal, el cual permite el

transporte de los espermatozoides en el útero hasta el oviducto y ayuda a la capacitación espermática.<sup>14</sup>

El plasma seminal (PS) contiene predominantemente proteínas pertenecientes a la familia de las espermadhesinas, mismas que muestran afinidad a la heparina, el ácido hialurónico, mananos, el epitelio del oviducto y a glicoproteínas de la zona pelucida; estas proteínas participan en diversas interacciones en los pasos subsecuentes del proceso reproductivo.<sup>15</sup>

Una gran variedad de proteínas del PS han sido sugeridas como benéficas para la capacidad fecundante de los espermatozoides de verraco y por lo tanto, como indicadores de presunción de la fertilidad. Entre ellos se encuentra una lista de espermadhesinas secretadas por las vesículas seminales que se unen a la porción craneal de la región acrosomal del espermatozoide durante la eyaculación y sigue a los espermatozoides hasta el óvulo, como se estudió *in vitro* e *in vivo*; donde las diferentes fracciones del eyaculado contienen sustancias del PS con diferentes actividades en los espermatozoides, algunos de ellos aparentemente beneficioso para su viabilidad, y otros con un papel indirecto en el transporte de los espermatozoides *in vivo*, sugieren que existe una necesidad de explorar más a fondo si algunos de estos podrían ser utilizados como aditivos para aumentar la resistencia a los cambios de la capacitación.<sup>16</sup>



**Figura 2.** Tránsito espermático en epidídimo.

## 1.5. ENDOCRINOLOGÍA

Las hormonas que regulan la reproducción en el verraco, se producen en el hipotálamo, la hipófisis y el testículo. Existe una complicada interrelación entre las hormonas producidas por el testículo y el mecanismo de retroalimentación de estas por el hipotálamo y el lóbulo anterior de la hipófisis (eje hipotalámico-hipofisiario-testicular).<sup>17</sup>

### 1.5.1. Hormona Liberadora de Gonadotropinas (GnRH)

En el macho la producción tónica de Factores de Liberación Hipotalámicos (GnRH) como su nombre lo indica, estimula la secreción de las dos gonadotropinas hipofisiarias: La

Hormona Luteinizante (LH) y la Hormona Folículo Estimulante (FSH) que son necesarias para mantener un adecuado funcionamiento testicular. El GnRH actúa principalmente a nivel adenohipofisiario.<sup>18</sup>

### **1.5.2. Gonadotropinas**

Estas hormonas tienen la función principal de estimular el funcionamiento de las gónadas y tanto la LH como la FSH son necesarias para que se inicie la espermatogénesis.<sup>18</sup>

Se puede detectar concentraciones circulantes de LH desde la vida fetal, y se observan picos durante la primera semana después del nacimiento. Posteriormente, las fluctuaciones de concentración siguen un patrón semejante al crecimiento testicular, aunque una pequeña cantidad de animales puede presentar altas concentraciones antes de la pubertad.<sup>17</sup>

Esta hormona estimula a las células de Leydig para producir esteroides testiculares. La testosterona promueve el desarrollo y el funcionamiento de las glándulas accesorias, origina el desarrollo de características sexuales secundarias y facilita diversas actividades sexuales como el cortejo, la erección y la eyaculación.<sup>18</sup>

Los niveles de FSH permanecen bajos durante todo el periodo prepuberal y se incrementan significativamente a medida que la pubertad se aproxima. Esta hormona induce cambios bioquímicos y morfológicos en las células de Sertoli como la conversión de andrógenos en estrógenos, la secreción de inhibina, y la producción de la proteína ligadora de andrógenos (ABP)<sup>5, 19</sup> y en las células de Leydig estimula el desarrollo de receptores de unión a la LH.<sup>17</sup>

### **1.5.3. Inhibina**

Hormona de naturaleza glicoproteica producida por las células de Sertoli, la secreción de esta hormona es estimulada por la FSH. El principal efecto de la inhibina se presenta a nivel hipofisiario, en donde precisamente actúa como regulador negativo de la secreción de FSH. De esta manera, la inhibina constituye un mecanismo de retroalimentación negativa específica sobre la secreción de FSH, que permite que en ciertos momentos la hipófisis deje de secretar FSH a pesar de estar siendo estimulado por la GnRH.<sup>18</sup>

### **1.5.4. Andrógenos**

En la etapa posnatal el testículo sintetiza y secreta principalmente androstenediona, mas que testosterona pero a medida que los verracos maduran sexualmente, el patrón se invierte.<sup>20</sup> Las células de Leydig proveen al túbulo seminífero de una alta concentración de testosterona, la cual es esencial para la espermatogénesis.<sup>17, 19</sup>

Las células de Leydig en el testículo del verraco maduro, producen diversos andrógenos, dentro de los cuales predomina la testosterona, que se encuentra activa en un 95% en la circulación periférica, pero también produce androstenediona, 5-androstenediol, sulfato de 5-androstenediol, dehydroepiandrostenediona, así como el grupo de hormonas conocidas como 16-androstenos, precursoras de las feromonas, producidas por los machos excitados sexualmente,<sup>17</sup> los cuales chasquean su mandíbula, provocando la secreción de grandes cantidades de saliva espumosa que contiene a las feromonas que estimulan la receptividad sexual de las cerdas en estro. Componentes activos en la saliva son los metabolitos  $3\alpha$ -andróstenol y  $5\alpha$ -androgenona.<sup>19</sup>

#### **1.5.4.1. Testosterona**

La testosterona es absolutamente esencial para el inicio de la madurez sexual y los niveles de testosterona periféricos han sido bien correlacionados con el desarrollo testicular, la madurez sexual y la producción espermática.<sup>10, 19</sup>

La producción testicular de testosterona es influenciada por el desarrollo fisiológico del animal, la actividad endocrina de los testículos y las formas predominantes de los andrógenos circulantes varían considerablemente con la edad, con la testosterona que es cada vez más elevada durante la madurez sexual.<sup>20</sup>

Los niveles de testosterona reportados en machos han mostrado grandes variaciones, que van desde 0.73 a alrededor de 50 ng/ml, con edad, raza y estación del año.<sup>10</sup> Park y Lee<sup>21</sup> reportaron que la concentración de testosterona es inferior a 1 ng/ml en machos con menos de 50 kg de peso corporal, el cual incrementa a 1.15 ng/ml y continua constante a partir de entonces.

En verracos de líneas comerciales, el patrón de secreción de la testosterona se estabiliza a los 5 meses de edad<sup>20, 22</sup> y coincide con la casi duplicación del volumen testicular lo que sugiere que el aumento de la testosterona podría estar relacionada con el incremento de las células de Leydig, otra posibilidad del incremento de los niveles circulantes de testosterona podría ser debida en parte a la modificación de la sensibilidad testicular a las gonadotropinas.<sup>20</sup>

Un estudio determino que a diferencia de los verracos locales del noreste de la India, cuyos niveles de testosterona se incrementan de los 2 a los cuatro 4 meses de edad, para reducirse a partir de entonces y mantenerse en la meseta hasta los seis meses, mientras

que los niveles de testosterona en los machos Hampshire incrementan con la edad a un ritmo constante y alcanza un nivel alto a los siete meses de edad.<sup>10</sup>

En el mismo estudio, en el período peripuberal se encontró una fuerte correlación positiva de la testosterona con la edad ( $r= 0.89$ ), peso del epidídimo ( $r= 0.95$ ), concentración espermática en la cola del epidídimo ( $r= 0.96$ ) y motilidad ( $r= 0.99$ ). También se encontró una fuerte correlación entre el peso testicular y el peso del epidídimo y también con la edad del verraco. Además, se encontró una fuerte correlación positiva entre la concentración de espermatozoides en la cola del epidídimo con el peso del epidídimo.<sup>10</sup>

El perfil de testosterona medido reveló que el nivel máximo ( $20.45\pm 1.33$  ng/ml) estuvo presente a los tres meses de edad en los cerdos locales del noreste de la India contra los valores máximos reportados a los siete meses de edad en los machos Yorkshire. Dicha investigación reportó un patrón bifásico de los niveles de testosterona en sangre en los machos Yorkshire (baja amplitud alrededor de 10 nmol/l) a las tres semanas de edad y el segundo pico (alta amplitud alrededor de 10 nmol/l) a los siete meses de edad. El significado fisiológico del primer pico en términos de desarrollo sexual no está claro pero el segundo pico es relacionado con la madurez sexual en esos animales.<sup>10</sup>

### **1.5.5. Estrógenos**

La célula de Sertoli también tiene funciones endocrinas, básicamente convierte los andrógenos en estrógenos por medio de la enzima aromatasa. Los estrógenos, conformados en su mayor parte por estradiol, estriol y principalmente estrona, que junto con los

andrógenos, son necesarios para la expresión de la conducta sexual y el desarrollo de las glándulas accesorias.<sup>17</sup>

Además, cuando los estrógenos ingresan al aparato genital femenino, ejercen en el eyaculado las siguientes funciones: favorecen el transporte espermático mediante la liberación de prostaglandinas del endometrio, aumentan la frecuencia de las contracciones uterinas e influyen en el momento de la ovulación, aumentando la liberación de prostaglandinas intrafoliculares que ocasionan ruptura folicular.<sup>17</sup>

Muchas de las funciones antes mencionadas que actúan sobre el tránsito espermático de los espermatozoides a través del epidídimo son reguladas por la dihidrotestosterona. Recientemente, también se ha demostrado que la reabsorción de líquido luminal que ocurre en los conductos eferentes y en segmento inicial del epidídimo es regulado por estrógenos. La regulación hormonal del epidídimo es de particular interés en especies que como el cerdo, donde el testículo produce cantidades de estradiol que resultan en niveles circulantes elevados. De hecho, se han encontrado niveles de estradiol de 1500 pg/mg proteína en testículo, 95 en la cabeza del epidídimo, 84 en el cuerpo y 65 en la cola.<sup>23</sup>

#### **1.5.6. Factores de crecimiento**

A parte del eje hipotalámico-hipofisiario-testicular, se requiere de la producción de factores locales que intervienen en las interacciones a nivel testicular entre las células de Sertoli, células de Leydig y células germinativas.<sup>2, 5, 9</sup> Por lo que en los Cuadros 1.2 a 1.4, se presenta un resumen sobre aquellas sustancias de producción paracrina y autocrina con

su posible función biológica (actualmente varias de ellas no están del todo esclarecidas) envueltas en dichas interacciones.

**Cuadro 1.2.** Principales sustancias que participan en el mantenimiento estructural de los testículos.

<b>Sustancia/Hormona</b>	<b>Función Biológica</b>
Sustancia inhibidora de los conductos de Müller	Glicoproteína que inhibe el desarrollo de los conductos de Müller en el embrión masculino.
Factor Neurotrópico Derivado de la Línea Celular Glial (GDNF)	Participa en la expansión de la población de las células de Sertoli.
$\beta$ -endorfina	Sintetizada por las células de Leydig, puede estar involucrada en la función y proliferación de las células de Sertoli.
Sistema de transferrinas	Asegurar las uniones estrechas de las células de Sertoli para que las células germinales reciban ferritina por las células de Sertoli.
Caderinas	Secretadas por células de Sertoli, mantienen la estructura del tejido testicular, la identidad y arquitectura celular.
Inhibina B	Regula la secreción hipofisiaria de FSH, es producida principalmente por las células de Sertoli bajo la influencia paracrina de las células germinales.
FSH y Activina	Estimulan la proliferación de las células de Sertoli en el desarrollo postnatal.

Recopilado de: <sup>5, 9, 18, 24, 25</sup>

**Cuadro 1.3.** Principales sustancias que participan en la regulación de la espermatogénesis y en la supervivencia celular.

<b>Sustancia/Hormona</b>	<b>Función Biológica</b>
Factor Celular Stem (SCF)	Participa en la migración, supervivencia, proliferación y adhesión de las células germinales.
FSH Y Testosterona	Previenen una disminución de las células germinales, restauran el proceso de espermatogénesis, previenen la apoptosis de las células germinales.
FSH	Inhibe la degeneración de espermatogonias y estimula la entrada a la meiosis potenciada por la testosterona. Se requiere una alta concentración como pre-requisito para completar la meiosis y la espermatogénesis. Participa en los cambios nucleares en la espermiogénesis y en la extrusión del flagelo de la espermátida.
Bad	Se localiza en el acrosoma y en diferentes estadios de las espermátidas.
GDNF	Participa en la diferenciación y regeneración de las espermatogonias.
Factor de Crecimiento Derivado de Plaquetas (PDGF)	Las células de Leydig humanas expresan el ligando y receptores para el sistema PDGF y se relaciona con el inicio de la espermatogénesis.
Activina A	Producida por las células de Sertoli, aumenta la cantidad de células germinales.
Folistatina y FSH	Aumentan el número de espermatogonias.
Factor de Crecimiento Epidérmico (EGF) y Factor de crecimiento Transformante alfa (TGF $\alpha$ )	Inducen efectos biológicos similares: migración celular, división, diferenciación, supervivencia y apoptosis. Se ha reportado su presencia en epidídimo, próstata y glándulas vesiculares por lo que se sugiere su participación en los diferentes ambientes del tracto reproductivo para lograr la plena capacidad de fertilización de los espermatozoides.
EGF	Se propone como un inhibidor de la diferenciación de las células germinales pero también estimula la proliferación de espermatogonias.
Proteína Ligadora de Andrógenos (ABP)	Transporta andrógenos para todo el aparato reproductivo

SCF y su receptor C-kit	Participan en el desarrollo tardío espermatogonial, actúa como factor mitógeno y de supervivencia para la espermatogonia tipo A.
Factor Estimulador de Colonias de Macrófagos en el Cerdo.	Estimula la supervivencia de la espermatogonia A.
Factor de Crecimiento para Insulina I y II e Insulina.	Promueven la diferenciación de la espermatogonia a espermatocito primario.
Prolactina	Participa en la espermiogénesis.
Proteínas Bcl-2	Promueven la supervivencia.
Bcl-xl	Determina el destino de las células germinales y regula la supervivencia durante la primera ola de espermatogonias, promueve la supervivencia de células germinales durante la embriogénesis. En testículo adulto no abunda y está restringida a espermatocitos y espermátidas.
Bcl-w	Regula el número de células germinales.
Bax	En núcleo de espermátidas redondas, promueve la apoptosis cuando el DNA está dañado.
Bak	Se expresa en compartimentos de espermatocitos y en espermátidas.
LIF, Interleucina-4 (IL-4), Factor de Crecimiento de Fibroblastos (FGF), Forma Soluble de SCF, Proteína Morfogénica del Hueso (BMD)-4	Participan en la supervivencia.
bFGF, LIF y Factor Neutrónico Ciliar	Promueven la supervivencia de monocitos.
BMP	Promueve el crecimiento de las células germinales.
BMP- 8A y 8P	Participan en la supervivencia de espermatocitos.
Somatostatina (SRIF)	Participa en la proliferación de gametos y puede estar modulada por la secreción de testosterona. En el cerdo ejerce acción positiva e inhibidora sobre las espermatogonias.

---

Recopilado de: 5, 9, 18, 24, 25

**Cuadro 1.4.** Principales sustancias que regulan la muerte celular programada (apoptosis).

<b>Sustancia/Hormona</b>	<b>Función Biológica</b>
SCF, Factor Inhibidor de Leucemia (LIF), Desert Hedge Hog (Dhh), Factor de Necrosis Tumoral alfa (TNF- $\alpha$ ), Factor de Crecimiento Transformante beta (TGF- $\beta$ ), Gonadotropinas, Estrógenos y Testosterona	Apoptosis de gonocitos.
FAS	Asociada a la apoptosis de células germinales, mediada por la vía de las caspasas.
Bmf	Participa en la apoptosis cuando hay una baja concentración de testosterona intracelular.

Recopilado de:<sup>18, 24, 25</sup>

## 1.6. PUBERTAD

Entre varios factores, la constitución genética se sabe influencia el desarrollo gonadal, la pubertad y la madurez sexual en verracos. La madurez sexual se puede estimar basándose en el crecimiento de los testículos y la gestación *in vivo*, se ha reportado que verracos de razas europeas comerciales adquieren la capacidad de fecundar a una cerda de los 5 a los 8 meses de edad.<sup>10</sup>

El inicio de la actividad sexual en el verraco comienza con la pubertad y esta se caracteriza por los cambios histológicos a nivel testicular, con aumento del diámetro y longitud de los túbulos seminíferos, formación de la luz tubular y aparición de las células espermatogénicas. El comienzo de la pubertad ocurre alrededor de las 10 semanas y la aparición de las primeras células espermáticas en el eyaculado ocurre a partir de la semana 17-18 de edad.<sup>26</sup>

### **1.6.1. Mecanismo hormonal que controla la presentación de la pubertad**

El inicio de la pubertad del macho depende de un incremento en la cantidad de FSH y testosterona; sin embargo, en la etapa pre púber los niveles de FSH, LH y testosterona son bajos debido a que esta última tiene un efecto de retroalimentación negativa para la secreción de gonadotropinas.<sup>26</sup> No se han encontrado correlaciones significativas entre las concentraciones de esteroides testiculares en plasma al principio del periodo post-natal y al alcanzar el peso de sacrificio de cerdos machos intactos. Pero, en algún momento previo a la pubertad, el hipotálamo es menos sensible a esa retroalimentación negativa, especialmente a la FSH, lo que ocasiona un incremento de los niveles plasmáticos de esa hormona, y en consecuencia una reducción de la influencia inhibitoria de la testosterona.<sup>17</sup>

Sin embargo, es necesario que aumente la cantidad de testosterona, lo cual está determinado por la LH. Para que esto suceda, la FSH promueve el desarrollo de receptores para LH en las células de Leydig, el testículo se vuelve más sensible a la acción de la LH y de esta forma se incrementa la cantidad de testosterona que se unirá a las proteínas receptoras en las células de Sertoli y será transferida a la célula germinal, acelerándose el proceso de espermatogénesis.<sup>17</sup>

### **1.6.2. Factores que afectan la presentación de la pubertad**

Hay que recordar que la preparación a la actividad reproductiva del futuro semental, comienza en los primeros meses de vida y que dependen de un normal funcionamiento endocrino y que no deberá verse influenciado por factores que alteren su presentación.<sup>26</sup> A continuación se enlistan algunos:

- La pubertad en el macho tiene una marcada relación con la edad del animal. Sin embargo puede retrasarse en animales con una severa restricción nutricional (de 50% o más) durante las etapas finales de la engorda. Aunque también se habla de que una reducción de la ingestión de alimento del 17 al 30% retarda la aparición de la pubertad y el desarrollo testicular, siendo la edad mucho más importante que el peso de los animales para alcanzar la pubertad.<sup>26</sup>
- Se ha comprobado que los verracos híbridos presentan la pubertad antes que los machos de razas puras.
- La crianza individual tiene un efecto negativo sobre la presentación de la pubertad y la aparición de la conducta sexual, reduciendo la eficiencia al servicio y aumentando la frecuencia de montas incorrectas.
- Machos criados en corrales a la intemperie alcanzan la pubertad antes que los alojados en instalaciones/edificios cerrados.
- A medida que disminuyen la cantidad de horas luz durante la etapa pre púber, se incrementa el comportamiento sexual, así como los niveles hormonales.
- El incremento en la temperatura ambiental disminuye la conducta sexual y la calidad del semen.<sup>17, 26, 27</sup>

### **1.7. TRANSPORTE Y CAPACITACIÓN DE LOS ESPERMATOZOIDES**

El verraco eyacula un gran volumen (200-500 ml) en el cual están suspendidos los espermatozoides, este volumen conocido como plasma seminal (PS), está compuesto por una mezcla del contenido de la cola del epidídimo y las secreciones de las glándulas sexuales accesorias.<sup>28</sup> Tanto en la monta directa como en la inseminación artificial un volumen considerable de semen de 80 a 300 ml es depositado en el tracto genital de la

cerda, este volumen es funcional debido a que una disminución en el volumen inseminado a 20 ml reduce la fertilización.<sup>29</sup>

La eyaculación está formada por una serie de fracciones denominadas: fracción pre-espermática, que contiene la secreción de las glándulas uretrales y bulbouretrales, además de la próstata; fracción rica en espermatozoides, dicha fracción posee la mayoría de espermatozoides y el líquido del epidídimo en la cual originalmente se encuentran suspendidos, se diluye con un líquido derivado de las vesículas seminales y de la próstata; y la fracción post-rica en espermatozoides, en la que pocos espermatozoides están presentes y el líquido se deriva principalmente de la creciente secreción de las vesículas seminales, la próstata y al final de la eyaculación, de las glándulas bulbouretrales.<sup>28</sup>

La última fracción del eyaculado produce la floculación de tapioca, que coagula el plasma seminal, e *in vivo* sirve para conservar el semen en el útero, lo que reduce el flujo retrógrado a través del cuello uterino.<sup>16</sup>

En el tracto genital femenino, los espermatozoides presentan más cambios que incluyen: la eliminación de macromoléculas absorbidas durante la maduración, alteraciones de tipo iónico, variación de la composición de los fosfolípidos y glicoproteínas de la membrana plasmática. Estos cambios reciben el nombre de “capacitación”.<sup>16, 17</sup>

El número promedio de espermatozoides eyaculados es superior del orden de  $30 \times 10^9$ . En el proceso de transporte, entre el 70 y el 99% de estos espermatozoides son rápidamente eliminados de la luz del útero, alrededor de 30-35% a través de flujo retrógrado después de la IA (cuando la secreción coagulante de las glándulas bulbouretrales ha sido removida *ad modum*). La mayoría de los espermatozoides son eliminados en el

útero, pero una pequeña población de espermatozoides son transportados por las contracciones del miometrio que rápidamente en cuestión de minutos hacia la unión útero-tubárica (UUT) durante la denominada fase rápida del proceso de transporte en el tracto genital femenino.<sup>16, 29</sup>

La estimulación de las contracciones uterinas podría ser benéfica ya que aumenta el transporte uterino y la subsecuente fertilización, pero puede también aumentar el reflujo, esto es particularmente importante en situaciones desfavorables como: un bajo número de células espermáticas, o un bajo volumen de inseminación y un intervalo largo entre inseminación y ovulación. Sin embargo, para el transporte y la distribución de las células espermáticas en el resto del tracto reproductivo, un volumen tan grande no es necesario, ya que una buena fertilización se logra con 10 ml de semen depositado profundamente en el útero, este hecho, se ve reflejado en los distintos métodos de apareamiento, que han cambiado la relación verraco: cerda (Cuadro 5.1).<sup>29</sup>

Los espermatozoides son transportados a lo largo de todo el oviducto, la mayoría se adhieren al nivel de la UUT y al segmento adyacente del istmo de cada oviducto, que constituyen el depósito de espermatozoides en los oviductos, en un plazo de minutos a dos horas, se almacena una población de espermatozoides de  $10^5$  a  $10^8$ . A pesar de la reposición del reservorio de espermatozoides (RE), con el número de espermatozoides suficientes para fecundar exitosamente todos los ovocitos ovulados, se considera que tarda hasta 3 horas después del apareamiento, el período más dramático se produce entre 5 y 60 minutos.<sup>30</sup> El RE mantiene la viabilidad de los espermatozoides y su capacidad de fertilización, así como ayuda a los espermatozoides para escapar de la fagocitosis en el lumen uterino, debido a

que el RE parece libre de leucocitos polimorfonucleares (PMN) en todo el período previo a la ovulación.<sup>31</sup>

Aunque parece existir una relación entre la llegada de los espermatozoides en los segmentos superiores del istmo y la ovulación de los ovocitos, las razones detrás de esto están aún en discusión. En cualquier caso, hay una reducción importante (de cientos) en el número de espermatozoides que llegan a la parte superior del oviducto, un hecho que contribuye fuertemente a la relación fisiológica (1:1) entre los espermatozoides y los ovocitos en el momento de la fecundación *in vivo*.<sup>31</sup> La razón principal de la reducción del número de espermatozoides que ocurre en el oviducto, es la reducción de la probabilidad de poliespermia. La razón más probable para la poliespermia de ovocitos porcinos parece ser la penetración simultánea de los espermatozoides, al menos *in vitro*, y una reducción en el número de espermatozoides ayuda a prevenir esta eventualidad.<sup>32</sup>

Varios mecanismos interactúan para facilitar la tercera fase del transporte de los espermatozoides a la unión istmo-ampular (UIA), donde tiene lugar la fertilización, estos incluyen la desaparición del moco intraluminal en el RE, un aumento en el flujo del líquido por el aumento de la actividad ciliar hacia la UIA, y la motilidad visible del myosalpinx; se ha observado que la parte superior del istmo (junto a la UIA) contiene más espermatozoides durante ( $\pm 4$  h) y después ( $\pm 8$  h) de la ovulación, que antes de la ovulación, lo que sugiere una reubicación de los espermatozoides al momento de la ovulación.<sup>16</sup>

Los espermatozoides (y el PS que los rodea) que se conservan en la cavidad uterina son eliminados, tanto por el reflujó vaginal, mediante fagocitosis por los leucocitos que migran desde el endometrio al lumen uterino y parcialmente, por los macrófagos del

epitelio endometrial. La entrada de semen en la cavidad uterina provoca, una invasión masiva de leucocitos (en su mayoría PMN) dentro del lumen uterino. Estos PMN migran de la lámina propia, subyacente al epitelio de revestimiento, donde se acumulan después de la extravasación, probablemente como resultado de los altos niveles de estrógenos que dominan el proestro en la cerda. Los PMN no alcanzan el lumen uterino inmediatamente después de la deposición del semen, por lo menos durante los primeros 10 minutos. Una presencia masiva de PMN se detectó por primera vez 30 minutos después de la deposición del semen, incrementándose de manera sostenida durante las siguientes tres horas.<sup>16</sup>

**Cuadro 1.5.** Relación verraco: cerda en base al método de apareamiento.

Método de apareamiento	Verraco: Cerda
Apareamiento en corral	1:4
Apareamiento natural	1:20
Inseminación artificial	1:150
IA intrauterina	1:450
Inseminación intrauterina profunda	1:3000

Modificado de:<sup>33</sup>

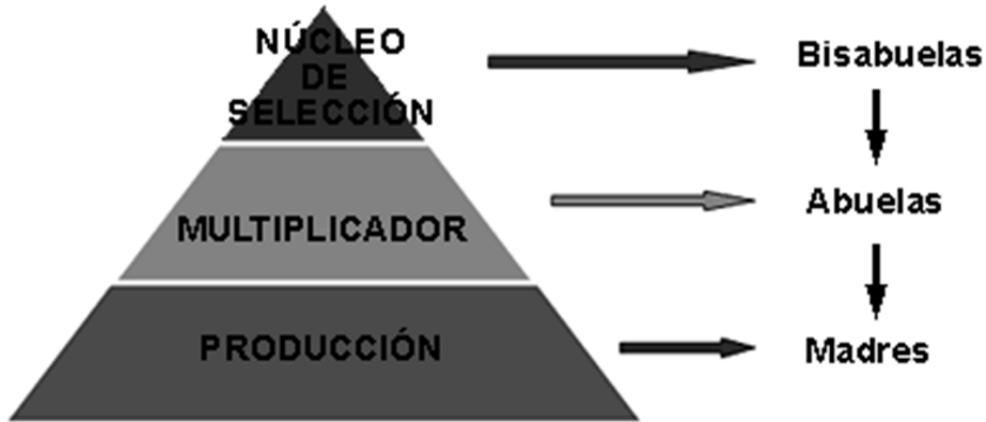
## **CAPÍTULO II. GENÉTICA DEL VERRACO**

### **2.1. INTRODUCCIÓN**

El desempeño reproductivo es controlado por la composición genética de la hembra, el verraco y su descendencia, aunque también es afectado por el ambiente. La identificación precisa del mérito genético de un verraco es cada vez más importante ante las tendencias actuales del uso generalizado de la inseminación artificial y el consiguiente aumento en el número de progenie, por lo que es de vital importancia conocer el potencial genético de un verraco, en torno a la expresión de las características productivas sin dejar a un lado el desempeño reproductivo. En el presente capítulo, se abarcan temas como las características de interés para la selección genética, los métodos de selección genética, así como las alteraciones genéticas que afectan la capacidad reproductiva de un verraco.

### **2.2. CARACTERÍSTICAS A SELECCIONAR**

La producción porcina tiene una estructura piramidal que describe, a nivel de mejora genética, los distintos pasos a realizar, los tipos de granjas existentes y la relación entre éstas.<sup>34</sup> La pirámide de genética porcina se muestra a continuación:



**Figura 3.** Pirámide de genética porcina. Tomado de: <sup>34</sup>

Dentro de la pirámide de genética porcina, los objetivos de cada tipo de producción son:

**Núcleo de selección:** Mejorar los parámetros de importancia económica de las distintas razas y líneas productivas, mediante la selección de los mejores animales para dichos parámetros.

**Multiplicador:** Diseminar la mejora genética y añadir a la mejora por selección la mejora por cruzamiento (vigor híbrido).

**Granja de producción:** Producir la mayor cantidad de kg de carne con la máxima eficiencia.<sup>34</sup>

Los verracos son seleccionados por su potencial genético superior; el término "superior" se puede definir como tener rasgos que el productor quiere transmitir a su piara, rasgos generalmente de importancia económica. Actualmente, las empresas de genética aplican para sus líneas, pocos caracteres, dependiendo de las líneas, y dando más importancia a unos u otros caracteres según la orientación que quieren que siga la línea. El

enfoque en el desarrollo de líneas de sementales terminales, se basa en el crecimiento y en las características de rendimiento magro en canal, mientras que en el desarrollo de una línea materna, se hace hincapié en estas características e incorpora el tamaño de la camada y la habilidad de producción de leche de la cerda.<sup>34, 35</sup>

Hay que tener en cuenta que la expresión de un determinado carácter (fenotipo) es debida a dos factores: la genética del animal (genotipo) y su manejo global (medio ambiente), entendiendo como tal la suma de instalaciones, manejo, sanidad, alimentación, etc. Por tanto, un animal puede ser genéticamente muy bueno para un carácter, por ejemplo: prolificidad, pero tener un promedio de lechones nacidos totales más bajo comparado con otro animal con peor genética, por tener problemas medioambientales (mala alimentación, temperaturas elevadas, enfermedades etc.).<sup>34</sup>

Para que un carácter productivo, reproductivo o morfológico sea seleccionable, debe cumplir una serie de condiciones:

- De importancia económica.
- Ser medible.
- Ser heredable.
- Tener variación.
- Conocer sus interacciones con otros caracteres, tanto negativas como positivas.<sup>34</sup>

En el sistema nacional de evaluación genética de Canadá, las características comúnmente evaluadas incluyen la tasa de crecimiento (de días a 100 kg), la grasa dorsal (profundidad de la grasa del lomo a los 100 kg, medido por ultrasonido), eficiencia

alimenticia (estimado por kg de alimento por kg de ganancia), rendimiento magro (estimación del contenido tejido magro de la canal), profundidad del lomo (profundidad del músculo dorsal largo medido por ultrasonido), área del ojo del lomo (área estimada de la cara expuesta del músculo dorsal largo de una canal acanalada) y tamaño de la camada (número de nacidos totales o el número de nacidos vivos).<sup>35</sup>

La exactitud del Valor Estimado de Cruzamiento (EBV) es generalmente alta para el crecimiento y pronóstico de las características de la canal en verracos ya que todos ellos tendrán su propia información sobre el rendimiento, así como el desempeño de sus compañeros de camada y otros familiares incorporados al EBV. El tamaño de la camada, sin embargo, es de baja heredabilidad (alrededor del 10%) y no se mide en el verraco. Hasta que un verraco acumula datos sobre el tamaño de la camada producida por un número de sus hijas, este EBV será inferior en la precisión que las de las características de crecimiento. La selección es por lo tanto, más eficaz en el crecimiento y características de engorda como lo demuestran las tendencias recientes de genética.<sup>35</sup>

Por lo anterior, la gran mayoría de machos son seleccionados exclusivamente por las características de crecimiento y de la canal, con un mínimo énfasis puesto en la cantidad, calidad o fertilidad del semen. En consecuencia, es razonable especular que no se conoce el verdadero mérito genético de la mayoría de los verracos comerciales en términos de sus características reproductivas. En esencia, esto representa una población en que la selección es limitada para el desempeño reproductivo del macho. En contraste con el gran interés por las características de producción y reproductivas de la hembra, muchos investigadores han ignorado las características reproductivas del macho.<sup>36, 37</sup>

Hay características de mayor y menor heredabilidad. Entre las más heredables se encuentran las características morfológicas y entre las menos heredables, las reproductivas. Las características relacionadas con la fertilidad del verraco son de baja heredabilidad ( $h^2 = 0.01-0.06$ ) y se ven fuertemente afectadas por los efectos ambientales y genéticos del propio verraco, la hembra y la descendencia.<sup>34, 38</sup> En contraste, las características de calidad del semen tienen una baja a moderada heredabilidad ( $h^2 = 0.19-0.37$ ).<sup>34, 38, 39</sup>

### 2.2.1. Características del semen

Las características del semen de mayor importancia son el volumen, concentración de espermatozoides y morfología de los espermatozoides. El volumen del semen y la concentración de espermatozoides han sido considerados como características hereditarias, pero las estimaciones de heredabilidad y repetibilidad para estos rasgos varían ampliamente.<sup>35</sup>

Bidanel *et al*,<sup>39</sup> han reportado estimaciones moderadas de heredabilidad para las características del semen antes mencionadas (Cuadro 2.1).

**Cuadro 2.1.** Estimaciones de heredabilidad ( $h^2$ ) para características del semen de verraco.

Característica	Nº de estimaciones	Media $h^2$	Rango
Volumen del semen	6	0.19	0.14-0.25
Concentración espermática	6	0.19	0.13-0.26
Motilidad espermática	6	0.11	0.06-0.18
% de anormalidades espermáticas	4	0.10	0.06-0.17

Modificado de:<sup>39</sup>

Por su parte, Smital *et al.*<sup>36</sup>, estimaron la heredabilidad de varias características del macho, entre ellas las del semen, usando cuatro modelos animales multi-rasgo, (Cuadro 2.2), reportando una heredabilidad alta para dichas características.

**Cuadro 2.2.** Media y desviación estándar (D.E) de los rasgos incluidos en los modelos animal (MA) 1-4.

Característica	Media	D.E	MA1	MA2	MA3	MA4
Volumen del semen (ml)	237.2	62.60	Y	Y	-	-
Concentración espermática ( $\times 10^3/\text{mm}^3$ )	412.6	104.54	Y	-	Y	-
Movimiento progresivo (%)	80.5	5.50	Y	Y	Y	-
Espermatozoides anormales (%)	7.6	4.18	Y	Y	Y	-
Número total de espermatozoides ( $\times 10^9$ )	92.9	24.03	-	Y	Y	-
Numero de dosis de inseminación	46.6	12.82	-	-	-	Y
Numero de lechones nacidos vivos	9.0	0.96	Y	Y	Y	Y
Lechones nacidos totales	10.2	0.93	Y	Y	Y	Y
Tasa de concepción	71.8	13.91	Y	Y	Y	Y

Y: Características incluidas. Tomado de:<sup>36</sup>

Donde el volumen del semen fue la característica de mayor heredabilidad con un valor de 0.6, seguido por la concentración de espermatozoides, que fue de alrededor de 0.5. Las demás características del semen (porcentaje de espermatozoides móviles, porcentaje de espermatozoides anormales, número de espermatozoides totales y número de dosis de inseminación) mostraron una heredabilidad moderadamente alta de aproximadamente 0.34-0.42. La tasa de concepción presentó una heredabilidad de 0.29, mientras que las características del tamaño de la camada mostraron valores inferiores a 0.10.<sup>36</sup>

Una alta correlación genética negativa se produjo entre el volumen del semen y la concentración de espermatozoides. También se observó una correlación negativa moderada en torno al 0.3 entre el porcentaje de espermatozoides móviles y el porcentaje de

espermatozoides anormales. Los valores absolutos de las correlaciones genéticas entre las características restantes del semen fueron inferiores a 0.2.<sup>36</sup>

Se encontraron correlaciones genéticas favorables (entre 0.2 y 0.4) entre los porcentajes de espermatozoides móviles y todas las características de reproducción femenina. El volumen del semen y el número de espermatozoides totales influyó negativamente sobre todo el número de lechones nacidos totales. Aunque el porcentaje de espermatozoides anormales mostró una correlación positiva con el número total de nacidos, el número de lechones nacidos vivos, no fue influenciado por el porcentaje de espermatozoides anormales. El número hipotético de dosis de inseminación tuvo un efecto ligeramente positivo en la tasa de concepción. Las correlaciones genéticas entre el número de dosis de inseminación y las dos características del tamaño de camada fueron ligeramente negativas.<sup>36</sup>

Como las características del tamaño de la camada tienen una heredabilidad baja de alrededor de 0.1, sólo un pequeño a moderado progreso genético en estas características será posible. Un argumento a favor de una selección positiva en las características reproductivas masculinas es el peligro de un potencial deterioro de estas características por una selección rápida de las características de producción.<sup>36</sup>

#### **2.2.1.1 Cantidad de Semen**

En los machos reproductores, la producción de semen varía considerablemente entre las razas, Kennedy y Wilkins<sup>40</sup> evaluaron las características del semen de verracos de raza pura. Estos autores encontraron que machos Yorkshire producen habitualmente  $10-12 \times 10^9$  espermatozoides más que las razas Landrace, Hampshire y Duroc que producen cantidades

intermedias. También es sabido que los verracos híbridos producen más volumen de semen que sus contrapartes de raza pura. En consecuencia, parece que hay una gran cantidad de diversidad genética en la producción de semen porcino entre las razas.

#### **2.2.1.2. Espermatozoides totales por eyaculado**

La producción de espermatozoides responde a la selección del tamaño de los testículos. Los verracos seleccionados por aumento del tamaño testicular produjeron  $6 \times 10^9$  espermatozoides más por eyaculado que sus contrapartes; esto representa un aumento de casi 10% en el número de espermatozoides. La producción de espermatozoides al día, aumentó más rápidamente y alcanzó su meseta a edades más tempranas en las líneas seleccionadas para el tamaño testicular en comparación con los controles. En consecuencia, los verracos que pueden producir grandes cantidades de semen a una edad joven y lo mantiene durante su vida productiva son de valor superior ya que producirán una mayor cantidad de dosis por eyaculado. La selección del tamaño de testicular parece ser un método válido para mejorar este parámetro.<sup>37, 41</sup>

#### **2.2.2. Comportamiento de apareamiento y libido**

La mayoría de los trabajos publicados sobre comportamiento sexual en el verraco se realizaron a finales de 1970 y las comparaciones son entre machos de raza pura y cruzados. El consenso general de estos estudios fue que las diferencias dentro y entre razas son mínimas. Dos hallazgos comunes fueron que los verracos cruzados mostraron mayor libido que sus contrapartes de raza pura, y verracos con Duroc en sus genealogías, que estaban menos interesados en la monta y más reacios a su compañera que los machos con cruza de Yorkshire. Las pruebas de comportamiento sexual de estos estudios consistieron en la

exposición de los verracos a cerdas en estro. Por el contrario, a los verracos para IA actuales rara vez se les permite el contacto con hembras después de que alcanzan la madurez sexual.<sup>37</sup>

Se ha demostrado que la producción de testosterona responde a la presión de selección y su heredabilidad es similar a las de otras características reproductivas del macho. Como la testosterona es la hormona más estrechamente asociada con la conducta sexual, es fisiológicamente razonable esperar que verracos con una elevada cantidad de testosterona también tengan una libido elevada. En la actualidad, existen limitaciones técnicas asociadas a la recopilación y utilización de las concentraciones de testosterona en los programas de selección. Sin embargo, se ha demostrado que los verracos seleccionados por un mayor tamaño testicular también tienen concentraciones elevadas de testosterona.<sup>37</sup> En teoría, la selección del tamaño de los testículos podría ser una manera de mejorar el comportamiento sexual en machos.<sup>41</sup>

Se ha estimado que el tamaño de los testículos y el peso testicular tienen una heredabilidad de  $h^2 = 0.37$  y  $h^2 = 0.44$ , respectivamente, mientras la libido tiene una heredabilidad correspondiente a  $h^2 = 0.15$ .<sup>39</sup>

### **2.2.3. Comportamiento de entrenamiento**

En las postas comerciales, la única medida de la conducta de apareamiento monitoreada regularmente es la proporción de verracos que no pueden ser entrenados para la colección de semen. Los datos presentados en el Cuadro 2.3 se obtuvieron a partir de tres postas de 250 verracos, durante un período de tres años. Cada posta aloja las mismas cuatro líneas genéticas de cerdos, los cuales están compuestos de tres o cuatro razas diferentes,

seleccionados para el crecimiento y características de la canal. Una vez entrenados exitosamente del 5° al 7° mes de edad, los verracos fueron trasladados a las postas y se inicio su colección regular entre el 7° y 9° mes de edad.<sup>37</sup>

El promedio general de la proporción de machos que fueron considerados fracasos en el entrenamiento fue de  $0.15 \pm 0.04$ , con un rango de 0.14 a 0.18 para los tres genotipos. No hubo efecto de la línea genética ( $P= 0.45$ ) o posta ( $P= 0.17$ ). Por lo tanto, la variación fenotípica asociada con el comportamiento de monta de los verracos de líneas de terminales fue baja. Por lo tanto, no parece haber una oportunidad para aumentar la tasa de éxito de entrenamiento de los verracos, debido a la escasa variación fenotípica entre verracos, y parece ser más prudente, enfocarse en las técnicas de entrenamiento y otros factores de manejo, que en la búsqueda de la genética superior.<sup>37</sup>

**Cuadro 2.3.** La media y error estándar de la posta y la línea genética en la proporción de verracos que no pudieron ser entrenados para su colección.

Posta	Líneas Genéticas				Media de la Posta
	A	B	C	D	
1	$0.15 \pm 0.03$ (68)	$0.19 \pm 0.06$ (76)	$0.22 \pm 0.06$ (45)	$0.14 \pm 0.04$ (32)	$0.17 \pm 0.05$ (221)
2	$0.12 \pm 0.04$ (47)	$0.10 \pm 0.02$ (81)	$0.15 \pm 0.03$ (73)	$0.11 \pm 0.03$ (35)	$0.12 \pm 0.03$ (236)
3	$0.16 \pm 0.04$ (43)	$0.18 \pm 0.05$ (45)	$0.19 \pm 0.04$ (78)	$0.15 \pm 0.03$ (64)	$0.16 \pm 0.04$ (230)
Media de la línea	$0.14 \pm 0.04$ (158)	$0.15 \pm 0.05$ (202)	$0.18 \pm 0.04$ (196)	$0.13 \pm 0.03$ (131)	-

Tomado de:<sup>37</sup>

#### 2.2.4. Fertilidad

Los verracos son una importante fuente de variación con respecto al éxito de la fertilización en el ganado porcino tanto *in vivo* como *in vitro*. Sin embargo, sólo unos pocos estudios han tratado de investigar si existe un componente genético de estas diferencias. La

conclusión general de estos estudios fue que los machos híbridos tienden a producir más lechones que los verracos de raza pura. Desgraciadamente, el número de apareamientos de los verracos que se utilizaron en estos estudios no fueron suficientes para evaluar realmente la fertilidad del verraco de IA, dado que se utilizó la monta natural. En esencia, los resultados de dichos estudios tienen una utilidad limitada para las líneas modernas de verracos de IA.<sup>37</sup>

### **2.3. MÉTODOS DE SELECCIÓN**

La selección genética se basa en algo tan simple de entender, pero tan complicado de llevar a la práctica, como elegir de entre un grupo de animales los que son genéticamente mejores para determinados caracteres. La identificación precisa del mérito genético es cada vez más importante con el uso generalizado de la IA y el consiguiente aumento en el número de la prole por semental.<sup>33, 34</sup> Entre los métodos de selección, podemos encontrar:

#### **2.3.1. Selección Visual**

La selección visual es la práctica de la selección de un verraco basada exclusivamente en su apariencia en un momento determinado. Aunque este método es el más simple y más antiguo utilizado por la industria porcina y se remonta a principios de la domesticación, el resultado es una tasa menor de progreso genético para la mayoría de características de importancia económica. Este método de selección es raramente predominante hoy en día, pero se puede utilizar en combinación con otros métodos para ayudar a identificar anomalías genéticas, destacar la conformación corporal, la corrección estructural, etc.<sup>33</sup>

Monorquidismo, criptorquidismo, defectos locomotores, frenillo persistente del pene, número anormal de tetas o mal espaciamiento entre ellas, pezones invertidos, son algunos ejemplos de características morfológicas heredables no deseables, que se pueden detectar con un examen visual.<sup>42</sup>

### **2.3.2. Medición del rendimiento individual**

El rendimiento individual del verraco se mide y se utiliza para proporcionar comparaciones objetivas, por lo general la tasa de crecimiento y espesor de grasa dorsal. Este enfoque resultó más eficaz que la evaluación visual, pero las comparaciones entre verracos siguen siendo difíciles, a menos que estén dentro del mismo grupo contemporáneo. Sin embargo, este método no captura ningún historial de rendimiento relevante de los antepasados del verraco candidato y puede variar ampliamente a causa del ambiente.<sup>33</sup>

### **2.3.3. Valor Estimado de Cruzamiento (EBV) y Mejor Selección Lineal Insesgada (BLUP)**

En la década de los 80s, con el auge de la computación, se implantó el uso de un programa informático de selección genética, este sistema se basa en una serie de complejos desarrollos matemáticos que registran el rendimiento fenotípico e información del pedigrí, que se utiliza para calcular las evaluaciones genéticas expresadas como el Valor Estimado de Cruzamiento (EBV de las siglas en inglés Estimated Breeding Values), Diferencia de Progenie Esperada (EPD de Expected Progeny Difference), basados en la Mejor Predicción Lineal Insesgada (BLUP de Best Linear Unbiased Predictors) para una serie de características de importancia económica. Utilizando los datos del rendimiento individual, ajustado por factores ambientales y los datos genealógicos de los candidatos de selección,

EBV y EPD permiten el cálculo objetivo del mérito genético de los verracos de forma individual. Una de las ventajas de esta tecnología, es el hecho de que permite el cálculo del mérito genético de un animal con base únicamente en el pedigrí. El aspecto importante en la selección de un verraco no es su EBV actual, si no su posición relativa en comparación con otros individuos dentro de una población.<sup>33, 34, 43</sup>

Los verracos seleccionados sobre la base de su índice de EBV son luego examinados por otros factores que afectan su idoneidad para la IA, incluida la conformación (patas y piernas), defectos (malformaciones de los pezones), alelos nocivos (RN), estado de salud del hato, genética y diferentes productos provenientes de diversas líneas genéticas existentes dentro de la unidad, la preferencia del cliente y las condiciones del mercado local.<sup>35</sup>

El método de selección varía según la unidad de IA, pero normalmente incluye una revisión del EBV, una inspección visual del verraco y los resultados de pruebas disponibles para genes específicos. Para el máximo progreso genético en características de importancia económica, la teoría indica que el enfoque debe permanecer en la selección de verracos con base en los índices de EBV, después de la proyección antes mencionada y con otros factores usados para decidir entre verracos de mérito similar.<sup>35</sup>

El proceso de decisión de sustituir a un verraco es igualmente diverso en todas las producciones y unidades de IA. Los verracos son generalmente reemplazados cuando un verraco joven con mejor EBV y/o índice de valores está disponible. Un estudio en el año 2003, de siete unidades de AI en América del Norte y Europa reveló que el 20-45% de los verracos son reemplazados cuando un verraco joven de mayor mérito genético está

disponible (Cuadro 2.4). Las tasas de reemplazo fueron variables, pero en general, todos los verracos fueron reemplazados antes de los cuatro años, a menos que fuera realmente excepcional. La incidencia de verracos reemplazados por la calidad del semen y problemas de producción es variable pero constituyen una proporción significativa de la población de sacrificados; estos sacrificios involuntarios, interfieren con el programa seleccionado diseñado por los genetistas de la unidad.<sup>35</sup>

**Cuadro 2.4.** Principales causas de reemplazo de los verracos en unidades de IA.

Capacidad de la unidad (s) (# verracos)	% anual de reemplazo	Razones para reemplazar a los verracos (% anual)				
		Genéticas	Calidad del semen	Libido	Solidez física	Otros
164-2000	50-145%	20-45%	10-30%	1-21%	13-60	10-20

\*Las razas de cerdos difirieron dentro y entre unidades [Danbred, Duroc, Genetiporc, Hampshire, Landrace (varios tipos), PIC, Yorkshire y varias cruzas]. Algunos de los entrevistados, proporcionaron datos combinados de varias unidades, e indicaron que las diferentes razas de cerdos presentaron diferencias en los tipos de sacrificio por razones genéticas y no genéticas. Tomado de:<sup>35</sup>

### 2.3.4. Pruebas de genética molecular

El desarrollo continuo de las herramientas de genética molecular y la capacidad de identificar con precisión la variación molecular a una edad temprana de los animales, han cambiado la selección sexual. Gran parte del trabajo teórico se ha realizado para evaluar bajo el enfoque de Selección Asistida por Marcadores (MAS de Marker Assisted Selection). La Selección Asistida por Marcadores se basa en la identificación de una asociación entre un marcador genético con una determinada característica fenotípica.<sup>33</sup>

Un ejemplo de MAS, es un polimorfismo en el locus del gen receptor de estrógenos (ESR) identificado en los cerdos chinos Meishan, asociando a su gran tamaño de camada. Una relación similar se encontró en algunas líneas comerciales, pero la relación entre el marcador y el fenotipo no fue consistente en todas las poblaciones.<sup>33, 44</sup>

Estudios posteriores encontraron que este polimorfismo se asocia con un mayor rendimiento reproductivo en varias razas de cerdos distintos de la Meishan. Específicamente, un alelo ventajoso del gen ESR (alelo B) ha demostrado tener un efecto aditivo positivo en el número de lechones nacidos totales y el número de lechones nacidos vivos. También se ha tratado de encontrar asociaciones entre este locus y otras características de la especie porcina, tales como espesor de grasa dorsal y el número de pezones.<sup>44</sup>

La gran ventaja de las pruebas moleculares, es la posibilidad de realizar la prueba al nacimiento de los animales. Esto permite una evaluación de las características que sólo se expresan tardíamente en la vida o que están relacionadas con el sexo. Una limitación importante de este enfoque ha sido que las características de mayor importancia económica están bajo el control de varios genes. Ya que las tecnologías moleculares permiten el muestreo de los animales al nacer; estas son especialmente útiles para las características que se miden al final de la vida (reproducción, longevidad), las que sólo se expresa en uno de los sexos (tamaño de la camada), o aquellos que son difíciles de medir (resistencia a enfermedades, calidad de la carne).<sup>33</sup>

Se ha propuesto que el análisis de genes candidatos se pueda utilizar para identificar los genes individuales responsables de las características de importancia económica. Pues el

análisis de genes candidatos para las características reproductivas en las cerdas ha demostrado con éxito la oportunidad de seleccionarlás para mejorar el rendimiento reproductivo. Las hormonas y los receptores de las hormonas, son buenos genes candidatos para las características de reproducción, ya que modulan los pasos limitantes en muchas vías de la reproducción.<sup>38</sup>

Como ejemplo de lo anterior, se realizó un estudio donde los verracos se evaluaron para nueve genes candidatos, entre ellos el Receptor de la Hormona Liberadora de Gonadotropinas (GnRHR), Prolactina (PRL), Receptor de la prolactina (PRLR), Hormona Folículo Estimulante Beta (FSHB), Hormona Luteinizante Beta (LHB), Folistatina (FST), Inhibina (INHA), Inhibina Beta A (INHBA), Inhibina Beta B (INHBB) que son genes conocidos por su función en el circuito hormonal del macho, y fueron elegidos para investigar sus efectos en las características de calidad del semen y la fertilidad del verraco.<sup>38</sup>

El análisis de varianza reveló una asociación significativa de GNRHR con la motilidad MOT ( $P= 0.0161$ ), con la tasa de gota plasmática TGC ( $P= 0.0048$ ) y con la tasa de espermatozoides anormales TEA ( $P= 0.0201$ ). Los cerdos heterocigotos para GnRHR presentaron una motilidad espermática significativamente más alta y una propensión a la disminución de la tasa anormal de espermatozoides y la tasa de espermatozoides inmaduros en comparación con los homocigotos CC.<sup>38</sup>

El gen INHBA afectó significativamente TGP ( $P = 0.0318$ ) y TEA ( $P = 0.0067$ ). Mientras que el gen INHBB se asoció significativamente con la concentración espermática ( $P = 0.0360$ ) en la población de verracos. Los efectos de sustitución de estos alelos fueron

principalmente negativos y varió de  $0.133 \times 10^8/\text{ml}$  a  $0.030 \times 10^8/\text{ml}$ , mientras que FSHB, FST, INHA, PRL, PRLR y LHB no tuvieron efectos significativos sobre ninguna característica.<sup>38</sup>

Por otro lado, ya que se ha sugerido que existe una base genética para la variación en la calidad del semen después de la descongelación, y que las tecnologías moleculares modernas son capaces de identificar marcadores ligados a genes que influyen en esta variación, se realizó un estudio para determinar la existencia de la variación genética interindividual en congelabilidad espermática y para la identificación de marcadores moleculares ligados a genes que controlan la congelabilidad del semen de verraco.<sup>45, 46</sup>

Independiente de la calidad del espermatozoide de verraco antes de la congelación, el semen de ciertos individuos consistentemente se congela mal, lo que resulta en una motilidad pobre, membranas plasmáticas interrumpidas y acrosomas reaccionados, reduciendo así la capacidad de fertilización de los espermatozoides. La congelación del semen no es un fenómeno biológico natural, por lo que es poco probable que haya un gen para controlar o regular la criopreservación. Sin embargo, los genes que se buscan tienen una influencia en la respuesta de los espermatozoides en el proceso de congelación-descongelación.<sup>45, 46</sup>

La evaluación de la viabilidad del espermatozoide arrojó una clasificación con tres categorías distintas de congelabilidad del semen, utilizada para asignar 129 verracos en grupos basados en la capacidad de sus espermatozoides para sobrevivir al proceso de congelación (buenos, medios, y pobres congeladores; 24, 63, y 42 verracos, respectivamente).<sup>46</sup>

El DNA de 22 verracos Large White previamente clasificados como buenos y malos congeladores fueron sometidos a la técnica de polimorfismos en la longitud de fragmentos de restricción amplificados (AFLP, de sus siglas en inglés: técnica molecular que visualiza diferencias en las secuencias de DNA entre individuos y proporciona un medio para identificar marcadores de DNA asociados con características deseadas, mediante la exploración de las relaciones entre la presencia o ausencia de un fragmento de DNA amplificado), identificando dieciséis marcadores moleculares potencialmente ligados a genes que controlan la congelabilidad del semen.<sup>46</sup>

Se espera que la comprensión de las causas de la variación a nivel genético sentará las bases para la mejora de la calidad del semen criopreservado mediante la selección genética y el desarrollo de pruebas genéticas que predigan el resultado de la congelación del semen.<sup>45, 46</sup>

Otro ejemplo, es el uso del gen del Factor de Crecimiento Parecido a la Insulina 2 (gen IGF2) expresado en los padres, el cual ha demostrado tener efectos favorables tanto en el crecimiento magro, como en características reproductivas asociadas a un mejor tamaño de camada, pero solo en el alelo que es heredado por el padre.<sup>47</sup>

Un nuevo aspecto de la selección ha sido el desarrollo de paneles de marcadores genéticos que cubren el genoma completo, lo que ha permitido que locus individuales subyacentes a la varianza genética de características cuantitativas de importancia económica (QTL's) sean detectados y mapeados sistemáticamente. QTL's para características reproductivas del macho han sido mapeados usando cruza entre cerdos chinos y razas europeas/americanas. La mayoría de ellos han tenido un efecto limitado (menos del 10% de variación), pero un número limitado de locus, localizados en el

cromosoma X, explican hasta el 20% de la varianza de varias características reproductivas del macho, como por ejemplo el peso del testículo y las vesículas seminales, el diámetro del túbulo seminífero, etc.<sup>39</sup> En el Cuadro 2.5 se muestran los QTL's para algunas características reproductivas del verraco.

**Cuadro 2.5.** Locus de Rasgos Cualitativos (QTLs) para características reproductivas del verraco.

Característica	Cromosoma del cerdo	Población <sup>a</sup>	Tamaño	% Varianza	Referencia
Duración de la eyaculación	6, 17	DU x ER	177	7.7 - 7.9	Xiang <i>et al.</i> , 2009
Tiempos de eyaculación	6, 16, 17	DU x ER	177	5.9 - 11.8	Xiang <i>et al.</i> , 2009
Peso del epidídimo a:					
90 días de edad	2	DU x ER	347	4.5	Ren <i>et al.</i> , 2009
180 días de edad	3, 4, 10, 13, 15	LW x MS	487	1.9 - 4.3	Bidanel <i>et al.</i> , 2001
300 días de edad	3, 7	DU x ER	347	4.5 - 27.3	Ren <i>et al.</i> , 2009
Longitud de las glándulas bulbo uretrales	1, 3, 7, 13	LW x MS	485	3.3 - 5.1	Bidanel <i>et al.</i> , 2001
Nivel plasmático de FSH	3, 10, X	WC x MS	315	-	Rhorer <i>et al.</i> , 2001
Nivel plasmático de testosterona	7, 13	DU x ER	347	7.3 - 14.3	Ren <i>et al.</i> , 2009
Volumen del semen	3, 15, 18	DU x ER	177	7.9 - 8.6	Xiang <i>et al.</i> , 2009
Diámetro de túbulos seminíferos a los:					
90 días de edad	5, 13, 14, X	DU x ER	347	8.4 - 14.8	Ren <i>et al.</i> , 2009
300 días de edad	16	DU x ER	347	14.8	Ren <i>et al.</i> , 2009
Peso de las vesículas seminales	1, 3, 4, 7, 11, 15, 16, X	LW x MS	481	2.5 - 21.8	Bidanel <i>et al.</i> , 2001
Tasa de espermatozoides anormales	4, 9	DU x ER	177	8.8 - 11.8	Xiang <i>et al.</i> , 2009
Concentración espermática	17	DU x ER	177	9.5	Xiang <i>et al.</i> , 2009
Motilidad espermática	4	DU x ER	177	6.3	Xiang <i>et al.</i> , 2009
Valor de pH del semen	2, 6, 9	DU x ER	177	5.7 - 9.8	Xiang <i>et al.</i> , 2009
Peso testicular a los:					
60 días de edad	3, X	DU x MS	449	5.0 - 9.0	Sato <i>et al.</i> , 2003
90 días de edad	1, X	DU x ER	347	9.1 - 20.6	Ren <i>et al.</i> , 2009
180 días de edad	4, 7, 10, 13, 17, X	LW x MS	487	3.5 - 19.6	Bidanel <i>et al.</i> , 2001
220 días de edad	X	WC x MS	315	-	Rhorer <i>et al.</i> , 2001
300 días de edad	1, 5, 7, X	DU x ER	347	4.8 - 14.7	Ren <i>et al.</i> , 2009

<sup>a</sup> Cruza de las razas DU, Duroc; ER, Erhualian; LW, Large White; MS, Meishan; WC, White European. Tomado de: <sup>39</sup>

## 2.4. ALTERACIONES GENÉTICAS QUE AFECTAN LA REPRODUCCIÓN

Otro uso que se le ha dado a los marcadores genéticos en los programas de selección, además de la selección de características deseables, es el de la identificación de genes indeseables, como RYR-1 y Rendiment Napole que son dos ejemplos de alelos deletéreos que afectan la calidad de la carne de los cerdos portadores de uno o dos copias del alelo “malo”. En ambos casos, el alelo "malo" se asocia con un aumento en el rendimiento magro de la canal pero una disminución en la calidad de la carne de cerdo que se muestra como carne pálida, suave y exudativa (PSE).<sup>33, 35</sup>

Las cerdas se pueden seleccionar por su buen tamaño de camada, pero los machos también contribuyen. Translocaciones recíprocas se producen cuando cromosomas diferentes intercambian piezas y posterior a la segregación durante la meiosis produce gametos que pueden estar equilibrados o desequilibrados con respecto a los cromosomas portadores de las translocaciones, los gametos desequilibrados portan una cromátida que será demasiado larga o demasiado corta. Si un espermatozoide penetra el óvulo, la cromátida desequilibrada no puede sincronizar correctamente con su par de cromátida femenina, lo que resulta en muerte embrionaria temprana y por lo tanto, una camada más pequeña.<sup>35</sup>

Un desplazamiento se ha identificado en verracos de la raza York finlandés, cuya translocación produce un promedio de dos lechones menos por camada que el promedio de la raza. Además, aunque los hijos que reciben el cromosoma desequilibrado mueren, la mitad de los descendientes vivos llevan la translocación balanceada y estas crías son subfértiles: por ejemplo, 16 hijas del verraco York fueron criadas, su producción fue de 9.35 lechones por camada, en contraste con el promedio de la raza para las primerizas de

10.3. Aunque en este caso la translocación aparentemente tiene como origen el resultado de un desplazamiento espontáneo, el problema con claridad puede perpetuarse en las generaciones posteriores.<sup>35</sup>

Se ha reportado que las deficiencias de GnRHR y mutaciones de GnRHR están asociadas con el hipogonadismo hipogonadotrófico idiopático o el síndrome de Kallmann en humanos. Por su parte, ratones machos *knocaut* FSHB homocigotos tuvieron niveles normales de testosterona en suero, pero presentaron testículos pequeños y oligospermia. Una mutación que causa la inactivación de la subunidad beta B de la LH en humanos conduce a la ausencia de células de Leydig, ausencia de pubertad espontánea e infertilidad.<sup>38</sup>

También, se ha encontrado que los machos que carecen del gen del receptor de la activina II, son fértiles, a pesar de que llegan a la pubertad tardíamente y con testículos de menor tamaño, pero las hembras son completamente infértiles. Sin duda, un verraco con estas características normalmente debería ser sacrificado, pero si se tratara de un verdadero "gigante genético" en las características de producción, de hecho podría ser utilizado y por lo tanto, podría estar produciendo hijas infértiles e hijos portadores.<sup>35</sup>

Otro ejemplo, es el receptor de estrógenos beta. Se ha observado que los ratones machos que carecen de este receptor, son fenotípicamente normales y fértiles, a pesar de que su próstata se agranda en la edad adulta. Sin embargo, las hembras que carecen de este receptor son subfértiles, lo que implica que un macho fértil de apariencia normal, puede causar la transmisión genética de la infertilidad a su descendencia femenina.<sup>35</sup>

## **CAPÍTULO III.**

### **EFECTO DEL MEDIO AMBIENTE SOBRE LOS SEMENTALES**

#### **3.1. INTRODUCCIÓN**

Los efectos del medio ambiente repercuten sobre el potencial genético de los cerdos, determinando durante el año los períodos de reproducción así como su intensidad. Factores del medio ambiente como la temperatura, el fotoperiodo y la humedad, entre otros, son capaces de modificar en condiciones particulares, la actividad reproductiva de los animales domésticos. Los porcinos tienen cierta capacidad de adaptación, pero esto tiene un límite y las variaciones ambientales se llevarán a cabo provocando estrés en los animales con consecuencias negativas sobre el rendimiento productivo y reproductivo del semental. A fin de superar el estrés por calor, alta humedad y fotoperiodos cambiantes, así como los problemas de consumo de alimento, la gestión eficaz del medio ambiente es muy importante. A continuación se abordarán aquellos factores medioambientales que juegan un papel importante en el desempeño del verraco.

#### **3.2. TEMPERATURA Y HUMEDAD**

La habilidad reproductiva de los animales de granja se ve afectada por factores estacionales tales como la temperatura, la humedad y la duración de la luz del día. En el medio ambiente, la temperatura es uno de los factores con mayor influencia en los índices reproductivos de una granja, determinada por un balance térmico del aire (mezcla de

gases), los animales y las instalaciones de alojamiento.<sup>48</sup> Está bien establecido que la eficiencia reproductiva en la producción porcina a menudo es menor durante y después de la temporada de calor. Una de las razones para la reducción en el rendimiento reproductivo podría ser la elevada temperatura ambiental, lo que induce el estrés por calor.<sup>49, 50</sup>

Dicho lo anterior, el más importante tipo de gestión para el verraco de IA es el manejo térmico y de la humedad, ya que temperaturas ambientales excesivamente frías o calientes y una humedad elevada crean estrés que puede afectar el consumo de alimento.<sup>51</sup>

El clima frío por lo general no afecta la reproducción, a menos que las instalaciones sean insuficientes para protegerlos de las inclemencias del clima y mantener el bienestar de los cerdos.<sup>51</sup> Solo ante este panorama las bajas temperaturas pueden alterar la función del semental joven retrasando su crecimiento y por consiguiente la aparición de la pubertad, acompañándose por la disminución de la función testicular e inclusive podría ser causa de hipoplasia de este órgano.<sup>52</sup>

Sin embargo, las altas temperaturas pueden causar una gran cantidad de efectos adversos en la reproducción del macho. Las altas temperaturas afectan a la espermatogénesis y disminuyen la producción y calidad espermática.<sup>48</sup> Si un semental es expuesto a temperaturas elevadas durante varios días, disminuye el número de espermatozoides en el eyaculado y en consecuencia, la fertilidad del animal; la disminución ocurre aproximadamente de la tercera a la sexta semana de haberse iniciado la exposición a temperaturas elevadas.<sup>52</sup>

Hay una diversidad de opiniones sobre la temperatura ambiental óptima para los verracos, algunos autores recomiendan de 16 a 18 °C y otros de 16 a 27 °C. Es difícil poner

límites de temperatura por lo que es mejor dar un límite máximo de amplitud, por lo que se recomienda no exponer a los sementales a temperaturas por arriba de 27 °C por periodos de 72 horas, al igual que 24 y 26 °C por 10 días pues tiene el mismo efecto negativo con las mismas repercusiones sobre la calidad del semen. Aunque se ha establecido que la raza Large White puede producir espermatozoides normales a una temperatura ambiente de 16 a 29 °C. En cuanto a la humedad, diversos autores recomiendan una humedad relativa del 50-70%.<sup>48, 50, 52, 53</sup>

La temperatura del escroto oscila entre 35 y 36.5 °C (2.5 °C por debajo de la temperatura corporal).<sup>52</sup> La posición testicular común en numerosos mamíferos, muestra la gran sensibilidad de este órgano al efecto de la temperatura, ya sea el calor durante el verano o hipertermia causada por una enfermedad.<sup>54</sup> En la mayoría de los mamíferos, la espermatogénesis se deteriora a una temperatura testicular elevada, aunque sólo alcance la temperatura corporal. Este fenómeno implica que las células espermatogénicas son extremadamente sensibles al estrés por calor.<sup>55</sup> Las consecuencias de un aumento brusco de la temperatura, no serán iguales en todas las porciones del tubo seminífero:

- Estrés térmico corto: sólo se ven afectadas las porciones de los tubos seminíferos con estadios espermátida-espermatozoide.
- Estrés térmico fuerte o prolongado: se ven afectadas todas las porciones de los tubos seminíferos.<sup>54</sup>

#### **3.2.1. Choque Térmico**

Para todos los mamíferos es posible definir una zona de bienestar térmico. La constancia de las pérdidas térmicas se debe a la vasodilatación periférica, sin que otros mecanismos se pongan en marcha. Más allá de esta zona, la evaporación de los líquidos

corporales permite regular las pérdidas térmicas a medida que la temperatura exterior aumenta. Por lo que, una vez alcanzada la vasodilatación máxima, la evaporación cutánea y frecuencia respiratoria aumentan de manera lineal en relación a la temperatura ambiente, permitiendo un equilibrio de los cambios térmicos. El incremento de la evaporación cutánea se obtiene por la emisión de sudor a nivel de las glándulas sudoríparas y de la evaporación respiratoria por el incremento de la frecuencia respiratoria. Ni la emisión de sudor, que en el cerdo es limitada, por su pobre capacidad de sudoración, ni la frecuencia respiratoria pueden aumentar indefinidamente, por lo tanto la cantidad de líquido que puede evaporarse está limitada por la humedad del aire. La temperatura corporal aumenta, produciéndose la hipertermia o estrés térmico.<sup>51, 56</sup>

El medio térmico no se concreta a la temperatura ambiente, la radiación solar o la humedad del aire, que pueden acentuar la carga térmica, sino también a la circulación del aire o las bajas temperaturas nocturnas que pueden aligerarla. No todos los animales responden de igual manera a un mismo medio térmico, algunos cerdos que son sensibles al calor pueden ser más afectados que aquellos que tienen una tolerancia a temperaturas elevadas, además las razas locales son generalmente más resistentes o están mejor equipadas para la termólisis.<sup>51, 56</sup>

En resumen, cuando los animales son sometidos a una carga térmica demasiado elevada, no pueden regular su temperatura interna para mantenerla dentro de límites que permitan índices satisfactorios de producción y de reproducción. La importancia de esta carga térmica, en condiciones de producción, depende de muchos factores ligados al medio ambiente (radiación solar, temperatura, humedad, circulación del aire), pero también está vinculada al propio animal a través de su genotipo o su nivel de producción.<sup>56</sup>

El estrés térmico en los sementales aumenta la secreción de cortisol y disminuye los valores séricos de testosterona que se refleja en una alteración de la producción espermática. El aumento de la temperatura testicular provoca alteraciones en algunas etapas críticas del ciclo del epitelio seminífero y por eso este efecto se limita a afectar a algunos tipos celulares,<sup>57</sup> interfiriendo principalmente en la maduración de los espermátocitos y las espermátidas.<sup>52</sup>

El efecto del estrés térmico limitado solamente al proceso de elaboración de las células sexuales, y la relativa insensibilidad de los espermatozoides epididimarios explican el largo plazo necesario para la aparición de las alteraciones en el semen eyaculado después del estrés térmico.<sup>56, 57</sup> Se ha observado que el efecto que causa detrimento sobre las características del semen aparece de 7-14 o 15 a 21 días después del inicio del estrés térmico<sup>53</sup> y puede reducir la fertilidad durante más de 8 semanas,<sup>58</sup> pero la duración y la intensidad de la exposición al estrés térmico determinan el retorno a una calidad normal del semen.<sup>56</sup>

#### **3.2.2. Efecto del choque térmico sobre los parámetros reproductivos**

Las altas temperaturas ambientales afectan ampliamente la eficiencia reproductiva de los verracos, limitando la capacidad de termorregulación testicular necesaria para el desarrollo normal de la espermatogénesis. Se ha demostrado que elevadas temperaturas ambiente tienen un efecto negativo sobre la libido y la calidad del semen.<sup>51, 53, 57, 59</sup>

Durante las épocas calurosas, los cerdos pueden comer menos y el equilibrio nutricional de su dieta puede verse afectado. Se ha asociado la reducción de la libido y el volumen del semen, como resultado de una disminución en los niveles de  $17\beta$ -estradiol.

También se habla de que si el tejido testicular muestra un grado de degeneración que no es tan grave, la libido de los verracos podría no verse afectada.<sup>51</sup>

La temperatura ambiente bajo la cual la motilidad del esperma se mantiene normal es de 27 °C, no importa si este incremento es súbito o paulatino, y la diferencia entre mantener a un macho a 32 °C puede ser hasta de un 28% más de células anormales que mantenerlo a 15 °C.<sup>27</sup>

Cuando se presenta un periodo de estrés térmico de 24 horas, los cambios en las características del semen y en las concentraciones hormonales no difieren entre 20 y 35 °C, pero cuando el periodo es de 100 horas aumentan las anomalías, especialmente la presencia de gota citoplasmática, cabezas anormales y baja la motilidad, asociado a esto se observa una disminución en los niveles circulantes de testosterona y un incremento en los niveles de cortisol.<sup>27,51</sup>

En otro estudio se demostró que los verracos sometidos al calor por períodos de seis horas por día, a una temperatura de 33.4-37.7 °C y una humedad relativa de 40-80%, produjeron un aumento significativo en los espermatozoides anormales (espermatozoides con la cabeza anormal, gota citoplasmática, cola anormal y defecto de la pieza intermedia) de dos a cinco semanas después del tratamiento.<sup>51</sup>

En cuanto a la afección de parámetros como la motilidad y el porcentaje de acrosomas normales, un estudio determinó que dichos parámetros fueron mejores en postas con control de la temperatura ambiente (ATC) (61.6 y 55.6%, respectivamente) que en las postas sin control de la temperatura (WATC) (57.8 y 53.4%). Los resultados en postas WATC y ATC indican que el semen producido por verracos alojados sin control de la

temperatura ambiente, tiene peor calidad seminal, observándose las mayores variaciones en la calidad del semen durante el verano. Es importante destacar que un mayor control ambiental, especialmente durante el invierno y el verano, mejorará el bienestar de los verracos y, en consecuencia los resultados de producción seminal con una mejor calidad.<sup>48</sup>

Huang *et al.*<sup>55</sup> determinaron la concentración, motilidad y morfología de los espermatozoides en las muestras de semen de tres razas porcinas. El Cuadro 3.1 enumera estas características de calidad del semen. Se observó una diferencia estacional significativa en todos los caracteres evaluados ( $P < 0.05$ ). La calidad del semen en la temporada de frío fue significativamente mejor que durante la temporada de calor en las tres razas de verracos. La calidad del semen de los verracos Landrace fue mejor que la de los Duroc y Yorkshire en ambas temporadas ( $P < 0.05$ ).

**Cuadro 3.1.** Medias de cuadrados mínimos de las características calidad del semen de verraco.

Características	Temporada fría (15.0 ±0.3 a 22.2±0.4 °C)			Temporada calurosa (23.7±0.3 a 32.0±0.4 °C)		
	Duroc	Landrace	Yorkshire	Duroc	Landrace	Yorkshire
Motilidad (%)	80.5±1.2a	82.6±1.5a	80.5±1.7 a	58.3±1.2c	71.1±1.5b	58.9±1.7c
Esperma normal (%)	55.1±1.9 c	70.7±2.4 a	63.3±2.6 b	37.0±1.8e	53.3±2.3 c	45.9±2.5 d
PPD*(%)	4.6±0.6 bc	3.2±0.7 c	5.7±0.8 b	7.7±0.6 a	4.6±0.7 b	6.6±0.8 ab
DPD** (%)	13.0±1.3c	6.5±1.6 de	2.5±1.8e	21.6±1.2a	17.0±1.5b	8.1±1.7d
Esperma anormal (%)	27.3±1.8c	19.6±2.3 d	28.5±2.6 bc	33.8±1.8 ab	25.1±2.2 cd	39.0±2.5 a
Concentración espermática (x10 <sup>8</sup> /ml)	2.38±0.19b	1.75±0.24c	2.03±0.27 bc	3.14±0.19 a	2.45±0.23 b	2.28±0.26 c

a Las medias dentro de la misma fila con diferentes letras difieren significativamente ( $P < 0.05$ ).

\* PPD: Espermatozoides con gota citoplasmática proximal.

\*\* DPD: Espermatozoides con gota citoplasmática distal. Modificado de:<sup>55</sup>

En otro estudio, se expuso a los verracos a 35 °C durante 100 h. El semen fue utilizado para la inseminación de cerdas primerizas Landrace x Large White, observándose

una disminución de la fertilidad a partir de la segunda semana después del término del estrés (Cuadro 3.2).<sup>53</sup>

**Cuadro 3.2.** Porcentaje de fertilidad después de someter a verracos a estrés térmico.

Momento de la IA	Número de primerizas	% de fertilidad
Antes del estrés térmico	14	78
2 – 3 semanas tras el estrés	12	63
5 – 6 semanas tras el estrés	6	67
7 – 10 semanas tras el estrés	8	89

Tomado de:<sup>53</sup>

Ha sido ampliamente reportada una variación individual en la sensibilidad de los verracos a las temperaturas elevadas y al calentamiento local del escroto, siendo los verracos sensibles los que muestran las respuestas marcadas con los cambios en el medio ambiente, mientras que los otros cerdos tienden a recuperarse más rápido o son resistentes a tales cambios climáticos,<sup>27, 56, 57</sup> por lo que la “tolerancia al calor” se ha propuesto como una característica a seleccionar y así poder desarrollar verracos de líneas genéticas con "tolerancia al calor", lo que mejoraría significativamente la eficiencia reproductiva.<sup>37</sup>

Los porcentajes de espermatozoides normales, la motilidad y concentración espermática son parámetros comúnmente utilizados para la evaluación de la calidad del semen. La detección de diferencias estacionales significativas en las características de calidad del semen implica que la calidad del semen se puede utilizar como un indicador para la termotolerancia en cerdos.<sup>55</sup>

En general se supone que tienden a ser universales los efectos negativos del estrés por calor en los cerdos y afectan a la mayoría de las líneas genéticas por igual. Hay divergencias en cuanto al grado de afección en las regiones tropicales y templadas, pero es un hecho que el rendimiento reproductivo del macho se ve afectado por las temperaturas

elevadas. A grandes rasgos, el estrés térmico provoca cambios en la conducta sexual, disminución de la calidad del semen, afectando principalmente el volumen, motilidad y morfología, lo que genera una disminución de la fertilidad.

A continuación se enlistan las consecuencias de la exposición de un verraco a estrés térmico:

**Conducta sexual**

- Disminución de la libido.

**Producción seminal**

- Disminución del volumen del eyaculado.
- Disminución del porcentaje de motilidad.
- Aumento del porcentaje de anomalías espermáticas.
- Gota citoplasmática proximal.
- Defectos en la pieza intermedia.
- Defectos de cola.
- Cabezas anormales.
- Defectos en el acrosoma.

**Capacidad Fecundante**

- Aumento del porcentaje de hembras repetidoras.
- Camadas de menor tamaño.

### **3.2.3. Sistema Convencional (CONV) y Sistema de Enfriamiento por Evaporación (EVAP)**

En un intento de combatir el impacto del clima sobre la producción de semen del verraco, en los últimos años, un nuevo sistema de enfriamiento por evaporación (EVAP), se ha introducido para mejorar el microclima de los animales de granja. EVAP es un sistema destinado a reducir la temperatura por un proceso de humidificación. El agua se pulveriza sobre un panel de refrigeración en un extremo del edificio cerrado. El aire exterior caliente pasa a través de paneles, utilizando el ventilador de escape en el otro extremo del edificio, y la temperatura del aire se enfría cuando el agua se evapora. Este proceso reduce la temperatura con un aumento complementario de la humedad relativa y el contenido de vapor de agua en el aire.<sup>49</sup>

Se realizó un estudio donde se observó el efecto de la temperatura y la humedad, así como los efectos estacionales, la producción de espermatozoides en machos Duroc mantenidos en sistemas convencionales CONV y en sistemas de ambiente controlado EVAP bajo las condiciones tropicales de Tailandia.<sup>51</sup>

Este estudio concluyó que los valores globales difieren poco para ambos sistemas (Cuadro 3.3). Mientras que las temperaturas fueron inferiores en EVAP, la humedad fue mayor en CONV; la humedad fue a menudo 30% menor, mientras que la temperatura fue generalmente 2-3 °C superior.<sup>51</sup> Ambos sistemas mostraron una disminución en el volumen del semen, así como en la producción total de espermatozoides por eyaculación (TSP) durante la estación cálida (marzo-mayo), aunque el cambio en el volumen y TSP mostraron una menor variación en el sistema EVAP que en el sistema CONV, ya que las temperaturas promedio de aumento fueron de 28.1 a 30.2 °C en el EVAP y 30.6 a 36.2 °C en el CONV

durante la temporada de calor.<sup>49</sup> El porcentaje de espermatozoides normales se redujo de 85 a 81% en la EVAP y 85-79% en el CONV así como el número de gotas citoplasmáticas proximales aumentó en ambos sistemas (1-2%).<sup>51</sup>

**Cuadro 3.3.** Características del semen y otros parámetros en el sistema convencional (CONV) y el sistema de enfriamiento por evaporación (EVAP) en postas de sementales.

Parámetros	Sistema	
	CONV (Media)	EVAP (Media)
Volumen (ml)	228.7	203.1
Concentración espermática(x 10 <sup>6</sup> /ml)	350.0	371.7
Número total de espermatozoides por eyaculado (x 10 <sup>6</sup> )	78.6	73.5
Intervalo de colección (días)	7.1	6.4
Edad a la colección (días)	698.0	626.0
Temperatura media máxima (°C)	33.9	29.1
Humedad mínima media (% HR)	52.1	76.1
Porcentaje de espermatozoides con morfología normal	79.8	80.9
Morfología normal incluyendo gota citoplasmática distal	85.4	85.4
Gota citoplasmática proximal	3.9	3.9
Gota citoplasmática distal	5.6	4.6
Defectos en la cola de los espermatozoides	1.9	1.8
Defectos en la cabeza de los espermatozoides	6.8	6.9

Modificado de:<sup>51</sup>

Se puede concluir que los sistemas de enfriamiento por evaporación podrían representar una alternativa para reducir la variación estacional en la producción espermática en sistemas de confinamiento cerrados, aunque no se demostró una clara ventaja en las características seminales, si se redujo el estrés y mejoró el consumo de alimento, por otro lado los alojamientos abiertos pueden usar con éxito rociadores de agua, goteo y ventilación a través de ventiladores eléctricos, que pueden ayudar a reducir el estrés de los verracos sensibles al calor.<sup>51</sup>

### 3.3. FOTOPERIODO

En los animales domésticos se observa una estacionalidad reproductiva que depende principalmente de las variaciones de la duración del día (fotoperiodo). Aunque todas las especies son sensibles a las variaciones del fotoperiodo, la intensidad de las respuestas a los cambios luminosos y sus consecuencias varían mucho de una especie a otra.<sup>56</sup> El jabalí Europeo (*Sus scrofa ferus*), es un reproductor de día corto, cuya actividad reproductiva se lleva a cabo en invierno y principios de la primavera, mientras que en el verano y el otoño es reproductivamente inactivo.<sup>59</sup>

Por el contrario, el verraco doméstico ha sido tradicionalmente considerado un reproductor no estacional, a pesar de que la calidad del semen y la libido son más bajos en el verano, en comparación con el óptimo de invierno, las variaciones estacionales en la calidad del semen han sido ampliamente estudiadas en los cerdos domésticos, sin embargo, existe controversia sobre el grado de variación en los parámetros del semen durante todo el año.<sup>60, 61</sup>

Por lo tanto, algunos investigadores han observado un aumento en el volumen del semen, la concentración de espermatozoides y el recuento total de espermatozoides a partir de una corta duración del día o fotoperiodo en comparación con un largo período de la duración del día. Mientras que otros autores han observado que la producción de espermatozoides se incrementó en los verracos sometidos a un tratamiento con un fotoperiodo artificial.<sup>62</sup> Estos resultados aparentemente contradictorios también se describen en el estudio de las variaciones hormonales en suero. Investigadores observaron un aumento en los niveles de la hormona folículo estimulante (FSH), cuando los verracos

tenían luz suplementaria, a la inversa, otros no encontraron ningún efecto en los niveles en sangre de FSH con luz suplementaria.<sup>61</sup>

Aunque en el cerdo doméstico se ha vinculado fuertemente el aumento del fotoperiodo y de la temperatura como factores que actúan en conjunto de manera negativa sobre la fertilidad,<sup>58</sup> también se ha señalado que, independientemente de la temperatura, el fotoperiodo afecta al eje hipotálamo-hipófisis-gonadal que regula la producción y maduración del espermatozoide en los testículos y epidídimo.<sup>62</sup>

En todas las especies de mamíferos, la percepción de los impulsos luminosos tiene su sede en la retina. Esta información es conducida por el tracto retino-hipotalámico hasta los núcleos supraquiasmáticos y paraventriculares del hipotálamo, antes de pasar por el ganglio cervical superior y llegar finalmente a la glándula pineal, la cual sintetiza y secreta en la sangre la melatonina, durante la noche. Es muy probable que en virtud de la duración de tal secreción los animales sean capaces de percibir la duración de la noche, y por ende la del día, e induce la estimulación de la actividad neuroendocrina. La melatonina modifica la retroalimentación negativa de los esteroides sobre la actividad neuroendocrina.<sup>56</sup>

Se ha reportado que el fotoperiodo artificial puede influir en el tiempo de aparición de la pubertad y la variación estacional en la reproducción, con la reducción de la fertilidad en el verano y principios del otoño. En los verracos domésticos, la síntesis de esteroides, el conteo de espermatozoides y la libido son más bajos en el verano en comparación con el óptimo en invierno,<sup>63</sup> también se ha observado que en verracos de cinco meses de edad en un fotoperiodo natural disminuido, la testosterona plasmática aumenta en comparación con un fotoperiodo natural aumentando.<sup>10, 63</sup>

También se ha observado que un día corto estimula la maduración puberal de la espermatogénesis, mientras que un día largo reduce los resultados sensoriales del olor sexual en el sacrificio de los machos enteros. El fotoperiodo también tiene un efecto sobre el consumo de alimento y un fotoperiodo largo se cree que estimula el consumo de alimento, lo que tiene un efecto adicional sobre el rendimiento reproductivo.<sup>51</sup>

En las regiones tropicales, donde el día y la noche tienen la misma longitud durante todo el año, el fotoperiodo y la intensidad de luz pueden ser un problema menor que el causado por las altas temperaturas ambientales y la humedad, durante los calurosos meses de verano.<sup>51</sup>

Por el contrario, el fotoperiodo y la intensidad de la luz se cree que juegan un papel importante en las regiones donde hay grandes fluctuaciones en la longitud del día y la noche.<sup>51</sup> Bajo esta premisa se realizó un estudio bajo las condiciones ambientales del mediterráneo, caracterizado por marcadas diferencias de temperatura, humedad, lluvias y horas de luz durante el año, el invierno caracterizado por un lapso luz solar de 4-5 h y el verano de 14-15 h, sin embargo el fotoperiodo natural del mediterráneo no provocó fuertes cambios en las características del semen de verraco en parámetros como el porcentaje de viabilidad, anomalías morfológicas y motilidad total, respuesta a la prueba de resistencia osmótica y características de los espermatozoides en movimiento, sólo la motilidad espermática fue afectada en función de las variaciones del fotoperiodo natural.<sup>61</sup>

Sancho *et al.*<sup>60</sup> al evaluar 20 verracos Landrace que fueron expuestos durante 75 días a incrementos y decrementos del fotoperiodo natural, encontraron resultados que indican la reducción de la calidad de semen de los verracos expuestos a un fotoperiodo decreciente, con la disminución de la concentración de espermatozoides, la producción

espermática y el número de dosis de semen. El análisis de la morfología de los espermatozoides mostró frecuencias significativamente más bajas de espermatozoides maduros e inmaduros con gota citoplasmática distal, y frecuencias significativamente más altas de espermatozoides inmaduros con gota proximal en cerdos expuestos al fotoperiodo decreciente. Estos resultados indican que de la calidad espermática de los machos seleccionados disminuyó durante fotoperiodos decrecientes, en comparación con un fotoperiodo creciente, debido principalmente al deterioro de la función testicular.

Dicho estudio muestra que el fotoperiodo creciente de la primavera y el fotoperiodo decreciente de otoño, no afectan el volumen de semen, pero dan lugar a alteraciones en el pH del semen. El pH del semen y el volumen dependen principalmente de la actividad secretora de las glándulas sexuales accesorias. Estos resultados indican que la actividad de estas glándulas se ve afectada tanto por el aumento y la disminución del fotoperiodo. Se ha encontrado que en verracos de climas templados, la actividad secretora de las glándulas sexuales accesorias, en particular las glándulas vesiculares, está ligeramente influenciada por el fotoperiodo.<sup>60</sup>

La concentración de espermatozoides, producción de esperma y el número de dosis de semen por eyaculación son un 50% menor en verracos de fotoperiodo decreciente que en verracos bajo fotoperiodo creciente. Esto indica que el fotoperiodo decreciente del otoño, pero no el fotoperiodo creciente de la primavera, da lugar a la alteración de la función testicular. El estudio de la morfología de los espermatozoides muestra que la frecuencia total de espermatozoides maduros, inmaduros y aberrantes es similar en los verracos seleccionados bajo fotoperiodo creciente y decreciente. No obstante, en ambas condiciones, la frecuencia total de espermatozoides inmaduros está muy cerca del nivel superior en la

especie porcina (7-8%) y, la frecuencia de espermatozoides aberrantes excede el límite superior (2-3%).<sup>60</sup>

No hay datos de las cifras específicas sobre los efectos del fotoperiodo estacional en el número de dosis de semen, sin embargo, ya que es un parámetro que depende directamente de concentración espermática, que también se ve afectada por la disminución de fotoperiodo. Dicho estudio demuestra claramente que el comportamiento reproductivo de los verracos seleccionados de climas templados disminuye en el fotoperiodo decreciente de otoño, en comparación con el fotoperiodo creciente de la primavera, debido principalmente al deterioro de la función testicular.<sup>60</sup>

De igual forma Sancho *et al.*<sup>62</sup> al evaluar tres grupos de 10 machos que fueron mantenidos durante 3 meses en condiciones experimentales de 24, 12 y 0 horas de luz artificial, encontraron que los fotoperiodos extremos (0 y 24 horas de luz), afectaron la calidad del semen en cuanto a la concentración de espermatozoides, la integridad del acrosoma y el volumen de semen, mientras la capacidad de fertilización sólo se redujo significativamente en condiciones de oscuridad absoluta.

La concentraciones de espermatozoides no varió significativamente entre el primer y el segundo mes, tanto en los grupos de 24H y 12H. En los grupos de 24 y 0H, el número de espermatozoides aumentó durante este período, mientras que los valores para el grupo de 12H fueron significativamente menores. A lo largo de todo el período experimental, las concentraciones de esperma fueron menores para los cerdos expuestos a 24 horas de luz, que las de 12 o 0H. Sin embargo, durante los primeros meses y en segundo lugar los verracos que permanecieron en la oscuridad absoluta mostraron menor recuento de

espermatozoides que aquellos que recibieron 12 horas de luz artificial, aunque esta diferencia perdió importancia en el tercer mes.<sup>62</sup>

En ese mismo estudio, los verracos del grupo 0H mostraron porcentajes significativamente más bajos de acrosomas intactos que los verracos en el grupo de 12H durante todo el período de tratamiento. Las comparaciones hechas entre los porcentajes de los grupos 24H y 0H presentaron valores similares en el primer mes de tratamiento, pero fueron inferiores en el segundo y el tercer mes para los verracos de 0H. Cuando se expuso continuamente a la luz, el volumen del semen de los verracos incrementó al principio, pero luego disminuyó en el tercer mes de exposición, mientras que la oscuridad absoluta no afectó esta variable.<sup>62</sup>

Strzezek *et al.*<sup>64</sup> también encontraron que la oscuridad no afecta el volumen del semen, aunque otros autores señalan que los verracos alojados en la oscuridad absoluta a una temperatura constante muestran una reducción del volumen total del semen, y que la longitud del fotoperiodo no afecta al volumen total del semen de la eyaculación.

Gopalkrishnan *et al.*<sup>65</sup> y Bartoov *et al.*<sup>66</sup> han informado que las variaciones en el volumen del semen son el resultado de cambios en la composición del líquido seminal, especialmente en términos de agua, iones y proteínas derivadas de la próstata, vesículas seminales y/o glándulas de Cowper. Por lo tanto, la luz afecta la producción de las glándulas accesorias mucho más que la composición de las secreciones.

La tasa de fertilidad fue alta en machos expuestos a la luz constante, mientras que los mantenidos en la oscuridad mostraron una disminución significativa de la fertilidad en el tercer mes. La prolificidad y la libido no se vieron afectados por las diferentes

condiciones de luz. Estos datos parecen indicar que la fertilidad, prolificidad y la libido están débilmente relacionadas entre sí, y que su funcionalidad es básicamente modulada por mecanismos independientes. Dado que la libido está regulada principalmente por la LH vinculada al mecanismo y producción de espermatozoides dependiente de las vías de FSH, pudiendo suponer que los efectos observados en el comportamiento reproductivo *in vivo* indican distintas sensibilidades a la luz de la LH y FSH vinculados a los mecanismos de regulación de la función testicular.<sup>62</sup>

Estos resultados indican que los fotoperiodos extremos afectan la calidad del semen del verraco. Las alteraciones observadas fueron más graves cuando los animales se mantuvieron en condiciones de oscuridad absoluta que los de luz constante. Las concentraciones de espermatozoides disminuyeron hasta el segundo mes de tratamiento, cuando el fotoperiodo fue de 12 o 24H aunque los verracos que permanecieron en oscuridad absoluta se recuperaron en el tercer mes. A pesar de que fotoperiodos extremos afectan a la función testicular de los verracos, el grado de recuperación observado en verracos que permanecieron en la oscuridad absoluta refleja su capacidad para adaptarse a esta condición.<sup>62</sup>

### **3.4. INSTALACIONES**

#### **3.4.1. Ambiente Social**

El ambiente social es un factor importante para los verracos pre púberes, si se quiere que sean reproductores exitosos, pues se ha reportado que el confinamiento y la restricción social son factores que aumentan los problemas reproductivos de los futuros sementales, a menudo causando un desarrollo inferior al normal del comportamiento sexual. La conducta sexual se aprende tanto antes como durante la edad de la pubertad.<sup>26, 51</sup>

El efecto del aislamiento durante el período de desarrollo de la pubertad parece precipitar los problemas en el comportamiento de monta durante la adolescencia. Una libido ausente o subnormal se asocia a menudo con la disminución de la duración de la eyaculación, que puede resultar en una producción menor de semen, aunque no en todos los casos, al menos en parte, son el resultado de las restricciones sociales y el confinamiento, que reducen la actividad endocrina del eje hipotálamo-hipófisis-testicular.<sup>26, 51</sup>

Se ha reportado, que cuando los machos son mantenidos sin contacto con cerdas en celo el tiempo de reacción a la monta aumenta de 2 a 6 minutos y su comportamiento copulatorio se ve afectado mientras el aislamiento continua, cuando los animales estuvieron a menos de 18 metros de hembras en celo no se encontró ningún efecto adverso en su conducta sexual ni en la calidad del semen.<sup>27</sup>

#### **3.4.2. Alojamiento**

Se recomienda un modulo específico para el alojamiento de los sementales, aislado de las cerdas. Pues se ha determinado que el alojamiento del verraco junto con las cerdas presenta dos grandes inconvenientes:

- Excitación permanente de los verracos que ocasiona una menor producción de semen.
- Contacto permanente con el microbismo de las cerdas, que aumenta el riesgo de que los verracos enfermen.<sup>67</sup>

Las instalaciones de alojamiento del verraco deben estar diseñadas y organizadas con el fin de proporcionar comodidad y un ambiente de bienestar capaz de optimizar la producción de semen y las condiciones sanitarias requeridas para los verracos.<sup>48</sup>

Para el alojamiento de los verracos maduros, el diseño debe proporcionar la asignación de espacio para el movimiento de los animales, para el trabajo humano y la limpieza.<sup>48</sup> Se recomienda un espacio vital de 8-12 m<sup>2</sup>/verraco, un bebedero de chupón a 75 cm del piso, con un caudal de 3 l/min, corrales con un declive del 3%, sin comedero en piso, con paredes de 1.2 m de altura y que los verracos tengan la posibilidad de percibir los gruñidos, el olor y la silueta de otros cerdos.<sup>52, 67</sup>

En un estudio que analizó el efecto que tienen el tipo de piso, tipo de división del corral y el uso de cama sobre la calidad del semen, el porcentaje de acrosomas normales y la motilidad de los espermatozoides,<sup>48</sup> se obtuvieron los siguientes resultados:

Tipo de piso: Se compararon pisos de concreto, rejilla y de rejilla/concreto. El tipo de piso tuvo una influencia significativa sobre las variables mediadas en el verano, pero no en las otras estaciones. El piso de concreto se asoció con la mejor calidad de semen durante la temporada de verano. Una vez más, la motilidad (55%) y el porcentaje de acrosomas normales (49.6%) fueron más bajos durante el verano (Cuadro 3.4).

**Cuadro 3.4.** Efecto del tipo de piso sobre la calidad del semen en postas con control de la temperatura ambiente.

Estación del año	Variable (%)	Concreto	Rejilla	Concreto/rejilla
Verano	Motilidad	63.2±11.1	58.0±4.5	55.00±8.4
	Acrosoma N.	61.5±9.1	49.6±13.3	54.00±10.7
Otras estaciones	Motilidad	64.4±11.5	63.5±9.9	60.36±9.6
	Acrosoma N.	54.4±12.3	62.1±10.6	55.36±10.7

Tomado de:<sup>48</sup>

Los resultados indican que los pisos de concreto son mejores que los de rejilla y el combinado de concreto/rejilla. La mejoría observada durante el verano en las instalaciones

de estas características podría estar relacionado con los materiales: el concreto aísla mejor que otros materiales. Esto también indica que, independientemente de la temperatura ambiente, un piso homogéneo (concreto) mejora la calidad seminal.<sup>48</sup>

Cama: El tipo de cama tuvo efectos significativos sobre la calidad seminal únicamente durante la temporada de verano. La cama mejoro la motilidad (63.3%) y el porcentaje de acrosomas normales (60.1%), pero la calidad del semen fue más baja durante el verano, independientemente del tipo de cama (Cuadro 3.5).<sup>48</sup>

**Cuadro 3.5.** Efecto de la cama sobre la calidad del semen en postas con control de la temperatura ambiente.

Estación del año	Variable (%)	Sin cama	Cama de paja
Verano	Motilidad	51.4±12.7	63.3±12.5
	Acrosoma N.	47.4±9.6	60.1±11.4
Otras estaciones	Motilidad	62.7±8.7	65.9±9.9
	Acrosoma N.	53.7±11.9	58.6±11.0

Tomado de:<sup>48</sup>

Además, desde el punto de vista del bienestar de los animales, independientemente de la temporada, la cama ayuda a lograr la comodidad y a satisfacer los patrones naturales de conducta del verraco.

Tipo de división del corral: Los resultados indican que la división mixta, 50% pared/50% puerta, mejora los parámetros de calidad del semen. La motilidad, así como el porcentaje de acrosomas normales se incrementaron significativamente con la división de pared/puerta únicamente durante el verano (65.8 y 61%, respectivamente) (Cuadro 3.6).<sup>48</sup>

**Cuadro 3.6.** Efecto del tipo de división del corral sobre la calidad del semen en postas con control de la temperatura ambiente.

Estación del año	Variable (%)	Puerta	Muro/Puerta
Verano	Motilidad	53.1±11.4	65.8±9.0
	Acrosoma N.	50.3±12.6	61.0±8.9
Otras estaciones	Motilidad	61.0±10.1	64.0±10.4
	Acrosoma N.	59.2±10.6	54.9±12.1

Tomado de:<sup>48</sup>

Este estudio confirma la necesidad de crear condiciones en el entorno de los verracos, de acuerdo a su ubicación y las características climáticas. Para diseñar las instalaciones de alojamiento teniendo en cuenta el tipo de división, el piso y las camas que contribuirán a aumentar la calidad del semen, lo que redundará en una mayor eficiencia reproductiva de los verracos.<sup>48</sup>

## **CAPÍTULO IV.**

### **NUTRICIÓN DEL VERRACO**

#### **4.1.INTRODUCCIÓN**

A pesar de la importancia del verraco en la fertilidad de la piara, la nutrición del verraco ha recibido escasa atención. La información relativa a los requerimientos nutricionales y la respuesta reproductiva del verraco a estos es por tanto limitada. La nutrición tiene gran relevancia en la respuesta reproductiva, pudiendo afectar directamente la espermatogénesis; sin embargo, los cambios en la dieta no se aprecian hasta pasadas siete u ocho semanas, ya que la espermatogénesis es un proceso que dura entre 38 a 40 días y la maduración en epidídimo requiere de 9 a 11 días.<sup>2</sup> A continuación se revisarán aquellos factores nutricionales de mayor relevancia, que aparte de satisfacer las necesidades nutricionales básicas, interactúan para lograr una buena función reproductiva en el verraco.

#### **4.2.NUTRICIÓN Y ALIMENTACIÓN DEL FUTURO SEMENTAL**

Los requerimientos nutricionales y la forma de proveerlos (alimentación), juegan conjuntamente para satisfacer las demandas tanto de crecimiento como de la actividad reproductiva del semental. Los nuevos sementales son generados por estrictos procesos de selección genética enfocados a una continua mejora de parámetros productivos como la tasa de crecimiento, conversión alimenticia, crecimiento magro, calidad de la canal y el potencial reproductivo.<sup>68, 69, 70</sup>

Como todo animal en pleno desarrollo, el verraco prepúber (< 6 meses) debe ser alimentado a libre acceso para permitir un crecimiento y desarrollo óptimo de todos sus órganos y sistemas; así como su estructura musculoesquelética.<sup>69,70</sup> Una vez alcanzada esta edad, un consumo a libertad podría afectar su capacidad física para realizar su función reproductiva al dificultar la monta, desarrollar problemas articulares y podales y disminuir el libido.<sup>68,69,71</sup> El sobrepeso u obesidad son por lo tanto el primer punto a tener en cuenta cuando se alimenta al futuro semental de la granja.<sup>68</sup>

El objetivo de un programa adecuado de alimentación y nutrición del futuro verraco es el de alcanzar la pubertad a una edad y peso adecuados, evitando anticipar la prestación de esta. En este sentido, la alimentación durante el periodo de crianza puede influir en la edad a la que el cerdo presenta su primera actividad sexual (pubertad). La edad es más importante que el peso corporal para determinar el inicio de la pubertad.<sup>69,71</sup> Se ha observado que la edad a la pubertad se retrasa cuando el consumo de alimento del verraco joven fue limitado, reportándose una reducción del 30% en el consumo de alimento resultando en un retraso de 42 y 30 días en la pubertad para los verracos puros y cruzados, respectivamente.<sup>69</sup>

Esta información sugiere que el nivel de energía y otros nutrientes durante el periodo prepuberal influyen tanto en la edad de la pubertad, como en la tasa de desarrollo sexual en los verracos jóvenes.<sup>69</sup> Sin embargo, a menos que el semental se encuentre severamente desnutrido, la subnutrición temprana no parece imponer ningún efecto perjudicial a largo plazo sobre la capacidad de reproducción, salvo los efectos obvios, sobre el crecimiento y el tamaño del cuerpo del animal maduro.<sup>69,71</sup>

### **4.3. PAPEL DE LOS NUTRIENTES SOBRE LA ACTIVIDAD REPRODUCTIVA DEL SEMENTAL.**

#### **4.3.1. ENERGÍA**

La energía es uno de los factores nutricionales, que afecta tanto positivamente, como negativamente la actividad reproductiva del verraco. Problemas como el exceso de peso, daño articular y podal, letargo y baja libido, tienen su génesis en un consumo excesivo de energía y son causas de desecho de los sementales.<sup>35, 72</sup> Contrariamente, un bajo consumo de este nutriente retrasa, aunque no impide la presentación de la pubertad.<sup>72</sup>

Los requerimientos diarios de energía para los verracos deben cubrir las siguientes necesidades:

- Mantenimiento.
- Crecimiento.
- Reproducción.
- Termorregulación.<sup>69, 70, 73-75</sup>

##### **4.3.1.1. Mantenimiento**

En un animal adulto, el principal uso de la energía que este consume, se destina a satisfacer las demandas energéticas de las funciones básicas como la respiración, el latido cardiaco, el metabolismo basal, la digestión, etc. En conjunto estas necesidades son conocidas como funciones básicas para mantener vivo al animal.<sup>70, 74</sup> El mantenimiento asume solo acciones encaminadas a preservar la vida del animal por lo que no incluye el crecimiento o la pérdida de peso del organismo.<sup>74</sup> Se estima que el 40% (jóvenes), al 80% (adultos) de la energía que un animal consume, se destina al mantenimiento de las funciones básicas.<sup>71</sup>

Investigadores del Instituto de la Investigación Agropecuaria en Francia (INRA), desarrollaron una fórmula que deduce el requerimiento de energía para mantenimiento del cerdo. Esta fórmula es la siguiente:

$$\text{Requerimiento de EM (Kcal) del cerdo para mantenimiento} = 112 (\text{PV})^{0.75}$$

Donde PV, es el peso vivo expresado en kg.<sup>1\*</sup>

Es importante aclarar que en el semental, el requerimiento de energía para la función reproductiva puede representar hasta el 5% de la energía consumida por el animal; la cual se destina a las actividades del apareamiento y a la producción espermática.<sup>69, 71</sup>

En el cerdo de 40 kg, los nutrientes destinados para el mantenimiento representan probablemente menos del 10% del total, sin embargo en un semental de 250 kg el mantenimiento representa el 85% del uso de energía. Esta disparidad se debe a que el cerdo joven posee una masa corporal pequeña y su tasa de crecimiento es tal, que la mayor parte de la energía se destina a este fin. En el adulto, por el contrario, el crecimiento es muy bajo pero la masa que debe ser mantenida es muy alta por lo que casi la totalidad de la ingesta calórica es destinada a este fin.<sup>70</sup> En general se reconoce que los requerimientos de energía de mantenimiento de los verracos en crecimiento son mayores que para las hembras o machos castrados.<sup>69, 74</sup>

Las necesidades de mantenimiento se expresan en relación al peso vivo del verraco elevado a una potencia (peso metabólico), de tal manera que conforme aumenta el peso vivo aumentan las necesidades de mantenimiento.<sup>72, 74</sup> Esta relación está considerada en la ecuación anteriormente presentada.

---

<sup>1\*</sup> Comunicación personal con MVZ Arturo Germán Borbolla Sosa.

Similarmente, Close y Roberts <sup>76</sup> han establecido que la relación general entre las necesidades de energía para el mantenimiento del verraco (Mcal de Energía Metabolizable: EM) y el peso corporal (PV en kg) se puede describir como:

$$\text{Energía de Mantenimiento (MJ de ED/día)} = 0.795 \text{ PV}^{0.665}$$

Por ejemplo: En verracos de 100 kg de peso, el requerimiento de energía de mantenimiento es de 3752 kcal de EM/día a 5950 y 7794 kcal de EM/día para verracos de 200 y 300 kg de peso corporal, respectivamente. <sup>69</sup>

Un trabajo posterior de los mismos investigadores, reporto que las necesidades de mantenimiento en verracos son:

$$\text{Necesidades de mantenimiento (Mcal de EM/día)} = 0.1823 \times \text{PV}^{0.665}$$

Utilizando el mismo ejemplo, un cerdo de 100 kg tendrá un requerimiento energético de 3897 kcal de EM/día, mientras que los verracos de 200 kg, 6180 Kcal de EM/día y para los de 300 kg, 8092 Kcal de EM/día. Estos requerimientos representan entre el 60 y el 90% del total de la energía consumida. <sup>72</sup>

Las necesidades de energía de mantenimiento para verracos de diferente peso recomendadas por diferentes autores se presentan en el Cuadro 4.1.

**Cuadro 4.1.** Determinación de la energía de mantenimiento en función del peso vivo (expresado en Kcal de energía metabolizable por día).

Peso vivo (kg)	Peso metabólico y= 0.665	Peso metabólico y= 0.75	Close y Roberts 1993 (a=182.35)	Kemp <i>et al.</i> 1989 y NRC 1998 (a= 106)	Kemp y Soede 2001 (a= 106)
100	21.4	31.6	3899	3352	3137
200	33.9	53.2	6182	5637	5275
300	44.4	72.1	8095	7641	7150
400	53.7	89.4	9801	9481	8871

Tomado de: <sup>70</sup>

#### 4.3.1.2. Crecimiento

La velocidad de crecimiento recomendada para los verracos reproductores es un tema controvertido. Es obvio y prudente permitir que los verracos tengan una tasa de crecimiento durante su vida productiva (etapa de actividad sexual), sin embargo, el crecimiento de los sementales debe ser controlado, y de baja intensidad para evitar un crecimiento excesivo o la deposición de lípidos en el tejido subcutáneo y visceral.<sup>69-71</sup> La reducción de la velocidad de crecimiento se logra mediante una acción inversa a la que lleva al animal al sobrepeso y la obesidad. Dicha acción consiste en reducir la cantidad de nutrientes asimilables que se le ofrecen al cerdo cada día.<sup>70, 71</sup>

La cantidad de alimento que se le sirve cada día a un verraco, depende de su edad y nivel de actividad. Animales jóvenes demandan una mayor cantidad de nutrientes debido a su mayor tasa de crecimiento, lo que significa que aun no alcanzan su peso maduro. En cambio los animales más longevos, tienen una velocidad de crecimiento menor; y un requerimiento más bajo de nutrientes para la función reproductiva.<sup>70</sup> Además es necesario frenar su crecimiento para facilitar su manejo, y mejorar su rendimiento, ya que una tasa acelerada de crecimiento está asociada a problemas de aplomos y baja libido, mientras un bajo consumo de alimento se asocia a un bajo número de espermatozoides eyaculados.<sup>69, 70</sup>

Los valores de 0.50, 0.40, 0.30, 0.20 y 0.10 kg/día han sido tomadas como las tasas de crecimiento aceptables para verracos de 100, 150, 200, 250 y 300 kg de peso corporal, respectivamente. Un verraco maduro tiene en promedio un peso de 350 kg. En este animal es posible predecir el requerimiento de energía para ganar un kg de peso, si se considera que dicha ganancia de peso corporal contiene 160 g de proteína y 250 g de grasa, un gramo de proteína contiene 5.7 kcal, mientras que la misma cantidad de grasa aporta 9.5 kcal. El

gasto de EM para depositar al primero es de 10.6 kcal, mientras que para el segundo es de 12.5 kcal. La eficiencia con la que se deposita la energía consumida a través de la proteína es del 54% y para la grasa el valor sube a 74%.<sup>69</sup>

#### **4.3.1.3. Reproducción**

El requerimiento de energía para la actividad reproductiva es difícil de medir con toda precisión.<sup>69</sup> Se ha reportado que la producción de calor asociada con la colección de semen cuando el verraco monta el potro es de 3.96 kcal de EM/kg de PV<sup>0.75</sup>.<sup>73</sup>

En cuanto a la producción de semen, se estima que la energía requerida para la producción de semen del contenido de energía media de cada eyaculación es de 57 kcal de EM y una estimación de la eficiencia de utilización de la energía del 60%. Mientras la energía requerida por eyaculación es de 95 kcal de EM.<sup>73</sup>

#### **4.3.1.4. Termorregulación**

Los verracos son a menudo mantenidos en malas condiciones ambientales. En tales circunstancias, el ambiente puede estar por debajo de la temperatura crítica inferior del animal (TCI) que es de 20 °C; y la cantidad de alimento debe ser aumentado ser aumentados si se quiere evitar que los verracos pierdan su condición corporal.<sup>69, 71</sup>

La energía consumida para que el verraco afronte la TCI debe aumentarse en 4% por cada °C que la temperatura disminuya por debajo de la TCI.<sup>70</sup>

El aumento de la demanda energética asociada a la baja temperatura ambiental, disminuye la deposición de proteína y grasa. Se ha demostrado que por cada °C de disminución de la temperatura por debajo de TCI, la deposición de proteínas se reduce en 10 g/día y la deposición de grasa en aproximadamente 20 g/día. La deposición de grasa, por

lo tanto, disminuye más que la deposición de proteínas a bajas temperaturas ambientales, lo que indica la importancia de asegurar una nutrición y alimentación adecuadas, cuando los verracos se mantienen en condiciones precarias de alojamiento, a fin de mantener la condición corporal y asegurar el rendimiento reproductivo.<sup>69</sup>

A continuación, en el Cuadro 4.2. se presentan los requerimientos de energía para satisfacer las diferentes necesidades del verraco.

**Cuadro 4.2.** Requerimientos energéticos para un verraco adulto.

Necesidades energéticas diarias para un verraco adulto en producción	
Mantenimiento	$182 \text{ kcal EM} \times \text{pv}^{0.665}$
Deposición proteica	$(5.7 \text{ kcal EM} \times \text{P})/0.54$
Deposición grasa	$(9.5 \text{ kcal EM} \times \text{G})/0.74$
Actividad de cubrición/colección	$3.96 \text{ kcal EM} \times \text{pv}^{0.75}$
Producción de semen	95 kcal EM
Termorregulación	$(3.82 \text{ kcal EM} \times \text{pv}^{0.75}) \times (\text{Tc}-\text{T})$

pv = peso vivo en kg; P y G = ganancia de proteína y grasa, respectivamente, en gramos por día y Tc y T = temperatura crítica (20 °C) y temperatura ambiente. Modificado de:<sup>75</sup>

#### 4.3.2. PROTEÍNAS

En la alimentación del verraco, además de la cantidad de proteína que se aporta en la dieta, es esencial considerar también la calidad o perfil de los aminoácidos (AA).<sup>70</sup> Las necesidades de proteína y aminoácidos, son proporcionalmente más elevadas en el animal joven que en adulto, en donde las necesidades de AA cambian conforme el animal crece.<sup>70, 74</sup>

En el verraco en crecimiento, cuando el aporte de aminoácidos es insuficiente, se provoca una disminución de la velocidad de crecimiento, por una menor formación de tejido muscular.<sup>68, 74</sup> En este sentido, se ha reportado que los niveles de lisina (y el resto de AA y energía) por debajo de 5 g/kg, reducen la tasa de crecimiento y retrasan la madurez sexual.<sup>71</sup>

Las necesidades de lisina de verracos jóvenes en crecimiento son de 21.6 y 25.3 g/día entre los 20-55 kg y 50-90 kg de peso, respectivamente. Además, se ha calculado que la suma de los aminoácidos esenciales para el crecimiento es de 48 g/100 g de proteína, mientras que para mantenimiento es sólo de 20 g/100 g de proteína. Sin embargo, es probable que el requerimiento del verraco maduro sea considerablemente menor que el de cerdos en crecimiento/finalización.<sup>69</sup>

Los verracos sexualmente activos no parecen tener ningún requerimiento inusual de aminoácidos. Algunos experimentos concernientes a los efectos de los suplementos de lisina y metionina en la función reproductiva de los verracos, indican que la actividad sexual del verraco puede tener un requerimiento relativamente alto de aminoácidos sulfurados y tal vez de lisina. Mientras otros investigadores sugieren que la suplementación con lisina o metionina tiene poco efecto sobre la producción de espermatozoides en verracos reproductores.<sup>68, 69, 73</sup> Close y Roberts<sup>76</sup> concluyeron que la suplementación dietética con lisina o metionina tiene poco efecto sobre la producción de semen, a menos que los verracos sean severamente sobre utilizados.

Se sugiere que las necesidades de proteína y aminoácidos del verraco activo son pequeñas en relación con el animal en crecimiento. Una ingesta de proteínas de 260 g/día, con un patrón de aminoácidos similar a la de la cerda preñada cumplirá las necesidades

diarias de los verracos de trabajo.<sup>73</sup> Una dieta que contenga 140-150 g PC/kg y 6.7 g de lisina/kg debería ser suficiente, y únicamente se requiere de un incremento de estos valores, cuando el uso del verraco es excesivo, es decir tres a cuatro veces por semana.<sup>71</sup>

Los requerimientos de proteína que el verraco necesita para la producción seminal es relativamente baja, se habla de 5 a 10 g de proteína/día, el semen contiene una cantidad baja de proteínas 3.4 g proteína/100 g y aminoácidos que van de 40 a 90 mg de aminoácidos/100 g de semen, por lo que las necesidades globales de proteínas para los verracos sexualmente activos no debe ir más allá de 270 g de proteína/día (Cuadros 4.3 y 4.4).<sup>69, 72</sup>

**Cuadro 4.3** Requerimientos proteicos para un verraco adulto.

Proteína y aminoácidos	g/día	% en pienso (2.6 kg/día)	% en pienso (3.0 kg/día)
Proteína	260	10	8.68
Lisina	12	0.46	0.4
Metionina	4.2	0.16	0.14
Metionina + cistina	8.4	0.32	0.28
Treonina	10	0.38	0.33
Triptófano	2.4	0.09	0.08
Histidina	3.8	0.01	0.13
Isoleucina	7	0.27	0.23
Leucina	10.2	0.39	0.34
Fenilalanina	5.7	0.22	0.19
Fenilalanina + tirosina	11.4	0.44	0.38
Valina	8	0.31	0.27

Tomado de:<sup>75</sup>

**Cuadro 4.4.** Requerimientos de proteína y aminoácidos de un verraco en producción, en base al NRC (1998).

Elemento	Requerimiento (g/d)	Dieta (g/kg)†
Proteína	260	130
Lisina	12.0	6.0
Metionina + cistina*	8.4	4.2
Treonina	10.0	5
Triptófano	2.4	1.2
Histidina	3.8	1.9
Isoleucina	7.0	3.5
Leucina	10.2	5.1
Fenilalanina + tirosina**	11.4	5.7
Valina	8.0	4.0

†Basado en un consumo de alimento de 2.0 kg/día.

\*al menos el 50% como metionina.

\*\* al menos el 50% como fenilalanina. Modificado de: <sup>69</sup>

En el verraco, una ingesta deficiente de proteína reduce la concentración espermática y el recuento total de espermatozoides por eyaculado. <sup>69, 73</sup> Debido a que la deficiencia de proteína genera un contenido hipotalámico reducido de las concentraciones séricas de GnRH y la reducción de LH, FSH, y testosterona. Por lo tanto, la ingesta de proteínas puede afectar la producción de semen a través de una alteración de la producción y secreción de esteroides. <sup>77, 78</sup>

Louis *et al.* <sup>77</sup> alimentaron a verracos de un año de edad con una dieta baja en proteínas de 7% de PC y los compararon con animales del tratamiento control con 16% PC. Después de un periodo de siete semanas, los verracos con una baja ingesta de proteínas presentaron una disminución de la libido, tardaron más tiempo para comenzar a eyacular y se mantuvieron en el maniquí de colección por un tiempo más corto que los verracos del

tratamiento control. Esta disminución de la libido, se correlacionó con una reducción de los niveles plasmáticos de la hormona  $17\beta$ -estradiol, que se sabe está implicada en el mantenimiento de la libido sexual.

A grandes rasgos, los verracos alimentados con una dieta con un bajo contenido en proteína presentaron una libido baja, un menor volumen seminal y requirieron más tiempo para aparearse o producir un eyaculado para IA, comparados con verracos alimentados con niveles adecuados de proteína.<sup>77</sup>

#### **4.3.3. VITAMINAS**

La alimentación, y más concretamente una mala formulación en vitaminas y minerales, provoca trastornos específicos; en el ámbito reproductivo pueden observarse efectos sobre la calidad del semen (número bajo de espermatozoides, aumento de formas anormales) o dificultades para la monta debido a lesiones en los aplomos o de integridad de las pezuñas.<sup>79</sup>

A continuación, se presentan los requerimientos vitamínicos (Cuadro 4.5) y se analizan las vitaminas que tienen un papel determinante en el desempeño reproductivo del verraco.

**Cuadro 4.5.** Requerimientos de vitaminas para el verraco reproductor.

Vitamina	NRC (1998)*	Requerimientos sugeridos
Vitamina A (UI)	4000	6000
Vitamina D (UI)	200	500
Vitamina E (UI)	44	50
Vitamina K (mg)	0.5	1
Tiamina (vitamina B1) (mg)	1.0	1.5
Rivoflavina(vitamina B2) (mg)	3.75	4
Acido nicotínico (niacina) (mg)	10	15
Acido pantotenico(mg)	12	15
Piridoxina(vitamina B6) (mg)	1	2
Cianocovalamina(vitamina B12) (mg)	0.015	0.02
Biotina(mg)	0.2	0.3**
Colina(g)	1.25	1.50
Acido fólico(mg)	1.3	1.3
Vitamina C (mg)	-	300

\*Calculado para un consumo diario de alimento de 2.0 kg.

- No se proporcionan valores.

\*\*Con problemas pódales persistentes incrementar a 1.0 mg/kg. Tomado de: <sup>69</sup>

#### 4.3.3.1. Vitamina E

La vitamina E es conocida como el antioxidante natural mas importante en la protección a los ácidos grasos insaturados de las membranas celulares frente a la peroxidación y que elimina los radicales libres derivados de la actividad celular, en situaciones normales como en situaciones de estrés. <sup>70, 80</sup>

La vitamina E tiene un efecto directo sobre la calidad espermática, protegiéndolos del daño oxidativo, pues actúa como un antioxidante en la membrana celular y tiene un papel estructural en todas las membranas. <sup>69, 71</sup> También se sabe que la presencia de la

vitamina E en el epidídimo resulta clave para permitir la adecuada maduración de los espermatozoides.<sup>70</sup>

En cuanto al papel de la vitamina E como antioxidante en el semen, se ha demostrado que el  $\alpha$ -tocoferol está presente en los espermatozoides, pero no en el plasma seminal, por lo que al parecer la vitamina E puede proteger directamente al espermatozoide del daño morfológico por la unión de endoperóxidos, y por lo tanto afectar el porcentaje de espermatozoides normales y móviles.<sup>81</sup> Lo anterior dejando claro que la vitamina E no tiene efecto sobre anomalías estructurales en las células de espermáticas, sino que sirve como antioxidante de la célula espermática, al evitar que el peróxido altere la morfología de los espermatozoides.<sup>71, 81</sup>

La deficiencia de vitamina E causa degeneración testicular en los cerdos y afecta a la célula espermática dentro del parénquima testicular, lo que resulta en un menor número de células germinales y una reducción en la producción de semen. Se ha informado que los suplementos de vitamina E aumentan la concentración de espermatozoides en el eyaculado del verraco.<sup>71, 81</sup>

Los cerdos susceptibles al estrés (Gen RYR-1) pueden desarrollar una hipertermia maligna fatal cuando son expuestos a actividades extenuantes, esto frecuentemente conduce a la muerte y una condición de canal denominada PSE (pálida, suave y exudativa). Se ha demostrado que las condiciones responsables de la susceptibilidad al estrés se reducen cuando las dietas se completan con la vitamina E. La excitación asociada con la monta de una cerda o un potro de colección, puede ser suficiente para inducir una respuesta de estrés fatal en individuos susceptibles, por lo tanto si se utiliza un verraco estrés positivo, la suplementación de la dieta con antioxidantes (vitamina E, C y Se) podría resultar útil. Sin

embargo, no se recomienda utilizar estos animales con el fin de evitar la herencia de este rasgo en toda la progenie.<sup>81</sup>

Marín-Guzmán *et al.*,<sup>81</sup> evaluaron el efecto de suplementar la dieta del verraco con 0 o 220 UI/kg de vitamina E y 0 o 0.5 ppm de selenio. Las dietas deficientes en selenio y vitamina E por períodos prolongados afectaron la eficiencia reproductiva de los sementales. La dieta basal resultó en un semen con menor movilidad y mayor proporción de células anormales que las dietas suplementadas.

Los resultados de esta investigación se muestran en el Cuadro 4.6, e indican que la suplementación de la dieta con selenio y vitamina E afecta la calidad del semen de verraco, pero el efecto del selenio parece ser mayor al de la vitamina E.<sup>81</sup>

#### **4.3.3.2. Biotina**

La biotina es una vitamina azufrada hidrosoluble, que aunque está ampliamente distribuida en la naturaleza, solo está presente en concentraciones relativamente pequeñas y tiene una disponibilidad limitada. Los signos asociados con la deficiencia de biotina en la dieta de los cerdos son irritación de mucosas, alopecia, piel seca y escamosa, espasmos de las extremidades posteriores, fracturas en pezuñas y cojinetes plantares. Aunque también, los problemas podales en los cerdos se asocian en parte a las malas condiciones del piso de las instalaciones de alojamiento de los animales.<sup>68-70</sup>

Por lo anterior, el papel de la biotina en la dieta de los cerdos se está volviendo cada vez más importante como resultado de su asociación con lesiones podales y las consiguientes repercusiones que esto tiene para el desempeño reproductivo del verraco.<sup>69</sup>

La suplementación de la dieta con biotina, se ha demostrado que fortalece la pezuña significativamente. En un estudio, se demostró inicialmente que la deficiencia de biotina inducida experimentalmente en machos y cerdas jóvenes produce grietas en la base de las pezuñas y las lesiones son sensibles a la suplementación de biotina. El modo preciso de acción de la biotina en la prevención de lesiones pódales es todavía incierto. Se sabe que la biotina aumenta la resistencia a la compresión y la dureza de la pared de las pezuñas. A la vista de los efectos observados sobre las debilidades en las piernas y lesiones podales sobre la capacidad del verraco para montar una cerda y de su libido, la suplementación de biotina a la dieta es una forma potencial que podría aumentar el rendimiento reproductivo. Debido a la vulnerabilidad del verraco, se sugiere la inclusión de biotina en la dieta sea de 0.3 mg/kg, pero si existen problemas podales, entonces éste debe ser aumentado a 1 mg/kg de dieta.<sup>69, 71</sup>

#### **4.3.3.3. Vitamina C**

La vitamina C actúa en la regeneración de la vitamina E, síntesis de carnitina, formación de cartílagos y huesos, como antioxidante y en la síntesis de las hormonas esteroideas, siendo los dos últimos de gran importancia en el proceso de espermatogénesis en el verraco.<sup>68, 71</sup>

En general se supone que los cerdos pueden sintetizar cantidades adecuadas de vitamina C para satisfacer sus necesidades metabólicas. Sin embargo, existe creciente evidencia de que la exigencia del cerdo para la vitamina C se incrementa bajo condiciones de estrés, tales como cambios en las condiciones ambientales y al manejo excesivo. Además, el aumento de la concentración de vitamina C en el semen ayuda a proteger las células espermáticas del daño oxidativo. El proveer una cantidad adicional de vitamina C

bajo estas condiciones puede ser benéfico. Por ejemplo, en un estudio se examinaron los efectos de la adición de vitamina C en la calidad espermática de verracos jóvenes. La adición de 2kg de vitamina C/ton de alimento, incremento significativamente el número de dosis seminales por eyaculación de 15.2 a 21.6. Este fue el resultado de una mejora significativa en la calidad espermática y una tendencia a aumentar el conteo espermático total por eyaculado.<sup>69,71</sup>

#### **4.3.4. MINERALES**

En el ámbito reproductivo, existe poca información sobre las necesidades de minerales para el desarrollo y la función testicular. Pues, algunos minerales son necesarios para la producción de hormonas o como cofactores de enzimas mientras que otros juegan un papel importante en la estructura de los espermatozoides y las células de los testículos.<sup>82</sup>

##### **4.3.4.1. Calcio (Ca) y Fosforo (P)**

El calcio (Ca) y fósforo (P) son minerales importantes a considerar en la alimentación del verraco ya que son cruciales no sólo para optimizar la tasa de crecimiento, sino también la mineralización ósea, y por lo tanto la solidez general de las extremidades.<sup>69</sup> Considerando que es precisamente por problemas relacionados con el sistema esquelético que muchos sementales deben ser desechados, a pesar de estar en su etapa de máxima eficiencia reproductiva.<sup>70</sup> Los minerales asociados con la formación del esqueleto son en gran parte Ca y P. El fósforo tiene su mayor concentración en el hueso, aunque también se utiliza para la formación de músculo y el metabolismo del cuerpo, mientras que la mayor parte del Ca se encuentra en el tejido óseo.<sup>75,82</sup>

Durante el período de crecimiento del músculo y el hueso, los requerimientos de P son altos. Si se proporciona un nivel dietético insuficiente de P, el crecimiento del músculo generalmente se reduce antes del crecimiento de tejido óseo, debido a que la formación de hueso tiene prioridad sobre el músculo.<sup>82</sup> En general se acepta que los altos niveles dietéticos de Ca y P son necesarios para una mineralización óptima y para un rendimiento máximo durante los procesos de crecimiento del verraco. La solidez de las extremidades se debe tener en cuenta con relación a problemas pódales, pues representan un factor importante que contribuye a la pérdida de la libido y la incapacidad del verraco para montar un potro.<sup>69</sup>

Se ha demostrado que los machos tienen huesos significativamente más pesados y valores más bajos de resistencia a las fracturas que las hembras. En consecuencia, para los verracos de hasta 50 kg, los requerimientos dietéticos de Ca y P deben establecerse cerca de 9.5 g de Ca/kg y 7.5 g de P/kg. Para los verracos de más de 50 kg de peso corporal y durante su vida fértil los requerimientos deben fijarse en 7.0-7.5 g de Ca/kg y 5.5-6.0 g de P/kg. Así, cuando el animal crece la relación Ca: P debe estar dentro del rango de 1.3-1.5:1.<sup>69</sup>

#### **4.3.4.2. Selenio (Se)**

El selenio es un cofactor necesario para la actividad de la glutathion peroxidasa (GSH-Px), una enzima que se encarga de proteger a las células de la acción de los radicales libres, particularmente evita la oxidación de los lípidos de membrana, también se reconoce su influencia en el desarrollo testicular y de los espermatozoides,<sup>70, 82</sup> ya que el Se se concentra en la cola de los espermatozoides, siendo necesario para su desarrollo normal y mantenimiento de la integridad estructural y función locomotora del mismo.<sup>68</sup> Por lo

anterior, una deficiencia de Se, puede influir en diferentes aspectos del proceso reproductivo y posiblemente, en la fecundación de los ovocitos en la hembra.<sup>69</sup>

La deficiencia de selenio en verracos por períodos prolongados afecta su eficiencia reproductiva. Se ha observado que cuando se alimenta a verracos con dietas bajas en Se, la motilidad del espermatozoide se reduce y aumenta el porcentaje de espermatozoides anormales, principalmente alterando la morfología de la cola (colas dobladas y enrolladas) y por lo tanto la motilidad, lo que genera un menor número de espermatozoides que alcanzan y penetran la zona pelúcida, afectando la tasa de fertilización del óvulo.<sup>71, 81</sup>

Marín-Guzmán *et al.*<sup>81</sup> evaluaron el efecto de suplementar la dieta con vitamina E (0 o 220 UI/kg) y selenio (0 o 0.5 ppm). El semen de los verracos adultos alimentados con la dieta suplementada con Se tuvo mayores volúmenes, concentraciones de espermatozoides y motilidad que la de machos alimentados con la dieta suplementada con vitamina E. No hubo disminución de la motilidad de los espermatozoides en el período de ensayo (16 semanas), pero si un número menor de espermatozoides anormales. Además, el semen de los machos alimentados con la dieta suplementada con Se presentó una mayor capacidad de fertilización que se tradujo en una la tasa de fertilización de las hembras inseminadas también más alta (Cuadro 4.6).

Los resultados demostraron que un suministro adecuado de Se en la dieta es esencial para el buen desarrollo de los espermatozoides y para optimizar la tasa de fertilización de las cerdas. La calidad del semen fue mejor con los tratamientos con Se comparados con los de vitamina E. Una deficiencia de Se tiene mayor impacto que la vitamina E y la suplementación de Se da una respuesta mayor. Por tanto, se sugiere que la dieta del verraco sea complementada con 0.3-0.5 ppm de Se.<sup>81</sup>

**Cuadro 4.6.** Efectos del selenio y la vitamina E sobre la calidad espermática de verracos adultos y en la tasa de fertilización de las cerdas.

Variables seminales y de fertilización	Se (ppm)		Vitamina E (UI/kg)	
	0	0.5	0	220
<b><i>Semen</i></b>				
Volumen (ml)	158	213	175	195
Concentración (no. x 10 <sup>6</sup> /ml)	807	946	965	788
Motilidad espermática (%)	60.4	87.9	72.5	75.8
Espermatozoides normales (%)	24.2	61.9	41.4	44.8
<b><i>Fertilización</i></b>				
Tasa de fertilización (%)	73.4	98.5	89.1	82.7
No. de espermatozoides accesorios que penetraron el ovocito	14.2	59.7	35.7	38.2

Tomado de: <sup>69</sup>

En otro estudio se evaluaron verracos de diferentes edades y pesos corporales, con dietas que contenían 0 ó 0.5 ppm de Se. A los 18 meses de edad, observaron que los machos alimentados con Se tuvieron un mayor número de reservas de espermatozoides. En los espermatozoides, la conexión de la membrana plasmática a la pieza de la cola no estaban estrechamente unidos en aquellos verracos alimentados con dietas sin Se, que en aquellos que fueron alimentados con dietas adicionadas con Se, lo que afectó la motilidad. La concentración de ATP en los espermatozoides de la verracos alimentados con 0.5 ppm de Se fue 25% mayor que el de verracos alimentados 0 ppm de Se. <sup>71</sup>

Esto indica que los verracos deficientes en Se producen espermatozoides de morfología pobre, siendo la cola el área principal de anomalía, y que el espermatozoide utiliza la energía con menos eficacia. Confirmando que los espermatozoides de los verracos con deficiencia de selenio tuvieron una movilidad inferior, y menos energía para llegar al óvulo. <sup>82</sup>

#### **4.3.4.3. Zinc (Zn)**

Actualmente se reconoce al zinc como un elemento indispensable para el adecuado crecimiento. El Zn es un mineral clave en el proceso de queratinización, relacionado en los cerdos a la salud de las pezuñas. También juega un papel importante en la espermatogénesis, en la respuesta a la LH, en el desarrollo de las células de Leydig y en la producción de esteroides a nivel testicular.<sup>68, 71</sup> Además, es un elemento que se encuentra en grandes concentraciones en los tejidos del aparato reproductivo del verraco, particularmente en los testículos, próstata y los espermatozoides contienen elevadas concentraciones de Zn.<sup>70</sup>

En diversas especies la deficiencia de Zn se relaciona con trastornos del sistema reproductor. En cerdos la deficiencia de Zn se refleja primero en una hiperqueratosis (comúnmente originada por excesos de Ca en la dieta), y en los sementales provoca infertilidad. El zinc tiene un papel establecido en la espermatogénesis puesto que la deficiencia de zinc está implicada en el retraso del desarrollo de las células de Leydig, una respuesta reducida a la LH y en la disminución de la esteroidogénesis testicular. Una investigación mostró que alimentar a los cerdos durante ocho semanas con dietas adecuadas (175 ppm) o deficientes (23 ppm) en Zn, no reducía el tamaño o peso testicular, sin embargo, al microscopio se presentaron diferencias importantes en las células de Leydig, las cuales eran de menor tamaño y mostraban infiltración grasa acompañada de un pobre desarrollo del retículo endoplásmico liso y una pérdida concomitante de tejido epitelial en los túbulos seminíferos en los testículos. Lo que conlleva a un desorden en la síntesis de esteroides y producción de testosterona pobre, ya que es precisamente en este organelo donde se lleva a cabo la síntesis de testosterona.<sup>69, 70, 79, 82</sup>

Los altos niveles de calcio en la dieta son conocidos por quelar al Zn en el tracto intestinal y reducir así su disponibilidad para la absorción. Debido a que los verracos son comúnmente alimentados con dietas elevadas en Ca durante otras fases de producción, la dieta debe ser adecuadamente fortificada con zinc a fin de permitir que una cantidad adecuada llegue a los testículos.<sup>79, 82</sup> Por lo tanto, se recomienda un nivel de 100 mg/kg, para una adecuada función testicular.<sup>68, 69, 71</sup>

Los requerimientos de minerales para el verraco, se presentan en el Cuadro 4.7.

**Cuadro 4.7.** Requerimientos de minerales para los verracos.

Minerales	Verracos adultos* (cantidad/kg) (NRC, 1998)	Asignaciones sugeridas para el verraco reproductor (/kg de dieta)
Calcio	7.5 g	7.5 g
Fosforo	6.0 g	6.0 g
Cloruro	1.2 g	1.5 g
Sodio	1.5 g	1.3 g
Potasio	2.0 g	2.5 g
Magnesio	400 mg	400 mg
Hierro	80 mg	80 mg
Zinc	50 mg	100 mg
Manganeso	20 mg	20 mg
Cobre	5.0 mg	5.0 mg
Cobalto	-	0.1 mg
Yodo	0.14 mg	0.5 mg
Selenio	0.15 mg	0.3 mg
Cromo	-	200 ppb

\* Calculado asumiendo un consumo diario de 2 kg de alimento. Tomado de:<sup>69</sup>

#### **4.4.Principales ingredientes usados para la formulación de alimentos balanceados en cerdos.**

En la alimentación de los verracos existe una gran variedad de ingredientes que pueden utilizarse en la formulación de una dieta. El nivel de uso de estos ingredientes en la ración, estará determinado por la composición nutricional del producto, de las restricciones nutricionales que tenga para las diferentes etapas productivas, del requerimiento de nutrimentos que se quiera satisfacer y del costo del ingrediente.<sup>83</sup>

##### **4.4.1. Fuentes de energía**

Las fuentes de energía más utilizadas para la alimentación porcina son el maíz, las grasas y/o aceites y los subproductos agroindustriales, como subproductos del arroz, del trigo y de la caña de azúcar, principalmente.<sup>83</sup>

##### **4.4.2. Fuentes de Proteína**

Se han clasificado en dos tipos de fuentes de proteína utilizadas en la elaboración de alimentos balanceados para cerdos. Las fuentes de proteína de origen vegetal, que incluye principalmente a la harina de soya. Y fuentes de proteína de origen animal, donde se incluyen las harinas de pescado, harina de carne y hueso, subproductos de la leche, plasma porcino, células sanguíneas y rara vez subproductos avícolas.<sup>83</sup>

##### **4.4.3. Fuentes de vitaminas y minerales**

Las fuentes de vitaminas y minerales traza, se agregan a los alimentos en forma de premezclas, solas o en conjunto.<sup>83</sup>

#### **4.4.4. Aditivos no nutricionales**

Dentro de aditivos no nutricionales se incluye a:

- Mejoradores de los rendimientos productivos: promotores de crecimiento, antibióticos, probióticos.
- Mejoradores de la calidad del alimento: inhibidores de hongos, secuestrantes, enzimas, levaduras, antioxidantes.
- Mejoradores de la calidad de la canal: agonistas beta adrenérgicos y la hormona del crecimiento.<sup>83</sup>

#### **4.5. SUPLEMENTACIÓN DE LA DIETA DEL VERRACO**

Con la tendencia del uso de la inseminación artificial se ha impulsado la demanda de sementales con mayor cantidad de dosis producidas por eyaculado y mayores concentraciones espermáticas de los mismos. Tomando como base la nutrición se han realizando investigaciones, con resultados contradictorios, sobre el desarrollo de estrategias nutricionales como la suplementación de la dieta del verraco.<sup>84, 85</sup>

##### **4.5.1. L-carnitina**

La L-carnitina es una amina sintetizada en el hígado, riñones y cerebro a través de la conversión de dos aminoácidos esenciales, lisina y metionina. Se habla de que el epidídimo es el órgano con las mayores concentraciones de L-carnitina, el plasma epididimal del verraco contiene L-carnitina de 20 nmol/mg de proteína en la cabeza a 700 nmol/mg de proteína en la cola del epidídimo, donde interviene en la maduración y metabolismo de los espermatozoides.<sup>84, 86</sup>

En el espermatozoide, la L-carnitina del plasma del epidídimo entra a través de difusión pasiva. Una vez dentro del espermatozoide funciona como un transportador de ácidos grasos a través de la membrana mitocondrial interna, donde se utiliza la  $\beta$ -oxidación de ácidos grasos como fuente principal de energía para los espermatozoides del epidídimo.<sup>84, 86</sup>

También juega un papel importante en la destoxificación celular al combatir el exceso de acetil-CoA (coenzima implicada en el metabolismo de los ácidos grasos que tienen un efecto tóxico) al convertirla en acil carnitina. Además, la L-carnitina posee propiedades antioxidantes pues protege las membranas celulares del daño oxidativo resultante de la peroxidación de los ácidos grasos poliinsaturados, que son componentes de los fosfolípidos de membrana.<sup>84, 86</sup>

Se habla también de la influencia de la L-carnitina sobre la supervivencia de los espermatozoides en el epidídimo, mediante su actividad anti-apoptótica. De esta manera, la L-carnitina podría mejorar la supervivencia de los espermatozoides y aumentar el número total de espermatozoides que son eyaculados.<sup>84, 86</sup>

Todas estas funciones de la L-carnitina, han despertado el interés por conocer el efecto que tiene la suplementación de la dieta del verraco con L-carnitina, se han realizado varios estudios, sin embargo los resultados son controversiales, pues algunos autores han reportado mejorías en la producción y calidad del semen, mientras otros no han encontrado efectos benéficos.<sup>53, 84, 86</sup>

Por ejemplo, estudios en otras especies han informado que alimentar con L-carnitina (500 mg/kg de dieta) incrementa la concentración de espermatozoides y disminuye la

peroxidación lipídica de los espermatozoides en gallos, mientras que en humanos, la L-carnitina (3 g/día) aumenta la concentración de espermatozoides y la motilidad de los espermatozoides de pacientes con astenozoospermia idiopática.<sup>84, 86</sup>

En verracos, un estudio reporta que en cerdos reproductores que recibieron una dieta suplementada con 500 mg por día de L-carnitina, incrementó el número de dosis producidas para IA por eyaculado. Mientras un ensayo de campo de 16 semanas que implicó a 180 verracos reveló que un nivel "alto" de L-carnitina aumentó el número de células espermáticas viables y el número de dosis de inseminación producidos por semana.<sup>84, 86</sup>

Por otro lado, Yeste *et al.*<sup>84</sup>, utilizaron 120 verracos púberes de 3 razas porcinas (Pietrain, Duroc y Large White) a los cuales se les proporcionó una dieta suplementada con L-carnitina (250 mg/kg de dieta; 625 mg/día) durante un periodo de veinte semanas. El suplemento con L-carnitina mantuvo la morfología de los espermatozoides en verracos Pietrain después de la semana 13, que coincidió con el aumento en el fotoperíodo y la temperatura, mientras que no se observaron efectos notables sobre las razas Duroc y Large White en cuanto a la calidad del semen durante todo el período experimental. En base a estos resultados se concluyó que la adición de L-carnitina a la dieta de los machos puede mantener el nivel de la morfología normal del espermatozoide, cuando un descenso en calidad espermática se produce por el efecto del incremento del fotoperíodo y la temperatura, sin afectar otros parámetros de la calidad espermática. Aunque los mecanismos de la L-carnitina que actúan sobre morfología de los espermatozoides permanecen sin determinarse.

Otra investigación se llevó a cabo para determinar los efectos de la dieta con L-carnitina en las características del semen de verracos postpuberes y adultos. La dieta fue suplementada con 500 mg/día de L-carnitina. El semen se colectó una vez por semana de la semana 0 a la semana 15 y 4 días consecutivos durante la semana 16, para determinar si la L-carnitina tiene efectos en las características del semen en individuos expuestos a un régimen intensivo de la colección, observándose únicamente un efecto benéfico de la suplementación durante los primeros tres días de colección intensa, pero en general, no se observaron efectos beneficiosos de la dieta con L-carnitina sobre las características del semen de verracos postpuberales y maduros.<sup>86</sup>

#### **4.5.2. Ácidos grasos Omega-3**

Los ácidos grasos Omega-3 poli-insaturados son aquellos en los que la primera doble ligadura entre carbonos ocurre en la posición 3, contando desde el final de la cadena del ácido graso como son el linolenico, eicosapentaenoico EPA y el docosahexaenoico DHA.<sup>70, 85</sup> El eicosapentaenoico (EPA, 20:5, w-3) y docosahexaenoico (DHA, 22:6, w-3), son ácidos de cadena larga w-3, especialmente abundantes en las fuentes naturales como los aceites de pescado.<sup>85</sup>

De particular importancia son dos familias de ácidos grasos (linoleico 18:2 w-6; linolénico: 18:3 w-3) las cuales no pueden ser sintetizados por el cerdo y por lo tanto su concentración tisular depende exclusivamente del consumo de alimentos que lo contengan.<sup>70</sup> El NRC<sup>73</sup> únicamente establece el requerimiento para el ácido linoleico (2g/día).

La importancia de los ácidos grasos Omega-3 poli-insaturados, en el ámbito reproductivo se basa principalmente en:

- En los espermatozoides de cerdo, el plasmalema contiene altos niveles de ácidos grasos poli-insaturados, especialmente el DHA, por lo que los cambios de las cantidades de ácidos grasos poli-insaturados en la dieta resultan en cambios concomitantes en la composición de w-3 y w-6 de la membrana plasmática del espermatozoide.<sup>85</sup>
- Veinte ácidos grasos poli-insaturados son los precursores directos para un grupo compuesto fisiológicamente activo llamados eicosanoides, de los cuales las prostaglandinas son un miembro.<sup>87</sup>

Hasta el momento, diferentes esfuerzos se han realizado para evaluar el semen de verracos alimentados con un suplemento dietético a base de aceites de pescado, que se sabe contienen una alta cantidad de ácidos grasos poli-insaturados. Sin embargo, no se ha llegado a conclusiones firmes sobre tales efectos. Se habla que la alimentación con ácidos grasos poli-insaturados modifican la composición de los lípidos de los espermatozoides, en particular, con la adición de aceite de pescado 3% a la ración del verraco al día, aumentó el contenido de DHA de los espermatozoides 33 a 45% y aumentó el número de espermatozoides en el eyaculado, pero no todas las investigaciones han observado cambios en los parámetros morfológicos y funcionales de los espermatozoides.<sup>85, 87</sup>

Un estudio realizado para determinar la relación entre la calidad del semen y una dieta con ácidos grasos omega-3 poli-insaturados, comparó tres razas porcinas: Duroc, Large-White y Pietrain. La dieta suplementada afectó positivamente la morfología de los espermatozoides en las razas Large-White y Pietrain y la resistencia osmótica de los espermatozoides Pietrain. Una posible hipótesis para explicar estos resultados, es que los efectos de w-3 en la espermatogénesis puede ser ligeramente diferente en las razas, debido

a que esto se relaciona con la diferente composición de la membrana plasmática de los espermatozoides en las razas y/o las influencias de estos ácidos grasos poli-insaturados durante la espermatogénesis. Sin embargo, aunque se sabe que los ácidos grasos w-3 se ingieren en la dieta y se transfieren a las células espermáticas, aún no se ha determinado cómo estos cambios en la diferente composición están involucrados en los cambios en la función espermática, especialmente en la morfología del semen.<sup>85</sup>

Estienne *et al.*<sup>87</sup> encontraron que la suplementación de la ración con ácidos grasos w-3 aumentó el número de espermatozoides en el eyaculado y alteró algunas características de su comportamiento sexual. Los machos fueron alimentados con 2.2 kg de la dieta de inicio aderezada con 0.3 kg de maíz (controles) o 0.3 kg de un suplemento que contenía 31% de ácidos grasos w-3 durante 16 semanas.

Los verracos que consumieron los suplementos que contenían ácidos grasos w-3 mostraron un aumento en el número total de espermatozoides (aproximadamente  $9 \times 10^9$  por eyaculación), que fue evidente después de la semana 7 de suplementación (Cuadro 4.8). Debido a que el semen se diluye para crear dosis de IA que contienen  $3 \times 10^9$  espermatozoides/dosis, el uso del suplemento de ácidos grasos w-3 aumentó el número de dosis en aproximadamente tres por eyaculado.<sup>87</sup>

**Cuadro 4.8.** Producción de espermatozoides totales por eyaculación con una dieta suplementada o no con ácidos grasos omega-3.

Semanas:	Espermatozoides totales por eyaculación	
	0 – 7 (Periodo 1)	8 – 15 (Periodo 2)
Control	$86.3 \pm 2.3 \times 10^9$	$86.4 + 2.3 \times 10^9$
Tratamiento con w-3	$84.3 \pm 2.3 \times 10^9$	$95.6 \pm 2.3 \times 10^9$

Modificado de:<sup>87</sup>

En el comportamiento sexual, se observó una disminución del tiempo de reacción (intervalo de tiempo entre la entrada en el corral de colección y el primer intento de monta) por período, siendo de 15.4 s para el período 1 y 8.6 s para el período 2. La duración de la eyaculación fue mayor para los verracos alimentados con ácidos grasos w-3 (388.8 s) en comparación con los controles (343.9 s). Aunque no son claros los mecanismos responsables de estos efectos, las prostaglandinas podrían estar involucradas.<sup>87</sup>

## **CAPÍTULO V.**

### **TÓXICOS**

#### **5.1. INTRODUCCIÓN**

La exposición prolongada a cualquier tóxico testicular, independientemente de su mecanismo de acción, casi siempre dará como resultado la degeneración de las células germinales. La razón de que las células germinales se ven afectadas es debido a que son totalmente dependientes de la función coordinada de otros tipos de células y procesos dentro del testículo, y cualquier perturbación de su medio ambiente puede causar la muerte o exfoliación en el lumen tubular.<sup>104</sup> En este capítulo se abordaran los tóxicos de mayor relevancia que afectan la función reproductiva del verraco, como lo son las micotoxinas y las especies reactivas de oxígeno.

#### **5.2. MICOTOXINAS**

La palabra “micotoxina”, es el término utilizado para describir a un grupo de metabolitos secundarios producidos por procesos naturales del metabolismo de los hongos filamentosos que causan una respuesta tóxica (micotoxicosis) al ser consumidos por los animales.<sup>88-92</sup>

Hay dos tipos de hongos: hongos patógenos (también llamados hongos de campo), que causan enfermedades en las plantas (antes de la cosecha) y hongos saprófitos (hongos de almacenamiento), que viven sólo de materia orgánica muerta (después de la cosecha).

En ambos casos, condiciones ambientales específicas refuerzan la producción de las micotoxinas como la humedad del sustrato (10 a 20%), la humedad relativa (>70%), la temperatura (0 a 50 °C, dependiendo de las especies de hongos) y la disponibilidad de oxígeno.<sup>89, 91, 92</sup> Otros factores tales como la población de insectos, las condiciones físicas del grano o la susceptibilidad de ciertos granos híbridos influyen también en la proliferación de los hongos. Las micotoxinas son químicamente estables y persisten durante periodos largos de tiempo, aunque el hongo muera.<sup>91</sup>

La presencia de micotoxinas en los alimentos a menudo muestra un patrón geográfico. Por otro lado, debido al comercio internacional de alimentos y piensos, los problemas con micotoxinas se producen en todo el mundo.<sup>92</sup> Se ha estimado que hasta un 25% de todas las materias primas para piensos están contaminadas con micotoxinas. Las micotoxinas de mayor importancia en la producción porcina a nivel mundial son: zearalenona, tricotecenos, aflatoxinas, ocratoxinas, fumonisinas y ergotamina.<sup>88, 89, 91-93</sup>

Bajo condiciones comerciales, es común que el ganado este expuesto a una mezcla compleja de micotoxinas. Cuando un alimento se contamina con más de una micotoxina los efectos toxicológicos suelen ser sinérgicos, es decir, de adición o de potenciación.<sup>91-93</sup> Esto provoca dificultades en la definición de los efectos de la contaminación por micotoxinas, incluyendo el diagnóstico correcto de los animales afectados. De las combinaciones de micotoxinas que han sido investigadas en cerdos, las interacciones entre las aflatoxinas y ocratoxina A, y entre aflatoxinas y toxina T-2 se encuentran entre los más potentes.<sup>89, 94</sup>

La respuesta clínica a la ingestión de micotoxinas dependerá de algunos factores que influyen sobre la toxicidad de las micotoxinas, los cuadros clínicos causados no solo depende del tipo de micotoxinas, la cantidad en el alimento y duración de la exposición,

sino también de varios factores tales como la especie animal, edad, sexo, estado nutricional, estado de salud, la condición del animal en el momento de la exposición y el medio ambiente.<sup>91-93</sup>

Las micotoxinas están implicadas en un gran número de patologías y problemas reproductivos.<sup>92</sup> Por lo que a continuación se describen las principales micotoxinas que afectan específicamente la capacidad reproductiva del verraco.

### **5.2.1. Zearalenona**

También conocida como F2, la zearalenona y sus derivados,  $\alpha$ -zearalenol y  $\beta$ -zearalenol son una familia de compuestos fenólicos con potentes propiedades estrogénicas, la zearalenona es sintetizada por varias especies de *Fusarium*, principalmente por *F. roseum*, *F. graminearum*, *F. culmorum*, *F. crokwellense*, *F. sambucinum* y *F. equiseti*. Esta micotoxina puede infectar muchos cultivos importantes como el maíz, trigo, sorgo, cebada, avena, semillas de sésamo, heno y ensilaje de maíz.<sup>88, 91, 92, 94-97</sup>

Los porcinos se encuentran entre los animales domésticos más sensibles a esta toxina.<sup>88, 93, 96</sup> La zearalenona causa el daño más amplio a la reproducción animal, ya que afecta directamente el sistema reproductivo como un estrógeno agonista. La zearalenona es una fitohormona, que posee propiedades anabólicas y fuertemente estrogénicas, así como hematotóxicas y genotóxicas.<sup>98</sup>

La molécula de zearalenona posee una configuración similar al estradiol. Por esta razón es capaz de adoptar una conformación lo suficientemente similar a 17  $\beta$ -estradiol y otros estrógenos naturales lo que le permite estimular y unirse a los receptores estrogénicos,

así como una interacción con las enzimas que intervienen en la síntesis y desactivación de los esteroides endógenos.<sup>88, 97, 98</sup>

La zearalenona tiene la capacidad de atravesar las membranas celulares uniéndose a los receptores estrógenicos citoplasmáticos (E2), formando un complejo ZEA-E2R. Este complejo (ZEA-E2R) es transferido al núcleo de la célula y se une a receptores específicos nucleares de E2 activando el gen responsable de la síntesis de ARNm (normalmente generado por E2). Estos efectos similares al estrógeno causan actividad anabólica y reproductiva. La ZEA interactúa no sólo con los dos tipos de receptores de estrógeno, también es un sustrato para hidroxisteroide deshidrogenasa, que transforma a la zearalenona en dos metabolitos,  $\alpha$ -zearalenol y  $\beta$ -zearalenol.<sup>88, 89, 92-94, 97</sup>

Desafortunadamente, el principal metabolito formado en cerdos es  $\alpha$ -zearalenol, que es un compuesto estrogénico más potente que la zearalenona, con una mayor afinidad por los receptores de estrógenos, de hecho se establece que  $\alpha$ -zearalenol es de 3 a 4 veces más estrogénico que la zearalenona, pues la  $\alpha$ -hidroxilación resulta en un aumento de la potencia estrogénica y explica la sensibilidad por especie específica hacia las intoxicaciones por ZEA, mientras que la capacidad de glucuronidación inactiva la zearalenona. En comparación con otras especies, los cerdos tienen una capacidad de glucuronidación baja que los hace más sensibles a la zearalenona.<sup>88, 89, 92-94, 97</sup>

La zearalenona es absorbida casi en su totalidad tras la administración oral.<sup>97</sup> Además, se ha sugerido que en cerdos los metabolitos de la zearalenona se excretan en la bilis sustancialmente para ser reabsorbidos y metabolizados por células de la mucosa intestinal, en última instancia, entran en el hígado y a la circulación sistémica. Este ciclo

entero-hepático tiene un efecto de retención de la zearalenona y sus derivados en el sistema circulatorio, lo que retarda su eliminación y prolonga la duración de la intoxicación.<sup>93</sup>

La zearalenona tiene un grave impacto con múltiples efectos sobre la reproducción de los porcinos. Pues al tener actividad estrogénica, los signos clínicos están típicamente relacionados con la reproducción, siendo los porcinos pre-púberes más sensibles que los adultos. La toxicosis por zearalenona ha sido descrita con mayor frecuencia en las hembras, y pocos estudios se han llevado a cabo sobre la influencia de ZEA en el desempeño reproductivo de los sementales.<sup>91, 92, 94, 97</sup>

En cerdas jóvenes se ha reportado que una concentración tan baja como 0.5 a 1 ppm puede causar pseudo-estro, prolapso vaginal o rectal. Mientras que en verracos jóvenes, se requiere de concentraciones más elevadas de zearalenona en el pienso para afectar negativamente el potencial reproductivo, resultando en prolapso rectal, feminización, atrofia testicular, edematización del prepucio, hipertrofia de las glándulas mamarias, disminución de la testosterona plasmática y de la libido.<sup>88, 91-93, 97, 98</sup>

Por ejemplo, Christensen *et al.*<sup>99</sup> alimentaron verracos de seis semanas de edad con 500 a 600 ppm de zearalenona durante un período de 6-15 semanas lo que resultó en animales con un peso testicular significativamente menor (hasta 30%) que los verracos control.

En otro estudio, se examinaron los efectos del consumo de zearalenona antes de la pubertad, sobre las concentraciones plasmáticas de las hormonas reproductivas y el desarrollo reproductivo de verracos de 14 a 18 semanas de edad alimentados con 40 ppm de zearalenona. En comparación con los controles, los verracos alimentados con

zearalenona presentaron una reducción de la libido, asociado a una disminución de la concentración de testosterona en el plasma durante el consumo de zearalenona.<sup>95</sup>

La alimentación con zearalenona disminuyó la concentración plasmática de testosterona (0.86 ng/ml) a niveles inferiores a los de los verracos control (1.68 ng/ml). Después de retirar la dieta con zearalenona, las concentraciones plasmáticas de testosterona en los machos tratados tendió a ser menor que las concentraciones en los verracos de control (1.67 vs 2.50 ng/ml). Además, los verracos del grupo de control tuvieron una mayor puntuación de la libido que los verracos alimentados con zearalenona.<sup>95</sup>

También, se realizó un estudio para determinar si la ingesta continua de bajas concentraciones de zearalenona tiene algún efecto en el crecimiento, desarrollo de los órganos reproductivos, la libido o la producción de esperma. Los verracos fueron alimentados con dietas que contenían 0, 3, 6 o 9 ppm de zearalenona de 32 días hasta 145 ó 312 días de edad.<sup>100</sup>

No se observó ningún efecto sobre el comportamiento sexual, sin embargo, hubo una tendencia constante de un menor peso testicular con cantidades crecientes de zearalenona en la dieta, con una reducción del total de espermatozoides móviles en los machos alimentados con 9 ppm, lo que sugiere que la zearalenona puede afectar la función del epidídimo.<sup>100</sup>

Por otro lado, se investigó el impacto de la zearalenona y el efecto desintoxicante de un aditivo en el alimento (Toxy-Nil Plus seco, TPD). Verracos de 10 meses de edad, con un peso de 150-155 kg fueron asignados a uno de los tres grupos. El grupo control recibió una alimentación libre de toxinas. Al grupo de control positivo se le dio un pienso que

contenía 0.57 mg/kg de zearalenona. El agente desintoxicante se añadió al alimento del tercer grupo experimental a razón de 1 kg/ton.<sup>94</sup> El experimento se dividió en tres períodos:

- Período pre-experimental: Durante 10 días los verracos fueron alimentados con alimentos de alta calidad, y entrenados para colectar el semen por el método manual. Evaluándose los parámetros cualitativos y cuantitativos del semen.<sup>94</sup>
- Período experimental: Donde se indujo una intoxicación durante 32 días en los grupos experimentales, mediante la alimentación con piensos que contenían la zearalenona (control positivo) y piensos contaminados con zearalenona tratados con el desintoxicante (alimentación desintoxicada). El semen fue colectado una vez a la semana en todos los grupos. Y se determinaron las respuestas fisiológicas del semen.<sup>94</sup>
- Período final de recuperación: Durante 21 días, los verracos fueron alimentados con alimentos de alta calidad. Nuevamente, las respuestas fisiológicas del semen fueron evaluadas.<sup>94</sup>

Tres días después de comenzar a alimentar a los verracos con el alimento que contenía zearalenona, el volumen de la eyaculación disminuyó en un 40.8% en comparación con el grupo control. Este parámetro se recuperó después de una semana de dar piensos no contaminados a los verracos en la fase de recuperación. El volumen de la eyaculación en el grupo experimental fue similar al control.<sup>94</sup>

De igual manera, el recuento de espermatozoides por eyaculación en el control positivo se redujo sustancialmente en el lapso de una semana en comparación con el control. Cuando se ofreció el alimento no contaminado después de la fase de prueba, el recuento total de espermatozoides por eyaculación se recobro dentro de una semana.<sup>94</sup>

Se determinó una motilidad inicial baja de los espermatozoides del grupo de cerdos alimentados con piensos contaminados con zearalenona ( $3.9 \pm 0.44$  puntos). Tan pronto como el alimento contaminado fue sustituido por alimentos de buena calidad de la motilidad de los espermatozoides se recuperó en pocos días y ascendió a  $7.0 \pm 0.15$  puntos. La baja motilidad de los espermatozoides podría estar asociada ya sea con un daño de la membrana espermática y alteraciones en el metabolismo de la célula. La motilidad de los espermatozoides de los verracos alimentados con alimento desintoxicado fue de  $7.0 \pm 0.16$  puntos y no difirió significativamente de la motilidad de los espermatozoides del grupo control sin zearalenona.<sup>94</sup>

Otro estudio, donde los verracos maduros fueron alimentados con piensos contaminados naturalmente con 1 ppm de zearalenona durante un periodo de dos meses, con el fin de determinar el efecto del alimento contaminado con zearalenona en el potencial reproductivo del verraco: libido, parámetros de calidad espermática, tejidos testiculares y cambios de las cantidades de las enzimas aspartato aminotransferasa (AST) y alanina aminotransferasa (ALT) en el suero sanguíneo. No se observaron cambios testiculares o un impacto negativo en la calidad del esperma. Solo se encontraron ligeras variaciones entre los grupos, como 1.69%-7.89% de espermatozoides más viables en los eyaculados del grupo control. Mientras el examen morfológico de los espermatozoides reveló un 1.51% menos defectos en los espermatozoides de los eyaculados del grupo control.<sup>98</sup>

El metabolismo de la zearalenona se lleva a cabo en el hígado. Por lo que se analizaron las cantidades de AST y ALT en el suero sanguíneo de los verracos. Los resultados mostraron que las concentraciones de enzimas hepáticas AST y ALT no excedieron los rangos fisiológicos, pero la cantidad de ALT en el suero del grupo

experimental fue significativamente mayor, lo que implica que la zearalenona podría tener un efecto sobre el organismo del verraco.<sup>98</sup>

La exposición de los verracos a 1 ppm de zearalenona por 55 días no afectó significativamente los parámetros de calidad de los espermatozoides y los testículos en los verracos maduros, ni tampoco afectó la espermatogénesis, pero si estimuló los procesos metabólicos del hígado.<sup>98</sup>

Existe controversia en cuanto a la sensibilidad de los verracos maduros a la zearalenona, mientras algunos investigadores indican que la F2 no afecta la espermatogénesis en los verracos adultos si la concentración en el alimento es inferior a 60 ppm. Otros opinan que los verracos maduros no son sensibles a la zearalenona, siempre y cuando la concentración diaria en piensos no sea de más de 200 ppm. Sin embargo, poco se sabe sobre el efecto que la zearalenona y sus metabolitos tienen en el sistema reproductivo del verraco.<sup>91, 98</sup>

En la investigación de Tsakmakidis *et al.*<sup>101</sup>, utilizaron semen de verraco con varias dosis de zearalenona y  $\alpha$ -zearalenol que oscilaron entre 40, 60 y 80  $\mu\text{g/ml}$ , se concluyó que las concentraciones usadas redujeron la capacidad de los espermatozoides de cerdo de unirse a la zona pelúcida.

Un estudio, permitió la definición de la toxicidad *in vitro* del efecto de la zearalenona y sus metabolitos en los espermatozoides de verraco.  $\alpha$ -zearalenol, demostró ser más activo en la desnaturalización de la estructura de la cromatina, la zearalenona tuvo más efecto sobre la viabilidad espermática, mientras  $\beta$ -zearalenol afectó exclusivamente a los parámetros de la motilidad.<sup>97</sup>

A continuación se enlistan los desórdenes reproductivos y otros más importantes inducidos por la zearalenona y sus metabolitos en los verracos.

**Verracos pre-puberes:**

- Prolapso rectal.
- Feminización.
- Atrofia testicular.
- Edematización del prepucio.
- Hipertrofia de las glándulas mamarias.
- Disminución de la testosterona plasmática.
- Supresión de la libido.

**Verracos adultos:**

- Reducción de la síntesis de testosterona.
- Trastornos de la espermatogénesis.
- Disminución de la viabilidad espermática.
- Disminución de la capacidad de fecundación.
- Disminución de la fertilidad.

**5.2.2. Ocratoxinas**

Las ocratoxinas son producidas por hongos del grupo de *Aspergillus* como *A. ochraceus* y diferentes especies de *Penicillium*, como *P. viridicatum* y *P. verrucosum*. Las ocratoxinas son un grupo de siete metabolitos fúngicos compuesto por una fracción de isocumarina vinculada al aminoácido L-β-fenilalanina. La Ocratoxina A (OA) ha sido reportada como un contaminante en varios granos, cereales y otros productos vegetales, en

países de todo el mundo. La OA actúa como un agente nefrotóxico, hepatotóxico, cancerígeno, teratogénico y supresor de la función inmune en animales.<sup>91, 94, 102, 103</sup>

Aunque la ocratoxina A (OA) es una de las micotoxinas más comunes en la naturaleza, hay pocos datos sobre los posibles efectos de esta toxina sobre la capacidad reproductiva de los verracos,<sup>104</sup> dos estudios diferentes encontraron que la exposición a OA da como resultado una calidad seminal inferior.

Solti *et al.*<sup>102</sup> utilizaron verracos sexualmente maduros en un experimento de tres periodos para evaluar el efecto de la Ocratoxina A sobre la motilidad y la longevidad del esperma porcino. En la fase inicial (P1), todos los animales se mantuvieron con una dieta libre de toxinas. En período experimental 2 (P2) se administró OA en la dieta durante 5 semanas. Después, un período de espera de 5 semanas (P3) los verracos se mantuvieron libres de la exposición a la toxina para evaluar posibles efectos tardíos.

El porcentaje de motilidad progresiva de los espermatozoides se determinó inicialmente y después de 24, 48, 96, 120 y 144 horas de almacenamiento. La OA apareció en el plasma y suero seminal poco después de la aplicación de la micotoxina. Se observó una reducción significativa de la motilidad inicial y la longevidad se deterioró después del retiro la toxina. Estos hallazgos sugieren que la OA podría tener el potencial para afectar la producción de espermatozoides y la calidad del semen de los verracos.<sup>102</sup>

Se observo una calidad seminal inferior aproximadamente 40 días después de comenzar el periodo de alimentación con OA, lo que indica que la OA podría afectar la espermatogénesis (38 a 40 días).<sup>2, 102</sup> El análisis de los cambios en el porcentaje de

espermatozoides móviles durante todo el experimento, registró la caída más fuerte después del desafío con las toxinas, como un efecto retardado de la OA en la calidad del semen.<sup>102</sup>

En otro estudio se investigó el efecto de la Ocratoxina A sobre la motilidad de los espermatozoides, el volumen del eyaculado, la viabilidad inicial y la motilidad progresiva. Verracos sexualmente maduros fueron sometidos a un período experimental dividido en tres etapas, con un período de control de 4 semanas, seguida de la fase de aplicación de la toxina, donde los animales recibieron 0.08 µg de OA/kg por vía oral al día durante 6 semanas, y por último la fase de recuperación de 9 semanas.<sup>104</sup>

Se observó una menor viabilidad de los espermatozoides en verracos experimentales durante todo el estudio, la motilidad progresiva inicial y la movilidad después de 24 horas de almacenamiento se redujeron significativamente en el grupo experimental solo en el período de recuperación, demostrando que la OA puede afectar la producción de espermatozoides y la calidad del semen de verraco sólo después de un período de latencia.<sup>104</sup>

Un posible efecto directo de la OA perjudicial para las células germinales (espermatogonias) se puede explicar por el modo de acción bioquímico de la toxina. La OA es conocida como un potente inhibidor de la síntesis de proteínas. Debido a esta actividad, se puede suponer que la síntesis de proteínas durante la espermatogénesis puede verse afectada por la OA causando una estabilidad anormal de la membrana de los espermatozoides. Estas membranas desintegradas de los espermatozoides que fueron eyaculados después de 40 días pueden ser responsables de las alteraciones en el semen de los verracos de experimentación.<sup>102, 104</sup>

### 5.2.3. Fumonisinias

*Fusarium spp.* es uno de los hongos de mayor prevalencia asociados con alimentos básicos de la dieta humana y animal que produce micotoxinas incluyendo a las fumonisinias. Las fumonisinias son un grupo de micotoxinas aisladas originalmente de *Fusarium moniliforme* aunque también pueden producirlas otras especies como *F. proliferatum*, *F. anthophilum* y *F. verticilloides*. Se han reportado seis análogos de las fumonisinias: FA<sub>1</sub>, FA<sub>2</sub>, FB, FB<sub>1</sub>, FB<sub>2</sub> y FB<sub>3</sub>, la serie A son amidas y la serie B tienen una amina libre.<sup>90, 91, 103</sup>

Las fumonisinias más importantes por su toxicidad son la FB<sub>1</sub> y FB<sub>2</sub>, que se encuentran en cereales como el maíz y sus subproductos.<sup>91, 93</sup> Siendo la FB<sub>1</sub>, la principal fumonisina producida en cultivos, así como de forma natural en el maíz y alimentos a base de maíz.<sup>90</sup>

Su mecanismo de acción es la inhibición de la síntesis de los esfingolípidos. En la mayoría de los animales, producen efectos neurotóxicos (leucoencefalomalacia), nefrotóxicos, lesiones cardíacas, edema pulmonar y cerebral. Reducen la ingesta de pienso y el crecimiento de los animales así como la linfoblastogénesis, lo que deteriora la función inmunitaria, causan daño hepático y renal, disminución de la ganancia de peso, y aumento de la tasa de mortalidad. En cerdos, también causa dificultades respiratorias.<sup>91, 103</sup>

Sin embargo, se sabe poco de los efectos de las fumonisinias sobre la eficiencia reproductiva de los animales. Se ha señalado que causan degeneración testicular y alteración de la espermatogénesis con un descenso concomitante en la tasa y la eficiencia de la producción de espermatozoides en ratas inyectadas con micro dosis de aflatoxina B<sub>1</sub>.<sup>90</sup>

En un estudio, 24 verracos de alrededor de 8 a 9 semanas de edad, fueron asignados a 4 dietas que contenían 0.2, 5.0, 10.0 y 15.0 mg FB<sub>1</sub>/kg que constituyeron las dietas control, 1, 2 y 3, respectivamente, en una prueba de alimentación de 6 meses, con el fin de evaluar el efecto de la ingesta crónica de una dieta con fumonisina B<sub>1</sub> (FB<sub>1</sub>) sobre la producción de espermatozoides y el potencial de almacenamiento de verracos púberes.<sup>90</sup>

Los resultados (Cuadro 5.1) revelaron una disminución dependiente de la concentración de las reservas espermáticas con cantidades crecientes de FB<sub>1</sub>. Las reservas totales de espermatozoides de la cola de los animales en las dietas 2 y 3 fueron aproximadamente el 70% de los animales de la dieta control. La producción espermática diaria (PED) por testículo de los animales en la dieta control y dieta 1 fueron significativamente más altos que los de las dietas 2 y 3, que no fueron significativamente diferentes entre sí. La PED por testículo en los animales expuestos a la dieta con FB<sub>1</sub> en concentraciones superiores a 5 mg/kg (dietas 2 y 3) fueron aproximadamente 70-70.6% de los de la dieta de control.<sup>90</sup>

Las reservas de espermatozoides del testículo y del epidídimo fueron significativamente más bajas de 70.6 y 70.1% de los de la dieta 2, y 70.0 y 69.8% para los de la dieta 3 en comparación con los de la dieta control para los respectivos parámetros, que se puede atribuir a la influencia de FB<sub>1</sub> dietética en la producción de espermatozoides y almacenamiento de los verracos, ya que los animales fueron similares en edad, y no existen diferencias significativas en sus pesos corporales y testiculares.<sup>90</sup>

**Cuadro 5.1.** Las reservas de espermatozoides del testículo y del epidídimo ( $\times 10^9$ ) y la producción espermática diaria (PED) de los verracos púberes expuestos a FB<sub>1</sub> en la dieta.

Parámetro	Control 0.2 mg FB <sub>1</sub>	Dieta 1 0.5 mg FB <sub>1</sub>	Dieta 2 10 mg FB <sub>1</sub>	Dieta 3 15 mg FB <sub>1</sub>	± S.E.M.
Peso corporal inicial (kg)	6.9	7	6.9	7.1	0.26
Peso corporal final (kg)	74.8	73.9	69.2	67.8	1.54
Peso testicular (g)	354.2	375.3	316.6	337.7	11.33
Peso testicular relativo* (%)	0.6	0.6	0.5	0.6	0.02
Reserva espermática/testículo	23.6 <sup>a</sup>	22.6 <sup>a</sup>	16.7 <sup>b</sup>	16.5 <sup>b</sup>	1.95
Reserva espermática de la cabeza	18.1 <sup>a</sup>	17.3 <sup>a</sup>	12.9 <sup>b</sup>	12.7 <sup>b</sup>	1.20
Reserva espermática del cuerpo	5.2 <sup>a</sup>	5.1 <sup>a</sup>	3.6 <sup>b</sup>	3.5 <sup>b</sup>	0.42
Reserva espermática de la cola	87.0 <sup>a</sup>	83.4 <sup>a</sup>	60.9 <sup>b</sup>	60.9 <sup>b</sup>	1.21
Reserva espermática epidídimo	110.4 <sup>a</sup>	105.8 <sup>a</sup>	77.4 <sup>b</sup>	77.0 <sup>b</sup>	2.80
PED ( $\times 10^9$ /testículo)	5.4 <sup>a</sup>	5.2 <sup>a</sup>	3.8 <sup>b</sup>	3.8 <sup>b</sup>	0.10

<sup>ab</sup> significa en la misma fila con diferentes superíndices difieren significativamente ( $P < 0.05$ )

\* En relación con el peso corporal final. Tomado de: <sup>90</sup>

Estos resultados confirman que la dieta con FB<sub>1</sub> influye negativamente en la producción espermática. Por lo que los sementales alimentados con una dieta con FB<sub>1</sub> a una cantidad superior de 5 mg/kg, pueden sufrir una reducción significativa de la producción espermática. <sup>90</sup>

### 5.3. ESPECIES REACTIVAS DE OXIGENO (RADICALES LIBRES)

#### 5.3.1. Estrés Oxidativo

El estrés oxidativo, se refiere al daño que pueden sufrir las células de los animales en la integridad de sus componentes estructurales; su efecto está directamente relacionado

con la disminución de la sobrevivencia y capacidad fisiológica de las células, lo cual es provocado por la formación de gran cantidad de especies reactivas de oxígeno (ROS).<sup>105-107</sup>

En las células vivas, las ROS, se forman continuamente como consecuencia de las reacciones bioquímicas, por ejemplo, dentro de la cadena respiratoria mitocondrial y los factores externos. El estrés oxidativo, induce la peroxidación lipídica, estructural y funcionalmente altera las proteínas, el DNA y promueve la apoptosis. El estrés oxidativo se produce cuando la generación de ROS y otras especies de radicales libres excede la capacidad de los antioxidantes naturales en el organismo de los mamíferos.<sup>107</sup>

Las ROS, son altamente reactivas a los agentes oxidativos, pertenecen a la clase de los radicales libres; un radical libre es cualquier componente (no necesariamente derivado de oxígeno) que puede contener uno o más electrones sin división. Los radicales libres son especies químicas que poseen un electrón no pareado y se comportan como moléculas altamente reactivas. Entre las principales ROS que destacan por su actividad, se encuentran: al anión superóxido ( $O_2^-$ ), peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ), radicales hidroxilos ( $\cdot OH$ ), óxido nítrico (NO) y aniones peroxinitritos (ONOO).<sup>105-107</sup>

Las especies reactivas al oxígeno también tienen importantes funciones fisiológicas en el organismo, por lo que las ROS se deben considerar como benéficas o tóxicas, dependiendo de su concentración y de los mecanismos antioxidantes que los produzcan.<sup>107</sup>

Los factores endógenos que aumentan la producción de ROS, son:

- Metabolismo anaeróbico a través de la cadena de transporte de electrones a nivel mitocondrial.
- La oxidación de los ácidos grasos.
- Reacciones del citocromo P450.

- Células fagocíticas (neutrófilos, monocitos, macrófagos, eosinófilos).

Mientras que dentro de los factores exógenos encontramos:

- Ingesta elevada de algunos metales como Fe y Cu.
- Luz solar.
- Choque térmico.
- Algunos solventes orgánicos y pesticidas.
- Micotoxinas.
- Hiperoxia.
- Sobre ejercicio.<sup>107</sup>

Las especies reactivas de oxígeno pueden tener efectos beneficiosos o perjudiciales sobre la función de los espermatozoides.<sup>106</sup>

Dentro de las actividades fisiológicas de los espermatozoides reguladas por las ROS se ha registrado que participan en la capacitación, la motilidad hiperactiva, y la reacción del acrosoma a través de procesos de transducción de señales.<sup>106, 108-110</sup>

El espermatozoide es una célula altamente especializada, con la capacidad de moverse de manera activa y fertilizar el óvulo, por lo que el daño a la membrana plasmática del espermatozoide resulta en la pérdida irreversible de sus funciones. La integridad de los espermatozoides puede ser sometida a muchos peligros, pero uno de los más perjudiciales es el estrés oxidativo inducido por especies reactivas de oxígeno (ROS).<sup>107-109</sup>

Los espermatozoides son particularmente susceptibles al daño inducido por las ROS debido a que sus membranas plasmáticas contienen porcentajes relativamente grandes de

ácidos grasos poliinsaturados y su citoplasma contiene concentraciones relativamente bajas de enzimas de barrido.<sup>105-111</sup>

La peroxidación induce alteraciones estructurales, pérdida rápida e irreversible de la motilidad, cambios profundos en el metabolismo, y una rápida liberación de componentes intracelulares, inhibición de la respiración, daños en el DNA de los espermatozoides, o deficiencias en la penetración de los ovocitos y en la fusión espermatozoide-ovocito. Lo que conlleva a una pérdida de la viabilidad, motilidad y capacidad fecundante del espermatozoide. Por otra parte, las enzimas antioxidantes intracelulares no pueden proteger a la membrana plasmática que rodea al acrosoma y la cola, forzando a los espermatozoides a depender de la protección proporcionada por el plasma seminal.<sup>105, 109, 111</sup>

A grandes rasgos las ROS perjudican la actividad funcional de las células de espermáticas, induciendo:

- Disminución de la motilidad.
- Disminución de la vitalidad.
- Permeabilización de la membrana plasmática y acrosomal.
- Fragmentación del DNA.
- Pérdida en la capacidad de fusión esperma-ovocito.
- Muerte celular.

### **5.3.2. Preservación del semen**

El uso de la inseminación artificial creó la necesidad de preservar espermatozoides por períodos prolongados de tiempo, para lograrlo la actividad metabólica de los

espermatozoides necesita ser reducida por dilución en un medio apropiado y disminuyendo la temperatura (refrigeración o congelación).<sup>108, 110</sup>

Para el procedimiento habitual de IA en las granjas porcinas se utiliza semen fresco refrigerado, ya que la fertilidad del semen se pierde gradualmente durante largos períodos de almacenamiento, y se ve afectada significativamente cuando el número de espermatozoides fértiles disminuyen. Los atributos de los espermatozoides tanto funcionales y estructurales son susceptibles al daño durante el almacenamiento ya que son susceptibles al choque de frío. Durante el almacenamiento, los espermatozoides de cerdo se someten a varios cambios, incluyendo disminución de la motilidad, disminución de la viabilidad y alteraciones de la permeabilidad de la membrana, que reducen el rendimiento posterior de los espermatozoides.<sup>105, 108-111</sup>

Parte de la reducción en la fertilidad del semen es debida al daño oxidativo, que conduce a una posterior peroxidación de lípidos de membrana. Además, este daño oxidativo puede ser exacerbado por la capacidad antioxidante relativamente baja del plasma seminal de verraco.<sup>105, 110</sup>

La criopreservación causa un daño mayor a los espermatozoides, ya que durante este proceso, la congelación conduce a un daño mecánico debido a la formación de cristales de hielo y al daño químico debido al estrés osmótico. La formación de cristales de hielo conduce a la acumulación de sales, solutos y gases que pueden tener efectos osmóticos y tóxicos.<sup>105</sup> El estrés al que son sometidos los espermatozoides termina a corto plazo con la muerte de los espermatozoides que la experimentan y, además, por la síntesis excesiva de ROS, que potencia el fenómeno de peroxidación lipídica en los espermatozoides que

todavía mantenían la funcionalidad, lo cual da lugar al "envejecimiento prematuro", que provocará la muerte espermática en corto período de tiempo.<sup>112</sup>

Por lo anterior, se afirma que aún en las mejores condiciones de criopreservación, sólo ~50% de los espermatozoides permanecen móviles tras los procesos de congelación y descongelación, y de éste 50%, sólo el 5% de los espermatozoides son totalmente competentes para la fertilización.<sup>105</sup> En la actualidad, se justifica la tecnología de la conservación seminal en congelación en la contribución a la conservación de los recursos genéticos amenazados en el presente y en el futuro.<sup>108</sup>

Independientemente de la técnica de congelación y descongelación del material germinal congelado, el número de células apoptóticas aumenta en comparación con el semen fresco.<sup>108</sup> Por lo que la comprensión de los mecanismos moleculares que subyacen el daño celular inducido por procedimientos como la criopreservación es de suma importancia para la mejora de la tecnología reproductiva. Parte de la investigación actual que se está realizando se está enfocando en la búsqueda de sustancias con función antioxidante para su adición al semen y así contrarrestar los efectos negativos del estrés oxidativo durante la preservación del semen.<sup>105</sup>

### **5.3.3. Antioxidantes**

Los antioxidantes, son sustancias o moléculas, que cuando están presentes a bajas concentraciones junto a un sustrato oxidable, retrasan o evitan la oxidación del mismo. En general, los antioxidantes previenen la oxidación de las moléculas biológicamente importantes por los radicales libres o sus metabolitos reactivos. Por lo que se puede reducir el impacto del estrés oxidativo durante el proceso de conservación seminal al adicionar

antioxidantes al medio de dilución para lograr el mantenimiento de la calidad de los espermatozoides.<sup>107, 108, 110</sup>

Los espermatozoides están equipados con sistemas antioxidantes naturales para contrarrestar los efectos tóxicos de las ROS, donde la función de un antioxidante, es actuar como un donador de electrones, capaz de evitar una reacción en cadena de óxido-reducción o, sacrificar su propia integridad molecular para evitar alteraciones de moléculas como lípidos, proteínas o DNA.<sup>107-109</sup>

Entre los antioxidantes naturales, encontramos a enzimas como la Glutación S-transferasa (GST), Tiorredoxina reductasa (TrxR), Peroxirredoxinas (Prxs), Hemo oxigenasa (HO), los espermatozoides del epidídimo son protegidos por cinco enzimas principales: glutación peroxidasa (GPx), fosfolípido hidroperóxido glutación peroxidasa (PHGPx), glutación reductasa (GR), superóxido dismutasa (SOD) y catalasa (CAT).<sup>106-109</sup>

Por otro lado, existe un grupo heterogéneo de moléculas hidrófobas e hidrófilas que capturan radicales libres y originan especies químicas menos nocivas para la integridad celular, como la vitamina A, vitamina C, vitamina E, Ubiquinona (coenzima Q), Glutación, Ácido úrico, Ergotioneína, compuestos Polifenólicos.<sup>107</sup>

También, algunos minerales traza han sido ligados a la protección contra el daño oxidativo, tales como Zn, Se, Mn, Fe y Cu, cuyo mecanismo de acción es a través de su participación en sistemas enzimáticos, ya sea como componentes estructurales o activadores.<sup>107</sup>

La investigación sobre la vitamina E (véase en capítulo 4), condujo a la identificación de antioxidantes como agentes reductores que previenen reacciones oxidativas, a menudo depurando las ROS antes de que puedan dañar a las células.<sup>106, 107</sup>

Entre los antioxidantes más utilizados en la solución diluyente, durante el almacenamiento líquido o en la criopreservación de espermatozoides de verraco, se encuentran: Crocina, Trolox, vitamina C, N-acetil-cisteína, taurina, glutatión, rafinosa, trehalosa, cisteamina y butilhidroxitolueno.<sup>109, 110</sup>

La relevancia del uso de antioxidantes en la conservación seminal, radica en proporcionar mejores condiciones para el mantenimiento de la calidad espermática durante la conservación, tanto en refrigeración como en congelación y de esta manera preservar la capacidad fecundante de los espermatozoides,<sup>108, 110</sup> lo que ha motivado a la investigación continua y permanente de los efectos de varias sustancias antioxidantes, por ejemplo, se ha reportado que antioxidantes como la superóxido dismutasa, catalasa, el citocromo C y glutatión peroxidasa en soluciones líquidas de preservación mejoran la motilidad, la integridad del acrosoma y la adherencia de los espermatozoides.<sup>113</sup>

El glutatión y la cisteína mejoraron la viabilidad y la integridad de los espermatozoides de cerdo durante la preservación líquida y la penetración *in vitro* de los espermatozoides de verraco, en el caso de la cisteína después de la preservación líquida a 10 °C durante 29 días.<sup>113</sup>

La melatonina también está siendo investigada por su actividad antioxidante, un estudio en semen de verraco preservado a 17 °C durante 7 días, reveló que a excepción de

la proporción de espermatozoides vivos con acrosoma intacto, la melatonina no fue capaz de mejorar la función del semen de verraco.<sup>110</sup>

El extracto acuoso de *Rhodiola sacra* (RSAE) una hierba china, se ha reportado que tiene una actividad limpiadora contra el radical anión superóxido ( $O_2^-$ ) y durante la criopreservación del semen de verraco a una concentración de 4 a 8 mg de RSAE/l de diluyente mejoró la motilidad espermática y preservó la integridad del acrosoma.<sup>111</sup>

## **CAPÍTULO VI.**

### **ENFERMEDADES DEL VERRACO**

#### **6.1. INTRODUCCIÓN**

Las enfermedades infecciosas, pueden elevar la temperatura corporal del verraco o la temperatura de los órganos genitales, lo que tiene un impacto directo sobre la capacidad reproductiva del mismo, además, este puede fungir como portador y transmisor de diversos agentes infecciosos que pueden causar enfermedad a las hembras. Aunque la inseminación artificial ha mejorado el control de muchas enfermedades por contacto directo entre machos y hembras, por otro lado, la propagación de agentes bacterianos y virales a través del semen contaminado por la IA puede ser importante en algunos casos, con consecuencias desastrosas sobre el plan financiero y genético de las producciones porcinas. A continuación se presentan los principales agentes patógenos que pueden afectar la capacidad reproductiva del verraco y que se pueden transmitir por el semen, dividiéndolos en agentes virales y agentes bacterianos.

#### **6.2. ENFERMEDADES VIRALES**

##### **6.2.1. Virus del Síndrome Respiratorio y Reproductivo Porcino (PRRSV)**

El Síndrome Respiratorio y Reproductivo Porcino, anteriormente conocido como la enfermedad misteriosa del cerdo es causado por el virus del PRRS (PRRSV) o virus de

Lelystad, que pertenece a la familia *Arteriviridae*, del género *Arterivirus*. El síndrome reproductivo y respiratorio porcino (PRRS de las siglas en inglés Porcine Reproductive and Respiratory Sindrom) es una de las enfermedades económicamente más devastadoras que afecta a la industria porcina de todo el mundo. <sup>114-117</sup>

Como el nombre del virus implica, la infección por PRRSV está asociada con problemas reproductivos y respiratorios. El primero, incluye nacimientos prematuros, abortos, nacimiento de lechones débiles y aumento de mortinatos y momificados; por otro lado las afecciones respiratorias tienen gran importancia, sobre todo en cerdos neonatos, en los que existe disnea como mayor característica, usualmente observada en animales de tres semanas de edad, pero puede presentarse en cerdos de todas las edades. El virus del PRRS también se ha visto implicado en cuadros clínicos de diarrea neonatal, aunque con menor frecuencia. <sup>116-118</sup>

Los miembros de la familia *Arteriviridae* comparten la capacidad de replicarse en los macrófagos y de persistir en los tejidos durante varios meses después de la desaparición de la fase aguda de la infección, de esta forma inducen infecciones persistentes en sus huéspedes naturales. Como consecuencia, el PRRSV tiene un complejo perfil epidemiológico y ha sido especialmente difícil de controlar bajo las condiciones habituales de la producción porcina comercial. <sup>115-117</sup>

El PRRS es una enfermedad multi-sistémica, ya que el virus puede difundirse de los pulmones al resto del cuerpo y distribuirse en diversos órganos y tejidos; en la sangre, solamente en asociación con los leucocitos o los monocitos que emigran a diversos tejidos para convertirse en macrófagos tisulares. Con esta difusión PRRS puede alcanzar el aparato

reproductor, conduciendo al desarrollo de los signos clínicos asociados a la reproducción.<sup>115, 116, 119</sup>

Aunque la enfermedad clínica asociada con PRRSV en cerdos en crecimiento puede ser muy grave, en los verracos la signología sigue un curso leve o incluso puede ser nula. Las manifestaciones clínicas que se llegan a observar son anorexia, letargo, fiebre, así como disminución de la libido (Cuadro 6.1) y en algunas ocasiones se observan alteraciones transitorias en la calidad del semen. En consecuencia, en la mayoría de los casos, la infección aguda pasa desapercibida. La ausencia o la limitada duración de los signos clínicos son importantes desde el punto de vista epidemiológico, ya que los animales con infección aguda pueden pasar desapercibidos, lo que aumenta el riesgo de transmisión del virus, ya que no se adoptan medidas especiales de control.<sup>115-117, 119</sup>

**Cuadro 6.1.** Signos clínicos después de la infección natural o experimental con el virus de PRRS en verracos.

Referencia	Infección natural (N) o Experimental (E)	Apetito	Fiebre	Libido
Feitsma <i>et al.</i> (1992)	N	↓	↑	↑
Prieto <i>et al.</i> (1984)	E	Normal	Normal	Normal
Yaeger <i>et al.</i> (1993)	E	↓	↑	-
Swenson <i>et al.</i> (1993)	E	Normal	Normal	Normal
- No reportado. Tomado de: <sup>119</sup>				

Varios estudios indican que la infección de verracos por el virus del PRRS puede causar alteraciones en la calidad seminal, y se han reportado, a partir de 2 semanas después de la infección.<sup>115</sup>

En el semen, el PRRSV se asocia con una reducción significativa de la calidad del semen expresada en:

- Disminución del volumen seminal.
- Disminución de la concentración espermática.
- Azoospermia.
- Reducción de la motilidad espermática.
- Aumento de anomalías morfológicas de los espermatozoides, como:
  - gotas citoplasmáticas proximales y distales.
  - acrosomas anormales.
  - cabezas anormales.<sup>114-119</sup>

Estas alteraciones se han descrito en infecciones naturales y experimentales (Cuadro 6.2). Sin embargo, las consecuencias de la infección en relación con el semen son objeto de controversia, ya que algunos investigadores han encontrado que la calidad del semen se mantiene dentro de los límites normales después de la infección con PRRSV, por lo que atribuyen las alteraciones en la calidad seminal como la consecuencia de las reacciones individuales al efecto de la infección PRRSV.<sup>115-119</sup>

Sin embargo, en verracos, se ha podido demostrar que el virus puede replicarse e inducir la apoptosis en las células epiteliales de los túbulos seminíferos, provocando una alteración de la espermatogénesis, afectando principalmente a espermatozoides y espermaticitos, lo cual se ha observado en aislamientos en el semen siete días post infección. Una consecuencia de la replicación, es la poca producción de espermatozoides y

muerte de la célula germinal, que induce a apoptosis y a un aumento en el número de células espermáticas inmaduras.<sup>115, 116</sup>

**Cuadro 6.2.** Efecto en la calidad seminal en verracos infectados con el virus de PRRS.

Referencia	Concentración espermática	Motilidad	Anormalidades (%)	Acrosomas	Eyaculados rechazados
Feitsma <i>et al.</i> (1992)	Azoospermia	↓	↑	Dañado	12% (vs 2% control)
Prieto <i>et al.</i> (1984)	Normal	↓	↑	Normal	-
Swenson <i>et al.</i> (1993)	Normal	Normal	Normal	-	-

- No reportado. Tomado de:<sup>119</sup>

Se sabe que una de las principales características de PRRSV es su alta transmisibilidad, los animales infectados pueden excretar el PRRSV en la saliva, secreciones nasales, orina, secreciones de la glándula mamaria, heces, y en el semen (Cuadro 6.3).<sup>115, 118</sup> También se ha establecido que los machos pueden contraer la infección por diversas rutas, incluyendo oral, intranasal, intramuscular e intraperitoneal.<sup>115</sup>

**Cuadro 6.3.** Periodo de tiempo máximo de excreción de PRRSV reportado para diferentes secreciones corporales en cerdos.

Secreción corporal	Periodo de tiempo máximo de excreción post infección
Saliva	42 días
Secreciones nasales	38 días
Orina	28 días
Heces fecales	35 días
Semen	92 días
Secreciones orofaríngeas	157 días

Recopilado de:<sup>115</sup>

El PRRSV puede ser eliminado en el semen de verracos infectados, incluso en ausencia de viremia y en la presencia de anticuerpos neutralizantes. Este hecho sugiere que el virus continúa replicándose en uno o más tejidos del aparato reproductor de donde se vierte directamente en el semen. Las muestras de suero de los verracos infectados experimentalmente han sido positivas durante períodos variables de tiempo de hasta 31 días post infección. Sin embargo, el PRRSV se ha detectado en muestras de semen de verracos infectados experimentalmente por periodos variables de tiempo que van desde 4 hasta 92 días post infección.<sup>115, 117, 118</sup>

Esto significa que los resultados obtenidos de las pruebas serológicas no siempre reflejan la situación en el semen en cuanto a la presencia o ausencia de PRRSV, y que, a pesar de un seguimiento intensivo de los verracos con las pruebas regulares sobre las muestras de sangre, la inocuidad del semen no se puede garantizar al 100%.<sup>120</sup>

Cualquier intento de clasificar el semen, ya sea como libre o contaminado con el PRRSV se complica por las inconsistencias temporales entre la viremia, la presencia de PRRSV en el semen, y el estado serológico. Por ejemplo, la viremia en los verracos adultos es de corta duración y por lo general termina antes de la eliminación del virus al final en el semen. Por otro lado, en las fases iniciales de la infección, los resultados serológicos serán negativos a pesar de que el virus se esté eliminando en el semen.<sup>115</sup>

Para el diagnóstico de PRRSV en semen, se recomienda una de las herramientas moleculares que se han desarrollado basadas en la tecnología del DNA recombinante, la reacción en cadena de la polimerasa (PCR). El RT-PCR se utiliza para detectar el material genético (genoma) de PRRSV en tejidos homogeneizados de cerdos y en muestras clínicas, incluyendo el semen. El RNA viral se detecta mediante la extracción de RNA de la

muestra, una transcriptasa inversa (RT) convierte el RNA a DNA, y el DNA es exponencialmente amplificado por PCR.<sup>121, 122</sup>

Las ventajas de utilizar el procedimiento de RT-PCR, son el tiempo de respuesta rápido y una alta sensibilidad y especificidad. La rapidez para la detección de secuencias genómicas víricas, resulta ventajoso por el hecho de que el semen de verraco sólo se puede almacenar temporalmente, y por lo tanto una prueba rápida es un requisito previo para garantizar la seguridad del semen antes de su uso. El semen resulta tóxico para las células utilizadas en el ensayo de aislamiento viral, por lo que las técnicas de PCR han sido muy útiles para hallar el PRRSV en el semen. Además, la RT-PCR detecta una porción del genoma del agente infeccioso, por lo que no es necesario esperar una respuesta inmunitaria del huésped antes de que el virus pueda ser detectado. Por lo tanto, en el caso de las infecciones agudas, la RT-PCR permite que el PRRSV sea detectado antes que en una prueba serológica.<sup>120-122</sup>

### **6.2.2. Circovirus porcino tipo 2 (PCV2)**

El circovirus porcino tipo 2 (PCV2) es un virus pequeño, DNA, sin envoltura, perteneciente al género *Circovirus* de la familia *Circoviridae*. El circovirus porcino tipo 2 se ha detectado en los cerdos domésticos y salvajes. El PCV2 es un virus omnipresente y la mayoría de los rebaños en todo el mundo son seropositivos para el PCV2, además ha sido identificado como el agente patógeno asociado a un complejo de diferentes enfermedades de gran impacto para la industria porcina.<sup>117, 119, 123-125</sup>

Inicialmente el circovirus porcino tipo 2 fue relacionado con un cuadro clínico caracterizado principalmente por adelgazamiento y linfadenopatía generalizada en cerdos en crecimiento. Actualmente la infección por PCV2 es comúnmente asociada con el

Síndrome de Desgaste Multisistémico Posdestete (PMWS de sus siglas en inglés) que afecta principalmente a cerdos de 6 a 20 semanas de edad y con la enfermedad asociada al PCV2 que incluye la enfermedad sistémica, cuadros clínicos respiratorios, enfermedades entéricas, dermatitis porcina y síndrome de nefropatía. En cerdos maduros la infección por PCV2 es comúnmente subclínica y es considerada de menor importancia, llega a causar de manera esporádica fallas reproductivas en las cerdas que pueden presentar abortos tardíos, momificación y mortinatos.<sup>117, 118, 126</sup>

Aunque hay certeza de que los signos clínicos se relacionan con desórdenes inmunopatológicos, el PCV2 asociado a la enfermedad reproductiva en condiciones de campo es poco frecuente. Los verracos maduros infectados con PCV2 en general, no presentan signos clínicos ni lesiones.<sup>117, 123</sup> Únicamente con el uso de inmunohistoquímica, se ha detectado al virus en el citoplasma de los macrófagos y células parecidas a los fibroblastos de los testículos, epidídimos y glándulas accesorias de verracos infectados.<sup>126</sup>

La transmisión de PCV2 ocurre tanto horizontal como verticalmente. El virus es eliminado a través de suero, heces, orina, saliva, líquido ocular, secreciones nasales y traqueo bronquiales, secreciones orales provenientes de las tonsilas, calostro, leche y semen. Se ha postulado que la principal vía de transmisión es la vía oro-nasal. Sin embargo, debido a la rápida difusión y el uso extensivo de la IA, la transmisión del PCV2 por el semen ha sido sugerida como una vía potencialmente importante desde el punto de vista epidemiológico en la propagación de la enfermedad entre regiones y poblaciones de cerdos.<sup>117, 119, 123-125</sup>

El PCV2 ha sido detectado en el semen de los verracos infectados de forma natural y experimental, incluso después de la aparición de anticuerpos en el suero. La detección de

la viremia (detección de DNA de PCV2 en suero) habitualmente se produce antes de la detección del virus asociado al semen, pero la excreción por semen ha sido reportada en la ausencia de viremia, lo que complica el diagnóstico de PCV2 mediante serología.<sup>117-119, 123, 124</sup>

Múltiples pruebas experimentales han demostrado la excreción interrumpida del virus que dura por lo menos entre 47 y 60 días.<sup>118, 125, 127</sup> En postas de verracos positivos a PCV2 infectados de forma natural, se ha encontrado que estos eliminan esporádicamente DNA de PCV2 en el semen durante un máximo de 27.3 semanas.<sup>117</sup>

Aunque se ha determinado la excreción del PCV2 a través del semen de manera intermitente, no existe evidencia directa suficiente de una transmisión venérea de PCV2 ya sea por monta natural o por inseminación artificial en cerdos que resulte en la falla reproductiva.<sup>123-125</sup>

En un estudio para determinar si el semen positivo a PCV2 por PCR causa falla reproductiva cuando se utiliza para inseminar a las cerdas negativas a PCV2, ocho de nueve cerdas servidas por IA quedaron gestantes y llevaron la gestación hasta la finalización del estudio a los 105 días de gestación. Las muestras semanales de suero de las cerdas inseminadas fueron negativas para anticuerpos anti-PCV2, y muestras de suero de todos los fetos de 105 días de gestación fueron también seronegativos.<sup>124</sup>

Aunque se desconocen las cantidades de PCV2 presentes en semen y el riesgo real de PCV2 de transmitirse por esta vía aún no es concluyente, varios autores recomiendan que esta vía de infección deba ser considerada como potencial ruta de diseminación.<sup>123, 125</sup>

### 6.2.3. Enfermedad del Ojo Azul

El Rubulavirus porcino es un virus RNA envuelto, perteneciente al género *Rubulavirus*, de la familia *Paramyxoviridae*, siendo los cerdos la única especie hospedadora conocida, la infección por Rubulavirus porcino causa la enfermedad del ojo azul (EOA), este virus fue aislado inicialmente en La Piedad, Michoacán, y posteriormente en Guanajuato y Jalisco en la década de 1980.<sup>117, 119, 128, 129</sup> Aunque solo se han reportado casos de EOA en los estados centrales de México, se han encontrado paramixovirus porcinos estrechamente relacionados en otros países.<sup>129</sup>

En la enfermedad los signos clínicos son dependientes de la edad, y se caracterizan por trastornos neurológicos y problemas respiratorios en lechones, falla reproductiva en animales adultos y, ocasionalmente opacidad corneal en todas las edades.<sup>128, 129</sup>

Los verracos adultos pueden cursar EOA sin presentar signos clínicos, o bien pueden presentar una signología evidente que abarca anorexia, fiebre, opacidad de la cornea, orquitis y epididimitis con posterior atrofia testicular, disminución de la calidad del semen y en casos severos, pérdida de la libido e infertilidad.<sup>117-119, 115, 129, 130</sup>

A nivel histológico se ha observado atrofia testicular asociada con degeneración de los tubos seminíferos, y formación de células gigantes, además de lesiones granulomatosas y necrosis en epidídimo.<sup>128, 130</sup>

En un estudio donde se inocularon verracos de la raza pelón mexicano con el rubulavirus porcino se observó edematización del testículo izquierdo entre el quinto y decimo día post infección. Mientras la cabeza de los epidídimos mostraron nódulos granulomatosos a los 20, 30 y 45 días posinoculación.<sup>130</sup>

El gonadotropismo del rubulavirus porcino se sustenta en la afinidad de las partículas virales a moléculas de ácido siálico. Se ha reportado la presencia de ácido siálico en los testículos, epidídimo, conductos deferentes y glándulas masculinas accesorias de cerdos. Además, residuos de ácidos siálicos se han identificado como constituyentes importantes de los acrosomas espermáticos, ya que participan en la maduración y capacitación de los espermatozoides, así como en el proceso de fertilización.<sup>128</sup>

Con base en la evaluación del semen, en las piaras infectadas con el rubulavirus, aproximadamente el 30% de los verracos desarrollan infertilidad temporal o permanente.<sup>117,</sup>  
<sup>118</sup> Las anomalías del semen incluyen una disminución de la concentración espermática, aumento de espermatozoides morfológicamente anormales, disminución de la motilidad y viabilidad espermática, y azoospermia.<sup>117-119, 128</sup>

Los cerdos con infección subclínica son la fuente principal para la transmisión de la EOA, que parece propagarse por vía oronasal. La transmisión del virus a través del semen a la cerda no se ha probado experimentalmente, sin embargo, el Rubulavirus porcino ha sido detectado en el semen de los verracos infectados a partir del segundo día hasta 49 días posinfección, por otra parte, el antígeno de rubulavirus porcino se ha detectado en la cabeza del epidídimo, por lo tanto, se puede deducir que la monta directa o IA son una vía potencial de difusión de la enfermedad del ojo azul.<sup>117-119, 128, 129</sup>

#### **6.2.4. Virus de la enfermedad de Aujeszky**

El herpes suino-1, Suid Herpesvirus 1 (SHV-1), virus de la enfermedad de Aujeszky, es un virus DNA miembro de la familia *Herpesviridae*, del género *Varicellovirus*. El SHV-1 se distribuye en todo el mundo, sin embargo, en los últimos años

los esfuerzos de erradicación han tenido éxito para eliminar el SHV-1 de la población de cerdos domésticos en algunas partes del mundo.<sup>117, 119, 131</sup>

El hospedador natural del SHV-1 es el cerdo, especie en la cual la infección se manifiesta de diferentes maneras, según se trate de individuos adultos o jóvenes. Los principales signos que se observan son respiratorios, nerviosos y reproductivos; mientras que en los adultos y jóvenes causa enfermedad respiratoria, infecciones latentes y abortos, para los lechones resulta letal. Otros mamíferos silvestres y domésticos, también pueden ser infectados por este virus, que generalmente ocasiona la muerte de los individuos afectados.<sup>131, 132</sup>

Los verracos clínicamente infectados pueden desarrollar la enfermedad respiratoria, presentando signos clínicos como fiebre, depresión, anorexia, ataxia, disnea, estornudos y se muestran reacios a moverse, por lo que a menudo son incapaces de montar.<sup>117, 118, 133</sup>

Después de la infección experimental con SHV-1 se ha reportado, la presencia de focos necróticos y degeneración testicular, además de un aumento transitorio de anomalías espermáticas (aumento del número de gotas citoplasmáticas proximales, anomalías de la forma de la cabeza, anomalías de la cola), después de 21 días post infección con recuperación parcial en aproximadamente 50 días posteriores.<sup>119, 131, 133</sup>

El SHV-1 se transmite principalmente por contacto de nariz a nariz, con la replicación viral en la mucosa nasal y faríngea y la transmisión primaria se realiza a través de la vía nasal. La replicación viral se ha observado que también tiene lugar en el tracto genital, y el virus ha sido aislado del semen lo que posibilita la transmisión venérea.<sup>117-120, 131, 132</sup>

Aunque se ha observado que la excreción viral generalmente se produce durante la fase aguda de la enfermedad, la excreción del virus no siempre se asocia estrechamente con signos clínicos o con la reducción de la calidad del semen. Las consecuencias epidemiológicas de estas características hacen muy importante tener en cuenta la posible propagación de la enfermedad a través de la inseminación artificial.<sup>118, 119</sup>

Las cerdas inseminadas con semen contaminado muestran seroconversión y pueden desarrollar vaginitis o endometritis que resulta en la muerte del embrión. Las cerdas infectadas en el primer trimestre de gestación suelen reabsorber sus fetos y retornar al estro. Si las cerdas se infectan en las últimas etapas la gestación pueden abortar o tener un mayor número de muertos y lechones nacidos débiles. Si la infección sucede cerca del parto, hay un mayor número de lechones nacidos débiles con signos de enfermedad del sistema nervioso.<sup>118, 119</sup>

#### **6.2.5. Parvovirus Porcina (PPV)**

El parvovirus porcino (PPV) es un virus DNA sin envoltura que pertenece a la familia *Parvoviridae*, del género *Parvovirus*. El PPV tiene una alta incidencia en las piaras porcinas de todo el mundo.<sup>117, 134, 135</sup>

La respuesta clínica a la infección por PPV es únicamente la falla reproductiva. La sintomatología más comúnmente observada es retorno al inicio del estro, muerte embrionaria y fetal, momificaciones, que en conjunto da como resultado un menor número de lechones por camada y abortos, aunque estos son un hallazgo esporádico.<sup>117-119, 134-136</sup>

La consecuencia de la infección por PPV depende del momento de la infección del feto: la muerte y la reabsorción se observan generalmente en 10-35 días de gestación de los

embriones, muerte y momificación se ven cuando la infección se da entre 35 a 70 días de gestación de los fetos, y una respuesta inmune activa y la supervivencia en el útero se ve en los fetos cuando se infectan después de 70 días de gestación. La infección aguda de las hembras reproductoras con PPV es habitualmente subclínica.<sup>117, 135</sup>

Por lo general, la infección en verracos en crecimiento y maduros con PPV no se asocia a signos clínicos. Biront y Bonte,<sup>136</sup> no encontraron alteraciones de fertilidad o libido en verracos infectados experimentalmente con PPV. Además, el examen histopatológico del tracto genital mostró lesiones degenerativas en los testículos de un verraco 13 días después de la infección experimental. El PPV no indujo modificaciones inflamatorias en los órganos genitales y tampoco fue influenciada de forma esencial la calidad del semen. A la fecha no hay evidencia de que la fertilidad o la libido de los verracos se alteren por la infección con PPV.<sup>117, 135, 136</sup>

Las principales vías de transmisión de PPV son oronasal y transplacentaria. Aunque el verraco puede desempeñar un papel importante en la diseminación de PPV. Durante la infección aguda el virus se disemina por diferentes vías, incluyendo el semen, además, se ha reportado el aislamiento de PPV a partir de semen de verracos infectados de forma natural. La excreción más allá de esta la fase aguda no se ha demostrado, pero se ha sugerido la posibilidad de portadores inmunotolerantes al PPV como resultado de la infección temprana en el útero. El semen también puede contaminarse con PPV de las heces o de los órganos reproductores masculinos.<sup>117, 118, 135</sup>

En el Cuadro 6.4., se presentan algunos de los agentes virales encontrados en el semen de verraco, además del riesgo que representan en la transmisión de la enfermedad a través del semen.

**Cuadro 6.4.** Virus de importancia en semen porcino y el riesgo de transmisión a través de la monta directa y/o inseminación artificial.

Nombre de la enfermedad	Agente Causal (familia y genero)	Aislamiento viral en semen	Riesgo de transmisión a través del semen
Síndrome Respiratorio y Reproductivo Porcino	<i>Arteriviridae</i> <i>Arterivirus</i>	Si	Existe
Enfermedad del Ojo Azul	<i>Paramyxoviridae</i> <i>Rubulavirus</i>	Si	Existe
Circovirus Porcino tipo 2	<i>Circoviridae</i> <i>Circovirus</i>	Si	Muy probable, en estudio
Parvovirus Porcina	<i>Parvoviridae</i> <i>Parvovirus</i>	Si	Existe
Enfermedad de Aujeszky	<i>Herpesviridae</i> <i>Varicellovirus</i>	Si	Existe
Fiebre Porcina Clásica	<i>Flaviviridae</i> <i>Pestivirus</i>	Si	Existe
Peste Porcina Africana	<i>Asfarviridae</i> <i>Asfvirus</i>	Si	Moderada
Encefalitis B japonesa	<i>Flaviviridae</i> <i>Flavivirus</i>	Si	Elevado
Fiebre Aftosa	<i>Picornaviridae</i> <i>Apthovirus</i>	Si	Moderada a Baja
Diarrea Viral Bovina	<i>Flaviviridae</i> <i>Pestivirus</i>	Si	Moderada a Baja
Influenza Porcina	<i>Orthomyxoviridae</i> <i>Influenzavirus</i>	Contaminante	Muy baja
Enterovirus	<i>Picornaviridae</i> <i>Enterovirus</i>	Contaminante	Baja

Recopilado de: <sup>137-139</sup>

### 6.3. ENFERMEDADES BACTERIANAS

Fiebre, orquitis, epididimitis o inflamación del escroto pueden causar degeneración testicular del verraco. Esta condición implica degeneración del epitelio germinal de los túbulos seminíferos. Eventualmente, el tejido testicular se atrofia, resultando en fibrosis testicular. En general los cambios en la calidad seminal después de una infección bacteriana son similares a los que ocurren después de la exposición del verraco a temperaturas ambientales elevadas (Véase en el capítulo 3). El semen puede contener baja cantidad de espermatozoides, motilidad espermática pobre, y un alto porcentaje de anomalías.<sup>118, 140</sup>

Los verracos pueden infectarse con bacterias patógenas específicas, que pueden actuar directamente sobre los testículos. La infección testicular ocurre por vía hematológica o por vía ascendente.<sup>118, 140</sup>

#### 6.3.1. Infecciones ascendentes

Infecciones del tracto urinario que ascienden hacia los testículos. Los principales géneros bacterianos son:

- *Corynebacterium pyogenes*
- *Streptococcus suis*
- *Staphylococcus aureus*
- *Escherichia coli*
- *Chlamydia psittaci* y *C. suis*
- *Mycoplasma suis*, *M. hyosynoviae* y *M. hyorhinis*<sup>118, 140</sup>

### 6.3.2. Infecciones sistémicas

Infecciones sistémicas, donde las bacterias logran el acceso a los testículos y epidídimos por vía hematógena. Las principales enfermedades que afectan a los órganos genitales del verraco son:

- **Brucelosis Porcina por *Bucella Suis***

Se trata de una enfermedad venérea, cuyas manifestaciones clásicas son aborto, infertilidad, orquitis, parálisis posterior, y claudicación. Se han reportado abortos 17 días después de la monta natural por la difusión de *B. suis* en el semen de verracos. En verracos puede ser asintomática o provocar orquitis, epididimitis y disminución de la libido e infertilidad. <sup>118, 140</sup>

- **Leptospirosis**

Causa problemas reproductivos como aborto, lechones nacidos muertos e infertilidad en cerdas. La transmisión venérea se cree que juega un papel importante en la propagación de la infección con la serovariedad *Bratislava*, que puede persistir durante intervalos prolongados en riñones y tracto genital de cerdas y verracos. <sup>118, 140</sup>

- **Tuberculosis**

Las infecciones por *Mycobacterium avium* son más comunes en los cerdos, pero las infecciones por *Mycobacterium tuberculosis* y *Mycobacterium bovis* también pueden ocurrir. *Mycobacterium sp.* puede tener acceso al semen si la infección se localiza en el tracto reproductivo. <sup>118</sup>

- **Erisipela por *Erysipelothrix rhusiopathiae***

Llega a causar inflamación y degeneración testicular, además origina una fiebre elevada que afecta el proceso de espermatogénesis.<sup>140</sup>

- **Salmonelosis por *Salmonella choleraesuis***

La Salmonelosis en su presentación septicémica puede afectar a la pira reproductora, causando fiebre elevada de 40.5-41.6°C que afecta directamente la espermatogénesis en verracos y causa abortos en las cerdas.<sup>141</sup>

- **Pasteurelosis pneumonica por *Pasteurella multocida***

La presentación aguda de la enfermedad es comúnmente asociada a cepas del serotipo B. Los animales muestran disnea, dificultad para respirar con golpes abdominales (contracción repentina del abdomen), postración y fiebre elevada de hasta 42.2 °C, que en verracos afecta el proceso de espermatogénesis.<sup>142</sup>

#### **6.4. CONTAMINACIÓN BACTERIANA DEL SEMEN**

La contaminación bacteriana del semen puede ser el resultado de una infección sistémica o de las vías urinarias del verraco, pero principalmente ocurre durante la colección, procesamiento y almacenamiento del semen. El proceso de colección del semen en el verraco está lejos de ser un procedimiento estéril. En consecuencia, el eyaculado recién colectado del verraco normalmente contiene determinada carga bacteriana, que puede incidir negativamente en la calidad del semen utilizado en la inseminación artificial.<sup>137, 143, 144</sup>

Se han identificado múltiples fuentes de contaminación del semen porcino. Pero se manejan dos fuentes principales de contaminación, clasificados en origen animal o no

animal (Cuadro 6.5). La primera fuente incluye, la contaminación procedente de los testículos, glándulas anexas, prepucio y su divertículo prepucial, sistema urinario, heces fecales, secreciones respiratorias, piel y pelo, entre otras. La segunda fuente proviene de agua contaminada, agua no esterilizada, cristalería contaminada, zona de colección de semen, mala higiene del personal, depósito del diluyente, el laboratorio y el sistema de tratamiento de aire.<sup>137, 143-145</sup>

**Cuadro 6.5.** Fuentes de contaminación bacteriana de semen de porcino diluido.

Origen animal	Origen no animal
Fecal	Agua del grifo
Fluidos del divertículo prepucial	Agua purificada (líneas de agua o tanques de retención)
Piel/pelo	Materia vegetal (alimento, cama)
Secreciones respiratorias	Lavabos o drenajes
Humanos (piel, pelo, secreciones respiratorias)	Aire/sistema de ventilación

Tomado de:<sup>145</sup>

Las bacterias son organismos extraordinariamente resistentes con una capacidad de supervivencia para adaptarse a una amplia variación de condiciones. Como los diluyentes de semen fueron diseñados específicamente para nutrir y prolongar la viabilidad *in vitro* de los espermatozoides, estos mismos atributos proveen un medio potencial en el que las bacterias contaminantes pueden prosperar.<sup>143, 146, 147</sup>

La mayoría de los contaminantes son bacterias Gram-negativas, con un gran porcentaje procedente de la familia Enterobacteriaceae. La mayoría de estos géneros bacterianos no se consideran patógenos primarios en el ganado porcino.<sup>143, 144</sup>

A continuación se enlistan los principales géneros bacterianos encontrados comúnmente en el semen porcino.

- |                              |   |
|------------------------------|---|
| ▪ <i>Escherichia coli</i>    | ▪ <i>Serratia spp.</i>                                  |
| ▪ <i>Pseudomonas spp.</i>    | ▪ <i>Stenotrophomonas</i>                               |
| ▪ <i>Klebsiella spp.</i>     | ▪ <i>maltophilia</i>                                    |
| ▪ <i>Staphylococcus spp.</i> | ▪ <i>Alcaligenes xylosoxidans</i>                       |
| ▪ <i>Proteus spp.</i>        | ▪ <i>Enterococcus spp.</i>                              |
| ▪ <i>Citrobacter spp.</i>    | ▪ <i>Bacteroides spp.</i>                               |
| ▪ <i>Streptococcus spp.</i>  | ▪ <i>Actinomyces spp</i>                                |
| ▪ <i>Corynebacterium spp</i> | ▪ <i>Aeromonas spp.</i>                                 |
| ▪ <i>Bacillus spp.</i>       | ▪ <i>Burkholderia cepacia</i>                           |
| ▪ <i>Enterobacter spp.</i>   | ▪ <i>Neisseria spp.</i>                                 |
| ▪ <i>Micrococcus spp.</i>    | ▪ <i>Providencia spp.</i> <sup>137-139, 143, 144,</sup> |
| ▪ <i>Acinetobacter spp.</i>  | 146, 148 149  |

Los efectos negativos de la bacteriospermia parecen ser dependientes de la concentración, que afecta la calidad y la longevidad del semen. Debido a la naturaleza dependiente de la concentración de esta interacción, el tiempo y el medio ambiente también son componentes críticos en la influencia negativa que las bacterias pueden tener en los espermatozoides. Si no se controlan, el resultado final de esta contaminación disminuye el desempeño reproductivo de la pira, ya que las bacterias parecen ejercer su efecto espermicida directamente sobre la célula espermática.<sup>143, 144</sup>

Las bacterias pueden modificar las características del plasma seminal, como el pH, los productos metabólicos, o los radicales libres ya que las bacterias proliferan y liberan diversos metabolitos. Por lo que la bacteriospermia se ha asociado con:

- Alta incidencia de aglutinación espermatozoide-espermatozoide.
- Acrosomas dañados.
- Disminución de la motilidad de los espermatozoides.
- Muerte espermática.
- Disminución de la longevidad de los espermatozoides.<sup>144-147, 149</sup>

Varios estudios han puesto de manifiesto que *Escherichia coli* es la bacteria más frecuentemente aislada en los estudios bacteriológicos del semen de verraco. Se ha sugerido que la unión de *E. coli* a células espermáticas no sólo puede causar reducción de la motilidad, sino también la aglutinación de los espermatozoides. Los factores de virulencia de algunas *E. coli* les permite colonizar el tracto genital y adherirse a las células espermáticas, causando la infertilidad masculina asintomática.<sup>144, 146</sup>

Un estudio reveló que la presencia de *E.coli* por encima de un valor umbral de  $3.5 \times 10^3$  UFC/ml, redujo el tamaño de 378 camadas, de cerdas inseminadas con el semen de 42 verracos.<sup>144, 146</sup>

De esta forma a pesar de que los verracos aparentemente pueden desempeñarse bien y dar un número aceptable de progenie, la contaminación bacteriana del semen, llega a resultar en un rendimiento subóptimo.<sup>144</sup>

Debido a la inevitable presencia de bacterias en el eyaculado, los antibióticos se han considerado como un componente esencial en la composición de los diluyentes. Los

antimicrobianos más utilizados en la actualidad en los diluyentes de semen porcino son los aminoglucósidos,  $\beta$ -lactámicos y lincosamidas.<sup>143</sup>

El semen de verraco constituye un medio favorable para la proliferación de amplia gama de especies bacterianas, por lo que es necesario conservar las medidas higiénicas que garanticen la obtención de este con menor contaminación bacteriana posible.<sup>146, 147, 149</sup>

Para reducir al mínimo la carga bacteriana procedente del verraco, se recomienda:

- Lavar y secar la parte ventral del abdomen antes de la colección del semen.
- Corte periódico del pelo largo del prepucio.
- Limpieza de la apertura del prepucio y el área circundante con toallas húmedas de un solo uso.
- El pene debe permanecer perpendicular al verraco durante el proceso de colección del semen para minimizar la contaminación del recipiente de colección de semen con los fluidos del prepucio. Desviar las fracciones pre-espermática y gel al momento de la colección de semen.<sup>143</sup>

Además, se recomienda la capacitación del personal, implantación de protocolos sanitarios en el laboratorio, vivienda del verraco y área de colección de semen y el monitoreo regular de la contaminación bacteriana, que pueden contribuir en gran medida a la minimización de la contaminación.<sup>143</sup>

## **CAPÍTULO VII.**

### **TERAPIA HORMONAL**

#### **7.1. INTRODUCCIÓN**

A pesar de que los tratamientos hormonales son más comúnmente utilizados para controlar la fertilidad y los eventos reproductivos en las hembras, las hormonas exógenas son cada vez más utilizadas para modular el comportamiento, la productividad y la fertilidad de los verracos. Este capítulo aborda brevemente aquellas hormonas de uso en verracos para dichos fines, como son la hormona liberadora de gonadotropinas, testosterona, gonadotropina corionica humana y prostaglandina F2 $\alpha$ .

#### **7.2. HORMONA LIBERADORA DE GONADOTROPINAS (GnRH)**

La hormona liberadora de gonadotropinas (GnRH) es la hormona hipotalámica que controla la actividad de las células gonadotropicas de la hipófisis y, como consecuencia, es un componente crítico de la cascada endocrina que determina el crecimiento, desarrollo, y la actividad funcional del tejido testicular, promoviendo así la espermatogénesis.<sup>150, 151</sup>

Los agonistas de la GnRH pueden tener efectos pro-gonadales o anti-gonadales. La naturaleza de la respuesta es determinada en gran parte por el patrón de administración. La administración pulsátil de GnRH exógena imita el patrón de secreción de GnRH endógena dando soporte a la función y mantiene la secreción de gonadotropinas, además, apoya y

sostiene el desarrollo y función testicular. Por el contrario, la administración continúa de agonistas de GnRH, pueden tener un efecto estimulador de breve duración, que eventualmente provoca la disminución de la secreción de gonadotropinas, la función testicular y suprime su actividad secretora.<sup>150</sup>

En un estudio, con el fin de determinar el estímulo de la actividad de la hipófisis anterior y de las células de Leydig, verracos púberes fueron inyectados con un análogo de la GnRH (acetato de buserelina) y se midió la respuesta endocrina de la LH y testosterona, no encontrándose diferencias en la respuesta endocrina al desafío con la GnRH.<sup>152</sup>

En humanos se ha determinado que la administración episódica de GnRH aumenta el volumen testicular, la secreción de testosterona e inicia la espermatogénesis en sujetos estériles debido a una inadecuada producción de GnRH endógena. Un enfoque terapéutico similar podría aplicarse en el tratamiento de animales infértiles o subfértiles, de hecho, en un estudio se aplicó un tratamiento pulsátil de GnRH exógena a garañones subfértiles o normales durante cinco meses, que dio lugar a un modesto aumento en los niveles séricos de LH y testosterona, pero no afectó el tamaño testicular, la producción espermática o la motilidad espermática.<sup>150</sup>

Por su parte, la administración continua de agonistas de GnRH se ha propuesto como un medio de supresión del desarrollo testicular y reducción de la producción de compuestos androgénicos y, por lo tanto, disminuye la incidencia y gravedad del olor sexual en machos en crecimiento destinados al sacrificio.<sup>150, 1153</sup>

A diferencia de lo anterior, la técnica de inmunocastración se basa en la inmunización activa con el fin de producir anticuerpos contra la GnRH. La vacuna contra la

GnRH estimula la producción de anticuerpos para inactivar la GnRH endógena, y por lo tanto reduce la liberación de las hormonas gonadotropicas que conducen a la atrofia gonadal temporal, y como resultado, la regresión de los órganos reproductivos, disminución de la síntesis de esteroides y la “castración inmunológica”.<sup>150, 151</sup>

Ya que los verracos adultos una vez que finalizan su vida productiva en la granja o posta, deben ser castrados quirúrgicamente antes de su sacrificio. Recientemente se ha propuesto la inmunocastración de dichos animales como una técnica de menor riesgo, con altas posibilidades de ser utilizada en un futuro en el manejo de verracos de desecho.<sup>151</sup>

En un estudio, se usaron verracos adultos, a los que se les inmunizó con la vacuna Improvac (Pfizer) en tres aplicaciones a dosis de 2 ml/verraco vía SC. Los resultados de este estudio indican que la inmunización activa de los verracos sexualmente maduros en contra de la GnRH tiene un impacto negativo en la concentración de testosterona, la conducta sexual, el volumen de la eyaculación y el número total de espermatozoides normales en el eyaculado.<sup>151</sup>

### **7.3. GONADOTROPINA CORIONICA HUMANA (hGC)**

La gonadotropina coriónica humana (hGC) es un análogo homólogo de la hormona luteinizante (LH), que se une y activa al mismo receptor de la LH, y ejercer efectos similares en la maduración de las células de Leydig y en la esteroidogénesis.<sup>154</sup>

Se ha comprobado claramente que, la administración exógena de hCG estimula la esteroidogénesis, causando un pico en los niveles plasmáticos de testosterona,<sup>19, 154, 155</sup> si bien falta investigación sobre los efectos de la aplicación exógena de la gonadotropina

coriónica humana (hCG) sobre la conducta sexual y en la espermatogenesis en los verracos.<sup>19</sup>

#### **7.4. TESTOSTERONA**

La testosterona, el principal andrógeno producido por los machos, es necesario para la producción de espermatozoides normales, el mantenimiento de las glándulas sexuales accesorias y está involucrado con la libido. Por lo que la aplicación de andrógenos exógenos a los verracos representa una posibilidad de optimizar la producción de semen y mejorar el comportamiento sexual de los verracos.<sup>19, 156</sup>

En el caso de la libido, a pesar de que las concentraciones circulantes de testosterona se correlacionan positivamente con la libido, también se ha informado de una correlación mas fuerte entre la libido y las concentraciones plasmáticas de estrógeno, asociado a que bajas concentraciones circulantes de estradiol incrementan el tiempo requerido para iniciar la eyaculación y disminuyen la duración de la eyaculación, por lo que se sugiere que la testosterona promueve algunos aspectos del comportamiento sexual en verracos a través de la aromatización de los estrógenos.<sup>157, 158</sup>

Un estudio evaluó la influencia de propionato de testosterona y cipionato de estradiol, sobre las características de la conducta sexual de verracos adultos castrados. Mostrando que la administración exógena tanto de andrógenos y estrógenos pueden reinstaurar la libido después de la castración de los cerdos.<sup>157</sup>

Mientras que en el caso de la influencia de la testosterona sobre la calidad del semen, se realizó un estudio con el fin de combatir la disminución de la calidad del semen y el comportamiento reproductivo en los verracos mediante la inyección de testosterona

durante los meses calurosos de verano. Verracos sexualmente maduros, previamente entrenados para la colección de semen, fueron divididos en tres grupos, el grupo control no recibió tratamiento y dos grupos experimentales, que recibieron 250 ó 500 mg/verraco de enantato de testosterona una vez al mes, de junio a septiembre.<sup>159</sup>

Los cambios más notables en la calidad del semen durante y después de los meses de verano se obtuvieron en la incidencia de espermatozoides anormales. En el grupo control, el porcentaje de espermatozoides anormales, es decir aquellos con gota citoplasmática proximal, cabezas anormales y colas en espiral y dobladas aumentó a  $34.3 \pm 3.6\%$  en septiembre. En contraste, los porcentajes de espermatozoides anormales en los grupos inyectados con testosterona se mantuvo sin cambios en 9.7% (250 mg) y 12.9% (500 mg) durante este período. Sin embargo, se observó una disminución de los espermatozoides totales por eyaculado durante y después del tratamiento con una dosis alta de testosterona (500 mg).<sup>159</sup>

### **7.5. PROSTAGLANDINA F2 $\alpha$ (PGF2 $\alpha$ )**

Las prostaglandinas se utilizan en el campo en un intento de mejorar el comportamiento sexual en verracos. Se ha sugerido que la administración de PGF2 $\alpha$  aumenta la libido en los verracos, el deseo de monta y el comportamiento de apareamiento, lo que ha despertado un gran interés en el ámbito científico. En general, los estudios de investigación se centran en los efectos de la PGF2 $\alpha$  sobre el comportamiento sexual en los verracos y en las características del semen.<sup>160-162</sup>

El mecanismo mediante el cual la PGF2 $\alpha$  afecta el comportamiento sexual en los verracos no ha sido aclarado, varios autores han propuesto que la PGF2 $\alpha$  podría estimular la liberación de esteroides en los testículos. Sin embargo, los resultados experimentales no

son consistentes. De hecho, se ha reportado que la administración de 20 mg de PGF2 $\alpha$  en verracos causó una elevación en las concentraciones circulantes de prolactina y cortisol, pero no alteró la secreción de LH o testosterona.<sup>19, 156, 158, 160-163</sup>

Bajo esta premisa otro estudio se dio a la tarea de determinar los efectos de la PGF2 $\alpha$  en el comportamiento sexual de verracos con una supresión de la testosterona y estradiol, mediante la aplicación de implantes SC de antagonistas de la GnRH (GnRHa), o implantes simulados. A partir de la semana 1, los verracos con implantes falsos recibieron 10 mg de solución salina, mientras los verracos con el implante de GnRHa recibieron un tratamiento IM de 10 mg de PGF2 $\alpha$  o solución salina al entrar en la sala de colección de semen, para evaluar el desempeño reproductivo de los verracos. Los resultados obtenidos se resumen en la Cuadro 7.1.<sup>156</sup>

**Cuadro 7.1.** Concentraciones hormonales y características del comportamiento sexual en verracos con implante falso y solución salina, verracos con implante de GnRHa y solución salina y verracos con implante de GnRHa tratados con PGF2 $\alpha$ .

Variable	Falso + S. Salina	GnRHa + S. Salina	GnRHa + PGF2 $\alpha$
Testosterona (ng/ml)	2.12 $\pm$ 0.72	-0.18 $\pm$ 0.74	1.60 $\pm$ 0.74
Estradiol (pg/ml)	309.2 $\pm$ 86.4	22.0 $\pm$ 89.3	272.8 $\pm$ 87.3
Tiempo de reacción (s)	398.0 $\pm$ 128.5	499.4 $\pm$ 129.5	292.1 $\pm$ 129.1
Inyección a eyaculación (s)	454.9 $\pm$ 116.4	519.6 $\pm$ 116.4	395.3 $\pm$ 116.4
Duración de la eyaculación (s)	276.3 $\pm$ 78.5	265.9 $\pm$ 83.4	498.0 $\pm$ 85.4
Montas falsas	1.6 $\pm$ 0.7	4.2 $\pm$ 0.6	-0.4 $\pm$ 0.7

Tomado de:<sup>156</sup>

En comparación con los verracos con implantes falsos y los verracos con implante de GnRHa que recibieron la PGF2 $\alpha$ , las concentraciones séricas de testosterona y estradiol

fueron menores en los verracos implantados con GnRHa que recibieron solución salina. A pesar de la supresión de las concentraciones de testosterona y estradiol, los verracos implantados con GnRHa siguieron montando el potro de colección y los indicadores de comportamiento sexual en la quinta semana fueron similares a los controles. Por su parte, el número de monta falsas se incrementó en los verracos con implantes de GnRHa, mientras que en los verracos con implante y que recibieron  $\text{PGF2}\alpha$ , el número de montas falsas se redujeron.<sup>156</sup>

Estos resultados sugieren que la supresión aguda de las concentraciones de testosterona y estradiol no resulta en un cese de la conducta sexual en verracos, pero puede conducir a un aumento en el número de montas falsas, por otra parte, el número de montas falsas pueden ser disminuidas mediante el tratamiento con  $\text{PGF2}\alpha$ .<sup>156</sup>

Un estudio mas reciente puso a prueba la hipótesis de que las  $\text{PGF2}\alpha$  exógenas restauran temporalmente el comportamiento sexual de los verracos castrados, y evaluó los efectos de  $\text{PGF2}\alpha$  sobre las concentraciones séricas de testosterona, estradiol, LH, prolactina y cortisol. A los 35 días después de la castración, nueve verracos adultos fueron asignados a tres tratamientos con tres dosis diferentes de  $\text{PGF2}\alpha$  (0, 10, y 20 mg) y tres periodos de tratamiento, con cinco días entre cada período.<sup>158</sup>

La castración suprimió la testosterona sérica a concentraciones no detectables, pero no suprimió completamente la concentración de estradiol circulante (276.6 a 4.8 pg/ml), observándose la pérdida total del deseo de monta en todos los verracos 26 días después de la castración.<sup>158</sup>

El tratamiento con  $\text{PGF}_2\alpha$  de los verracos castrados no modificó significativamente las concentraciones séricas de testosterona, estradiol, LH, prolactina y cortisol, pero restauró el comportamiento sexual. Los investigadores dedujeron que los efectos de  $\text{PGF}_2\alpha$  sobre el comportamiento sexual son independientes de los cambios en la liberación de hormonas endógenas, y por lo tanto puede ser debido a una acción directa de la  $\text{PGF}_2\alpha$  en áreas específicas del cerebro a nivel del hipotálamo, área preóptica, o hipocampo y alternativamente, una acción indirecta por la estimulación de los nervios aferentes en los órganos de músculo liso o en los núcleos paraventricular y supraóptico, lo que podría facilitar la liberación de otras hormonas, por ejemplo, la oxitocina. En ese sentido, la oxitocina ejerce efectos en las áreas de comportamiento sexual del cerebro, dando lugar a la erección del pene y la eyaculación.<sup>158</sup>

Aunque algunos productos de prostaglandinas administrados exógenamente mejoran el comportamiento sexual, no se sabe si la liberación endógena de prostaglandina es necesaria para la exhibición normal de la libido en verracos. Se puso a prueba esta hipótesis, mediante la evaluación de la conducta sexual de verracos después de bloquear farmacológicamente la producción de prostaglandinas.<sup>164</sup>

Verracos previamente entrenados para la colección de semen fueron tratados con meglumina de flunixin o indometina, en ambos casos los verracos presentaron una disminución de los niveles de 15-ketodihydro-prostaglandina-F2 (PGFM) en el suero, el comportamiento de monta y la eyaculación no fueron abolidos pero se observó un aumento del número de montas falsas, y el intervalo entre la entrada al corral de colección y el comienzo de la eyaculación. Estos resultados sugieren que la síntesis y liberación de

prostaglandinas son necesarias para la exhibición completa del comportamiento sexual normal en verracos.<sup>164</sup>

La administración exógena de  $\text{PGF}_2\alpha$  se ha utilizado con éxito en los esfuerzos para mejorar la conducta sexual de los verracos. Por ejemplo, Szurop *et al.*<sup>165</sup> informaron que el tratamiento con una  $\text{PGF}_2\alpha$  sintética (20 mg de Enzaprost-F) estimuló el comportamiento exitoso de monta y colección de semen en verracos jóvenes sin experiencia sexual y en verracos mayores previamente entrenados que exhibieron una pérdida de la libido.

Otro estudio determinó los efectos de la  $\text{PGF}_2\alpha$  en el entrenamiento de verracos sexualmente activos (con experiencia en monta natural) para montar un potro de colección y lograr la colección del semen. Los verracos recibieron 10 mg de  $\text{PGF}_2\alpha$  o 2 ml de agua desionizada inmediatamente después de entrar en corral de colección (dos veces por semana durante cuatro semanas). La sesión de entrenamiento para cada verraco fue de un máximo de 15 minutos. Después de que un verraco era colectado con éxito, el tratamiento era suspendido en el momento de entrada a la siguiente sesión de entrenamiento. Sin embargo, si el verraco fracasaba en la monta del potro y en la eyaculación, se le permitía 15 minutos adicionales de exposición al potro.<sup>160</sup>

Seis de los siete (86%) verracos tratados con  $\text{PGF}_2\alpha$  montaron y permitieron la colección del semen durante su primera exposición al potro de colección. El semen fue colectado de dos de los siete (29%) verracos tratados con solución salina durante la primera sesión de entrenamiento. Después de cuatro sesiones de entrenamiento, el 100% de los verracos tratados con  $\text{PGF}_2\alpha$  fueron entrenados exitosamente, en comparación con cuatro de los siete (57%) verracos tratados con agua desionizada. El número de montas falsas por

sesión fue menor para los verracos tratados con PGF2 $\alpha$  (0.6+1.0), en comparación con verracos que recibieron agua desionizada (3.9+1.0) o de verracos entrenados sin ningún tratamiento (3.4+0.7). El tiempo de reacción (tiempo transcurrido después de entrar al corral de colección al comienzo de la eyaculación) fue menor para los verracos tratados con PGF2 $\alpha$  (267.4+63.4 s), en comparación con verracos tratados con agua desionizada (628.4+98.3) o de verracos que no recibieron tratamiento (440.4+46.4 s).<sup>160</sup>

Por su parte, Kozink *et al.*<sup>161</sup> examinaron los efectos de Lutalyse (PGF2 $\alpha$ ; trometamina de dinoprost) en verracos jóvenes de línea terminal sin experiencia en monta natural. Los verracos fueron sometidos a dos sesiones de entrenamiento de 10 minutos por semana, durante seis semanas (un total de 12 sesiones de entrenamiento). Al entrar en la sala de colección del semen, se aplicó a los verracos 4 ml de agua desionizada o Lutalyse a dosis de 5, 10 o 20 mg y posteriormente recibieron una puntuación de la libido del 1-5 (1= no tiene interés en el potro, 5= monta el potro y permite la colección del semen).

El porcentaje de verracos sin experiencia sexual entrenados exitosamente para la colección de semen fue de 20% para los controles, 30% de verracos tratados con 5 mg de PGF2 $\alpha$ , 20% de verracos tratados con 10 mg de PGF2  $\alpha$ , y 10% de verracos tratados con 20 mg de PGF2 $\alpha$ . Los verracos tratados con 10 mg de Lutalyse tuvieron significativamente mayores puntuaciones de la libido que los controles, mientras que la dosis de 20 mg del medicamento disminuyó las puntuaciones de la libido por debajo de los controles. Las características de los eyaculados de los verracos controles y los tratados con Lutalyse a dosis de 5, 10, o 20 mg fueron similares.<sup>161</sup>

En otro estudio, se comparó dos productos de prostaglandinas disponibles en el mercado con respecto a agilizar el entrenamiento de los verracos para la colección de

semen. Se aplicó a verracos jóvenes sin experiencia sexual 10 mg de Dinoprost trometamina (Lutalyse) una PGF $2\alpha$  de origen natural, o 250  $\mu$ g de Cloprostenol sódico (Estrumate), un análogo sintético de PGF $2\alpha$ .<sup>164</sup>

Los resultados obtenidos evidenciaron que Dinoprost, pero no cloprostenol aceleró el entrenamiento exitoso de los verracos para la colección del semen. Por lo que los autores dedujeron que las diferencias en la acción de los fármacos sobre el comportamiento sexual en los verracos puede depender de diferencias en la actividad farmacológica o biológica y/o afinidad por los receptores.<sup>164</sup>

No todos los estudios han encontrado efectos benéficos del tratamiento con PGF $2\alpha$ , en un estudio se identificaron 10 verracos de 7 meses de edad, que no podían montar una cerda en estro. Una semana después de que los verracos fallaron en la prueba de libido de 15 minutos, los verracos fueron tratados con solución salina (4 verracos), 10 mg de PGF $2\alpha$  (4 verracos) o 25 mg de PGF $2\alpha$  (2 verracos). Los verracos que recibieron solución salina o 10 mg de PGF $2\alpha$  fueron tratados un minuto antes de la exposición de 15 minutos a una cerda. Los verracos tratados con 25 mg de PGF $2\alpha$  fueron expuestos a las cerdas 30 minutos después de la aplicación del tratamiento. El tratamiento de los verracos jóvenes con PGF $2\alpha$  (Lutalyse) no indujo la monta de una cerda en estro.<sup>166</sup> Tal vez los verracos deben mostrar cierta voluntad de monta de una cerda o un potro antes de que la PGF $2\alpha$  pueda estimular o acelerar el proceso de monta y eyaculación.<sup>160</sup>

En el caso del efecto del tratamiento con PGF $2\alpha$  sobre las características del semen, los resultados de las investigaciones son contradictorios, por ejemplo se investigo el efecto del tratamiento de verracos con PGF $2\alpha$  sobre las características del semen. Se utilizaron cinco verracos alojados individualmente y cinco verracos alojados en grupo. Los verracos

fueron tratados con 15 mg de PGF2 $\alpha$  40 a 60 minutos antes de la colección del semen. El tratamiento de los verracos alojados individualmente con PGF2 $\alpha$  no influyó significativamente en las características del semen. Sin embargo, el volumen de eyaculado y motilidad de los espermatozoides presentaron un incremento cuando los verracos alojados en grupo fueron tratados con PGF2 $\alpha$ .<sup>166</sup>

Por su parte, Estienne y Harper<sup>162</sup>, determinaron los efectos la aplicación de 10 mg de PGF2 $\alpha$  (Lutalyse) sobre las características del semen y la libido durante 16 semanas en verracos de línea terminal. El semen fue colectado una vez por semana durante la semana 1 a la 15 y en cuatro días consecutivos durante la semana 16. En general, no se reportaron efectos excepcionales positivos o negativos de largo plazo del tratamiento con PGF2 $\alpha$  sobre las características del semen y la libido en los verracos.

En contraste, otro estudio reporta que para los verracos colectados a intervalos de 3 días durante 28 días, la concentración de espermatozoides y el número total de espermatozoides se incrementaron en un 23% y 34%, respectivamente, debido al tratamiento con 12 mg de PGF2 $\alpha$ .<sup>160, 162</sup>

En algunos estudios, también se han reportado efectos no deseados inducidos por el tratamiento con PGF2 $\alpha$ , por ejemplo se ha reportado vómito,<sup>161, 164</sup> rascado intenso, necesidad frecuente de orinar y defecar, extensión de un pene flácido y masturbación,<sup>166</sup> además, algunos machos parecen mostrar una mayor agresividad hacia el potro de colección.<sup>19</sup>

## 7.6. PRODUCTOS HORMONALES

Existe una gran variedad de productos hormonales comerciales disponibles para modular el comportamiento, la productividad y la fertilidad de los verracos. El Cuadro 7.2 muestra algunos de los productos de uso en porcinos.

**Cuadro 7.2.** Productos hormonales comerciales de uso en cerdos, disponibles en el mercado.

Principio Activo	Medicamento	Compañía farmacéutica
<b>Hormona liberadora de gonadotropinas (GnRH)</b>		
Peforelina	Maprelin®	Bayer
Acetato de gonadrelina	Gonavet Veyx	Bayer
<b>Gonadotropinas</b>		
Hormona gonadotrópica	Gonadotropina corionica	Brovel
Hormona gonadotrópica	Gonadotropina corionica	Instituto de agrobioquimicos
Hormona gonadotrópica	Gonaforte®	Parfarm
Gonadotropina corionica	Gonaforte® 2,500 U.I.	Parfarm
HGC	Chorulon®	Intervet
HGC y EGC	PG600	Intervet
HGC y EGC	Gonaforte® Porcino SC800	Parfarm
HGC y EGC	Sincrovet®	Lapisa
<b>Testosterona</b>		
Enantato de testosterona	Testosterona 200	Brovel
Acetato de testosterona + Valerato de testosterona + Undeconato de testosterona	Deposterona®	Fort dodge®
<b>Prostaglandina F2<math>\alpha</math></b>		
Cloprostenol	Porciprost®	Lapisa
Cloprostenol	Prostagen-C	Fort Dodge®
Cloprostenol sódico	Celosil®	Schering-Plough
Cloprostenol dextrógiro	Dalmaprost-D	Schütze-Segen
Cloprostenol dextrógiro	Prostagenol-D	Internacional Prode
D-cloprostenol	D-cloprostenol Sanfer®	Sanfer
D-cloprostenol	Alfa Sincro®	Aranda
D-cloprostenol	Prosolvín® C	Intervet
D-cloprostenol	Luteosyl®	Syva
Dinoprost trometamina	Lutalyse	Pfizer
Lupostriol	Prosolvín®	Intervet

Información recopilada de: <sup>167, 168</sup>

## CONCLUSIONES

A partir del uso generalizado de la inseminación artificial como la principal tecnología reproductiva en la porcicultura, disminuyó el número de verracos requeridos y aumentaron las demandas para los verracos en producción. Actualmente la presentación de problemas en el comportamiento, el manejo reproductivo y la salud de los animales tiene un mayor efecto en la producción de las granjas.

Sin embargo, a pesar de la gran relevancia del verraco en la respuesta reproductiva, la información relacionada con los aspectos reproductivos del verraco, es en general escasa, siendo además, en algunas ocasiones no concluyente o contradictoria. Aunque actualmente se sigue generando constantemente nueva información sobre los verracos.

Para poder tomar decisiones adecuadas sobre el manejo de este tipo de animal es necesario conocer con detalle los principales factores que inciden sobre él. Con base en la revisión de literatura realizada se determina que los principales problemas del macho son: la presentación de la pubertad y todos aquellos factores que inciden en la espermatogénesis, una inadecuada selección, la exposición a temperaturas elevadas y el diseño inadecuado de las instalaciones, una sobre o sub-alimentación, la presencia de micotoxinas en el alimento y el efecto de agentes patógenos como PRRS y Circovirus principalmente.

**LITERATURA CITADA**

1. TILMANN C, CAPEL B. Cellular and molecular pathways regulating mammalian sex determination. *Recent Prog Horm Res* 2002; 57: 1-8.
2. FRANÇA LR, AVELAR FG, ALMEIDA FLF. Spermatogenesis and sperm transit through the epididymis in mammals with emphasis on pigs. *Theriogenology* 2005; 63: 300-318.
3. HECKERT L, GRISWOLD M. The expression of the follicle-stimulating hormone receptor in spermatogenesis. *Recent Prog Horm Res* 2002; 57: 129-148.
4. FRANÇA LR, BECKER-SILVA SC, CHIARINI-GARCÍA H. The length of the cycle of seminiferous epithelium in goats. *Tissue and Cell* 1999; 31: 274-280.
5. MESQUITA HM, FRITSCH M. Gametogénesis. En: GALINA C, VALENCIA J, editores. *Reproducción de animales domésticos*. 3a ed. México: Limusa, 2008: 43-57.
6. RUSSEL LD, FRANÇA LR. Building a testis. *Tissue Cell* 1995; 27: 129-147.
7. GARCIA-GIL N, PINART E, SANCHO S, BADIA E, BASSOL J, KÁDÁR E, *et al.* The cycle of the seminiferous epithelium in Landrace boars. *Anim Reprod Sci* 73; 2002: 211-225.
8. MURTA VFD, COSTA SD, SANTOS DM, FARIA JCF. Somatic and germ cell proliferation during post-natal development of the testis in the wild boar. *Anim Reprod Sci* 2010; 19: 154-159.

9. OHNUMA K, KANEKO H, NOGUCHI J, KIKUCHI K, OZAWA M, HASEGAWA Y. Production of inhibin A and inhibin B in boars: Changes in testicular and circulating levels of dimeric inhibins and characterization of inhibin forms during testis growth. *Domest Anim Endocrin* 2007; 33: 410-421.
10. KUMARESAN A, BUJARBARUAH KM, KADIRVEL G, KHARGHARIA G, SARMA RG, GOSWAMI J, *et al.* Early sexual maturity in local boars of Northeastern India: Age-related changes in testicular growth, epididymal sperm characteristics and peripheral testosterone levels. *Theriogenology* 2011; 75: 687-695.
11. DACHEUX J-L, CASTELLA S, GATTI JL, DACHEUX F. Epididymal cell secretory activities and the role of proteins in boar sperm maturation. *Theriogenology* 2005; 63: 319-341.
12. JONES RC. Evolution of the epididymis. In: ROBAIRE B, HINTON BT, editors. *The Epididymis Molecules to Clinical Practice. A comprehensive Survey of the Efferent Ducts, the Epididymis and the Vas Deferens.* New York, London: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2002: 11-13.
13. FOXCROFT G, DYCK M, RUIZ-SANCHEZ A, NOVAK S, DIXON W. Identifying useable semen. *Theriogenology* 2008; 70: 1324-1336.
14. KIRKWOOD R, VADNAIS M, ABAD M. Practical application of seminal plasma. *Theriogenology* 2008; 70: 1364-1367.
15. MANÁSKOVÁ P, JONÁKOVÁ V. Localization of porcine seminal plasma proteins in the boar reproductive tract and spermatozoa. *J of Reprod Immunology* 2008; 78: 40-48.
16. RODRÍGUEZ-MARTÍNEZ H, SARAVIA F, WALLGREN M, TIENHAI P, JOHANNINSSON A, VÁZQUEZ MJ, *et al.* Boar spermatozoa in the oviduct. *Theriogenology* 2005; 63: 514-535.

17. MARTÍNEZ GRG. Reproducción del verraco. En: AGUDELO SI, MARTÍNEZ GRG, editores. Mejoramiento Animal Reproducción, Cerdos. DF: SUA-UNAM, 2011: 167-176.
18. ZARCO L. Endocrinología de la reproducción. En: GALINA C, VALENCIA J editores. Reproducción de animales domésticos. 3a ed. México: Limusa, 2008: 59-83.
19. KUSTER CE, ALTHOUSE GC. Reproductive physiology and endocrinology of boars. In: YOUNGQUIST RS, THERLFALL WR, editors. Current therapy in large animal theriogenology. 2nd ed. USA: Elsevier inc, 2007: 717-721.
20. MARTIN TE, BAKER B Jr., MILLER HW, KELLOGG TF. Circulating androgen levels in the developing boar. Theriogenology 21; 1984: 357-365
21. PARK CS, LEE KS. Changes in serum LH, FSH, prolactine, testosterone, GOT, and GTP concentrations in the growing male pig. Res Rep Agric Sci Technol 11; 1984: 103-107.
22. KATTESH HG, KNIGHT JW, GWAZDAUSKAS FC, KORNEGAY ET. Daily alterations in plasma testosterone in boars at different ages. Theriogenology 18; 1982: 113-118.
23. PEARL C, BERGER T, ROSER J. Estrogen and androgen receptor expression in relation to steroid concentrations in the adult boar epididymis. Domest Anim Endocrin 2007; 33: 451-459.
24. OLIVA HJ, PEREZ GJF. Localization of the epidermal growth factor (EGF) in the epididymis and accessory genital glands of the boar and functional effects on spermatozoa. Theriogenology 70; 2008: 1159-1169.

25. YAN CC, WONG WPE, YAN HNH, MRUK DD. Regulation of spermatogenesis in the microenvironment of the seminiferous epithelium: New insights and advances 1. *Mol Cell Endocrinol* 315; 2010: 49-56.
26. WILLIAMS S. Manejo de verracos para centros de inseminación artificial. 2010. Disponible en:  
[http://www.porcicultura.com/porcicultura/home/impresion.asp?cve\\_art=620](http://www.porcicultura.com/porcicultura/home/impresion.asp?cve_art=620)
27. MARTÍNEZ GRG. Principales factores que afectan la reproducción en el cerdo. *Ciencia Veterinaria*. 8; 1998: 187-221.
28. SARA VIA F, WALGREN M, JOHANISSON A, CALVETE J, SANZ L, PEÑA F, *et al*. Exposure to the seminal plasma of different portions of the boar ejaculate modulates the survival of spermatozoa cryopreserved in MiniFlatPacks. *Theriogenology* 2009; 71: 662-675.
29. LANGENDIJK P, SOEDE N, KEMP B. Uterine activity, sperm transport, and the role of boar stimuli around insemination in sows. *Theriogenology* 2005; 63: 500-513.
30. RODRÍGUEZ MH. Oviduct function in cows and pigs: with special references to sperm capacitation. *Asian Aust J Anim Sci* 2001; 14: 28-37.
31. BERGQVIST AS, KILLIAN G, RODRIGUEZ-MARTINEZ H. Fas ligand in the bivariate oviduct may contribute to its immunoprivileged status. *Biol Repro* 2002; 66: 315.
32. HUNTER RHF. Ovarian control of very low sperm/egg ratio at the commencement of mammalian fertilization to avoid polyspermy. *Mol Reprod Dev* 1996; 44: 417-422.
33. SAFRANSKI TJ. Genetic selection of boars. *Theriogenology* 70; 2008: 1310-1316.
34. DE ANDRÉS MA, APARICIO AM, PIÑEIRO C. Granjas de genética: particularidades de manejo y gestión de datos. 2008. Disponible en:

- [http://www.3tres3.com/datos\\_productivos/granjas-de-genetica:-particularidades-de-manejo-y-gestion-de-datos\\_2451/](http://www.3tres3.com/datos_productivos/granjas-de-genetica:-particularidades-de-manejo-y-gestion-de-datos_2451/)
35. ROBINSON JAB, BUHR MM. Impact of genetic selection on management of boar replacement. *Theriogenology* 63; 2005: 668-678.
36. SMITAL J, WOLF J, DE SOUSA LL. Estimation of genetic parameters of semen characteristics and reproductive traits in AI boars. *Anim Reprod Sci* 86; 2005:119-130.
37. FLOWERS WL. Genetic and phenotypic variation in reproductive traits of AI boars. *Theriogenology* 70; 2008: 1297-1303.
38. LIN CL, PONSUKSILI S, THOLEN E, JENNEN DGJ, SCHELLANDER K, WIMMERS K. Candidate gene markers for sperm quality and fertility of boar. *Anim Reprod Sci* 2006; 92: 349-363.
39. BIDANEL J. Biology and genetics of Reproduction. In: ROTSCHIL M, RUVINSKY A, editors. *The Genetics of the Pig*. 2<sup>nd</sup> ed. UK: C.A.B. International, 2011: 218-241.
40. KENNEDY BW, WILKINS JN. Boar, breed and environmental factors influencing semen characteristics of boars used in artificial insemination. *Can J Anim Sci* 1984; 64: 833-843.
41. RATHJE TA, JOHNSON RK, LUNSTRA DD. Sperm production in boars after nine generations of selection for increased weight of testis. *J Anim Sci* 1995; 73: 2177-2185.
42. SHIPLEY CF. Breeding soundness examination of the boar. *Swine Health Prod* 7; 1999: 117-120.
43. DE ANDRÉS MA, APARICIO AM, PIÑEIRO C. Granjas de genética-procesado de información-índices genéticos. 2008. Disponible en: [http://www.3tres3.com/datos\\_productivos/granjas-de-genetica-procesado-de-informacion-indices-geneticos\\_2501/](http://www.3tres3.com/datos_productivos/granjas-de-genetica-procesado-de-informacion-indices-geneticos_2501/)

44. ISLER BJ, IRVIN KM, NEAL SM, MOELLER SJ, DAVIS ME, MEEKER DL. Examination of the relationship between the estrogen receptor gene and reproductive traits in swine. *J Anim Sci* 80, 2002, 2334-2339.
45. THURSTON LM, WATSON PF. Semen cryopreservation: a genetic explanation for species and individual variation? *CryoLetters* 2002; 23:255-262.
46. THURSTON LM, SIGGINS K, MILEHAM AJ, WATSON PF, HOLT WV. Identification of amplified restriction fragment length polymorphism markers linked to genes controlling boar sperm viability following cryopreservation. *Biol Reprod* 66; 2002: 545-554.
47. DEKKERS J, MATHUR P, KNOL E. Genetic Improvement of the pig. In: ROTSCHIL M, RUVINSKY A, editors. *The Genetics of the Pig*. 2<sup>nd</sup> ed. UK: C.A.B. International, 2011: 390-425.
48. CORCUERA BD, HERNÁNDEZ-GIL R, DE ALBA RC, MARTÍN RS. Relationship of environment temperature and boar facilities with seminal quality. *Livest Prod Sci* 74; 2002: 55-62.
49. SURIYASOMBOON A, LUNDEHEIM N, KUNAVONGKRIT A, EINARSSON S. Effect of temperature and humidity on sperm production in Duroc boars under different housing systems in Thailand. *Livest Prod Sci* 89; 2004: 19-31.
50. SONDERMAN JP, LUEBBE JJ. Semen production and fertility issues related to differences in genetic lines of boars. *Theriogenology* 70; 2008: 1380-1383.
51. KUNAVONGKRIT A, SURIYASOMBOON A, LUNDEHEIM N, HEARD TW, EINARSSON S. Management and sperm production of boars under differing environmental conditions. *Theriogenology* 63; 2005: 657-667.

52. MARTÍNEZ GRG. Manejo del semental. En: TRUJILLO OME, MARTÍNEZ GRG, HERRADORA LMA, editores. La piara reproductora. México: Mundi-Prensa, 2002. 147-163.
53. LE COZ P. Inseminación Artificial: Alojamiento y alimentación del verraco, 2006. Disponible en: [http://www.3tres3.com/inseminacion\\_artificial/alojamiento-y-alimentacion-del-verraco\\_4026/](http://www.3tres3.com/inseminacion_artificial/alojamiento-y-alimentacion-del-verraco_4026/)
54. LE COZ P. Inseminación artificial: Anatomía y fisiología del verraco. 2006. Disponible en: [http://www.3tres3.com/inseminacion\\_artificial/anatomia-y-fisiologia-del-verraco\\_4025/](http://www.3tres3.com/inseminacion_artificial/anatomia-y-fisiologia-del-verraco_4025/)
55. HUANG SY, KUO YH, LEE YP, TSOU HL, LIN EC, JU CC, *et al.* Association of heat shock protein 70 with semen quality in boars. *Anim Reprod Sci* 63; 2000: 231-240.
56. CHEMINEAU P. Influence of climate on livestock breeding. *World Anim Rev* 77; 1993. Disponible en: <http://www.fao.org/DOCREP/V1650T/v1650T04.htm#efectos%20de%20la%20%C2%ABcarga%20termica%C2%BB%20sobre%20la%20reproducci%C3%Bn>
57. HENAO RG, TRUJILLO ALE, BURITICÁ HME, SIERRA PCI, CORREA LG, GONZÁLEZ BOD. Efectos del clima sobre las características seminales de porcinos en una zona de bosque húmedo tropical. *Rev Fac Nal Agr Medellín* 57; 2004: 2355-2372.
58. JONSON K. Como reducir el estrés por calor. 2006. Disponible en: [http://www.3tres3.com/buscando/como-reducir-el-estres-por-calor\\_1655/](http://www.3tres3.com/buscando/como-reducir-el-estres-por-calor_1655/)
59. RIVEIRO M. Problemas reproductivos provocados por el calor, 2001. Disponible en: [http://www.engormix.com/MA-porcicultura/genetica/articulos/problemas-reproductivos-provocados-calor\\_t50/103-p0.htm](http://www.engormix.com/MA-porcicultura/genetica/articulos/problemas-reproductivos-provocados-calor_t50/103-p0.htm)

60. SANCHO S, PINART E, BRIZ M, GARCIA-GIL N, BADIA E, BASSOLS J, *et al.* Semen quality of postpubertal boars during increasing and decreasing natural photoperiods. *Theriogenology* 62; 2004: 1271-1282.
61. RIVERA MM, QUINTERO-MORENO A, BARRERA X, PALOMO MJ, RIGAU T, RODRÍGUEZ-GIL JE. Natural Mediterranean photoperiod does not affect the main parameters of boar-semen quality analysis. *Theriogenology* 64; 2005: 934-946.
62. SANCHO S, RODRIGUEZ-GIL JE, PINART E, BRIZ M, GARCIA-GIL N, BADIA E, *et al.* Effects of exposing boars to different artificial light regimens on semen plasma markers and "in vivo" fertilizing capacity. *Theriogenology* 65; 2006: 317-331.
63. ANDERSSON H, RYDHMER L, LUNDSTROM K, WALLGREN M, ANDERSSON M, FORSBERG M. Influence of artificial light regimens on sexual maturation and boar taint in entire male pigs. *Anim Reprod Sci* 51; 1998: 31-43.
64. STRZEZEK JF, DEMIANOWICZ W, KORDAN W, WYSOCKI P, HOLODY D. Effect of depletion test on the composition of boar semen. *Theriogenology* 2000; 54: 949-963.
65. GOPALKRISHNAN K, HINDUJA IN, KUMAR TC. Volume of semen as a parameter of its quality. *Indian J Med Res* 1992; 96: 361-365.
66. BARTOOV B, ELTES F, PANSKY M, LEDERMAN H, CASPI E, SOFFER Y. Estimating fertility potencial via semen analysis data. *Hum Reprod* 1993; 8: 65-70.
67. LE COZ P. Inseminación Artificial: Variación del semen y anomalías. 2006. Disponible en: [http://www.3tres3.com/inseminacion\\_artificial/variaciones-del-semen-yanomalias\\_4029/](http://www.3tres3.com/inseminacion_artificial/variaciones-del-semen-yanomalias_4029/)
68. CARRIÓN D, MEDEL P. Interacción nutrición reproducción en ganado porcino. XVII Curso de especialización FEDNA, 2001: 34-37.

69. CLOSE WH, COLE DJA. The boar. In Nutrition of sows and boars. UK: Nottingham University Press, 2000: 257-291.
70. BRAÑA VD. Alimentación del semental porcino. En: MEJÍA GCA, CUARÓN IJA, RENTERÍA FJA, BRAÑA VD, MARISCAL LG, GÓMEZ RS, editores. Alimentación del Hato Reproductor Porcino. Libro Científico N° 1. México, INIFAP- SAGARPA, 2007: 157-185.
71. CLOSE WH. The role of the boar in maximizing reproduction: Effects of nutrition and management. In: TAYLOR PJA, NOLLET J, editors. Nutritional approaches to arresting the decline in fertility of pigs and poultry. UK: Wageningen Academic Publishers, 2006: 93-116.
72. QUILES A. La nutrición del verraco. Cría y salud porcina 17; 2008: 24-31.
73. National Research Council. Nutrient requirements of swine, 10th ed. Washington, DC: National Academy Press; 1998.
74. MAROTTA E, LAGRECA L, TAMBURINI V. Requerimientos alimenticios adaptados al porcino moderno y calidad de la carne. Revista Veterinaria Cuyana 4; 2009: 16-24.
75. RIU VI. La alimentación del verraco. 2011. Disponible en: [http://www.3tres3.com/nutricion/la-alimentacion-del-verraco\\_30405/](http://www.3tres3.com/nutricion/la-alimentacion-del-verraco_30405/)
76. CLOSE WH, ROBERTS FG. Nutrition of the working boar. In: HARESING W, COLE DJA, editors. Recent Advances in Animal Nutrition. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1991: 21-44.
77. LOUIS GF, LEWIS AJ, WELDON WC, MILLER PS, KITTOK RJ, STROUP WW. The effect of protein intake on boar libido, semen characteristics, and plasma hormone concentrations. J Animal Sci 1994; 72: 2038-2050.

78. AUDET I, BÉRUBÉ N, BAILEY JL, LAFOREST JP, QUESNEL H, MATTE JJ. Effects of dietary vitamin supplementation and semen collection frequency on hormonal profile during ejaculation in the boar. *Theriogenology* 71; 2009: 334-341.
79. QUILES A, HEVIA ML. Necesidades de vitaminas, minerales y oligoelementos en la alimentación del verraco. 2004. Disponible en: [http://www.3tres3.com/buscando/necesidades-de-vitaminas-minerales-y-oligoelementos-en-la alimentacio\\_945/](http://www.3tres3.com/buscando/necesidades-de-vitaminas-minerales-y-oligoelementos-en-la-alimentacio_945/)
80. DAZA A, SALADO S, GÁLVEZ JF, GUTIÉRREZ-BARQUÍN M. Efecto de la suplementación con vitamina E y selenio sobre el sistema inmune, parámetros hematológicos y parámetros productivos de lechones recién destetados. *Investigación Agraria. Producción y sanidad Animales* 15; 2000: 21-30.
81. MARÍN-GUZMÁN J, MAHAN DC, CHUNG YK, PATE JL, POPE WF. Effects of dietary selenium and vitamin E on boar performance and tissue responses, semen quality, and subsequent fertilization rates in mature gilts. *J Anim Sci* 75; 1997: 2994-3003.
82. MAHAN DC, ZAWADZKI J, GUERRERO R. Mineral metabolism and boar fertility: observation from Latin America to Europe. *Nutrition Biotechnology in the Feed and Food Industries. Proc. Alltech's 18th Ann. Europ. Symposium, Alltech.* 2002: 411-418.
83. CAMPABADAL C. Guía técnica para alimentación de cerdos. Fundación para el fomento y promoción de la investigación y transferencia de tecnología agropecuaria de Costa Rica. 2009.
84. YESTE M, SANCHO S, BRIZ M, PINART E, BUSSALLEU E, BONET S. A diet supplemented with L-carnitine improves the sperm quality of Pietrain but not of Duroc

- and Large White boars when photoperiod and temperature increase. *Theriogenology* 73; 2010: 577- 586.
85. YESTE M, BARRERA X, COLL D, BONET S. The effects on boar sperm quality of dietary supplementation with omega-3 polyunsaturated fatty acids differ among porcine breeds. *Theriogenology* 76; 2011: 184-196.
86. KOZINK DM, ESTIENNE MJ, HARPER AF, KNIGHT JW. Effects of dietary L-carnitine supplementation on semen characteristics in boars. *Theriogenology* 61; 2004: 1247-1258.
87. ESTIENNE MJ, HARPER AF, CRAWFORD RJ. Dietary supplementation with a source of omega-3 fatty acids increases sperm number and the duration of ejaculation in boars. *Theriogenology* 70; 2008: 70-76.
88. BEASLEY V. Estrogenic and Anti-androgenic Toxicants. International Veterinary Information Service. Ithaca, New York. 1999. Disponible en: <http://www.ivis.org/advances/Beasley/cpt8c/ivis.pdf>
89. MELLOR S. Problem of mycotoxins... and some solutions. *Pig progress* 19; 2003: 12-15.
90. GBORE FA, EGBUNIKE GN. Testicular and epididymal sperm reserves and sperm production of pubertal boars fed dietary fumonisin B<sub>1</sub>. *Anim Reprod Sci* 105; 2008: 392-397.
91. SALA ER, REGUERA DTG, PÉREZ-LLANO B, GARCÍA CP. Micotoxinas y su impacto en la producción porcina. *Revista Albéitar* 112; 2008: 34-38.
92. KANORA A, MAES D. The role of mycotoxins in pig reproduction: a review. *Vet Med Czech* 54; 2009: 565-576.

93. D'MELLO JPF, PLACINTA CM, MACDONALD AMC. Fusarium mycotoxins: a review of global implications for animal health, welfare and productivity. Anim Feed Sci Tech 80; 1999: 183-205.
94. SCHWARZER K. Reducing zearalenone impact on semen quality. Pig Progress 18; 2002: 33-35.
95. BERGER T, ESBENSHADE KL, DIEKMAN MA, HOAGLAND T, TUIITE J. Influence of Prepubertal Consumption of Zearalenone on Sexual Development of Boars. J Anim Sci 53; 1981: 1559-1564.
96. AGAG BI. Mycotoxins in food and feeds 3-zearalenone. Assiut University Bulletin Environmental Researches 7; 2004: 159-176.
97. BENZONI E, MINERVINI F, GIANNOCCARO A, FORNELLI F, VIGO D, VISCONTI A. Influence of *in vitro* exposure to mycotoxin zearalenone and its derivatives on swine sperm quality. Reprod Toxicol 25; 2008: 461-467.
98. SUTKEVICIENE N, BAKUTIS B, BANYS A, KARVELIENE B, RUTKAUSKAS A, SABECKIENE J, *et al.* The effect of the estrogenic mycotoxin zearalenone on boar reproductive potencial and the dynamic of aspartate aminotransferase and alanine aminotransferase levels in the boar blood serum. Vet Med Zoot 68; 2009: 73-77.
99. CHRISTENSEN CM, MIROCHA CJ, NELSON GH, QUAST JF. Effect of young swine of consumption of rations containing corn invaded by *Fusarium roseum*. Appl Environ Microbiol 23; 1972: 202.
100. YOUNG LG, KING GJ. Low Concentrations of Zearalenone in Diets of Boars for a Prolonged Period of Time. J Anim Sci 63; 1986: 1197-1200.
101. TSAKMAKIDIS IA, LYMBEROPOULOS AG, VAINAS E, BOSCOS CM, KYRIAKIS SC, ALEXOPOULOS C. Study on the *in vitro* effect of zearalenone and

- alpha-zearalenol on boar sperm-zona pellucida interaction by hemizona assay application. *J Appl Toxicol* 27; 2007: 498-505.
102. SOLTI L, PÉCSI T, BARNA-VETRÓ I, SZÁSZ Jr. F, BIRÓ K, SZABÓ E. Analysis of serum and seminal plasma after feeding ochratoxin A with breeding boars. *Anim Reprod Sci* 56; 1999: 123-132.
103. AKANDE KE, ABUBAKAR MM, ADEGBOLA TA, BOGORO SE. Nutritional and Health Implications of Mycotoxins in Animal Feeds: A Review. *Pakistan Journal of Nutrition* 5; 2006: 398-403.
104. BIRÓ K, BARNA-VETRO I, PÉCSI T, SZABÓ E, WINKLER G, FINK-GREMMELS J, *et al.* Evaluation of spermatological parameters in ochratoxin A-challenged boars. *Theriogenology* 60; 2003: 199-207.
105. MORAN JM, MADEJÓN L, ORTEGA FC, PEÑA FJ. Nitric oxide induces caspase activity in boar spermatozoa. *Theriogenology* 70; 2008: 91-96.
106. KIM TS, SA SJ, SHIN MY, JANG DM, KWON SH, KWON EH, *et al.* Stimulation of plasminogen activator activity by free radicals in boar spermatozoa. *Anim Reprod Sci* 114; 2009: 228-237.
107. CÓRDOVA-IZQUIERDO A, SALTIJERAL OJA, RUIZ LG, XOLALPA CVM, CORTÉS SS, PEÑA BSD, *et al.* Estrés Oxidativo en gametos – Oxidative Stress in gametes. *Rev Electron Vet*, 1695-7504. Julio 2010; 11 (7): 32 Disponible en: <http://www.veterinaria.org/revistas/redvet/n070710/071014.pdf>
108. Córdova-Izquierdo A, Córdova-Jiménez MS, Córdova-Jiménez CA, Guerra LJE. Conservación seminal de mamíferos domésticos (Seminal conservation of domestic mamalia) *Revista Electron Vet*. 1695-7504. Julio 2006; 7 (7): 6 Disponible en: <http://www.veterinaria.org/revistas/redvet/n070706/070614.pdf>

109. VALLORANI C, SPINACI M, BUCCI D, TAMANINI C, GALEATI G. Effects of antioxidants on boar spermatozoa during sorting and storage *Anim Reprod Sci* 122; 2010: 58-69.
110. MARTÍN-HIDALGO D, BARÓN FJ, BRAGADO MJ, CARMONA P, ROBINA A, GARCÍA-MARÍN LJ, *et al.* The effect of melatonin on the quality of extended boar semen after long-term storage at 17 °C *Theriogenology* 75; 2011: 1550-1560.
111. ZHAO H-W, LI Q-W, NING G-Z, HAN Z-S, JIANG Z-L, DUAN Y-F. Rhodiola sacra aqueous extract (RSAE) improves biochemical and sperm characteristics in cryopreserved boar semen *Theriogenology* 71; 2009: 849-857.
112. VASCO MD, HERNÁNDEZ MM, MARÍA VJ, MARTÍNEZ E, ROCA J. Sustancias oxígeno reactivas (ROS) en semen congelado-descongelado de porcino. *Ciencia y tecnología* 1; 2008: 23-29.
113. FUNAHASHI H, SANO T. Select antioxidants improve the function of extended boar semen stored at 10 °C. *Theriogenology* 63; 2005: 1605-1616.
114. PRIETO C, SUÁREZ P, BAUTISTA JM, SÁNCHEZ R, RILLO SM, SIMARRO I, *et al.* Semen changes in boars after experimental infection with porcine reproductive and respiratory syndrome (PRRS). *Theriogenology* 45; 1996: 383-395.
115. PRIETO C, CASTRO JM. Porcine reproductive and respiratory syndrome virus infection in the boar: a review. *Theriogenology* 63; 2005: 1-16.
116. AACP. Síndrome Reproductivo y Respiratorio del cerdo (PRRS) y su importancia en la producción porcina. Sitio Argentino de Producción Porcino, 2006: 10. Disponible en:[http://www.produccionanimal.com.ar/sanidad\\_intoxicaciones\\_metabolicos/infecciosas/porcinos/01-sindrome\\_reproductivo\\_respiratorio\\_cerdo.pdf](http://www.produccionanimal.com.ar/sanidad_intoxicaciones_metabolicos/infecciosas/porcinos/01-sindrome_reproductivo_respiratorio_cerdo.pdf)

117. OPRIESSNIG T, GIMÉNEZ-LIROLA GL, HALBUR PG. Artificial Insemination and Its Role in Transmission of Swine Viruses. In Perez-Marin CC editor. A Bird's-Eye View of Veterinary Medicine. Croatia: InTech, 2012: 255-280.
118. MAES D, NAUWYNCK H, RIJSSELAERE T, MATEUSEN B, VYT P, DE KRUIF A, *et al.* Diseases in swine transmitted by artificial insemination: An overview. *Theriogenology* 70; 2008: 1337-1345.
119. GUÉRIN B, POZZI N. Viruses in boar semen: detection and clinical as well as epidemiological consequences regarding disease transmission by artificial insemination. *Theriogenology* 63; 2005: 556-572.
120. VAN RIJN PA, WELLENBERG GJ, DER HONING RH, JACOBS L, MOONEN PLJM, FEITSMA H. Detection of economically important viruses in boar semen by quantitative Real Time PCR™ technology. *J Virol Methods* 120; 2004: 151-160.
121. STAN D. Utilidad de la PCR en PRRS. 1999. Disponible en: [http://www.3tres3.com/los-expertos-opinan/utilidad-de-la-pcr-en-el-prrs\\_320/](http://www.3tres3.com/los-expertos-opinan/utilidad-de-la-pcr-en-el-prrs_320/)
122. CHRISTOPHER-HENNINGS J, FAABERG KS, MURTAUGH MP, NELSON EA, ROOF MB, VAUGHN EM, *et al.* Porcine reproductive and respiratory syndrome (PRRS) diagnostics: Interpretation and limitations. *J Swine Health Prod* 10; 2002: 213-218.
123. NORIEGA J, REYES P, BUCAREY S. Circovirus porcino: un virus pequeño que genera un gran problema. *Av Cs Vet* 22; 2007: 62-71.
124. MADSON D, OPRIESSNIG T. Shedding of porcine circovirus type 2 by boars and the role of PCV-2 in semen transmission. The American Association of Swine Veterinarians, 39th Annual Meeting Proceedings. 2008: 129-130.

125. SCHMOLL F, LANG C, STEINRIGL AS, SCHULZE K, KAUFFOLD J. Prevalence of PCV2 in Austrian and German boars and semen used for artificial insemination. *Theriogenology* 69; 2008: 814-821.
126. OPRIESSINIG T, KUSTER C, HALBURG PG. Case Report. Demonstration of porcine circovirus type 2 in the testes and accessory sex glands of a boar. *J Swine Health Prod* 14; 2006: 42-45.
127. LAROCHELLE R, BIELANSKI A, MÜLLER P, MAGAR R. PCR detection of porcine and evidence of shedding of porcine circovirus type 2 in boar semen. *J Clin Microbiol* 38; 2000: 4629-4632.
128. SOLÍS A, RAMÍREZ-MENDOZA H, MERCADO C, ESPINOSA S, VALLEJO V, REYES-LEYVA J, *et al.* Semen alterations in porcine rubulavirus-infected boars are related to viral excretion and have implications for artificial insemination. *Res Vet Sci* 83; 2007: 403-409.
129. The Center for Food Security and Public Health (CFSPH) Porcine Rubulavirus Infection, 2006. Disponible en: [http://www.cfsph.iastate.edu/Factsheets/pdfs/blue\\_eye\\_disease.pdf](http://www.cfsph.iastate.edu/Factsheets/pdfs/blue_eye_disease.pdf)
130. RAMÍREZ MH, MARTÍNEZ GRG, VIZUET AOT, MONRROY BJ. Inoculación del virus de la enfermedad del ojo azul en verracos de la raza pelón mexicano. *Vet Mex* 30; 1999: 1-6.
131. ECHEVERRÍA MG, NOSETTO EO. Actualización en enfermedad de Aujeszky. *Analecta Veterinaria* 20; 2000: 22-30.
132. WITTMANN G. Aujeszky's disease. *Scientific and Technical Review-International Office of Epizootics* 5; 1986: 959-977.

133. HALL L, KLUGE J, EVANS L, CLARK T, HILL H. The effect of pseudorabies (Aujeszky's) virus infection on young mature boar and boar fertility. *Can J Com Med* 48; 1984: 192-197.
134. SÁNCHEZ MJM, GUILLERMO AM, BORRALLO MG. Parvovirus porcina. *Mundo ganadero* 11; 1993: 65-68.
135. BICAN J, SVOBODA M, DRABEK J. Porcine Parvovirus Infection in Boars in the Czech Republic. *Acta Vet Brno* 71; 2002: 45-49.
136. BIRONT P, BONTE P. Porcine Parvovirus (P.P.V.): Infection in Boars. Possibility of a Genital Localization in the Boar after Oronasal Infection. *Zentralbl Veterinärmed B* 30; 1983: 541-545.
137. DE CUADRO-HANSEN G. Control sanitario de los verracos en un centro de producción de semen. *Memorias de 5° Seminário Internacional de Suinocultura*; 2000 septiembre 27-28; São Paulo (Brasil). Concórdia: Embrapa Suínos e Aves: 152-162.
138. LE COZ P. Inseminación Artificial. Las enfermedades y el semen. 2006. Disponible en: [http://www.3tres3.com/inseminacion\\_artificial/las-enfermedades-y-el-semen\\_4030/](http://www.3tres3.com/inseminacion_artificial/las-enfermedades-y-el-semen_4030/)
139. PINEDA AA. Manual práctico de la reproducción del verraco: Estudio de Revisión (Tesis de licenciatura) México, DF: Universidad Nacional Autónoma de México, 2007: 78-86.
140. ALMOND GW, FLOWERS WL, BATISTA L, D'ALLAIRE S. Diseases of the reproductive System. In: STRAW BE, ZIMMERMAN JJ, D'ALLAIRE S, TAYLOR DJ, editors. *Diseases of swine*. 9<sup>th</sup> ed. USA: Blackwell Publishing, 2006: 113-147.
141. GRIFFITH RW, SCHWARTZ KJ, MEYERHOLZ DK. Salmonella pp. In: Straw BE, Zimmerman JJ, D'Allaire S, Taylor DJ. *Diseases of swine*. 9<sup>th</sup> ed. USA: Blackwell Publishing, 2006: 739-754.

142. PIOJAN C. Pneumonic Pasteurellosis. STRAW BE, ZIMMERMAN JJ, D'ALLAIRE S, TAYLOR DJ. Diseases of swine. 9<sup>th</sup> ed. USA: Blackwell Publishing, 2006: 719-737.
143. ALTHOUSE CG, LU KG. Bacteriospermia in extended porcine semen. *Theriogenology* 63; 2005: 573-584.
144. MAROTO MLO, CRUZ ME, DE CUPERE F, VAN DRIESSCHE E, ECHEMENDIA-BLANCO D, MACHADO RJM, B, *et al.* Bacterial contamination of boar semen affects the litter size. *Anim Reprod Sci* 120; 2010: 95-104.
145. ALTHOUSE GC, KUSTER CE, SG CLARK SG, WEISIGER RM. Field investigation of bacterial contaminants and their effects on extended porcine semen. *Theriogenology* 53; 2000: 1167-1176.
146. FERNÁNDEZ A, CRUZ E, LAZO L, ARREDONDO C Y BRITO A. Estudio bacteriológico del semen de porcino. Valoración preliminar del efecto de la lectina de *Escherichia coli* en la aglutinación espermática. *Revista Salud Animal* 23; 2001: 73-79.
147. OKAZAKI T, MIHARA T, FUJITA Y, YOSHIDA S, TESHIMA H, SHIMADA M. Polymyxin B neutralizes bacteria-released endotoxin and improves the quality of boar sperm during liquid storage and cryopreservation. *Theriogenology* 74; 2010: 1691-1700.
148. ESPINOSA HS. Inseminación artificial. En: TRUJILLO OME, MARTÍNEZ GRG, HERRADORA LMA, editores. De: La piara reproductora. México: Mundi-Prensa, 2002: 165-188.
149. ALTHOUSE GC, PIERDON MS, LU KG. Thermotemporal dynamics of contaminant bacteria and antimicrobials in extended porcine semen. *Theriogenology* 70; 2008: 1317-1323.

150. ADAMS TE. Using gonadotropin-releasing hormone (GnRH) and GnRH analogs to modulate testis function and enhance the productivity of domestic animals. *Anim Reprod Sci* 88; 2005: 127-139.
151. BILSKIS R, SUTKEVICIENE N, RISKEVICIENE V, JANUSKAUSKAS A, ZILINSKAS H. Effect of active immunization against GnRH on testosterone concentration, libido and sperm quality in mature AI boars. *Acta Vet Scand* 54; 2012: 34-45.
152. ANDERSSON H, WALLGREN M, RYDHMER L, LUNDSTROM K, ANDERSSON K, FORSBERG M. Photoperiodic effects on pubertal maturation of spermatogenesis, pituitary responsiveness to exogenous GnRH, and expression of boar taint in crossbred boars. *Anim Reprod Sci* 54; 1998: 121-137.
153. KAUFFOLD J, ROHRMANN H, BOEHM J, WEHREND A. Effects of long-term treatment with the GnRH agonist deslorelin (Suprelorin®) on sexual function in boars. *Theriogenology* 74; 2010: 733-740.
154. OSKAM IC, LERVIK S, TAJET H, DAHL E, ROPSTAD E, ANDRESEN Q. Differences in testosterone, androstenone, and skatole levels in plasma and fat between pubertal purebred Duroc and Landrace boars in response to human chorionic gonadotrophin stimulation *Theriogenology* 74; 2010: 1088-1098.
155. KNIGHT JW, KATTESH HG, GWAZDAUSKAS FC, THOMAS HR, KORNEGAY ET. Peripheral testosterone in boars after administration of hGC, ACTH and testosterone at three ages. *Theriogenology* 17; 1982: 383-391.
156. ESTIENNE MJ, HARPER AF. Semen characteristics and libido in boars treated repeatedly with PGF2 $\alpha$ . *J Anim Sci* 82; 2004: 1494-1498.

157. LEVIS DG, FORD JJ. The influence of androgenic and estrogenic hormones on sexual behavior in castrated adult male pigs. *Horm Behav* 33; 1989: 393-411.
158. ZAMORA ZV, FIGUEROA JL, MARTÍNEZ M, SÁNCHEZ-TORRES MT, CÁRDENAS M, KIRKWOOD RN. Sexual behavior of castrated boars treated with prostaglandin F<sub>2α</sub>. *Theriogenology* 74; 2010: 100-104.
159. NAKAYAMA H, HIDAKA R, ASHIZAWA K. Effects of testosterone injection on the semen quality in boars during high ambient temperature. *Anim Reprod Sci* 25; 1991: 73-82.
160. ESTIENNE MJ, HARPER AF. PGF<sub>2α</sub> facilitates the training of sexually active boars for semen collection. *Theriogenology* 74; 2000: 1039-1045.
161. KOZINK DM, ESTIENNE MJ, HARPER AF, KNIGHT JW. The effect of lutalyse on the training of sexually inexperienced boars for semen collection *Theriogenology* 58; 2002: 1039-1045.
162. ESTIENNE MJ, HARPER AF, KNIGHT JW, BARB CR, RAMPACEK GB. Sexual behavior after treatment with prostaglandin-F<sub>2α</sub> in boars with suppressed concentrations of gonadal steroids. *Appl Anim Behav Sci* 89; 2004: 53-57.
163. ZAMORA ZV. Características seminales de verracos alimentados con dietas adicionadas con acido linoleico conjugado o nucleótidos y comportamiento sexual de verracos castrados tratados con PGF<sub>2α</sub> (Tesis de Doctorado) México, Edo. de México: Colegio de Postgraduados (2010) 69-76.
164. ESTIENNE MJ, HARPER AF, BEAL WE, CRAWFORD RJ. Effects of prostaglandins and prostaglandin synthesis inhibitors on sexual behavior in boars. *Rep Biol* 7; 2007: 163-175.

165. SZUROP I, NAGY A, JÖCHLE W. Stimulation of Libido in Pubertal and Mature Boars with Prostaglandin F<sub>2α</sub> Analogs: Clinical Observations. *Reprod Domest Anim* 21; 1986: 83-86.
166. LEVIS DG, REICKS DL. Assessment of sexual behavior and effect of semen collection pen design and sexual stimulation of boars on behavior and sperm output - a review *Theriogenology* 63; 2005: 630-642.
167. Prontuario de especialidades veterinarias: Farmacéuticas, Biológicas y Nutricionales. 28 ed. México: PLM, 2008.
168. Porcicultura.com. Productos/Sanidad. Disponible en:  
<http://www.porcicultura.com/porcicultura/home/productos.asp>