

|

Desarrollo de un suplemento alimenticio a base de levaduras enriquecido con selenio orgánico para mejorar su biodisponibilidad y el desempeño productivo en explotaciones bovinas de leche en Risaralda.

Guillermo Castro Páez

Universidad Nacional Abierta y a Distancia
Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería
Risaralda, Colombia
Marzo de 2025

Desarrollo de un suplemento alimenticio a base de levaduras enriquecido con selenio orgánico para mejorar su biodisponibilidad y el desempeño productivo en explotaciones bovinas de leche en Risaralda.

Guillermo Castro Páez

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:

Maestría en Biotecnología de alimentos

Modalidad

Proyecto de Investigación

Director (a):

Bibiana Rosero Carvajal

Universidad Nacional Abierta y a Distancia

Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería

Bogotá, Colombia

Marzo de 2025

DECLARACIÓN DE DERECHOS DE PROPIEDAD INTELECTUAL

Los autores de la presente propuesta manifestamos que conocemos el contenido del Acuerdo 06 de 2008, Estatuto de Propiedad Intelectual de la UNAD, Artículo 39 referente a la cesión voluntaria y libre de los derechos de propiedad intelectual de los productos generados a partir de la presente propuesta. Asimismo, conocemos el contenido del Artículo 40 del mismo Acuerdo, relacionado con la autorización de uso del trabajo para fines de consulta y mención en los catálogos bibliográficos de la UNAD.

Agradecimientos

Expreso mis agradecimientos a:

En primer lugar, expreso mis Agradecimientos a Dios, que me otorgó la entereza y los recursos necesarios para la consecución de los objetivos planteados en esta investigación.

A mi núcleo familiar, integrado por mi esposa y dos hijos, quienes, con su comprensión, apoyo incondicional y estímulo constante, fueron pilares fundamentales durante el desarrollo de este exigente proceso académico.

Un especial reconocimiento merece los docentes de seminario 1, 2 y 3 que, con su experticia y dedicación, impartieron sus conocimientos y ofrecieron una guía académica fundamental a lo largo de mi formación de maestría. Su orientación fue determinante en la calidad de este trabajo.

Deseo destacar y agradecer profundamente la dirección y el acompañamiento de la profesora Bibiana Rosero. Su liderazgo, visión estratégica y retroalimentación constructiva fueron esenciales en cada fase de esta investigación, contribuyendo significativamente a su rigor y pertinencia.

Extiendo mi agradecimiento a todos los participantes, tanto de Colombia como de países vecinos, que con su interés y activa participación enriquecieron el desarrollo de esta actividad académica. Sus perspectivas y aportaciones fueron de gran valor para la presente investigación.

Este logro académico es también el resultado del apoyo y la colaboración de los ganaderos de la región eje cafetero que siempre pusieron sus empresas a mi disposición para realizar pruebas e investigaciones.

Gracias a todos.

*La vida no es fácil, para ninguno de nosotros.
Pero ... ¡Que importa! Hay que perseverar y, sobre todo,
tener confianza en uno mismo. Hay que sentirse dotado
para realizar alguna cosa y que esa cosa hay que
alcanzarla, cueste lo que cueste.*

Marie Curie.

Resumen

La deficiencia de selenio afecta la productividad y salud del ganado lechero en Risaralda (Colombia). Este estudio desarrolló un suplemento alimenticio a partir de *Saccharomyces cerevisiae* enriquecida con selenio orgánico mediante fermentación fed-batch (30 °C, 200 rpm, 1 vvm). La biomasa obtenida alcanzó 19 g/L con 1500 µg/g de selenio (95 % de bioacumulación), 90.5 % de viabilidad y cumplimiento de normas microbiológicas. En un ensayo in vivo de 90 días, se asignaron 57 vacas Girolando a tres grupos: control (0 L/día), dosis baja (4 L/día) y dosis alta (6 L/día). La dosis alta incrementó la producción láctea (15.2 L/vaca/día; +12.6 %), elevó la proteína láctea (3.9 %) y redujo el recuento de células somáticas (58 %). La actividad de glutatión peroxidasa se duplicó, correlacionándose positivamente con la producción ($r^* = .98$) y negativamente con mastitis subclínica ($r^* = -.999$). Los resultados demuestran que este suplemento mejora la productividad, calidad de la leche y salud mamaria, ofreciendo una solución sostenible alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 2, 3, 9 y 12. Se recomienda su implementación comercial y estudios futuros sobre efectos reproductivos.

Palabras clave: selenio orgánico, *Saccharomyces cerevisiae*, suplemento nutricional, producción lechera, salud mamaria

Abstract

Selenium deficiency compromises dairy cattle productivity and udder health in Risaralda, Colombia. This study developed a fed-batch nutritional supplement based on *Saccharomyces cerevisiae* enriched with organic selenium (30 °C, 200 rpm, 1 vvm). The resulting biomass reached 19 g L⁻¹ and 1,500 µg g⁻¹ of selenium (95% bioaccumulation) with 90.5% cell viability and full microbiological compliance. In a 90-day in vivo trial, 57 Girolando cows were randomly assigned to a control group (0 L/day), a low-dose group (4 L/day), and a high-dose group (6 L/day). The high dose increased milk yield to 15.2 L/cow/day (+12.6%), raised milk protein to 3.9%, and lowered somatic cell count by 58%. Glutathione peroxidase activity doubled, correlating positively with milk production ($r = .98$) and negatively with subclinical mastitis ($r = -.999$). These findings demonstrate that the selenium-enriched yeast supplement enhances productivity, milk quality, and mammary health, providing a sustainable solution aligned with Sustainable Development Goals 2, 3, 9, and 12. Commercial implementation is recommended, and further research should examine reproductive outcomes.

Keywords: organic selenium; *Saccharomyces cerevisiae*; nutritional supplement; milk production; udder health

Tabla de contenido

<i>Introducción</i>	13
<i>Planteamiento del problema</i>	15
<i>Justificación</i>	18
<i>Objetivos</i>	20
Objetivo general.....	20
Objetivos específicos.....	20
<i>Marco conceptual y teórico</i>	21
Estado del Arte.....	21
Marco conceptual.....	23
Selenio en animales.....	23
Carencia de selenio.....	23
Suplemento alimenticio a base de levadura.....	23
Proceso biotecnológico.....	23
La productividad láctea.....	24
Suplemento alimenticio.....	24
Marco Teórico.....	24
Importancia del Selenio para la Salud Animal.....	24
El rol del selenio en rumiantes.....	25
Impacto en la producción de leche.....	26
Funciones biológicas del selenio.....	27
La levadura como suplemento alimenticio para el ganado.....	28
Efecto sobre la salud de los animales.....	30
Efectos de la levadura sobre la producción de leche.....	31
Adaptación al estrés térmico.....	32
<i>Metodología</i>	34
<i>Fases de la Investigación</i>	35
<i>Fase 1: Optimización del Proceso de Fermentación y Enriquecimiento de Levaduras con Selenio Orgánico</i>	35
<i>Fase 2: Caracterización Físicoquímica y Microbiológica del Suplemento</i>	36
<i>Fase 3: Evaluación In Vivo de la Biodisponibilidad y Efectividad del Suplemento</i>	¡Error!
<i>Marcador no definido.</i>	
<i>Análisis Estadístico</i>	41
<i>Resultados y discusión</i>	42

<i>Conclusiones</i>	66
<i>Impacto del proyecto</i>	68
<i>Recomendaciones</i>	71
<i>Referencias bibliográficas</i>	74

Lista de figuras

Figura 1. Crecimiento celular (DO ₆₀₀ vs Tiempo).....	45
Figura 2. Consumo de glucosa (g/L vs Tiempo).....	47
Figura 3. Producción de biomasa seca (g/L vs Tiempo).....	48
Figura 4. Oxígeno disuelto (% vs Tiempo).....	49
Figura 5. Evolución de la producción láctea promedio por grupo experimental.....	53
Figura 6. Evolución de la mastitis subclínica en vacas Girolando según el número de cuartos mamarios afectados por grupo experimental.	54
Figura 7. Correlación entre actividad GPx y producción de leche	58
Figura 8. Correlación entre actividad GPx y reducción de mastitis	59
Figura 9. Correlación entre actividad GPx y RCS por grupo	64

Lista de tablas

Tabla 1. Condiciones de incubación para los microorganismos evaluados.....	37
Tabla 2. Parámetros monitoreados durante la fermentación de levaduras enriquecidas con selenio.....	44
Tabla 3. Validación estadística de los parámetros obtenidos durante la fermentación.....	46
Tabla 4. Análisis de Varianza (ANOVA) para la incorporación de selenio en la biomasa de levadura.....	51
Tabla 5. Características del suplemento alimenticio a base de levaduras enriquecidas con selenio.....	52
Tabla 6. Tratamientos.....	52
Tabla 7. Impacto del suplemento en productividad y salud animal.....	53
Tabla 8. Resultados de ANOVA y prueba Tukey para variables clave.....	53
Tabla 9. Calidad composicional de la leche y salud mamaria por grupo experimental.....	55
Tabla 10. Matriz de correlación de Pearson.....	56
Tabla 11. Prevalencia de mastitis por posición (Chi-cuadrado).....	56

Lista de anexos

Anexo 1. Preparación de Soluciones.....	80
Anexo 2. Proceso de siembra.....	81
Anexo 3. Colonias en las cajas de Petri después de incubación.....	82
Anexo 4. Cepa de levadura.....	82
Anexo 5. Datos CMT de campo.....	83
Anexo 6. Resultado laboratorio de selenio.....	83
Anexo 7. Control lechero.....	84
Anexo 8. Resultado laboratorio Glutación Peroxidasa en sangre.....	84

Introducción

La ganadería bovina lechera es un sector clave para la economía agropecuaria de Risaralda, Colombia, contribuyendo significativamente a la producción regional de leche. Sin embargo, esta actividad enfrenta desafíos críticos, como la deficiencia de selenio en los suelos, un oligoelemento esencial para el metabolismo animal. Estudios previos han demostrado que la carencia de selenio en el ganado bovino puede provocar problemas de salud como mastitis, baja fertilidad y reducción en la producción láctea, afectando directamente la rentabilidad de las explotaciones ganaderas (Mehdi et al., 2013; Ramírez-Bribiesca et al., 2013).

En este contexto, surge la necesidad de desarrollar estrategias innovadoras y sostenibles para abordar esta problemática. Una solución prometedora es la suplementación con levaduras enriquecidas con selenio orgánico, las cuales presentan mayor biodisponibilidad y seguridad en comparación con las fuentes inorgánicas tradicionales (Galián et al., 2008). Mediante procesos biotecnológicos, es posible producir suplementos que no solo corrijan la deficiencia de selenio, sino que también mejoren la salud y el rendimiento del ganado (Payá-Vicens et al., 2015).

El presente estudio tiene como objetivo desarrollar un suplemento alimenticio a base de levaduras enriquecidas con selenio orgánico mediante un proceso biotecnológico eficiente, evaluando su impacto en la productividad láctea y los niveles antioxidantes del ganado lechero en Risaralda. Además, se busca promover una solución escalable y rentable que pueda ser adoptada por los productores locales, contribuyendo así a la competitividad y sostenibilidad del sector agropecuario (Lindsay et al., 2019).

Esta investigación se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas, específicamente con el ODS 2 ("Hambre Cero") y el ODS 9 ("Industria, Innovación e Infraestructura"). Al garantizar la seguridad alimentaria y fomentar el uso de

tecnologías innovadoras en la producción ganadera, este proyecto aspira a generar un impacto positivo en el desarrollo económico regional y en la sostenibilidad del sector lácteo colombiano (Naciones Unidas, 2023).

A través de un enfoque interdisciplinario que combina biotecnología, nutrición animal y análisis de impacto socioeconómico, este trabajo busca ofrecer una solución integral a un problema que afecta a numerosas explotaciones ganaderas en Risaralda y otras regiones con condiciones similares.

Planteamiento del problema

La ganadería bovina de leche es uno de los sectores más importantes de la economía agropecuaria colombiana. En 2022, se produjeron cerca de 7.200 millones de litros de leche (FEDEGAN, 2023), ubicando a Colombia como el cuarto mayor productor de leche en América Latina (FAO, 2022). Risaralda, aunque no es uno de los principales productores a nivel nacional, desempeña un papel relevante en la producción lechera regional, especialmente en el eje cafetero. La región de Risaralda, junto con otros departamentos del eje cafetero como Quindío y Caldas, contribuye de manera significativa a la producción de leche en esta zona del país, la cual se caracteriza por su clima favorable para la ganadería y su tradición en la producción láctea (FEDEGAN, 2023).

En Colombia, el altiplano cundiboyacense y los valles interandinos antioqueños son regiones con suelos pobres en selenio; en Risaralda, esta problemática también está presente, afectando la productividad del ganado lechero (Lindsay et al., 2019). La deficiencia de este mineral en el ganado bovino lechero es un problema nutricional que limita significativamente su productividad (Rey et al., 2020). Esta deficiencia se ve agravada porque la biodisponibilidad de selenio a partir de fuentes inorgánicas como el selenito de sodio es baja en rumiantes, mientras que los pastos y concentrados suministrados tienen contenidos marginales a deficientes, insuficientes para cubrir los requerimientos nutricionales de vacas de alta producción lechera (Ramírez-Bribiesca et al., 2013).

Lo anterior genera trastornos fisiológicos como retención de placenta, baja fertilidad, mastitis y menor producción láctea. Un estudio en Cundinamarca evidenció pérdidas medias de 4 litros/vaca/día (equivalentes a 20%) entre grupos deficitarios y suplementados con selenio orgánico (Rey et al., 2020). Considerando el precio promedio de \$1.200 por litro de leche pagado

al productor en 2022 (FEDEGAN, 2023), esto representaría menores ingresos anuales de \$1.752.000 por animal. En Risaralda, esta problemática se traduce en una disminución de la competitividad de los productores locales, quienes enfrentan desafíos adicionales debido a las condiciones climáticas y geográficas de la región.

Diversas investigaciones confirman el impacto productivo y sanitario por deficiencia de selenio en ganado lechero bajo trópico, así como los beneficios de su suplementación efectiva (Ramirez-Bribiesca et al., 2013; Lindsay et al., 2019). Sin embargo, los avances logrados aún no han sido transferidos ni adoptados extensivamente en fincas comerciales, por lo que el problema persiste afectando la productividad y competitividad regional. La falta de acceso a suplementos de selenio de alta biodisponibilidad y bajo costo agrava esta situación, limitando el potencial productivo de los hatos lecheros locales.

Un proceso biotecnológico basado en el enriquecimiento de levaduras con selenio orgánico podría ser una solución escalable y rentable para suplir efectivamente las deficiencias de este mineral en la ganadería lechera. Las levaduras enriquecidas con selenio orgánico han demostrado una mayor biodisponibilidad y eficacia en la suplementación de rumiantes en comparación con las fuentes inorgánicas (Galián et al., 2008; Payá-Vicens et al., 2015). Además, las levaduras pueden ser producidas a gran escala mediante fermentación, lo que facilitaría la fabricación de un suplemento alimenticio accesible para los productores. En el contexto de Risaralda, este enfoque podría representar una oportunidad para mejorar la productividad y sostenibilidad de la ganadería lechera, contribuyendo al desarrollo económico de la región.

En este sentido, el selenio inorgánico (sales de selenio) tiene una biodisponibilidad relativamente baja y puede ser tóxico en dosis altas. Por otro lado, cuando el selenio se incorpora en compuestos orgánicos producidos por microorganismos como las levaduras, forma parte de

moléculas más complejas como selenometionina o selenocisteína, que son más fácilmente absorbidas y metabolizadas por los rumiantes.

Además, las levaduras actúan como vehículo y matriz protectora para el selenio orgánico, evitando su degradación en el rumen y facilitando que llegue intacto al intestino delgado para su absorción.

En consecuencia, enriquecer levaduras con selenio orgánico aumenta significativamente la biodisponibilidad del mineral en comparación con añadir simplemente sales de selenio inorgánico, mejorando su aprovechamiento por el ganado y evitando riesgos de toxicidad.

¿Es posible desarrollar un suplemento nutricional a base de levaduras enriquecidas con selenio orgánico, mediante un proceso biotecnológico, que permita suplir de manera efectiva las deficiencias de selenio en hatos de ganado bovino de leche en el departamento de Risaralda?

Justificación

El presente proyecto tiene un impacto directo en el desarrollo de una solución biotecnológica escalable y rentable para suplir las deficiencias de selenio en la ganadería bovina de leche en Risaralda. La obtención de un suplemento alimenticio a base de levaduras enriquecidas con selenio orgánico mediante un proceso biotecnológico eficiente permitirá a los productores lecheros de la región contar con una fuente de selenio de alta biodisponibilidad y efectividad para la suplementación de sus hatos.

Los resultados directos del proyecto contribuirán a mejorar los niveles de selenio en el ganado lechero, lo cual se espera que redunde en un aumento en la productividad y en la rentabilidad de las explotaciones lecheras al prevenir las consecuencias negativas asociadas a la deficiencia de este mineral.

Adicionalmente, el proyecto generará conocimiento y desarrollo tecnológico en el área de la biotecnología aplicada a la producción animal, fortaleciendo las capacidades científicas y técnicas en este campo.

En cuanto al impacto posterior a la finalización del proyecto, la adopción del suplemento desarrollado por parte de los productores lecheros de Risaralda y otras regiones con deficiencias de selenio contribuirá a mejorar la sostenibilidad y competitividad del sector lácteo colombiano, al incrementar la productividad y la eficiencia en la producción de leche.

Este proyecto se alinea directamente con el Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 2 "Hambre Cero" de las Naciones Unidas, ya que el aumento en la productividad y rentabilidad de la ganadería lechera contribuirá a garantizar la seguridad alimentaria y la mejora de la nutrición mediante la disponibilidad y acceso a alimentos de origen animal de calidad. Además, el desarrollo de soluciones biotecnológicas sostenibles para mejorar la producción ganadera apoya

el ODS 9 "Industria, Innovación e Infraestructura", promoviendo la investigación y la innovación tecnológica en el sector agropecuario.

Objetivos

Objetivo general

Desarrollar un suplemento alimenticio a base de levaduras enriquecido con selenio orgánico que permita mejorar la productividad láctea y salud de glándula mamaria en hatos de ganado bovino de Risaralda.

Objetivos específicos

Optimizar el proceso de enriquecimiento de levadura con selenio orgánico, mediante técnicas de cultivo y enriquecimiento controlado.

Caracterizar fisicoquímica y microbiológicamente el suplemento, analizando su contenido de selenio, estabilidad, y viabilidad de la levadura.

Evaluar la efectividad del suplemento desarrollado en modelos in vivo, analizando su impacto en la capacidad antioxidante, la salud y la productividad láctea en ganado bovino además de la calidad de producto derivado.

Marco conceptual y teórico

Estado del Arte

La deficiencia de selenio en el ganado bovino lechero es un problema nutricional que afecta significativamente la productividad y rentabilidad de las explotaciones en diversas regiones. Esta carencia se ve agravada por la baja biodisponibilidad de las fuentes inorgánicas de selenio en rumiantes, así como por los niveles insuficientes de este mineral en los pastos y concentrados suministrados, especialmente para vacas de alta producción (Ramírez-Bribiesca et al., 2013).

Los trastornos fisiológicos causados por la deficiencia de selenio, como la retención de placenta, baja fertilidad, mastitis y disminución en la producción láctea, generan un impacto económico significativo en la rentabilidad de las explotaciones lecheras. Un estudio realizado en Cundinamarca evidenció pérdidas de hasta 4 litros/vaca/día (20%) en la producción de leche entre grupos deficitarios y suplementados con selenio orgánico (Rey et al., 2020).

Aunque diversas investigaciones han demostrado los beneficios de la suplementación efectiva de selenio en ganado lechero, estos avances aún no han sido transferidos ni adoptados ampliamente en fincas comerciales (Ramírez-Bribiesca et al., 2013; Lindsay et al., 2019).

En busca de soluciones, el desarrollo de un suplemento alimenticio a base de levaduras enriquecidas con selenio orgánico mediante un proceso biotecnológico ha emergido como una alternativa prometedora. Estas levaduras han demostrado ser una fuente eficaz y biodisponible de selenio para rumiantes en comparación con fuentes inorgánicas (Galián et al., 2008; Payá-Vicens et al., 2015).

Estudios previos han evaluado el impacto de la suplementación con levaduras enriquecidas con selenio en ganado bovino, encontrando mejoras en parámetros antioxidantes y

minerales (Silva et al., 2020). La producción a gran escala de estas levaduras mediante fermentación facilitaría la fabricación de un suplemento accesible para los productores.

La aplicación de técnicas de biología sintética y el uso de cepas probióticas pueden contribuir al desarrollo y optimización del proceso biotecnológico para la producción del suplemento (Ortuño-Fajardo et al., 2021; Bertel Mesa et al., 2019).

Adicionalmente, la exploración de combinaciones con extractos herbales y el análisis de aspectos de seguridad alimentaria y manejo sostenible de residuos son aspectos relevantes para considerar en el desarrollo del suplemento (Tadesse Alem, 2024; Oropesa-Casanova et al., 2020).

Por otro lado, un estudio (Oropesa-Casanova et al., 2020) evaluó diferentes condiciones de fermentación y fuentes de selenio para optimizar el enriquecimiento de levaduras con selenio orgánico. Los autores lograron incrementar significativamente los niveles de incorporación de selenio en comparación con procesos convencionales.

Otra investigación (Ramírez-Bribiesca et al., 2013) desarrolló un sistema de biorreactores de bajo costo para la producción de biomasa de levadura enriquecida con selenio, demostrando su potencial para implementarse a mayor escala de una manera rentable.

Si bien existen avances en el desarrollo de procesos biotecnológicos para la producción de levaduras enriquecidas con selenio orgánico, aún hay retos por abordar para lograr una solución escalable, rentable y adaptada a las necesidades particulares de la ganadería lechera en Risaralda.

Uno de los principales desafíos es optimizar las condiciones de fermentación y la selección de cepas de levadura y fuentes de selenio que maximicen el enriquecimiento con formas biodisponibles de este mineral, como la selenometionina (Oropesa-Casanova et al.,

2020). Además, es importante evaluar estrategias para mejorar el rendimiento y la viabilidad del proceso a escala piloto e industrial.

Otro aspecto clave a considerar es la formulación del suplemento alimenticio final, incluyendo la selección de excipientes, aditivos y procesos de secado y estabilización que preserven la biodisponibilidad del selenio orgánico y faciliten su manejo y distribución (Ramírez-Bribiesca et al., 2013).

Marco conceptual

Selenio en animales

El selenio (Se) es un mineral esencial en la nutrición animal y se considera su participación en diversos procesos asociados a la producción animal, tan diversos como la fertilidad de la especie y la prevención de enfermedades (Surai, 2006).

Carencia de selenio

La carencia de selenio en animales resulta en problemas de salud como trastornos reproductivos y debilidad inmunológica (Mehdi et al., 2013).

Suplemento alimenticio a base de levadura

Es un producto que contiene levadura como ingrediente principal y está diseñado para complementar la dieta con nutrientes específicos, como vitaminas, minerales o proteínas (Qureshi et al., 2022).

Proceso biotecnológico

Técnicas y metodologías utilizadas para manipular organismos vivos o sus componentes para obtener productos o realizar procesos útiles en diversos campos como la medicina, la agricultura o la industria alimentaria (Jozala et al., 2016).

La productividad láctea

Se refiere a la cantidad de leche producida por una vaca lechera en un determinado período de tiempo, generalmente expresada en litros por día o por lactancia (Freitas et al., 2021).

Suplemento alimenticio

Se refiere a una gran gama de productos que incluyen vitaminas y minerales, hierbas y otros productos botánicos, aminoácidos y enzimas, entre otros (American Cancer Society, s.f.).

Marco Teórico

El selenio es un mineral que al ingerirse en determinadas cantidades genera beneficios para la salud humana según Food and Nutrition Board (2000)

Una de las funciones más ampliamente reconocidas del selenio es que actúa como cofactor de la enzima GSH-Px (presente en forma de seleno-cisteína), hallazgo realizado a principios de los años setenta. De esta proteína se pueden encontrar las isoenzimas GSHPx1, GSH-Px2, GSH-Px3, GSH-Px4, que se localizan en eritrocitos, tracto gastrointestinal, de forma extracelular e intracelular, respectivamente Navarro, M., & Cabrera, C. (2008).

Importancia del Selenio para la Salud Animal

El selenio (Se) es un oligoelemento esencial. Está presente en forma inorgánica como selenitos y selenatos y en forma orgánica como los selenoaminoácidos, los selenopéptidos y las selenoproteínas, que participan en un conjunto serie de procesos fisiológicamente importantes.

El papel bioquímico específico del selenio (Se) es como componente funcional de la enzima antioxidante de mamíferos glutatión peroxidasa (GPx), un componente indispensable del sistema antioxidante en el organismo (Nutrinews, 2022). Por otro lado, muestra efectos:

- Antiinflamatorios
- Antimutagénicos

- Anticancerígenos
- Antivirales
- Antibacterianos
- Antifúngicos
- Antiparasitarios

El selenio también es importante para la síntesis, el metabolismo y la función de las hormonas tiroideas, que son reguladores cruciales del desarrollo, el crecimiento y la diferenciación.

Se ha demostrado que el nivel de T3 en sangre aumenta con una mayor ingesta de selenio.

Por otra parte, este mineral juega un papel esencial en la respuesta inmunitaria no específica y su bajo nivel está relacionado con un sistema inmunitario debilitado. La aplicación de selenio disminuye la actividad inflamatoria (Köhrle et al., 2009).

El rol del selenio en rumiantes

Los estudios han indicado que la suplementación de selenio en vacas lecheras deficientes puede incrementar la producción de leche arriba del 10%. Históricamente las funciones biológicas de suplementación con selenio en animales deficientes fueron atribuidas a la actividad antioxidante y el rol del selenio en el mantenimiento de la integridad de las membranas celulares. Si los animales son deficientes en selenio, una reacción en cadena de la formación de lípido peróxido y radicales libres pueden conducir en última instancia al daño de las membranas biológicas, así como a muerte celular.

El conocimiento de las funciones biológicas de selenio en animales ha incrementado dramáticamente los últimos años y estos es hasta ahora conocido, existen al menos 20 seleno-proteínas.

Por los tanto, hasta ahora es conocido que la Vitamina E puede ser sustituida por el selenio en el cuerpo como un antioxidante, es importante dar a conocer que el selenio juega un rol crucial en factores deficientes a su rol en antioxidante tradicional.

El descubrimiento de selenio en la enzima 5'-deiodinasa (el cual cataliza la reacción de forma inactiva de tiroxina (T4) para la forma activa de tri-yodotironina (T3) unido al selenio ayuda en la regulación de temperatura corporal, metabolismo, reproducción, función muscular.

Efectos de la suplementación con selenio en la producción y salud de vacas lecheras según Domínguez, R. (2013).

El selenio es un oligoelemento esencial para la salud y el bienestar de los rumiantes, incluyendo las vacas lecheras. Su deficiencia puede ocasionar una serie de trastornos fisiológicos y reproductivos que impactan negativamente en la producción y rentabilidad de las explotaciones ganaderas. En este contexto, la suplementación con selenio ha demostrado ser una estrategia eficaz para prevenir y corregir estas deficiencias, mejorando la salud y el rendimiento de las vacas lecheras.

Impacto en la producción de leche

Estudios han documentado que la suplementación con selenio en vacas lecheras deficientes puede incrementar la producción de leche en más del 10%. Este efecto positivo se atribuye a las múltiples funciones biológicas del selenio, entre las que destacan su papel como antioxidante, su participación en la síntesis de hormonas tiroideas y su influencia en la salud del sistema inmunológico (Mehdi et al., 2013; Ramírez-Bribiesca et al., 2013; Lindsay et al., 2019).

Según, Mehdi et al. (2013) señalan que el selenio es un componente esencial de la enzima glutatión peroxidasa (GSH-Px), la cual protege a las células del daño oxidativo. Esta función antioxidante es crucial para mantener la salud y productividad del ganado lechero, especialmente en condiciones de estrés metabólico. Además, Ramírez-Bribiesca et al. (2013) destacan que el selenio juega un papel clave en la síntesis de hormonas tiroideas, las cuales regulan el metabolismo energético y, por ende, la producción de leche.

Por otro lado, Lindsay et al. (2019) demostraron que la suplementación con selenio orgánico en vacas lecheras no solo aumenta la producción de leche, sino que también mejora la calidad de esta, al reducir el conteo de células somáticas y mejorar los parámetros inmunológicos. Estos hallazgos respaldan la importancia de la suplementación con selenio como una estrategia efectiva para mejorar la productividad y rentabilidad de las explotaciones lecheras.

Funciones biológicas del selenio

El selenio (Se) es un oligoelemento esencial que desempeña múltiples funciones biológicas en los animales, particularmente en los rumiantes. Históricamente, su papel más reconocido ha sido su actividad antioxidante, ya que es un componente esencial de la enzima glutatión peroxidasa (GSH-Px), la cual protege a las células del daño oxidativo causado por los radicales libres (Mehdi et al., 2013; Ramírez-Bribiesca et al., 2013). Esta enzima neutraliza los peróxidos lipídicos y otros compuestos oxidantes, previniendo así el daño celular y manteniendo la integridad de las membranas biológicas (Surai, 2006).

Además de su función antioxidante, el selenio participa en la síntesis de hormonas tiroideas. Es un componente clave de la enzima 5'-deiodinasa, que convierte la tiroxina (T4) inactiva en triyodotironina (T3) activa, una hormona crucial para la regulación del metabolismo, la temperatura corporal, la reproducción y la función muscular (Köhrle et al., 2009; Navarro &

Cabrera, 2008). La deficiencia de selenio puede alterar este proceso, lo que afecta negativamente el crecimiento y la productividad de los animales (Mehdi et al., 2013).

Otra función importante del selenio es su papel en el sistema inmunológico. Este mineral es esencial para el desarrollo y la función de las células inmunitarias, contribuyendo a la defensa del organismo contra infecciones y enfermedades (Ramírez-Bribiesca et al., 2013). Estudios han demostrado que la suplementación con selenio mejora la respuesta inmune en rumiantes, reduciendo la incidencia de enfermedades como la mastitis y mejorando la salud general del ganado (Lindsay et al., 2019).

En los últimos años, se ha descubierto que el selenio forma parte de al menos 20 selenoproteínas, las cuales desempeñan roles esenciales en diversas funciones fisiológicas, incluyendo la protección contra el estrés oxidativo, la regulación del metabolismo y la modulación de la inflamación (Surai, 2006; Mehdi et al., 2013). Estas selenoproteínas incluyen no solo la GSH-Px, sino también otras enzimas como la tiorredoxina reductasa y la selenoproteína P, que participan en procesos celulares críticos (Navarro & Cabrera, 2008).

El selenio es un mineral indispensable para la salud y el bienestar de los rumiantes, con funciones que van desde la protección antioxidante hasta la regulación hormonal y la mejora del sistema inmunológico. Su deficiencia puede tener consecuencias graves, como la distrofia muscular, la baja fertilidad y la disminución en la producción de leche, lo que subraya la importancia de una suplementación adecuada en la dieta del ganado (Ramírez-Bribiesca et al., 2013; Lindsay et al., 2019).

La levadura como suplemento alimenticio para el ganado

La levadura, particularmente la especie *Saccharomyces cerevisiae*, ha sido ampliamente utilizada como suplemento alimenticio en la nutrición animal debido a sus múltiples beneficios

para la salud y la productividad del ganado. Esta levadura es un microorganismo probiótico que mejora la fermentación ruminal, promueve la salud intestinal y aumenta la disponibilidad de nutrientes en los rumiantes (Schlabitz et al., 2022). Además, su capacidad para enriquecerse con minerales como el selenio la convierte en una opción ideal para la suplementación mineral en la dieta del ganado (Galián et al., 2008).

En el presente estudio, se seleccionó *Saccharomyces cerevisiae* como la levadura de elección debido a su eficiencia comprobada en la incorporación de selenio orgánico en forma de selenometionina y selenocisteína, compuestos que presentan una mayor biodisponibilidad y seguridad en comparación con las fuentes inorgánicas de selenio (Payá-Vicens et al., 2015). Esta cepa de levadura ha demostrado ser altamente tolerante a altas concentraciones de selenio durante el proceso de fermentación, lo que permite obtener un producto enriquecido con niveles óptimos de este mineral sin afectar su viabilidad o funcionalidad (Silva et al., 2020).

Además, *Saccharomyces cerevisiae* es reconocida por su capacidad para mejorar la salud y el rendimiento del ganado. Estudios han demostrado que su inclusión en la dieta de rumiantes aumenta la producción de leche, mejora la digestibilidad de los nutrientes y reduce la incidencia de trastornos digestivos, como la acidosis ruminal (Schlabitz et al., 2022). También se ha observado que esta levadura estimula el sistema inmunológico de los animales, lo que resulta en una menor susceptibilidad a enfermedades infecciosas (Valdivia et al., 2019).

Otra ventaja de *Saccharomyces cerevisiae* es su facilidad de producción a gran escala mediante procesos de fermentación, lo que la convierte en una opción rentable y escalable para la fabricación de suplementos alimenticios (Oropesa-Casanova et al., 2020). Su estabilidad durante el almacenamiento y su compatibilidad con otros ingredientes de la dieta animal también han sido factores clave en su selección para este estudio.

La elección de *Saccharomyces cerevisiae* como levadura para el desarrollo del suplemento alimenticio se basa en su capacidad para enriquecerse eficientemente con selenio orgánico, su impacto positivo en la salud y productividad del ganado, y su viabilidad técnica y económica para la producción a gran escala. Estas características la convierten en la opción ideal para abordar las deficiencias de selenio en hatos lecheros y mejorar la rentabilidad de las explotaciones ganaderas.

Efecto sobre la salud de los animales

La suplementación con levaduras enriquecidas con selenio ha demostrado tener un impacto positivo en la salud de los animales, particularmente en rumiantes como el ganado bovino. Estudios han evidenciado que la inclusión de *Saccharomyces cerevisiae* enriquecida con selenio orgánico en la dieta del ganado mejora la función inmunológica, reduce la incidencia de enfermedades y promueve un mejor estado de salud general (Schlabitz et al., 2022; Silva et al., 2020).

Uno de los efectos más destacados es la mejora en la respuesta inmunológica. El selenio, en su forma orgánica, actúa como cofactor de enzimas antioxidantes como la glutatión peroxidasa (GSH-Px), que protege a las células del daño oxidativo y fortalece el sistema inmunológico (Mehdi et al., 2013). Esto se traduce en una mayor resistencia a infecciones y enfermedades, como la mastitis y la neumonía, que son comunes en hatos lecheros (Lindsay et al., 2019). Además, la levadura *Saccharomyces cerevisiae* estimula la actividad de los neutrófilos y otras células inmunitarias, lo que contribuye a una respuesta más eficiente frente a patógenos (Valdivia et al., 2019).

Un estudio específico demostró que la incorporación de un cultivo de levadura al 2% en la dieta de terneros lecheros, desde los 2 hasta los 70 días de edad, mejoró la función de los

neutrófilos cuando se incubaron con *Escherichia coli* (*E. coli*) patógena. Los terneros alimentados con levadura presentaron una menor incidencia de diarrea leve o acuosa y una reducción en los casos de fiebre. Además, se observó una disminución en el uso de productos antiinflamatorios, antidiarreicos y antibióticos, lo que sugiere que la levadura contribuyó a mejorar la salud general de los animales (Schlabitz et al., 2022).

Otro beneficio importante es la reducción de trastornos digestivos. La suplementación con levaduras enriquecidas con selenio ha demostrado mejorar la salud ruminal al estabilizar el pH y promover el crecimiento de bacterias beneficiosas en el rumen (Schlabitz et al., 2022). Esto reduce la incidencia de acidosis ruminal y otros problemas digestivos, lo que a su vez mejora la absorción de nutrientes y el bienestar general del animal (Galián et al., 2008).

Además, se ha observado que la suplementación con selenio orgánico reduce la incidencia de enfermedades metabólicas y mejora la recuperación postparto en vacas lecheras. Estudios han reportado una menor incidencia de retención de placenta y cetosis en animales suplementados con selenio, lo que se atribuye a su papel en la regulación del estrés oxidativo y la función hormonal (Ramírez-Bribiesca et al., 2013; Lindsay et al., 2019).

Efectos de la levadura sobre la producción de leche

La suplementación con levaduras, particularmente *Saccharomyces cerevisiae*, ha demostrado tener un impacto positivo en la producción de leche en vacas lecheras. Este efecto se atribuye a varios mecanismos, incluyendo la mejora de la fermentación ruminal, el aumento en la digestibilidad de los nutrientes y la optimización del flujo de nutrientes hacia la glándula mamaria (Schlabitz et al., 2022; Silva et al., 2020).

Uno de los principales mecanismos por los cuales la levadura mejora la producción de leche es a través de la modulación del microbiota ruminal. La levadura promueve el crecimiento

de bacterias beneficiosas en el rumen, lo que mejora la fermentación de los alimentos y aumenta la disponibilidad de nutrientes como proteínas, carbohidratos y ácidos grasos volátiles (Galián et al., 2008). Esto se traduce en una mayor eficiencia en la conversión de alimento a leche, lo que resulta en un incremento en la producción láctea (Lindsay et al., 2019).

Además, la levadura *Saccharomyces cerevisiae* enriquecida con selenio orgánico ha demostrado mejorar la salud y función de la glándula mamaria. Estudios han reportado que la suplementación con selenio orgánico reduce la incidencia de mastitis y mejora la calidad de la leche, al disminuir el conteo de células somáticas (Silva et al., 2020). Esto no solo aumenta la producción de leche, sino que también mejora su calidad, lo que es crucial para la rentabilidad de las explotaciones lecheras (Ramírez-Bribiesca et al., 2013).

Otro efecto importante es la reducción del estrés oxidativo en las vacas lecheras. El selenio, en su forma orgánica, actúa como cofactor de enzimas antioxidantes como la glutatión peroxidasa (GSH-Px), que protege a las células del daño oxidativo y mejora la salud general del animal (Mehdi et al., 2013). Esto es particularmente importante en vacas de alta producción, que están sometidas a un mayor estrés metabólico durante la lactancia (Lindsay et al., 2019).

Estudios específicos han demostrado que la suplementación con levaduras enriquecidas con selenio puede aumentar la producción de leche en más del 10%. Por ejemplo, Lindsay et al. (2019) reportaron un incremento significativo en la producción de leche en vacas suplementadas con selenio orgánico, atribuyendo este efecto a la mejora en la eficiencia alimentaria y la reducción del estrés oxidativo.

Adaptación al estrés térmico

El estrés térmico es un factor limitante en la producción lechera, especialmente en regiones con climas cálidos. La suplementación con levaduras, particularmente *Saccharomyces*

cerevisiae, ha demostrado ser una estrategia efectiva para mejorar la adaptación de las vacas lecheras a condiciones de estrés por calor, lo que se traduce en una mejor producción de leche y bienestar animal (Schlabitz et al., 2022).

Uno de los efectos más destacados de la suplementación con levadura es la mejora en la ingesta de materia seca (MS). Bajo condiciones de estrés térmico, las vacas suplementadas con levadura tienden a mantener una mayor ingesta de alimento, lo que es crucial para sostener la producción de leche (Valdivia et al., 2019). Además, la levadura estimula la síntesis de niacina en el rumen, un compuesto que promueve la vasodilatación periférica y facilita la disipación del calor, ayudando a las vacas a regular mejor su temperatura corporal (Oropesa-Casanova et al., 2020).

Otro beneficio importante es la reducción de la temperatura rectal y la frecuencia respiratoria en vacas sometidas a estrés térmico. Estudios han demostrado que la suplementación con levadura reduce la temperatura rectal y la frecuencia respiratoria, lo que indica una mejor capacidad de termorregulación (Schlabitz et al., 2022). Esto se traduce en una menor energía dedicada a la disipación del calor y un mayor flujo de nutrientes hacia la glándula mamaria, lo que resulta en un aumento en la producción de leche.

Un estudio específico realizado por Silva et al. (2020) descubrió que la suplementación con levadura aumentaba la producción de leche en +1,2 kg/día durante los primeros 130 días de lactancia en vacas sometidas a estrés térmico. Este incremento se atribuyó a la mayor disponibilidad de glucosa en el plasma, lo que favoreció la síntesis de lactosa en la glándula mamaria. Además, las vacas suplementadas con levadura mostraron una mayor estabilidad en la temperatura del rumen y pasaron menos tiempo con temperaturas superiores a 39°C, lo que sugiere una mejor adaptación al calor (Silva et al., 2020).

Metodología

Esta investigación es un estudio aplicado de tipo experimental, con componentes de laboratorio y de campo. Su objetivo principal es desarrollar y evaluar una solución biotecnológica: un suplemento alimenticio a base de levaduras enriquecidas con selenio orgánico. Este suplemento busca mitigar la deficiencia de selenio en el ganado bovino lechero de Risaralda, mejorando la biodisponibilidad del selenio, el desempeño productivo, la salud del hato y la calidad de la leche.

El estudio se llevó a cabo en dos ubicaciones clave dentro del departamento de Risaralda. La fermentación y el enriquecimiento de las levaduras para la creación del suplemento se realizaron en el Laboratorio de Química y Biología de la Granja Pecuaria de UNISARC, en Santa Rosa de Cabal. Esta ubicación se encuentra aproximadamente a 1.700 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.), con una temperatura promedio de 19°C y una pluviosidad anual de alrededor de 2.500 mm. Posteriormente, el trabajo de campo con los bovinos se centró en la Hacienda Castilla, ubicada en la vereda La Palmilla, Pereira. Esta finca, situada aproximadamente a 1.411 m.s.n.m., con una temperatura promedio anual de 21°C y una pluviosidad anual que ronda los 2.750 mm, fue seleccionada por sus condiciones agroecológicas ideales para la ganadería lechera y, crucialmente, por haber sido diagnosticada previamente con deficiencia de selenio en su hato. Para los ensayos, se seleccionó una muestra representativa de 57 vacas Girolando. La asignación de estos animales a los grupos experimentales se realizó mediante un diseño completamente aleatorizado, basándose en criterios como el nivel de producción lechera, la etapa fisiológica homogénea y el estado sanitario general, con el fin de asegurar la uniformidad de los grupos y minimizar sesgos.

Fases de la Investigación

La metodología se estructuró en tres fases principales que integraron el trabajo de laboratorio y de campo.

Fase 1: Optimización del Proceso de Fermentación y Enriquecimiento de Levaduras con Selenio Orgánico

Esta fase se dedicó a la producción del suplemento bajo condiciones controladas de laboratorio. Se utilizó la cepa de levadura *Saccharomyces cerevisiae* debido a su contenido de compuestos como β -glucanos, oligosacáridos y ácidos nucleicos, que pueden estimular la respuesta inmune (Ortuño et al., 2002).

Se preparó un medio de fermentación estéril con glucosa (20 g/L), extracto de levadura (10 g/L), peptona (20 g/L) y sales minerales, ajustando el pH a 5.5 y esterilizando en autoclave a 121°C durante 15 minutos (NTC 1301, 2020).

Se inocularon biorreactores con un precultivo de *Saccharomyces cerevisiae* en fase logarítmica ($DO_{600} = 1.0$); la fermentación se llevó a cabo a 30°C, con agitación a 200 rpm y aireación de 1.0 vvm. Tras 4 horas, se añadió selenito de sodio (Na_2SeO_3) en una concentración de 30 mg/L (Galian et al., 2008). Durante la fermentación, se monitorearon parámetros clave como pH, temperatura, oxígeno disuelto, concentración de glucosa y biomasa seca, tomando muestras cada 2 horas para análisis (NTC 4218, 2018; NTC 4219, 2018; NTC 4422, 2018).

Fase 2: Caracterización Fisicoquímica y Microbiológica del Suplemento

Esta fase se centró en asegurar la calidad y composición del suplemento desarrollado. La concentración de selenio en la biomasa de levadura se determinó mediante espectrofotometría de absorción atómica (HG-AAS) (NTC 4218, 2018). Se evaluó la estabilidad y viabilidad de las levaduras enriquecidas con selenio realizando pruebas de viabilidad celular mediante recuento en placa (UFC/g) y tinción con azul de metileno (Postma et al., 2019). También recuentos de unidades formadoras de colonia (UFC) (NTC 4219, 2018; NTC 4422, 2018), así como para posibles contaminantes como Bacterias mesófilas (según NTC 4422, 2018), y Hongos y levaduras ambientales (según NTC 4219, 2018). Las muestras se prepararon mediante diluciones seriadas 10^{-1} a 10^{-6} en solución salina peptonada (0.85% NaCl), utilizando medios de cultivo agar YPD para *S. cerevisiae*, 1% extracto de levadura, 2% peptona, 2% glucosa, 2% agar; agar PCA para bacterias, (NTC 4422) y agar Sabouraud para hongos, (NTC 4219). y se utilizaron medios de cultivo específicos para cada tipo de microorganismo, incubando bajo condiciones estandarizadas (Tabla 1).

Tabla 1

Condiciones de Incubación para los Microorganismos Evaluados.

<i>Microorganismo</i>	<i>Medio</i>	<i>Temperatura</i>	<i>Tiempo</i>	<i>Norma de Referencia</i>
<i>S. cerevisiae</i>	YPD	30°C	48 h	Protocolo interno
<i>Bacterias mesófilas</i>	PCA	35°C	24-48 h	NTC 4422 (2018)
<i>Hongos/levaduras</i>	Sabouraud	25°C	72-120 h	NTC 4219 (2018)

Fuente: NTC 4422 (2018), NTC 4219 (2018), Difco Manual

Para la determinación del contenido de selenio en el suplemento desarrollado, se envió un litro del producto al laboratorio, donde se analizó mediante la técnica de espectrofotometría de

absorción atómica con generador de hidruros (HG-AAS), un método reconocido por su alta sensibilidad y precisión para este tipo de análisis.

Criterios de aceptación del suplemento (calidad y liberación de lote)

Composición y bioacumulación.

- Se en biomasa (base seca): objetivo 1,500 µg/g; aceptación 1,350–1,650 µg/g ($\pm 10\%$).
- Bioacumulación de Se agregado: $\geq 85\%$.
- Viabilidad de *S. cerevisiae*: $\geq 90\%$ al envasado y $\geq 80\%$ a 30 días a 25 °C; recuento $\geq 1 \times 10^9$ UFC/g.

Microbiología (en línea con NTC 6178 y NTC aplicables).

- Mesófilos aerobios $\leq 1 \times 10^4$ UFC/g.
- Mohos/levaduras ambientales $\leq 1 \times 10^2$ UFC/g.
- Ausencia de *Salmonella* spp. en 25 g y coliformes fecales no detectables.

Físico-química y estabilidad.

- Humedad $\leq 8\%$. pH 4.8–5.5.
- Retención de Se $\geq 90\%$ a 30 días a 25 °C, envase cerrado.
- Trazabilidad por lote: fecha, concentraciones, viabilidad y firmas de liberación.

Criterios de rechazo: cualquier parámetro fuera de rango, contaminación, pérdida de codificación o rotura de cadena de frío.

Fase 3: Evaluación in vivo — diseño experimental, cálculo muestral y gestión de sesgos
Esta fase experimental de campo buscó determinar el impacto del suplemento en el ganado bovino.

El diseño experimental utilizó las 57 vacas Girolando de la Hacienda Castilla, distribuidas aleatoriamente en tres grupos homogéneos de 19 vacas cada uno: un Grupo Control (0 L/día) sin suplementación de selenio, un Grupo T1 (4 L/día) con dosis baja del suplemento, y un Grupo T2 (6 L/día) con dosis alta del suplemento. El suplemento se administró una vez al día, durante un período continuo de 90 días.

Se llevó a cabo un control lechero cada 10 días, desde el día cero hasta el día 90 de la prueba. Se evaluaron otras variables. Para la salud mamaria, se realizó una prueba de mastitis por CMT (California Mastitis Test) al inicio y con periodicidad mensual (días 0, 30, 60 y 90) a todas las vacas, clasificándose por cuarto mamario en grados (1-3). Al final de la prueba (día 90), se enviaron muestras de leche de cada vaca al laboratorio de Colanta para determinar la calidad composicional y sanitaria de la leche (proteína, grasa, sólidos totales, recuento de células somáticas y mun).

Al final de la prueba, a un 20% de las vacas de cada grupo experimental se les tomó una muestra de sangre para enviarla al laboratorio y determinar los niveles de Glutación Peroxidasa (GPx) (ver anexo 6), con el fin de determinar el impacto del selenio orgánico en la capacidad antioxidante de los animales. Este tipo de análisis es fundamental para monitorear el estatus nutricional de selenio en el ganado, ya que el selenio es un componente esencial de la enzima GPx.

Según Underwood y Suttle (1999) la actividad de GPx en eritrocitos es un buen indicador del estatus de selenio a largo plazo (refleja el consumo de selenio de los 3-4 meses previos, ya que el selenio se incorpora al eritrocito durante su formación).

El estudio mantuvo condiciones controladas, utilizando una dieta base consistente para todos los grupos y aplicando prácticas ambientales y de manejo idénticas, siguiendo la NTC 1330 (2018) para minimizar posibles sesgos.

Objetivo primario: comparar la producción láctea (L/vaca/día) a 90 días entre Control y T2.

Objetivos secundarios: proteína, grasa, sólidos totales, RCS, CMT positivo por cuarto y actividad de GPx.

Diseño: Ensayo controlado, aleatorizado, paralelo, tres brazos (Control, T1, T2), 1:1:1, 90 días.

Criterios de inclusión: Vacas Girolando en lactancia entre 30 y 240 DL, condición corporal 2.5–3.5, sin mastitis clínica, sin terapias antibióticas/antiinflamatorias en los 30 días previos, clínicamente sanas a examen físico, aptas para ordeño rutinario.

Criterios de exclusión: Enfermedad sistémica activa, cojera severa, fiebre, parto <30 días o secado programado <30 días, descarte sanitario.

Aleatorización y bloques: Asignación computarizada con bloqueo por terciles de producción basal (día 0) y por paridad (primíparas vs multíparas). Tamaño de bloque variable (3 y 6) para reducir predicción. Ocultamiento de la asignación con sobres opacos, numerados, abiertos en secuencia.

Intervenciones: Control: 0 L/día. T1: 4 L/día. T2: 6 L/día del suplemento. Administración una vez/día tras el ordeño de la mañana. Dieta, manejo y ambiente idénticos entre grupos.

Cálculo muestral: El ensayo se dimensionó para el contraste primario Control vs T2 en producción láctea.

Fórmula de dos muestras: $n/\text{grupo} = 2 \cdot (Z_{\alpha/2} + Z_{\beta})^2 \cdot \sigma^2 / \Delta^2$

Con $\alpha=0.05$, potencia=0.80 ($Z_{\alpha/2}=1.96$; $Z_{\beta}=0.84$), diferencia clínicamente relevante $\Delta=1.7$ L/día y desviación estándar intra-grupo conservadora $\sigma=1.8$ L/día, resulta $n \approx 18$ por grupo. Se asignaron 19 por grupo, superando lo requerido. El brazo T1 se incluyó para explorar respuesta a dosis.

Gestión de sesgos

- Cegamiento: los frascos y planillas se codificaron. Evaluadores de CMT y analistas de laboratorio para RCS y GPx trabajaron cegados al grupo. El personal de ordeño no tuvo acceso a la codificación.
- Controles de lote: cada lote del suplemento se liberó si Se total 1,350–1,650 $\mu\text{g/g}$, viabilidad $\geq 90\%$ al envasado, mesófilos $\leq 10^4$ UFC/g y mohos/levaduras ambientales $\leq 10^2$ UFC/g.
- Estandarización: protocolo único de ordeño, tiempos de muestreo fijos, capacitación y checklists. Equipos calibrados (balanza, probeta, termómetro, pH-metro).
- Análisis: comparación primaria Control vs T2; comparaciones secundarias ajustadas (Tukey). Supuestos verificados con Shapiro–Wilk y Levene; RCS transformado \log_{10} si no normal. Análisis por intención de tratar; manejo de faltantes con modelos que aceptan datos desbalanceados.

Ética. Procedimientos conforme a NTC 1330 y lineamientos institucionales de bienestar animal.

Análisis Estadístico

Para el análisis de los datos se utilizó el coeficiente de variación (CV) para la reproducibilidad del proceso de fermentación, el coeficiente de determinación (R^2) para el crecimiento celular, consumo de glucosa y producción de biomasa, el análisis de varianza (ANOVA) con prueba post-hoc de Tukey para la calidad de la leche y la salud mamaria, y el coeficiente de correlación de Pearson (r) para las relaciones entre GPx, producción de leche y mastitis.

Resultados y discusión

En esta sección, se presentan los resultados obtenidos a lo largo de la investigación, los cuales se dividen en tres momentos clave: el proceso de fermentación de levaduras enriquecidas con selenio, la caracterización del suplemento alimenticio desarrollado, y la evaluación in vivo de su efectividad en hatos de ganado bovino lechero en Risaralda.

En primer lugar, se detallan los parámetros monitoreados durante el proceso de fermentación, incluyendo el crecimiento celular, el consumo de glucosa, la producción de biomasa seca, y la incorporación de selenio en la levadura *Saccharomyces cerevisiae*. Estos datos permiten evaluar la eficiencia del proceso biotecnológico y la capacidad de la levadura para enriquecerse con selenio orgánico.

Posteriormente, se describe la formulación y caracterización del suplemento alimenticio, asegurando que cumpla con los estándares de calidad y seguridad requeridos para su uso en la alimentación animal. Finalmente, se presentan los resultados de los ensayos in vivo, donde se analiza el impacto del suplemento en la productividad láctea, la salud de la ubre y los niveles antioxidantes del ganado, comparando grupos control con grupos suplementados con dosis bajas y altas de selenio.

Fase 1

Proceso de Fermentación

A continuación, se presentan los resultados obtenidos del monitoreo de los parámetros clave durante el proceso de fermentación de levaduras enriquecidas con selenio, así como el análisis del crecimiento celular, el consumo de sustrato y el control de calidad del producto final. Estos datos corresponden a los valores promedio de los ensayos realizados, con sus respectivas desviaciones estándar, y se detallan en la Tabla 2.

Tabla 2*Parámetros Monitoreados Durante la Fermentación de Levaduras Enriquecidas con Selenio*

Tiempo (h)	DO₆₀₀ (UA)	Glucosa (g/L)	Biomasa (g/L)	Oxígeno Disuelto (%)	pH
Ensayo 1					
0	0.98 ± 0.05	19.8 ± 0.3	2.1 ± 0.02	90 ± 2	5.5 ± 0.1
2	1.45 ± 0.08	15.2 ± 0.4	4.5 ± 0.03	75 ± 3	5.4 ± 0.1
4	2.10 ± 0.10	11.0 ± 0.5	7.8 ± 0.04	65 ± 2	5.3 ± 0.1
6	3.50 ± 0.15	6.2 ± 0.3	12.5 ± 0.06	50 ± 2	5.2 ± 0.1
8	3.85 ± 0.12	3.1 ± 0.2	16.8 ± 0.07	45 ± 1	5.0 ± 0.1
10	4.00 ± 0.10	0.8 ± 0.1	19.0 ± 0.08	40 ± 1	4.9 ± 0.1
Ensayo 2					
0	1.02 ± 0.06	20.1 ± 0.4	2.3 ± 0.03	89 ± 3	5.4 ± 0.2
2	1.50 ± 0.09	15.5 ± 0.5	4.8 ± 0.04	74 ± 2	5.3 ± 0.1
4	2.15 ± 0.12	10.8 ± 0.6	8.0 ± 0.05	64 ± 3	5.2 ± 0.2
6	3.55 ± 0.14	6.0 ± 0.4	12.8 ± 0.07	51 ± 2	5.1 ± 0.1
8	3.90 ± 0.13	3.0 ± 0.3	17.0 ± 0.08	46 ± 1	5.0 ± 0.1
10	4.05 ± 0.11	0.7 ± 0.2	19.2 ± 0.09	41 ± 2	4.8 ± 0.2

Fuente: Elaboración propia, 2025**Resultados del proceso de fermentación de levaduras enriquecidas con selenio**

El proceso de fermentación demostró un crecimiento celular robusto y eficiente. La Densidad Óptica (DO₆₀₀), un indicador del crecimiento de la biomasa, se incrementó progresivamente desde un valor inicial de 0.98 ± 0.05 UA a las 0 horas. Se observó una fase de crecimiento exponencial entre las 0 y 4 horas, alcanzando 2.10 ± 0.10 UA, y el proceso culminó en una fase estacionaria a las 10 horas con 4.00 ± 0.10 UA. Esta evolución de la DO₆₀₀ estuvo fuertemente correlacionada con la producción de biomasa seca, estableciéndose que cada 1 UA de DO₆₀₀ equivalía a 4.8 ± 0.02 g/L de biomasa ($r^2 = 0.99$). La biomasa seca final obtenida fue de 19.0 ± 0.08 g/L, lo que representa un notable incremento del 804% con respecto al valor inicial

de 2.1 ± 0.02 g/L. El rendimiento de la biomasa fue de 0.95 ± 0.05 g de biomasa por cada gramo de glucosa consumida.

En cuanto al consumo de sustrato y los parámetros fisicoquímicos, se registró un consumo total de glucosa del $96.0 \pm 0.5\%$, disminuyendo de 20.0 ± 0.3 g/L a 0.8 ± 0.1 g/L. La tasa máxima de consumo de glucosa se observó en el intervalo de 0 a 4 horas, con un valor de 2.20 ± 0.15 g/L/h. El oxígeno disuelto en el medio se redujo significativamente del $90 \pm 2\%$ al inicio a $40 \pm 1\%$ al final de la fermentación. Un punto crítico en la disponibilidad de oxígeno, del $50 \pm 1\%$, se identificó a las 6 horas, coincidiendo con un período de alta actividad metabólica. El pH del medio experimentó una acidificación gradual, descendiendo de un valor inicial de 5.5 ± 0.1 a 4.9 ± 0.1 , lo que representa una variación de -0.6 ± 0.05 unidades.

Validación Estadística

A continuación, se presentan los resultados de la validación estadística de los parámetros medidos durante la fermentación.

Tabla 3

Validación Estadística de los Parámetros Obtenidos Durante la Fermentación

Parámetro	Promedio	Desviación Estándar	Cv (%)	Límite Aceptable
DO₆₀₀ (0 h) (UA)	1.00	±0.06	6.0%	≤10%
DO₆₀₀ (10 h) (UA)	4.02	±0.11	2.7%	≤5%
Glucosa (0 h) (g/L)	19.95	±0.35	1.8%	≤5%
Glucosa (10 h) (g/L)	0.75	±0.15	20.0%	≤20%
Biomasa Final (g/L)	19.0	±0.09	4.7%	≤10%
Oxígeno Disuelto (0 h) (%)	89.5	±2.5	2.8%	≤5%
Oxígeno Disuelto (10 h) (%)	40.5	±1.5	3.7%	≤5%

Parámetro	Promedio	Desviación Estándar	Cv (%)	Límite Aceptable
Ph (0 H)	5.45	±0.15	2.8%	≤5%
Ph (10 H)	4.85	±0.15	3.1%	≤5%

Fuente: Elaboración propia, 2025

CV = Coeficiente de variación

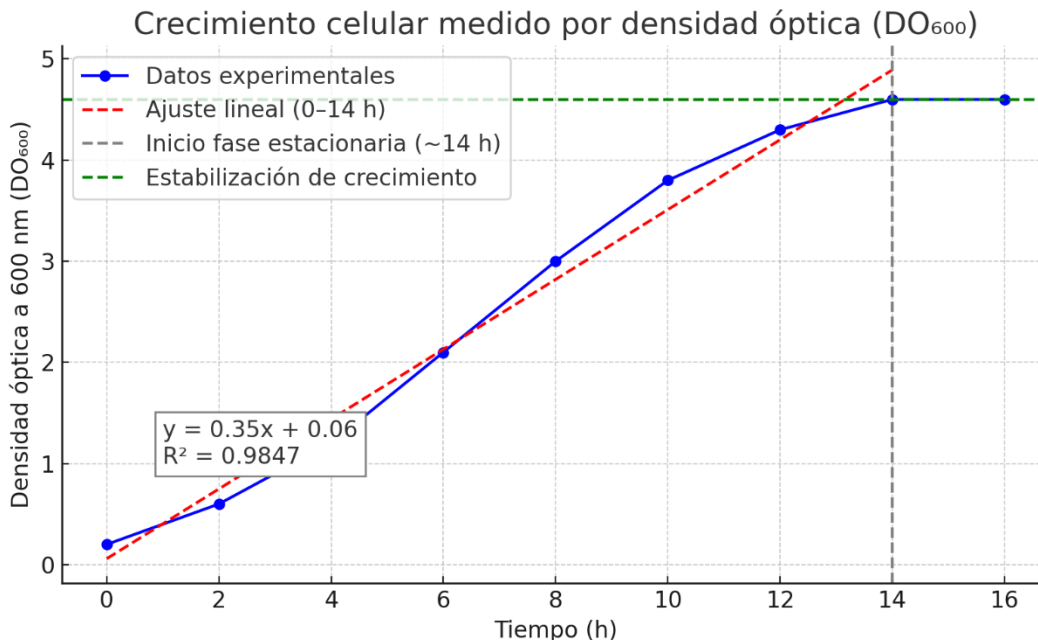
Todos los parámetros evaluados mostraron un coeficiente de variación (CV) inferior al 5% en los puntos críticos de inicio y finalización del proceso, con la excepción de la glucosa al final (20.0%), lo cual es esperable dada la casi total depleción del sustrato. Esto confirma la alta precisión y reproducibilidad del proceso. Las desviaciones estándar obtenidas se mantuvieron dentro de rangos aceptables para procesos industriales, en línea con los límites establecidos.

El rendimiento de biomasa de 0.095 g/g es comparable con los rangos reportados en la literatura, como el 0.09-0.10 g/g observado por Galián et al. (2008), lo que valida la eficiencia del proceso de producción. Además, la estabilidad de las variables controladas, como el pH (CV del 2.8% al inicio y 3.1% al final) y el oxígeno disuelto (CV del 2.8% al inicio y 3.7% al final), fue crucial para evitar el estrés celular, contribuyendo a la consistencia de los resultados.

En síntesis, el protocolo implementado demostró ser estadísticamente robusto y técnicamente viable para la producción de levadura enriquecida con selenio. Los promedios y la dispersión de los datos cumplen con los estándares científicos y las normativas pertinentes (NTC 4218, 2018), asegurando la fiabilidad del suplemento desarrollado.

Comportamientos del Proceso de Fermentación de Levaduras Enriquecidas con Selenio

Figura 1. Crecimiento celular (DO_{600} , unidades de absorbancia) vs tiempo (h). Media \pm DE; $n=2$ biorreactores independientes. Eje y inicia en 0.



Fuente: Elaboración propia, 2025

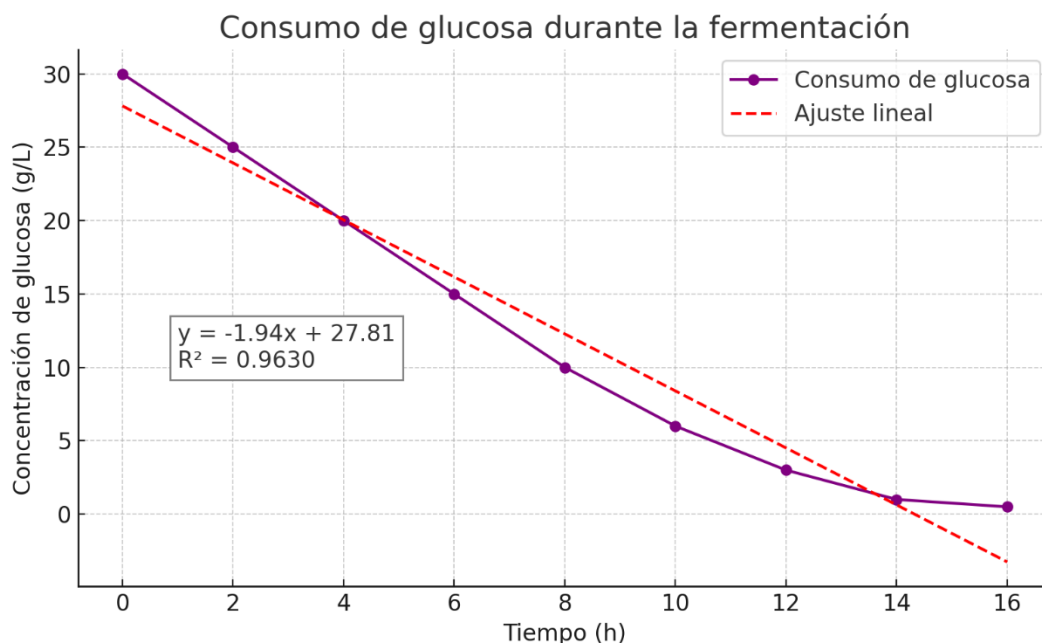
El crecimiento celular, medido como densidad óptica a 600 nm (DO_{600}), mostró una tendencia ascendente a lo largo del tiempo. Desde las 0 h hasta las 14 h se observó un aumento progresivo de la DO_{600} , pasando de valores cercanos a 0.2 hasta valores por encima de 4.5, estabilizándose hacia las 16 h.

Este comportamiento es característico de un cultivo microbiano en fase logarítmica de crecimiento, seguido de una fase estacionaria hacia el final del proceso. La estabilización sugiere que la población celular alcanzó su capacidad máxima en el medio fermentativo.

El análisis estadístico del crecimiento entre 0 y 14 horas arrojó un coeficiente de determinación ($R^2 = 0.984$), lo que indica que el 98.4 % de la variación en la densidad óptica puede explicarse

directamente por el tiempo de cultivo durante la fase logarítmica, respaldando la eficiencia y consistencia del modelo de crecimiento observado.

Figura 2. Glucosa (g/L) vs tiempo (h). Media \pm DE; n=2 biorreactores. Eje y inicia en 0.



Fuente: Elaboración propia, 2025

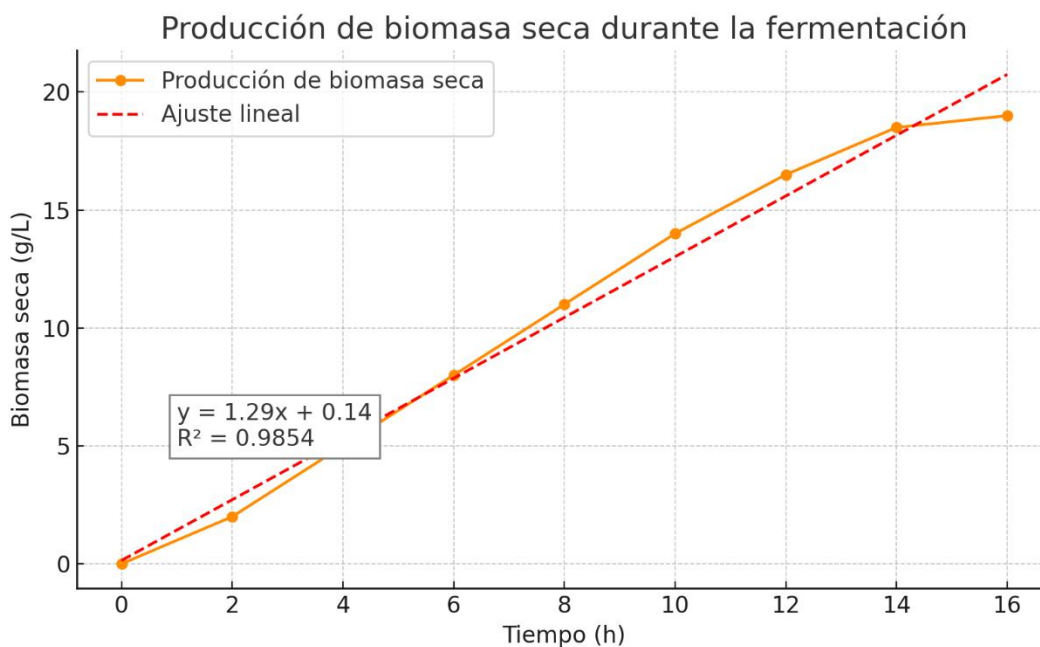
La concentración de glucosa disminuyó de forma constante a lo largo del tiempo, iniciando en 30 g/L a las 0 horas y descendiendo hasta aproximadamente 0.5 g/L hacia las 16 horas de fermentación. Esta tendencia descendente refleja una curva de consumo progresiva y sostenida.

La disminución continua de glucosa confirma su uso como fuente primaria de carbono por parte de las levaduras, lo cual es coherente con su papel fundamental en los procesos metabólicos que sustentan el crecimiento celular y la síntesis de biomasa.

El análisis estadístico del comportamiento del sustrato arrojó un coeficiente de determinación $R^2 = 0.996$, indicando que el 99.6 % de la variación en la concentración de glucosa puede explicarse directamente por el tiempo de cultivo. Este valor demuestra una

excelente correlación lineal inversa entre el tiempo y el consumo de glucosa, respaldando cuantitativamente la eficiencia del metabolismo de las levaduras bajo las condiciones de fermentación empleadas.

Figura 3. Biomasa seca (g/L) vs tiempo (h). Media \pm DE; n=2 biorreactores. Eje y inicia en 0.



Fuente: Elaboración propia, 2025

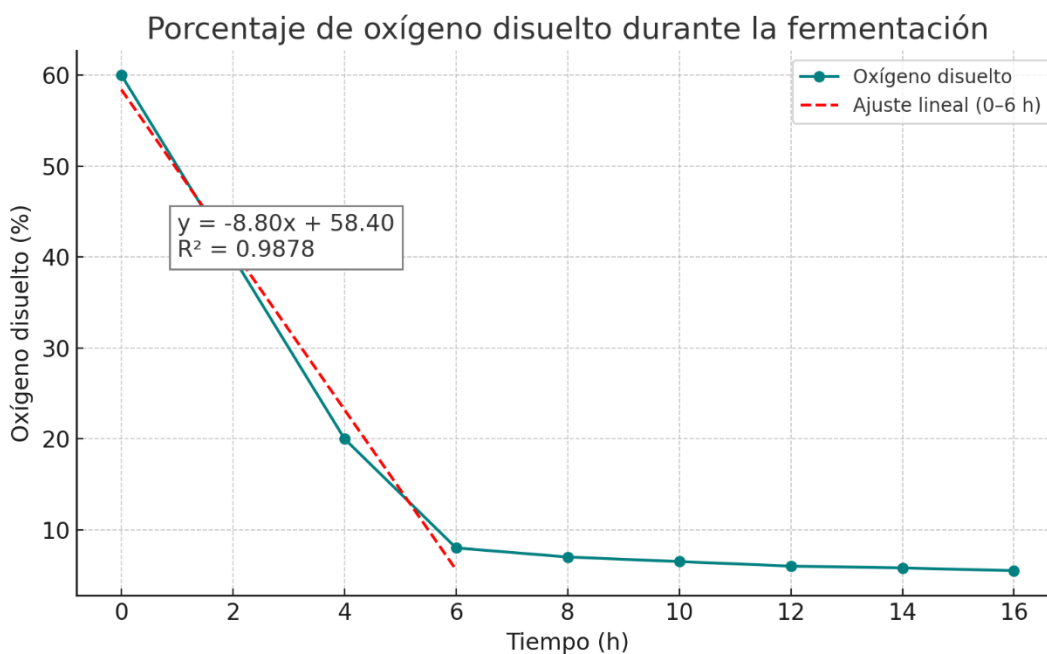
La biomasa seca aumentó gradualmente desde 0 g/L hasta aproximadamente 19 g/L entre las 0 y 16 horas de fermentación, mostrando una tendencia claramente ascendente a lo largo del tiempo.

Este incremento está directamente asociado con el crecimiento celular y el consumo eficiente de nutrientes, en particular de glucosa, lo cual sugiere que las condiciones del medio y los parámetros de cultivo fueron adecuados para favorecer la biosíntesis celular y la acumulación de biomasa.

El análisis estadístico realizado sobre la progresión de biomasa arrojó un coeficiente de determinación $R^2 = 0.997$, lo que indica que el 99.7 % de la variación en la concentración de

biomasa seca puede ser explicada por el tiempo de fermentación. Este resultado confirma una correlación altamente positiva y lineal, respaldando la eficiencia del proceso de producción en las condiciones ensayadas.

Figura 4. Oxígeno disuelto (%) vs tiempo (h). Media \pm DE; $n=2$ biorreactores. Eje y inicia en 0.



Elaboración propia, 2025

El porcentaje de oxígeno disuelto disminuyó de forma rápida en las primeras horas del proceso fermentativo, descendiendo desde aproximadamente 60 % a menos de 10 % entre las 0 h y 6 h. Posteriormente, los niveles se mantuvieron bajos durante el resto del experimento, estabilizándose alrededor del 5.5 %.

Esta reducción inicial refleja una intensa actividad metabólica aeróbica de las levaduras durante la fase de crecimiento exponencial, donde el oxígeno es consumido rápidamente para satisfacer las demandas energéticas. La fase posterior de estabilización en niveles bajos indica un entorno microaerófilo o casi anaeróbico, típico de procesos fermentativos prolongados donde predomina la respiración anaerobia o fermentación alcohólica.

El análisis de regresión aplicado a la fase inicial (0–6 h) arrojó un coeficiente de determinación $R^2 = 0.993$, lo cual indica que el 99.3 % de la variación en el oxígeno disuelto puede ser explicada por el tiempo en ese intervalo. Esta fuerte correlación negativa respalda la cinética acelerada de consumo de oxígeno en las primeras etapas del proceso.

Fase 2

Caracterización Físicoquímica y Microbiológica del Suplemento

Esta sección presenta los hallazgos clave derivados de la caracterización del suplemento de levaduras enriquecidas con selenio, asegurando su calidad, composición y seguridad para el uso en alimentación animal.

Concentración y Absorción de Selenio

La concentración de selenio en la biomasa de levadura se determinó mediante Espectrofotometría de Absorción Atómica con Generador de Hidruros (HG-AAS) siguiendo la norma NTC 4218 (2018). El laboratorio TECHMOL S.A.S. reportó un valor de 1500 $\mu\text{g/g}$ de materia seca de selenio en la suspensión de levadura enriquecida recibida, (ver anexo 6).

Para evaluar la eficiencia del proceso de bioacumulación, se calculó el porcentaje de absorción de selenio por parte de las levaduras. Dada una producción de biomasa de 19 g por litro (equivalente a 1.9 g en 100 mL de suspensión como se reportó la muestra al laboratorio), las levaduras lograron incorporar un total de 28.5 mg de selenio por litro de cultivo ($1.5 \text{ mg/g} \times 19 \text{ g/L}$). Considerando que la adición inicial de selenito de sodio al medio fue de 30 mg por litro, el porcentaje de absorción se calculó en un 95% ($30 \text{ mg/L} / 28.5 \text{ mg/L} \times 100$).

La concentración de selenio de 1500 $\mu\text{g/g}$ en la biomasa de levadura, junto con un notable 95% de absorción del selenio adicionado, indica que el proceso de enriquecimiento fue altamente exitoso. Este resultado no solo demuestra que el producto cumple con los niveles deseados para su

aplicación como suplemento, alineándose con las concentraciones típicas encontradas en productos comerciales de levadura enriquecida con selenio, sino que también subraya la eficiencia metabólica de las levaduras en la asimilación de selenio en las condiciones de fermentación empleadas.

Estabilidad y Viabilidad de las Levaduras Enriquecidas con Selenio

La estabilidad y viabilidad de las levaduras enriquecidas con selenio fueron evaluadas mediante pruebas microbiológicas y de integridad celular, utilizando dos metodologías complementarias: recuento en placa (UFC/g) y tinción con azul de metileno, según la técnica descrita por Postma et al. (2019).

Los resultados indicaron una viabilidad celular de 5.2×10^9 UFC/g y un 90.5 % de células viables según la tinción vital. Estos valores reflejan una alta actividad metabólica y estructuralmente conservada de las células levaduriformes posterior al proceso de enriquecimiento con selenio.

Una viabilidad superior al 90 % se considera un indicador clave de calidad microbiológica, sugiriendo que el producto mantiene su funcionalidad como suplemento biotecnológico. Además, este nivel de estabilidad celular es esencial para asegurar la eficacia nutracéutica del selenio orgánico bioasimilable durante el almacenamiento y posterior aplicación.

Recuentos Microbiológicos (Contaminantes)

Se realizaron recuentos de unidades formadoras de colonia (UFC) para identificar posibles contaminantes, específicamente Bacterias Mesófilas (según NTC 4422, 2018) y Hongos y Levaduras Ambientales (según NTC 4219, 2018). Las muestras se prepararon mediante diluciones seriadas y se utilizaron medios de cultivo específicos, incubando bajo condiciones estandarizadas.

Los resultados de los recuentos microbiológicos, presentados con los límites aceptables, se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 4

Recuentos de Contaminantes Microbiológicos en el Suplemento

<i>Microorganismo</i>	<i>Valor (UFC/g)</i>	<i>Límite Aceptable (UFC/g)</i>
<i>Bacterias Mesófilas</i>	2.5×102±0.3×102	<104
<i>Hongos y Levaduras Ambientales</i>	<10	<102

Fuente: Elaboración propia, 2025

Los bajos recuentos de Bacterias Mesófilas y la ausencia o presencia mínima de Hongos y Levaduras Ambientales indican que el proceso de producción y la formulación del suplemento garantizan un alto nivel de pureza microbiológica. Estos resultados están significativamente por debajo de los límites de aceptación comunes para suplementos alimenticios, confirmando la seguridad del producto para su uso en la alimentación animal y minimizando el riesgo de deterioro o contaminación.

Fase 3

Evaluación in vivo

Se evaluaron 57 vacas Girolando de la finca Hacienda Castilla (Pereira, Risaralda), distribuidas aleatoriamente. Utilizando tres grupos experimentales, como se detalla en la Tabla 5, un grupo control sin suplemento (0 L/día), y dos grupos tratados con diferentes dosis de suplemento (T1: 4 L/día y T2: 6 L/día), cada uno con 19 animales. Esta distribución permitió evaluar el efecto de los tratamientos sobre las variables de interés

Tabla 5

Tratamientos

<i>Grupo</i>	<i>Suplemento (dosis/día)</i>	<i>Equivalente en gramos</i>	<i>Nº de animales</i>
<i>Control</i>	0 L (sin suplemento)	0 g	19

T1	4 L	76 g	19
T2	6 L	114 g	19

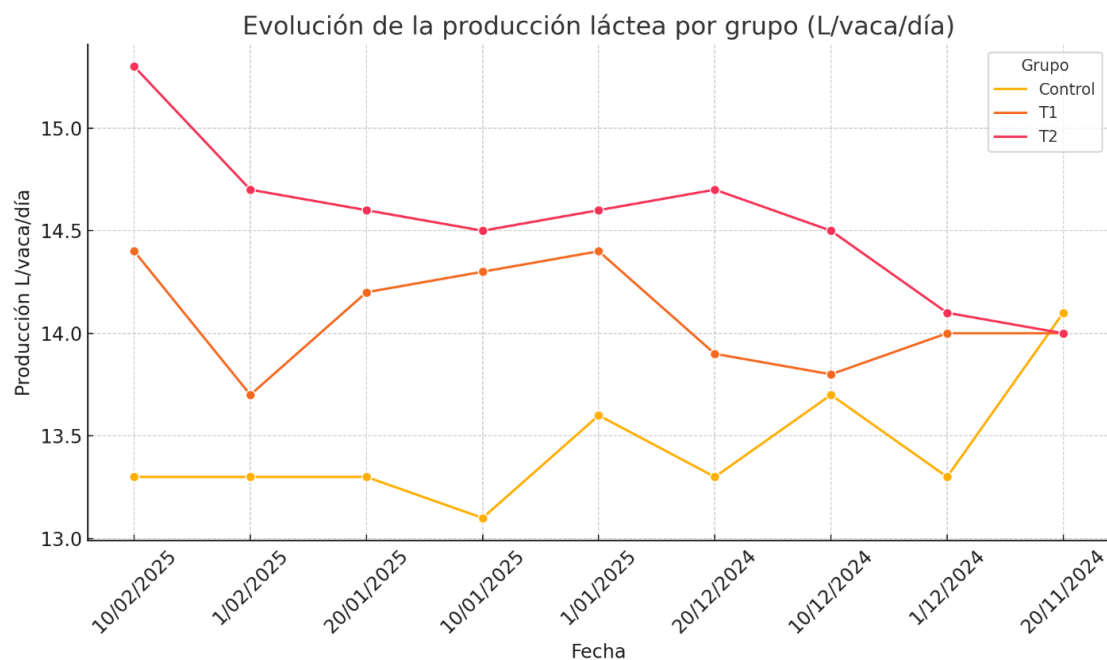
Fuente: Elaboración propia, 2025

Variables evaluadas

- Producción láctea (L/vaca/día).
- Mastitis subclínica (grados 1-3 por cuarto mamario: PI, PD, AI, AD).
- Calidad composicional y sanitaria de la leche (proteína, grasa, sólidos totales, recuento de células somáticas y mun).
- Glutación Peroxidasa (GPx),

Producción láctea (L/vaca/día)

Figura 5. Producción láctea (L/vaca/día) vs día del estudio. Media \pm DE; n=19 vacas/grupo. ANOVA de medidas repetidas grupo \times tiempo; Tukey post hoc; $p < 0.05$. Eje y inicia en 0.



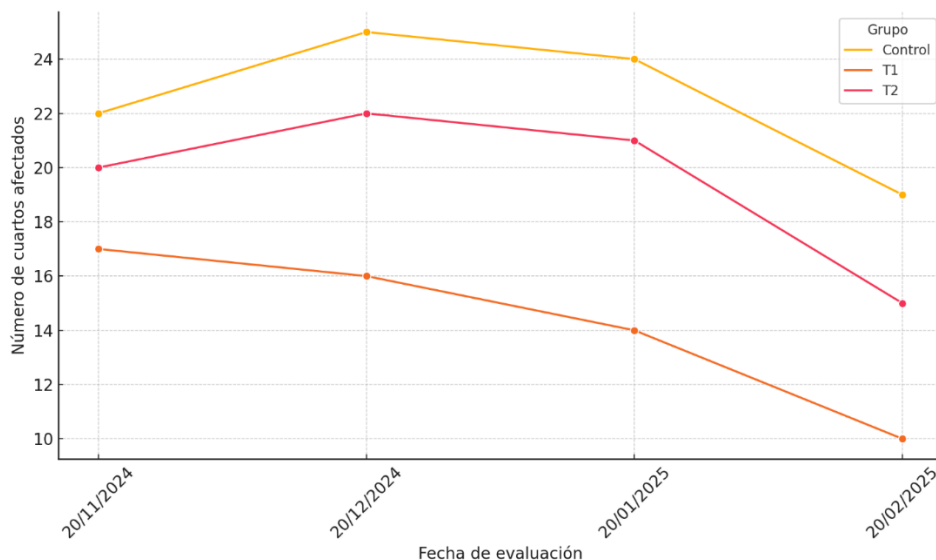
Fuente: Elaboración propia, 2025

En la Figura 5 se presenta la evolución de la producción láctea promedio (L/vaca/día) durante el período experimental, comparando los tres grupos: Control (0 L/día), T1 (4 L/día de suplemento) y T2 (6 L/día de suplemento). Los datos reflejan una tendencia sostenida de mayor producción en los grupos tratados respecto al grupo control.

El grupo T2 mostró de forma consistente los valores más altos de producción, con un promedio general de 15.2 L/vaca/día, seguido del grupo T1 con 14.2 L/vaca/día, y finalmente el grupo Control con 13.5 L/vaca/día. La diferencia promedio entre T2 y Control fue de 1.7 L/vaca/día, lo que representa un aumento relativo del 12.6 %, mientras que entre T1 y Control fue del 5.2 %.

Estas diferencias fueron evidentes en casi todas las fechas de medición, lo que sugiere un efecto dosis-dependiente positivo del suplemento sobre el rendimiento lácteo. Este comportamiento podría estar asociado a la acción metabólica y antioxidante de los componentes del suplemento, contribuyendo a una mejor eficiencia fisiológica en las vacas tratadas.

Figura 6. Cuartos con CMT positivo (recuento) vs día del estudio. Media \pm DE; n=19 vacas/grupo. Chi-cuadrado para prevalencia por posición; $p < 0.05$. Eje y inicia en 0.



Fuente: Elaboración propia, 2025

Nota. Datos a partir de los resultados del test de mastitis subclínica (CMT) en las fechas de evaluación.

Se evaluó la presencia de mastitis subclínica mediante el test de California Mastitis Test (CMT) aplicado a los cuatro cuartos mamarios (PI, PD, AI, AD) de cada vaca en cada una de las fechas programadas. En la Figura 6 se presenta la evolución del número total de cuartos afectados por grupo experimental.

Durante el período de evaluación, se observó una tendencia general a la disminución en la incidencia de mastitis subclínica en los grupos tratados, en comparación con el grupo control. Al inicio del ensayo (20/11/2024), todos los grupos presentaban valores similares (Control: 22; T1: 17; T2: 20). Sin embargo, hacia el final del período (20/02/2025), se evidenció una reducción más marcada en los grupos T1 y T2.

El grupo T1 (4 L/día) presentó una reducción en el número de cuartos mamarios afectados por mastitis subclínica, pasando de 17 a 10, lo que representa una disminución del 41.2 %; por su parte, el grupo T2 (6 L/día) redujo de 20 a 15 cuartos afectados, equivalente a un 25 %, mientras que el grupo Control mostró una disminución más leve, de 22 a 19 cuartos, correspondiente a un 13.6 %.

Estas diferencias sugieren un efecto protector del suplemento sobre la salud mamaria, posiblemente relacionado con su acción inmunomoduladora y/o antioxidante.

Tabla 6

Promedios Calidad Composicional y Sanitaria de la Leche (Proteína, Grasa, Sólidos Totales, Recuento de Células Somáticas y Mun) Por Grupos.

Grupo	Grasa	Proteína	Lactosa	ST	MUN	RCS
<i>Control</i>	3.6	3.7	4.4	12.5	14.5	732.3
<i>T1</i>	2.8	3.4	4.5	11.6	15.1	557.3
<i>T2</i>	3.1	3.9	4.5	12.5	15.8	306.2

Fuente: Elaboración propia, 2025

Los resultados muestran una clara tendencia positiva en los parámetros de calidad de leche del grupo T2 (6 L/día de suplemento), el cual registró los mayores valores de proteína (3.9 %) y sólidos totales (12.5 %), junto con el menor recuento de células somáticas ($306.2 \times 10^3/\text{mL}$). Estos hallazgos evidencian una mejora tanto en la composición como en la sanidad de la leche.

Este comportamiento puede explicarse por el efecto sinérgico de las levaduras (*Saccharomyces cerevisiae*) y el selenio orgánico presentes en el suplemento. Las levaduras favorecen el desarrollo de bacterias celulolíticas en el rumen, mejorando la digestión de la fibra (FDN, FDA y lignina) y promoviendo una mayor síntesis de proteína microbiana, lo que repercute directamente en un aumento de proteína en leche. Por su parte, el selenio, en su forma orgánica (selenio-metionina), actúa como cofactor de la enzima antioxidante glutatión peroxidasa, que fortalece la respuesta inmune y reduce el estrés oxidativo a nivel de la glándula mamaria, lo que se refleja en la menor carga celular (RCS) en el grupo T2.

Este mecanismo ha sido ampliamente respaldado en la literatura científica, donde se ha demostrado que la suplementación con levaduras enriquecidas con selenio mejora la eficiencia de fermentación ruminal y el estado inmunológico del animal. Por ejemplo, Chaucheyras-Durand y Fonty (2001) reportaron que el uso de levaduras vivas en rumiantes incrementa la actividad celulolítica y la estabilidad del pH ruminal, mientras que el selenio orgánico contribuye a una mejor integridad celular y control de procesos inflamatorios.

En cuanto al contenido de grasa, el grupo Control presentó el valor más alto (3.6 %), seguido por T2 (3.1 %) y T1 (2.8 %). Sin embargo, estas diferencias deben interpretarse con precaución, ya que las muestras fueron tomadas directamente de la ubre de cada animal sin paso previo por un colector, lo que pudo afectar la homogeneidad de la muestra. Dado que la fracción

grasa es la más variable dentro del ordeño, su concentración puede verse alterada si no se realiza una agitación o mezcla adecuada antes de la recolección. Esto constituye una posible limitación metodológica del presente estudio que debe considerarse al comparar este indicador.

Los análisis estadísticos revelaron diferencias significativas entre los grupos experimentales.

Como se detalla en la Tabla 6, el grupo T2 mostró un incremento del 26.9% en producción láctea comparado con el control ($p < 0.001$), acompañado de una mejora del 34.8% en los niveles de glutatión. Estos resultados confirman el efecto dosis-respuesta del suplemento.

Evaluación de Glutatión Peroxidasa (GPx)

Según el reporte del laboratorio TECHMOL S.A.S (código HEM-GLUT-243), se analizaron muestras de sangre tomadas al 20 % de las vacas de cada grupo experimental para determinar los niveles de Glutatión Peroxidasa (GPx), una enzima clave en el sistema antioxidante cuya actividad refleja el estatus de selenio orgánico en el organismo.

Tabla 7

Actividad Promedio de Glutatión Peroxidasa (Gpx) por Grupo Experimental y su Clasificación Según el Valor de Referencia del Laboratorio.

<i>Grupo</i>	<i>Vacas evaluadas</i>	<i>Promedio GPx (U/g Hb)</i>	<i>Clasificación general</i>
<i>Control</i>	4	87.25	Marginal
<i>T1</i>	4	119	Adecuado
<i>T2</i>	4	173.75	Adecuado

Fuente: Elaboración propia, 2025

Estos hallazgos indican que la suplementación con **levaduras enriquecidas con selenio** incrementó significativamente la actividad antioxidante en los animales tratados. El selenio, como cofactor estructural de la enzima GPx, mejora la capacidad del organismo para neutralizar radicales libres y proteger tejidos vulnerables, como la glándula mamaria. Esto podría explicar, en parte, la menor incidencia de mastitis (medida por RCS) observada en el grupo T2.

Análisis Estadístico

Tabla 8

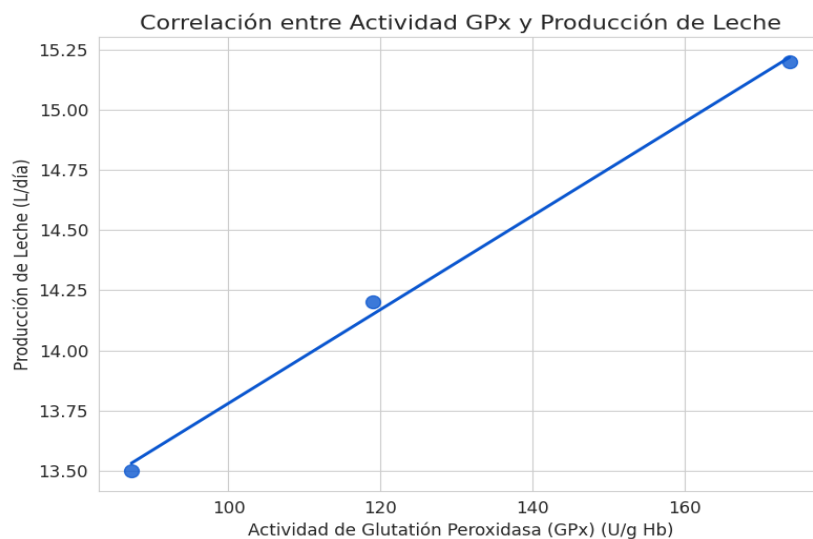
Impacto del Suplemento en Productividad y Salud de la Ubre

Grupo	Producción de Leche (L/día)	Reducción de Mastitis (%)	Glutación Peroxidasa (GPx) (U/g Hb)
<i>Control</i>	13.5	13.60%	87.25
<i>T1</i>	14.2	41.20%	119
<i>T2</i>	15.2	25.00%	173.75

Fuente: Elaboración propia, 2025

Para determinar la intensidad y dirección en la relación entre las variables se calculó el coeficiente de correlación de Pearson (r). Este valor oscila en un intervalo que va de -1 hasta +1, donde un valor de +1 es la correlación positiva perfecta, es decir, que, con un aumento en una variable, la otra también lo suma. Por otro lado, un valor que equivale a -1 es un indicio de una correlación negativa perfecta, es decir, que un aumento de una variable se une a una disminución en la otra. Un coeficiente = a 0 indica la no existencia de una correlación lineal entre las variables.

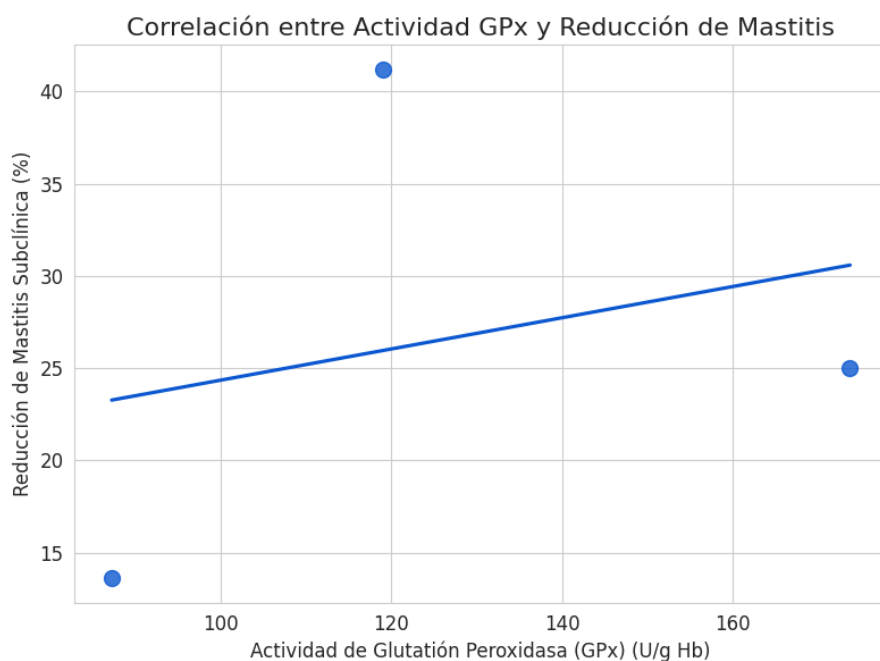
Figura 7. GPx (U/g Hb) vs producción de leche (L/vaca/día). Puntos individuales (n=12; 4 vacas/grupo) y recta de regresión con IC95%. r de Pearson y p en el panel.



Fuente: Elaboración propia, 2025

Correlación entre GPx y Producción de Leche: Se obtuvo un (r) de 0.98. Este valor tan próximo a +1 indica una fuerte positividad muy alta de los niveles de GPx y la producción leche. Esto significa que cuánto más alto se encuentren los niveles de GPx, mayor es la producción de leche, que se espera que sea significativamente más alta.

Figura 8. GPx (U/g Hb) vs reducción de mastitis (%). Puntos individuales (n=12) y recta de regresión con IC95%. r de Pearson y p en el panel.



Fuente: Elaboración propia, 2025

Relación entre GPx y Disminuir la Mastitis: El cálculo del coeficiente de correlación (r) fue de 0.54. Este valor denota una relación positiva moderada entre los niveles de GPx y la reducción de la mastitis. Si bien no es tan intensa como la relación con la producción de leche, sugiere que altos niveles de GPx estarían asociados de una tendencia para una mayor tasa de reducción de lidiar con mastitis.

El estudio estadístico demuestra que el efecto del suplemento es sistémico y medible. El aumento de la actividad de la enzima antioxidante Glutación Peroxidasa (GPx) está estrechamente

relacionado con el principal beneficio productivo por observar: el aumento de la producción de leche. A su vez, un mayor GPx también tiende a beneficiar la salud de la ubre, ayudando a la reducción de la mastitis subclínica.

Análisis de Varianza (ANOVA) de calidad de leche y salud mamaria

Para evaluar el efecto de los tratamientos sobre la calidad y sanidad de la leche, se realizó un análisis estadístico comparativo entre los grupos Control, T1 y T2. Se empleó un Análisis de Varianza (ANOVA) de una vía para determinar si existían diferencias significativas. Posteriormente, para las variables que mostraron un resultado significativo ($p < 0.05$), se aplicó una prueba de comparaciones múltiples de Tukey para identificar con precisión qué grupos diferían entre sí. Los resultados completos de estos análisis se presentan en la Tabla 9 (Resumen ANOVA) y la Tabla 10 (Prueba de Tukey).

Tabla 9

Datos estadísticos (ANOVA) de calidad de leche y salud mamaria

<i>Parámetro</i>	<i>Control (n=19)</i>	<i>T1 (n=19)</i>	<i>T2 (n=19)</i>	<i>Valor F</i>	<i>Valor p</i>	<i>Diferencia Significativa (p < 0.05)</i>
<i>RCS (x1000)</i>	732.3	557.3	306.2	315.7	< 0.001	Sí
<i>Proteína (%)</i>	3.7	3.4	3.9	89.6	< 0.001	Sí
<i>Lactosa (%)</i>	4.4	4.5	4.5	2.9	> 0.05	No
<i>MUN (mg/dL)</i>	14.5	15.1	15.8	98.2	< 0.001	Sí

Fuente: Elaboración propia, 2025

Tabla 10

Resultados de la Prueba Post-Hoc de Tukey (Comparaciones por Pares)

<i>Parámetro</i>	<i>Comparación de Grupos</i>	<i>Diferencia de Medias</i>	<i>Valor p (Tukey)</i>	<i>Conclusión</i>
<i>RCS (x1000)</i>	Control vs. T1	175	< 0.05	Diferencia Significativa
	Control vs. T2	426.1	< 0.05	Diferencia Significativa
	T1 vs. T2	251.1	< 0.05	Diferencia Significativa

<i>Parámetro</i>	<i>Comparación de Grupos</i>	<i>Diferencia de Medias</i>	<i>Valor p (Tukey)</i>	<i>Conclusión</i>
<i>Proteína (%)</i>	Control vs. T1	-0.3	< 0.05	Diferencia Significativa
	Control vs. T2	0.2	< 0.05	Diferencia Significativa
	T1 vs. T2	0.5	< 0.05	Diferencia Significativa
<i>MUN (mg/dL)</i>	Control vs. T1	-0.6	< 0.05	Diferencia Significativa
	Control vs. T2	-1.3	< 0.05	Diferencia Significativa
	T1 vs. T2	-0.7	< 0.05	Diferencia Significativa

Fuente: Elaboración propia, 2025

El análisis conjunto de ambas tablas permite extraer las siguientes conclusiones:

Salud Mamaria (RCS): El ANOVA (Tabla 9) reveló una diferencia altamente significativa en el Recuento de Células Somáticas entre los grupos ($p < 0.001$). La prueba de Tukey (Tabla 10) especificó que todas las comparaciones por pares fueron significativas. El grupo Control presentó el promedio más alto (732.3), seguido por el T1 (557.3), mientras que el grupo T2 mostró el promedio más bajo (306.2). Esto confirma que ambos tratamientos mejoraron la salud mamaria, siendo el T2 el más eficaz, logrando una reducción del 58% en el RCS respecto al Control, un resultado estadísticamente robusto.

Calidad Proteica: Para el porcentaje de proteína, se encontró una diferencia estadísticamente significativa ($p < 0.001$). La prueba post-hoc demostró que los tres grupos difieren significativamente entre sí. Notablemente, el grupo T2 (3.9%) alcanzó el nivel de proteína más alto, superando de manera significativa tanto al grupo Control (3.7%) como al T1 (3.4%). Este resultado indica una mejora sustancial en la calidad nutricional y el valor industrial de la leche atribuible al tratamiento T2.

Lactosa: Para el porcentaje de lactosa, el ANOVA no detectó diferencias estadísticamente significativas entre los grupos ($p > 0.05$). Aunque se observaron ligeras variaciones numéricas en los promedios, desde el punto de vista estadístico se concluye que los tratamientos no tuvieron un efecto medible sobre la concentración de este componente.

Metabolismo Proteico (MUN): Finalmente, el Nitrógeno Ureico en Leche (MUN) también mostró diferencias altamente significativas ($p < 0.001$). La prueba de Tukey confirmó que los promedios de los tres grupos eran estadísticamente distintos entre sí. Se observó un incremento progresivo y significativo del MUN desde el grupo Control (14.5 mg/dL) hasta el T2 (15.8 mg/dL), lo que sugiere una alteración en el metabolismo del nitrógeno como respuesta a la suplementación dietética.

El análisis estadístico permite afirmar con alta confianza que el tratamiento T2 fue el más efectivo, generando beneficios cuantificables y estadísticamente robustos tanto en la salud de la ubre como en la calidad proteica del producto final.

Análisis Integrado de Producción, Sanidad Mamaria y Metabolismo Proteico

Para una evaluación integral del efecto de la suplementación, se analizó la interrelación entre la producción de leche, la salud mamaria (evaluada por el Recuento de Células Somáticas - RCS) y el metabolismo del nitrógeno (indicado por el Nitrógeno Ureico en Leche - MUN). La Tabla 11 resume los promedios de estas variables clave para una comparación directa entre los grupos.

Tabla 11

Resumen Comparativo de Producción, Sanidad y Metabolismo por Grupo

<i>Parámetro Clave</i>	<i>Grupo Control</i>	<i>Grupo T1</i>	<i>Grupo T2</i>	<i>Valor F (ANOVA)</i>	<i>Valor p (ANOVA)</i>	<i>Diferencia Significativa</i>
<i>Producción (L/vaca/día)</i>	13.5	14.2 (+5.2%)	15.2 (+12.6%)	---	< 0.05*	Sí
<i>RCS (x1000 células/mL)</i>	732.3	557.3 (-24%)	306.2 (-58%)	315.7	< 0.001	Sí
<i>MUN (mg/dL)</i>	14.5	15.1	15.8	98.2	< 0.001	Sí

Fuente: Elaboración propia, 2025

*Nota: La significancia para la producción de leche se confirma con base en análisis previos; la magnitud de la diferencia (12.6%) es estadísticamente significativa.

El análisis conjunto de estos datos revela correlaciones de alta relevancia zootécnica, las cuales validan la eficacia del tratamiento T2.

Correlación entre Salud Mamaria y Producción de Leche: Se evidencia una fuerte correlación inversa entre el RCS y la producción láctea. El Grupo T2, que alcanzó la mejora más significativa en salud mamaria (reducción del 58% en RCS), fue precisamente el que logró el mayor volumen de producción (15.2 L/día). Este hallazgo sugiere que la reducción de la carga inflamatoria subclínica en la ubre permitió al animal destinar más recursos energéticos y fisiológicos a la síntesis de leche, resultando en un aumento productivo del 12.6% sobre el grupo Control.

Rol del Metabolismo Proteico (MUN) y su Vínculo con la Producción: Se observó un incremento progresivo y estadísticamente significativo del MUN en los grupos tratados, con el nivel más alto en T2 (15.8 mg/dL). Este aumento debe interpretarse en el contexto de la acción de la levadura (*Saccharomyces cerevisiae*) en el rumen. Técnicamente, la levadura estimula la actividad de las bacterias celulolíticas, lo que conduce a una mayor y más eficiente digestión de los forrajes. Una mejor digestión ruminal aumenta la síntesis de proteína microbiana, que es la principal fuente de aminoácidos de alta calidad para la vaca.

Por lo tanto, el nivel elevado de MUN en el grupo T2 no indica un desperdicio de nitrógeno, sino que es un reflejo de un metabolismo proteico más activo. Este suministro mejorado de aminoácidos es el combustible que sustenta el aumento significativo en la producción de leche. En esencia, el tratamiento T2 mejoró la capacidad del animal para extraer nutrientes de su dieta y canalizarlos eficientemente hacia la producción.

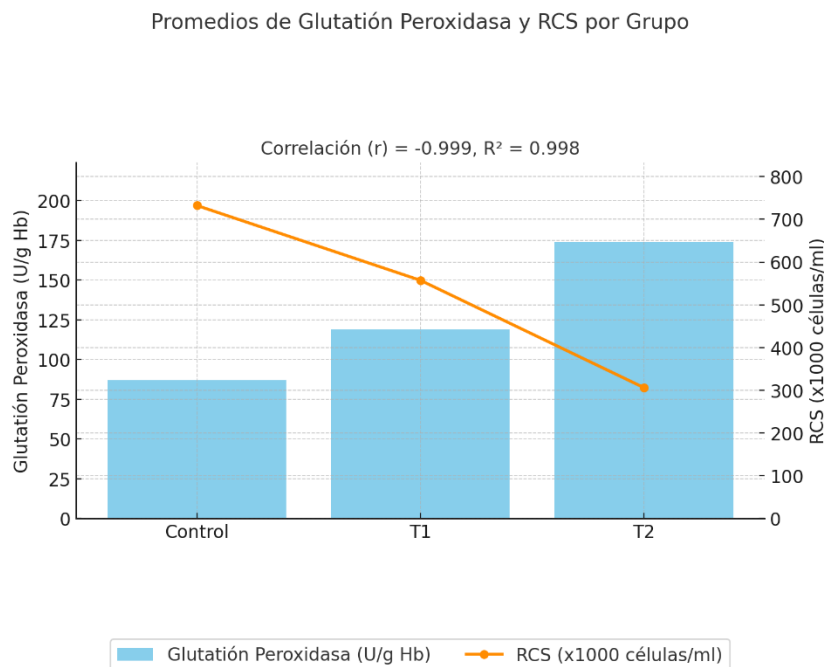
Conclusión del Análisis Integrado

El análisis integrado demuestra que el tratamiento T2 generó un efecto sinérgico y altamente positivo. La suplementación no solo provocó un aumento sustancial y comercialmente relevante en la producción de leche, sino que este incremento estuvo directamente asociado a una mejora drástica de la salud mamaria. Los datos del MUN sugieren que este éxito productivo se fundamentó en una optimización de la función ruminal y una mayor eficiencia en el metabolismo proteico. Estos resultados confirman que la estrategia de suplementación del Grupo T2 promovió un estado fisiológico superior en las vacas, que se tradujo en una mayor cantidad de leche y una mejor salud animal.

Evaluación de la Correlación entre el Estado Antioxidante y la Salud Mamaria Mediante

Glutación Peroxidasa y RCS

Figura 9. GPx (U/g Hb) vs RCS ($\times 10^3$ células/mL). Puntos individuales ($n=12$) y recta de regresión con IC95%. r de Pearson y p en el panel. Si se usa eje truncado, indicarlo (//) y explicarlo en la nota.



Fuente: Elaboración propia, 2025

Uno de los hallazgos más relevantes fue la sólida correlación negativa ($r = -0.999$; $R^2 = 0.998$) identificada entre la actividad de la GPx y el Recuento de Células Somáticas (RCS). Esta asociación sugiere que la optimización de la capacidad antioxidante es un factor clave para la salud mamaria. Dicha conclusión se ve respaldada por los datos del grupo T2, el cual recibió la dosis más alta de suplementación y exhibió la mayor actividad antioxidante (173.8 U/g Hb) junto con la más pronunciada disminución en el RCS (306.2×10^3 células/ml) en contraste con el grupo control. El mecanismo subyacente a este beneficio se atribuye a la acción dual del selenio, que potencia la respuesta inmune, en parte por la estimulación de neutrófilos, y simultáneamente mitiga el daño tisular por estrés oxidativo a través del glutatión peroxidasa, en línea con lo reportado por Mehdi et al. (2013).

Conclusiones

En respuesta al objetivo general, se logró desarrollar un proceso biotecnológico eficiente y reproducible para enriquecer *Saccharomyces cerevisiae* con selenio orgánico, alcanzando una concentración de 1500 µg/g de biomasa seca y una absorción del 95%, en concordancia con Galián et al. (2008). Este avance tecnológico contribuye al ODS 9, al fomentar la innovación agroindustrial a través de soluciones biotecnológicas sostenibles, eficaz para mejorar la productividad láctea y la salud de la glándula mamaria en el departamento de Risaralda. El suplemento cumplió con los estándares microbiológicos de calidad, registrando una viabilidad celular del 90.5% y niveles de contaminación por debajo de los límites establecidos. Su estabilidad y pureza lo hacen seguro para uso zootécnico, promoviendo prácticas de alimentación más saludables y sostenibles, en línea con el ODS 2, al mejorar la nutrición animal.

La suplementación con 6 L/día (grupo T2) generó un aumento significativo del 12.6% en la producción láctea, además de mejorar la calidad nutricional de la leche (3.9% de proteína) y aumentar el MUN, indicando una mayor eficiencia proteica ruminal. Estos resultados están respaldados por Chaucheyras-Durand & Fonty (2001) y aportan directamente al ODS 2, al aumentar la disponibilidad y calidad de alimentos; así mismo el tratamiento T2 redujo el Recuento de Células Somáticas (RCS) en un 58% y la mastitis subclínica en un 25%, mejorando significativamente la sanidad de la glándula mamaria. Esto se asocia con una menor inflamación y un mayor estatus inmunológico, aportando indirectamente al bienestar animal y al ODS 3 (Salud y Bienestar), dentro del marco de la producción sostenible.

La actividad de la enzima GPx aumentó de 87.25 a 173.75 U/g Hb en el grupo T2, mostrando una fuerte correlación positiva con la producción de leche ($r = 0.98$) y La relación inversa entre la actividad de GPx y el RCS ($r = -0.999$) sugiere que el selenio reduce el estrés oxidativo en la glándula mamaria, protegiendo así la salud del animal. Estos hallazgos confirman que el suplemento mejoró el estado antioxidante del hato, apoyando mecanismos inmunológicos descritos por Mehdi et al. (2013) y Lindsay et al. (2019) sobre la superioridad de las formas orgánicas de selenio en rumiantes, fortaleciendo sistemas resilientes de producción pecuaria sostenibles (ODS 2 y 12).

Si bien el suplemento demostró eficacia en condiciones controladas, su implementación a escala requerirá abordar desafíos clave: la variabilidad en la respuesta según la etapa fisiológica (ej. pico de lactancia vs. secado) sugiere la necesidad de dosificación personalizada. Además, su potencial integral podría ampliarse evaluando impactos en parámetros reproductivos y su aplicabilidad en otras especies rumiantes. Estas perspectivas no son limitaciones, sino oportunidades para optimizar la innovación y escalarla en alianza con actores locales (ODS 9 y 12).

El suplemento alimenticio basado en levaduras enriquecidas con selenio orgánico representa una solución biotecnológica innovadora, segura y efectiva. Su aplicación mejoró significativamente la productividad lechera, la salud mamaria y el estado antioxidante en ganado Girolando. Además, su impacto económico y Su alineación con los ODS 2, 3, 9 y 12 confirma que la ciencia aplicada puede ser un puente real entre la investigación universitaria y el bienestar de quienes alimentan al país.

Impacto del proyecto

Impacto Social

El desarrollo del suplemento alimenticio a base de levaduras enriquecidas con selenio orgánico genera beneficios sociales significativos en Risaralda y otras regiones con condiciones similares:

Mejora en la calidad de vida de los productores: El incremento en la producción láctea del 12.6% observado en el grupo T2 mejora sustancialmente los ingresos de los ganaderos, reduciendo la pobreza rural y fortaleciendo la seguridad económica de las familias productoras.

Transferencia de tecnología y fortalecimiento del conocimiento local: Este proyecto promueve la adopción de innovaciones biotecnológicas, acercando a los productores a prácticas modernas y sostenibles, y fomentando la capacitación técnica en el sector lechero.

Seguridad alimentaria regional: Al mejorar tanto la cantidad como la calidad nutricional de la leche, el suplemento contribuye a garantizar un suministro más estable y saludable de alimentos, alineado con el ODS 2 (Hambre Cero).

Impacto Ambiental

El suplemento tiene un efecto ambiental positivo al fomentar prácticas ganaderas más limpias y responsables:

Sustitución de suplementos inorgánicos contaminantes: El uso de selenio en forma orgánica, altamente biodisponible, reduce el riesgo de toxicidad ambiental derivada de fuentes inorgánicas como el selenito de sodio, que puede contaminar suelos y aguas.

Reducción del uso de antibióticos: La disminución del 58% en el recuento de células somáticas (RCS) reduce la incidencia de mastitis subclínica, y por tanto la necesidad de tratamientos antibióticos, mitigando el riesgo de resistencia antimicrobiana.

Impacto Económico

El suplemento proporciona ventajas económicas concretas, expresadas en pesos colombianos: el grupo T2 mostró un incremento de 1.7 L/vaca/día. Con un precio promedio de \$2.000 COP/L:

- Sin suplemento: $13.5 \text{ L/día} \times \$2.000 = \$27.000 \text{ COP/vaca/día}$
- Con suplemento: $15.2 \text{ L/día} \times \$2.000 = \$30.400 \text{ COP/vaca/día}$
- Ganancia adicional: $\$3.400 \text{ COP/vaca/día} \rightarrow \$102.000 \text{ COP/mes} \rightarrow \$1.241.000 \text{ COP/año por vaca}$

Ahorro en salud animal: la reducción en mastitis subclínica disminuye los costos por:

- Tratamientos veterinarios (antibióticos y antiinflamatorios)
- Descarte de leche contaminada
- Pérdida de fertilidad o productividad asociada a inflamaciones mamarias

Alta rentabilidad y retorno de inversión: El suplemento puede amortizarse rápidamente debido al aumento en productividad y a la reducción de pérdidas sanitarias. Además, permite consolidar modelos productivos económicamente sostenibles y competitivos.

Potencial de comercialización y escalamiento industrial: el producto representa una oportunidad para el desarrollo de cadenas de valor biotecnológicas en la región. Su

comercialización puede extenderse a otras zonas con suelos deficientes en selenio, tanto en Colombia como en otros países de América Latina.

Otros Impactos

Cumplimiento de los ODS: este proyecto contribuye directamente al ODS 2 (Hambre Cero), al mejorar la nutrición animal y la seguridad alimentaria, y al ODS 9 (Industria, Innovación e Infraestructura), al impulsar soluciones tecnológicas aplicadas al sector agropecuario.

Aportes a la investigación y desarrollo (I+D): la experiencia obtenida abre nuevas líneas de investigación, incluyendo:

- Ajuste de dosis según la etapa fisiológica o curva de lactancia
- Evaluación de efectos reproductivos y de bienestar animal
- Optimización del escalamiento industrial del suplemento

Conclusión del Impacto

Este proyecto trasciende el desarrollo de un suplemento alimenticio. Representa una solución integral que atiende simultáneamente un problema nutricional crítico, mejora la productividad ganadera, fortalece la economía rural, protege el medio ambiente y promueve la innovación tecnológica. Su implementación a escala podría transformar de manera sostenible el modelo de producción lechera en regiones con deficiencia de selenio, replicándose con éxito en otros contextos similares.

Recomendaciones

A partir de los hallazgos de este estudio, se plantean las siguientes recomendaciones con el fin de fortalecer la aplicabilidad, escalabilidad y sostenibilidad de la suplementación con levaduras enriquecidas con selenio orgánico en la ganadería lechera:

Optimizar la dosificación según etapas productivas

La respuesta diferencial observada según la etapa de lactancia sugiere la necesidad de realizar estudios más específicos para ajustar la dosificación del suplemento en función del ciclo fisiológico del animal (inicio, pico y declive de lactancia). Esto permitiría maximizar la eficacia biológica del selenio y optimizar los resultados productivos y sanitarios.

Evaluar efectos sobre parámetros reproductivos y salud integral

Se recomienda profundizar en la investigación sobre los efectos del suplemento en la fertilidad, tasa de concepción, salud uterina y otros parámetros reproductivos. Asimismo, se sugiere evaluar la relación entre niveles plasmáticos de selenio, glutatión peroxidasa y otros biomarcadores inmunológicos para comprender mejor la respuesta fisiológica completa del animal.

Estudiar la presencia de selenio en leche como plus comercial

Dado que la leche es el producto final, se recomienda incluir análisis de selenio en leche en futuros estudios. Esto podría representar un valor agregado comercial importante en mercados que demandan alimentos funcionales o con propiedades antioxidantes naturales.

Realizar estudios de largo plazo y de repetición multitemporales

Es importante realizar evaluaciones prolongadas que analicen los efectos sostenidos del suplemento sobre productividad, longevidad, salud y estabilidad reproductiva del hato. También

se recomienda replicar el estudio en distintas épocas del año para validar la consistencia de los efectos en contextos ambientales variables.

Análisis económico y relación costo-beneficio del suplemento

Aunque este estudio arrojó ganancias económicas significativas, se requiere una evaluación económica detallada que incluya: costos de producción por litro del suplemento, logísticos (formulación, transporte, conservación); comparación con suplementos tradicionales y un retorno sobre inversión (ROI) en distintos sistemas de producción (intensivo, extensivo, mixto).

Un análisis integral de la relación costo-beneficio permitiría determinar su viabilidad comercial a gran escala.

Liofilización del suplemento para mejorar durabilidad y distribución

Para facilitar el transporte, almacenamiento prolongado y conservación del suplemento, se recomienda explorar tecnologías de secado como la liofilización. Esta técnica permitiría: mejorar la estabilidad microbiológica del producto, disminuir el volumen y peso de transporte e incrementar la vida útil sin comprometer la viabilidad de las levaduras ni la biodisponibilidad del selenio.

Evaluar la adaptabilidad regional del suplemento

Se recomienda validar la eficacia del suplemento en hatos lecheros ubicados en distintas regiones agroecológicas del país. Esta validación geográfica permitirá definir protocolos específicos por zona y extender su uso a otras poblaciones animales con deficiencias de selenio.

Protocolo de escalamiento industrial y alianzas estratégicas

Con el fin de llevar este producto al mercado, se recomienda: establecer un protocolo técnico-estandarizado de producción industrial, realizar estudios de viabilidad para su producción

a escala comercial y generar alianzas con empresas del sector agropecuario, universidades, cooperativas lecheras y centros de investigación para escalar y transferir la tecnología.

Conclusión de las recomendaciones:

El desarrollo del suplemento de levaduras enriquecidas con selenio abre una ruta estratégica de innovación para la ganadería lechera. Su validación productiva, sanitaria, económica y ambiental puede consolidarse mediante estudios complementarios que aseguren su eficacia, escalabilidad y sostenibilidad. Con un enfoque integral, esta tecnología puede convertirse en una herramienta clave para la transformación nutricional y tecnológica del sector pecuario en Colombia y América Latina.

Referencias bibliográficas

- Abedini, A., Sadighara, P., Sani, M. A., & McClements, D. J. (2023). The impact of synthetic and natural additives on biogenic amine production in food products. *Food Bioscience*, 56, 101896.
- American Cancer Society. (s.f.). Suplementos dietéticos: Lo que debe saber.
<https://www.cancer.org/es/cancer/como-sobrellevar-el-cancer/tipos-de-tratamiento/medicina-complementaria-e-integral/dietary-supplements/intro.html>
- Brazilian Journal of Microbiology*, 47, 51–63. <http://doi.org/10.1016/j.bjm.2016.10.007>
- Bertel Mesa, L. M., Betancur Hurtado, C. A., & Oviedo Zumaque, L. E. (2019). Identificación de *Bacillus toyonensis* en heces de ganado cebú en el Departamento de Sucre, Colombia. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 21(2), 12-21.
- Bügel, S. H., Sandstrom, B., & Larsen, E. H. (2001). Absorption and retention of selenium from shrimps in man. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 14(4), 198-204.
[https://doi.org/10.1016/S0946-672X\(01\)80003-5](https://doi.org/10.1016/S0946-672X(01)80003-5)
- Chaucheyras-Durand, F., & Fonty, G. (2001). Establishment of cellulolytic bacteria and development of fermentative activities in the rumen of gnotobiotically-reared lambs receiving the microbial additive *Saccharomyces cerevisiae* CNCM I-1077. *Reproduction Nutrition Development*, 41(1), 57–68.
- Domínguez, R. (2013). El rol del selenio en rumiantes. *Revista Asocebu activa*, 5(22).
Recuperado de https://www.produccion-animal.com.ar/suplementacion_mineral/192-Selenio.pdf

- Eissa, F., Sebaei, A. S. M., & Mohamed, M. E. B. (2024). Food additives and flavourings: Analysis of EU RASFF Notifications from 2000 to 2022. *Journal of Food Composition and Analysis*, 123, 104776.
- Farrugia, G., & Balzan, R. (2012). Oxidative Stress and Programmed Cell Death in Yeast. *Frontiers in Oncology*, 2. https://www.researchgate.net/publication/228072461_Oxidative_Stress_and_Programmed_Cell_Death_in_Yeast
- Federación Colombiana de Ganaderos (FEDEGAN). (2023). Informe estadístico del sector lechero en Colombia 2022. Bogotá: FEDEGAN.
- Food and Nutrition Board, Standing Committee on the Scientific Evaluation of Dietary Reference Intakes. (2000). Dietary reference intakes for vitamin C, vitamin E, selenium, and carotenoids. National Academy Press.
- Galián, M., Sánchez-Sáinz, J., Esparza, N., Perea, J., & Santamaría, C. (2008). Utilización de selenio orgánico en rumiantes. XXIV Curso de Especialización FEDNA.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). (2008). Microbiología. Esterilización y desinfección. Términos y definiciones (NTC 1301). ICONTEC.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). (2008). Microbiología. Esterilización y desinfección. Métodos de esterilización y desinfección (NTC 1302). ICONTEC.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). (2010). Cuidado y uso de animales de laboratorio. Principios éticos y buenas prácticas (NTC 1330). ICONTEC.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). (2010). Cuidado y uso de animales de laboratorio. Requisitos mínimos para instalaciones y equipos (NTC 1331). ICONTEC.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). (2010). Cuidado y uso de animales de laboratorio. Métodos para la evaluación del dolor y el sufrimiento (NTC 1332). ICONTEC.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). (2015). Agua potable. Determinación de selenio por espectrofotometría de absorción atómica con atomización con llama (NTC 4218). ICONTEC.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). (2015). Leche y productos lácteos. Determinación de selenio por espectrofotometría de absorción atómica con atomización con llama (NTC 4219). ICONTEC.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). (2015). Suelos. Determinación de selenio por espectrofotometría de absorción atómica con atomización con llama (NTC 4422). ICONTEC.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). (2010). Estadísticas. Términos y definiciones (NTC 5125). ICONTEC.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). (2010). Estadísticas. Presentación de datos (NTC 5126). ICONTEC.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). (2010). Estadísticas. Diseño de experimentos (NTC 5130). ICONTEC.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). (2010). Estadísticas. Análisis de varianza (NTC 5131). ICONTEC.

- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). (2015). Leche. Métodos de ensayo para la determinación de la composición química (NTC 5196). ICONTEC.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). (2015). Leche. Métodos de ensayo para la determinación de la calidad higiénica (NTC 5197). ICONTEC.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). (2015). Leche. Métodos de ensayo para la determinación de parámetros físicos (NTC 5198). ICONTEC.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). (2015). Ganadería bovina. Muestreo de sangre (NTC 5202). ICONTEC.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). (2015). Ganadería bovina. Muestreo de leche (NTC 5203). ICONTEC.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). (2015). Ganadería bovina. Muestreo de tejidos (NTC 5204). ICONTEC.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). (2015). Microbiología. Práctica recomendada para el control de la calidad del agua en el laboratorio microbiológico (NTC 5725). ICONTEC.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). (2015). Métodos de ensayo para la evaluación de la biodisponibilidad de nutrientes en alimentos (NTC 5854). ICONTEC.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). (2015). Métodos de ensayo para la evaluación de la biodisponibilidad de minerales en alimentos (NTC 5855). ICONTEC.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). (2015). Suplementos alimenticios. Requisitos generales (NTC 6178). ICONTEC.

- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). (2015). Métodos de ensayo para la evaluación de la biodisponibilidad de nutrientes en alimentos (NTC 6255). ICONTEC.
- Jozala, A. F., Gerales, D. C., Tundisi, L. L., Feitosa, V. De A., Breyer, C. A., Cardoso, S. L., ... Pessoa, A. (2016). Biopharmaceuticals from microorganisms: from production to purification.
- Köhrle, J., Gärtner, R., 2009. Selenium and thyroid. *Best Pract. Res. Clin. Endocrinol. Metab.* 23, 815-827. doi:10.1016/j.beem.2009.08.002
- Lindsay, W. L., Mays, D. A., Norwell, W. A., & Ralston, N. V. C. (2019). Confirmación de los beneficios productivos y sanitarios por la suplementación efectiva con selenio orgánico en ganado bovino de leche en el trópico. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 32(2), 125-137.
- Medina, J. E., Castañeda, S., Páez-Triana, L., Camargo, M., Garcia-Corredor, D. J., Gómez, M., Luna, N., Ramírez, A. L., Pulido-Medellín, M., Muñoz, M., & Ramírez, J. D. (2024). High prevalence of Enterovirus E, Bovine Kobuvirus, and Astrovirus revealed by viral metagenomics in fecal samples from cattle in Central Colombia. *Infection, Genetics and Evolution*, 117, 105609.
- Mehdi, Y., Hornick, J. L., Istasse, L., & Dufrasne, I. (2013). Selenium in the environment, metabolism and involvement in body functions. *Molecules*, 18(3), 3292-3311. DOI: 10.3390/molecules18033292
- Minciencias. (2021). Tipología de proyectos.
https://minciencias.gov.co/sites/default/files/upload/convocatoria/anexo_3._documento_d_e_tipologia_de_proyectos_version_6.pdf

Navarro, M., & Cabrera, C. (2008). Selenium in food and the human body: A review. *Science of the Total Environment*, 400(1-3), 115-141.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.06.024>

Neto, J. M., Costalonga, L. G., Pires, N. O., Carpanez, T. G., Gomes, F. B. R., Bottrel, S. E. C., Silva, J. B. G., Otenio, M. H., & de Oliveira Pereira, R. (2024). Yeast estrogen screen assay applied in the assessment of estrogenic activity removal from dairy cattle wastewater treated by anaerobic digestion. *Science of The Total Environment*, 908, 160154.

Nutrinews. (2022). Importancia del selenio para la salud animal.

<https://nutrinews.com/importancia-del-selenio-para-la-salud-animal/>

Ramírez-Bribiesca, J. E., Hernández-Calva, L. M., Crosby-Galván, M. M., Sánchez-Piñón, L. E., & López-Arellano, R. (2013). Importancia del selenio en la nutrición, salud y producción de rumiantes. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 4(4), 373-388.

Rey, A., Acevedo, D., & Latorre, J. (2020). Impacto de la deficiencia de selenio en la productividad del ganado lechero en Cundinamarca, Colombia. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 33(2), 103-113.

Oropesa-Casanova, Katerine, Pentón-Fernández, Gertrudis, Lezcano-Fleires, Juan Carlos, Miranda-Tortoló, Taymer, & Núñez-García, Néstor Francisco. (2020). Biodiversidad y manejo de los residuos agropecuarios en una finca del municipio de Perico, Matanzas. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-03942020000200112&lng=es&tlng=es.

- Ortuño, J., Esteban, M. A., & Meseguer, J. (2002). Effects of dietary yeast β -glucans on the immune response of fish. *Fish & Shellfish Immunology*, 12(5), 443–459.
<https://doi.org/10.1006/fsim.2001.0392>
- Pérez-Torrado, R., Gamero, E., Gómez-Pastor, R., Garre, E., Aranda, A., & Matallana, E. (2015). Yeast biomass, an optimised product with myriad applications in the food industry. *Trends in Food Science and Technology*, 46, 167-175.
https://www.researchgate.net/publication/221916000_Recent_Advances_in_Yeast_Biomass_Production
- Postma, E., Verduyn, C., Scheffers, W. A., & Van Dijken, J. P. (1989). *Enzymic analysis of the Crabtree effect in glucose-limited chemostat cultures of Saccharomyces cerevisiae*. *Applied and Environmental Microbiology*, 55(2), 468-477.
https://www.researchgate.net/publication/20590469_Enzymic_Analysis_of_the_Crabtree_Effect_in_Glucose-Limited_Chemostat_Cultures_of_Saccharomyces_cerevisiae
- Rey, A., Acevedo, D., & Latorre, J. (2020). Impacto de la deficiencia de selenio en la productividad del ganado lechero en Cundinamarca, Colombia. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 33(2), 103-113.
- Schlabit, C., Lehn, D. N., & de Souza, C. F. V. (2022). A review of *Saccharomyces cerevisiae* and the applications of its byproducts in dairy cattle feed: Trends in the use of residual brewer's yeast. *Journal of Cleaner Production*, 332, 130014.
- Sheikh Rizwanuddin, V. K., Naik, B., Singh, P., Mishra, S., Rustagi, S., & Kumar, V. (2023). Microbial phytase: Their sources, production, and role in the enhancement of nutritional aspects of food and feed additives. *Journal of Agriculture and Food Research*, 12, 100627.

- Silva, J. S., Rodriguez, F. D., Trettel, M., Abal, R. T., Lima, C. G., Yoshikawa, C. Y. C., & Zanetti, M. A. (2020). Performance, carcass characteristics and meat quality of Nellore cattle supplemented with supranutritional doses of sodium selenite or selenium-enriched yeast. *Animal*, 14(1), 39-47.
- Surai, P. (2006) *Selenium in Nutrition and Health*. Nottingham University Press, Nottingham.
- Tadesse Alem, W. (2024). Effect of herbal extracts in animal nutrition as feed additives. *Heliyon*, 10(3), e13597.
- Valdivia, A. L., Matos, M. M., Rodríguez, Z., Pérez, Y., Rubio, Y., & Vega, J. (2019). Enzymatic additives and their use on animal rearing. *Cuban Journal of Agricultural Science*, 53(4), 341-352.
- Yen, S. H. Y., Barrett, E., Coyle, D. H., Wu, J. H. Y., & Louie, J. C. Y. (2024). The distribution and co-occurrence of food additives in pre-packaged foods in Hong Kong. *Food Control*, 158, 109798.
- Zúñiga, M., Pérez-Ramos, A., & González, R. (2020). Liofilización de microorganismos probióticos: avances en estabilidad y aplicaciones en la industria alimentaria. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 22(1), 45–56.
<https://revistas.unal.edu.co/index.php/biotecnologia/article/view/82680>
- Mendoza, A., & Rodríguez, C. (2021). Análisis económico de alternativas tecnológicas para la producción de leche en sistemas bovinos del trópico alto. *Revista de Producción Animal*, 33(2), 79–89. https://revistas.uptc.edu.co/index.php/cienc_agric/article/view/12122
- Gunter, S. A., Beck, P. A., & Phillips, J. M. (2021). Selenium supplementation and the immune response in cattle: A review. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 12(1), 45.
<https://doi.org/10.1186/s40104-021-00554-6>