

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



LA SUPLEMENTACIÓN CON NUTRACÉUTICOS EN MACHOS OVINOS
ALIMENTADOS CON SOBRANTE DE DIETA DE VACAS LECHERAS MEJORA
CARACTERÍSTICAS CORPORALES, METABÓLICAS Y REPRODUCTIVAS

Tesis

Que presenta ANDRÉS JUNIOR RODRÍGUEZ SÁNCHEZ
como requisito parcial para obtener el Grado de
DOCTOR EN CIENCIAS EN PRODUCCIÓN AGROPECUARIA

Torreón, Coahuila

Diciembre, 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



LA SUPLEMENTACIÓN CON NUTRACÉUTICOS EN MACHOS OVINOS
ALIMENTADOS CON SOBRANTE DE DIETA DE VACAS LECHERAS MEJORA
CARACTERÍSTICAS CORPORALES, METABÓLICAS Y REPRODUCTIVAS

Tesis

Que presenta ANDRÉS JUNIOR RODRÍGUEZ SÁNCHEZ
como requisito parcial para obtener el Grado de
DOCTOR EN CIENCIAS EN PRODUCCIÓN AGROPECUARIA



Dra. Ma. de los Angeles De Santiago Miramontes
Director (UAAAN)



Ph.D. César Alberto Meza Herrera
Co-Director (UACH - URUZA)

Torreón, Coahuila

Diciembre, 2025


LA SUPLEMENTACIÓN CON NUTRACÉUTICOS EN MACHOS OVINOS
ALIMENTADOS CON SOBRANTE DE DIETA DE VACAS LECHERAS MEJORA
CARACTERÍSTICAS CORPORALES, METABÓLICAS Y REPRODUCTIVAS

Tesis


Elaborada por ANDRÉS JUNIOR RODRIGUEZ SÁNCHEZ como requisito parcial
para obtener el grado de Doctor en Ciencias en Producción Agropecuaria con la
supervisión y aprobación del Comité de Asesoría



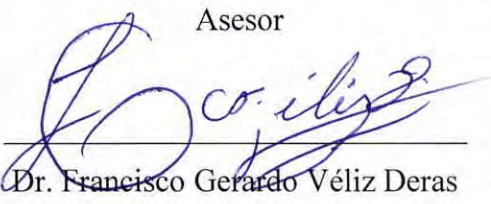
Dra. Ma. de los Angeles De Santiago Miramontes
Director de Tesis




Ph.D. César Alberto Meza Herrera
Asesor



Dr. Oscar Ángel García
Asesor




Dr. Francisco Gerardo Véliz Deras
Asesor




Dr. Alan Sebastián Alvarado Espino
Asesor



Dr. Jorge Arturo Bustamante Andrade
Asesor



Dra. Dalia Ivette Carrillo Moreno
Jefe del Departamento de Postgrado



Dr. Antonio Flores Naveda
Subdirector de Postgrado

AGRADECIMIENTOS

A mi Alma Mater, la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro por haberme permitido concluir mis tres grados académicos y ser parte de mi vida profesional

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la beca obtenida como apoyo para la realización y obtención del grado de doctorado.

A mis guías en el mundo de la investigación, la Dra. Ma. de los Angeles De Santiago Miramontes, Ph.D. César Alberto Meza Herrera, Dr. Francisco Gerardo Véliz Deras, Dr. Jorge Arturo Bustamante Andrade y al Dr. Cayetano Navarrete Molina, gracias por su dedicación y sobre todo su paciencia. A los doctores Dr. Oscar Ángel García, Dr. Alan Sebastián Alvarado Espino y Dra. Ma. Guadalupe Calderón Leyva por haberme compartido su enorme experiencia, asesorar y contribuir a la realización del presente documento

Aurelia Nájera Cruz Por todo el apoyo recibido durante la maestría y doctorado.

A mis compañeros y amigos del posgrado: Abril Barajas, Daniel padrón, Fortunato Nava J., José Luis Herrera, Juan Roberto, Mariana Barragan y Rafael Rodríguez

A mis padres y hermanos, por todo el apoyo incondicional.

A Elizabeth Carrillo Robles, por su enorme apoyo y por estar en momentos cruciales de mi vida y de mi doctorado, gracias por estar siempre.

Y a todos aquellos que participaron directa o indirectamente en la elaboración de esta tesis.

¡Gracias a todos ustedes!

DEDICATORIA

A Dios, por permitirme llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor.

A mi padre, Andrés Rodríguez Rodríguez, por todo el apoyo que me ha brindado para poder culminar mis estudios, gracias por desear y anhelar siempre lo mejor para mí, llevo en mi el consejo que me dio “Es bonito salir adelante, pero es mucho mejor salir con tus seres queridos”.

A mi madre, Teresa Sánchez Pérez (†), que, aunque haya partido de este mundo hace años, es un ángel que me ve y cuida desde el cielo, siempre estará en mi corazón y en cada logro en mi vida, cada reto superado se lo dedica a ella, Te amo mamá.

A mis hermanos, María Doris y Leodan Leonardo, aunque me encuentre lejos de ustedes sé que cuento con su apoyo para sacar la fuerza necesaria para salir adelante y cumplir mis metas, estoy agradecido con Dios por tenerlos en mi vida, por esas risas, alegría y tristeza que compartimos, **¡los quiero mucho hermanos!**

A mis abuelitos, Guadalupe Rodríguez y Andrés Rodríguez, infinitas gracias por brindarme más apoyo del necesario después del fallecimiento de mi mamá, estaré eternamente agradecidos con ustedes, las palabras no bastan para describir el amor que me ofrecieron.

ÍNDICE

Agradecimientos	ii
Dedicatoria	iii
Índice de cuadros.....	vi
Índice de figuras	vii
CERTIFICADO DE ACEPTACIÓN Y ENVÍO DE ARTÍCULOS.....	viii
Artículo número 1: Aceptado y publicado.	viii
Artículo número 2, enviado.....	ix
Resumen.....	x
ABSTRACT.....	xii
I. Introducción	1
Hipótesis General.....	2
Objetivo general	2
Objetivos específicos	2
II. Revisión de literatura	3
Importancia global y nacional de la ovinocultura	3
Fisiología reproductiva del macho ovino	5
Estructura de los órganos reproductores masculinos	5
Testículos	5
Barrera hematotesticular (BHT).....	7
Epidídimo y conducto deferente	7
Cordón espermático	7
Glándulas sexuales accesorias.....	7
Sistema reproductivo hormonal	8
Melatonina.....	8
GnRH	8

Gonadotropinas: FSH y LH	8
Testosterona	9
Espermatogénesis.....	9
Comportamiento sexual de los ovinos	11
Factores que regulan el desempeño reproductivo del macho ovino	13
El fotoperiodo responsable de la estacionalidad reproductiva	13
Estacionalidad reproductiva en ovinos.....	14
Edad del macho, experiencia sexual del macho y “efecto macho”	14
Morfometría corporal	16
Circunferencia escrotal.....	16
Efecto de la Condición corporal como modulador del desempeño reproductivo del macho ovino.	16
Componentes hemáticos.....	17
Biomoléculas naturales utilizadas para incrementar el desempeño de la reproducción animal.....	18
Función de los nutraceuticos sobre el desempeño sexual y reproductivo.....	18
III. Artículos.....	22
IV. Conclusión general.....	70
Referencias.....	72

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1: Principales conductas relacionadas con las conductas sexuales apetitivas y consumatorias en carneros. Adaptado de Calderón-Leyva <i>et al.</i> (2018)	13
--	----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Inventario ovino mundial 2023	3
Figura 2: Inventario nacional ovino 2023	4
Figura 3: testículo y epidídimo	6
Figura 4: Sección del epitelio germinal de los túbulos seminíferos con diferentes estadios en la formación de los espermatozoides, adaptado de Kaur <i>et al.</i> (2014).....	10

CERTIFICADO DE ACEPTACIÓN Y ENVÍO DE ARTÍCULOS

Artículo número 1: Aceptado y publicado.

Circular Economy, Dairy Cow Feed Leftovers, and *Withania somnifera* Supplementation: Effects upon Black Belly Ram's Libido, Sperm Quality, Sexual Behavior, and Hemogram Values.



Artículo número 2, enviado.

Efecto Robín Hood; sobrantes alimenticios de vacas lecheras + suplementación nutracéutica: Principales resultados en variables corporales, metabólicas y volumétricas testicular-res-espermáticas en ovinos Black Belly



RESUMEN

La suplementación con nutraceuticos en machos ovinos alimentados con sobrante de dieta de vacas lecheras mejora características corporales, metabólicas y reproductivas

Andrés Junior Rodríguez Sánchez

Doctor en Ciencias en Producción Agropecuaria

Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro

Dra. Ma. de los Angeles De Santiago Miramontes

Directora de tesis

Se evaluó el efecto de la suplementación con *Withania somnifera* (WS) sobre la calidad seminal, comportamientos sociosexuales y constituyentes sanguíneos de ovinos Black Belly, desde una perspectiva de economía circular y reproductiva en el norte de México. Para lo cual, tres tratamientos fueron investigados: no suplementado (CONT), suplementado con 100 mg kg PV⁻¹ d⁻¹ de WS (100WS) y suplementado con 200 mg kg PV⁻¹ d⁻¹ de WS (200WS); complementando su alimentación con sobrante de dieta para vacas lecheras (SDVL). Los resultados no evidenciaron diferencias ($p > 0.05$) entre tratamientos respecto a peso vivo (PV) y condición corporal (CC) al inicio del estudio. Sin embargo, al final el tratamiento 200WS fue favorecido. Un segundo estudio fue realizado, el cual incluyo grupo CONT, suplementado con 400 mg kg PV⁻¹ d⁻¹ de WS (400WS) y suplementado con 400 mg kg PV⁻¹ d⁻¹ de *Lepidium meyenii* (400LM). El objetivo fue cuantificar el impacto de la suplementación nutraceutica en machos ovinos alimentados con SDVL en variables corporales, metabólicas y sexuales-testiculares. Las variables PV, CC, glucosa en sangre, proteína sérica, circunferencia escrotal y algunos componentes del volumen testicular no mostraron diferencias ($p > 0.05$) entre los efectos simples del tratamiento (TRT) o tiempo (T). Sin embargo, un efecto de interacción TRTxT ($p < 0.05$) en algunas variables corporales, metabólicas y volumetría testicular-espermática fue evidenciado, favoreciendo a los grupos 400WS y 400LS. Desde una perspectiva productiva-reproductiva, el uso del SDVL+ el uso de nutraceuticos, representa una alternativa sostenible para el desarrollo rural en la zona de estudio (Comarca Lagunera, México).

Palabras clave: Ovejas de pelo, Machos, Suplementación, Desempeño reproductivo, Sobrante de vacas, *Withania somnifera*, Ashwagandha, *Lepidium meyenii*, Maca, Economía circular

ABSTRACT

Nutraceutical supplementation in male sheep fed leftover from dairy cows' diet improves body, metabolic and reproductive outcomes

Andrés Junior Rodríguez Sánchez

Doctor of Science in Agricultural Production

Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro

Dr. Ma. de los Angeles De Santiago Miramontes

Thesis director

The effect of supplementation with *Withania somnifera* (WS) on seminal quality, socio-sexual behaviors, and blood constituents of Black Belly rams was evaluated from a circular-economy and reproductive perspective, in the north of Mexico. For which, three treatments were investigated: non-supplemented (CONT), supplemented with 100 mg kg PV⁻¹ d⁻¹ of WS (100WS), and supplemented with 200 mg kg PV⁻¹ d⁻¹ of WS (200WS); complementing their diet with feed leftover from dairy cows (FLDC). The results didn't show differences ($p > 0.05$) between treatments regarding liveweight (LW) and body condition (BC) at the beginning of the study. However, by the end, the 200WS treatment was favored. A second study was conducted, which included a CONT group, supplemented with 400 mg kg PV⁻¹ d⁻¹ of WS (400WS), and 400 mg kg PV⁻¹ d⁻¹ of *Lepidium meyenii* (400LM). The objective was to quantify the impact of nutraceutical supplementation in rams fed with FLDC on body, metabolic, and sexual-testicular variables. The LW, BC, blood glucose, serum protein, scrotal circumference and some testicular volume components showed no differences ($p > 0.05$) between the treatment's main effects (TRT) or time (T). However, a TRTxT interaction effect was observed ($p < 0.05$) in some body, metabolic, and testicular-sperm volumetric variables, favoring the 400WS and 400LS groups. From a productive-reproductive perspective, the use of FLDC, together with nutraceutical supplementation, represents a sustainable alternative for rural development in the study area (Comarca Lagunera, Mexico).

Keywords: Hair sheep, Males, Supplementation, Reproductive performance, Leftovers, *Withania somnifera*, Ashwagandha, *Lepidium meyenii*, Maca, Circular Economy.

I. INTRODUCCIÓN

Desde su domesticación, los animales han sido pieza importante en la evolución de las sociedades humanas, contribuyendo en su economía y sustento (Hiendleder *et al.*, 2002). Es probable que las ovejas fueran domesticadas hace 10,500 años (Alberto *et al.*, 2018). Se ha propuesto que para el 2050 a nivel mundial la humanidad enfrentará un desafío por la inseguridad alimentaria, principalmente ante una población mundial urbanizada superando los 9,100 millones de habitantes, en consecuencia también se prevé un incremento en la demanda de alimentos de origen animal, todo esto bajo un contexto de competencia por los principales recursos, es decir suelo y agua, aunado a lo anterior, los efectos del cambio climático (Pérez Vázquez *et al.* (2018). En los últimos 50 años la producción de carne ha tenido un incremento sumamente rápido con una tasa de cambio variable entre países, por consecuencia, en el siglo XXI los productos cárnicos constituyen la principal fuente de proteína en países desarrollados con un consumo de 28 gramos de proteína por día por persona. Durante el periodo de 2014 a 2016 el consumo total percapita a nivel mundial fue de 34.1 kilogramos por año figurando con aproximadamente un 60% las carnes rojas (bovino, porcino y ovino) (Salter, 2018)

El rendimiento reproductivo de los animales es uno de los rasgos más importantes, debido a su impacto en la rentabilidad general del rebaño. La fertilidad de los animales es un rasgo particularmente crucial ya que afecta la producción y la eficiencia económica de las industrias ovinas.: En efecto, el desempeño reproductivo de los carneros tiene un impacto significativo sobre la productividad del rebaño, ya que un macho tiene el potencial de afectar la fertilidad en un gran número de hembras afectando directamente al rebaño entero (Stellflug *et al.*, 2008; Maquivar *et al.*, 2021). Existen reportes que sugieren que solo el 70-75% de los machos en un rebaño son reproductivamente óptimos al comienzo de la temporada de cría (Maquivar *et al.*, 2021). En ese contexto, se requiere que la producción animal implique el menor grado de afectación al medio ambiente, favorecer los parámetros del bienestar animal, y producir más con menos, buscando soluciones “limpias, verdes y éticas”, conectando la industria lechera altamente tecnificada con sistemas de producción animal menos desarrollados como la producción de ovinos de carne, aplicando un enfoque de “repensar-reutilizar-reducir” como una estrategia de economía circular a aplicarse en el norte-árido de México.

Hipótesis General

La suplementación con nutraceuticos (*Withania somnifera* y *Lepidium meyenii*) mejorará las características corporales, reproductivas y metabólicas de machos ovinos alimentados con sobrante de dieta de vacas lecheras convirtiéndolo en un sistema de producción circular.

Objetivo general

Evaluar el efecto de la suplementación con nutraceuticos (*Withania somnifera* y *Lepidium meyenii*) en las características corporales, reproductivas y metabólicas de machos ovinos alimentados con sobrante de dieta de vacas lecheras.

Objetivos específicos

1. Cuantificar el efecto de la suplementación con nutraceuticos (*Withania somnifera* y *Lepidium meyenii*) en las características corporales como peso vivo, condición corporal, y parámetros testiculares en machos ovinos Black Belly del norte de México alimentados con sobrante de la dieta de vacas lecheras.
2. Cuantificar el efecto de la suplementación con nutraceuticos (*Withania somnifera* y *Lepidium meyenii*) en las características reproductivas como olor sexual, conducta sexuales apetitivas y consumatorias; y en el volumen y calidad seminal en machos ovinos Black Belly del norte de México alimentados con sobrante de la dieta de vacas lecheras.
3. Cuantificar el efecto de la suplementación con nutraceuticos (*Withania somnifera* y *Lepidium meyenii*) en las características metabólicas como glucosa sanguínea, proteína en suero sanguíneo y conteo de células hemáticas en machos ovinos Black Belly del norte de México alimentados con sobrante de la dieta de vacas lecheras.
4. Explorar el potencial de la alimentación con sobrante de dieta de vacas lecheras en machos ovinos suplementados con nutraceuticos aplicando un enfoque de “repensar-reutilizar-reducir” para generar una economía circular.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

Importancia global y nacional de la ovinocultura

La oveja fue una de las primeras especies en ser sometida al proceso de domesticación por parte del ser humano. La ovinocultura se caracteriza por estar presente en la mayoría de los continentes, debido a su gran capacidad de adaptabilidad a los diferentes climas y vegetaciones con el objetivo de la subsistencia de familias que se encuentran incrustadas en zonas rurales (Viana, 2008). Actualmente, a nivel global se cuenta con un inventario poco más de 1,324 millones de cabezas, de este total poco más del 75% del inventario se concentran en dos continentes: Asia que representa el 44.75 % de los efectivos, seguida de África con un 32.95%. (FAOSTAT, 2023).

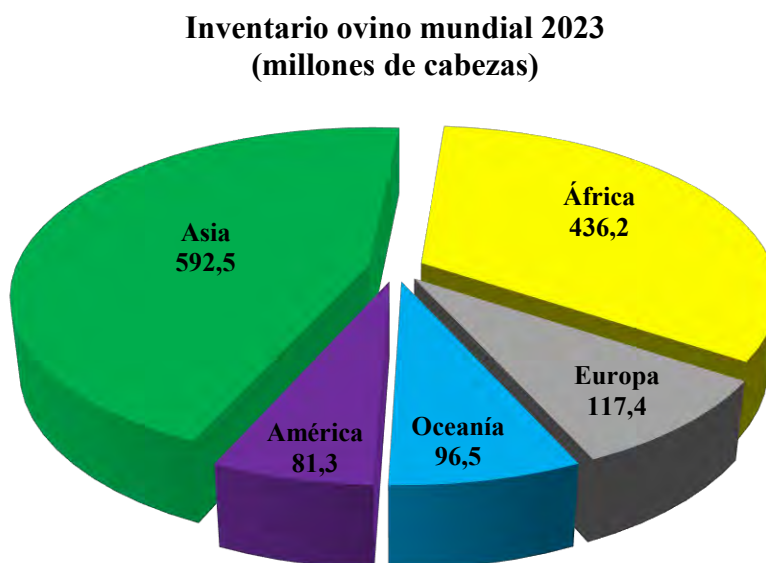


Figura 1: Inventario ovino mundial 2023

Fuente: elaboración propia con datos de FAO STATS 2023

En 2023, México contaba con un inventario ganadero aproximadamente de 8.84 millones de cabezas de ovinos, de acuerdo al SIAP (2023) la ovinocultura presenta una alta concentración territorial en seis estados de la república que reúnen poco más del 53.33 % de la población ovina, el Estado de México ocupa el primer lugar con un inventario de 1,365, 021, seguido de Hidalgo con 1,107,406, Veracruz con 740,362 Puebla con 552,912, Zacatecas con 504,673 y Jalisco con 442,569. La población ovina en Durango es de 64,280

cabezas mientras que la de Coahuila fue de 81,499 en 2023. Esta distribución depende de varios factores como, por ejemplo, culturales, condiciones ambientales y principalmente el mercado que han consolidado a estos estados como principales núcleos de producción ovina en México (Vázquez-Martínez *et al.*, 2018).

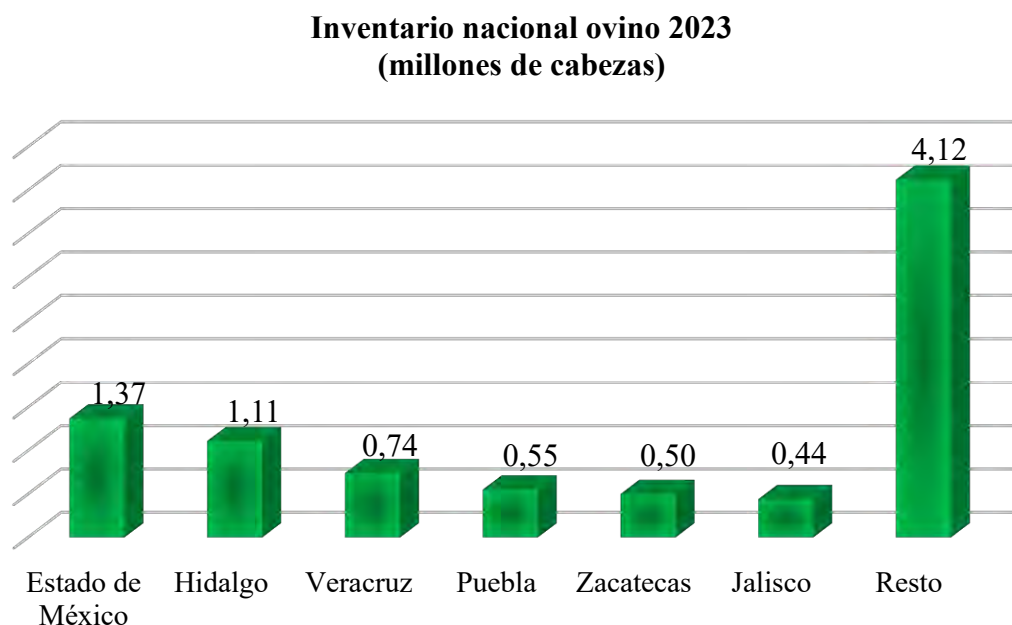


Figura 2: Inventario nacional ovino 2023

Fuente: elaboración propia con datos de SIAP 2023

La producción ovina en México opera principalmente bajo el sistema de pastoreo tradicional, con escasa tecnología, aunado a eso, se desarrolla con una baja productividad. Debido el extenso territorio nacional y a su variada climatología, la crianza de ovinos se ubica en tres regiones: la región sur y sureste se caracteriza con un clima tropical destacando razas de pelo (Pelibuey y Black Belly), aunque actualmente se ha visto que los productores han ido incorporando razas para producción de carne (Dorper y Katahdin), en la región centro producen en su mayoría ganado cruzado (Suffolk o Hampshire y razas de pelo) alimentándolos en agostaderos y con sobrante agrícolas después de las cosechas y la región norte principalmente con sistemas tecnificados con ovinos de lana y razas de carne (Hernández-Marín *et al.*, 2017).

La Comarca Lagunera una región agroecológica árida ubicada al noreste de México entre los estados de Durango (Gómez Palacio, Lerdo, Tlahualilo, Mapimí, Rodeo, Nazas, San

Juan de Guadalupe, San Luis del Cordero, General Simón Bolívar y San Pedro del Gallo) y Coahuila (Torreón, Matamoros, San Pedro, Francisco. I. Madero y Viesca), predomina el sistema de producción intensivo y extensivo con un inventario de 13,147 cabezas lo que representa tan solo el 0.15% del inventario nacional; sobresaliendo la Laguna de Durango con 7,617 y en La Laguna de Coahuila 5,530 (SIAP, 2023).

Fisiología reproductiva del macho ovino

El sistema reproductor masculino se conforma por estructuras que tienen funciones exócrinas (espermatozoides; gametos masculinos) y endócrinas (producir y hormonas). El sistema reproductor masculino está constituido por testículos, un sistema tubular de almacenamiento y conducción, glándulas accesorias que están involucradas en la formación y protección química del semen y por último el órgano copulador o pene (García Sacristán *et al.*, 2018).

Estructura de los órganos reproductores masculinos

Testículos

Son órganos pares ubicados al interior del escroto fuera de la cavidad abdominal, estos juegan un papel sumamente importante ya que son los responsables de la producción de los espermatozoides y participar sobre la intensa actividad endocrina (Boeta *et al.*, 2018). Están cubiertos por la túnica vaginal, que cubre la túnica albugínea, originando tabiques que dividen al órgano en lobulillos testiculares. Al interior de los lobulillos se encuentran los túbulos seminíferos rodeados por el espacio intersticial (García Sacristán *et al.*, 2018).

Los túbulos seminíferos es la estructura en donde se producen y ubican los espermatozoides. Éstos son túbulos enrollados y delgados que inician y finalizan en una red ubicada en el centro del testículo que se le conoce como *rete testis* o red testicular. Las células de Sertoli son esenciales para sostener el epitelio seminífero y nutrir a las células germinales en desarrollo para poder madurar y posteriormente liberar los espermatozoides. También funge en el proceso de eliminación de productos de desecho, sobre todo, los restos citoplasmáticos de las espermatidas. Además de producir sustancias como la inhibina y la proteína fijadora de andrógenos (ABP), la cual alcanza la corriente sanguínea ejerciendo el proceso de una retroalimentación negativa en el proceso de secreción de FSH (García Sacristán *et al.*, 2018).

Los espermatozoides son canalizados hacia el *rete testis* a través de alrededor de 15 a 20 conductos eferentes que son conectados entre éste y el epidídimo. El *rete testis* juega un papel sumamente importante en la conducción de hormonas sexuales y gametos masculinos. El tejido conectivo que se encuentra en los túbulos seminíferos está situado entre las Células de Leydig, donde se originan los andrógenos testiculares, sobre todo la testosterona. El epidídimo y el testículo se encuentran dentro del escroto, éste último es una bolsa formado. La túnica albugínea es una cubierta fibrosa formada por células musculares lisas. Al contraerse estas células aumenta la presión sobre los tejidos que rodean a los túbulos seminíferos. Esta presión es primordial ayudando a transportar a los espermatozoides (cuando se encuentran inmóviles) desde los túbulos seminíferos a la *rete testis* y posteriormente al epidídimo donde se vuelven móviles (García Sacristán *et al.*, 2018).

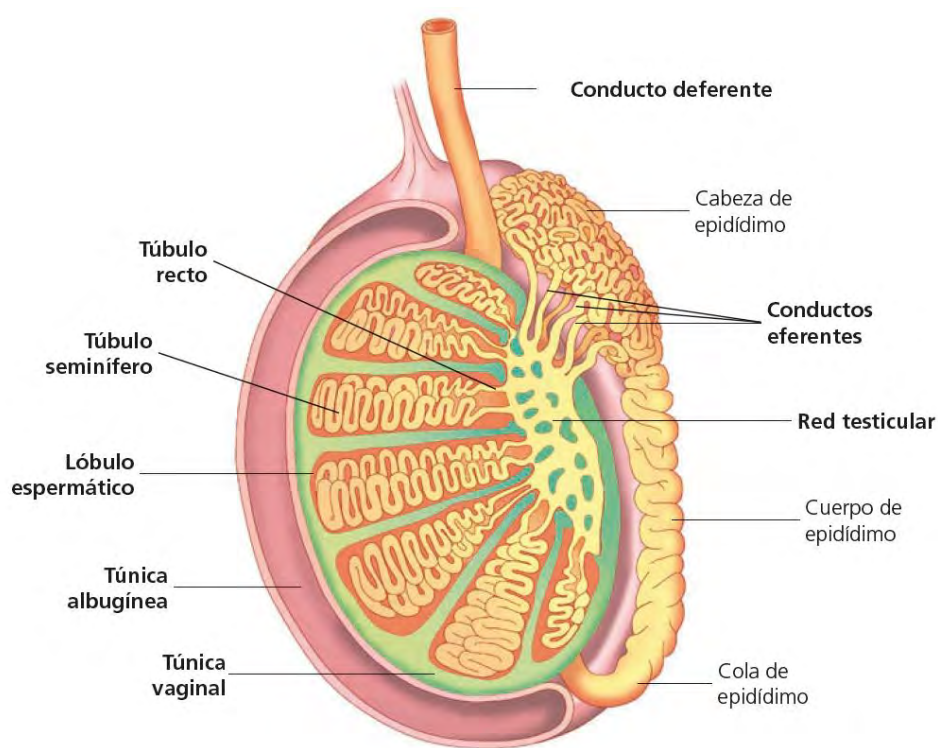


Figura 3: testículo y epidídimo

Fuente: Imagen tomada de García Sacristán *et al.* (2018)

Barrera hematotesticular (BHT)

Ésta se forma debido al complejo de la unión de las células de Sertoli. Este complejo, además de hacer una compartimentación aduminal y física basal crea una barrera a la permeabilidad. Esta barrera es de suma importancia para desarrollar compartimientos fisiológica dentro del epitelio seminífero relacionado con la composición de proteínas, iones, carbohidratos y aminoácidos. Debido a esto, la composición del líquido en las vías espermáticas y en los túbulos seminíferos existe una diferencia considerable de la composición de la linfa testicular y el plasma sanguíneo (García Sacristán *et al.*, 2018).

Epidídimo y conducto deferente

EL epidídimo, es el origen de la maduración de células sexuales masculinas, este es un conducto largo, enrollado y tortuoso presentado longitudes variables, esto dependiendo de cada especie, además de fungir como almacenamiento de los espermatozoides que van de los 10 a 15 días. El epidídimo se divide en tres partes: cabeza, cuerpo y cola, donde los espermatozoides pasan continuamente al conducto deferente. Este conducto tiene la responsabilidad de trasladar los espermatozoides desde el epidídimo hasta la uretra (García Sacristán *et al.*, 2018).

Cordón espermático

El cordón espermático es una estructura par extendiéndose entre los testículos y la cavidad abdominal. Los cordones espermáticos se componen de una vaina de tejido conectivo que a su vez envuelve al conducto deferente, vasos sanguíneos (arteria testicular y plexo pampiniforme), nervios y vasos linfáticos que nutren al testículo (García Sacristán *et al.*, 2018).

Glándulas sexuales accesorias

Las glándulas accesorias se localizan en torno a la uretra pelviana masculina, estas incluyen: glándulas de Cowper (bulbouretrales), glándulas vesiculares y la próstata. El papel que desempeñan es la segregar sustancias que favorecen en la nutrición y transporte de las células sexuales masculinas. La testosterona es la responsable de controlar el desarrollo y el buen funcionamiento de las glándulas. La encargada de controlar el buen desarrollo y sobre todo, el buen funcionamiento de estas glándulas, aunque, a veces, se

necesita que los estrógenos actúen de forma sinérgica. Para que la testosterona sea fisiológicamente activa en las glándulas debe convertirse en dihidrotestosterona, pero solo en algunas especies (García Sacristán *et al.*, 2018).

Sistema reproductivo hormonal

Melatonina

La melatonina, secretada por la glándula pineal en los animales de hábitos diurnos ejerce un patrón circadiano de secreción caracterizado por niveles basales durante el día y elevados durante la noche. Las variaciones en la secreción de esta hormona reflejan el fotoperiodo (duración de horas luz en el día), haciendo de transductor de la información fotoperiódica a una respuesta hormonal, transmitida al eje HHG (Hipotálamo-Hipófisis-Gónadas). La melatonina transmite la información del fotoperiodo en el área premamilar hipotalámica (Malpoux et al., 1988) regulando la secreción de GnRH que a su vez regula la secreción de las dos hormonas gonadotropas producidas en la adenohipófisis, LH y FSH (Clarke et al., 1984). La melatonina ejerce sus efectos en áreas específicas del hipotálamo, muy probablemente a través de los receptores MT1. La acción final de esta indolamina a nivel del sistema nervioso central es la modulación de la secreción de GnRH, pero no actúa directamente sobre las neuronas GnRH; su acción involucra un complejo circuito interneuronal que incluye al menos neuronas dopaminérgicas, serotoninérgicas y aminoacidérgicas (Correa y Fernández, 2017).

GnRH

La Hormona Liberadora de Gonadotropinas (GnRH) es un decapeptido que se sintetiza en el núcleo arcuato, supraquiasmático y en el área preóptica del hipotálamo, esta hormona actúa en las células de la glándula pituitaria llamada gonodotrofos, los cuales son los encargados de la liberación y síntesis de las gonadotropinas (Hormona Folículo Estimulante (FSH) y Hormona Luteinizante (LH)).

Gonadotropinas: FSH y LH

La LH (también llamada en machos ICSH; hormona estimuladora de las células intersticiales) induce la síntesis de testosterona por las células testiculares intersticiales o de Leydig, así mismo, la FSH promueve la conversión de dichos andrógenos a estrógenos en

las células testiculares de Sertoli, así como la secreción de inhibina, y la producción de la proteína ligadora de andrógenos (ABP). Por ende LH y la FSH, son necesarias para la espermatogénesis (Ganong, 2000).

Testosterona

La testosterona es la hormona principal de los testículos, debido a que es un esteroide que se sintetiza a partir de la adrostenediona. Para esto hay una secreción de testosterona que se encuentra bajo el control de la Hormona Luteinizante (LH) y mediante el cual ésta provoca un estímulo a las células de Leydig mediante la formación de AMP cíclico y actividad de RNA mensajero (Ruckebusch *et al.*, 1994). La testosterona al igual que otros andrógenos ejerce un efecto de retroalimentación positiva o negativa sobre la secreción de LH actuando directamente sobre la hipófisis dando como resultado la secreción o inhibición de GnRH del hipotálamo y junto a la FSH y LH, la testosterona mantiene la espermatogénesis.

Espermatogénesis

El testículo tiene dos funciones principales, una endócrina y otra exócrina. La primera consiste en secretar hormonas, principalmente la testosterona ya que es fundamental para el mantenimiento y desarrollo de un importante número de funciones fisiológicas, y la segunda en generar los gametos masculinos indispensables para la fertilidad del macho mediante el proceso llamado espermatogénesis (Roberts y Chauvin, 2019).

El proceso de la espermatogénesis es un proceso complejo en el cual las llamadas células germinales (espermatogonias) entran en un proceso de diferenciación y por consecuencia dan origen a los espermatozoides (Jan *et al.*, 2012). Todo este proceso ocurre en los iniciatúbulos seminíferos de los testículos donde proliferan las células germinales bajo un proceso de mitosis y meiosis constante, posteriormente inician su traslado al centro del túbulo donde van generando su forma característica de espermatozoide (Roberts y Chauvin, 2019). El movimiento de los espermatozoides es estimulado por células miodes que se encuentran rodeando los túbulos seminíferos (Jan *et al.*, 2012).

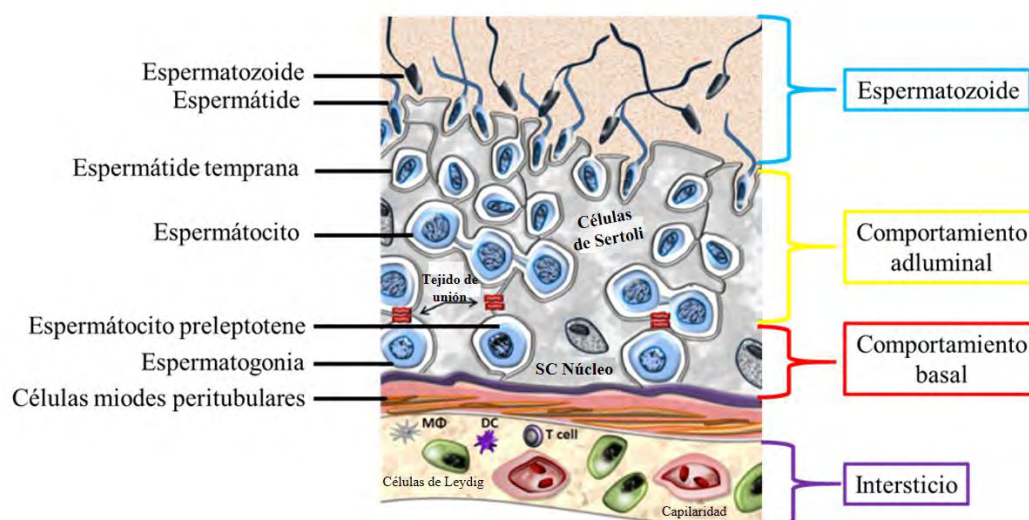


Figura 4: Sección del epitelio germinal de los túbulos seminíferos con diferentes estadios en la formación de los espermatozoides, adaptado de Kaur *et al.* (2014).

Los factores hormonales requieren una sinergia entre FSH y LH en los testículos para poder iniciar el proceso del espermatogénesis.

De entre los factores hormonales se ha considerado que se requiere la acción combinada de FSH y LH en el testículo para iniciar la espermatogénesis. Este proceso es apoyado por el aumento progresivo de FSH y LH durante la maduración puberal en animales. Así mismo, la FSH y la testosterona son reguladores claves del espermatogénesis, y, en consecuencia, de la masa de células germinales repercutiendo en el tamaño de los testículos del carnero adulto.

El desarrollo de los espermatozoides dura 31 días desde el estado de célula germinal hasta que alcanza el centro del túbulo seminífero, posteriormente tarda unas 84 horas en llegar al epidídimo y alrededor de 14 días en llegar hasta la cola del epidídimo. El proceso, desde el inicio de la formación del espermatozoide hasta que esté preparado para “poder fecundar” tarda 49 días y 14 días más para que terminen de madurar en el epidídimo. Todo este proceso no puede acelerarse (salvo el paso por el epidídimo donde pudiera verse influenciado por eyaculaciones constante del macho, acortándose de 1 o 2 días), por lo anterior, los tratamientos que puedan recibir los sementales para poder mejorar la producción de espermatozoides deben empezar cuando menos 7 semanas antes de iniciar la cubrición (Folch, 2000).

El proceso de espermatogénesis es influenciado por el regulamiento de hormonas producidas por la hipófisis y el hipotálamo en correlación con algunos otros productos dentro del testículo. El hipotálamo secreta GnRH lo que genera un estímulo a la glándula hipófisis para la producción de FSH y LH. La LH, es trasladada mediante vía sanguínea a los testículos estimulando a las células de Leydig con el fin de producir testosterona (O'Donnell *et al.*, 2015). La testosterona producida actúa como un andrógeno tras la interacción con la enzima aromatasa para producir estrógenos.

Dentro de los túbulos seminíferos se encuentran las células de Sertoli, estas células son indispensables para poder crear un microambiente, habilitando la generación sostenida de espermatozoides durante toda la vida del macho (Jan *et al.*, 2012)

Comportamiento sexual de los ovinos

La supervivencia de una especie depende en última instancia de la reproducción, y uno de los elementos clave en ella es el comportamiento sexual. Este comportamiento entre un macho y una hembra debe manifestarse en un momento fisiológicamente apropiado para que pueda ocurrir la fecundación (Borja y Fabre-Nys, 2012). Los mamíferos son considerados como copuladores cortos o sostenidos de acuerdo a la duración del contacto sexual. El carnero se incluye en este grupo de copuladores cortos a diferencia del cerdo, el perro y los camellos, quienes son copuladores sostenidos (Senger, 2004).

Los carneros utilizan señales olfatorias con el fin de detectar hembras en celo (Lindsay, 1965), por lo que si una hembra se encuentra receptiva, el macho se aproxima casi inmediatamente (Perkins *et al.*, 2007)

El contacto físico inicial, cortejo y apareamiento son considerados las preferencias sexuales esenciales de las parejas en el comportamiento sexual de una especie animal. Notoriamente, para que exista éxito en la reproducción, la atracción sexual entre animales de distinto sexo es un punto clave. En la naturaleza, un abundante número de especies suelen presentar un marcado dimorfismo sexual: los machos prefieren aparearse con las hembras, sin embargo, se ha observado que en muchas especies se observa un cortejo, atracción y contacto genital entre individuos del mismo sexo. (Roselli y Stormshak, 2009)

El comportamiento de cortejo sexual da inicio desde que el macho se acerca a la hembra culminado con la monta con eyaculación (O'Donnell *et al.*, 2015).

Las conductas sexuales estereotipadas en el carnero pueden llevarse a cabo antes de realizar la primera monta. Estas conductas incluyen una interacción mediante el olfateo en la región ano-genital de la hembra; golpeteo repentinamente con la pata delantera en el flanco de la hembra formando un pequeño ángulo y lamer, mordisquear y acariciar su flanco y la zona anogenital. Precedente a la cópula, el carnero realiza movimientos levantando la cabeza y retrayendo el labio superior en respuesta al olor y/o sabor de la orina de la hembra, también conocido como respuesta de Flehmen. Esta respuesta atrae olores no volátiles al órgano vomeronasal para su detección por el sistema olfativo accesorio. Además, algunos machos, emiten vocalizaciones graves, similares a gorgoteos, antes y mientras tocan a la oveja con su pata. El conjunto de estos comportamientos se suele denominar “comportamientos de cortejo”(Perkins *et al.*, 2007).

Cuando los carneros realizan más de 5 eyaculaciones en una prueba de 30 minutos se clasifican como “líbido alto” y al carnero que tiene menos a 4 eyaculaciones se le denomina “líbido bajo” (Price *et al.*, 1991).

El comportamiento sexual en machos como en hembras se ve influenciado por señales ambientales como sensoriales, visuales, táctiles y olfativas (Maina y Katz, 1999), el comportamiento sexual en la mayoría de las especies es derivado de la secuencia de dos sucesos separados, dando inicio con una interacción donde el macho busca y se acerca a la hembra, denominada “apetitivo” (Conducta sexual apetitiva; CSA); y la consumatoria (Conducta sexual consumatoria; CSC) o copulatorio, donde el macho tiene un contacto sexual en diferentes actividades como son la monta, penetración y finalizando con la eyaculación (Borja y Fabre-Nys, 2012; Calderón-Leyva *et al.*, 2018). En el cuadro 1 se describen las CSA y CSC en carneros.

Cuadro 1: Principales conductas relacionadas con las conductas sexuales apetitivas y consumatorias en carneros. Adaptado de Calderón-Leyva *et al.* (2018)

Conducta	Descripción
Conducta sexual apetitivo (CSA)	
Flehmen	Esta conducta es el proceso de elevación de la cabeza y del labio superior hacia atrás
Olfateo anogenital	Olfateo de la región perianal de la hembra
Aproximaciones	Acercamiento del macho por algún flanco de la hembra
Pataleo	Elevación del miembro anterior
Vocalizaciones	Expresión de silbidos o gorgoteos en el macho al acerca a la hembra
Comportamiento sexual consumatorio (CSC)	
Intentos de monta y monta	El macho se para por la parte posterior de la hembra y eleva sus miembros anteriores pretendiendo copular a la hembra, pero sin penetración
Eyacuación	Introducción del pene en la hembra finalizando con un característico “golpes de riñón”

Factores que regulan el desempeño reproductivo del macho ovino

El fotoperiodo responsable de la estacionalidad reproductiva

El fotoperiodo es considerado el principal factor medioambiental que modula la actividad sexual de los ovinos originarios o adaptados a zonas templadas o subtropicales (Thiéry *et al.*, 2002). Influenciada por la latitud, que se define como la distancia angular de un punto de la superficie de la tierra con respecto al ecuador (Vázquez y Stevens 2004). Por lo cual existen variaciones en la percepción de la luz por la glándula pineal la cual está implicada en el control del fotoperiodo sobre la reproducción, esta glándula es la encargada de traducir la información fotoperiódica a través de la secreción de melatonina (Arendt, 1998). La melatonina se sintetiza y secreta solamente durante la noche, y la duración de la secreción está determinada por la duración de ésta o por el periodo de oscuridad. Posteriormente, a través de redes neuronales desconocidas, la melatonina estimula la secreción de kisspeptina por neuronas que se encuentran en el núcleo paraventricular

anteroventral y el núcleo arcuato (Smith *et al.*, 2008). La kisspeptina estimula las neuronas que secretan GnRH a nivel hipotalámico. La GnRH es liberada a nivel porta-hipofisiario que se encuentra en la eminencia media, y es transportada hasta alcanzar las células gonadotrópicas de la hipófisis donde estimula la secreción de las gonadotropinas LH y FSH (Smith, 2012).

Estacionalidad reproductiva en ovinos.

Las razas de ovejas de origen o adaptadas a latitudes templadas ($> 40^{\circ}$ N o S) y subtropicales ($> 23^{\circ} < 40^{\circ}$) manifiestan una estacionalidad reproductiva marcada (Malpaux *et al.*, 2001). En las ovejas de genotipo Ile de France y Suffolk, originarias de clima templado en el hemisferio norte, el periodo de actividad sexual lo muestran de septiembre-octubre a enero-febrero y el anestro se observa de marzo a agosto (Chanvallon *et al.*, 2011). Sin embargo, las ovejas de la raza Black Belly muestran una estacionalidad nula o reducida lo que se traduce en actividad sexual continua, presentando ciclos estrales casi continuamente durante todo el año (a menos que se suspendan por gestación). Las hembras de raza Black Belly alcanzan la madurez sexual alrededor de los 8 meses y tienen su primer parto aproximadamente al año. Su intervalo entre partos es de unos 240 días, y muestra alta prolificidad, con la capacidad de tener entre 3 y 4 crías por parto. Aunque existe cierta variabilidad en la actividad ovulatoria según las condiciones de luz, en general esta raza se caracteriza por reproducirse durante todo el año con poca o ninguna estacionalidad marcada, (Arroyo, 2011), lo que les permite parir varias veces al año dependiendo del manejo y la alimentación, favoreciendo la producción continua de corderos durante todo el año, ideal para sistemas de producción que busquen múltiples partos anuales y buena adaptación al clima tropical o cálido (Hinojosa Cuéllar y Oliva Hernández, 2009). Asimismo, la reducida estacionalidad reproductiva se manifiesta en los machos de esta raza, lo cual, se ve reflejada en un proceso espermatogénico continuo, lo cual favorece a una programación de empadres.

Edad del macho, experiencia sexual del macho y “efecto macho”

Un factor importante a considerar es la edad del carnero, un carnero adulto tendrá mejores resultados reproductivos en las hembras en comparación con un carnero joven, provocando mejores resultados de ovulación, respuesta estral y tasa de concepción. Esta

diferencia en la estimulación se explica al menos en parte, por las distintas señales emitidas por los carneros adultos. Por el contrario, la menor tasa de preñez obtenida al usar carneros jóvenes se explica por el menor número de cópulas y/o la poca experiencia sexual de estos animales (Ungerfeld *et al.*, 2008). Debido a lo anterior, el resultado positivo es reducido o nulo (Rosa *et al.*, 2000). Existe un fenómeno sexual llamado efecto macho cuyos primeros reportes fueron generados a partir de la relación entre la fecha de introducción del carnero al rebaño y la época de partos. En la actualidad se sabe que este efecto estimula el restablecimiento de la secreción pulsátil de GnRH/LH durante los periodos de inactividad ovárica. Se ha observado que el tiempo que transcurre desde la introducción del carnero hasta el primer incremento en la secreción de LH en las hembras es muy corto en ovejas. El mecanismo de acción del “efecto macho” es a través de feromonas (sustancias volátiles) que el macho secreta y mediante las cuales estimula una respuesta inmediata en la secreción de GnRH/LH entre las 3 y 30 horas después de la introducción, lo que provoca su ovulación entre las 24 y las 60 hora (Fabre-Nys *et al.*, 2015). En efecto, la introducción repentina del semental en el entorno cercano de las hembras provoca el aumento de pulsaciones de la hormona luteinizante (LH) en las ovejas, a su vez puede generar una cascada de LH que ocasiona la ovulación. Por lo general, esta ovulación no está asociada con el celo ya que éste se manifiesta hasta la segunda ovulación 17-20 días después de la introducción del carnero. En otras, hay un cuerpo lúteo de corta duración (de 4-5 días), luego una segunda ovulación con signos de estro, seguido de una fase lútea de duración normal. Después de eso, se produce una tercera ovulación también asociada con signos de celo (Álvarez *et al.*, 2003). La respuesta de las hembras al efecto macho se ve influido por dos factores, el primero, es la capacidad de respuesta de la hembra ya que hay ovejas que no responden, independientemente de la fuerza del estímulo (esta se produce por un fuerte patrón estacional individual) y la segunda es el momento en el que se ejecuta el efecto macho, (profundidad del anestro), si éste sucede en la época de transición, las hembras pueden responder aún con un estímulo muy ligero debido a que se produce en un anestro poco profundo cerca de la temporada de reproducción (Luna-Orozco *et al.*, 2012).

Morfometría corporal

La morfometría tradicional analiza varios aspectos como por ejemplo proporciones, perímetros, longitudes, masas, áreas, circunferencias, ángulos, alturas y anchuras (Marcus, 1990). Con respecto a los carneros suelen evaluar múltiples variables como por ejemplo: peso vivo, condición corporal altura a la cruz, longitud corporal, perímetro torácico y circunferencia escrotal (Sifuentes-Lamónt *et al.*, 2022). Sin embargo, las variables más importantes y representativas son condición corporal y circunferencia escrotal.

Circunferencia escrotal

Existen reportes de que existe una correlación positiva entre el peso corporal y la talla testicular. Un aspecto clave para determinar volumen testicular es a través de la circunferencia escrotal, siendo de suma importancia ya que mantiene una correlación positiva entre ésta y la producción de espermatozoides.

Efecto de la Condición corporal como modulador del desempeño reproductivo del macho ovino.

La condición corporal, estrechamente relacionada con la nutrición juega un papel fundamental en el desempeño reproductivo de los machos en las diferentes especies de interés zootécnico, lo cual se ha investigado extensamente. De manera general se concluye que la secreción de GnRH se reduce en animales desnutridos o en marasmo nutricional (Wade y Jones, 2004; Alhamada *et al.*, 2017). Sin embargo, el entendimiento de la forma en la cual las señales derivadas del metabolismo y originadas por una desnutrición son captadas a nivel central para regular la secreción de GnRH, es complejo (Arroyo, 2011). Se han estudiado distintos indicadores metabólicos que intervienen en este proceso vital, tales como la glucosa, ácidos grasos volátiles, algunos aminoácidos y ácidos grasos no esterificados (Keisler y Lucy, 1996). También se investigan mediadores endocrinos como: el factor de crecimiento asociado a la insulina (IGF-I), la hormona del crecimiento. Lo anterior repercute en el desempeño reproductivo de los machos de diferentes especies de interés zootécnico, diversas investigaciones lo comprueban tal es el caso de las diferentes respuestas del carnero a las manipulaciones nutricionales, donde se pueden dividir en

efectos a corto plazo que actúan sobre el sistema neuroendocrino que controla la actividad testicular y a largo plazo, cuyos efectos actúan sobre el crecimiento testicular y la producción de espermatozoides (Maurya *et al.*, 2010). De acuerdo con estos últimos autores los carneros tienen una mejor eficiencia reproductiva si la condición corporal se encuentra entre 3.0 y 3.5 puntos que en aquellos que tienen una condición corporal menor (2.5) y mayor a 4.0, lo que indica la importancia de mantener un nivel óptimo en la condición corporal de los carneros, que se traduce en una mayor eficiencia reproductiva, a diferencia de los machos con baja condición corporal.

Componentes hemáticos

El conocimiento sobre valores fisiológicos de parámetros hemáticos es esencial para comprender los procesos del organismo. Los parámetros sanguíneos son responsables de una función corporal adecuada, y su deficiencia conduce al daño y causa anomalías estructurales y fisiológicas (Nedeva *et al.*, 2022). El perfil hematológico forma parte de variables fisiológicas que podrían aportar información valiosa sobre la salud y el bienestar de los rumiantes (Bezerra *et al.*, 2017). El cambio en los componentes sanguíneos es un posible indicador para la predicción del bienestar animal y particularmente de la resistencia de las ovejas a diversas condiciones climáticas y al estrés, factores que impiden su buen desempeño productivo y reproductivo (Nedeva *et al.*, 2022).

Biomoléculas naturales utilizadas para incrementar el desempeño de la reproducción animal

Las tendencias actuales, debido a una creciente popularidad, han ocasionado que muchas investigaciones se centren en diversos usos medicinales de las plantas, incluido el tratamiento para mejorar el desempeño sexual y reproductivo en humanos y de los machos de diversas especies animales de producción. Existen reportes sobre productos a base de plantas y alimentos de uso común que tienen un efecto beneficioso sobre la salud reproductiva masculina. Es probable que la infertilidad masculina sea causada por desequilibrios hormonales, nutricionales, infecciosos, entre otros factores, por lo que están surgiendo múltiples estrategias para corregirla (Sengupta *et al.*, 2018). Existen tratamientos de reproducción asistida, sin embargo, los nutraceuticos están ganando terreno como una modalidad terapéutica alternativa o suplementaria para esta condición.

Función de los nutraceuticos sobre el desempeño sexual y reproductivo

Existen factores ambientales que pueden alterar la secreción hormonal, diferenciación celular de los testículos, maduración en el epidídimo y transporte de espermatozoides. Así mismo, es conocido que algunas deficiencias nutricionales generan trastornos y degeneración de los órganos reproductivos en diferentes grados, lo que desencadena una afectación en la fertilidad. (Freitas y de Oliveira, 2018), debido a esto, se ha optado por buscar estrategias que se sean efectivas con el propósito de aumentar la productividad en los hatos ganaderos. La condición de los animales juega un papel importante en la regulación de procesos reproductivos, incluida la calidad del espermato (Hashem *et al.*, 2024)

En 1989 el Dr. Stephen De Felice a partir de "Nutrición" y "Farmacéutico" acuñó el término de "Nutraceutico". Estas definiciones pueden ayudar a distinguir entre suplementos dietéticos y alimentos funcionales y nutraceuticos (Kalra, 2003).

El término nutraceutico se le adjudica a productos derivados de alimentos que proporcionan beneficios extras para la salud que van más allá de los valores básicos de la dieta. Entre algunos de los productos nutraceuticos que son utilizados en la reproducción se pueden mencionar la L-carnitina, las vitaminas del complejo B, arginina, β -caroteno, omega-3 y los antioxidantes en general (Freitas y de Oliveira, 2018). Las biomoléculas

que se encuentran de manera natural como componentes de alimentos han venido generando una gran popularidad como aditivos en las dietas de los animales, debido a su potencial para mejorar la calidad del espermatozoide y la eficiencia reproductiva animal (Hashem *et al.*, 2024).

Debido a que los consumidores se hacen más conscientes sobre el origen y calidad de los productos de origen animal, la integración de aditivos naturales inocuos puede mejorar los aspectos generales de la industria ganadera y por ende con el compromiso del bienestar animal y prácticas ecológicas (Njisane *et al.*, 2019).

Con la finalidad de utilizar fuentes naturales, sostenibles, limpias, verdes y éticas para la manipulación del desempeño y control reproductivo de los machos de roedores y en la especie humana, (Nasimi Doost *et al.*, 2018) se ha diversificado su uso ya en especies de interés zootécnico, se han empleado diversas alternativas de origen natural, y priorizando el bienestar animal tal como las biomoléculas de *Withania somnifera* (WS) y *Lepidium meyenii* (LM) para ver su efecto sobre el proceso endocrinológico y de espermatogénesis (Avelar *et al.*, 2016).

Withania somnifera (WS), también conocida como Ashwagandha, es un arbusto densamente pubescente de hasta 1 m de altura, perteneciente a la familia de las solanáceas. Se han identificado compuestos químicos en WS, incluyendo grandes cantidades de antioxidantes, taninos, flavonoides y compuestos fenólicos (Kaur *et al.*, 2014). Se ha informado que WS posee efectos antiinflamatorios y antioxidantes, y puede ser útil en el tratamiento de trastornos endocrinos y neuronales (Mishra *et al.*, 2000). Las propiedades medicinales del WS se atribuyen a metabolitos secundarios específicos, como alcaloides y withasteroides-withanolídeos (Kumar *et al.*, 2015). Un estudio demostró los efectos positivos del WS en ratas macho en la medida en que aumentó el nivel de hormona luteinizante (LH) en ratas macho adultas (Dar *et al.*, 2015). Los estudios también indican que el extracto acuoso de WS induce algunos cambios en las gonadotropinas hipofisarias acompañados de un aumento en la foliculogénesis en ratas hembra inmaduras (Singh *et al.*, 2010). Otro estudio informó que WS aumentó la libido en ratas adultas (Jain *et al.*, 2012). Un estudio en 150 hombres adultos mostró que el tratamiento con WS condujo a un aumento en la testosterona y LH y una disminución en la hormona foliculo estimulante

(FSH) y prolactina sérica. El mismo estudio también informó que WS aumentó los antioxidantes y disminuyó los agentes oxidativos, reduciendo así el estrés oxidativo (Saiyed *et al.*, 2016).

Las tendencias actuales, debido a la creciente popularidad han ocasionado que muchas investigaciones se centren en diversos usos medicinales de las plantas, incluido el tratamiento del desempeño sexual y reproductivo en humanos y de los machos de diversas especies animales de producción. Se sabe que existen medicamentos a base de plantas y alimentos de uso común que tienen un efecto beneficioso sobre la salud reproductiva masculina.

Asimismo, la biomolécula *Lepidium meyenii*, conocida como maca, se utiliza para mejorar el desempeño en la reproducción principalmente en machos, aumentando la motilidad y vitalidad de los espermatozoides, de igual manera la mejora de las conductas sexuales y la calidad seminal. Sin embargo, en un estudio realizado en machos ovinos (Avelar *et al.*, 2016), no hubo diferencias en el desempeño reproductivo total, ellos evaluaron su efecto sobre la capacidad de servicio de los machos, 40 machos se clasificaron como de alto (HP) y bajo desempeño sexual (LP), (high and low performance). Dentro de cada categoría (n = 20), diez machos se suplementaron con 233 mg de maca seca/kg de peso corporal/día durante cuatro semanas, seguidos de cuatro semanas de dieta control, mientras que el resto de los animales permanecieron como testigos durante las ocho semanas. Los machos ovinos LP incrementaron ($P < 0.05$) todas sus conductas sexuales durante la suplementación hasta niveles similares a los mostrados por los HP. En contraste, en los machos HP, la suplementación con maca sólo incrementó las conductas de olfateo genital y cortejo, sin embargo, montas y eyaculaciones permanecieron sin cambios tanto durante la fase de suplementación como la residual. Se concluyó que la suplementación con maca actúa diferente en machos de acuerdo a su capacidad de servicio. Probablemente por la dosificación o el tiempo de suplementación, pudieran ser factores para considerar.

Estudios en humanos muestran que *Lepidium meyenii* incrementa la motilidad y la vitalidad espermática, con efectos más evidentes en individuos con baja motilidad originalmente. Esto se traduce en una mayor capacidad de fertilización y embarazos en parejas de sujetos tratados. Además, se ha observado una mejora en la calidad espermática

debido a la reducción de células germinales inmaduras y formas anormales, beneficiando la espermatogénesis (Abdulzahra *et al.*, 2024).

Investigaciones en ratas y humanos muestran que la maca puede aumentar el peso de testículos y epidídimos, revitalizando la espermatogénesis, y mejorando el volumen seminal junto con el número y motilidad de espermatozoides en humanos. Los niveles hormonales, como la testosterona, pueden estar modulados sin cambios significativos indicando que la maca actúa más desde la calidad espermática que por alteraciones hormonales directas. *Lepidium meyenii* tiene también propiedades antioxidantes que protegen la funcionalidad espermática y la salud reproductiva frente a daños oxidativos, mejorando la espermiación y protección testicular en modelos experimentales (Inoue *et al.*, 2016).









III. ARTÍCULOS

Article 1: Circular Economy, Dairy Cow Feed Leftovers, and *Withania somnifera* Supplementation: Effects upon Black Belly Ram's Libido, Sperm Quality, Sexual Behavior, and Hemogram Values.

Artículo 2: Efecto Robín Hood; sobrantes alimenticios de vacas lecheras + suplementación nutracéutica: Principales resultados en variables corporales, metabólicas y volumétricas testicular-res-espermáticas en ovinos Black Belly.

Article

Circular Economy, Dairy Cow Feed Leftovers, and *Withania somnifera* Supplementation: Effects on Black Belly Ram's Libido, Sperm Quality, Sexual Behavior, and Hemogram Values

Andrés J. Rodríguez-Sánchez ¹, Cesar A. Meza-Herrera ^{2,*}, Angeles De Santiago-Miramontes ^{1,*}, Cayetano Navarrete-Molina ³, Francisco G. Veliz-Deras ¹, Julieta Z. Ordoñez-Morales ¹, Jessica M. Flores-Salas ¹ and Ruben I. Marin-Tinoco ^{3,4}

¹ Programa de Posgrado en Ciencias en Producción Agropecuaria, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Unidad Laguna, Torreon 27054, Mexico

² Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas, Universidad Autónoma Chapingo, Mapimí 35230, Mexico

³ Departamento de Química Área Tecnología Ambiental, Universidad Tecnológica de Rodeo, Rodeo 35760, Mexico; navarrete.molina1977@gmail.com (C.N.-M.)

⁴ Hospital Rural no. 162 Instituto Mexicano del Seguro Social, Rodeo 35760, Mexico

* Correspondence: cmeza2020@hotmail.com (C.A.M.-H.); angelesdesantiago867@gmail.com (A.D.S.-M.)



Citation: Rodríguez-Sánchez, A.J.; Meza-Herrera, C.A.; De Santiago-Miramontes, A.; Navarrete-Molina, C.; Veliz-Deras, F.G.; Ordoñez-Morales, J.Z.; Flores-Salas, J.M.; Marin-Tinoco, R.I. Circular Economy, Dairy Cow Feed Leftovers, and *Withania somnifera* Supplementation: Effects on Black Belly Ram's Libido, Sperm Quality, Sexual Behavior, and Hemogram Values. *Biology* **2024**, *13*, 656. <https://doi.org/10.3390/biology13090656>

Academic Editors: Jean Feugang and Yongjie Wan

Received: 21 July 2024

Revised: 11 August 2024

Accepted: 21 August 2024

Published: 24 August 2024



Copyright: © 2024 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Simple Summary: In the Americas, the Comarca Lagunera (CL), located in North-arid Mexico, concentrates one of the main dairy cattle hubs (>500,000 Holstein cows) managed under highly technified-industrial schemes. Dairy cows' nutrition is based on the use of total mixed rations; whereas feed rejection (i.e., 3–5%) has been observed, such feed-leftovers retain a high-pitched nutritional value. The CL also holds an emergent sheep industry, which exhibited the largest production value growth (i.e., >580%; 2010–2023). With that in mind and considering a circular economy perspective, we envisioned a research opportunity. Our working hypothesis states that a basal diet founded on such dairy cow feed-leftovers and aligned with short-term supplementation (i.e., 40 d) with *Withania somnifera* L. (Ashwagandha) will enhance some reproductive and behavioral outcomes in Black Belly rams. Such approach should bridge these two interesting animal production systems in the CL.

Abstract: Considering a circular economy perspective, this study evaluates the possible effect of targeted short-term supplementation with *Withania somnifera* L. (WS; Ashwagandha) on ram's seminal quality, socio-sexual behaviors, and blood constituents. Black Belly rams ($n = 20$) received a basal diet comprising feed-leftovers from dairy cows in the north-arid Mexico (i.e., Comarca Lagunera CL). The experimental units, with proven libido and fertility, were homogeneous in terms of age (3.41 ± 0.21 yr), live weight (LW; 53.8 ± 3.3 kg), body condition (BC; 2.96 ± 0.01 units), initial sperm concentration ($2387 \pm 804 \times 10^6$), and viability ($23.9 \pm 15.6\%$). Rams were randomly assigned during the transition reproductive period (i.e., May to Jun; 25° NL) to three treatment groups: non-supplemented control group (CONT; $n = 6$), low WS-supplemented (LWS; i.e., $100 \text{ mg kg LW}^{-1} \text{ d}^{-1} \times 40 \text{ d}$; $n = 7$), and high-WS-supplemented (HWS; i.e., $200 \text{ mg kg LW}^{-1} \text{ d}^{-1} \times 40 \text{ d}$; $n = 7$). The basal leftover diet was offered twice daily (0700 and 1600 h); the experimental period (EP) lasted 47 d. No differences ($p > 0.05$) among treatments occurred regarding LW and BCS at the onset of the EP. Whereas the greater scrotal circumference (SCRC, cm) arose in the LWS and CONT rams, an increased ejaculated volume (VOLEJA, mL) occurred in the WS-rams. A total of 5/9 (i.e., 55%) appetitive and 3/3 (i.e., 100%) consummatory sexual behaviors favored ($p < 0.05$) the WS-rams, particularly the HWS rams, towards the final EP. The same was true ($p < 0.05$) regarding the hemogram variables white blood cell count ($\times 10^9 \text{ cells L}^{-1}$), hemoglobin concentration (g dL^{-1}), and medium corpuscular volume (fL). This study, based on a rethink–reuse–reduce enquiry approach, enabled connectedness between two noteworthy animal systems in the CL: dairy cows and meat sheep schemes. Certainly, the use of dairy cow feed-leftovers aligned with the short-term supplementation with WS promoted enhanced testicular function, augmented seminal volume, and an increased sexual behavior in Black Belly rams in northern Mexico. Finally, while our research outcomes should enhance not only the resilience and sustainability

of sheep production and the well-being of sheep-producers and their families, it may also embrace clinical translational applications.

Keywords: hair sheep; dairy cows; feed surplus; ashwagandha supplementation; reproductive outcomes

1. Introduction

In the Americas, the Comarca Lagunera (CL)—an agroecological arid region located in northern Mexico, is one of the main dairy-cattle-producing regions. In 2023, with a total inventory of 500,000 Holstein cows and 245,000 milked cows, the CL generated 3000 million liters of milk, with a production value of around 1420 million USD [1,2]. Regarding small ruminants, between 1970–2023, whereas the national goat population showed a decrease of 7.5%, the sheep inventory increased 37%, with a final inventory of 8.8 million sheep. Five provinces (i.e., Mexico, Hidalgo, Veracruz, Jalisco, and Puebla) accounted for about 50% of the national sheep inventory, whereas the CL generated sheep meat production close to 180,000 kg, with a production value of 660,000 USD [1]. While the economic and productive importance of the dairy cow industry in the CL is beyond any doubt, it is worth it to state that the sheep productive and economic indicators in the CL become potentially important. During the period 2000–2023, the CL's sheep inventory grew 318%, with concomitant increases in sheep-meat production (i.e., 600%) and the sheep-production economic value (i.e., 580%). Indeed, the sheep production displayed the largest census growth of the livestock sector in the CL [1].

Most of the dairy cattle clusters in the CL are managed under highly intensified industrial production schemes and fed with total mixed rations [3]. Whereas a feed rejection of 3–5% of the offered mixed diet has been reported, such surplus feed holds a high nutritional value. Previous research from our group has demonstrated a positive effect of the dairy cow feed-leftover use to enhance the out-of-season reproductive performance in goats under extensive conditions [4] and upon the generation of some goat out-of-season bioeconomic indices [5]. These studies suggest a kind of “Robin Hood Effect” [4] by dispersing some of the non-reusable energy–protein assets from a majorly unsustainable, wasteful linear bovine model [3] towards a goat extensive system, resembling a more circular, less linear model of production [6]. In addition, and from an economic and biologic standpoint, reproductive efficiency is essential to increase the pregnancy rate and consequently augment the viability and resilience of any animal system, as well as the economic return to the producer. Certainly, the male reproductive efficiency is central to achieve greater viability not only from a productive, but also from a genetic and economic return, standpoint. On this regard, and under a clean, green, and ethical intervention approach, the use of various phytoextracts to improve not only the level of production, but also the male reproductive performance and sexual behavior in diverse animal species, has grown [7–10]. Moreover, low reproductive performance in males can be triggered by diverse hormonal, nutritional, and infectious imbalances, among others [11].

The use of nutraceuticals to increase libido and sperm quality has significantly emerged during the last decades [12,13]. As reported, the nutritional content of different plants plays an essential role due to their medicinal, nutritional, and therapeutic properties [10]. From a therapeutic standpoint, consumption of the roots of a small evergreen shrub called *Withania somnifera* [WS; Ashwagandha] has shown positive effects in animal production [12]. This WS-root has demonstrated anti-inflammatory, antitumor, anti-stress, antioxidant, and immunomodulator effects, improving hematopoiesis, while it seems to act on the endocrine, cardiopulmonary, and central nervous systems [12,14–17]. In addition, the sperm quality of infertile males can be improved by the oral intake of WS-root extracts. Certainly, the extracts of the WS-root inhibit lipid peroxidation, improve sperm counts and motility, and regulate reproductive hormone levels, with collateral benefits on the health status [8,15].

The use of such adaptogens also dynamizes the economy in diverse animal production systems [8,18].

Sheep farming, as an emergent, yet with high expansion potential, animal industry in the CL, requires the development of initiatives to increase reproductive rates to significantly impact the sheep's productive performance. In addition, there is a large opportunity to use the rejected mixed ration from the highly industrialized dairy cow production system in the CL. Therefore, we visualize an interesting research opportunity based on a rethink–reuse–reduce enquiry approach, looking for connectedness between these two interesting ruminant production schemes. Hence, we hypothesized that the use of feed-leftovers from the dairy cow industry as a basal diet aligned with the short-term supplementation with *W. somnifera* (i.e., WS) will promote enhancement of the reproductive, behavioral, and hemogram values in male sheep. To test this hypothesis, our aim was to evaluate the possible effect of this basal diet + WS-supplementation on the testicular size and function, sperm quality, sexual behavior (i.e., appetitive and consummatory), and hemogram values in Black Belly rams in northern Mexico.

2. Materials and Methods

2.1. General

All methods, experimental procedures, and management conducted in this study adhered strictly to guidelines for the ethical treatment, care, and welfare of animals in research at both the international [19] and national [20] levels. In this study, all the reported procedures aligned with conventional veterinary practices; blood and semen sampling were performed by trained veterinarians. In addition, the study received institutional endorsement under the reference number UAAAN-UL-425502002-2743.

2.2. Location, Environmental Conditions, Experimental Groups, and Management

The study was performed on a sheep herd (i.e., El Milagro) managed under intensive conditions, located in Matamoros, Coahuila, belonging to the CL in northern Mexico (25° NL, 103° WL, 1110 m altitude). The region is defined as a semi-arid ecotype, with an average annual temperature of 23.8 °C, a maximum of 41 °C in Jun, and a minimum of −1 °C in Dec and Jan. The photoperiod fluctuates from 13 h 41 min in the summer solstice down to 10 h 19 min at the winter solstice, having an average annual rainfall of 230 mm [21]. The prevailing photoperiod and the chronology of the main activities carried out, along with the experimental period, are shown in Figure 1.

Adult male sheep of the Black Belly breed ($n = 20$), with proven libido and fertility, homogeneous in terms of age (3.41 ± 0.21 year, live weight (LW; 53.8 ± 3.3 kg), body condition (BC; 2.96 ± 0.01 units), and initial concentration ($2387 \pm 804 \times 10^6$) and sperm viability ($23.9 \pm 15.6\%$) were randomly assigned to three experimental groups: non-supplemented control group (CONT; $n = 6$), low-supplemented group (LWS; i.e., $100 \text{ mg kg LW}^{-1} \text{ d}^{-1} \times 40 \text{ d}$; $n = 7$), and high supplemented group (HWS; i.e., $200 \text{ mg kg LW}^{-1} \text{ d}^{-1} \times 40 \text{ d}$; $n = 7$). The experimental groups received a basal diet twice daily (0700 and 1600 h) comprising the feed-leftovers from an industrial, highly technified dairy cow enterprise and composed of a mixture of alfalfa hay, corn silage, rolled corn grain, soybean meal, cottonseed meal, and a vitamin–mineral premix. Both the physical and chemical conformation of the basal diet (i.e., dairy cow feed-leftovers), as well as the management of the offered basal diet, were previously defined [4,5]. Briefly, the feed-leftovers from a dairy cow enterprise were collected daily (i.e., 0700 h) and brought to the ram's corrals to be individually offered to the WS-supplemented rams. Rams were dewormed one month prior to the experimental period and received fat-soluble vitamins (A 500,000 UI; D 75,000 UI; E 50 UI). In addition, cleaning, attempting to control the fly population, was carried in both the general corrals and the experimental pens; clean fresh water was provided ad libitum. Rams had a three-week adaptation period to the basal diet, prior to the onset of the EP. The chemical and physical composition of the basal diet is shown in Table 1.

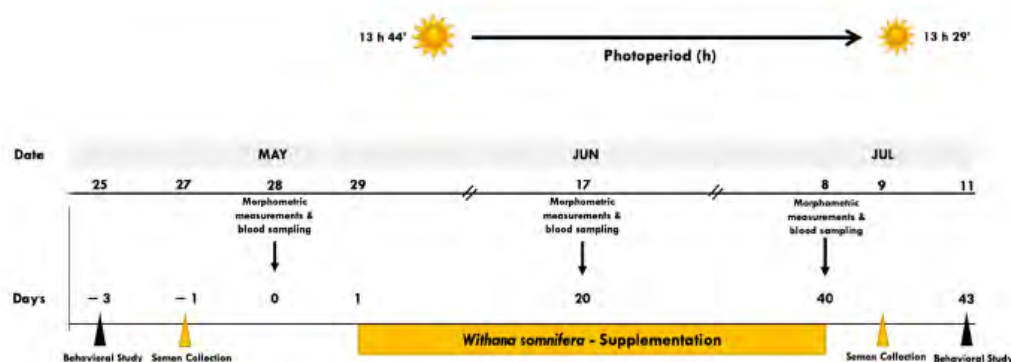


Figure 1. Schematic representation of the experimental protocol. Black Belly rams ($n = 20$), with proven libido and fertility, homogeneous in terms of age (3.41 ± 0.21 years), live weight (LW; 53.8 ± 3.3 kg), body condition (BC; 2.96 ± 0.01 units), and initial sperm concentration ($2387 \pm 804 \times 10^6$) and viability ($23.9 \pm 15.6\%$) were fed twice daily (0700 and 1600 h), with a basal diet comprising the feed-leftovers from an industrial dairy cow enterprise. Rams were randomly assigned during the transition reproductive period (i.e., May–Jun–Jul; 25^o NL) to three treatment groups: non-supplemented control group (CONT; $n = 6$), low WS-supplemented (LWS; i.e., $100 \text{ mg kg LW}^{-1} \text{ d}^{-1}$; $n = 7$), and high-supplemented (HWS; i.e., $200 \text{ mg kg LW}^{-1} \text{ d}^{-1}$; $n = 7$). While the experimental period (EP) lasted 47 d, the response variables included corporal and testicular measurements, seminal evaluations, socio-sexual behavior (i.e., appetitive and consummatory), and hemogram quantifications. On May 28, Jun 17, and Jul 08; (d-1, 20 and 40 of the EP), LW, BC, scrotal circumference, and odor intensity were registered; blood samples were also collected to build the hemogram response. On days-3 and 43 of the EP, behavioral male-to-female tests were carried out (0800 h, during 15 min; each day) quantifying the number of sexual (i.e., appetitive and consummatory) and non-sexual behaviors. Also, on day-1 and 41, semen samples were collected to quantify seminal quantity and quality. No indication of any health-related issues was observed along with the EP.

Table 1. Chemical and physical composition of the dairy cow feed-leftovers used as basal diet offered during the experimental period (40 d) to Black Belly rams ($n = 20$) in northern Mexico ^{1,2,3,4}.

Ingredient	$\text{g kg}^{-1} \text{ DM}^{-1}$
Corn silage	241.6
Rolled corn grain	310.7
Alfalfa hay	135.2
Soybean meal	123.5
Cottonseed meal	94.5
Vitamins and minerals premix	94.5
Nutrient content of diet	%
Dry matter	80.0
Ash	7.3
Ether extract	3.8
Crude protein	15.3
Neutral detergent fiber	26.9
Acid detergent fiber	17.8
Starch	30.9
Total detergent nutrients	88.9
Metabolizable energy ($\text{Mcal kg}^{-1} \text{ MS}^{-1}$)	3.5

¹ The short-term supplementation period included 40 days. ² The presence of *Aspergillus flavus* in corn by-products was discarded [22]. ³ The metabolizable energy was calculated according to the equation previously proposed [23]. ⁴ The basal diet was collected daily (i.e., 0700 AM); every 10 d, 10 samples (i.e., 50 g each) were collected along the dairy cow feeding line and were subsequently chemically and physically analyzed.

2.3. Response Variables: Corporal, Odor, Testicular, and Seminal Evaluations

During the transition reproductive period (i.e., May–Jun) the response variables evaluated were recorded on days 0 (i.e., initial) and 40 (i.e., final) of the EP, and the following were considered: live weight (LW, kg), body condition (BC, units), scrotal circumference (SC, cm), odor intensity (ODOR, units); blood samples were collected to quantify hemogram values. Whereas the LW was registered by using a digital scale with a capacity of 150 kg and a minimum of 50 g (WH-C 100, Guangdong, China), BC was evaluated via palpation of the thickness of the muscle and adipose mass. The BC-evaluated areas considered the space between the spinous and transverse processes of the lumbar vertebrae, with a range of 1 to 4 (1 = emaciated and 4 = obese) according to the technique previously described [24]. Also, with respect to the libido and semen quality variables, the following issues were registered: latency to ejaculation (LATEJA, seconds), volume ejaculated (VOLEJA, mL), sperm concentration (SPERCON, $\times 10^6$), mass motility (MASMOT, units), mass progressive motility (MASPROG, %), and sperm viability (VIABILI, %). These variables were recorded on days-1 and 40 of the EP. Whereas the SC was registered by measuring the widest point of the testes with a flexible tape measure graduated in millimeters [25], odor intensity was evaluated using a previously described technique [24]. Briefly, the back of the base of the horns was sniffed at 15 cm (range 0–3; 0, neutral odor or equal to females or neutered male; 1, light male odor; 2, moderate male taint; and 3, intense male taint).

To evaluate semen quality, it was collected from each male with the help of an artificial vagina using an estrogenized-stimulated female (i.e., 2 mg of estradiol cypionate via IM, every third day; Zoetis[®], Mexico City, Mexico). Previously, the water in the artificial vagina was preheated (i.e., 45 °C). Then, the semen was collected in graduated glass tubes, which were immediately immersed in a water bath at 37 °C for subsequent analyses over the next 10 min. The latency to ejaculate (i.e., seconds) was defined as an indirect quantification of the ram libido and considered the period from the time the male was exposed to the female in estrus to the time the ram ejaculated into the artificial vagina. Each male was exposed to the female for 300 s; after this time, if the male did not mount the female, it was considered rejection to ejaculate. Next, macro and microscopic assessments were carried out. The ejaculated volume (mL) was quantified directly in the conical collection tube, graduated with optically visible intervals of 0.1 mL. Semen color was recorded parallel to the quantification of volume directly, using the glass tube for semen collection. The seminal color collected was classified as white, milky-white, or creamy white.

The sperm concentration ($\times 10^6 \text{ mL}^{-1}$) was determined via photometric analysis (Spermacue[®], 12300/0500 Minitub, Landshut, Germany), according to Olivera-Muzante and collaborators in 2011 [26]), using undiluted semen, expressing itself as $\times 10^6 \text{ cells mL}^{-1}$. The total number of ejaculated spermatozoa (units) was calculated considering the concentration of spermatozoa per mL, multiplied by the total volume ejaculated, and expressed as $\times 10^6 \text{ cells}$. Mass motility (%) was evaluated considering a scale of 1 to 5, where 1 = 20% and 5 = 100% motile spermatozoa, as previously suggested [11]. Briefly, a preheated slide (37 °C) was used, and then, 10 μL of undiluted semen was added, and mass motility was quantified using a phase contrast microscope (Olympis CX43, Minitube, trinocular and heated stage, Tiefenbach, Germany). Progressive motility was determined based on the proportion of progressively motile spermatozoa. Briefly, 10 μL of undiluted semen was placed on a preheated slide, and then, a coverslip slide was placed and observed under a microscope (Olympis CX43, Minitube, trinocular, with a 40 \times objective, Tiefenbach, Germany). Finally, sperm viability was evaluated by means of the eosin–nigrosin staining technique [9]. Briefly, 200 cells per sample were observed using an optical microscope, using a 100 \times objective, calculating the percentage of live cells (undyed) and dead cells (stained pink). All evaluations were carried out by the same technician.

2.4. Appetitive-Consummatory Sexual and Non-Sexual Behavioral Evaluations

The response variables to evaluate sexual behavior were recorded on days 0 (i.e., initial) and 40 (i.e., final) of the experimental period. Sexual behavioral tests were per-

formed on each male on two consecutive days. Each ram was exposed to one estrogenized female during 15 min per test; the numbers of previously proposed sexual behaviors were quantified [27–29]. Appetitive sexual behavior considered approaches (APRO, n), kicking (KICK, n), ano-genital sniffing (ANGESNI, n), corporal sniffing (CORPSNI, n), flehmen (FLE, n), flehmen + sniffing (FLESNI, n), flehmen + urine sniffing (FLEURSNI, n), penis extrusion (PENEXTR, n), and attempt mounting (ATTMO, n). Regarding consummatory sexual behavior, the following response variables were evaluated: mount + penis extrusion (MOPENEXTR, n), mount + penis intromission (MOPENINTRO, n), and mount + ejaculation (MOEJACU, n). Finally, other non-sexual behaviors were also registered: [low vocalization (LVOCA, n), high vocalization (HVOCA, n), standing position (STAND, n), as well as isolation + attempt to scape (ISOATTESC, n).

2.5. Blood Sampling: Quantification of the Ram Blood Count Values—Hemogram

Along with the experimental period, all rams were blood-sampled to determine hematic count values. Blood samples (i.e., 5 mL) were collected via jugular venipuncture with 9 mL BD Vacutainer® tubes (Broken Bow, NE, USA). Tubes contained 7.2 mg of spray-dried K2EDTA on its inner wall, which acts as an anticoagulant, binding the calcium ions and interrupting the blood clotting process to assess the complete blood-plasma count. Blood samples for hemogram were collected at 0800 h under fasting conditions. Then, plasma samples were used to quantify the complete blood count with an automated hematology analyzer (Hemalyzer 1000; Minneapolis, MN, USA), performed by a trained technician. The blood response variables included the white blood cell count (WBCC, $\times 10^9$ cells L^{-1}), red blood cell count (RBCC, $\times 10^{12}$ cells L^{-1}), hemoglobin concentration (HbC, g dL^{-1}), hematocrit (Ht, %), medium corpuscular volume (MCV, fL), mean corpuscular hemoglobin (MCHb, pg), mean corpuscular hemoglobin concentration (MCHbC, g dL^{-1}), and red blood cell distribution width (RBCDW, %).

2.6. Statistical Analyses

The corporal, testicular, seminal, sexual-behavioral, and hemogram response variables were analyzed by using linear mixed models for repeated measurements in the same animal across time, by means of the PROC MIXED procedure. In the final model, the fixed effect was the supplementation level, whereas the repeated measurement was the sampling period; each period represented the measurement of diverse response variables of the same experimental unit under a different time condition. The random effect was the ram's ID within the supplementation level; each ram was considered an experimental unit. Because discontinuous or categorical variables did not fit the normal distribution, they were analyzed by means of the GENMOD procedure, using the LOGIT function to reduce skewness. When significant F values were observed among the response variables, mean separation among experimental groups considered the LSMEAN/PDIFF procedure of SAS; a statistical difference was considered at a value of $p \leq 0.05$. All statistical analyses were solved using the SAS statistical package (SAS Inst. Inc. Ver. 9.4, 2016, Cary, NC, USA). The reported results in this study are expressed in $lsmeans \pm sem$.

3. Results

3.1. *Withania somnifera* Supplementation and Corporal, Testicular, and Semen Responses

Table 2 shows the corporal, testicular, and seminal variables. Differences ($p < 0.05$) among treatments occurred with respect to the response variables: (1) SCRC, with the lowest value in the HWS group, (2) ODOR, favoring to the HWS group, and (3) VOLEJA, with the largest volume occurring in the LWS group. In contrast, no differences ($p > 0.05$) among treatments were observed regarding the following variables: LW (55.4 ± 3.16 kg), BCS (3.0 ± 0.06 units), LATEJA (134.5 ± 45.16 s), SPERCON ($2582.3 \pm 708.3 \times 10^6$), MAS-MOT (1.93 ± 0.7 units), MASPROG ($38.3 \pm 14.2\%$), and VIABIL ($33.3 \pm 13.1\%$).

Table 2. Least-square means \pm standard error of mean for different corporal, testicular, and seminal response variables according to a short-term (40 d) supplementation with *Withania somnifera* either at low (LWS; 100 mg kg LW⁻¹ d⁻¹) or high (HWS; 200 mg kg LW⁻¹ d⁻¹) levels, or not supplemented (CONT), in Black Belly rams (n = 20) in northern Mexico (25° N).

Variable	CONT	LWS	HWS	p-Value
LW (kg)	55.3 \pm 3.3 ^a	56.8 \pm 3.1 ^a	54.1 \pm 3.1 ^a	0.84
BCS (u)	3.0 \pm 0.05 ^a	2.9 \pm 0.07 ^a	3.1 \pm 0.05 ^a	0.89
SCRC (cm)	32.4 \pm 1.2 ^a	32.9 \pm 1.1 ^a	28.25 \pm 1.1 ^b	0.01
ODOR (u)	0.0 \pm 0.0 ^c	0.2 \pm 0.0 ^b	0.4 \pm 0.0 ^a	0.01
LATEJA (s)	149.7 \pm 47.5 ^a	84.8 \pm 44.0 ^a	169.1 \pm 44.0 ^a	0.28
VOLEJA (mL)	0.2 \pm 0.1 ^b	0.7 \pm 0.1 ^a	0.3 \pm 0.1 ^{ab}	0.01
SPERCON ($\times 10^6$ mL ⁻¹)	2480.1 \pm 745.9 ^a	2995.3 \pm 690.6 ^a	2272.4 \pm 690.6 ^a	0.72
MASROT (units)	1.5 \pm 0.7 ^a	2.0 \pm 0.7 ^a	2.3 \pm 0.7 ^a	0.85
MASPROG (%)	31.6 \pm 15.0 ^a	39.6 \pm 13.9 ^a	43.9 \pm 13.9 ^a	0.91
VIABILI (%)	30.4 \pm 13.8 ^a	33.9 \pm 12.8 ^a	35.7 \pm 12.7 ^a	0.98

Live weight (LW, kg), body condition score (BCS, units), scrotal circumference (SCRC, cm), odor (units), latency to ejaculation (LATEJA, s), volume ejaculated (VOLEJA, mL), sperm concentration (SPERCON, $\times 10^6$ mL⁻¹), mass motility (MASROT, units), mass progressive motility (MASPROG, %), sperm viability (VIABILI, %).

^{a-c} Least-square means without a common superscript within a response variable differ ($p < 0.05$).

3.2. *Withania somnifera* Supplementation and Sexual and Non-Sexual Behavioral Responses

Appetitive and consummatory sexual behaviors, as well as other social, non-sexual behaviors are shown in Table 3. From an appetitive behavior perspective, the ANGESNI variable differed ($p < 0.05$) among groups, favoring the HWS. In contrast, the variables APRO (6.9 \pm 2.26 n), KICK (3.6 \pm 1.43 n), CORPSNI (5.4 \pm 2.3 n), FLE (0.56 \pm 0.5 n), FLESNI (1.4 \pm 0.8 n), FLEURSNI (0.76 \pm 0.5 n), PENEXTR (2.56 \pm 1.3 n), and ATTMO (2.23 \pm 1.2 n) did not differ ($p > 0.05$) among the experimental groups. Regarding the consummatory sexual behaviors, while MOPENEXTR favored ($p < 0.05$) the HWS group, no differences ($p > 0.05$) occurred for MOPENINTRO (1.5 \pm 0.50 n) and MOEJACU (0.76 \pm 0.23 n) among treatments. When considering the quantification of other non-sexual behaviors, such as low vocalizations (LVOCA, n), high vocalizations (HVOCA, n), standing position (STAND, n), and isolation + attempt to escape (ISOATTESC, n), none of them accounted for differences ($p > 0.05$) among experimental groups.

Table 3. Least-square means \pm standard error of mean for appetitive sexual behaviors, consummatory sexual behaviors, and other non-sexual behaviors according to a short-term (40 d) supplementation with *Withania somnifera* either at low (LWS; 100 mg kg LW⁻¹ d⁻¹) or high (HWS; 200 mg kg LW⁻¹ d⁻¹) levels, or not supplemented (CONT), in Black Belly rams (n = 20) in northern Mexico (25° N).

Variable	CONT	LWS	HWS	p-Value
<i>Appetitive sexual behavior</i>				
APPRO (n)	4.4 \pm 2.4 ^a	7.0 \pm 2.2 ^a	9.5 \pm 2.2 ^a	0.62
KICK (n)	2.6 \pm 1.5 ^a	5.4 \pm 1.4 ^a	3.0 \pm 1.4 ^a	0.48
ANGESNI (n)	5.3 \pm 2.9 ^b	4.7 \pm 2.6 ^b	14.3 \pm 2.7 ^a	0.03
CORPSNI (n)	2.9 \pm 2.4 ^a	4.5 \pm 2.2 ^a	8.8 \pm 2.2 ^a	0.22
FLE (n)	0.3 \pm 0.5 ^a	0.7 \pm 0.5 ^a	0.7 \pm 0.5 ^a	1.00
FLESNI (n)	1.6 \pm 0.8 ^a	1.5 \pm 0.8 ^a	1.3 \pm 0.8 ^a	0.99
FLEURSNI (n)	0.8 \pm 0.5 ^a	0.7 \pm 0.5 ^a	0.8 \pm 0.5 ^a	0.77
PENEXTR (n)	1.0 \pm 1.4 ^a	3.2 \pm 1.3 ^a	3.5 \pm 1.3 ^a	0.64
ATTMO (n)	0.8 \pm 1.3 ^a	2.6 \pm 1.2 ^a	3.3 \pm 1.2 ^a	0.61
<i>Consummatory sexual behavior</i>				
MOPENEXTR (n)	0.6 \pm 1.3 ^{bc}	1.8 \pm 1.1 ^b	4.2 \pm 1.2 ^a	0.04
MOPENINTRO (n)	1.6 \pm 0.5 ^a	1.5 \pm 0.5 ^a	1.4 \pm 0.5 ^a	0.56
MOEJACU (n)	0.9 \pm 0.3 ^a	0.5 \pm 0.2 ^a	0.9 \pm 0.2 ^a	0.69

Table 3. Cont.

Variable	CONT	LWS	HWS	p-Value
<i>Other non-sexual behaviors</i>				
LVOCA (n)	0.7 ± 0.6 ^a	0.8 ± 0.5 ^a	2.1 ± 0.5 ^a	0.25
HVOCA (n)	0.0 ± 0.4 ^a	0.6 ± 0.4 ^a	0.6 ± 0.4 ^a	0.28
STAND (n)	0.3 ± 0.4 ^a	0.8 ± 0.4 ^a	0.1 ± 0.4 ^a	0.58
ISOATTESC (n)	0.1 ± 0.1 ^a	0.0 ± 0.1 ^a	0.3 ± 0.1 ^a	0.32

Appetitive sexual behavior [approaches (APRO, n), kicking (KICK, n), ano-genital sniffing (ANGESNI, n), corporal sniffing (CORPSNI, n), flehmen (FLE, n), flehmen + sniffing (FLESNI, n), fleshmen + urine sniffing (FLEURSNI, n), penis extrusion (PENEXT, n), attempt mounting (ATTMO, n)], consummatory sexual behavior [mount + penis extrusion (MOPENEXT, n), mount + penis intromission (MOPENINTRO, n), mount + ejaculation (MOEJACU, n)], and other non-sexual behaviors [low vocalization (LVOCA, n), high vocalization (HVOCA, n), standing position (STAND, n), isolation + attempt to escape (ISOATTESC, n)]. ^{a-c} Least-square means without a common superscript within a response variable differ ($p < 0.05$).

3.3. *Withania somnifera* Supplementation and Some Hemogram Responses

The least-square means ± standard error for the hemogram response variables are shown in Table 4; HbC (g dL⁻¹) was the only hemogram variable that differed ($p < 0.05$) among treatments, favoring those rams supplemented with *W. somnifera* either at low (i.e., 100 mg d⁻¹) or high (i.e., 200 mg d⁻¹) levels, as compared with the non-supplemented Black Belly rams (i.e., CONT). In contrast, the hemogram response variables WBCC (118.6 ± 4.2 × 10⁹ cells L⁻¹), RBCC, 3.06 ± 0.1 × 10¹² cells L⁻¹), Ht (12.2 ± 0.7%), MCV (39.7 ± 0.1 fL), MCHb (48.1 ± 2.7 pg), MCHbC (121.5 ± 6.9 g dL⁻¹), and RBCDW (14.4 ± 0.2%) did not differ ($p > 0.05$) among Black Belly rams irrespectively of the WS-supplementation level.

Table 4. Least-square means ± standard error of mean for some hemogram response variables as affected by a short-term (40 d) supplementation with *Withania somnifera* either at low (LWS; 100 mg kg LW⁻¹ d⁻¹) or high (HWS; 200 mg kg LW⁻¹ d⁻¹) levels, or not supplemented (CONT), in Black Belly rams (n = 20) in northern Mexico (25° N).

Variable	CONT	LWS	HWS	p-Value
WBCC, (×10 ⁹ cells L ⁻¹)	113.7 ± 4.3 ^a	121.8 ± 4.0 ^a	121.9 ± 4.0 ^a	0.32
RBCC, (×10 ¹² cells L ⁻¹)	2.9 ± 0.1 ^a	3.3 ± 0.1 ^a	3.0 ± 0.1 ^a	0.18
HbC, (g dL ⁻¹)	12.4 ± 0.4 ^b	14.8 ± 0.4 ^a	14.6 ± 0.4 ^a	0.01
Ht, (%)	11.5 ± 0.7 ^a	13.2 ± 0.7 ^a	12.1 ± 0.7 ^a	0.18
MCV, (fL)	39.5 ± 0.1 ^a	39.9 ± 0.1 ^a	39.9 ± 0.1 ^a	0.17
MCHb, (pg)	48.7 ± 2.8 ^a	45.9 ± 2.6 ^a	49.4 ± 2.6 ^a	0.65
MCHbC, (g dL ⁻¹)	124.8 ± 7.2 ^a	115.5 ± 6.7 ^a	124.4 ± 6.7 ^a	0.61
RBCDW, (%)	14.5 ± 0.2 ^a	14.2 ± 0.2 ^a	14.5 ± 0.2 ^a	0.44

White blood cell count (WBCC, ×10⁹ cells L⁻¹), red blood cell count (RBCC, ×10¹² cells L⁻¹), hemoglobin concentration (HbC, g dL⁻¹), hematocrit (Ht, %), mean corpuscular volume (MCV, fL), mean corpuscular hemoglobin (MCHb, pg), mean corpuscular hemoglobin concentration (MCHbC, g dL⁻¹), and red blood cell distribution width (RBCDW, %). ^{a,b} Least-square means without a common superscript within a response variable differ ($p < 0.05$).

3.4. Supplementation by Time Interaction—Corporal, Testicular, and Seminal Responses

The least-square means ± standard error, as affected by the simple effect of the supplementation by time interaction regarding corporal, testicular, and seminal variables, are presented in Table 5. Since only four response variables from this dataset (i.e., BCS, units; SCRC, cm; ODOR, u; and VOLEJA, mL) were affected ($p < 0.05$) by the treatment-by-time interaction, other blood variables were not included. Certainly, such non-included response variables were only affected by the main effect of the supplementation level as seen in Table 2. Regarding the response variables affected by the simple effect of the treatment-by-time interaction, differences ($p < 0.05$) emerged among treatments regarding the following: (a) BCS, observing the largest value ($p < 0.01$) towards the final part of the experimental period in the HWS-Black Belly rams; (b) SCRC, with the larger values occurring in the LWS and CONT groups; (c) ODOR, favoring the HWS-Black Belly rams;

and (d) VOLEJA, with the larger volumes occurring in the *W. somnifera*-supplemented rams. Interestingly, despite the HWS-rams showing the lowest SCRC, they showed an increased VOLEJA ($p < 0.01$) regarding the CONT, which depicted increased SCRC values regarding the HWS-Black Belly rams.

Table 5. Least-square means \pm standard error of mean according to the supplementation-by-time interaction regarding the body condition score, scrotal circumference, odor, and volume ejaculated as affected by either a short-term (40 d) supplementation with *Withania somnifera* at low (LWS; 100 mg kg LW⁻¹ d⁻¹) or high (HWS; 200 mg kg LW⁻¹ d⁻¹) levels, or not supplemented (CONT), as well as the time supplementation period [i.e., d0 (Initial) or d40 (Final)] in Black Belly rams (n = 20) in northern Mexico (25° N)¹.

Variable	CONT		LWS		HWS		SEM ²	p-Value
	Initial	Final	Initial	Final	Initial	Final		
BCS (u)	3.0 ^b	2.9 ^b	2.9 ^b	2.9 ^b	3.0 ^b	3.3 ^a	0.1	0.01
SCRC (cm)	31.6 ^{ab}	33.2 ^a	31.7 ^{ab}	34.0 ^a	27.4 ^c	29.0 ^{bc}	1.2	0.01
ODOR (u)	0.0 ^c	0.0 ^c	0.0 ^c	0.5 ^b	0.0 ^c	0.9 ^a	0.0	0.01
VOLEJA (mL)	0.2 ^b	0.3 ^b	0.6 ^a	0.8 ^a	0.5 ^{ab}	0.6 ^a	0.1	0.01

¹ Body condition score (BCS, units), scrotal circumference (SCRC, cm), odor (units), and volume ejaculated (VOLEJA, mL). ² The most conservative standard error of the mean is presented. ^{a-c} Least-square means without a common superscript within a response variable differ ($p < 0.05$).

3.5. Supplementation by Time Interaction—Sexual and Non-Sexual Behavioral Responses

Information regarding the effect of the supplementation level by time interaction affecting ($p < 0.05$) the performance of both appetitive and consummatory sexual behaviors, as well as other non-sexual behaviors, throughout the experimental period (i.e., simple effect of the treatment interaction by time) is presented in Table 6.

Table 6. Least-square means \pm standard error of mean according to the supplementation-by-time interaction regarding appetitive sexual behaviors, consummatory sexual behaviors, and other non-sexual behaviors, as affected by either a short-term (40 d) supplementation with *Withania somnifera* either at low (LWS; 100 mg kg LW⁻¹ d⁻¹) or high (HWS; 200 mg kg LW⁻¹ d⁻¹) levels, or not supplemented (CONT), as well as the time supplementation period [i.e., d0 (Initial) or d40 (Final)] in Black Belly rams (n = 20) in northern Mexico (25° N)¹.

Variable	CONT		LWS		HWS		SEM ²	p-Value
	Initial	Final	Initial	Final	Initial	Final		
Appetitive sexual behavior								
APPRO (n)	1.8 ^b	3.5 ^{ab}	6.2 ^a	4.5 ^{ab}	4.0 ^{ab}	2.1 ^{ab}	1.7	0.01
KICK (n)	3.0 ^b	5.8 ^{ab}	6.5 ^{ab}	7.5 ^{ab}	7.4 ^{ab}	11.5 ^a	2.9	0.01
ANGESNI (n)	5.0 ^b	5.6 ^b	6.0 ^b	3.4 ^b	8.7 ^{ab}	19.8 ^a	3.5	0.01
CORPSNI (n)	1.8 ^b	4.0 ^{ab}	5.0 ^{ab}	4.0 ^{ab}	4.8 ^{ab}	12.8 ^a	3.2	0.01
FLE (n)	0.5 ^a	0.1 ^a	0.0 ^a	1.4 ^a	0.0 ^a	1.4 ^a	0.8	0.07
Consummatory sexual behavior								
MOPENEXTR (n)	0.1 ^b	1.1 ^{ab}	1.4 ^{ab}	2.1 ^{ab}	2.5 ^{ab}	5.8 ^a	1.5	0.01
MOPENINTRO (n)	0.6 ^{ab}	1.6 ^a	1.1 ^{ab}	2.0 ^{ab}	2.0 ^{ab}	2.0 ^b	0.07	0.03
MOEJACU (n)	0.3 ^b	1.5 ^a	0.4 ^b	0.5 ^{ab}	0.7 ^{ab}	1.4 ^a	0.03	0.04
Other non-sexual behaviors								
LVOCA (n)	1.3 ^b	0.1 ^b	0.5 ^b	1.0 ^b	0.8 ^b	3.4 ^a	0.7	0.01
ISOATTESC (n)	0.1 ^b	0.0 ^b	0.0 ^b	0.0 ^b	0.0 ^b	0.7 ^a	0.2	0.05

¹ Appetitive sexual behavior [approaches (APPRO, n), kicking (KICK, n), ano-genital sniffing (ANGESNI, n), corporal sniffing (CORPSNI, n), and flehmen (FLE, n), consummatory sexual behavior [mount + penis extrusion (MOPENEXTR, n), mount + penis intromission (MOPENINTRO, n), mount + ejaculation (MOEJACU, n)], and other non-sexual behaviors [low vocalization (LVOCA, n), and isolation + attempt to escape (ISOATTESC, n)].

² The most conservative standard error of the mean is presented. ^{ab} Least-square means without a common superscript within a response variable differ ($p < 0.05$).

Interestingly, as seen in Table 6, a total of 5/9 (i.e., 55%) appetitive sexual behaviors and 3/3 (i.e., 100%) consummatory sexual behaviors favored ($p < 0.05$) the Black Belly rams supplemented with *W. somnifera*, particularly in the HWS group, towards the end of the experimental period. On the other hand, the FLE response variable showed a trend ($p = 0.07$) like its appetitive counterparts with the highest values not only towards the end of the study but also in those groups supplemented with *W. somnifera*. Finally, non-sexual behaviors, low-range vocalizations ($p < 0.01$), and aggressions + escape attempts ($p < 0.05$) were also affected by the effect of the interaction supplementation by time, favoring the HWS group.

3.6. Supplementation by Time Interaction—Some Hemogram Responses

According to the variables presented in Table 7, the highest ($p < 0.05$) WBCC values occurred in the HWS-Black Belly rams. A similar trend was followed by the HbC and MCV variables; the highest values were observed in the EP's intermediate and final phases in those males receiving short-term supplementation with *W. somnifera* ($p < 0.05$). The other blood variables are not included in this table, because they were only affected by the main effect of the supplementation level (Table 4).

Table 7. Least-square means \pm standard error of mean according to the supplementation-by-time interaction regarding the hemogram response variables as affected by either a short-term (40 d) supplementation with *Withania somnifera* either at low (SLW; 100 mg kg LW⁻¹ d⁻¹) or high (SHW; 200 mg kg LW⁻¹ d⁻¹) levels, or not supplemented (CONT), as well as the time supplementation period (i.e., d0 (Initial), d20 (Middle) or d40 (Final), in Black Belly rams (n = 20) in northern Mexico (25° N)¹.

Variables	CONT			LWS			HWS			SEM ²	p-Value
	Initial	Middle	Final	Initial	Middle	Final	Initial	Middle	Final		
WBCC ($\times 10^9$ cells L ⁻¹)	113.6 ^b	112.8 ^b	114.8 ^b	119.3 ^{ab}	109.5 ^b	136.6 ^a	121.8 ^{ab}	109.4 ^b	134.6 ^a	7.0	0.01
HbC (g dL ⁻¹)	11.7 ^b	13.5 ^b	12.2 ^b	13.6 ^b	13.6 ^a	17.3 ^a	13.0 ^b	13.1 ^b	17.7 ^a	0.8	0.01
MCV (fL)	39.3 ^b	39.2 ^b	39.3 ^b	39.3 ^b	39.7 ^{ab}	40.6 ^a	39.4 ^b	39.9 ^{ab}	40.5 ^a	0.3	0.01

¹ White blood cell count (WBCC, $\times 10^9$ cells L⁻¹), hemoglobin concentration (HbC, g dL⁻¹), and mean corpuscular volume (MCV, fL). ² The most conservative standard error of the mean is presented. ^{ab} Least-square means without a common superscript within a response variable differ ($p < 0.05$).

4. Discussion

Our working hypothesis stated that short-term *W. somnifera* supplementation (i.e., 40 d) generates an enhancement not only of the testicular size and function, but also an augmented sperm quality and quantity, with an increased odor intensity and socio-sexual behaviors (i.e., appetitive and consummatory) in Black Belly rams fed with feed-leftovers from a dairy cow industry as a basal diet in northern-arid Mexico. According to the main outcomes from this study, this working hypothesis is not rejected. In sires, either rams, bucks, or stallions, semen quality, libido, and the hemogram are important variables to define male reproductive fitness. Whereas sperm and blood cells appear to be among those cellular lines pointedly susceptible to metabolic and environmental influences, the interaction among diet, micronutrients, endogenous biochemical pathways, and reproductive-seminal outcomes in ruminants has been established [30]. In our study, an antioxidant role of WS may have played a supportive role, considering the high metabolic activity depicted by both sperm and blood cells, resulting in an increased cell turn over and therefore a large susceptibility to oxidative stress. Indeed, these two cell lines are expressly prone to subcellular changes generated by an augmented metabolic rate and, in turn, the release of reactive oxygen species (ROS) [31,32]. Therefore, WS-supplementation may have acted as a ROS-scavenger, enhancing the seminal and hemogram cellular outcomes. The last is in a pathway still to be defined but certainly enhanced by increases in serum testosterone concentrations. Such scenario may have influenced both appetitive and consummatory

sexual behaviors in those Back Belly rams supplemented with WS, during the sexual resting–transition season (i.e., May–Jun–Jul; 25° N) in the CL.

4.1. *Withania somnifera* Supplementation and Some Corporal, Testicular, and Seminal Responses

While no differences among treatments occurred regarding LW and BCS at the onset of the EP, differences emerged by the end of the EP (i.e., BCS and ODOR); the largest values occurred in the HWS rams. The observed outcomes of this study, in particular the positive effect of WS-supplementation on SCRC and VOLEJA, certainly acquire special interest. As reported, WS not only induces testicular development [14] and augmented testosterone synthesis [$\Delta = 72 \text{ ng dL}^{-1}$ (WS) v.s. $\Delta = 5.4 \text{ ng dL}^{-1}$ (CONT)] [16], but also enhanced semen quality by managing the optimum levels of essential amino acids, citrate, and lactate in seminal plasma [14]. Both reactive oxygen and nitrogen species are extremely responsive free radicals generated at subcellular testicular compartments, mainly mitochondria. Thus, the excessive production of free radicals promotes tissue damage and cell death because of a reduction in the antioxidant status [33,34]. Moreover, lipid peroxidation exerts damage to the sperm cellular membrane, engendering a significant reduction in fertility potentials. In addition, oxidative stress also impairs sperm viability, since under such scenarios, the unsaturated fatty acid content is naturally augmented in the cytoplasm [34]. Furthermore, ROS cause male infertility by preventing spermatogenesis. Even more, ROS compromise the sperm architecture and function, as well as sperm motility, viability, acrosome reaction, and sperm–ovum interactions. In turn, ROS reduce fertilization while diminishing implantation rates [35]. Therefore, a reduction in the excessive ROS levels is, certainly, a way to overcome or diminish such reproductive harms.

Further, and in a very interesting fashion, despite the HWS-rams exhibiting a diminished SCRC (i.e., a 13% reduction) regarding both CONT and LWS groups, the HWS-rams doubled the ejaculated volume as compared to the CONT-rams, with no differences among groups concerning the sperm concentration (i.e., $2582 \text{ sperms} \times 10^6 \text{ mL}^{-1}$). Therefore, an interesting question emerges from our study. Is it possible that the augmented SCRC and VOLTEJA values observed in the WS-rams can be extended to an in vivo (i.e., either direct mount or fresh semen) or in vitro (i.e., frozen semen) fertilizing potential? The last is central since the preparation of semen for assisted reproductive techniques requires the elimination of seminal plasma, which has a high amount of antioxidant molecules and enzymes. As the semen lacks its own protection against free radicals, they have a high risk of damage generated by oxidative stress [7,13]. Moreover, sperm cryopreservation allows for sperm storage. However, this process is also associated with the production of oxygen free radicals, which subsequently leads to lipid peroxidation and decreased sperm parameters [36]. Even when the level of ROS is pathologically augmented, antioxidant compounds start to work, aiding to lessen oxidative detriment, healing, or even prevent it [37]. Therefore, the assessment of the possible extended positive action of the WS supplementation upon the in vivo and in vitro seminal fertilizing potential emerges as an interesting research question that warrants further studies.

In an elegant study comparing the use of different phytoextracts in male rats, with WS among these, no differences ($p > 0.05$) regarding body weight, as well as absolute (g) and relative (%) reproductive organ weights (i.e., testis, whole epididymis, vas deferens, seminal vesicles, and ventral prostate) occurred between the WS and CONT groups. The same was true ($p > 0.05$) regarding total sperm motility (%) and abnormality rate (%; head, tail, and total). Nonetheless, the WS-supplemented males shown an increased ($p < 0.01$) sperm concentration regarding the CONT-rams (i.e., 154.8 vs. $110.3 \times 10^6 \text{ Right Cauda}^{-1}$) [38]. Our research outcomes arise as the importance about the use of WS as an antioxidant adjuvant, to prevent the onset of disturbances in case of augmented metabolic activity, such as that observed previously (i.e., transition period) and during the breeding season. In rams, the spermatogenesis process (i.e., spermatocytogenesis, meiosis, and spermiogenesis) lasts around 60 days. Therefore, it could be tempting to propose that the duration of the WS-supplementation period (i.e., 40 d) was not sufficient to promote more substantial effects

on the seminal outcomes from a quality and quantity perspective. Nonetheless, if we also consider the asynchronous nature of the spermatogenesis cycle, a restricted period effect of the WS-supplementation may be pondered as having a low impact. Undoubtedly, a 60 d WS-supplementation period would have defined a better and stronger response regarding the quality–quantity of semen in the Black Belly rams. Certainly, supplementation of at least 60 days, parallel to the positive effect of the 45 d WS-supplementation observed on the ejaculated volume, would possibly have been extended to other response variables, in particular, those defining seminal quality and even the libido level (i.e., LATEJA (s), SPERCON ($\times 10^6$ mL $^{-1}$), MASMOT (units), MASPROG (%), and VIABILI (%). Therefore, further studies must consider this situation.

4.2. *Withania somnifera* Supplementation and Some Sexual and Non-Sexual Behavioral Responses

Sexual behavior is a complex centralized controlled process that involves a myriad of neurotransmitters and neuropeptides. While the neural circuitry mediating sexual motivation and behavior overlaps in both sexes [39], the specific mating actions are sexually dimorphic yet strongly gonadal–endocrine-dependent in both sexes [40,41]. Certainly, gonadal hormones have an essential role in brain sexual differentiation at the fetal and perinatal stages by shaping sexually dimorphic neural circuits [39–41]. Later, gonadal hormones activate such sexual circuitry, promoting the expression of the relevant sex-typical behavior [39–42].

Withanolids are steroidal lactones (i.e., withaferin A and withanolide D) and are the main bioactive compounds present in WS; they target diverse biomolecules and are responsible for diverse pharmacological actions [17,43]. Testosterone is one of the main products of the steroidogenic pathway; its optimal level improves spermatogenesis, libido, energy, bone density, erectile function, and muscle strength [41,42,44]. In humans, the effect of WS supplementation (i.e., 8 weeks) was evaluated based on the androgen profile and various sexual domains. The response variables were registered at the initial and final week of the supplementation period and included serum testosterone, sexual fantasies, sexual arousal, sexual behavior, libido, ejaculation, and the total sexual score. While all these variables favored ($p < 0.05$) the WS-males, a substantial increase ($p < 0.05$) during the final assessment (i.e., week 8th) occurred in all the evaluated variables [16]. In another study comparing the use of different phytoextracts in male rats, with WS among these, all the sexual behavioral response variables [i.e., mounting latency (sec) and frequency (n), as well as intromission latency (sec) and frequency (n)] favored ($p < 0.01$) the WS-supplemented males [38]. Intriguingly, however, while no differences ($p > 0.05$) for FSH and LH occurred between the WS and CONT groups, the WS-males displayed the largest ($p < 0.01$) testosterone concentration (i.e., 3.5 vs. 2.2 ± 0.1 ng mL $^{-1}$). Moreover, when quantifying the concentration of malonaldehyde (MDA), an index of lipid peroxidation and oxidative stress, the CONT-males disclosed the largest values, either in serum (i.e., 0.54 vs. 0.44 ± 0.05 μ mol L $^{-1}$) or in the testis (i.e., 1.64 vs. 1.51 ± 0.09 nmol g $^{-1}$) regarding the WS-supplemented males [38]. The last confirms the central role of WS as an adaptogen that reduces lipid peroxidation and oxidative stress.

Sexual behaviors are often conceptualized in two classes: appetitive and consummatory [28,29,45]. In our study, a total of 10 out of 16 (i.e., 62.5%) socio-sexual behaviors were linked to the short-term WS-supplementation. From these behaviors, 5/9 (i.e., 55%) were defined as appetitive, but 3/3 (i.e., 100%) were defined as consummatory sexual behaviors; all of these favored ($p < 0.05$) the WS-rams, particularly the HWS rams around the end of the EP. WS-influenced socio-sexual behaviors included appetitive behaviors, such as approaches, kicking, ano-genital sniffing, corporal sniffing, and flehmen, consummatory behaviors, like mount + penis extrusion, mount + penis intromission, and mount + ejaculation, and non-sexual behaviors, such as low vocalizations and isolation + attempt to escape.

4.3. *Withania somnifera* Supplementation and Some Hemogram Responses

Blood is constituted of formed elements, such as red blood cells, white blood cells, and platelets, which are suspended in a fluid medium termed plasma. Plasma is obtained via the centrifugation of blood that is prevented from clotting and comprises 55–66% of the total volume. In a very interesting study comparing the use of different phytoextracts in male rats, with WS among these, based on some hemogram response variables, no differences ($p > 0.05$) arose among WS-males, the control positive sildenafil, and the control negative standard group [38]. In our study, the hemogram response variables white blood cell count (WBCC, $\times 10^9$ cells L^{-1}), hemoglobin concentration (HbC, g dL^{-1}), and medium corpuscular volume (MCV, fL) were positively affected by the short-term WS-supplementation, although all of them were within the normal range values for sheep. While an increased WBCC may denote a normal response to reduce inflammation processes, an augmented HbC may suggest a natural response to an amplified metabolic rate, whereas MCV is an indicator of the RBC average size; augmented values could be related to low iron levels.

Prior to close the Discussion of our study, and contrasting our results with previous studies cited in the scientific literature, we still have two pending assignments. The first one is to propose some possible mechanisms of action through which the WS short-term supplementation could have affected most of the response variables in our study. While we certainly have a fragmentary knowledge of such respects, a starting point is to gain a broader insight regarding the molecular mechanisms involved in the antioxidant response exerted by WS in the male reproductive tissues. For this respect, the Nrf2 signaling pathway (i.e., erythroid 2-related factor 2) has been proposed as a transcription factor that promotes the expression of different and crucial antioxidant genes [46,47]. In addition, NF- κ B, an enhancer binding-transcription factor aligned to the immune, cell proliferation, and apoptosis responses has shown not only important pro-survival actions through the induced transcription of several antiapoptotic genes [48], but it has been related to the downregulation of neuroinflammatory genes [49].

Therefore, the possible WS-supplementation effect on the expression of NF κ B and Nrf2 protein levels, along with some components of the male reproductive tract, should be an important point of departure. Accordingly, WS supplementation promoted the augmented protein expression of Nrf2 in the vas deferens, epididymis, testes, and prostate, without major effects regarding the protein expression of NF κ B. Another plausible WS-mechanism of the action could be its role as a facilitator, either in vitro and in vivo, based on the expression and release of GnRH throughout GABAergic neurons [50]. In addition, the action of WS supplementation may also act through withanolides, probably derived from cholesterol; withanolides involve a group of C28-steroidal lactone triterpenoids that resemble the structure of testosterone [51]. Therefore, considering such previous research outcomes merged with our research results, we can observe a feasible and interesting way to better understand how the WS-supplementation increased spermatogenesis, odor intensity, and libido, with all of them linked to an enlarged sexual behavior, either appetitive or consummatory, observed in the ashwagandha-supplemented Black Belly rams. Unquestionably, these outlined possible mechanisms of WS action on male reproductive and sexual outcomes, although tempting and persuasive, remain to be scientifically proven.

The second pending assignment relates to a comment on the potential impact that bridging of the dairy cow production system and the meat sheep production system may have on the animal industry in the CL from a socio-economic standpoint. In this regard, we start from the volume of leftovers available from the dairy cattle industry, only considering the rejection (i.e., 4–5%) of the cows in production (i.e., only milking cows, excluding dry cows). These values range from 157,389 to 209,236 tons on a wet basis, equivalent to 80,654 to 100,818 tons on a dry basis. If we consider a conservative average sheep LW of 50 kg (i.e., males and females) with an average consumption of 3% LW, the last is equivalent to an annualized consumption of 1.14 tons per sheep, on a wet basis. Therefore, the use of dairy cow fodder leftovers would potentially feed a production inventory from 146,832

to 183,540 sheep. In turn, this sheep inventory for meat production, with a conservative carcass yield of 45%, would generate a production value with annualized ranges of 14.4 to 18.1 million USD. This circular economy, animal productive efficiency, bioeconomic gains, and human well-being frame, would contribute to both the mitigation and resolutions of environmental and developmental issues.

5. Conclusions

This study, based on a rethink–reuse–reduce enquiry approach, bridged two noteworthy animal systems in northern Mexico, Comarca Lagunera: dairy cows and meat sheep schemes. Certainly, the use of feed-leftovers from the dairy cow industry as a basal diet aligned with the short-term supplementation with *Withania somnifera* promoted an enhanced testicular function, an enhanced seminal volume, while an amplified odor intensity and sexual behavior, either appetitive or consummatory, aligned with the improvement of some hemogram response variables across time in Black Belly rams. Such research outcomes should enhance not only the resilience and sustainability, but also speed up the sexual behavior and reproductive efficiency, of sheep production and should also heighten the well-being of sheep-producers and their families. Moreover, the research outcomes elicited by the short-term WS supplementation displayed an enhancement of ram’s reproductive and sexual function that may hold interesting implications from a translational standpoint.

Author Contributions: Conceptualization, C.A.M.-H. and A.D.S.-M.; Data curation, C.A.M.-H.; Formal analysis, C.A.M.-H. and A.D.S.-M.; Funding acquisition, A.D.S.-M., C.N.-M., F.G.V.-D. and J.M.F.-S.; Investigation, A.J.R.-S., C.N.-M., J.Z.O.-M., J.M.F.-S. and R.I.M.-T.; Methodology, A.J.R.-S., C.A.M.-H. and A.D.S.-M.; Project administration, C.N.-M., F.G.V.-D., J.Z.O.-M., J.M.F.-S. and R.I.M.-T.; Resources, C.N.-M., F.G.V.-D., J.Z.O.-M., J.M.F.-S. and R.I.M.-T.; Supervision, A.D.S.-M.; Visualization, F.G.V.-D.; Writing—Original draft, C.A.M.-H. and A.D.S.-M. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding.

Institutional Review Board Statement: All the experimental procedures were completed in accordance with the recommendations for ethical use, care, and welfare of animals in research at global (USA) and national (Mexico) levels, and they were institutionally authorized by UAAAN; the animal study protocol was authorized by the Institutional Review Board, with approval reference number: UAAAN-UL-425502002-2743.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: None of the data were deposited in an official repository, yet information can be made available upon request.

Acknowledgments: The authors thank Jose A. Tricio-Haro, Francisco J. Aguilera-Vazquez, and Sergio A. Valenzuela Ramirez for providing all the animals and facilities to carry out this study. We also acknowledge CONAHCYT Mexico for the doctoral scholarship awarded to Andrés J. Rodríguez-Sánchez. *In loving memory:* Ramon Alfredo Delgado-Gonzalez, (1960–2024), and Ramon Dionisio-Tapia (1978–2024).

Conflicts of Interest: The authors declare that there are no conflicts of interest that could be perceived as prejudicing the impartiality of the research reported in this manuscript. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses, or interpretation of data; in the writing of the manuscript; or in the decision to publish the results.

References

1. SIAP—Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera—Agrifood and Fishery Information System. Livestock Production Yearbook. 2023. Available online: http://infosiap.siap.gob.mx/repoAvance_siap_gb/pecAvanceEdo.jsp (accessed on 15 July 2024).
2. DOF—Diario Oficial de la Federación—Official Gazette of the Federation. Tipo de Cambio y Tasas. Secretaría de Gobernación, Gobierno de México. 2023. Available online: <https://dof.gob.mx/indicadores.php#gsc.tab=0> (accessed on 15 July 2024).

3. Navarrete-Molina, C.; Meza-Herrera, C.A.; Ramirez-Flores, J.J.; Herrera-Machuca, M.A.; Lopez-Villalobos, N.; Lopez-Santiago, M.A.; Veliz-Deras, F.G. Economic Evaluation of the Environmental Impact of a Dairy Cattle Intensive Production Cluster under Arid Lands Conditions. *Animal* **2019**, *13*, 2379–2387. [CrossRef] [PubMed]
4. Machado-Ramos, M.G.; Meza-Herrera, C.A.; De Santiago-Miramontes, A.; Mellado, M.; Veliz-Deras, F.G.; Arella-no-Rodríguez, E.; Contreras-Villarreal, V.; Arévalo, J.R.; Carrillo-Moreno, D.I.; Flores-Salas, J.M. A Circular Economy Approach to Integrate Divergent Ruminant Production Systems: Using Dairy Cow Feed Leftovers to Enhance the Out-of-Season Reproductive Performance in Goats. *Animals* **2023**, *13*, 2431. [CrossRef]
5. Meza-Herrera, C.A.; Machado-Ramos, M.G.; De Santiago-Miramontes, A.; Mellado, M.; Navarrete-Molina, C.; Sariñana-Navarrete, M.d.l.Á.; Arévalo, J.R.; Angel-García, O.; Alvarado-Espino, A.S.; Rodríguez-Venegas, R. Connectedness between Intensive and Extensive Ruminant Production Systems: Using Dairy Cow Feed Leftovers to Generate Out-of-Season Bio-Economic Indices in Goats. *Agriculture* **2023**, *13*, 2079. [CrossRef]
6. Navarrete-Molina, C.; Meza-Herrera, C.A.; Herrera-Machuca, M.A.; Macias-Cruz, U.; Veliz-Deras, F.G. Not All Ruminants Were Created Equal: Environmental and Socio-Economic Sustainability of Goats Under a Marginal-Extensive Production System. *J. Clean. Prod.* **2020**, *255*, 120237. [CrossRef]
7. Agarwal, A.; Virk, G.; Ong, C.; du Plessis, S.S. Effect of Oxidative Stress on Male Reproduction. *World J. Mens Health* **2014**, *32*, 1–17. [CrossRef] [PubMed]
8. Almeida, A.M.; Schwalbach, L.M.J.; Cardoso, L.A.; Greyling, J.P.C. Scrotal, Testicular and Semen Characteristics of Young Boer Bucks Fed Winter Veld Hay: The Effect of Nutritional Supplementation. *Small Rumin. Res.* **2007**, *73*, 216–220. [CrossRef]
9. Kafi, M.; Safdarian, M.; Hashemi, M. Seasonal Variation in Semen Characteristics, Scrotal Circumference and Libido of Persian Karakul Rams. *Small Rumin. Res.* **2004**, *53*, 133–139. [CrossRef]
10. Mendieta-Araica, B.; Spörndly, E.; Reyes-Sánchez, N.; Spörndly, R. Feeding *Moringa oleifera* Fresh or Ensiled to Dairy Cows—Effects on Milk Yield and Milk Flavor. *Trop. Anim. Health Prod.* **2011**, *43*, 1039–1047. [CrossRef] [PubMed]
11. Mahsud, T.; Jamil, H.; Qureshi, Z.I.; Asi, M.N.; Lodhi, L.A.; Waqas, M.S.; Ahmad, A. Semen Quality Parameters and Selected Bio-Chemical Constituents' Level in Plasma of Lohi Rams. *Small Rumin. Res.* **2013**, *113*, 175–178. [CrossRef]
12. Mishra, L.C.; Singh, B.B.; Dagenais, S. Scientific Basis for the Therapeutic Use of *Withania somnifera* (Ashwagandha): A Review. *Altern. Med. Rev.* **2000**, *5*, 334–346. Available online: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=2bdff82eb23a373885252c87b53135b2fc9adde4> (accessed on 21 May 2024).
13. Sapanidou, V.G.; Margaritis, I.; Siahos, N.; Arsenopoulos, K.; Dragatidou, E.; Taitzoglou, I.A.; Tsantarliotou, M.P. Antioxidant Effect of a Polyphenol-Rich Grape Pomace Extract on Motility, Viability and Lipid Peroxidation of Thawed Bovine Spermatozoa. *J. Biol. Res.-Thessaloniki* **2014**, *21*, 19. [CrossRef]
14. Gupta, A.; Mahadi, A.A.; Shukla, K.K.; Ahmad, M.K.; Bansal, N.; Sankhwar, P.; Sankhwar, S.N. Efficacy of *Withania somnifera* on Seminal Plasma Metabolites of Infertile Males: A Proton NMR Study at 800 MHz. *J. Ethnopharmacol.* **2013**, *149*, 208–214. [CrossRef]
15. Kumar, N.; Shala, A.Y.; Khurana, S.M. Antiviral and Immuno-boosting Potential of Ashwagandha (*Withania somnifera* L.). *Med. Plants-Int. J. Phytomedicines Relat. Ind.* **2021**, *13*, 237–244. [CrossRef]
16. Chauhan, S.; Srivastava, M.K.; Pathak, A.K. Effect of Standardized Root Extract of Ashwagandha (*Withania somnifera*) on Well-Being and Sexual Performance in Adult Males: A Randomized Controlled Trial. *Health Sci. Rep.* **2022**, *5*, e741. [CrossRef]
17. Bashir, A.; Nabi, M.; Tabassum, N.; Afzal, S.; Ayoub, M. An Updated Review on Phytochemistry and Molecular Targets of *Withania somnifera* (L.) Dunal (Ashwagandha). *Front. Pharmacol.* **2023**, *14*, 1049334. [CrossRef]
18. Singh, A.K.; Rajak, S.K.; Kumar, P.; Kerketta, S.; Yogi, R.K. Nutrition and Bull Fertility: A Review. *J. Entomol. Zool. Stud.* **2018**, *6*, 635–643. Available online: https://www.researchgate.net/profile/Abhishek-Singh/publication/329177644_Nutrition_and_bull_fertility_A_review/links/5bfaa326458515a69e3abb19/Nutrition-and-bull-fertility-A-review.pdf (accessed on 21 May 2024).
19. FASS—Federation Animal Science Society. *Guide for the Care and Use of Agricultural Animals in Agricultural Research and Teaching*, 3rd ed.; Federation Animal Science Society: Champaign, IL, USA, 2010; p. 177.
20. NAM—National Academy of Medicine. *Guide for the Care and Use of Laboratory Animals*, 1st ed.; Co-Produced by the National Academy of Medicine—Mexico and the Association for Assessment and Accreditation of Laboratory Animal Care International: Harlan, KY, USA; Mexico City, Mexico, 2002.
21. CONAGUA—Comisión Nacional del Agua—National Water Commission. Normales Climatológicas por Estación. Ciudad de México: Servicio Meteorológico Nacional, Comisión Nacional del Agua. 2023. Available online: <https://smn.conagua.gob.mx/es/> (accessed on 15 July 2024).
22. Girolami, F.; Barbarossa, A.; Badino, P.; Ghadiri, S.; Cavallini, D.; Zaghini, A.; Nebbia, C. Effects of Turmeric Powder on Aflatoxin M1 and Aflatoxinol Excretion in Milk from Dairy Cows Exposed to Aflatoxin B1 at the EU Maximum Tolerable Levels. *Toxins* **2022**, *14*, 430. [CrossRef] [PubMed]
23. NRC—National Research Council. *Nutrient Requirements of Ruminants: Sheep, Goats, Cervids, and New World Camelids*; National Academy Press: Washington, DC, USA, 2007.
24. Walkden-Brown, S.W.; Restall, B.J.; Scaramuzzi, R.J.; Martin, G.B.; Blackberry, M.A. Seasonality in Male Australian Cashmere Goats: Long Term Effects of Castration and Testosterone or Oestradiol Treatment on Changes in LH, FSH and Prolactin Concentrations, and Body Growth. *Small Rumin. Res.* **1997**, *26*, 239–252. [CrossRef]

25. Cruz-Castrejón, U.; Véliz-Deras, F.G.; Rivas-Muñoz, R.; Flores, J.A.; Duarte Moreno, G. Respuesta de la Actividad Sexual a la Suplementación Alimenticia de Machos Cabrios Tratados con Días Largos, con un Manejo Extensivo a Libre Pastoreo. *Téc. Pecu. Méx.* **2007**, *45*, 93–100. Available online: <https://www.redalyc.org/pdf/613/61345108.pdf> (accessed on 21 May 2024).
26. Olivera-Muzante, J.; Fierro, S.; López, V.; Gil, J. Comparison of Prostaglandin- and Progesterone- Based Protocols for Timed Artificial Insemination in Sheep. *Theriogenology* **2011**, *75*, 1232–1238. [CrossRef]
27. Fabre-Nys, C. Le Comportement Sexuel des Caprins: Contrôle Hormonal et Facteurs Sociaux. *INRAE Prod. Anim.* **2000**, *13*, 11–23. [CrossRef]
28. Tejada, L.M.; Meza-Herrera, C.A.; Rivas-Muñoz, R.; Rodríguez-Martínez, R.; Carrillo, E.; Mellado, M.; Véliz-Deras, F.G. Appetitive and Consummatory Sexual Behaviors of Rams Treated with Exogenous Testosterone and Exposed to Anestrus Dorper Ewes: Efficacy of the Male Effect. *Arch. Sex. Behav.* **2017**, *46*, 835–842. [CrossRef]
29. Calderón-Leyva, G.; Meza-Herrera, C.A.; Rodríguez-Martínez, R.; Angel-García, O.; Rivas-Muñoz, R.; Delgado-Bermejo, J.V.; Véliz-Deras, F.G. Influence of Sexual Behavior of Dorper Rams Treated with Glutamate and/or Testosterone on Reproductive Performance of Anovulatory Ewes. *Theriogenology* **2018**, *106*, 79–86. [CrossRef] [PubMed]
30. Abdel-Khalek, A.E.; El-Maghraby, M.M.; Elbially, Z.I.; Al Wakeel, R.A.; Almadaly, E.A.; Shukry, M.; El-Badawy, A.A.; Zaghloul, H.K.; Assar, D.H. Mitigation of Endogenous Oxidative Stress and Improving Growth, Hemato-Biochemical Parameters, and Reproductive Performance of Zaraibi Goat Bucks by Dietary Supplementation with *Clorella vulgaris* or/and Vitamin C. *Trop. Anim. Health Prod.* **2023**, *55*, 267. [CrossRef]
31. Agrawal, A.; Prabakaran, S.; Allamaneni, S.S.S.R. Relationship Between Oxidative Stress, Varicocele and Infertility: A Meta-analysis. *Reprod. Biomed. Online* **2006**, *12*, 630–633. [CrossRef]
32. Gupta, S.; Agrawal, A.; Banerjee, J.; Alvarez, J.G. The Role of Oxidative Stress in Spontaneous Abortion and Recurrent Pregnancy Loss: A Systemic Review. *Obstet. Gynecol. Surv.* **2007**, *62*, 335–347. [CrossRef] [PubMed]
33. Dare, B.J.; Oyeniyi, F.; Olaniran, O.T. Role of Antioxidant in Testicular Integrity. *Ann. Res. Rev. Biol.* **2014**, *4*, 998–1023. Available online: <http://article.publish4promo.com/id/eprint/2249/1/25011-Article%20Text-46903-1-10-20190102.pdf> (accessed on 24 May 2024). [CrossRef]
34. Kooti, W.; Mansouri, E.; Ghasemiboroon, M.; Harizi, M.; Ashtary-Larky, D.; Afrisham, R. The Effects of Hydroalcoholic Extract of *Apium graveolens* Leaf on the Number of Sexual Cells and Testicular Structure in Rat. *Jundishapur J. Nat. Pharm. Prod.* **2014**, *9*, e17532. [CrossRef]
35. Fanaei, H.; Aziz, Y.; Khayat, S. A Review: Role of Oxidative Stress in Male Infertility. *J. Adv. Biomed. Sci.* **2013**, *3*, 93–103. Available online: <http://jabs.fums.ac.ir/article-1-337-en.pdf> (accessed on 24 May 2024).
36. Bahmyari, R.; Zare, M.; Sharma, R.; Agarwal, A.; Halvaei, I. The Efficacy of Antioxidants in Sperm Parameters and Production of Reactive Oxygen Species Levels during the Freeze-Thaw Process: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Andrologia* **2020**, *52*, e13514. [CrossRef]
37. Boroujeni, S.N.; Malamiri, F.A.; Bossaghzadeh, F.; Esmaeili, A.; Moudi, E. The Most Important Medicinal Plants Affecting Sperm and Testosterone Production: A Systemic Review. *JBRA Assist. Reprod.* **2022**, *26*, 522–530. [CrossRef] [PubMed]
38. Sahin, K.; Orhan, C.; Akdemir, F.; Tuzcu, M.; Gencoglu, H.; Sahin, N.; Turk, G.; Yilmaz, I.; Ozeran, I.H.; Juturu, V. Comparative Evaluation of the Sexual Functions and NF- κ B and Nrf2 Pathways of Some Aphrodisiac Herbal Extracts in Male Rats. *BMC Complement. Altern. Med.* **2016**, *16*, 318. [CrossRef] [PubMed]
39. Knoedler, J.R.; Shah, N.M. Molecular Mechanisms Underlying Sexual Differentiation of the Nervous System. *Curr. Opin. Neurobiol.* **2018**, *53*, 192–197. [CrossRef]
40. McCarthy, M.M.; Arnold, A.P. Reframing Sexual Differentiation of the Brain. *Nat. Neurosci.* **2011**, *14*, 677–683. [CrossRef] [PubMed]
41. Jennings, K.; de Lecea, L. Neural and Hormonal Control of Sexual Behavior. *Endocrinology* **2020**, *161*, bqaa150. [CrossRef]
42. Dohle, G.R.; Smit, M.; Weber, R.F. Androgens and Male Fertility. *World J. Urol.* **2003**, *21*, 341–345. [CrossRef]
43. Subhadrata, P.; Shreya, C.; Utpal, A.; Swarnali, D.; Samapika, N.; Mimosa, G.; Suchismita, C.S.; Manoj, T.P.; Ramesh, K.; Jaroslaw, P. *Withania somnifera* (L.) Dunal (Ashwagandha): A Comprehensive Review on Ethnopharmacology, Pharmacotherapeutics, Biomedicinal and Toxicological Aspects. *Biomed. Pharmacother.* **2021**, *143*, 112175. [CrossRef]
44. Bain, J. The Many Faces of Testosterone. *Clin. Interv. Aging.* **2007**, *2*, 567–576. [CrossRef]
45. Ball, G.F.; Balthazart, J. How Useful is the Appetitive and Consummatory Distinction Four Our Understanding of the Neuroendocrine Control of Sexual Behavior? *Horm. Behav.* **2008**, *53*, 307–311. [CrossRef]
46. Kensler, T.W.; Wakabayashi, N.; Biswal, S. Cell Survival Responses to Environmental Stresses Via the Keap1-Nrf2-ARE Pathway. *Annu. Rev. Pharmacol. Toxicol.* **2007**, *47*, 89–116. [CrossRef]
47. Yu, M.; Xu, M.; Liu, Y.; Yang, W.; Rong, Y.; Yao, P.; Yan, H.; Wang, D.; Liu, L. Nrf2/ARE is the Potential Pathway to Protect Spague-Dawley Rats against Oxidative Stress Induced by Quinocetone. *Regul. Toxicol. Pharmacol.* **2013**, *66*, 279–285. [CrossRef] [PubMed]
48. Verzella, D.; Pescatore, A.; Capece, D.; Vecchiotti, D.; Ursini, M.V.; Franzoso, G.; Alesse, E.; Zazzeroni, F. Life, Death, and Autophagy in Cancer: NF- κ B Turns up Everywhere. *Cell Death Dis.* **2020**, *11*, 210. [CrossRef] [PubMed]
49. Mikulska, P.; Malinowska, M.; Ignacyk, M.; Szustowski, P.; Nowak, J.; Pesta, K.; Szelag, M.; Szklanny, D.; Judasz, E.; Kaczmarek, G.; et al. Ashwagandha (*Withania somnifera*)—Current Research on the Health-Promoting Activities: A Narrative Review. *Pharmaceutics* **2023**, *15*, 1057. [CrossRef] [PubMed]

50. Watanabe, M.; Fukuda, A.; Nabekura, J. The Role of GABA in the Regulation of GnRH Neurons. *Front. Neurosci.* **2014**, *28*, 387. [\[CrossRef\]](#)
51. Mirjalili, M.H.; Moyano, E.; Bonfill, M.; Cusido, R.M.; Palazón, J. Steroidal Lactones from *Withania somnifera*, an Ancient Plant for Novel Medicine. *Molecules* **2009**, *14*, 2373–2393. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

*Artículo original***Efecto Robin Hood; sobrantes alimenticios de vacas lecheras + suplementación nutracéutica:****Principales resultados en variables corporales, metabólicas y volumétricas testiculares-espermáticas en ovinos Black Belly****The Robin Hood effect; dairy cow feed leftovers + nutraceutical supplementation: Main outcomes upon corporal, metabolic, and testicular volumetry-sperm variables in Black Belly rams****Andrés Rodríguez-Sánchez¹✉, Cesar A. Meza-Herrera²✉*, Ángeles De Santiago-Miramontes¹✉*, Cayetano Navarrete-Molina¹✉**¹ Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro - Unidad Laguna, Torreón 27054, México;ajuniorrosan@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1295-9839> (A.R.-S.);angelesdesantiago867@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5491-0662> (A.D.S.-M.);navarremolina1977@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7867-2745> (C.N.-M.)² Universidad Autónoma Chapingo, Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas, Bermejillo35230, México; cmeza2020@hotmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0289-2009> (C.A.M.-H.)

* Correspondencia: cmeza2020@hotmail.com (C.A.M.-H.); angelesdesantiago867@gmail.com (A.D.S.-M.)

Recibido:

Aceptado:

Publicado:

<https://doi.org/10.18633/biotecnia.vXX.XXX>**Resumen:** Los nutracéuticos (i.e. "nutrición + productos farmacéuticos") se derivan de alimentos que ofrecen beneficios para la salud. En la producción animal, se han evaluado diversos nutracéuticos por su capacidad para influir positivamente en el rendimiento productivo y reproductivo. Desde una

perspectiva reproductiva, la suplementación con *Withania somnifera* y *Lepidium meyenii* ha demostrado efectos positivos en los sistemas endocrino, cardiopulmonar y nervioso central. Nuestro objetivo fue cuantificar el posible impacto de la suplementación nutracéutica en ovejas macho alimentadas con una dieta basada en el rechazo de alimento de un sistema de producción de vacas Holstein altamente industrializado en variables corporales (peso vivo [PV], kg; condición corporal [CC], unidades), metabólicas (glucosa en sangre [GLU], mg dL⁻¹, proteína sérica [PRO], g 100 mL⁻¹) y sexuales-testiculares (olor sexual [ODOR], unidades; circunferencia escrotal [CE], cm; volumen testicular [VTES], cm³, y producción espermática diaria estimada [PEDE], millones). Ovejas Black Belly (n=12; norte de México, 25° N), con fertilidad y libido comprobadas, homogéneas en cuanto a edad, PV y CC, se dividieron en 3 grupos experimentales: suplementadas con *W. somnifera* (WITH; 400 mg kg⁻¹ PV d⁻¹) o *L. meyenii* (LEPI; 400 mg kg⁻¹ PV d⁻¹), o sin suplementación (CONT). Las variables PV, CC, GLU, PRO y CE y algunos componentes del VTES no mostraron diferencias significativas ($p > 0.05$) entre los efectos simples del tratamiento (TRT) o el tiempo (T); solo las variables ODOR, diámetro del testículo transversal derecho y VTES total difirieron entre los tratamientos, generalmente favoreciendo al grupo WITH. Sin embargo, se observó un efecto de interacción TRT x T ($p < 0.05$) en algunas variables corporales, metabólicas y de volumetría testicular-espermática, favoreciendo a los grupos WITH y LEPI al final del estudio. Cabe destacar que la interacción TRT x T demostró un efecto mayor ($p < 0.05$) en el grupo suplementado con *W. somnifera*, observándose los valores más altos para PV, GLU, PRO, ODOR, CE, longitud del testículo derecho, VTES derecho, VTES total y PEDE. Desde una perspectiva productiva-reproductiva, el uso del rechazo de las raciones de ganado lechero como dieta base en la alimentación de ovejas macho, complementado con el uso de nutracéuticos o suplementos orgánicos funcionales (WITH y LEPI), representa una alternativa viable. Así, el Efecto Robin Hood tiene el potencial de mejorar no solo el rendimiento productivo, fisiológico y reproductivo de los machos de oveja Black Belly, sino también otros resultados productivos y socioeconómicos; estos últimos para fortalecer el bienestar del productor y su familia.

Palabras clave: Ovejas, *Withania somnifera*, ashwagandha, *Lepidium meyenii*, Maca, Economía circular 53
54

Abstract: Nutraceuticals (i.e., "nutrition + pharmaceutical") are derived from foods that offer health 55
benefits. In animal production, various nutraceuticals have been evaluated regarding their ability to 56
positively impact productive and reproductive performance. From a reproductive perspective, 57
supplementation with *Withania somnifera* and *Lepidium meyenii* has shown positive effects upon the 58
endocrine, cardiopulmonary, and central nervous systems. We aimed to quantify the possible impact of 59
nutraceutical supplementation in male sheep fed diet based on the food rejection of a highly 60
industrialized Holstein cow production system on corporal (live weight [PV], kg; body condition [CC], 61
units), metabolic (blood glucose; GLU, mg dL⁻¹, serum protein; PRO, g 100 mL⁻¹) and sexual- 62
testicular variables (sexual odor ODOR, units; scrotal circumference CE, cm; testicular volumes 63
VTES, cm³, and estimated spermatid daily production (PEDE, millions). Black Belly sheep (n=12; 64
northern Mexico 25° N), with proven fertility and libido, homogeneous in terms of age, PV, and CC, 65
were divided into 3 experimental groups: supplemented with *W. somnifera* (WITH; 400 mg kg⁻¹ PV d⁻¹ 66
or *L. meyenii* (LEPI; 400 mg kg⁻¹ PV d⁻¹), or not supplemented (CONT). The variables PV, CC, 67
GLU, PRO, and CE, as well as some components of VTES, did not differ ($p > 0.05$) among the simple 68
effects of treatment (TRT) or time (T); only the variables ODOR, right-transverse testicle, and total 69
VTES differed among treatments, generally favoring the WITH group. However, a TRT x T 70
interaction effect occurred ($p < 0.05$) regarding some corporal, metabolic, and testicular volumetry- 71
sperm variables, favoring the WITH and LEPI groups by the end of the study. Remarkably, the TRT x 72
T interaction demonstrated a superior performance ($p < 0.05$) of the *W. somnifera* supplemented group, 73
observing the largest values for PV, GLU, PRO, ODOR, CE, right testicular length, right VTES, total 74
VTES, and PEDE. From a productive-reproductive perspective, the use of the rejection of dairy cattle 75
rations as a base diet in the feeding of male sheep, complemented with the use of nutraceuticals or 76
functional-organic supplements (WITH and LEPI), represents a viable alternative. Thus, the Robin 77

Hood Effect has the potential to improve not only the productive, physiological, and reproductive performance of male Black Belly sheep but also other productive and socioeconomic outputs; the latter to strengthen the well-being of the producer and his family.

Keywords: Sheep, *Withania somnifera*, Ashwagandha, *Lepidium meyenii*, Maca, Circular economy

INTRODUCCIÓN

En las últimas dos décadas se ha generado un interés creciente respecto al uso de diversos nutraceuticos para mejorar no solo el nivel de producción, sino el comportamiento reproductivo en diversas especies de interés zootécnico, bajo esquemas de intervención limpios, verdes y éticos (Agarwal *et al.*, 2014; Almeida *et al.*, 2007; Kafi *et al.*, 2004). Diversos nutraceuticos han sido evaluados respecto a su capacidad de impactar positivamente la performance reproductiva del macho (Mendieta-Araica *et al.*, 2011); una baja en el comportamiento reproductivo puede ser ocasionada por diversos desequilibrios hormonales, nutricionales, infecciosos, entre otros (Mahsud *et al.*, 2013). El uso de nutraceuticos para aumentar la libido y la calidad espermática ha despuntado como una modalidad terapéutica alternativa para afrontar dicho escenario (Mishra *et al.*, 2000; Sapanidou *et al.*, 2014). En efecto, el uso de *Lepidium meyenii* (i.e., Maca), un tubérculo originario de los Andes Peruanos, ha mostrado efectos importantes en la salud sexual, con mejoras en el deseo sexual, la disfunción eréctil, la función testicular, con incrementos paralelos en las células de Leydig y en la síntesis de testosterona (Huerta-Ojeda *et al.*, 2025; Minich *et al.*, 2024; Ulloa *et al.*, 2024). En el mismo sentido, se han reportado efectos positivos que desde un punto de vista terapéutico han generado la ingesta de las raíces de un pequeño arbusto de hoja perenne llamado *Withania somnifera* (Ashwagandha) (Mishra *et al.*, 2000; Kumar *et al.*, 2021). En México, mientras que la población caprina mostró un decremento del 7.5% entre 1970-2020, en dicho periodo el inventario ovino incrementó en un 37%, con una cifra de 8.5 millones de ovinos (SIAP, 2025). En la Comarca

Lagunera, la producción de carne ovina fue cercana a 180,000 kg, con un valor de la producción de 660,000 USD. Los indicadores productivos y económicos del ovino para producción de carne en la Comarca Lagunera se tornan potencialmente importantes; durante el periodo 2000-2020, el inventario ovino creció un 318%, la producción de carne un 600% y el valor de la producción un 580%, lo cual marcó el mayor crecimiento en el inventario ovino y una aumentada derrama económica generada por los ovinos de pelo en la Comarca Lagunera (SIAP, 2025).

Diversos estudios proponen que *L. meyenii* (i.e., LEPI) ha demostrado interesantes beneficios incluyendo neuroprotección, propiedades antiinflamatorias, inmunregulación, efectos antioxidantes, regulador de la salud gastrointestinal, propiedades antitumorales, actividad antihipertensiva, desarrollo muscular, protección hepática y cardíaca, efectos proangiogénicos, antitrombóticos y antialérgicos (Gaddafi *et al.*, 2025; Gonzales, 2012; Gonzales *et al.*, 2014). Desde un punto de vista reproductivo, la suplementación in vivo e in vitro de Maca ha generado incrementos en la esteroidogénesis, síntesis de progesterona y calidad espermática, en especial incrementos en la motilidad, morfología e integridad del espermatozoides y el acrosoma, mayor vitalidad, hiperactivación espermática y preservación de la integridad del DNA espermático (Huerta-Ojeda *et al.*, 2025; Minich *et al.*, 2024; Ulloa *et al.*, 2024). Otros efectos en la función testicular incluyen incrementos en la concentración total espermática, en la motilidad total y progresiva, en el diámetro de los ductos y lumen del epidídimo, y decrementos en la fragmentación del DNA (Huerta-Ojeda *et al.*, 2025; Minich *et al.*, 2024; Ulloa *et al.*, 2024). Por su parte, la raíz de *W. somnifera* (i.e., WITH) posee efectos antiinflamatorios, antitumorales, antiestrés, antioxidantes, actúa como inmunomodulador, mejora la hematopoyesis, además de ejercer un posible efecto en el sistema endocrino, cardiopulmonar y el sistema nervioso central (Mishra *et al.*, 2000). Al respecto, se ha reportado que la calidad espermática de machos infértiles puede mejorarse mediante la ingesta oral de raíces de Ashwagandha (WITH). Los extractos de dicha raíz inhiben la peroxidación lipídica, mejoran el conteo de espermatozoides y su motilidad, además de regular los niveles de hormonas reproductivas, con beneficios colaterales en el estado de salud (Almeida *et al.* 2007; Kumar *et al.*, 2021). Desde una óptica económica, la eficiencia reproductiva es indispensable para incrementar

el porcentaje de preñez y reducir en consecuencia el intervalo generacional. Por ello, la eficiencia reproductiva del macho es central para lograr una mayor viabilidad no solo productiva en el rebaño, sino también desde un punto de vista genético y de retorno económico (Agarwal *et al.*, 2014; Almeida *et al.*, 2007; Sapanidou *et al.*, 2014; Singh *et al.*, 2018). Si bien el testículo juega un papel endocrino en la producción de testosterona, también tiene un papel exocrino al producir espermatozoides (Rogol & Cappa, 2025). Además, mientras que la función testicular tiene una correlación directa con el volumen testicular, -ya que aproximadamente el 98% del volumen testicular está formado por túbulos seminíferos y células germinales-, la función testicular está modulada por el aporte nutricional (Calderón-Leyva *et al.*, 2018). Basados en los hallazgos previos, nosotros hipotetizamos que existe un efecto del uso de nutracéuticos con respecto a algunas variables productivas-reproductivas en ovinos alimentados con desperdicios de la dieta ofrecida a vacas Holstein manejados bajo esquemas de producción altamente industrializados en la Comarca Lagunera, promoviendo un enfoque de economía circular. El presente estudio planteó como objetivo evaluar el posible efecto de la suplementación con los nutracéuticos *W. somnifera* y *L. meyenii* respecto a variables corporales (peso vivo PV, kg; condición corporal CC, unidades), sexuales (olor sexual ODOR, unidades; circunferencia escrotal CE, cm; volumen testicular VTES, cm³), y metabólicas (glucosa en sangre; GLU, mg dL⁻¹, proteína en suero PRO; g 100 mL⁻¹) en ovinos Black Belly alimentados con una dieta base conformada por el rechazo alimenticio de un sistema de producción altamente industrializado de vacas Holstein en el norte de México (25° N).

MATERIALES Y MÉTODOS

Todos los métodos, procedimientos experimentales, y manejo de las unidades experimentales utilizados en el presente estudio, cumplirán con las pautas para el uso ético, el cuidado, y el bienestar de los animales en investigación tanto a nivel internacional (FASS, 2010) y nacional (NAM, 2002). Así como la aprobación institucional bajo la referencia: Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro – 425502002-2832.

Localización, condiciones ambientales & épocas reproductivas	153
El presente estudio se realizó en un hato ovino manejado bajo condiciones semi-intensivas, ubicado en	154
el ejido Granada municipio de Matamoros, Coahuila, perteneciente a la Comarca Lagunera en el norte	155
de México, a una latitud de 25° N y longitud 103° O., una altura de 1110 msnm. La región presenta	156
una temperatura media anual de 23.8 °C, máxima de 41 °C en junio, y mínima de -1 °C en diciembre y	157
enero (CONAGUA, 2025). con una precipitación pluvial anual de 230 mm. El estudio se desarrolló	158
durante los meses de mayo, junio y julio, que involucran la época de transición al empadre (mayo-	159
junio) y época reproductiva (junio-julio).	160
Tratamientos y variables a evaluar	161
Machos ovinos Black Belly (n=12), con fertilidad y lívido comprobadas, homogéneos en cuanto a	162
edad, peso vivo, condición corporal, concentración y viabilidad espermática, fueron divididos a	163
principios de mayo en 3 grupos experimentales y fueron suplementados (mayo – julio; 63 d) con <i>W.</i>	164
<i>somnifera</i> (WITH; 400 mg kg PV ⁻¹ d ⁻¹), <i>L. meyenii</i> (LEPI; 400 mg kg PV ⁻¹ d ⁻¹), o no suplementados	165
(CONT). Las variables de respuesta consideradas en el presente estudio incluyeron variables	166
corporales (peso vivo; PV, kg, condición corporal; CC, unidades), reproductivas (olor sexual; ODOR,	167
unidades; circunferencia escrotal CE, cm; volumen testicular (VTES, cm ³), y metabólicas (glucosa en	168
sangre; GLU, mg dL ⁻¹ , proteína en suero PRO; g 100 mL ⁻¹) las cuales fueron registradas los días 0, 10,	169
20, 30, 40, 50, 60 y 65 del periodo experimental.	170
Variables corporales: condición corporal y peso vivo. La CC se registró mediante palpación del	171
grosor de la masa muscular y adiposa en el espacio entre las apófisis espinosas y transversas de las	172
vértebras lumbares, con rango de 1 a 4 (1 = emaciado y 4 = obeso) (Ponce-Covarrubias <i>et al.</i> , 2023;	173
Walkden-Brown <i>et al.</i> , 1997). Por su parte, el PV se registró mediante una báscula digital con	174
capacidad de 200 kg y de 50 g como mínimo (WH-C 100, China).	175

Variables reproductivas: intensidad de olor sexual, circunferencia escrotal y volumen testicular. 176

Con respecto a las variables reproductivas, mientras que la intensidad de olor sexual consistió en oler 177
la parte posterior de la base de los cuernos a una distancia de 15 cm considerando cuatro rangos (0 a 178
3), donde 0) se define como olor neutro o igual a hembras o macho castrado, 1) olor sexual ligero, 2) 179
olor sexual moderado y 3) olor sexual intenso (Ponce-Covarrubias *et al.*, 2023; Walkden-Brown *et al.*, 180
1997). Por su parte, la CE, fue registrada midiendo el punto más ancho de los testículos con una cinta 181
métrica flexible graduada en milímetros, mediante la técnica descrita por Cruz-Castrejón *et al.* (2007). 182
Con objeto de obtener el volumen total testicular (VTOTES, cm³) las exploraciones testiculares se 183
realizaron de la siguiente manera: el escroto se apoyó en una toalla enrollada colocada debajo del 184
escroto para estabilizar los testículos y se aplicó generosamente gel de acoplamiento para minimizar la 185
interferencia del aire circundante. Los testículos se estabilizaron aún más al colocar un dedo en el rafe 186
mediano de la piel escrotal antes de escanear suavemente para evitar la distorsión de su forma y sus 187
dimensiones. Mediante el uso de un equipo de ultrasonido (EMP G70, China 2011), con sonda lineal 188
de alta resolución de 7.5 MHz, se adquirieron imágenes de los testículos en los planos longitudinal y 189
transversal. La longitud (WIDTH) y la altura (HEIGHT) testicular se midieron en la vista longitudinal 190
mientras que profundidad se midió en la vista transversal (TRANS); primero la derecha y luego la 191
izquierda usando el mediastino testicular como referencia; el epidídimo no se incluyó en la medición. 192
El volumen (cm³) de cada testículo (LFT y RIG) se calculó utilizando la fórmula 193
 $0.61[(width)(height)(trans)]$ (Montes-Garrido *et al.*, 2023); la suma de ambos generó el promedio del 194
volumen total testicular (VTOTES) por grupo experimental. Todos los escaneos fueron realizados por 195
el mismo técnico para minimizar el error. En el mismo sentido, la regresión lineal propuesta por 196
Montes-Garrido *et al.* (2023) fue utilizada para calcular la producción estimada diaria de esperma 197
(millones) (i.e., PEDE, M): $PEDE (M) = [(0.02226 \times VTOTES) - 2.977] \times 1,000$. 198

2.2.3. Variables metabólicas: determinación de glucosa y proteína sérica. Para determinar los niveles 199
de glucosa y proteína sérica, se obtuvo una muestra sanguínea de los machos de cada grupo 200
experimental, colectando 5 mL, mediante punción directa de la vena yugular utilizando un tubo de 201

tapón color rojo, el cual permite la coagulación sanguínea (suero). Cada muestra fue centrifugada durante 15 minutos a 3500 rpm con el propósito de separar el suero y fue almacenada a -20 °C hasta su posterior análisis. Mientras que las concentraciones séricas de proteína total (PRO) se determinaron por duplicado utilizando un kit comercial basado en el reactivo de ácido bicinonónico considerando la albúmina sérica bovina 16 como estándar y se realizaron como se describe en el kit manual (Pierce Chemical Co., EE. UU.), los análisis de glucosa sérica (GLU) se realizaron por duplicado a través de técnicas de espectrofotómetro, siguiendo los protocolos suministrados por el fabricante del kit (Roche Diagnostic Systems, Inc., Estados Unidos). Las muestras fueron obtenidas de cada macho dentro y entre grupos experimentales en condiciones de ayuno.

Análisis estadísticos

Las variables de respuesta peso vivo, condición corporal, y niveles de glucosa y proteína sérica a través del periodo experimental, fueron analizadas mediante un análisis de parcelas divididas. El modelo incluyó al tratamiento en la parcela mayor y fue probado utilizando al macho dentro del tratamiento como término del error. El tiempo y la interacción TRT x T se incluyeron en la parcela menor y se evaluaron utilizando el valor del cuadrado medio residual, mediante el procedimiento PROC MIXED. En el evento de un efecto significativo del TRT, la separación de medias consideró la opción PDIFF del PROC GLM. Las variables discontinuas o categóricas fueron analizadas mediante el procedimiento GENMOD, utilizando la función LOGIT. El único efecto incluido en el modelo fue el tratamiento de suplementación, y cada macho se consideró la unidad experimental, dado que la suplementación y la evaluación-cuantificación de variables se desarrollarán de manera individual en cada macho. En caso de existir diferencias entre tratamientos, se utilizó el procedimiento LSMEAN/PDIFF. Otras variables fueron analizadas mediante un ANOVA; en caso de observar diferencias entre tratamientos, se realizó una comparación múltiple de medias mediante la prueba LSD. Todos los análisis estadísticos fueron desarrollados mediante el paquete estadístico SAS (SAS Inst. Inc. Ver. 9.4, 2016, Cary, NC, USA).

Los resultados obtenidos son expresados en medias (\pm EEM); se consideró una diferencia estadística a una $p < 0.05$.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Efecto de la suplementación en las variables de respuesta analizadas

La Tabla 1 muestra los resultados obtenidos para las variables dependientes: peso vivo (PV, kg), condición corporal (CC, u), glucosa en sangre (GLU, mg dL⁻¹) y proteína en suero (PRO, g 100 mL⁻¹); no se observaron diferencias ($p > 0.05$) entre tratamientos; dicha situación también se observó con respecto al tiempo (Tabla 2). La Tabla 3 muestra las medias por tratamiento de variables reproductivas (circunferencia escrotal, CE, cm; olor sexual, ODOR, unidades), y de volumetría testicular (longitud, WIDTH, cm; altura, HEIGHT, cm; y profundidad, TRANS, cm) izquierdo (LFT) y derecho (RIG); se obtuvieron los volúmenes (i.e., VTO) para cada testículo (i.e., LFT & RIG), y se obtuvo el promedio del volumen total testicular (VTOTES, cm³) así como la producción espermática diaria esperada (PEDE, millones) en ovinos Black Belly. De las variables indicadas, las variables ODOR, TRANS-RIG y VTOTES difirieron ($p < 0.05$) entre tratamientos, durante el periodo experimental. Mientras que ODOR mostró su mayor valor en WITH, seguido de LEPI y CONT, observando una variación del 77.8% entre los valores extremos, la variable TRANS-RIG mostró una tendencia similar. Respecto a VTOTES, el valor más elevado ocurrió en WITH, y el más bajo en LEPI, observando diferencias entre ambas del 17.3% en favor de WITH.

Insertar Tablas 1, 2 y 3

Efecto de la interacción suplementación x tiempo en las variables de respuesta analizadas

El análisis de interacción entre el tipo de suplementación y el periodo experimental mostró diferencias ($p < 0.05$) en las variables PV, CC, GLU y PRO (Tabla 4). Mientras que la variable PV mostró una tendencia al alza en WITH and LEPI, el incremento del PV al final del periodo experimental fue negligible en CONT. En general, la variable CC se mantuvo constante entre LEPI y CONT a lo largo del estudio, con la excepción de WITH en el periodo inicial observando el valor más bajo respecto al

tiempo y tratamientos, aunque sin diferencias en la parte media y final del estudio. Las variables	251
metabólicas mostraron comportamientos inestables a lo largo del periodo experimental.	252
Insertar Tabla 4	253
El comportamiento de la interacción tratamiento x tiempo para variables reproductivas (ODOR, CE),	254
volumetría testicular (longitud, WIDTH, cm; altura, HEIGHT, cm; y profundidad, TRANS, cm) en	255
testículo izquierdo (LFT) y derecho (RIG), el volumen individual testicular (i.e., VTO; LFT & RIG), el	256
promedio del volumen total testicular (VTOTES, cm ³), y la producción estimada diaria de esperma	257
(PEDE, M) se concentran en la Tabla 5. El efecto de la interacción TRT x T afectó el comportamiento	258
de las variables: ODOR, CE, WIDTH-LFT, WIDTH-RIG, VTO-RIG, VTOTES y PEDE. En general,	259
las variables testiculares volumétricas favorecieron al grupo WITH, observando los mayores valores	260
hacia el final del periodo experimental. Aun cuando todas las variables analizadas revisten	261
importancia, es central resaltar que las variables intensidad del olor sexual, circunferencia escrotal,	262
volumen total testicular, y la producción espermática diaria estimada mostraron los mayores valores en	263
el grupo suplementado con <i>W. somnifera</i> .	264
Insertar Tabla 5	265
Los resultados obtenidos sustentan la hipótesis de trabajo, al existir efecto de tratamiento x tiempo ($p <$	266
0.05) en las variables de respuesta en machos Black Belly alimentados con una dieta base conformada	267
por el desperdicio alimenticio de un sistema de producción altamente industrializado de vacas	268
Holstein, y suplementados con nutracéuticos (i.e., WITH y LEPI). Aunque la variable ODOR fue la	269
única que difirió ($p < 0.05$) debido a efectos simples (i.e., tratamiento y tiempo), la gran mayoría de las	270
variables dependientes en estudio difirieron ($p < 0.05$) respecto a la interacción tratamiento x tiempo	271
(i.e., TRT x T), en especial las variables olor, circunferencia escrotal, volumen total testicular, y la	272
producción estimada diaria de esperma, mostraron los mayores valores en el grupo suplementado con	273
<i>W. somnifera</i> . Lo anterior es central al considerar que las variables analizadas son de particular	274
importancia desde una óptica productiva y reproductiva (Rodríguez-Sánchez <i>et al.</i> , 2024). En ovinos,	275
diversos estudios han reportado diferencias en variables corporales, productivas y reproductivas	276

(Asaduzzaman *et al.*, 2020; Hassan & Talukder, 2011; Islam *et al.*, 2018; Koutinhoun *et al.*, 2017; 277

Rodriguez-Sanchez *et al.*, 2024). Los resultados obtenidos indican efectos benéficos por la 278

suplementación con WITH cuyos principios activos afectan el crecimiento y modulan acciones 279

antiestrés, antioxidantes, inmunomoduladoras y hepatoprotectoras (Kushwaha *et al.*, 2012; Singh *et al.*, 280

2010; Tikore *et al.*, 2019; Verma *et al.*, 2012). En general, el grupo LEPI mostró un mejor 281

comportamiento respecto al grupo CONT, posiblemente debido a sus efectos no solo en el 282

metabolismo energético, la termorregulación y el equilibrio electrolítico (Gaddafi *et al.*, 2025; 283

Gonzales, 2012), sino en la resistencia física y mitigación térmica (Liu *et al.*, 2024) aunado a su efecto 284

termorregulador (Da Silva *et al.*, 2020; Huerta-Ojeda *et al.*, 2024) en mamíferos. De nuestro estudio se 285

desprende que la suplementación con WITH y LEPI a través del tiempo mejoró diferentes variables de 286

importancia productiva y reproductiva en machos Black Belly alimentados con una dieta base de 287

sobranche de ración alimenticia para vacas lecheras en la zona de estudio. Los mecanismos y sitios de 288

acción de los nutraceuticos suplementados (i.e., WITH y LEPI) en las variables corporales, 289

reproductivas y metabólicas no podrán ser dilucidados sin el diseño de investigación complementaria, 290

particularmente a nivel fisiológico y molecular. 291

Las variables de respuesta ODOR, TRANS-RIG, VTOTES y PEDE fueron las únicas que difirieron (p 292

< 0.05) entre tratamientos (Tabla 3), observando los mayores valores en WITH, seguido de LEPI para 293

ODOR, y TANS-RIG y por CONT para VTOTES y PEDE. Los resultados del presente estudio son 294

importantes ya que las variables corporales son rasgos esenciales en producción animal, al ser criterios 295

de selección fenotípica y de rentabilidad económica (Cam *et al.*, 2010). Los efectos positivos de la 296

suplementación con WITH en la expresión fenotípica del PV han sido reportados en diferentes 297

especies (Joshi *et al.*, 2015; Pandey *et al.*, 2013; Singla *et al.*, 2017), y revisten importancia dado que 298

rasgos corporales, como el PV y la CC, afectan las características de crecimiento (Asaduzzaman *et al.*, 299

2020; Birteeb & Ozoje, 2012). Respecto a la morfometría testicular, la CE se correlaciona 300

positivamente con la capacidad reproductiva y otras variables; los rasgos testiculares son considerados 301

por los productores al seleccionar sus reemplazos (Waheed *et al.*, 2011). *W. somnifera* (i.e., WITH) 302

posee efectos antiinflamatorios, antitumorales, antiestrés, antioxidantes, actúa como
 inmunomodulador, mejora la hematopoyesis, además de ejercer un posible efecto en el sistema
 endocrino, cardiopulmonar y el sistema nervioso central (Mishra *et al.*, 2000). La calidad espermática
 de machos infértiles puede mejorarse mediante la ingesta oral de raíces de Ashwagandha (WITH);
 inhibe la peroxidación lipídica, mejoran el conteo de espermatozoides y su motilidad, además de
 regular los niveles de hormonas reproductivas, con beneficios colaterales en el estado de salud
 (Almeida *et al.* 2007; Kumar *et al.*, 2021). El efecto positivo de la suplementación LEPI ha sido
 atribuido a su acción en el metabolismo energético, la termorregulación y el equilibrio electrolítico
 (Gaddafi *et al.*, 2025; Gonzales, 2012), así como en la resistencia física y mitigación del estrés térmico
 (Liu *et al.*, 2024); su contenido mineral ha sido involucrado en el equilibrio electrolítico,
 particularmente en ventanas de actividad física aumentada y durante la exposición al calor (Gaddafi *et*
al., 2025; Gonzales *et al.*, 2014; Merzah & Ali, 2023). Si bien esta investigación no incluyó retos
 físicos, los animales bajo investigación fueron sujetos a una excesiva radiación solar y exposición al
 calor derivadas de las condiciones climáticas naturales de entornos áridos.

La interacción TRT x T afectó el comportamiento fenotípico en todas las variables de respuesta; ello
 coincide con Bhattacharya *et al.* (1987) que reportaron un incremento en los niveles de glucosa debido
 a la suplementación con WITH, se alinea con Pedhavi *et al.* (2017) en pollos de engorda, y con Razo *et*
al. (2020) en corderos. Respecto a la suplementación con LEPI, se han reportado reducciones en
 glucosa plasmática y ácidos grasos libres (López-Fando *et al.*, 2004; Kimura *et al.*, 2016; Večeřa *et al.*,
 2007), así como una posible actividad antioxidante (Sandoval *et al.*, 2002). En nuestro estudio, los
 niveles más bajos de glucosa sanguínea ocurrieron en el grupo LEPI (44.95 mg dL⁻¹) respecto al grupo
 CONT (48.76 mg dL⁻¹) y WITH (50.95 mg dL⁻¹) (Tabla 1).

Respecto a la proteína sérica, nuestros resultados coinciden con Pedhavi *et al.* (2017), quienes
 reportaron un efecto de WITH en los niveles de lipoproteínas de alta densidad y proteína total, y con
 Razo *et al.* (2020), quienes reportaron incrementos en las concentraciones de PRO en ovinos
 suplementados con WITH. Lo anterior ha sido relacionado con los niveles de fenoles y taninos

presentes en dicho adaptógeno (Kulkarni & Dhir, 2008; Ozeer *et al.*, 2024; Paul *et al.*, 2021). Al inicio del estudio, no existieron diferencias para PRO entre grupos experimentales, sin embargo, LEPI mostró el valor más bajo al final del estudio; ello coincide con Muritala *et al.* (2022) quienes reportaron dicho escenario en ratas suplementadas con extractos etanólicos de LEPI. Posiblemente una incapacidad de los hepatocitos para sintetizar proteínas, o ciertos síndromes de sobrehidratación, malabsorción, enfermedad hepática e hipogammaglobulinemia estén asociados a dicha respuesta (Batista *et al.*, 2020).

Paralelo a los resultados biológicos obtenidos en nuestro estudio, otro aspecto importante a destacar es la interesante estrategia de economía circular en la cual se basó nuestra investigación y que consideró el uso de una dieta base para la alimentación de ovinos fundamentado en el rechazo alimenticio proveniente de la industria lechera Holstein en la Comarca Lagunera, considerada como la principal cuenca lechera bovina del país. Adicionalmente, la producción de carne ovina en la zona de estudio, aunque negligible en comparación con la industria lechera bovina, adquiere una relevancia socioeconómica que no debe ser minimizada. En efecto, bajo un esquema de economía circular, los sobrantes de la industria lechera poseen el potencial de impulsar la producción de carne ovina en la región basada en una estrategia de minimización de costos de producción. Al hacer una evaluación en 50 explotaciones lecheras intensivas bovinas, se observó que se ofrecen en promedio 21.42 kg base húmeda por vaca en producción/día (i.e., $VP^{-1} d^{-1}$), con un promedio de materia seca de 84.45% (18.09 kg VP^{-1} , base seca) y un rechazo del 4.5%. Dicho rechazo equivale a 0.96 kg $VP^{-1} d^{-1}$ base húmeda; un censo de 264,638 vacas en producción (SIAP, 2025), se generaría una disponibilidad diaria de 254.05 t base húmeda, equivalentes a 215.4 t base seca, considerando el rechazo de alimento que ejerce el bovino lechero bajo dicho esquema industrializado de producción.

Por otra parte, Avendaño y Navarro (2020), al considerar las diferentes etapas fisiológicas ovinas (i.e. mantenimiento, empadre, gestante, lactancia, reemplazos y corderos en crecimiento), reportaron un peso vivo promedio por oveja de 41.82 kg y un consumo promedio diario de 2.88% del peso vivo de materia seca; considerando dichas cifras, el rechazo alimenticio generado por la industria lechera

bovina tendría el potencial de alimentar un inventario ovino de cercano a 180,000 ovejas. Con base en
dichos números, el censo ovino en la Comarca Lagunera, región agroecológica del árido norte de
México, podría incrementarse 18 veces, basando su dieta solamente en el rechazo alimenticio generado
por la industria lechera bovina; esto es, el “Robin Hood Effect” previamente reportado por nuestro
grupo tanto en caprinos (Machado-Ramos *et al.* 2023; Meza-Herrera *et al.*, 2023) como en ovinos
(Rodriguez-Sanchez *et al.*, 2024). Para dimensionar el impacto productivo-económico y considerando
un rendimiento en canal de 24.28 kg por ovino sacrificado (SIAP, 2025), se estaría en posibilidad de
generar una producción de 4,343.56 t de carne ovina, basada única y exclusivamente en el Efecto
Robin Hood. Esto es, tomamos recursos no utilizables por la rica y solvente industria del bovino
Holstein y los distribuimos en esquemas de producción ovina pobres-marginales, generalmente de tipo
extensivo en entornos áridos, con estrés no solo térmico y nutricional, sino biótico, económico y social.
El escenario previo estaría incompleto si no consideráramos el impacto socioeconómico potencial que
conlleva. Desde una óptica económica, el precio promedio mundial por tonelada de carne ovina fresca
o refrigerada es de 5,778.37 USD (FAO, 2025). Si alineamos dicho valor económico con el nivel de
producción potencial del ovino basado en el Efecto Robin Hood, se determinó que el uso del
desperdicio alimenticio de la industria bovina lechera tiene el potencial de generar una derrama
económica anual de 25.10 MUSD a través de la industria ovina productora de carne. Si a lo anterior
agregamos el Énfasis Socioeconómico del citado Efecto Robin Hood, y tomando como base lo
reportado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2025) y el Banco de México
(DOF, 2025), así como a Hernández-Valenzuela *et al.* (2019), quienes al evaluar la contribución
económica de la producción ovina tres estratos de diferente nivel de tecnología, reportaron que dicha
aportación va del 13.3 a 30.6 %. Con dicha información, la derrama económica del Efecto Robin Hood
sería suficiente para fortalecer el ingreso económico requerido por un rango de 20,059 a 8,914
familias, respectivamente, en la Comarca Lagunera. Lo anterior adquiere particular relevancia en un
mundo brutalmente inequitativo en lo económico, lo social, aunado a un descomunal uso de recursos
bióticos, particularmente hídricos, concentrado en unos cuantos productores de la industria lechera

bovina (Navarrete-Molina *et al.*, 2019). De esta forma, el Efecto Robin Hood emerge como una innovadora y factible estrategia de economía circular, con uso holístico y sostenible de los escasos recursos naturales disponibles en la Comarca Lagunera, en el norte-árido de México; además, en paralelo, se coadyuvaría en los esfuerzos para la consecución de los objetivos del desarrollo sostenible de la Agenda 2030 (UN, 2025).

CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos, el uso de sobrantes de raciones alimenticias de vacas lecheras en la conformación de la dieta base en machos ovinos Black Belly suplementados con los nutraceuticos *W. somnifera* (WITH) y *L. meyerii* (LEPI), influyó positivamente en el comportamiento de variables de importancia económica. En particular, la suplementación con WITH generó impactos clave en las variables PV, GLU, PRO, ODOR, CE, WIDTH-RIG, VTO-RIG, VTOTES y PEDE. Por su parte, la suplementación con LEPI generó un efecto intermedio con respecto a los tratamientos WITH y CONT. Desde una óptica biológica, el uso del rechazo de raciones de bovinos lecheros como dieta base en la alimentación de machos ovinos, complementado con el uso de nutraceuticos, representa sin duda una alternativa viable. Más aún, desde una óptica productiva, económica y social, dicho esquema de integración del rechazo alimenticio generado por la industria bovina lechera en la alimentación ovina puede constituir una estrategia de economía circular aplicable en el norte-árido de México, al tener el potencial de generar 4,343.56 toneladas de carne ovina, y una derrama económica anual de 25.10 MUSD suficiente para fortalecer el ingreso económico de hasta 20,000 familias del sector rural en la Comarca Lagunera. Aun cuando todas las variables analizadas revisten importancia, es central resaltar que las variables olor sexual, circunferencia escrotal, volumen total testicular, y la producción espermática diaria estimada, mostraron los mayores valores en el grupo suplementado con *W. somnifera*. Sin duda, el uso los desechos de la alimentación de vacas lecheras bajo esquemas a gran escala, altamente industrializados y más lineales (v.g., sistema intensivo) para complementar sistemas de producción animal menos desarrollados a través del "Efecto Robin Hood" es, sin duda, una

interesante estrategia que impactaría positivamente los resultados biológicos, productivos, reproductivos y socioeconómicos de sistemas de producción menos lineales, más circulares y menos desarrollados, esquemas característicos en ovinos y caprinos (v.g., semi-extensivos, extensivos); ello debería apoyar en paralelo el bienestar del productor y su familia.

AGRADECIMIENTOS

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación México por la beca de doctorado otorgada a Andrés J. Rodríguez-Sánchez.

CONFLICTOS DE INTERESES

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses que pudiera perjudicar la imparcialidad de la investigación presentada en este manuscrito.

REFERENCIAS

- Agarwal, A.; Virk, G.; Ong, C.; du Plessis, S.S. Effect of Oxidative Stress on Male Reproduction. *World J. Mens Health* **2014**, *32*, 1-17. <http://dx.doi.org/10.5534/wjmh.2014.32.1.1>
- Almeida, A.M.; Schwalbach, L.M.J.; Cardoso, L.A.; Greyling, J.P.C. Scrotal, Testicular and Semen Characteristics of Young Boer Bucks Fed Winter Veld Hay: The Effect of Nutritional Supplementation. *Small Rumin. Res.* **2007**, *73*, 216–220. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2007.02.001>
- Asaduzzaman, M.; Jha, P.K.; Alam, M.G.S.; Bari, F. Y. Multi-farm Evaluation of Morphometric, Reproductive and Productive Traits of Jamuna Basin Indigenous and Muzaffamagari Cross Breed Sheep of Bangladesh. *J. Appl. Anim. Sci.* **2020**, *13*, 31-50. Available online: <https://www.thaiscience.info/Journals/Article/JAAS/10997239.pdf> (accessed on November 10, 2025).
- Avendaño, R.V.A.; Navarro, O.C.A. Alimentación de Ovinos en Regiones del Trópico en Colombia. *Rev. Sist. Prod. Agroecol.* **2020**, *11*, 71-108. Available online:

- <https://revistas.unillanos.edu.co/index.php/sistemasagroecologicos/article/download/471/808> 430
(accessed on November 20, 2025). 431
- Batista, D.; Campos, P.; Silva, V.R.; Santos, S.L.; Bezerra, D.P.; Soares, M.B.; Colepicolo, P.; 432
Zambotti-Villela, L.; Pinto, E.; Araújo, F.M.; Martins, D.; Fernandez, L.G.; Ligterink, W.; Canuto, 433
G.A.B.; Dias de Cerqueira, M.; Ribeiro, P.R. *Piper anisum* as a Promising New Source of 434
Bioactive Metabolites. *Chem. Pap.* **2020**, *74*, 1505-1515. [https://doi.org/10.1007/s11696-019-](https://doi.org/10.1007/s11696-019-01004-4) 435
01004-4 436
- Bhattacharya, S.K. Goel, R.K.; Kaur, R.; Ghosal, S. Anti-stress Activity of Sitoindosides VII and VIII, 437
New Acylsterylglucosides from *Withania somnifera*. *Phytother. Res.* **1987**, *1*, 32-37. 438
<https://doi.org/10.1002/ptr.2650010108> 439
- Birteeb, P.T.; Ozoje, M.O. Prediction of Live Body Weight from Linear Body Measurements of West 440
African Long-legged and West African Dwarf Sheep in Northern Ghana. *Online J. Anim. Feed* 441
Res. **2012**, *2*, 427-434. Available online: [https://www.researchgate.net/profile/Peter-](https://www.researchgate.net/profile/Peter-Birteeb/publication/257305181_Prediction_of_live_body_weight_from_linear_body_measurements_of_West_African_long-legged_and_West_African_Dwarf_sheep_in_northern_Ghana/links/0deec524d5ba1a38d9000000/Prediction-of-live-body-weight-from-linear-body-measurements-of-West-African-long-legged-and-West-African-Dwarf-sheep-in-northern-Ghana.pdf) 442
Birteeb/publication/257305181_Prediction_of_live_body_weight_from_linear_body_measuremen 443
ts_of_West_African_long- 444
legged_and_West_African_Dwarf_sheep_in_northern_Ghana/links/0deec524d5ba1a38d9000000/ 445
Prediction-of-live-body-weight-from-linear-body-measurements-of-West-African-long-legged- 446
and-West-African-Dwarf-sheep-in-northern-Ghana.pdf (accessed on November 15, 2025). 447
- Calderón-Leyva, G.; Meza-Herrera, C.A.; Rodriguez-Martinez, R.; Angel-García, O.; Rivas-Muñoz, 448
R.; Delgado-Bermejo, J.V.; Véliz-Deras, F.G. Influence of Sexual Behavior of Dorper Rams 449
Treated with Glutamate and/or Testosterone on Reproductive Performance of Anovulatory Ewes. 450
Theriogenology **2018**, *106*, 79–86. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2017.10.016> 451
- Cam, M.A.; Olfaz, M.; Soydan, E. Body Measurements Reflect Body Weights and Carcass Yields in 452
Karayaka Sheep. *Asian J. Anim. Vet. Adv.* **2010**, *5*, 120-127. Available online: 453
<https://avesis.omu.edu.tr/yayin/901f0eb1-3c14-414c-bb69-4e7702993212/body-measurements-> 454

- reflect-body-weights-and-carcass-yields-in-karayaka-sheep/document.pdf (accessed on November 15, 2025).
- CONAGUA—Comision Nacional del Agua—National Water Comission. *Normales Climatológicas por Estado*. Ciudad de México: Servicio Meteorológico Nacional, Comisión Nacional del Agua. 2025. Available online: <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/normales-climatologicas-por-estado> (accessed on November 10, 2025).
- Cruz-Castrejón, U.; Véliz-Deras, F.G.; Rivas-Muñoz, R.; Flores, J.A.; Duarte Moreno, G. Respuesta de la Actividad Sexual a la Suplementación Alimenticia de Machos Cabrios Tratados con Días Largos, con un Manejo Extensivo a Libre Pastoreo. *Téc. Pecu. Méx.* 2007, 45, 93–100. Available online: <https://www.redalyc.org/pdf/613/61345108.pdf> (accessed on November 20, 2025).
- Da Silva, L.P.N.; Cabrera, P.B.L.; Medeiros, M.L.L.; Formigoni, M.; Hernandez, B.F.R.; Droval, A.A.; Reitz, C.F.A. Medicinal Effects of Peruvian Maca (*Lepidium meyenii*): A Review. *Food Funct.* 2020, 11, 83–92. <https://doi.org/10.1039/C9FO02732G>
- DOF—Diario Oficial de la Federacion—Official Gazette of the Federation. *Tipo de Cambio y Tasas*. Secretaría de Gobernación, Gobierno de México. 2025. Available online: <https://dof.gob.mx/indicadores.php#gsc.tab=0> (accessed on November 10, 2025).
- FAO—Food and Agriculture Organization of the United Nations. *FAOSTAT: Crops and Livestock Products*. 2025. Available online: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL> (accessed on November 20, 2025).
- FASS—Federation Animal Science Society. *Guide for the Care and Use of Agricultural Animals in Agricultural Research and Teaching*, 3rd ed.; Federation Animal Science Society: Champaign, IL, USA, 2010; p. 177.
- Gaddafi, S.; Garba, M.G.; Yahaya, M.A. Response of Maca (*Lepidium meyenii*) Powder Supplementation on Physiological and Serum Electrolyte Responses of Yankasa Rams During Hot Season. *FUDMA J. Agr. Agric. Technol.* 2025, 11, 139–143. <https://doi.org/10.33003/jaat.2025.1102.017>

- Gonzales, G.F. Ethnobiology and Ethnopharmacology of *Lepidium meyenii* (Maca), a Plant from the Peruvian Highlands. *Evid.-Based Complement. Altern. Med.* **2012**, 193496. <https://doi.org/10.1155/2012/193496>
- Gonzales, G.F.; Villaorduña, L.; Gasco, M.; Rubio, J.; Gonzales, C. Maca (*Lepidium meyenii* Walp), A Review of its Biological Properties. *Rev. Peru. Med. Exp. Salud Publ.* **2014**, *31*, 100-110. <https://doi.org/10.17843/rpmesp.2014.311.15>
- Hassan, M.R.; Talukder, M.A.I. Comparative Performance of Different Regional Native Sheep in Bangladesh. *Bangl. Vet.* **2011**, *28*, 85-95. Available online: <https://banglajol.info/index.php/BVET/article/download/10692/7864> (accessed on November 10, 2025).
- Hernández-Valenzuela, D.; Sánchez-Vera, E.; Gómez-Demetrio, W.; Martínez-García, C.G. Productive and Socioeconomic Characterization of a Sheep Production System in a Natural Protected Area in Mexico. *Rev. Mex. Cienc. Pecu.* **2019**, *10*, 951-965. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v10i4.4470>
- Huerta-Ojeda, Á.; Rodríguez Rojas, J.; Cancino-López, J.; Barahona-Fuentes, G.; Pavez, L.; Yeomans-Cabrera, M.-M.; Jorquera-Aguilera, C. Effects of Maca (*Lepidium meyenii* Walp.) on Physical Performance in Animals and Humans: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Nutrients* **2025**, *17*, 107. <https://doi.org/10.3390/nu17010107>
- INEGI—Instituto Nacional de Estadística y Geografía—National Institute of Statistics and Geography. *National Survey of Household Income and Expenditure 2024*. 2025. Available online: https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/enigh/nc/2024/doc/enigh2024_ns_presentacion_resultados.pdf (accessed on November 20, 2025).
- Islam, S.; Bhuiyan, A.F.H.; Hossain, M.; Lee, S.H.; Bhuiyan, M.S.A. Morphometric Features, Production and Reproduction Potentials of Indigenous Sheep Genetic Resources of Bangladesh. *J. Anim. Breed. Genom.* **2018**, *2*, 107-115. <https://doi.org/10.12972/jabng.20180026>

- Joshi, S.S.; Ingle, P.B.; Bhagwat, S.R.; Pawar, M.M.; Prajapati, K.B.; Kulkarni, R.C. Effect of Dietary Addition of Ashwagandha (*Withania somnifera*) and Guduchi (*Tinospora cordifolia*) Powder on Broiler performance. *Indian J. Anim. Sci.* **2015**, *85*, 1358–1361. Available online: https://www.researchgate.net/profile/Mahesh-Pawar/publication/294123281_Effect_of_dietary_addition_of_ashwagandha_Withania_somnifera_and_guduchi_Tinospora_cordifolia_powder_on_broiler_performance/links/56e27cef08ae03f0278f9ac8/Effect-of-dietary-addition-of-ashwagandha-Withania-somnifera-and-guduchi-Tinospora-cordifolia-powder-on-broiler-performance.pdf (accessed on November 15, 2025).
- Kafi, M.; Safdarian, M.; Hashemi, M. Seasonal Variation in Semen Characteristics, Scrotal Circumference and Libido of Persian Karakul Rams. *Small Rumin. Res.* **2004**, *53*, 133–139. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2003.07.007>
- Kimura, M.; Abdelhamed, A.; Noguchi, T.; Ashizawa, T.; Hirano, H.; Koyasu, H.; Terai, K.; Saito, K.; Ide, H.; Muto, S.; Yamaguchi, R.; Horie, S. The Influence of Maca (*Lepidium meyenii*) on the Glucose Metabolism and Erectile Function in Type 1 Diabetic Rats: MP86-03. *J. Urol.* **2016**, *195*, e1107. <https://doi.org/10.1016/j.juro.2016.02.2311>
- Koutinhoun, G.B.; Tougan, P.U.; Boko, K.C.; Zannou, M.S.; Hanzen, C. Relationships between Body Size and Testicular Morphometric Traits of Mature Rams of Djallonke and Ouda Breeds Reared in North Benin. *Inter. J. Agri. Biosci.* **2017**, *6*, 53–59. Available online: <https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/230611/1/2017%20Koutinhoun%20International%20J%20Agriculture%20and%20biosciences%20testicules%20of%20rams.pdf> (accessed on November 15, 2025).
- Kulkarni, S.K.; Dhir, A. *Withania somnifera*: An Indian Ginseng. *Prog. Neuropsychopharmacol. Biol. Psychiatry.* **2008**, *32*, 1093–1105. <https://doi.org/10.1016/j.pnpbp.2007.09.011>
- Kumar, N.; Shala, A.Y.; Khurana, S.M. Antiviral and Immuno-boosting Potential of Ashwagandha (*Withania somnifera* L.). *Med. Plants-Int. J. Phytomedicines Relat. Ind.* **2021**, *13*, 237–244. <https://doi.org/10.5958/0975-6892.2021.00026.5>

- Kushwaha, S.; Roy, S.; Maity, R.; Mallick, A.; Soni, V.K.; Singh, P.K.; Chaurasiya, N.D.; Sangwan, R.S.; Misra-Bhattacharya, S.; Mandal, C. Chemotypical Variations in *Withania somnifera* Lead to Differentially Modulated Immune Response in BALB/c Mice. *Vaccine* **2012**, *30*, 1083-1093. <https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2011.12.031>
- Liu, M.C.; Weng, P.W.; Chien, Y.H.; Wu, M.H.; Hsu, W.B.; Chen, S.W.; Yang, M.T. Effects of *Lepidium meyenii* (Maca) Extract Supplementation on Oxidative Stress, Muscle Damage, and Aerobic Capacity After Exhaustive Endurance Exercise. *Isokinet. Exerc. Sci.* **2024**, *32*, 349-357. <https://doi.org/10.3233/IES-240006>
- López-Fando, A.; Gómez-Serranillos, M.P.; Iglesias, I.; Lock, O.; Upamayta, U.P.; Carretero, M.E. *Lepidium peruvianum* Chacon Restores Homeostasis Impaired by Restraint Stress. *Phytother. Res.* **2004**, *18*, 471-474. <https://doi.org/10.1002/ptr.1455>
- Machado-Ramos, M.G.; Meza-Herrera, C.A.; De Santiago-Miramontes, A.; Mellado, M.; Véliz-Deras, F.G.; Arellano-Rodríguez, F.; Contreras-Villarreal, V.; Arévalo, J.R.; Carrillo-Moreno, D.I.; Flores-Salas, J.M. A Circular Economy Approach to Integrate Divergent Ruminant Production Systems: Using Dairy Cow Feed Leftovers to Enhance the Out-of-Season Reproductive Performance in Goats. *Animals* **2023**, *13*, 2431. <https://doi.org/10.3390/ani13152431>
- Mahsud, T.; Jamil, H.; Qureshi, Z.I.; Asi, M.N.; Lodhi, L.A.; Waqas, M.S.; Ahmad, A. Semen Quality Parameters and Selected Bio-chemical Constituents Level in Plasma of Lohi Rams. *Small Rumin. Res.* **2013**, *113*, 175-178. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2013.04.004>
- Mendieta-Araica, B.; Spörndly, E.; Reyes-Sánchez, N.; Spörndly, R. Feeding *Moringa oleifera* Fresh or Ensiled to Dairy Cows - Effects on Milk Yield and Milk Flavor. *Trop. Anim. Health Prod.* **2011**, *43*, 1039-1047. <https://doi.org/10.1007/s11250-011-9803-7>
- Merzah, L.H.; Ali, N.A.L. Different Diets of Maca Roots (*Lepidium meyenii*) Affect Several Physiological Blood Characteristics of Broiler Chickens Under Oxidative Stress. *IOP Conf. Series: Earth Env. Sci.* **2023**, *1259*, 012071. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1259/1/012071>

- Meza-Herrera, C.A.; Machado-Ramos, M.G.; De Santiago-Miramontes, A.; Mellado, M.; Navarrete-Molina, C.; Sariñana-Navarrete, M.d.l.Á.; Arévalo, J.R.; Angel-García, O.; Alvarado-Espino, A.S.; Rodríguez-Venegas, R. Connectedness between Intensive and Extensive Ruminant Production Systems: Using Dairy Cow Feed Leftovers to Generate Out-of-Season Bio-Economic Indices in Goats. *Agriculture* **2023**, *13*, 2079. <https://doi.org/10.3390/agriculture13112079>
- Minich, D.M.; Ross, K.; Frame, J.; Fahoum, M.; Warner, W.; Meissner, H.O. Not All Maca Is Created Equal: A Review of Colors, Nutrition, Phytochemicals, and Clinical Uses. *Nutrients* **2024**, *16*, 530. <https://doi.org/10.3390/nu16040530>
- Mishra, L.C.; Singh, B.B.; Dagenais, S. Scientific Basis for the Therapeutic Use of *Withania somnifera* (Ashwagandha): A Review. *Altern. Med. Rev.* **2000**, *5*, 334-346. Available online: <https://anaturalhealingcenter.com/documents/Thorne/articles/Ashwagandha.pdf> (accessed on November 20, 2025).
- Montes-Garrido, R.; Anel-Lopez, L.; Riesco, M.F.; Neila-Montero, M.; Palacin-Martinez, C.; Soriano-Úbeda, C.; Boixo, J.C.; de Paz, P.; Anel, L.; Alvarez, M. Does Size Matter? Testicular Volume and Its Predictive Ability of Sperm Production in Rams. *Animals* **2023**, *13*, 3204. <https://doi.org/10.3390/ani13203204>
- Muritala, H.F.; Oyewesi, H.; Ajakaiye, L.; Aina, K.; Ibrahim, W.; Ogunyinka, F.P.; Ibrahim, W.A.; Ogunyinka, F.P.; Aliyu, H.I.; Bewaji, C.O. The Evaluation of Biochemical Parameters of Ethanolic Extract of *Lepidium meyenii* in Male Wistar Rats. *J. Trop. Life Sci.* **2022**, *12*, 397-414. <http://dx.doi.org/10.11594/jtls.12.03.13>
- NAM—National Academy of Medicine. *Guide for the Care and Use of Laboratory Animals*, 1st ed.; Co-Produced by the National Academy of Medicine—Mexico and the Association for Assessment and Accreditation of Laboratory Animal Care International: Harlan, KY, USA; Mexico City, Mexico, 2002.
- Navarrete-Molina, C.; Meza-Herrera, C.A.; Ramirez-Flores, J.J.; Herrera-Machuca, M.A.; Lopez-Villalobos, N.; Lopez-Santiago, M.A.; Veliz-Deras, F.G. Economic Evaluation of the

- Environmental Impact of a Dairy Cattle Intensive Production Cluster under Arid Lands
Conditions. *Animal* **2019**, *13*, 2379–2387. <https://doi.org/10.1017/S175173111900048X>
- Ozeer, F.Z.; Nagandran, S.; Wu, Y.S.; Wong, L.S.; Stephen, A.; Lee, M.F.; Kijssomporn, J.; Mac Guad,
R.; Batumalaie, K.; Oyewusi, H.A.; Verma, A.; Yadav, E.; Afzal, S.; Sekar, M.; Subramaniyan,
V.; Kumar, F.N.; Fuloria, S.; Sarker, M.M.R. A Comprehensive Review of Phytochemicals of
Withania somnifera (L.) Dunal (Solanaceae) as Antiviral Therapeutics. *Discov. Appl. Sci.* **2024**, *6*,
187. <https://doi.org/10.1007/s42452-024-05845-x>
- Pandey, N.K.; Singh, D.P.; Niwas, R. Broiler Characteristics, Sensory Qualities, and Economic
Efficiency in Vencobb-400 Chicks Supplemented with a Conjugated Herbal Feed Additive in
Diet. *Anim. Sci. Rep.* **2013**, *7*, 128–132. Available online:
https://www.researchgate.net/profile/Ram-Niwas-8/publication/343651114_BROILER_CHARACTERISTICS_SENSORY_QUALITIES_AND_ECONOMIC_EFFICIENCY_IN_VENCOBB_400_CHICKS_SUPPLEMENTED_WITH_A_CONJUGATED_HERBAL_FEED_ADDITIVE_IN_DIET/links/5f36568692851cd302f4381c/BROILER-CHARACTERISTICS-SENSORY-QUALITIES-AND-ECONOMIC-EFFICIENCY-IN-VENCOBB-400-CHICKS-SUPPLEMENTED-WITH-A-CONJUGATED-HERBAL-FEED-ADDITIVE-IN-DIET.pdf
(accessed on November 20, 2025).
- Paul, S.; Chakraborty, S.; Anand, U.; Dey, S.; Nandy, S.; Ghorai, M.; Chatterjee, S.S.; Tukaram, P.M.;
Kandimalla, R.; Proćków, J.; Dey, A. *Withania somnifera* (L.) Dunal (Ashwagandha): A
Comprehensive Review on Ethnopharmacology, Pharmacotherapeutics, Biomedical and
Toxicological Aspects. *Biomed. Pharmacother.* **2021**, *143*, 112175.
<https://doi.org/10.1016/j.biopha.2021.112175>
- Pedhavi, S.; Burte, R.G.; Kumar, S.; Desai, B.G.; Bhagat, D.J.; Prasade, N.N.; Dhekale, J.S. Effect of
Ashwagandha (*Withania somnifera*) on Haematology and Serum Biochemistry of Broiler Chicks.
Adv. Agr. Res. Technol. J. **2017**, *1*, 57–60. Available online:

- http://isasat.org/DAPOLI%20AARJ%20CTP/AARJ_1_1_8.pdf (accessed on November 10, 2025).
- Ponce-Covarrubias, J.L.; García y González, E.C.; Pineda-Burgos, B.C.; Guevara-Arroyo, A.M.; Hernández-Ruiz, P.E.; Torres-Agatón, F.; Ruiz-Ortega, M.; Paredes-Alvarado, M.; Robles-Robles, J.M.; Rodríguez-Castillo, J.d.C.; Ángel-García, O.; Valencia-Franco, E. Annual Sexual Behavior in Boer Bucks Located in the Guerrero Tropics in Mexico. *Ruminants* **2023**, *3*, 149–157. <https://doi.org/10.3390/ruminants3020014>
- Razo, O.P.B.; Mendoza, M.G.D.; Silva, G.V.; Osorio, T.A.I.; Gonzalez, S.J.F.; Hernandez, G.P.A.; De la Torre, H.M.E.; Espinosa, A.E. Polyherbal Feed Additive for Lambs: Effects on Performance, Blood Biochemistry and Biometry. *J. Appl. Anim. Res.* **2020**, *48*, 419–424. <https://doi.org/10.1080/09712119.2020.1814786>
- Rodriguez-Sanchez, A.J.; Meza-Herrera, C.A.; De Santiago-Miramontes, A.; Navarrete-Molina, C.; Veliz-Deras, F.G.; Ordoñez-Morales, J.Z.; Flores-Salas, J.M.; Marin-Tinoco, R.I. Circular Economy, Dairy Cow Feed Leftovers, and *Withania somnifera* Supplementation: Effects on Black Belly Ram's Libido, Sperm Quality, Sexual Behavior, and Hemogram Values. *Biology* **2024**, *13*, 656. <https://doi.org/10.3390/biology13090656>
- Rogol, A.D.; Cappa, M. Historical Aspects of Testicular Function: Virility, Androgen Production, and Spermatogenesis. *Endocr. Rev.* **2025**, *46*, 549–575. <https://doi.org/10.1210/endrev/bnaf009>
- Sandoval, M.; Okuhama, N.N.; Angeles, F.M.; Melchor, V.V.; Condezo, L.A.; Lao, J.; Miller, M.J.S. Antioxidant Activity of the Cruciferous Vegetable Maca (*Lepidium meyenii*). *Food Chem.* **2002**, *79*, 207–213. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(02\)00133-4](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(02)00133-4)
- Sapanidou, V.G.; Margaritis, I.; Siahos, N.; Arsenopoulos, K.; Dragatidou, E.; Taitzoglou, I.A.; Tsantarliotou, M.P. Antioxidant Effect of a Polyphenol-Rich Grape Pomace Extract on Motility, Viability and Lipid Peroxidation of Thawed Bovine Spermatozoa. *J. Biol. Res.-Thessaloniki* **2014**, *21*, 19. <https://doi.org/10.1186/2241-5793-21-19>

- SIAP—Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera—Agrifood and Fishery Information System. *Livestock Production Yearbook—Monthly Progress of Livestock Production*. 2025. Available online: https://nube.agricultura.gob.mx/avance_pecuario/ (accessed on November 10, 2025).
- Singh, A.K.; Rajak, S.K.; Kumar, P.; Kerketta, S.; Yogi, R.K. Nutrition and Bull Fertility: A Review. *J. Entomol. Zool. Stud.* **2018**, *6*, 635–643. Available online: https://www.researchgate.net/publication/329177644_Nutrition_and_bull_fertility_A_review (accessed on November 15, 2025).
- Singh, G.; Sharma, P.K.; Dudhe, R. Singh, S. Biological Activities of *Withania somnifera*. *Ann. Biol. Res.* **2010**, *1*, 56–63. Available online: https://www.researchgate.net/profile/Rupesh-Dudhe/publication/265245087_Biological_activities_of_Withania_somnifera/links/551e4f430cf29dcabb03ae02/Biological-activities-of-Withania-somnifera.pdf (accessed on November 20, 2025).
- Singla, M.; Saini, A.L.; Singh, N.D.; Kaur, P.; Sharma, A. Impact of Ashwagandha (*Withania somnifera*) Supplementation on the Performance of Beetal Kids Under Stall-fed Conditions. *Indian J. Anim. Res.* **2017**, *51*, 1086–1090. <https://doi.org/10.18805/ijar.v0iOF.7807>
- Tikore, P.; Rathod, P.; Ingole, R.S.; Khose, K.K.; Khodke, M.V. Protective Effect of (Ashwagandha) *Withania somnifera* Root Powder on General Performance and Hematological Profile Against Fenvalerate Induced Toxicity in Cockerels. *J. Entomol. Zool. Stud.* **2019**, *7*, 289–294. Available online: https://www.researchgate.net/profile/Pravin-Rathod-6/publication/331638285_Protective_effect_of_Ashwagandha_Withania_somnifera_root_powder_on_general_performance_and_hematological_profile_against_fenvalerate_induced_toxicity_in_cockerels/links/5c8476cf92851c695067f8b4/Protective-effect-of-Ashwagandha-Withania-somnifera-root-powder-on-general-performance-and-hematological-profile-against-fenvalerate-induced-toxicity-in-cockerels.pdf (accessed on November 10, 2025).
- Ulloa, d.C. N.; Alvarado-Corella, D.; Quiñones-Laveriano, D.M.; Araya-Sibaja, A.; Vega-Baudrit, J.; Monagas-Juan, M.; Navarro-Hoyos, M.; Villar-López, M. Exploring the Chemical and

- Pharmacological Variability of *Lepidium meyenii*: A Comprehensive Review of the Effects of Maca. *Front. Pharmacol.* **2024**, *15*, 1360422. <https://doi.org/10.3389/fphar.2024.1360422>
- UN-United Nations. *Sustainable Development Goals*. United Nations Development Programme. 2025. Available online: <https://www.undp.org/sustainable-development-goals> (accessed on November 10, 2025).
- Večeřa, R.; Orolin, J.; Škottová, N.; Kazdová, L.; Oliyarnik, O.; Ulrichová, J.; Šimánek, V. The Influence of Maca (*Lepidium meyenii*) on Antioxidant Status, Lipid and Glucose Metabolism in Rat. *Plant Food Hum. Nutr.* **2007**, *62*, 59-63. <https://doi.org/10.1007/s11130-007-0042-z>
- Verma, S.K.; Asima Shaban, A.S.; Reena Purohit, R.P.; Chimata, M.L.; Geeta Rai, G.R.; Verma, O.P. Immunomodulatory Activity of *Withania somnifera* (L.). *J. Chem. Pharm. Res.* **2012**, *4*, 559-561. Available online: <http://jocpr.com/vol4-iss1-2012/JCPR-2012-4-1-559-561.pdf> (accessed on November 15, 2025).
- Waheed, A.; Khan, M.S.; Ahmed, A.N.; Tariq, M.M.; Rauf, M.; Eyduan, E. Relationships among Testicular Traits, Body Measurements and Body Weight in Beetal Male Goats in Pakistan. *Iğdır Univ. J. Inst. Sci. & Tech.* **2011**, *1*, 59-62. Available online: https://www.academia.edu/download/81806168/Fen_20Bilimleri_20Enstitusu_20Dergisi_20Subat_202011mak-8.pdf (accessed on November 20, 2025).
- Walkden-Brown, S.W.; Restall, B.J.; Scaramuzzi, R.J.; Martin, G.B.; Blackberry, M.A. Seasonality in Male Australian Cashmere Goats: Long Term Effects of Castration and Testosterone or Oestradiol Treatment on Changes in LH, FSH and Prolactin Concentrations, and Body Growth. *Small Rumin. Res.* **1997**, *26*, 239-252. [https://doi.org/10.1016/S0921-4488\(97\)00017-5](https://doi.org/10.1016/S0921-4488(97)00017-5)

TABLAS

Tabla 1. Medias de mínimos cuadrados por tratamiento de variables corporales (peso vivo, PV, kg; condición corporal, CC, unidades) y metabólicas (glucosa en sangre, GLU, mg dL⁻¹; proteína en suero, PRO, g 100 mL⁻¹) en ovinos Black Belly (n = 12) suplementados con *Withania somnifera* (WITH; 400

mg kg⁻¹ PV d⁻¹), *Lepidium meyenii* (LEPI; 400 mg kg⁻¹ PV d⁻¹), o no suplementados (CONT) durante mayo – julio (63 d) en el norte de México (25° N).

Table 1. Least squares means by treatment of body variables (live weight, PV, kg; body condition, CC, units) and metabolic variables (blood glucose, GLU, mg dL⁻¹; serum protein, PRO, g 100 mL⁻¹) in Black Belly sheep (n = 12) supplemented with *Withania somnifera* (WITH; 400 mg kg⁻¹ PV d⁻¹), *Lepidium meyenii* (LEPI; 400 mg kg⁻¹ PV d⁻¹), or not supplemented (CONT) during May – July (63 d) in northern Mexico (25° N).

Variable	WITH	LEPI	CONT	EE ¹
PV (kg)	71.5 ^a	71.4 ^a	68.2 ^a	1.2
CC (u)	2.9 ^a	3.0 ^a	3.0 ^a	0.0
GLU (mg dL ⁻¹)	51.0 ^a	45.0 ^a	48.8 ^a	2.2
PRO (g 100 mL ⁻¹)	7.5 ^a	7.4 ^a	7.4 ^a	0.3

¹ El error estándar de medias de mínimos cuadrados más conservador es presentado.

^{a-c} Medias de mínimos cuadrados con un superíndice distinto dentro variable, difieren ($p < 0.05$).

Tabla 2. Medias de mínimos cuadrados a través del tiempo para variables corporales (peso vivo, PV, kg; condición corporal, CC, unidades), y metabólicas (glucosa en sangre, GLU, mg dL⁻¹; proteína en suero, PRO, g 100 mL⁻¹) en ovinos Black Belly (n = 12) en el norte de México (25° N).

Table 2. Least squares means over time for body variables (live weight, PV, kg; body condition, CC, units), and metabolic variables (blood glucose, GLU, mg dL⁻¹; serum protein, PRO, g 100 mL⁻¹) in Black Belly sheep (n = 12) in northern Mexico (25° N).

Variable / Dias	0	10	20	30	40	50	63	EE ¹
PV (kg)	68.1 ^a	69.1 ^a	71.1 ^a	70.9 ^a	70.7 ^a	71.2 ^a	71.5 ^a	1.9
CC (u)	3.0 ^a	3.0 ^a	3.0 ^a	3.0 ^a	3.0 ^a	3.0 ^a	3.0 ^a	0.0
GLU (mg dL ⁻¹)	49.9 ^a	48.4 ^a	48.3 ^a	41.7 ^a	48.4 ^a	50.9 ^a	49.9 ^a	3.4
PRO (g 100 mL ⁻¹)	7.2 ^a	7.3 ^a	7.2 ^a	7.7 ^a	7.7 ^a	7.8 ^a	7.2 ^a	0.4

¹ El error estándar de medias de mínimos cuadrados más conservador es presentado.

^{a-d} Medias de mínimos cuadrados con un superíndice distinto dentro variable, difieren ($p < 0.05$).

Tabla 3. Medias de mínimos cuadrados por tratamiento de variables reproductivas (intensidad del olor sexual, ODOR, unidades; circunferencia escrotal, CE, cm), y de volumetría testicular (longitud, WIDTH, cm; altura, HEIGHT, cm; y profundidad, TRANS, cm) izquierdo (LFT) y derecho (RIG); se obtuvieron los volúmenes individuales testiculares (i.e., VTO)

para generar el promedio del volumen total testicular (VTOTES, cm³), y producción espermática (producción espermática diaria esperada, PEDE, M) en ovinos Black Belly (n = 12) suplementados con *Withania somnifera* (WITH; 400 mg kg⁻¹ PV d⁻¹), *Lepidium meyenii* (LEPI; 400 mg kg⁻¹ PV d⁻¹), o no suplementados (CONT) durante mayo – julio (63 d) en el norte de México (25° N).

Table 3. Least squares means by treatment of reproductive variables (intensity of sexual odor, ODOR, units; scrotal circumference, CE, cm), and testicular volumetry (length, WIDTH, cm; height, HEIGHT,

GLU (mg dL ⁻¹)	51.0 ^{a,b}	46.3 ^{b-e}	55.6 ^{a,b}	44.6 ^{c,e,f}	38.0 ^f	48.3 ^{b,c}	54.0 ^{a,b}	40.6 ^f	45.6 ^{d-f}
PRO (g 100 mL ⁻¹)	7.1 ^b	7.6 ^a	7.6 ^a	7.2 ^{a,b}	7.9 ^a	6.8 ^b	7.1 ^b	7.5 ^a	7.2 ^b

¹ El error estándar de medias de mínimos cuadrados más conservador es presentado.

^{a-e} Medias de mínimos cuadrados con un superíndice distinto dentro de variable difieren ($p < 0.05$).

Tabla 5. Medias de mínimos cuadrados de la interacción tratamiento x tiempo para variables reproductivas (intensidad del olor sexual, ODOR, unidades; circunferencia escrotal, CE, cm), volumetría testicular (longitud, WIDTH, cm; altura, HEIGHT, cm; y profundidad, TRANS, cm) en testículo izquierdo (LFT) y derecho (RIG); se obtuvieron los volúmenes individuales testiculares (i.e., VTO) para generar el promedio del volumen total testicular (VTOTES, cm³), y producción espermática (producción espermática diaria estimada, PEDE, M) en ovinos Black Belly (n = 12) suplementados con *Withania somnifera* (WITH; 400 mg kg⁻¹ PV d⁻¹), *Lepidium meyenii* (LEPI; 400 mg kg⁻¹ PV d⁻¹), o no suplementados (CONT) a través del tiempo (mayo – julio; 63 d) en el norte de México (25° N).

Table 5. Least squares interaction means of treatment x time for reproductive variables (intensity of sexual odor, ODOR, units; scrotal circumference, CE, cm), testicular volumetry (length, WIDTH, cm; height, HEIGHT, cm; and depth, TRANS, cm) in left (LFT) and right (RIG) testes; individual testicular volumes (i.e., VTO) were obtained to generate the average total testicular volume (VTOTES, cm³), and sperm production (estimated daily sperm production, PEDE, M) in Black Belly sheep (n = 12) supplemented with *Withania somnifera* (WITH; 400 mg kg⁻¹ PV d⁻¹), *Lepidium meyenii* (LEPI; 400 mg kg⁻¹ PV d⁻¹), or not supplemented (CONT) over time (May – July; 63 d) in northern Mexico (25° N).

Variable/Período	WITH		LEPI		CONT		S.E. ¹
	Inicio	Final	Inicio	Final	Inicio	Final	
ODOR (u)	0.0 ^c	2.0 ^a	0.0 ^c	1.6 ^a	0.0 ^c	0.5 ^b	0.1
CE (cm)	34.5 ^a	34.3 ^a	33.5 ^b	34.0 ^b	34.0 ^b	33.5 ^b	0.81
WIDTH-LFT (cm)	4.63 ^b	5.52 ^a	5.07 ^{ab}	4.56 ^b	5.63 ^a	5.25 ^{ab}	0.28
WIDTH-RIG (cm)	5.50 ^a	4.92 ^a	4.32 ^b	4.22 ^b	4.46 ^b	4.24 ^b	0.33
HEIGHT-LFT (cm)	8.73 ^a	9.17 ^a	9.28 ^a	9.38 ^a	9.06 ^a	9.25 ^a	0.65
HEIGHT-RIG (cm)	9.62 ^a	8.88 ^a	8.16 ^a	8.93 ^a	9.16 ^a	8.76 ^a	1.04
TRANS-LFT (cm)	4.26 ^a	4.62 ^a	4.23 ^a	4.50 ^a	4.71 ^a	4.50 ^a	0.24
TRANS-RIG (cm)	4.67 ^a	5.19 ^a	4.60 ^a	3.99 ^a	4.39 ^a	3.70 ^a	0.52
VTO-LFT (cm ³) ²	92.19 ^a	122.3 ^a	103.4 ^a	100.4 ^a	127.2 ^a	108.1 ^a	11.4
VTO-RIG (cm ³)	127.4 ^a	116.4 ^a	95.3 ^b	79.6 ^b	93.6 ^b	71.4 ^b	18.1
VTOTES (cm ³)	219.6 ^a	238.6 ^a	198.7 ^b	180.1 ^b	220.8 ^a	179.6 ^b	19.8
PEDE (Millones) ³	2,716.2 ^a	3,277.4 ^a	1,927.3 ^b	1,678.3 ^b	2,720.5 ^b	1,856.4 ^b	262.4

¹ El error estándar de medias de mínimos cuadrados más conservador es presentado.

^{a-e} Medias de mínimos cuadrados con un superíndice distinto dentro de variable difieren ($p < 0.05$).

² El cálculo del volumen testicular individual (cm³), consideró la fórmula $0.61 [\text{WIDTH} \times \text{HEIGHT} \times \text{TRANS}]$ (i.e., VTO; LFT y RIG). La suma de ambos generó el promedio del volumen total testicular (VTOTES); el epididimo no se incluyó en la medición.

³ La producción estimada diaria de espermatozoides (millones), consideró regresión lineal $\text{PEDE (M)} = [(0.02226 \times \text{VTOTES}) - 2.977] \times 1,000$

IV. CONCLUSIÓN GENERAL

Los resultados obtenidos, soportaron la hipótesis planteada en esta investigación, considerando que la suplementación con los nutraceuticos *Withania somnifera* (WITH) y *Lepidium meyenii* (LEPI) mejoró las características corporales, reproductivas y metabólicas de machos ovinos alimentados con una dieta base de sobrante de vacas lecheras, convirtiéndolo en un sistema de producción circular. Como fue expuesto en los capítulos anteriores, esta investigación fue dividida en dos etapas; en la primera de ellas fue demostrado que el uso de residuos de alimento de la industria lechera como dieta base, aunado con la suplementación por corto tiempo (40 días) con WITH en machos ovinos Black Belly (i.e. T1: 100 mg kg PV⁻¹ d⁻¹; T2: 200 mg kg PV⁻¹ d⁻¹) mejoró las variables respuesta ($p < 0.05$) relacionadas con la función testicular, volumen seminal, intensidad del olor sexual, comportamiento sexual, recuento de glóbulos blancos, concentración de hemoglobina y volumen corpuscular medio, al compararles con el tratamiento control (sin suplementación nutraceutica). Y con una tendencia superior del T2 sobre el T1. Lo anterior, supondría que la suplementación nutraceutica posee el potencial de mejorar el comportamiento sexual y la eficiencia reproductiva de la producción ovina, lo cual contribuiría con el bienestar de los ovinocultores y sus familias.

Antes los resultados obtenidos en el primer experimento, fue desarrollada una segunda etapa. La cual incluyó la suplementación con WITH por un mayor periodo (60 d) y una dosis mayor (400 mg kg PV⁻¹ d⁻¹). Adicionalmente, un nuevo nutraceutico fue administrado a otro grupo de machos ovinos, el nuevo tratamiento incluyó la suplementación por 60 días con 400 mg kg PV⁻¹ d⁻¹ de LEPI. Es importante mencionar que estos suplementos fueron añadidos a una dieta base resultante de residuos de alimento de la industria lechera. Los resultados obtenidos, de esta segunda etapa, demostraron que la suplementación nutraceutica con WITH y LEPI, influyó positivamente en el comportamiento de variables de respuesta de importancia económica. Particularmente, la suplementación con WITH, la cual impactó sobre variables clave ($p < 0.05$) como peso vivo, niveles de glucosa en sangre, proteína total en suero, intensidad del olor sexual, circunferencia escrotal, ancho del testículo derecho, volumen total del testículo derecho, volumen testicular total y la producción estimada diaria de espermatozoides. En este mismo sentido, los valores calculados para las variables de respuesta para el tratamiento

LEPI se ubicaron en un punto intermedio entre los tratamientos WITH y control (sin suplementación nutracéutica).

Todas las evidencias obtenidas en el desarrollo de esta investigación, representan una alternativa sostenible y alineada a los principios de la economía circular, misma que vendría a contribuir con el cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible de la agenda 2030 de las Naciones Unidas, en particular con el ODS 2: “Hambre cero”, el cual busca poner fin al hambre, lograr la seguridad alimentaria, mejorar de la nutrición y promover la agricultura sostenible. Sin embargo, estas conclusiones quedarían incompletas, si no se integraran estos resultados, desde una óptica productiva, económica y social, en un contexto local. En este sentido, los hallazgos obtenidos poseen el potencial de constituir una estrategia de economía circular aplicable en el norte-árido de México, en especial a la Comarca Lagunera y, tomando como referencia el año 2024, generar 4,343.56 toneladas de carne ovina, equivalentes a una derrama económica de 25.10 millones de dólares americanos, lo cual sería suficiente para fortalecer el ingreso económico de hasta 20,000 familias del sector rural. Por lo anteriormente expuesto, resulta de vital importancia que la información generada en esta investigación, sea del conocimiento de los tomadores de decisiones y la sociedad en general, para que se promuevan estrategias más circulares, encaminadas a complementar y apoyar sistemas de producción animal menos desarrollados con los residuos generados por los sistemas más desarrollados a través del "Efecto Robin Hood".

REFERENCIAS

- Abdulzahra, I. S., S. S. Al-Dujaily y A. A. Zabbon 2024. "Novel combination with maca improves sperm parameters in vitro of asthenozoospermic men." *Human Antibodies* 32: 221-227.
- Alberto, F. J., F. Boyer, P. Orozco-terWengel, I. Streeter, B. Servin, P. De Villemereuil, B. Benjelloun, P. Librado, F. Biscarini y L. Colli 2018. "Convergent genomic signatures of domestication in sheep and goats." *Nature communications* 9: 813.
- Alhamada, M., N. Debus, E. González-García y F. Bocquier 2017. "Sexual behaviour in sheep is driven by body condition and the related nutritional and metabolic status." *Applied Animal Behaviour Science* 191: 24-30.
- Arendt, J. 1998. "Melatonin and the pineal gland: influence on mammalian seasonal and circadian physiology." *Reviews of reproduction* 3: 13-22.
- Arroyo, J. 2011. "Estacionalidad reproductiva de la oveja en México." *Tropical subtropical agroecosystems* 14: 829-845.
- Avelar, A., A. Orihuela, R. Vázquez y M. Palma-Irizarry 2016. "Maca (*Lepidium meyenii*) supplementation increases the sexual capacity of low but not high sexual performance rams (*Ovis aries*)." *Boletín Latinoamericano y del Caribe de Plantas Medicinales y Aromáticas* 15: 144-150.
- Bezerra, L. R., W. D. Oliveira, T. P. Silva, J. N. Torreão, C. A. Marques, M. J. Araújo y R. L. Oliveira 2017. "Comparative hematological analysis of Morada Nova and Santa Inês ewes in all reproductive stages." *Pesquisa Veterinária Brasileira* 37: 408-414.
- Boeta, M., A. Balcázar, J. Cerbón, M. Hernández, C. Hernández, R. Páramo, A. Porras, L. Rangel, B. Salgado y J. Valencia (2018). Fisiología reproductiva de los animales domésticos.
- Borja, F. y C. Fabre-Nys 2012. "Brain structures involved in the sexual behaviour of Ile de France rams with different sexual preferences and levels of sexual activity." *Behavioural brain research* 226: 411-419.
- Calderón-Leyva, G., C. A. Meza-Herrera, R. Rodríguez-Martínez, O. Angel-García, R. Rivas-Munoz, J. V. Delgado-Bermejo y F. G. Véliz-Deras 2018. "Influence of sexual behavior of Dorper rams treated with glutamate and/or testosterone on reproductive performance of anovulatory ewes." *Theriogenology* 106: 79-86.
- Chanvallon, A., L. Sagot, E. Pottier, N. Debus, D. Francois, T. Fassier, R. Scaramuzzi y C. Fabre-Nys 2011. "New insights into the influence of breed and time of the year on the response of ewes to the 'ram effect'." *Animal* 5: 1594-1604.
- Correa, L. M. y J. L. Fernández 2017. "Influencia de la Melatonina sobre la fisiología y la conducta de ungulados." *Revista de investigaciones altoandinas* 19: 337-350.

- Dar, N. J., A. Hamid y M. Ahmad 2015. "Pharmacologic overview of *Withania somnifera*, the Indian Ginseng." *Cellular molecular life sciences* 72: 4445-4460.
- FAOSTAT 2023. 2025(16 de abril):
- Folch, J. 2000. "Manejo del morueco." *Jornadas Científicas SEOC, Producción ovina y caprina*: 61-64.
- Freitas, M. L. y R. A. de Oliveira 2018. "Nutraceutical in male reproduction." *Brazilian Journal of Veterinary Medicine* 40: e220118-e220118.
- Ganong, W. F. 2000. "Circumventricular organs: definition and role in the regulation of endocrine and autonomic function." *Clinical Experimental Pharmacology Physiology* 27: 422-427.
- García Sacristán, A., J. González Gallego, F. Castejón Montijano, M. D. M. López de Silanes, G. M. Salido Ruiz y L. F. de la Cruz Palomino (2018). Fisiología veterinaria, Tébar Flores.
- Hashem, N. M., W. M. Essawi y A. A. El-Raghi 2024. "Ovarian activity, hormone profile, pro-inflammatory cytokines and reproductive performance of buffalo cows fed diets with different estrogenicity." *Journal of Animal Physiology Animal Nutrition* 108: 1-12.
- Hernández-Marín, J. A., V.-P. M., J. E. Ruíz-Nieto, A. I. Mireles-Arriaga, C. Cortez-Romero y J. Gallegos-Sánchez 2017. "Contribución de la ovinocultura al sector pecuario en México." *Agro productividad* 10.
- Hiendleder, S., B. Kaupe, R. Wassmuth y A. Janke 2002. "Molecular analysis of wild and domestic sheep questions current nomenclature and provides evidence for domestication from two different subspecies." *The Royal Society* 269: 893-904.
- Hinojosa Cuéllar, J. A. y J. Oliva Hernández 2009. "Distribución de partos por estación en ovejas de razas de pelo y cruces en un ambiente tropical húmedo." *Revista Científica* 19: 288-295.
- Inoue, N., C. Farfan y G. Gonzales 2016. "Effect of butanolic fraction of yellow and black maca (*Lepidium meyenii*) on the sperm count of adult mice." *Andrologia* 48: 915-921.
- Jain, R., S. Kachhwaha y S. Kothari 2012. "Phytochemistry, pharmacology, and biotechnology of *Withania somnifera* and *Withania coagulans*: A review." *Journal of Medicinal Plants Research* 6: 5388-5399.
- Jan, S. Z., G. Hamer, S. Repping, D. G. de Rooij, A. M. van Pelt y T. L. Vormer 2012. "Molecular control of rodent spermatogenesis." *Biochimica et Biophysica Acta - Molecular Basis of Disease* 1822: 1838-1850.
- Kalra, E. K. 2003. "Nutraceutical-definition and introduction." *Aaps Pharmsci* 5: 25.
- Kaur, G., L. A. Thompson y J. M. Dufour 2014. "Sertoli cells-immunological sentinels of spermatogenesis." *Seminars in cell & developmental biology* 30: 36-44.
- Keisler, D. H. y M. C. Lucy 1996. "Perception and interpretation of the effects of undernutrition on reproduction." *Journal of Animal Science* 74: 1-17.

- Kumar, A., R. Kumar, M. S. Rahman, M. A. Iqbal, G. Anand, P. K. Niraj y M. Ali 2015. "Phytoremedial effect of *Withania somnifera* against arsenic-induced testicular toxicity in Charles Foster rats." *Avicenna Journal of Phytomedicine* 5: 355.
- Lindsay, D. 1965. "The importance of olfactory stimuli in the mating behaviour of the ram." *Animal Behaviour* 13: 75-78.
- Maina, D. y L. S. Katz 1999. "Scent of a ewe: transmission of a social cue by conspecifics affects sexual performance in male sheep." *Biology of reproduction* 60: 1373-1377.
- Malpaux, B., M. Migaud, H. Tricoire y P. Chemineau 2001. "Biology of mammalian photoperiodism and the critical role of the pineal gland and melatonin." *Journal of biological rhythms* 16: 336-347.
- Maquivar, M. G., S. M. Smith y J. R. Busboom 2021. "Reproductive management of rams and ram lambs during the pre-breeding season in US sheep farms." *Animals* 11: 2503.
- Marcus, L. F. (1990). Traditional morphometrics. Proceedings of the Michigan morphometrics workshop.
- Maurya, V., V. Sejian, D. Kumar y S. Naqvi 2010. "Effect of induced body condition score differences on sexual behavior, scrotal measurements, semen attributes and endocrine responses in Malpura rams under hot semi-arid environment." *Journal of animal physiology animal nutrition* 94: e308-e317.
- Mishra, L.-C., B. B. Singh y S. Dagenais 2000. "Scientific basis for the therapeutic use of *Withania somnifera* (ashwagandha): a review." *Alternative medicine review* 5: 334-346.
- Nasimi Doost, A. R., A. Zomorodi, H. Nazemyieh, S. M. B. Fazljou, H. Sadeghi Bazargani, F. Nejatbakhsh, A. Moini Jazani y Y. Ahmadi AsrBadr 2018. "Effects of *Withania somnifera* on reproductive system: a systematic review of the available evidence." *BioMed research international* 2018: 4076430.
- Nedeva, I., T. Slavov, V. Radev, D. Panayotov y I. Varlyakov 2022. "Blood biochemical profile as an objective measure of welfare in Lacaune sheep." *Bulgarian Journal of Agricultural Science* 28.
- Njisane, Y. Z., F. E. Mukumbo y V. Muchenje 2019. "An outlook on livestock welfare conditions in African communities—A review." *Asian-Australasian journal of animal sciences* 33: 867.
- O'Donnell, L., P. Stanton y D. M. de Kretser (2015). Endocrinology of the male reproductive system and spermatogenesis.
- Pérez Vázquez, A., D. A. Leyva Trinidad y F. C. Gómez Merino 2018. "Desafíos y propuestas para lograr la seguridad alimentaria hacia el año 2050." *Revista mexicana de ciencias agrícolas* 9: 175-189.
- Perkins, A., C. E. Roselli y behavior 2007. "The ram as a model for behavioral neuroendocrinology." *Hormones* 52: 70-77.

- Price, E. O., S. J. Wallach y M. R. Dally 1991. "Effects of sexual stimulation on the sexual performance of rams." *Applied Animal Behaviour Science* 30: 333-340.
- Roberts, K. P. y T. R. Chauvin 2019. "Molecular mechanisms of testosterone action on the testis." *Current Opinion in Endocrine and Metabolic Research* 6: 29-33.
- Roselli, C. E. y F. Stormshak 2009. "The neurobiology of sexual partner preferences in rams." *Hormones behavior* 55: 611-620.
- Ruckebusch, I., L.-P. Phaneuf, R. Dunlop y A. F. Martínez Haro (1994). Fisiología de pequeñas y grandes especies.
- Saiyed, A., N. Jahan, S. F. Majeedi y M. Roqaiya 2016. "Medicinal properties, phytochemistry and pharmacology of *Withania somnifera*: an important drug of Unani Medicine." *Sci Innov Res* 5: 156-160.
- Salter, A. 2018. "The effects of meat consumption on global health." *Revue scientifique et technique* 37: 47-55.
- Senger, P. L. (2004). Pathways to pregnancy and parturition.
- SIAP 2023. Servicio de información agroalimentaria y pesca. 2025(29 de octubre):
- Sifuentes-Lamont, P. I., C. A. Meza-Herrera, F. G. Véliz-Deras, A. S. Alvarado-Espino, A. V. Alvarado-Espino, G. Calderón-Leyva, O. Angel-García, D. I. Carrillo-Moreno, V. Contreras-Villarreal y R. A. Delgado González 2022. "Multifaceted interplay among social dominance, body condition, appetitive and consummatory sexual behaviors, and semen quality in Dorper Rams during out-of-season and transition periods." *Animals* 12: 3339.
- Singh, G., P. Sharma, R. Dudhe y S. Singh 2010. "Biological activities of *Withania somnifera*." *Ann Biol Res* 1: 56-63.
- Smith, J. 2012. "The role of kisspeptin and gonadotropin inhibitory hormone in the seasonal regulation of reproduction in sheep." *Domestic animal endocrinology* 43: 75-84.
- Smith, J. T., L. M. Coolen, L. J. Kriegsfeld, I. P. Sari, M. R. Jaafarzadehshirazi, M. Maltby, K. Bateman, R. L. Goodman, A. J. Tilbrook y T. Ubuka 2008. "Variation in kisspeptin and RFamide-related peptide (RFRP) expression and terminal connections to gonadotropin-releasing hormone neurons in the brain: a novel medium for seasonal breeding in the sheep." *Endocrinology* 149: 5770-5782.
- Stellflug, J., N. Cockett y G. Lewis 2008. "The influence of breeding intensity on above-and below-average sexual performance rams in single-and multiple-sire breeding environments." *Animal reproduction science* 104: 248-256.
- Thiéry, J.-C., P. Chemineau, X. Hernandez, M. Migaud y B. Malpoux 2002. "Neuroendocrine interactions and seasonality." *Domestic Animal Endocrinology* 23: 87-100.
- Vázquez-Martínez, I., J. L. Jaramillo-Villanueva, Á. Bustamante-González, S. Vargas-López, F. Calderón-Sánchez, G. Torres-Hernández y W. Pittroff 2018. "Estructura y tipología de las unidades de producción ovinas en el centro de México." *Agricultura, sociedad y desarrollo* 15: 85-97.

- Viana, J. G. A. 2008. "Panorama geral da ovinocultura no mundo e no Brasil." *Revista Ovinos* 4: 44-47.
- Wade, G. N. y J. E. Jones 2004. "Neuroendocrinology of nutritional infertility." *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative Comparative Physiology* 287: R1277-R1296.