

La mejora genética, estrategia para aumentar la productividad y reproductividad en la porcicultura de Nicaragua

Genetic improvement, a strategy to increase productivity and reproducibility in Nicaraguan pig farming

Narciso L Duarte Acevedo^{1*} ; Indiana R Montoya Dompe¹ , Marcos A Reyes Centeno¹ 
Harold J Martínez Martínez² ; Cristhian R Lazo Salazar¹ .

¹Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua (UNAN-Managua). Centro Universitario CUR-Chontales, Nicaragua.

²Instituto Nicaragüense de Tecnología Agropecuaria (INTA). Nicaragua.

*Correspondencia: nduarte@unan.edu.ni

Recepción: 12 febrero 2025 | Aprobación: 18 junio 2025 | Publicación: 2 julio 2025

RESUMEN

La reproducción de cerdos de alta genética es fundamental para programas de inseminación artificial, donde la evaluación rutinaria de la calidad seminal es prioritaria. Este estudio evaluó parámetros espermáticos en 53 eyaculados de verracos de las líneas Topig (707-8), Traxx (318-12), Tempo (361-8) y Línea Materna (368-1 y 285-7) durante 18 semanas en la Granja de Alta Genética Porcina del INTA en Chontales, Nicaragua. Se analizaron volumen, concentración espermática, morfología, motilidad y producción de dosis seminales. Los resultados mostraron que la línea L/M 285-7 presentó el mayor volumen promedio (328.33 ml/eyaculado), mientras que la línea Tempo 361-8 registró la mayor concentración espermática (292×10^6 espermatozoides/ml). La morfología fue óptima en las líneas LM 368-1 y LM 285-7 (93%), y la motilidad general fue muy buena (>80%). La producción de dosis seminales fue más eficiente en las líneas L/M 285-7, Tempo 361-8 y Traxx 318-12 (20-22 dosis/eyaculado). El análisis multivariado (PCA y clustering) identificó tres grupos de verracos según su capacidad fecundante, destacando el grupo de alta capacidad ($n=26$) con concentración espermática elevada ($305,731 \pm 85,095$ spz/ml) y producción eficiente de dosis (20.4 ± 4.7). Los reproductores Tempo 361-8, L/M 285-7 y Traxx 318-12 mostraron perfiles seminales superiores, aptos para programas de mejora genética y reproducción asistida. Estos hallazgos resaltan la importancia de la selección basada en parámetros seminales integrados para optimizar la eficiencia reproductiva en granjas porcinas.

Palabras clave: Calidad espermática; inseminación artificial; mejora genética; reproducción porcina; análisis multivariado.

ABSTRACT

The reproduction of high-genetic-value pigs is essential for artificial insemination programs, where routine evaluation of semen quality is a priority. This study assessed sperm parameters in 53 ejaculates from boars of the Topig (707-8), Traxx (318-12), Tempo (361-8), and Maternal Line (368-1 and 285-7) breeds over 18 weeks at the INTA High Genetic Porcine Farm in Chontales, Nicaragua. Volume, sperm concentration, morphology, motility, and semen dose production were analyzed. Results showed that the L/M 285-7 line had the highest average volume (328.33 ml/ejaculate), while the Tempo 361-8 line exhibited the highest sperm concentration (292×10^6 spermatozoa/ml). Morphology was optimal in the LM 368-1 and LM 285-7 lines (93%), and overall motility was very good (>80%). Semen dose production was

Como citar (Vancouver).

Duarte ANL, Montoya DIR, Reyes CMA Martínez MHJ, Lazo SCR. La mejora genética, estrategia para aumentar la productividad y reproductividad en la porcicultura de Nicaragua. Rev Colombiana Cienc Anim. Recia. 2025; 17(2):e1094. <https://doi.org/10.24188/recia.v17.n2.2025.1094>

most efficient in the L/M 285-7, Tempo 361-8, and Traxx 318-12 lines (20-22 doses/ejaculate). Multivariate analysis (PCA and clustering) identified three boar groups based on fecundity: a high-capacity group (n=26) with elevated sperm concentration ($305,731 \pm 85,095$ spz/ml) and efficient dose production (20.4 ± 4.7). The top-performing boars—Tempo 361-8, L/M 285-7, and Traxx 318-12—demonstrated superior seminal profiles, suitable for genetic improvement and assisted reproduction programs. These findings underscore the importance of integrated seminal parameter analysis for optimizing reproductive efficiency in swine farms.

Keywords: Sperm quality; artificial insemination; genetic improvement; swine reproduction; multivariate analysis.

INTRODUCCIÓN

En Nicaragua la porcicultura es una actividad productiva que ha sido impulsada por unas 149,000 familias pequeñas y medianas productoras, que abastecen la demanda alimenticia que cada año aumenta por el rápido crecimiento poblacional y que garantiza la seguridad alimentaria y nutricional a nivel nacional (1).

Datos del Ministerio Agropecuario en 2024, reportan que en Nicaragua se produce el 80% de los alimentos que consume la población nacional y el 59% del consumo de carne de cerdos. Esta actividad, por tanto, desempeña un papel fundamental en la economía y la subsistencia del país, alineándose con las preocupaciones globales sobre la producción sostenible de alimentos (2).

Dada la importancia de la porcicultura para el abastecimiento alimentario, resulta esencial optimizar su potencial reproductivo y productivo. Una técnica es la inseminación artificial, que ha demostrado ser una herramienta eficaz para mejorar la eficiencia reproductiva en las granjas porcinas (3,4).

En Nicaragua, al igual que en otros países de América Latina, la porcicultura se caracteriza por la predominancia de sistemas de producción tradicionales, donde el 85–88% del hato porcino nacional se encuentra en manos de pequeños productores que manejan razas criollas y cruces adaptados a condiciones locales. El restante 12–15% se concentra en granjas tecnificadas distribuidas en todos los departamentos del país, dedicadas tanto a la producción de carne como a la reproducción de animales genéticamente mejorados. De este segmento tecnificado, aproximadamente el 70–75% de los cerdos son destinados al desarrollo y engorde para abastecer mataderos industriales y mercados locales, mientras que el restante 20–25% se orienta a fines reproductivos, promoviendo así la mejora genética del hato nacional (5).

Es por ello por lo que la inseminación artificial es una herramienta biotecnológica de la reproducción que se aplica en la producción animal con el fin de aumentar la eficiencia productiva, lograr un mayor progreso genético e incrementar el desempeño reproductivo (6).

Hoy en día, con el uso de inseminación artificial, se ha permitido optimizar el recurso reproductor macho, un verraco puede inseminar al año entre 100 y 200 hembras, dependiendo de la fertilidad, la calidad del semen y la frecuencia de inseminación, notando las diferencias respecto a la monta natural que cubre 25 cerdas por macho en promedio; además, se reducen riesgos como transmisión de enfermedades, accidentes durante la manipulación ya que son animales pesados puesto que las hembras son de menor tamaño y permite observar y seleccionar individuos de alto valor genético (7).

Para ello, el conocimiento y buen manejo reproductivo de los machos porcinos es igualmente fundamental para alcanzar óptimos parámetros en la producción (8). En este sentido, la evaluación de la calidad espermática es una herramienta de mucha trascendencia para la selección y uso de verracos con alto potencial reproductivo. Se considera que el verraco aporta el 50% de la importancia en la granja sobre todo en la reproducción y producción, es por ello por lo que se deben llevar a cabo de manera rutinaria pruebas que incluya la respuesta adecuada sobre la capacidad fecundante del material genético aportado por estos animales (9).

En los centros de mejoramiento genético y reproducción asistida, se deben realizar pruebas de rutina para evaluar y garantizar la calidad seminal. Para ello se estudia el volumen, concentración, morfología y la motilidad espermática (10). Llamas & García (11), consideran que el cálculo de la concentración espermática del eyaculado (número de espermatozoides/ml) es un valor muy importante, ya que, junto al volumen del eyaculado, dependerá el número de dosis a realiza y la variabilidad entre los distintos aparatos de medida es considerable lo que puede afectar significativamente la calidad de las dosis preparadas.

La calidad de los eyaculados constituye un factor clave para el desarrollo y éxito de la aplicación de técnicas de inseminación artificial (IA) en especies ganaderas. Se enfatiza que la concentración espermática junto al volumen del eyaculado es crucial para determinar el número de dosis a realizar (12).

Así mismo, los cerdos alcanzan pesos adecuados en menor tiempo al momento de mandarlos al sacrificio. Esto demuestra que las granjas porcinas de alta calidad genética son una herramienta efectiva para mejorar la producción y la reproductividad de la porcicultura.

Los beneficios de estas granjas son significativos, ya que se espera que aumenten la producción de carne de cerdo, generen mayores ingresos para los productores y mejoren la seguridad alimentaria y nutricional de las familias rurales. En particular, la granja de alta genética en la región central de Nicaragua ha demostrado resultados positivos, como un incremento en el número de lechones por parto, crías más vigorosas y un mayor número de crías vivas al destete con un peso más uniforme.

El estudio tiene como objetivo comparar la capacidad fecundante de cerdos en la Granja de Alta Genética Porcina del INTA (Instituto Nicaragüense de Tecnología Agropecuaria) en Chontales, Nicaragua. Esta iniciativa, promovida por el Gobierno de la República como parte del Plan Nacional de Lucha contra la Pobreza, busca establecer granjas porcinas de alta calidad genética para mejorar la productividad y reproductividad en la porcicultura nicaragüense.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio. El estudio se efectuó en la Granja de Alta Genética Porcina del Instituto Nicaragüense de Tecnología Agropecuaria (INTA) de la delegación de Juigalpa en Chontales a 146 Km de la Capital de Nicaragua, Managua. Los eyaculados fueron analizados, evaluados y procesados en el Laboratorio Multiusos (Bioanálisis Clínico) del Centro Universitario Regional (CUR) de la UNAN Managua en Chontales.

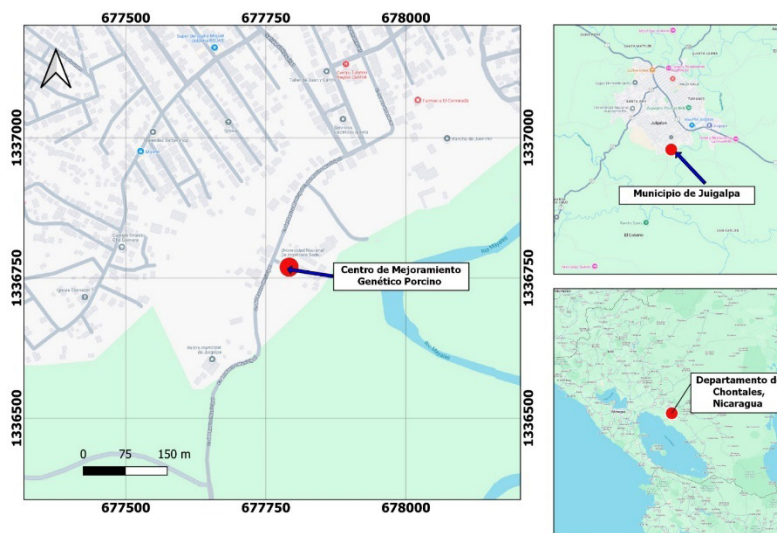


Figura 1. Área de estudio del ensayo registrado.
Figure 1. Study area of the registered trial.

Metodología. Fueron procesados 53 eyaculados de 5 cerdos reproductores de las líneas Topig (código 707-8), Traxx (código 318-12), Tempo (código 361-8) y Línea Materna (código 368-1 y código 285-7) por un periodo de 18 semanas (25/05/2021 al 22/11/2021).

La metodología se realizó en diferentes momentos, primero se recolectaron muestras seminales a través de manipulación manual; seguido, se traslada la muestra al laboratorio para realizar una evaluación macroscópica del semen que incluye medición del volumen, algunas características como olor, color y textura.

Recolección de la muestra seminal. Se colectaron 53 muestras en total, cada verraco entrenado, para el proceso de recolección mediante estimulación manual y cerca del área de cerdas reproductoras para generar motivación. Se utilizó vaso colector (Minitube®) esterilizados y bolsas plásticas (US Bag®, Minitube®), con una temperatura de 38°C, recogiendo la fracción espermática del eyaculado. Los ejemplares se mantuvieron en sus cubículos en el periodo de estudio con alimento balanceado, agua Ad Livitum y con un calendario sanitario propio de la unidad de producción. Las edades de los ejemplares oscilaron entre 12-15 meses. Las muestras fueron trasladadas en termos al laboratorio en un lapso no mayor de 30 minutos desde su recolección. Las muestras fueron registradas al llegar al laboratorio y sumergidas en baño María a 38°C para mantener la temperatura y evitar shock térmico.

Evaluación macroscópica del semen. El volumen, se midió con probetas de cristal graduadas de 500 ml, se consideró normal el color blanco lechoso y anormal si estuvo mezclado con otros colores como marrón, rojizo o amarillento. El olor sui generis se consideró normal, así como olores anormales, lo cual pudo darse por alteraciones patológicas del aparato reproductor, procedimiento inadecuado de obtención del eyaculado o a la contaminación con orina durante la eyaculación (13).

Evaluación microscópica del semen. Todas las muestras seminales fueron evaluadas para determinar la concentración espermática mediante doble lectura usando el hemocitómetro. La determinación de la concentración espermática se introdujo en la cámara de Neubauer® (Marienfeld-Superior CE-IVD) según la metodología descrita por la OMS. Para ello con una alícuota se tomó 10 µL de semen fresco y se diluyó en 990 µL (dilución 1:100) de solución fijadora de los espermatozoides compuesta por Formol al 3% con citrato de sodio. Se dejó reposar por 10 minutos, luego fueron puesta directamente al microscopio binocular (Olympus CX22, Tokyo, Japón) y se realizó el recuento de las células espermáticas.

Para evaluar la morfología, se colocaron 10 µL de cada muestra de semen en un portaobjetos, se extendió para secar y posteriormente realizar la tinción con colorante eosina. La tinción con eosina se realiza de forma rápida para las muestras seminales para su análisis morfológico. Las muestras, previamente secadas al aire, se fijaron y tiñeron por inmersión en la solución por unos cuantos segundos, luego para acelerar el secado fueron sometidas a mechero. Posteriormente se contabilizó 100 espermatozoides diferenciando los espermatozoides normales de los que presentaban anomalías en su morfología. Las muestras consideradas aceptables fueron las que superaron el 85% de células espermáticas normales (9).

Para evaluar motilidad, con una alícuota de 10 µL de semen fresco, Valverde y colaboradores sugieren que lo que se busca es evaluar el vigor espermático y el desplazamiento de los espermatozoides hacia adelante y de manera rectilínea. Fueron consideradas las muestras de buena y muy buena calidad aquellas que superaban el 80% de movilidad (10).

Dilución y preparación de las muestras para inseminación artificial. Una vez que se consideró que la muestra era viable, se procesó. Una vez sabida la cantidad aproximada de espermatozoides por ml del eyaculado, se mezcló con un diluyente comercial (ANDROSTAR® PLUS). Diluyendo en un Beaker de cristal de 5000 ml el equivalente de un sobre (ANDROSTAR® PLUS, 47g) en un litro de agua destilada. Luego se colocó el vaso en un trípode de metal y con un mechero se calentó el Beaker hasta obtener una muestra homogénea a una temperatura de 38°C. Una vez listo el diluyente se procedió a mezclar con la muestra seminal a una temperatura de 38°C. Se prepararon dosis seminales con un promedio de $3-5 \times 10^6$ espermatozoides en una botella de plástico (Minitube®) de 100 ml ya diluido. La cantidad de sobres (ANDROSTAR® PLUS) a utilizar y dosis seminales ya preparadas varió según la concentración y volumen de la muestra seminal a proceso y según la demanda de la zona. Preparadas las dosis seminales, en un lapso de dos horas se descendió la temperatura a 16°C (según el fabricante), para luego poder ser almacenadas las dosis seminales en un refrigerador a temperatura que oscilen en +10°C- 25°C. Luego fueron evaluada de forma visual la movilidad a las 24, 48 y 72 horas las dosis de semen diluido refrigerado. Para ser evaluadas estas muestras refrigeradas, se llevó la dosis seminal a una temperatura de 38°C para que los espermatozoides respondieran de forma adecuada a la temperatura

Análisis estadístico. Todos los análisis se ejecutaron en R (R Core Team 2024) (14), utilizando paquetes especializados en análisis multivariado y visualización. Los scripts y datos están disponibles para auditoría, cumpliendo con estándares de ciencia abierta.

Dada la naturaleza multivariada de los datos colectados, se aplicó un Análisis de Componentes Principales (PCA) para resumir la información en dimensiones ejecutables. Las variables fueron estandarizadas para aminorar sesgos por diferencias de escala (15). Los componentes principales (PC1 y PC2), explican la mayor proporción de la varianza total, se usaron como base para su interpretación.

El primer componente principal (PC1), asociado al volumen de eyaculado y número de dosis, se usó como un índice sintetizado de fertilidad. Los reproductores fueron clasificados en un ranking lógico según su puntuación en PC1, facilitando la identificación de ejemplares con mayor potencial reproductivo.

Para complementar el PCA, se implementó técnicas de clustering:

Clustering jerárquico: aplicando el método de Ward (ward.D2) con distancia euclidiana, que minimiza la varianza intra-grupos y maximiza la heterogeneidad entre clústers (16).

Para la validación se realizó un análisis de K-means: se aplicó con $k=3$, utilizando 25 inicializaciones aleatorias para asegurar estabilidad, donde se particiona las observaciones en k grupos, y cada observación pertenece al grupo que tenga la media más cercana (17).

La concordancia entre ambos métodos validó la clasificación de los reproductores en tres categorías de capacidad fecundante:

Alta capacidad fecundante: valores superiores en volumen y dosis.

Capacidad media: parámetros intermedios.

Baja capacidad: valores reducidos en variables clave.

Cada clúster se caracterizó mediante estadísticas descriptivas (media \pm desviación estándar) de las variables seminales, permitiendo caracterizar el perfil reproductivo típico de cada grupo.

RESULTADOS

Al realizar el análisis de resultados de este trabajo, se abordan cinco variables fundamentales en torno a la evaluación de la calidad espermática de semen con 45 eyaculados de 5 cerdos ubicados en la granja de alta genética del INTA en Juigalpa; el volumen, la concentración espermática, morfología, dosis seminales producidas del semen para inseminación artificial y movilidad permite determinar que: La hipótesis comprobada de que al menos uno de los cerdos evaluados presenta buenas cualidades reproductivas, evidenciadas por parámetros seminales superiores. Esto se sustenta en los siguientes hallazgos:

El análisis multivariado (PCA y análisis de conglomerados) permitió identificar diferencias significativas entre los individuos en cuanto a volumen de eyaculado, concentración espermática, morfología y número de dosis obtenidas.

Se identificaron grupos de verracos con perfiles seminales diferenciados, destacando especialmente el grupo de alta capacidad fecundante, cuyos miembros presentan un perfil seminal óptimo para la reproducción: volumen medio de eyaculado alto, concentración espermática superior y producción de dosis eficiente.

El ranking compuesto basado en los scores de los primeros componentes principales identificó a reproductores como Tempo 361-8, L/M 285-7 y Traxx 318-12 con valores superiores en las variables clave, confirmando la existencia de individuos con características seminales sobresalientes.

Por tanto, la hipótesis de que al menos un cerdo posee buenas cualidades reproductivas ha sido comprobada mediante la identificación objetiva de individuos con parámetros seminales superiores dentro de la población analizada

Parámetros seminales. Para caracterizar la calidad seminal de verracos reproductores, se analizaron las principales variables evaluadas: volumen de eyaculado, concentración espermática, morfología y número de dosis obtenidas.

Como se observa en la Tabla 1, el volumen de eyaculado y la concentración espermática presentan una notable variabilidad, con rangos amplios que van desde 50 mL hasta 465 mL para el eyaculado y desde 90,000 hasta 510,000 espermatozoides/mL para la concentración. En contraste, la morfología espermática mostró una alta consistencia, con una media cercana al 91%. El número de dosis obtenidas por eyaculado también varió considerablemente, promediando 20.4 dosis.

Tabla 1. Análisis de las diferentes variables sobre las muestras analizadas.

Table 1. Analysis of the different variables on the samples analyzed.

Variable	Media	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
Cantidad eyaculado (ml)	270.6	76.6	50	465
Concentración / ml (pura)	277,858.5	92,765.3	90	510
Morfología (%)	90.9	4.5	80	100
Nº dosis obtenidas	20.4	4.8	6	31

Análisis de componentes principales (PCA). Se realizó un análisis de componentes principales (PCA) para examinar las relaciones entre las variables seminales.

La Tabla 2 muestra la varianza de cada componente principal, simplificando el conjunto de datos y extrayendo las interconexiones entre las variables seminales, la distribución de la varianza entre los componentes principales. El PC1 capturó el 41.7% de la varianza total, mientras que el PC2 añadió un considerable 36.44%. Esto significa que, con un 78.13% de la variabilidad acumulada explicada por estos dos primeros componentes, podemos inferir que la información crucial sobre la calidad seminal de los reproductores está predominantemente representada en estas dos dimensiones.

Tabla 2. Varianza de cada componente principal.

Table 2. Variance of each principal component.

Componente	Desviación Estándar	Proporción Varianza	Proporción Acumulada
PC 1	1.291	41.7	41.7
PC 2	1.207	36.44	78.13
PC 3	0.803	16.1	94.23
PC 4	0.48	5.77	100

En la Figura 2 se observa la contribución de las variables a los componentes principales.

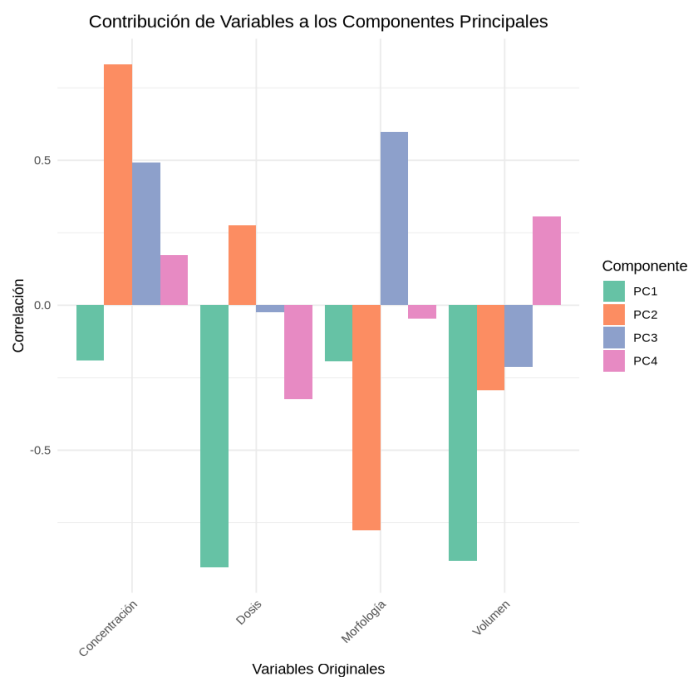


Figura 2. Contribución de las variables a los componentes principales.

Figure 2. Contribution of variables to the principal components.

Componente principal 1 (PC1). Este componente presenta fuertes correlaciones negativas con “Dosis” (aproximadamente -0.8) y “Volumen” (aproximadamente -0.75). “Concentración” y “Morfología” también contribuyen negativamente, aunque en menor medida (aproximadamente -0.3 y -0.35, respectivamente). Esto sugiere que PC1 captura una dimensión donde el aumento de “Dosis” y “Volumen” se asocia con valores más bajos en esta dirección del componente.

Componente principal 2 (PC2). Se puede observar una correlación positiva de “Concentración” con PC2 (aproximadamente 0.75), indicando que esta variable es un determinante de este componente. En contraste, “Morfología” presenta una fuerte correlación negativa (aproximadamente -0.7), mientras que “Dosis” y “Volumen” muestran correlaciones positivas y negativas moderadas, (aproximadamente 0.25 y -0.25).

Componente principal 3 (PC3). Las contribuciones de PC3 son de menor magnitud en comparación con los dos primeros componentes. “Dosis” y “Volumen” muestran correlaciones negativas moderadas (aproximadamente -0.4 y -0.4, respectivamente). “Concentración” y “Morfología” muestran correlaciones débiles, positiva y negativa.

Componente principal 4 (PC4). Este componente es influenciado por “Volumen”, que muestra una correlación positiva moderada (aproximadamente 0.3). Las correlaciones de las demás variables con PC4 son cercanas a cero o muy débiles, indicando una mínima contribución.

Análisis de correlación de variables con componentes principales. El análisis de componentes principales (PCA) deja ver las correlaciones entre las variables originales y los componentes principales, permitiendo una interpretación de las dimensiones subyacentes en los datos. El círculo de correlaciones de la Figura 3 muestra la relación entre las variables y las dos primeras dimensiones (Dim1 y Dim2), que explican el 41.7% y el 36.4% de la varianza total, respectivamente.

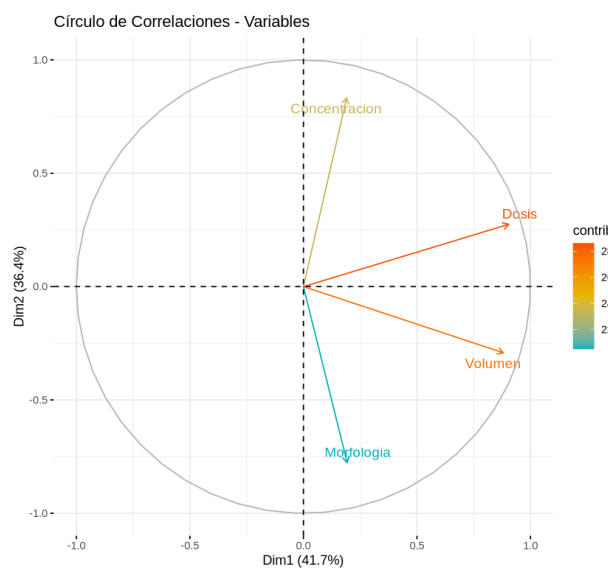


Figura 3. Correlaciones entre las variables originales y los componentes principales.
Figure 3. Correlations between the original variables and the principal components.

PC1 (Primer componente principal). El primer componente principal explica el 41.7% de la varianza total. Presenta una fuerte correlación negativa con el volumen de eyaculado (-0.88) y con el número de dosis obtenidas (-0.91), lo que indica que verracos con valores altos en PC1 tienden a producir menor volumen de semen y obtener menos dosis, y viceversa. Por lo tanto, PC1 representa la cantidad de semen producido y la eficiencia en la obtención de dosis.

PC2 (Segundo componente principal). El segundo componente principal explica el 36.44% de la varianza. Está altamente correlacionado de forma positiva con la concentración espermática (0.83) y negativamente con la morfología (-0.78). Esto sugiere que PC2 distingue entre animales con alta concentración espermática pero menor morfología y aquellos verracos con mejor morfología, pero menor concentración. Así, este componente refleja un eje que compara calidad celular frente a cantidad celular.

PC3 y PC4. Estos componentes explican conjuntamente el 21.86% restante de la varianza y muestran correlaciones moderadas o mixtas respecto a las variables originales. Su interpretación es menos relevante para la variabilidad principal, aunque pueden capturar patrones secundarios o atípicos presentes en los datos.

Distribución de individuos por grupo. La Figura 4 muestra esta distribución, donde cada punto representa un cerdo individual y las elipses corresponden a los intervalos de confianza (usualmente 95%) para cada grupo.

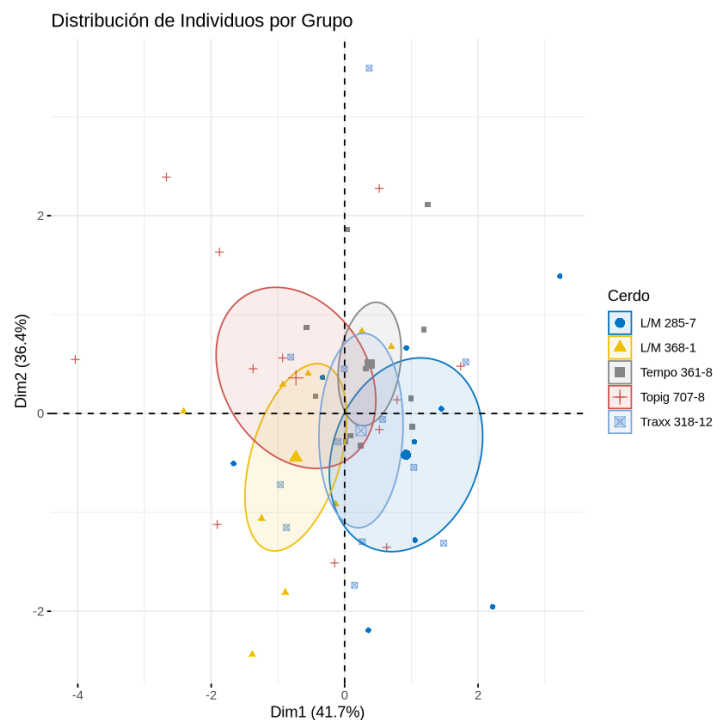


Figura 4. Distribución de individuos por grupo.

Figure 4. Distribution of individuals by group.

Se observó una tendencia de agrupación para cada uno de los cinco grupos de cerdos en distintas regiones del espacio PCA, lo que sugiere diferencias en las características analizadas entre ellos.

Sin embargo, el análisis mostró un solapamiento notable entre las elipses de confianza de varios grupos, indicando que, si bien existen diferencias promedio, los grupos no son completamente distinguibles basándose únicamente en los dos primeros componentes principales. Esto implica que ciertos individuos de diferentes grupos comparten características similares, resultando en una mezcla en el espacio multidimensional.

El grupo L/M 285-7 (círculos azules) mostró una dispersión considerable a lo largo del eje Dim1 positivo, con individuos extendiéndose hacia el cuadrante inferior derecho, y un solapamiento significativo con el grupo Traxx 318-12.

El grupo L/M 368-1 (triángulos amarillos) tendió a concentrarse en el cuadrante inferior izquierdo del gráfico, exhibiendo solapamiento con los grupos Topig 707-8 y Tempo 361-8.

El grupo Tempo 361-8 (cuadrados grises) se posicionó más centralmente, mostrando solapamiento con L/M 368-1, Topig 707-8 y L/M 285-7, sugiriendo características más “promedio” dentro de las variables evaluadas.

El grupo Topig 707-8 (cruces rojas) se localizó preferentemente en el cuadrante superior izquierdo, con algunos individuos notablemente distantes del centro grupal, y presentó solapamiento con L/M 368-1 y Tempo 361-8.

Finalmente, el grupo Traxx 318-12 (X azules claras) se concentró en el cuadrante inferior derecho, con un solapamiento pronunciado con L/M 285-7.

Identificación de individuos distintivos (Outliers/Atípicos). El gráfico PCA identificó individuos que se desviaban significativamente del centro de su propio grupo. Estos puntos, que representan características atípicas o sobresalientes en las variables analizadas, merecen una investigación más profunda:

Dentro del grupo Topig 707-8 (cruces rojas), se observaron varios individuos situados considerablemente por encima de la distribución principal de su grupo, lo que sugiere que poseen características distintivas o potencialmente seminales sobresalientes.

Un individuo del grupo L/M 285-7 (círculos azules) se posicionó marcadamente hacia la derecha en el eje Dim1, indicando una característica única dentro de su grupo.

Similarmente, se identificaron algunos puntos más alejados del núcleo en el grupo L/M 368-1 (triángulos amarillos).

Biplot (Variables e individuos). En la Figura 5 se observa una cierta separación entre los grupos de cerdos, representados por los diferentes colores y formas de los puntos. Aunque existe un solapamiento en las elipses de confianza, lo cual indica variabilidad dentro de los grupos, la dispersión de los puntos y la orientación de las elipses refuerzan la idea de que existen diferencias en las características reproductivas de los verracos.

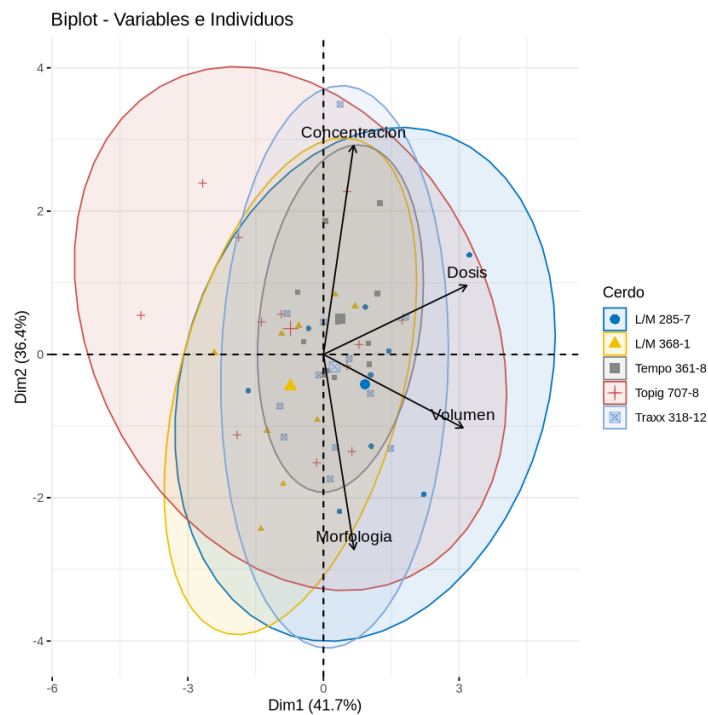


Figura 5. Identificación de individuos distintivos.

Figure 5. Identification of distinctive individuals.

Los cerdos que se encuentran más alejados del centro del biplot son aquellos que poseen valores más extremos en las variables medidas, es decir, son los que más contribuyen a la variabilidad general del conjunto de datos.

Considerando los scores de los individuos en ambos componentes principales (Dim1 y Dim2), que explican la mayor parte de la variabilidad, se construyó un ranking compuesto:

El reproductor Tempo 361-8 ocupa el primer lugar en el ranking compuesto, seguido de L/M 285-7 y Traxx 318-12. Estos animales presentan valores superiores en las variables que más contribuyen a la variabilidad total (principalmente volumen y dosis, pero también concentración y morfología).

Los reproductores con scores negativos, como Topig 707-8 y L/M 368-1, se sitúan en posiciones menos favorables, lo que indica que sus características seminales son menos destacadas en el contexto multivariado.

Esta clasificación multivariada es más robusta que una simple comparación de medias, ya que considera simultáneamente todas las variables relevantes y su relación entre sí.

Clasificación de reproductores: Análisis de conglomerados. Para identificar grupos homogéneos de reproductores según su perfil seminal, se aplicaron dos técnicas de análisis de conglomerados: jerárquico y k-means. Ambas metodologías permitieron agrupar a los individuos en función de la similitud de sus características seminales, facilitando la toma de decisiones en programas de selección y manejo. El análisis jerárquico, utilizando el método de Ward y distancia euclidiana, permitió visualizar la estructura de los grupos mediante un dendrograma. Este gráfico mostró cómo se agrupan los reproductores en diferentes niveles de similitud, ayudando a determinar el número óptimo de clústers.

Clasificación por K-Means y características seminales. Posteriormente, se aplicó el método de k-means para la formación de conglomerados, identificando tres grupos distintivos de reproductores, clasificados según su capacidad fecundante, volumen de eyaculado y número de dosis producidas. Los resultados se visualizan en la Figura 6 y se detallan a continuación:

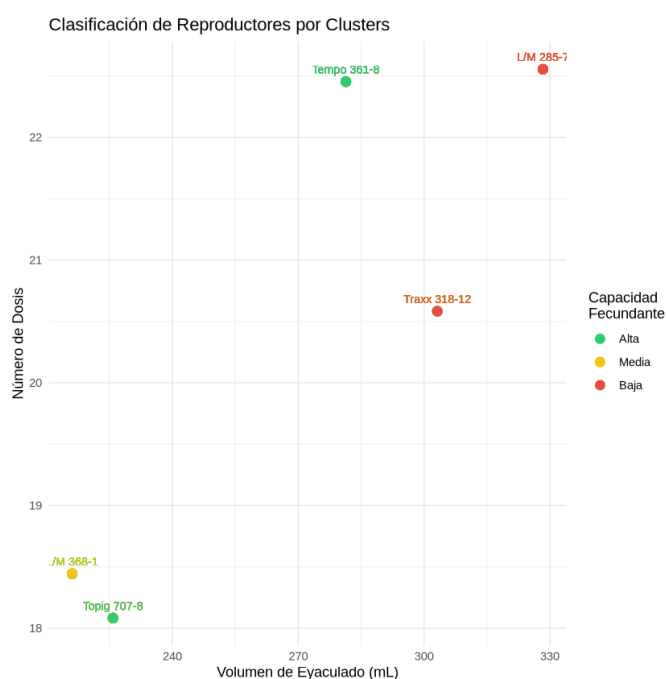


Figura 6. Clasificación según características seminales de los reproductores.

Figure 6. Classification according to seminal characteristics of the breeders

La Figura 6 refleja claramente la distribución de los reproductores en estos tres clústeres, evidenciando la relación entre el volumen de eyaculado, el número de dosis, la concentración espermática, la morfología y la capacidad fecundante. Esta clasificación proporciona una base sólida para la selección y el manejo de los reproductores en futuros programas de mejora, permitiendo estrategias diferenciadas para cada grupo con el fin de optimizar el rendimiento reproductivo general:

Grupo de alta capacidad fecundante (n=26). Este conglomerado se caracteriza por presentar un perfil seminal óptimo para la reproducción. Los reproductores de este grupo mostraron un volumen medio de eyaculado de 240.00 ± 66.86 mL y la mayor concentración espermática, con $305,730.77 \pm 85,095.03$ espermatozoides/mL. Además, la morfología espermática fue adecuada ($87.88 \pm 3.51\%$) y la producción de dosis se mantuvo en un rango medio-alto (20.42 ± 4.73 dosis). Este grupo representa a los reproductores más eficientes en términos de producción seminal y potencial reproductivo. Características principales: Concentración espermática óptima y producción de dosis eficiente.

Grupo de capacidad media (n=13). Este grupo se distingue por tener un volumen medio de eyaculado de 249.46 ± 58.71 mL. Si bien presentaron una excelente morfología espermática ($94.62 \pm 3.80\%$), su concentración espermática fue notablemente menor ($198,846.15 \pm 31,335.14$ espermatozoides/mL) y, consecuentemente, su producción de dosis fue la más baja de los tres grupos (16.00 ± 2.74 dosis). Características principales: Excelente morfología, pero con menor concentración espermática y producción de dosis.

Grupo de baja capacidad fecundante (n=14). Este conglomerado se caracteriza por el mayor volumen de eyaculado promedio (347.14 ± 55.56 mL) y la máxima producción de dosis (24.36 ± 2.62 dosis). La concentración espermática fue buena ($299,464.29 \pm 106,257.03$ espermatozoides/mL) y la morfología muy buena ($93.21 \pm 2.49\%$). A pesar de la alta producción de dosis, su clasificación como “baja capacidad fecundante” en el gráfico (Figura 1) sugiere que otros factores, o la relación entre las variables, impactan en su rendimiento reproductivo final. Características principales: mayor volumen de eyaculado y máxima producción de dosis.

La distribución espacial de los reproductores según su clasificación se puede observar en los siguientes gráficos:

Dispersión por volumen y número de dosis. La Figura 7 presenta un gráfico de dispersión que ilustra la distribución de los reproductores en función de dos variables clave: el volumen de eyaculado (mL) y el número de dosis producidas. Este gráfico visualiza la agrupación resultante del análisis de conglomerados, con elipses de confianza del 95% que delimitan la distribución de cada clúster.

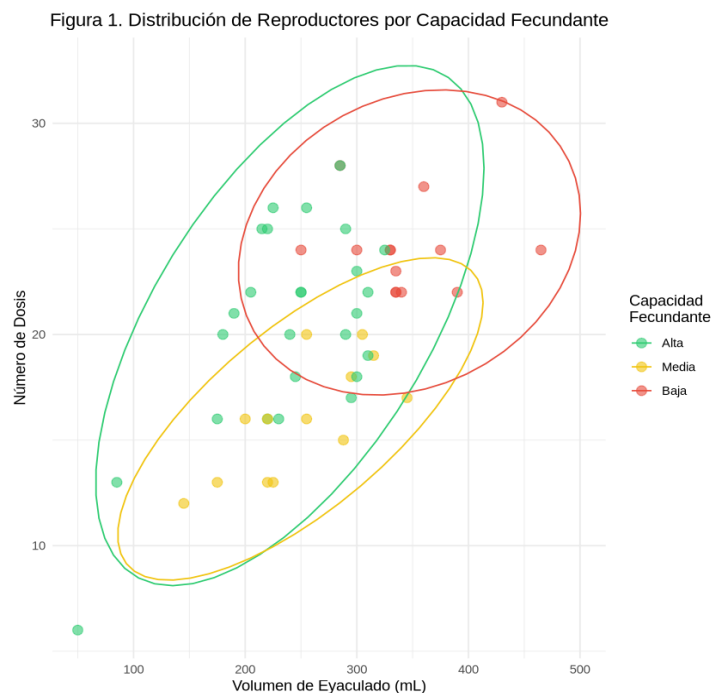


Figura 7. Distribución de reproductores por capacidad fecundante.

Figure 7. Distribution of breeders by fertilizing capacity.

Se observa una clara diferenciación entre los tres grupos basados en su capacidad fecundante:

Grupo de alta capacidad fecundante (verde). Este grupo se posiciona predominantemente en la parte superior-derecha del gráfico, indicando consistentemente valores superiores tanto en volumen de eyaculado como en número de dosis. La elipse verde encapsula a la mayoría de los reproductores con un alto rendimiento seminal, destacándose por su eficiencia productiva.

Grupo de capacidad media (amarillo). Los reproductores de este grupo se distribuyen en un rango intermedio, con una elipse que abarca valores de volumen de eyaculado y número de dosis más bajos en comparación con el grupo de alta capacidad, pero superiores a los reproductores de menor rendimiento.

Grupo de baja capacidad fecundante (rojo). Este grupo se extiende sobre un amplio rango de volúmenes de eyaculado, incluyendo algunos de los volúmenes más altos, pero su característica distintiva es el número de dosis consistentemente más bajo en relación con el volumen de eyaculado producido.

La superposición de las elipses de confianza del 95% entre los grupos indica que, si bien hay una tendencia de agrupación, existen reproductores en las zonas limítrofes que comparten características con más de un clúster. No obstante, la visualización global confirma la efectividad del análisis de conglomerados para identificar y diferenciar a los reproductores en categorías con perfiles seminales distintos, lo que es fundamental para estrategias de manejo y selección específicas.

Para una comprensión más profunda de las diferencias entre los grupos identificados, la Figura 8 presenta diagramas de caja (box plots) que muestran la distribución de los cuatro parámetros seminales clave: Volumen de Eyaculado (mL), Concentración (spz/mL), Morfología (%) y Número de Dosis Obtenidas.

Estos diagramas permiten visualizar de manera efectiva la variabilidad dentro de cada grupo, las diferencias significativas entre ellos, la presencia de valores atípicos, y la posición de las medianas y rangos intercuartílicos.

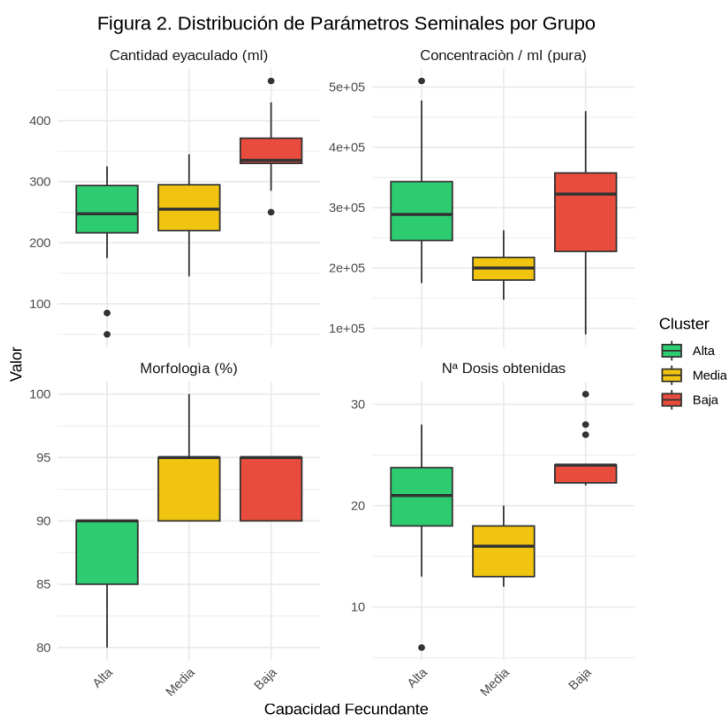


Figura 8. Distribución de parámetros seminales por grupo.

Figure 8. Distribution of seminal parameters by group.

Cantidad de eyaculado (mL). El grupo de baja capacidad (rojo) muestra claramente la mediana y el rango intercuartílico más altos para el volumen de eyaculado, lo que confirma su característica de producir un mayor volumen, tal como se indicó en los resultados descriptivos.

Los grupos de alta y media capacidad (verde y amarillo, respectivamente) presentan medianas y rangos intercuartílicos de volumen de eyaculado similares y notablemente inferiores al grupo de baja capacidad, aunque con el grupo de alta capacidad mostrando una ligera tendencia a un volumen medio-alto dentro de su rango.

Concentración (spz/mL). El grupo de alta capacidad (verde) exhibe la mediana más alta y un rango intercuartílico elevado en concentración espermática, lo que es congruente con su designación de “Alta Capacidad Fecundante”.

El grupo de baja capacidad (rojo) también presenta una concentración media-alta, cercana a la del grupo de Alta Capacidad, aunque con una mayor dispersión.

En contraste, el grupo de capacidad media (amarillo) posee la concentración espermática más baja, con una mediana significativamente inferior a los otros dos grupos, lo que es un factor clave en su menor producción de dosis.

Morfología (%). Los grupos de capacidad media y baja capacidad (amarillo y rojo) demuestran una morfología espermática excelente y muy similar, con medianas y rangos intercuartílicos muy altos (por encima del 90%).

El grupo de alta capacidad (verde), aunque con valores de morfología adecuados, presenta una mediana y un rango intercuartílico ligeramente inferiores a los otros dos grupos, lo que sugiere que su ventaja reproductiva no radica únicamente en este parámetro.

Número de dosis obtenidas. El grupo de alta capacidad (verde) y el grupo de baja capacidad (rojo) muestran las medianas más altas y rangos intercuartílicos que se solapan en la producción de dosis, indicando que ambos grupos son los que más dosis pueden generar, con el grupo de baja capacidad alcanzando valores máximos más elevados.

El grupo de capacidad media (amarillo) se diferencia claramente por tener la mediana y el rango intercuartílico más bajos en cuanto a la producción de dosis, lo cual es esperable dada su menor concentración espermática.

Rankin. La Tabla 3 muestra el ranking de los reproductores según el análisis de componentes principales (PCA), junto con sus valores promedio de volumen de eyaculado, concentración, morfología y dosis generadas. El "Score PCA" es un valor compuesto que resume el desempeño multivariado de cada animal, permitiendo una comparación objetiva y global.

Tabla 3. Ranking de los reproductores según el análisis de componentes principales (PCA).

Table 3. Ranking of players according to principal component analysis (PCA).

Reproductor	Volumen ml	Concentración mill	Morfología percent	Dosis	Score_pca	Ranking
Tempo 361-8	281.4	300.2	89.1	22.5	1.71	1
L/m 285-7	328.3	278.9	93.3	22.6	0.374	2
Traxx 318-12	303.2	249.2	90	20.6	0.001	3
Topig 707-8	225.8	303.2	90	18.1	-0.128	4
L/m 368-1	216.1	253.9	93.3	18.4	-1.957	5

Como se observa en la Tabla 3, el reproductor Tempo 361-8 encabeza el ranking, lo que indica que posee el perfil seminal más destacado considerando todas las variables relevantes. Le siguen L/M 285-7 y Traxx 318-12 en el segundo y tercer puesto, respectivamente, consolidando su posición como reproductores de alto rendimiento.

A continuación, la Figura 9 de radar ilustra visualmente el perfil seminal de cada reproductor, permitiendo comparar de manera intuitiva sus fortalezas y debilidades en cada variable:

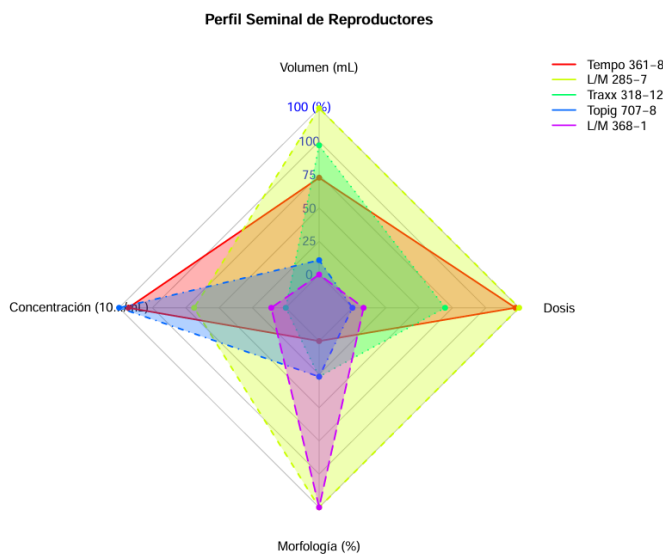


Figura 9. Perfil seminal de los reproductores.

Figure 9. Seminal profile of the breeders.

Cada línea de color en el gráfico de radar representa un reproductor específico, y su extensión desde el centro hacia el borde indica el desempeño en cada variable estandarizada (normalizada).

El perfil de Tempo 361-8 (línea roja) se extiende significativamente hacia el exterior en todas las dimensiones, reflejando su primer puesto en el ranking.

L/M 285-7 (línea gris) y Traxx 318-12 (línea verde) también muestran polígonos amplios, aunque con algunas variaciones respecto a Tempo 361-8, lo que explica sus posiciones subsiguientes en el ranking. Por ejemplo, L/M 285-7 destaca en volumen, morfología y dosis, mientras que Traxx 318-12 tiene un perfil ligeramente más moderado en concentración.

En contraste, los perfiles de Topig 707-8 (línea azul) y L/M 368-1 (línea púrpura) son más pequeños y se mantienen más cerca del centro del radar, indicando un rendimiento general inferior en la mayoría de los parámetros evaluados, lo cual concuerda con sus posiciones en los últimos lugares del ranking.

Índice compuesto de fertilidad. Para sintetizar la calidad fecundante general de los reproductores y obtener una medida unificada de su potencial reproductivo, se desarrolló un "Índice Compuesto de Fertilidad" utilizando la primera componente principal (PC1) derivada del análisis multivariado de los parámetros seminales. Este score de PC1 es un indicador directo: cuanto mayor es su valor, mejor es la calidad fecundante del reproductor, integrando de forma ponderada el volumen de eyaculado, la concentración espermática, la morfología y el número de dosis obtenidas.

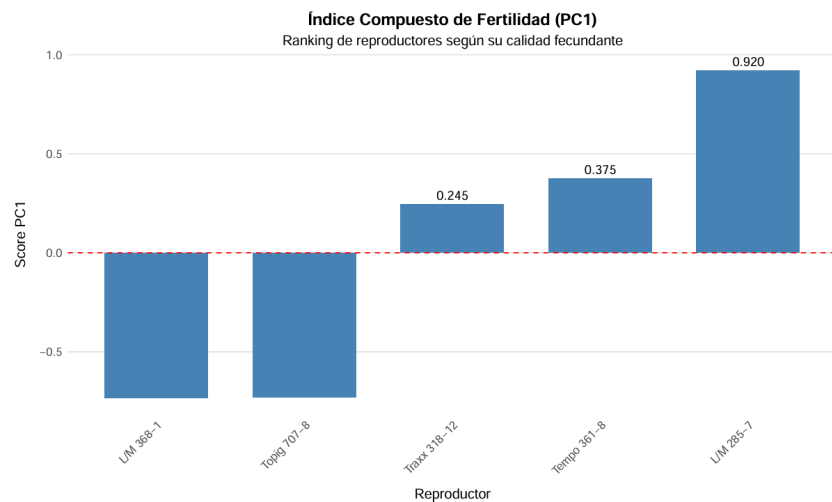


Figura 10. Índice compuesto de fertilidad para los reproductores.

Figure 10. Composite fertility index for breeders.

L/M 285-7 lidera el ranking de calidad fecundante con un Score PC1 de 0.920. Este reproductor se destaca consistentemente por su alto volumen de eyaculado (328.3 mL) y su elevada producción de dosis (22.6), siendo el de mayor potencial reproductivo según las variables analizadas.

Tempo 361-8 ocupa el segundo lugar con un Score PC1 de 0.375. Este reproductor demuestra un excelente balance entre todas las variables seminales, lo que lo posiciona como un animal de muy alta calidad fecundante, aunque su perfil es ligeramente diferente al de L/M 285-7.

Traxx 318-12 se ubica en la tercera posición con un Score PC1 de 0.245. Este reproductor también se encuentra por encima del promedio, indicando una buena calidad fecundante, aunque con un potencial ligeramente inferior a los dos primeros.

En contraste, los reproductores Topig 707-8 y L/M 368-1 muestran Scores PC1 negativos (aproximadamente -0.75 y -0.7 respectivamente), lo que indica que su calidad fecundante está por debajo del promedio del grupo evaluado. Estos reproductores presentan características seminales que, en conjunto, contribuyen a un menor potencial reproductivo.

Movilidad espermática. Finalmente, se realizó un análisis descriptivo de la movilidad espermática y en términos generales, muy buena en aproximadamente el 90% de las muestras evaluadas. De las 53 muestras evaluadas y procesadas, 48 de ellas resultaron con una movilidad muy buena lo que indica un alto nivel de calidad en este parámetro.

DISCUSION

El presente estudio permitió caracterizar y clasificar objetivamente a los verracos reproductores mediante la evaluación integrada de parámetros seminales clave, confirmando la hipótesis de que existen individuos con cualidades reproductivas destacadas. Los resultados revelaron una marcada variabilidad en el volumen de eyaculado (50–465 mL), concentración espermática (90,000–510,000 spz/mL) y número de dosis obtenidas (6–31), lo que concuerda con estudios previos en poblaciones porcinas comerciales (18). Esta heterogeneidad subraya la importancia de implementar estrategias de selección basadas en análisis multivariados para optimizar la eficiencia reproductiva. Por tanto, estas líneas presentan ventajas en cuanto al volumen del líquido seminal que produce. Valverde et al (19), considera que el volumen del eyaculado varía normalmente dentro del rango 100 a 300 ml, pero esto se puede ver influenciado por una incorrecta colección del eyaculado, esto puede darse por una presión inadecuado y constante al momento de sostener el espiral peneano en todo el momento de la eyaculación. Además, una incorrecta colección del eyaculado puede llevar a los verracos a presentar molestias, dolor y olores fuera de lo normal, que muchas veces se vuelven procesos infecciosos de los órganos genitales. Almaguer et al (9), consideran que variables como volumen, concentración espermática, frecuencia de extracción también se pueden ver influenciadas por la calidad de la alimentación, el manejo de los animales en la granja, la hora de colección de semen y líneas de cerdos investigados. Todos estos elementos influyen en la producción y calidad espermática de las muestras evaluadas. Además, el eyaculado colectado entre más rápido se evalúe (dentro de los 30 minutos recién colectada la muestra) menos variación se presentarán en las variables de interés.

La cantidad total de espermatozoides por eyaculado constituye un parámetro de gran relevancia, ya que refleja, en machos activos, tanto la capacidad de producción gonadal como el almacenamiento funcional a nivel epididimario (20). Según Córdoba et al (21), la concentración espermática promedio oscila entre 150 y 205×10^6 espermatozoides/mL de eyaculado. No obstante, Williams y Fernández (22) reportaron valores considerablemente más altos, con concentraciones de 700 a 800×10^6 /mL en verracos. Estudios más recientes, aunque muestran cifras más moderadas, mantienen valores comparables. Por ejemplo, Chu et al. (23) estiman concentraciones medias entre 200 y 300×10^6 /mL, dentro de los rangos comúnmente utilizados para dosis seminales en inseminación artificial. De manera similar, Hallberg y Morrell (24) reportan valores concordantes en contextos comerciales. En contraste, Kondracki y Górski (25) documentan concentraciones más elevadas, cercanas a 529×10^6 /mL, particularmente en razas como Duroc, aunque reconocen que estos niveles son menos frecuentes bajo condiciones generales de producción. Colenbrander y Kempt (26), aduce que la valoración de la concentración espermática es fundamental, debido a que junto al volumen del eyaculado se podrá determinar cuántas dosis seminales podrán prepararse para la inseminación artificial (IA). No obstante, hay algunas condiciones que afectan la producción espermática como la época del año, la luminosidad, la temperatura, entorno social, la nutrición, la raza o línea, la edad, el tamaño de los testículos y la salud de los animales.

La cantidad de espermatozoides por dosis modificará de forma directa el rendimiento del eyaculado (27). Barquero et al (28), sugiere que se debe aprovechar al máximo el verraco de la granja para que se fundamente el recurso; para ello, al obtener eyaculados de cerdos de alto rango genético con cantidades adecuadas de espermatozoides en la dosis seminal puede ser utilizado para inseminar de 10 a 20 cerdas partiendo de un único eyaculado. Pinart y Morrell (29) subrayan que la calidad del semen de verraco está altamente influenciada por el manejo térmico durante su conservación. Henning et al (30) demostraron que temperaturas entre 17°C y 25°C permiten mantener la viabilidad y el estado energético del esperma, mientras que valores por debajo de 15°C provocan daños celulares significativos. Por ello, una vez cerradas y etiquetadas, las dosis seminales deben conservarse a temperatura controlada según las recomendaciones del fabricante. Además, antes de la inseminación, deben aclimatarse gradualmente hasta alcanzar los 38 °C, temperatura corporal de la cerda en celo, evitando así fluctuaciones que comprometan su fertilidad.

La evaluación morfológica de los espermatozoides se considera una contribución muy importante para determinar la fertilidad del semental. Las altas incidencias de los defectos morfológicos se asocian con problemas de fertilidad. Estos defectos incluyen alteraciones de la cabeza, parte intermedia y cola del espermatozoide (31). Se considera que un espermatozoide que tiene anomalías morfológicas cuando presenta alguna o varias de sus estructuras alteradas; por ejemplo, acrosoma dañado, cola enrollada, más de una cola, cabeza redonda o puntiaguda, pieza media muy corta o engrosada, entre otras. Las anomalías que con mayor frecuencia suelen aparecer son las correspondientes a la presencia

de gotas citoplasmáticas tanto proximales como distales, así como las colas en látigo. En ambos casos se trata de malformaciones de tipo secundario que se producen durante la maduración de los espermatozoides en el epidídimo. Un eyaculado normal no debe contener más del 10% de espermatozoides con alguna anomalía, principalmente de la cabeza, ya que las malformaciones admisibles para la cola pueden ser del 20% (21).

Córdova et al (21), estiman que la movilidad espermática, debe evaluarse cuantitativa y cualitativamente, en donde se valora el porcentaje de espermatozoides en movimiento (de 0 a 100 %) y la calidad (vigor) en una escala de 0 a 5, según el tipo de movimiento: [0] inmóviles o muertos; [1] girando entre sí, sin movimiento progresivo; [2] movimientos anormales, en ocasiones progresivo; [3] con movimiento progresivo lento y ondulatorio; [4] con movimiento progresivo rápido y; [5] con movimiento progresivo rectilíneo muy rápido. Compagnoni et al (27), Balogh et al (32), sugieren que un eyaculado con menos del 60% de motilidad no debe emplearse en inseminación artificial; así mismo, Henning et al (27), estima que una disminución de la temperatura conduce a una disminución de la movilidad y otros efectos indeseables en los espermatozoides. Si hay movimiento espermático anormal (movimientos en círculo, adhesión al vidrio, aglutinación) detalles referentes a las características de la movilidad individual y colectiva se considera comprometida la fertilidad de las muestras/verracos.

La cantidad de dosis generadas en el estudio indica que la concentración de espermatozoides en las dosis de semen porcino es un factor determinante en la fertilidad. Muestras con mayor concentración mostraron una mejor preservación de la motilidad espermática a lo largo del tiempo, lo cual es fundamental para una fecundación exitosa. Al analizar la gráfica, se observa una disminución más pronunciada en las muestras de baja concentración. Además, considera si hay diferencias significativas entre los volúmenes de las dosis y si existe una interacción entre concentración y volumen en cuanto a su efecto sobre la motilidad. Al relacionar estos resultados con otros parámetros seminales como la viabilidad y la morfología, se puede obtener una visión más completa del impacto de la concentración espermática en la calidad seminal y, por ende, en la fertilidad porcina. Un estudio reciente indica que la concentración de espermatozoides en las dosis de semen es un factor clave que afecta la fertilidad porcina. Se evaluaron dosis con concentraciones de 1,5 mil millones de células, distribuidas en volúmenes de 45 y 90 mL. Los resultados mostraron que las dosis de baja concentración (16.7×10^6 células/mL) perdieron motilidad tres veces más que las de alta concentración (33.3×10^6 células/mL) a las 72 horas, lo que sugiere que una mayor concentración puede mejorar la eficacia de la inseminación artificial (33).

El Análisis de Componentes Principales (PCA) identificó dos dimensiones críticas: PC1, asociada a la producción seminal (volumen y dosis), y PC2, vinculada a la calidad espermática (concentración vs. morfología). Esta dualidad refleja la necesidad de equilibrar cantidad y calidad en la selección de reproductores, tal como señalan Zhou et al (34), quienes destacan que ambos factores son predictores clave del éxito en inseminación artificial. La superioridad del reproductor Tempo 361-8 en el ranking PCA (Score: 1.71) respalda su perfil seminal integral, con valores destacados en volumen (281.4 mL), concentración (300,200 spz/mL) y dosis (22.5), lo que lo posiciona como un candidato ideal para programas de mejora genética.

La clasificación en conglomerados reforzó estos hallazgos al agrupar a los verracos en tres perfiles:

Alta capacidad fecundante (n=26): Destacó por su alta concentración espermática (305.731 ± 85.095 spz/mL) y producción eficiente de dosis (20.4 ± 4.7), similar a lo reportado por Wang et al (2021), quienes asociaron estos parámetros con mayores tasas de fertilidad en campo.

Capacidad media (n=13): Aunque mostró excelente morfología ($94.6 \pm 3.8\%$), su baja concentración (198.846 ± 31.335 spz/mL) limitó la producción de dosis, sugiriendo que la calidad morfológica no compensa la escasez de espermatozoides funcionales.

Baja capacidad/Alta producción (n=14): Combinó alto volumen (347.1 ± 55.6 mL) con buena concentración (299.464 ± 106.257 spz/mL), pero su clasificación como "baja capacidad" podría deberse a interacciones no lineales entre variables, como la dilución del semen en dosis, un factor crítico mencionado por (35).

Desde una perspectiva práctica, estos resultados permiten ajustar el manejo reproductivo según el perfil de cada grupo. Por ejemplo, los verracos de alta capacidad podrían priorizarse en programas de inseminación frecuente (2 colectas/semana), mientras que los de capacidad media requerirían monitoreo nutricional y ambiental para mejorar su concentración espermática. Asimismo, la identificación de individuos atípicos (como el cerdo "L/M 285-7" con volumen extremo) resalta la utilidad del PCA para detectar ejemplares con características excepcionales, útiles en programas de cruzamiento selectivo.

Si bien el estudio aporta herramientas valiosas para la selección genética, es crucial considerar limitaciones. La superposición de grupos en el espacio PCA sugiere que factores no medidos (genéticos, epigenéticos o de manejo) podrían influir en la calidad seminal. Además, la evaluación en un solo momento limita la comprensión de la estabilidad temporal de estos parámetros. Futuras investigaciones deberían incorporar datos longitudinales y marcadores moleculares para enriquecer los modelos predictivos.

En conclusión, la integración de métodos estadísticos multivariados (PCA y clustering) permite una selección objetiva de reproductores porcinos, optimizando la eficiencia reproductiva. La confirmación de la hipótesis —con individuos como Tempo 361-8 demostrando un perfil seminal superior— refuerza la viabilidad de estas herramientas en granjas comerciales. Sin embargo, su éxito dependerá de un monitoreo continuo y de adaptar las estrategias a la dinámica intrínseca de los parámetros seminales.

El análisis de componentes principales permitió identificar a los mejores reproductores considerando simultáneamente todas las variables de calidad seminal. El reproductor Tempo 361-8 obtuvo el mayor score compuesto en el espacio de los dos primeros componentes principales, seguido de L/M 285-7 y Traxx 318-12.

Estos resultados sugieren que estos animales presentan un perfil seminal superior, caracterizado principalmente por un mayor volumen de eyaculado y mayor número de dosis generadas, así como valores favorables en concentración y morfología.

Futuras investigaciones deberán evaluar la posible existencia de diferencias significativas en la calidad espermática entre líneas genéticas seleccionadas para funciones maternas y aquellas orientadas a la fase de finalización.

Los avances en el estudio de la calidad seminal y las técnicas de inseminación artificial porcina representan una oportunidad para optimizar la eficiencia reproductiva, tanto en explotaciones comerciales como en granjas de alto valor genético, como las del INTA. Los resultados de este estudio demuestran que los verracos de las líneas porcinas evaluadas en la granja de alta genética del INTA en Chontales presentan una calidad seminal adecuada, conforme a los parámetros de referencia para la especie. Por lo tanto, estos ejemplares son aptos para su inclusión siempre bajo monitoreo periódico en programas de mejora genética y reproducción asistida, garantizando así estándares óptimos de productividad.

Conflicto de intereses

Los autores manifiestan no tener ningún conflicto de intereses.

Financiación

Además, agradecemos por su generoso apoyo al Instituto Nicaragüense de Tecnología Agropecuaria (INTA), delegación Chontales por facilitar insumos y reactivos para el análisis y procesamiento de muestras y a la Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua (UNAN Managua) a través de su Centro Universitario Regional (CUR Chontales) por brindar las condiciones de laboratorio, equipos y cristalería para análisis y procesamiento de muestras recolectadas.

Agradecimientos

Se reconoce con especial atención al personal técnico de la Granja de Alta Genética Porcina del Instituto Nicaragüense de Tecnologías Agropecuarias (INTA) delegación en Chontales, estudiantes de la carrera Ingeniería Agronómica que participaron en el análisis, evaluación y procesamiento del semen porcino y al Centro Regional Universitario de la UNAN Managua en Chontales.

REFERENCIAS

1. FAO, FIDA, OMS, PMA, UNICEF. El estado de la seguridad alimentaria y la nutrición en el mundo 2023: urbanización, transformación de los sistemas agroalimentarios y dietas saludables a lo largo del continuo rural-urbano. Roma, Italia; 2023. <https://doi.org/10.4060/cc3017es>
2. CEPAL, FAO, IICA. Perspectivas de la agricultura y del desarrollo rural en las Américas: una mirada hacia América Latina y el Caribe 2023–2024. San José (CR): IICA; 2023. <https://hdl.handle.net/11362/69183>

3. Cane F, Pereyra N, Cane V, Marini P, Teijeiro JM. Mejoramiento del porcentaje de parición mediante el uso de inseminación artificial en cerdas. *Revista mexicana de ciencias pecuarias*. 2019; 10(3):583-594. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v10i3.4772>
4. Bortolozzo FP, Zanin GP, Chris TS, Rech RD, Ulguim RdR, Gonçalves Mellagi AP. Artificial insemination and optimization of the use of seminal doses in swine. *Animal Reproduction Science*. 2024; 269:107501. <https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2024.107501>
5. Roppa L, Duarte ME, Kim SW. Pig production in Latin America. *Animal Bioscience*. 2024; 37(4):786-793. <https://doi.org/10.5713/ab.23.0453>
6. Córdova I, Ruiz LCG, Xolalpa C, Córdova JMS, Córdova JCA. Biotecnologías de reproducción animal con posibilidad de aplicación para optimizar el potencial reproductivo y productivo de los animales. Una revisión. *Revista Complutense de Ciencias Veterinarias*. 2011; 5(2):1-10. https://doi.org/10.5209/rev_RCCV.2011.v5.n2.36938
7. Rodríguez AL, Van Soom A, Arsenakis I, Maes D. Boar management and semen handling factors affect the quality of boar extended semen. *Porcine health management*. 2017; 3(1):1-12. <https://doi.org/10.1186/s40813-017-0062-5>
8. Herrera Vargas D, Castaño Escobar M, Arcila Dávila D, López Pérez J, Cardona Maya W, Cardona Cadavid H. Análisis de la calidad seminal de machos caprinos con métodos convencionales y citometría de flujo. *Rev Colomb Cienc Pecu*. 2015; 28:38-57.
9. Almaguer Pérez Y, Font Puente H, Rosell Pardo R, Quirino CR, Montes Torres I. Evaluación de la calidad seminal en sementales porcinos en un Centro de Inseminación Artificial. *Red Vet*. 2015; 16(7).
10. Valverde A, Barquero V, Carvajal V. Applied biotechnology to the study of the boar semen motility. *Agron. Mesoam*. 2021; 32(2):662-680. <http://dx.doi.org/10.15517/am.v32i2.40628>
11. Llamas PJ, García FA. Puntos de control en la elaboración de dosis seminales: concentración espermática. *3tres3*. 2017. https://www.3tres3.com/latam/articulos/puntos-de-control-en-la-elaboracion-de-dosis-seminales-concentracion_11981/
12. García Casado P, López C, Pérez LLano B, Hernández R, Ibáñez J, Gosálvez J. Mejora de la calidad seminal en inseminación artificial. *Mundo Ganadero*. 2010; 225:28-33. https://www.adiveter.com/ftp_public/A3190210.pdf
13. Córdova Izquierdo A, Pérez Gutiérrez JF, Méndez Hernández W, Villa Mancera AE, Huerta Crispín R. Obtención, evaluación y manipulación del semen de verraco en una unidad de producción mexicana. *Revista Veterinaria*. 2015; 26(1):69-74. <https://doi.org/10.30972/vet.261253>
14. R Core Team. A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. 2024. Disponible en: <https://www.R-project.org/>
15. Jolliffe T, Cadima J. Principal component analysis: a review and recent developments. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2016; 374(2065):1-16. <https://doi.org/10.1098/rsta.2015.0202>
16. Murtagh F, Legendre P. Ward's Hierarchical Agglomerative Clustering Method: Which Algorithms Implement Ward's Criterion?. *J Classif*. 2014; 31(3):274-295. <https://doi.org/10.1007/s00357-014-9161-z>
17. MacQueen J. Some Methods for Classification and Analysis of Multivariate Observations. En *Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*. 1967; 1:281-297. <https://projecteuclid.org/search?author=J.MacQueen>
18. Paschoal AF, Luther AM, Jakop U, Schulze M, Bortolozzo FP, Waberski D. Factors influencing the response of spermatozoa to agitation stress: Implications for transport of extended boar semen. *Theriogenology*. 2021; 175:54-60. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2021.08.033>

19. Valverde Abarca A, Madrigal Valverde M, Camacho Calvo M, Zambrana Jiménez A, López L. Efecto de la composición racial sobre la calidad espermática de verracos. *Agronomía Mesoamericana*. 2018; 29(3):485-506. <https://doi.org/10.15517/ma.v29i3.32445>
20. Amann RP. A critical review of methods for evaluation of spermatogenesis from seminal characteristics. *Journal of Andrology*. 1981; 2(1):37-58. <https://doi.org/10.1002/j.1939-4640.1981.tb00595.x>
21. Córdova Izquierdo A, Córdova Jiménez CA, Córdova Jiménez MS. Control reproductivo del verraco. *Revista Veterinaria*. 2007; 18(1):65-69. <https://doi.org/10.30972/vet.1811929>
22. Williams SI, Fernández V. Evaluación, procesamiento y conservación del semen. Inseminación artificial. En: Williams S, editor. *Atlas de reproducción porcina*. Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Inter-Médica; 2015.
23. Chu FH, Chen YH, Kang TC, Chen LR, Herbie Lin HL. A simple and rapid evaluation of boar sperm quality using the resazurin colorimetric assay. *Animal Reproduction*. 2025; 22(1). <https://doi.org/10.1590/1984-3143-AR2024-0005>
24. Hallberg I, Morrell JM, Malaluang P, Johannisson A, Sjunnesson Y, Laskowski D. Sperm quality and in vitro fertilizing ability of boar spermatozoa stored at 4 °C versus conventional storage for 1 week. *Frontiers in Veterinary Science*. 2024; 11(1444550). <https://doi.org/10.3389/fvets.2024.1444550>
25. Kondracki , Górski. Analysis of factors of variation in characteristics of boar ejaculates. *Animals*. 2025; 15(14):2043. <https://doi.org/10.3390/ani15142043>
26. Colenbrander B, Kempt B. Factors influencing semen quality in pigs. *J. Reprod. Fert. Suppl*. 1990; 40:105-115. <https://www.bioscioproceedings.org/BP/0013/bp0013cpr8.pdf>
27. Compagnoni MV, Tittarelli CM, Williams SI. Artificial insemination in the swine species: inseminating dose related to the deposition place. *Analecta Veterinaria*. 2019; 39(2):33-46. <https://doi.org/10.24215/15142590e041>
28. Barquero V, Roldan ERS, Soler C, Vargas-Leitón B, Sevilla F, Camacho M, et al. Relationship between fertility traits and kinematics in clusters of boar ejaculates. *Biology*. 2021; 10(595). <https://doi.org/10.3390/biology10070595>
29. Pinart E, Morrell JM. Editorial: Factors affecting boar sperm preservation and quality. *Frontiers in Veterinary Science*. 2023; 10:1-3. <https://doi.org/10.3389/fvets.2023.1218940>
30. Henning H, Nguyen QT, Wallne U, Waberski D. Temperature limits for storage of extended boar semen from the perspective of the sperm's energy status. *Frontiers in Veterinary Science*. 2022; 9:1-12. <https://doi.org/10.3389/fvets.2022.953021>
31. Del Valle Rodríguez A. Evaluación de la calidad espermática de sementales porcinos. *REDVET*. 2017; 18(10):1-17.
32. Balogh E, Dálnoki AB, Rózsa L, Debnár VJ, Varga-Balogh O, Rátky J, et al. Evaluation of porcine semen quality by portable and desktop CASA systems. *Acta Veterinaria Hungarica*. 2020; 68(2):197-199. <https://doi.org/10.1556/004.2020.00023>
33. Quirino M, Nunes Pereira V, Costa Tamanini MdS, Ulguim RdR, Schulze M, Gonçalves Mellagi AP, et al. Sperm concentration of boar semen doses and sperm quality: Novel perspectives based on the extender type and sperm resilience. *Animal Reproduction Science*. 2023; 255:107293. <https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2023.107293>
34. Han H, Zhou Y, Xiong B, Zhong R, Jiang Y, Sun H, et al. Alginate oligosaccharides increase boar semen quality by affecting gut microbiota and metabolites in blood and sperm. *Frontiers in Microbiology*. 2022; 13:01-13. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.982152>
35. Waberski D, Luther AM. Boar semen storage at 5 °C for the reduction of antibiotic use in pig insemination: Pathways from science into practice. *Animal Reproduction Science*. 2024; 269(107486). <https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2024.107486>