

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA

**EVALUACIÓN DE EFICIENCIA ALIMENTICIA EN VAQUILLONAS DE
CARNE EN SISTEMAS SILVOPASTORILES**

por

Clara GIRIBALDI CARRIQUIRY

Martina VICINO ANTÚNEZ

**Trabajo final de grado
presentado como uno de los
requisitos para obtener el
título de Ingeniero Agrónomo**

**MONTEVIDEO
URUGUAY
2025**

Este Trabajo Final de Grado se distribuye bajo licencia
“Creative Commons Reconocimiento – No Comercial – Sin Obra Derivada”.



PÁGINA DE APROBACIÓN

Trabajo final de grado aprobado por:

Director/a:

Ing. Agr. (Dra.) Mariana Carriquiry

Tribunal:

Ing. Agr. (Dra.) Mariana Carriquiry

Ing. Agr. (Dra.) Ana Carolina Espasandin

Ing. Agr. (Dr.) Martín Claramunt

Fecha: 4 de diciembre de 2025

Estudiante:

Clara Giribaldi Carriquiry

Martina Vicino Antúnez

AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer a nuestras familia y amigos por el apoyo constante durante la carrera, especialmente a Antonia Díaz y Lucía Umpierrez con quienes compartimos esta importante etapa.

Agradecimiento especial a nuestra tutora Mariana Carriquiry por su compromiso y ayuda durante la elaboración de esta tesis y a Federica Marín que colaboró con su experiencia y conocimientos.

TABLA DE CONTENIDO

PÁGINA DE APROBACIÓN.....	2
AGRADECIMIENTOS.....	4
LISTA DE TABLAS Y FIGURAS	6
RESUMEN	7
ABSTRACT	8
1 INTRODUCCIÓN.....	9
2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	10
2.1 SISTEMAS SILVOPASTORILES	10
2.1.1 <i>Sistemas silvopastoriles en Uruguay</i>	10
2.1.2 <i>Componente arbóreo</i>	11
2.1.3 <i>Componente forrajero</i>	12
2.1.4 <i>Componente animal</i>	13
2.2 CONSUMO DE ENERGÍA Y EFICIENCIA EN EL USO DE LA ENERGÍA CONSUMIDA	15
2.3 HIPÓTESIS	17
3 MATERIALES Y MÉTODOS.....	18
3.1 LOCALIDAD Y PERÍODO EXPERIMENTAL.....	18
3.2 DISEÑO EXPERIMENTAL ANIMALES Y TRATAMIENTOS	18
3.3 MEDICIONES EXPERIMENTALES	19
3.4 CÁLCULOS Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	22
4 RESULTADOS	24
4.1 CONDICIONES CLIMÁTICAS.....	24
4.2 RESPUESTA PRODUCTIVA Y PARTICIÓN DE LA ENERGÍA.....	24
5 DISCUSIÓN.....	29
6 CONCLUSIONES.....	34
7 BIBLIOGRAFÍA.....	35
8 ANEXO	43

LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

Tabla 1 Resultados de composición química (% base seca) según tratamiento	21
Tabla 2 Variables productivas, consumo y eficiencia de conversión.....	26
Tabla 3 Pulso de O ₂ , partición de energía e indicadores de eficiencia de uso de la energía consumida.....	27
Figura 1 Diagrama de flujo de sistema silvopastoril	10
Figura 2 Esquema de partición de energía y las ineficiencias del sistema	16
Figura 3 Diseño espacial del experimento, establecimiento “Mi Capricho”, localidad Buena Vista, Cerro Largo, Uruguay.....	19
Figura 4 Secuencia temporal de las actividades experimentales	19
Figura 5 Representación esquemática de la secuencia de cálculos.	22
Figura 6 Condiciones climáticas durante el período experimental.....	24
Figura 7 Frecuencia cardíaca (lat/min) y producción de calor (kJ/kg PV ^{0,75}) a lo largo del día.	28
Figura 8 E-poster presentado en ALPA 2025.....	44

RESUMEN

En el contexto actual de cambio climático y creciente demanda de alimentos, se busca el desarrollo sostenible y eficiente de los sistemas agropecuarios. Los sistemas silvopastoriles (SSP) surgen como alternativa por sus beneficios ambientales, productivos y económicos. Con el fin de evaluar la incidencia de la ausencia o presencia de árboles en diferentes densidades sobre la partición de la energía consumida entre mantenimiento y producción, se cuantificaron variables de productividad (peso vivo, PV; ganancia media diaria, GMD; y espesor de grasa subcutánea), de consumo (materia seca, CMS; materia orgánica digestible, CMOD; y energía metabolizable, CEM) y uso de la energía consumida (energía retenida en tejidos, ER-tej; producción de calor, HP; ER-tej/CEM, ER-tej/HP; HP residual, RHP) en 36 vaquillonas de raza Brangus y cruzas (18 meses, 349 ± 12 kg de PV) asignadas al azar a un diseño de bloques completos con tres tratamientos: control sin árboles (CON), dos filas de árboles (2F) y cuatro filas de árboles (4F) con tres repeticiones (4 vacas/tratamiento/bloque). El arreglo espacial en ambos tratamientos con árboles (2F o 4F) consistió en $5 \times 5 + 20$ metros. El experimento tuvo una duración de 15 días en verano. La HP se determinó usando la técnica de tasa cardíaca (HR)-pulso de O₂, y la digestibilidad de MO del forraje a partir del N fecal de muestras de heces colectadas durante el período experimental. El CEM se estimó como la suma de HP + ER-tej y el CMS a partir del CEM y la concentración de EM del forraje. Los datos fueron analizados utilizando modelos mixtos y las medias se consideraron diferentes si $P < 0,05$. No se observaron diferencias entre tratamientos en la GMD (156 ± 5 g/d) ni en la ER-tej (243 ± 3 kJ/kg PV^{0,75}/d). La HR y el O₂P no difirieron entre tratamientos ($75 \pm 1,8$ lat/min y $0,279 \pm 0,013$ µLO₂/PV^{0,75}/latido), pero la HP promedio fue mayor en CON que 2F y 4F (668, 592 y 573 ± 34 kJ/kg PV^{0,75}, respectivamente). A su vez, la HR y la HP variaron con la hora del día, a la vez que existió una interacción tratamiento x hora significativa, mostrando mínimos durante la noche (21:00 - 5:00 h) y picos al inicio y final del día (6:00 - 9:00 h y 17:00 - 19:00 h), siendo más evidentes en las vaquillonas CON, donde también se observan valores mayores al mediodía (11:00 - 13:00 h). Los CMS, CMOD y CEM fueron mayores en las vaquillonas CON que en las 2F y 4F (9,2, 7,9 y $7,9 \pm 0,4$ kg/d; 4, 4,5 y $4,5 \pm 0,42$ kg/d y 72,6, 58,1 y $60,6 \pm 2,8$ MJ/d, para cada tratamiento respectivamente). Sin embargo, al expresarlos como %PV o PV^{0,75}, no se observaron diferencias en CMS entre tratamientos, aunque las vaquillonas CON presentaron un CMOD y CEM 16% mayor, reflejando la mayor digestibilidad de la MO del forraje en CON que 2F y 4F. A pesar de que no se detectaron diferencias en la conversión alimenticia entre tratamientos (20,4 g/kg MS), la eficiencia en uso de la EM consumida, medida como ER-tej/CEM y ER-tej/HP fueron menores mientras que la RHP fue mayor en CON que en 2F y 4F (RHP de 4,77, -2,69 y $-2,71 \pm 2,57$ MJ/d, respectivamente). Estos resultados sugieren un menor requerimiento energético de mantenimiento en los SSP, sin grandes diferencias entre los tratamientos de densidad de árboles. La mayor partición de la EM a producción en los SSP probablemente estuvo asociada a menores costos de actividad y termorregulación resultado de un microclima más favorable.

Palabras clave: silvopastoreo, ganadería, bioenergética

ABSTRACT

In the current context of climate change and increasing food demand, the development of sustainable and efficient livestock systems becomes essential. Silvopastoral systems (SPS) have emerged as an alternative due to their environmental, productive, and economic benefits. To evaluate the effect of the absence or presence of trees at different densities on the partitioning of consumed energy between maintenance and production, we quantified productivity variables (body weight, BW; average daily gain, ADG; and subcutaneous fat thickness), intake variables (dry matter intake, DMI; digestible organic matter, DOM; and metabolizable energy intake, MEI), and the use of consumed energy (energy retained in tissues, RE-tissue; heat production, HP; RE-tissue/MEI; RE-tissue/HP; residual heat production, RHP) in 36 Brangus and crossbred heifers (18 months, 349 ± 12 kg BW). Animals were randomly assigned to a randomized complete block design with three treatments: control without trees (CON), two tree rows (2R), and four tree rows (4R), with three replicates (4 heifers/treatment/block). The spatial arrangement in both tree treatments (2R, 4R) consisted of $5 \times 5 + 20$ meters. The experimental period lasted 15 days and took place over the summer. Heat production was determined using the heart rate (HR)-O₂ pulse technique, and forage OM digestibility was estimated from fecal N in samples collected during the trial. The MEI was estimated as HP + RE-tissue, and DMI was derived from MEI and forage ME concentration. Data were analyzed using mixed models, and means were considered different when P < 0.05. No differences were observed among treatments in ADG (156 ± 5 g/d) or RE-tissue (243 ± 3 kJ/kg BW^{0.75}/d). Heart rate and O₂ pulse did not differ among treatments (75 ± 1.8 beats/min and 0.279 ± 0.013 µL O₂/BW^{0.75}/beat), but average HP was higher in CON than in 2R and 4R (668, 592, and 573 ± 34 kJ/kg BW^{0.75}, respectively). Moreover, HR and HP varied over the day and there was a significant treatment x time interaction, showing minimum values at night (21:00–5:00 h) and peaks at the beginning and end of the day (6:00–9:00 h and 17:00–19:00 h). These patterns were more pronounced in CON heifers, which also showed higher midday values (11:00–13:00 h). The DMI, DOM intake, and MEI were higher in CON heifers compared with 2R and 4R (9.2, 7.9, and 7.9 ± 0.4 kg/d; 4.0, 4.5, and 4.5 ± 0.42 kg/d; and 72.6, 58.1, and 60.6 ± 2.8 MJ/d, respectively). However, when expressed as %BW or BW^{0.75}, no differences in DMI were detected, although CON heifers showed 16% greater DOM intake and MEI, reflecting the higher forage OM digestibility in CON compared with 2R and 4R. Despite no differences in feed conversion (20.4 g/kg DM), the efficiency of ME use, expressed as RE-tissue/MEI and RE-tissue/HP, was lower, while RHP was higher in CON than in 2R and 4R (RHP of 4.77, -2.69, and -2.71 ± 2.57 MJ/d, respectively). These results suggest lower maintenance energy requirements in SPS, with no major differences between tree-density treatments. The greater partitioning of ME toward production in SPS was likely associated with reduced activity and thermoregulation costs resulting from a more favorable microclimate.

Keywords: silvopastoral systems, livestock, bioenergetics

1 INTRODUCCIÓN

Los sistemas silvopastoriles (SSP), que integran árboles, pasturas y animales en un mismo espacio productivo, ofrecen una alternativa sostenible para la intensificación ganadera, especialmente en regiones con alta presión sobre los recursos naturales. En Uruguay, desde el 2002 en adelante, se ha registrado un aumento sostenido en los precios de la tierra (Oficina de Estadísticas Agropecuarias [DIEA], 2024), acompañado por un incremento en el área destinada a forestación y creciente demanda de productos forestales. En el período 2000-2023 se registró un aumento de 94% del área dedicada a la forestación (Dirección General Forestal, 2025), constituyendo un cambio estructural en el agro uruguayo en las últimas décadas y repercutiendo en la competencia por el uso de la tierra. Como consecuencia, las empresas forestales han comenzado a establecerse en tierras arrendadas, principalmente en establecimientos ganaderos, debido a la complementariedad entre ambos rubros y el peso estratégico del sector ganadero en el país. A nivel nacional, la ganadería es una actividad de gran importancia, ocupando 12.857.000 hectáreas, lo que representa aproximadamente un 73% de la superficie total del país. En 2024, la exportación de carne bovina representó el 23% del total de los productos exportados de origen agropecuario, generando ingresos por 2.110 millones de dólares, constituyéndose en el principal rubro exportador del sector agropecuario (DIEA, 2024).

Paralelamente en las últimas décadas, en el contexto de cambio climático, la mayoría de los países han orientado sus sistemas productivos hacia un desarrollo sostenible promoviendo el uso racional de los recursos naturales y un incremento de la eficiencia de producción. En este sentido, se ha demostrado que la incorporación de árboles en un sistema de producción ganadero contribuye a mitigar los impactos ambientales negativos, diversificar la producción e ingresos de las empresas y reducir el uso de insumos externos (Gallo, 2006). Asimismo, los sistemas ganaderos más eficientes, caracterizados por una mayor participación de la energía y de los nutrientes consumidos hacia producción de carne, presentan menores costos por kilo de carne producido. Esto, a su vez, implica un menor impacto ambiental, dado que los nutrientes que no se retienen como producto son excretados al medio ambiente (Capper & Cady, 2020).

Particularmente, uno de los principales factores que determinan el impacto de los SSP sobre la producción animal es el arreglo espacial y la densidad de los árboles. Estos parámetros influyen sobre la disponibilidad y calidad del forraje, el microclima del sistema y el comportamiento de los animales (Fedrigo et al., 2019). Sin embargo, la información nacional sobre el impacto de los SSP en general y del arreglo espacial de los árboles sobre el consumo, participación y eficiencia de utilización de la energía del componente animal es limitada o nula. Es así que, el objetivo general de este trabajo es evaluar la incorporación de árboles en bajas densidades sobre la respuesta productiva y eficiencia alimenticia de vaquillonas de carne en un sistema silvopastoril. Los objetivos específicos son: 1) estimar la producción total de calor (HP), la energía retenida en tejido (ER) y el consumo de energía metabolizable (CEM) en vaquillonas de carne en ausencia o presencia de árboles (SSP) en densidades diferentes y 2) evaluar las relaciones entre distintos índices de eficiencia alimenticia (conversión alimenticia, producción de calor residual) y su asociación con digestibilidad y comportamiento.

2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

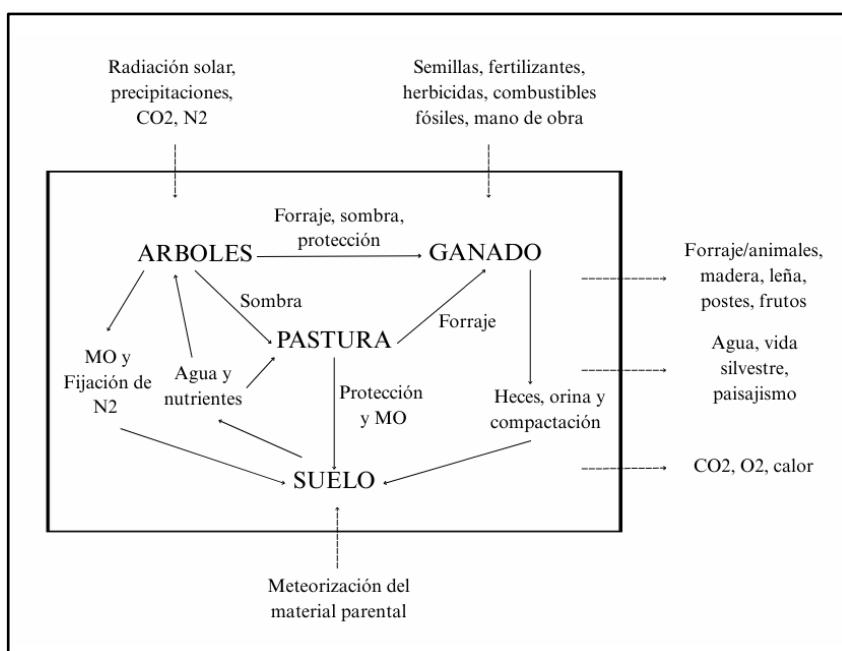
2.1 SISTEMAS SILVOPASTORILES

2.1.1 Sistemas silvopastoriles en Uruguay

Sancho et al. (2021) definen los SSP como la “integración deliberada y a largo plazo de árboles, ganado y pasturas, que interactúan en forma armónica, propendiendo a la sinergia de sus componentes, con el objetivo de maximizar la producción del sistema en forma sostenible” (p. 30). En este sentido, estos sistemas permiten diversificar el ingreso, preservar el ambiente y disminuir los impactos negativos del calentamiento global (ie. disminuir estrés térmico animal). Su implementación apunta a combinar la producción de madera con la producción de carne sobre el campo natural (CN).

Los SSP se clasifican como sistemas integrados, siendo estos dinámicos y con múltiples interacciones (Figura 1 Russo & Botero Botero, 2005). Como se esquematiza en la figura el ingreso de radiación solar y precipitaciones aportan al crecimiento de los árboles, cuya productividad puede incrementarse mediante el uso de insumos externos al igual que el resto de los componentes del sistema. A su vez, el estrato alto aporta protección a los animales reduciendo el estrés térmico y simultáneamente, contribuye al ciclaje de nutrientes del suelo. De este modo se promueve el desarrollo de la pastura, que es consumida por los animales, devolviendo nutrientes al suelo mediante sus deyecciones. Como resultado de estas interacciones se obtienen productos tales como carne y madera, además de servicios ecosistémicos asociados, entre los que se destacan la regulación microclimática, la captura de carbono y la conservación del recurso edáfico.

Figura 1
Diagrama de flujo de sistema silvopastoril



Nota: Adaptado de Russo y Botero Botero (2005).

La inclusión de árboles por parte de productores ganaderos a nivel nacional se ve impulsada en 1967, cuando se promulgó la Ley Forestal N.^o 15.939, fomentando a

numerosos productores ganaderos a incorporar la forestación en sus establecimientos con el objetivo de producir madera, de forma de mantener su actividad ganadera como rubro principal y, a su vez, aprovechar las oportunidades económicas del sector forestal (Bueno et al., 2017). La posterior evolución de los SSP en Uruguay está asociada a la creación de planes y/o políticas de integración foresto-ganaderos (Viñoles Gil et al., 2022). Los SSP en nuestro país ocupan un área efectiva de 6.392 ha, en un total de 39 predios. El 80% de la superficie ocupada por estos sistemas se encuentra en la región sur - sureste (Canelones, Lavalleja, Maldonado, Rocha, Treinta y Tres). El resto de la superficie se encuentra distribuida entre la región Centrosur (15%) y Norte (5%) (Sancho et al., 2021).

A nivel práctico, los diseños espaciales predominantes (87%) en sistemas forestales son los diseños de filas dobles o triples separadas por callejones, en su mayoría de entre 6 y 8 metros. En relación con las densidades de plantación, se observa que la mayoría de los casos supera los 900 árboles por hectárea (83%). Sin embargo, en las plantaciones de SSP más recientes, particularmente aquellas asociadas a productores que priorizan la función de la forestación como servicio para la actividad ganadera, se identifican configuraciones con callejones de mayor amplitud (entre 12 y 20 metros) y densidades arbóreas inferiores a 750 árboles por hectárea (Sancho et al., 2021). El género *Eucalyptus* representa la principal especie forestada en Uruguay, abarcando el 82 % de la superficie plantada, seguido por el *Pinus* con un 18 %. La preferencia por *Eucalyptus* se debe a su buena adaptación a las condiciones locales además de que existe mayor conocimiento sobre su manejo (Fedrigo et al., 2018). La base forrajera es principalmente CN y en algunos casos se ha incorporado mejoras con leguminosas. La carga animal en estos sistemas se caracteriza como conservadora, entre 0,6 - 0,9 UG/ha (Sancho et al., 2021).

2.1.2 Componente arbóreo

Los árboles son el componente dominante del sistema, por lo que los mismos tienen un impacto significativo en el mismo y determinan la mayoría de las interacciones. Dónde generalmente, el arreglo espacial, densidad y especie seleccionada van a definir el éxito del sistema. El arreglo espacial del componente arbóreo es clave en la productividad del SSP y cumple un rol fundamental al captar e integrar al sistema una mayor cantidad de radiación solar. De acuerdo con experiencias regionales, el arreglo más efectivo para la entrada de luz es por medio de callejones (Varella et al., 2016) y, según datos no publicados de Hernández et al. (s.f., como se cita en Viñoles Gil et al., 2022), la mayor radiación acumulada se presenta en filas con orientación N-S en comparación con filas con orientación E-O. A su vez, la radiación incidente depende de la estación del año, en un experimento realizado en el departamento de Cerro Largo (Uruguay) se comprobó que la orientación de las filas influye en la radiación incidente y acumulada en el sistema. En este sentido, durante el invierno el sol presenta una inclinación aparente hacia el norte permitiendo una mayor radiación directa en sistemas con orientación de filas N-S. En cambio, en orientaciones E-O, la mayor radiación acumulada se registra a fines de primavera y comienzos del verano. Si bien el movimiento solar es perpendicular a la orientación N-S, esta presenta menor variabilidad anual pero mayor variabilidad diaria en la recepción de la radiación. Esta disposición permite recibir luz directa todo el año, a diferencia de la orientación E-O en la que a veces la radiación puede ser interceptada de manera difusa y generando sombreado en la mayor parte del año (Sotelo et al., 2021).

Hernández et al. (2009) indican que los árboles además de cumplir una función estructural en los SSP contribuyen al reciclaje de nutrientes al extraerlos desde las capas

profundas del suelo y redistribuirlos hacia los estratos superficiales, reduciendo así las pérdidas por lixiviación. Asimismo, se incrementa la captación y el almacenamiento de carbono en el suelo, lo que representa una estrategia clave de mitigación frente al cambio climático. Este proceso también mejora la estructura y la composición química del suelo, favoreciendo la productividad vegetal a largo plazo. En este sentido, un experimento realizado en Colombia confirmó aumentos de carbono tanto en la biomasa como en suelo en SSP bajo condiciones de bosque seco tropical (Contreras-Santos et al., 2022). A nivel nacional, Echeverrigaray Quillet y Quintela Martínez (2024) reportaron un balance de carbono negativo (valores positivos del balance significan más emisiones de GEI de lo que está siendo fijado por los árboles) en un SSP de *Eucalyptus grandis* cuyo diseño de plantación fue de filas triples con callejones de aproximadamente 18 m, reforzando el potencial de estos sistemas como sumideros de carbono, los resultados arrojaron que se captura tres veces más carbono de lo liberado por el ganado dentro de la plantación.

En el sotobosque, definido por Real Academia Española (RAE, s.f.) como vegetación formada por matas y arbustos que crecen bajo los árboles, el aumento de la humedad y la disminución de la amplitud térmica tanto en el aire como en el suelo, generan un microclima más favorable para la permanencia del ganado. Durante el verano, la disminución de la temperatura representa una ventaja para el crecimiento de forrajeras invernales, ya que las temperaturas extremas pueden inhibir procesos fisiológicos esenciales como la fotosíntesis y la síntesis de citocininas, hormona que estimula la formación de hojas y macollos, y retraza la senescencia (Wang et al., 2003).

Con respecto a las modificaciones hidrológicas en sistemas agroforestales, los efectos más conocidos son el aumento de la intercepción de agua proveniente de precipitaciones y de la evaporación directa desde la canopia, con la reducción del escurrimiento superficial, lo que genera una disminución en el contenido de humedad en comparación con áreas sin árboles (Munka, 2010). A su vez, se ha encontrado que los árboles redistribuyen el agua en el suelo, desde regiones más húmedas a regiones más secas mediante movimientos pasivos. Gutiérrez et al. (1996, como se cita en Fedrigo et al., 2019) reportan que la disminución del viento permite reducir la tasa de evapotranspiración hasta en un 20 %, lo que ayuda a mitigar el estrés hídrico en el sistema.

Boscana et al. (2023) comparando un sistema forestal convencional (CFS) y un SSP, no hallaron diferencias en parámetros de producción de madera como sobrevivencia, diámetro a la altura de pecho, altura y altura dominante, pero sí existió una mayor producción de madera por hectárea (m^3/ha) en sistemas con mayor densidad de árboles. Este estudio también evaluó el ingreso anual equivalente para medir el retorno financiero de estos sistemas, para los cuales los resultados fueron 140 y 141 U\$S/ha/año para CFS y SSP respectivamente, con una menor inversión inicial y mayor liquidez en SSP. Esto indicaría una viabilidad económica en la implementación de sistemas silvopastoriles.

2.1.3 Componente forrajero

La introducción de árboles modifica la calidad y cantidad de luz disponible para el sotobosque, afectando el componente forrajero. Es así que, la presencia, arreglo y densidad de árboles impacta en la sombra y en el microclima generado bajo el sotobosque, ocasionando cambios estructurales, taxonómicos y químicos en el tapiz natural. Los diseños en filas entre callejones permiten el crecimiento de gramíneas bajo el dosel

arbóreo gracias a una mayor entrada de luz solar, facilitando a su vez el movimiento del ganado entre calles (Boscana et al., 2023).

En particular, las pasturas que crecen en condiciones de sombra reciben una mayor proporción de luz difusa con una menor relación luz roja/luz roja lejana, lo cual se asocia con una disminución en la tasa de macollaje y, por lo tanto, a un menor crecimiento forrajero. Esta disminución de la producción de forraje dependerá de la adaptación a la sombra y fisiología de las distintas especies. En un estudio realizado por Tonini et al. (2023) en Bagé, Rio Grande do Sul (Brasil), se demostró que la densidad de árboles (*Eucalyptus grandis* y *Eucalyptus dunnii*) afecta significativamente la producción y calidad de la pastura. Altas densidades (625 árboles/ha), reducen la cobertura, biomasa y diversidad a la vez que disminuye el crecimiento de gramíneas y leguminosas, que son las especies con mayor valor forrajero. La densidad de árboles que se asemeja a resultados óptimos son densidades menores, entre 204 - 312 árboles/ha resultando de un mejor equilibrio entre producción forestal, pastura y conservación de especies forrajeras de buena calidad (Tonini et al., 2023).

Este autor también ha encontrado que una densidad de árboles baja (250 - 300 árboles/ha) mejora la calidad del forraje, aumentando el contenido de proteína cruda (PC) y disminuyendo el contenido de fibra detergente neutro (FDN). Cal Díaz et al. (2023) observaron que la pastura debajo de los árboles en SSP presentó 2,9% más de PC y 8% menos de FDN en comparación con las pasturas que crecen a pleno sol (PS). Siguiendo la misma línea, Fedrigo et al. (2019) encontraron en tratamientos con forestación, una menor producción de forraje, pero con mayor contenido de PC y menor contenido de FDN y FDA, en comparación con áreas sin forestación. Las especies más adaptadas a ambientes con menor disponibilidad de radiación son las especies C3, mientras que las especies C4 son más sensibles al sombreado. Las especies C3 presentan una mayor capacidad para mantener la absorción de luz y conservar los pigmentos foliares en ambientes de baja luminosidad, lo que se traduce en mayor eficiencia fotosintética, menores requerimientos energéticos y aumento de su frecuencia en comparación con C4 (Silveira, 2023). Esto se explica por la simplicidad del sistema C3 en relación con el sistema C4 permite que la plasticidad fotosintética se concentre a nivel celular en lugar de tisular permitiendo mayor capacidad de aclimatación (Sage & McKown, 2006).

En síntesis, en los SSP los árboles deben tener una densidad tal que permita el desarrollo de la pastura (INTA Informa, 2015). Diversos estudios han demostrado que los árboles, cuando están dispuestos en arreglos que permiten el ingreso adecuado de luz, logran mejorar su calidad nutricional y no afectar en gran medida la biomasa vegetal.

2.1.4 Componente animal

La incorporación de árboles tiene un impacto positivo en la producción animal, asociado a una mejora en la calidad del forraje disponible (Cal Díaz et al., 2023), a un aumento del consumo de materia seca (CMS) y/o a un menor gasto energético de mantenimiento producto del abrigo y la sombra proporcionados por los árboles (menos gasto energético en termorregulación), que a la vez genera beneficios en el bienestar animal.

A nivel productivo, varios estudios han detectado un impacto negativo del 15% en la ganancia media diaria (GMD) en condiciones de estrés calórico, comparado con animales con libre acceso a sombra (Lapetina, 2008). En particular, en un experimento

realizado en el departamento de Rio Negro, se demostró que vaquillonas Hereford y cruza con Hereford pastoreando en CN con acceso a sombra, presentaron mayor GMD (+ 0,208 kg/día) durante el periodo estival que vaquillonas pastoreando sin acceso a sombra (Simeone et al., 2014). A su vez, Cal Díaz et al. (2023) demostraron que las vacas en SSP tuvieron una mayor condición corporal (CC) y peso vivo (PV), en comparación con vacas manejadas en condiciones de PS, asociado posiblemente a un aumento en el consumo de forraje y a una mejora en la calidad del forraje. Asimismo, Lemes et al. (2021) compararon un SSP con un sistema de referencia a PS encontraron que el PV y la CC de las vacas, así como el CMS fueron mayores en el SSP.

De manera contraria, en un estudio reportado por Huertas et al. (2021) no existieron diferencias significativas en el peso vivo ni en la ganancia de peso entre las vaquillonas mantenidas en SSP y aquellas en sistemas de PS, utilizando vaquillonas de razas europeas manejadas sobre CN en el sureste de Uruguay. Siguiendo en la misma linea, no se observaron diferencias en GMD entre los tratamientos SSP y PS en Tucumán, Argentina, utilizando vaquillonas de raza criolla, siendo el componente pastoril una pastura de *Chloris gayana* cv. Épica (Lara et al., 2023).

A su vez, el estrés calórico también puede inducir alteraciones en el comportamiento ingestivo. En este sentido, Atrian y Aghdam Shahryar (2012), describieron cambios comportamentales de las vacas estresadas por calor, entre ellos una disminución de entre 8 y 12 % del consumo a temperaturas mayores a los 24 grados. Los autores lo explican por una mayor distensión del tracto digestivo producto del aumento de consumo de agua bajo estas condiciones y una reducción de la velocidad del pasaje de alimento, agravando el efecto de llenado. Asimismo, Geremia (2016) evaluó el impacto de los SSP en el comportamiento ingestivo de vaquillonas lecheras pastoreando *Brachiaria brizantha* cv. Piatã a (PS) y bajo dos arreglos distintos de árboles, dos filas y cuatro filas. El microclima generado por los árboles mejoró el confort térmico de los animales, lo que resultó en períodos más prolongados de pastoreo y rumia, con las vaquillonas pasando más tiempo buscando sitios de pastoreo y menos tiempo en cada uno de ellos. Siguiendo la misma linea, Barragán et al. (2017) estudiaron el comportamiento ingestivo diurno y estrés calórico de vacas bajo sistemas silvopastoriles y pradera sin árboles. Encontrando que vacas en el tratamiento sin sombra presentaron tiempos de pastoreo menores (1,86 horas menos por día) y mayores tiempos de descanso (2,96 h más por día).

Finalmente, De Oliveira et al. (2019), en un estudio realizado en Brasil evaluaron la temperatura vaginal en vacas Nelore en diferentes patrones arbóreos y diferentes densidades. Como resultado, observaron una menor temperatura vaginal en el tratamiento de mayor densidad arbórea. Estos resultados sugieren efectos fisiológicos de la inclusión de árboles en el sistema, que se pueden complementar con los cambios comportamentales previamente descriptos. Este efecto sobre la temperatura vaginal, indicador que posee una correlación con la temperatura corporal, se ve influenciado por su genética: Fedrigo et al. (2021) mostraron aumentos significativos en la temperatura vaginal en bovinos de razas Hereford y Aberdeen Angus, pero no en cruzas con Bonsmara. Más aún, Beatty et al. (2006) demostraron que las respuestas fisiológicas ante la exposición prolongada a altas

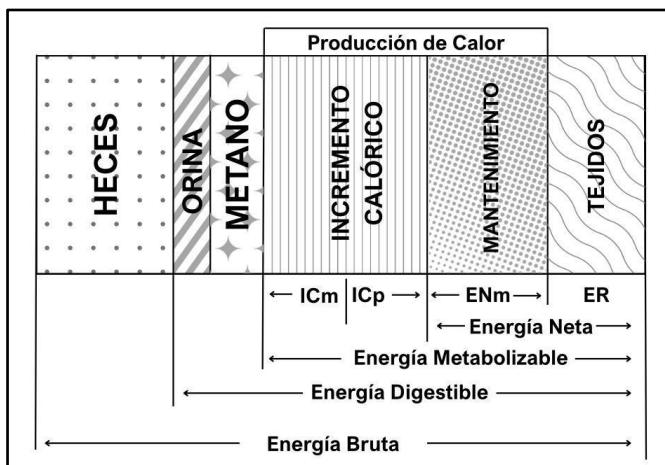
temperaturas son más pronunciadas en *Bos indicus* (Brahman) que en *Bos taurus* (Angus).

2.2 CONSUMO DE ENERGÍA Y EFICIENCIA EN EL USO DE LA ENERGÍA CONSUMIDA

No toda la energía que consume el animal (energía bruta; EB) es retenida y transformada en productos o destinada a cubrir los costos de mantenimiento, ya que existen diferentes pérdidas de energía a través del proceso de la digestión y metabolismo de nutrientes absorbidos (Figura 2). Si a la EB se le descuenta la energía perdida en heces, se obtiene la energía digestible (ED), estas pérdidas se pueden estimar conociendo la digestibilidad de la dieta. A su vez, si a la ED se le resta la energía perdida como gases (principalmente metano) y orina, se obtiene la energía metabolizable (EM) (National Research Council [NRC], 2000). Las pérdidas en heces, gases y orina pueden variar dependiendo de la dieta del animal, principalmente del contenido de fibra y proteína. Dietas con mayores contenidos de PC aumentan las pérdidas por orina y, por otro lado, dietas más fibrosas, que aumentan la fermentación, producen más metano (Morales García, 2022). Dietas con mayores contenidos de FDN, de fibra detergente ácidos (FDA) y de lignina y por lo tanto, de menor digestibilidad, disminuye el consumo de ED y las relaciones de EM/ED, EM/EB y ED/EB (Vázquez-Carillo et al., 2021).

La EM es la energía disponible para el metabolismo animal, es decir, la energía potencialmente disponible para que el animal pueda mantenerse y producir. Sin embargo, la totalidad de la EM no será aprovechada, sino que una parte de esa energía se perderá debido al incremento calórico (IC; incremento en calor por consumo de alimento) asociado a la fermentación, digestión, metabolismo y excreción de los nutrientes (Marín, 2023). Entonces, si a la EM se le descuenta el IC se obtiene el valor de energía neta (EN). La EN representa la parte de energía del alimento que el animal usa para mantenimiento (ENm), engorde (ENg) y producción de leche (ENl; Pigurina et al., 1991). McDonald et al. (1985) define la EN como la fracción de la energía de los alimentos que está disponible para el mantenimiento del organismo como ENm y las distintas formas de producción como EN de producción (ENp) que puede ser huevos, carne, leche, lana, fibra, etc. Los costos de energía para mantenimiento incluyen el costo energético de las actividades voluntarias como el consumo de alimentos y desplazamiento (comportamiento animal), e involuntarias como mantenimiento de la presión sanguínea, tono muscular, actividad cardíaca, termorregulación, transmisión de impulsos nerviosos o el transporte de iones a través de membranas. Estos gastos pueden representar hasta un 70% de las exigencias energéticas totales dónde la energía restante será utilizada para la síntesis de tejidos, proteínas, grasas (Cuartas Cardona et al., 2013).

Figura 2
Esquema de partición de energía y las ineficiencias del sistema



Nota. Adaptado de Gómez Zabala (2022).

Según Short et al. (1990), los bovinos partitionan su energía siguiendo un orden de prioridades, en primera instancia se prioriza el mantenimiento de las funciones vitales y, en segundo lugar, la reproducción. El orden aproximado de prioridades es: (1) metabolismo basal, (2) actividad, (3) crecimiento, (4) reposición de reservas energéticas básicas, (5) gestación, (6) lactancia, (7) acumulación de reservas adicionales, (8) actividad reproductiva (ciclos estrales e inicio de la gestación) y (9) exceso de reservas. Por lo tanto, la eficiencia de producción está fuertemente ligada a la partición energética.

En el presente trabajo, se define la eficiencia alimenticia como la capacidad del sistema de transformar el alimento en un determinado producto, a través de procesos digestivos y metabólicos (NRC, 2000). Una mayor eficiencia, se logra reduciendo las pérdidas a lo largo de las rutas digestivas y metabólicas de utilización de la energía, permitiendo alcanzar mayores niveles de EN para ser destinada a los productos finales de interés. Para lograr mayor eficiencia, se busca disminuir los requerimientos energéticos de mantenimiento y aumentar la digestibilidad, de modo que una proporción mayor de la EM se dirija a la formación de tejidos, incrementando así la cantidad de producto obtenido y/o disminuyendo el costo energético de mantenimiento por cada kg ganado.

Tradicionalmente, los indicadores de eficiencia animal más utilizados fueron la eficiencia alimenticia y su inverso, la eficiencia de conversión (kg de ganancia/kg consumido). Estos índices representan la relación entre la energía retenida en forma de producto (carne, leche, lana, pelo, etc.) respecto de la contenida en los alimentos que consumen los animales. Dónde son más eficientes aquellos animales que con un menor consumo obtienen una mayor ganancia. Sin embargo, estos indicadores no son independientes del tamaño o ganancia del animal, lo que se traduce en una limitante del parámetro. La eficiencia de conversión también puede ser expresada en términos de energía, mediante la relación entre ER-tej y CEM, que refleja la proporción de la energía disponible que es efectivamente utilizada para producción. Este indicador depende directamente del consumo individual de alimento lo cual afecta su aplicabilidad en condiciones de pastoreo extensivo (Aello, 2014).

Actualmente, el indicador de eficiencia animal más estudiado y más ampliamente utilizado a nivel productivo para identificar y seleccionar animales según su eficiencia es

el consumo residual de alimento o RFI (por sus siglas en inglés, residual feed intake). Se calcula como la diferencia entre el consumo real de alimento y el consumo de alimento predicho para el mantenimiento del tamaño corporal ($PV^{0,75}$) y el nivel de producción (GMD), siendo los valores negativos o más bajos más deseables (Lawrence et al., 2011). El RFI es una característica heredable independiente del tamaño y el nivel de producción (Berry & Crowley, 2012). Sin embargo, el RFI posee como limitante la necesidad de obtención de medidas precisas e individuales del CMS y de las características del proceso de pastoreo que, en condiciones de libre pastoreo, supone alta complejidad y variabilidad de los resultados (Marín et al., 2024). En base a esto, surge como indicador de eficiencia energética la producción residual de calor o RHP, por su sigla en inglés (residual heat production) que puede ser utilizado sin necesidad de medir el CMS. La RHP es un indicador de la eficiencia animal ya que representa la pérdida de calor real de un animal, en comparación con la esperada para ese animal en función de su peso metabólico ($PV^{0,75}$) y GMD representando los costos energéticos de mantenimiento y la ER-tej, respectivamente. Los valores negativos de este índice representan animales más eficientes ya que poseen menos pérdidas por calor de las esperadas para un cierto nivel productivo (HP observado < HP estimado). A su vez, el RHP es una medida repetible y heredable (Marín et al., 2024), que se correlaciona positivamente con RFI (Asher et al., 2018). Si bien este índice se puede determinar sin medir el CMS individual lo que puede facilitar su uso en situaciones de pastoreo, requiere la medición de HP. Es así que las cámaras respirométricas constituyen el “gold standard” para la determinación de HP, pero se ha demostrado que la técnica del pulso de O₂ (O₂P) y frecuencia cardíaca (HR; O₂P - HR; Brosh, 2007) puede ser utilizada para en animales en pastoreo (Jasinsky et al., 2019; Talmón et al., 2020).

La bibliografía que estudia el uso de la energía en SSP es muy limitada. Cuartas Cardona et al. (2013) en bovinos pastoreando SSP intensivos con *Leucaena leucocephala* vs. control, reportaron que 35 vs. 15% de la EN consumida fue destinada a GMD y que la eficiencia en la utilización de la EM para mantenimiento (ENm/EMm) fue mayor en SSP que control (64 vs. 60%), lo que indicaría mayor eficiencia en SSP bajo estas condiciones. Sin embargo, la metodología utilizada difirió ya que la HP en este experimento fue obtenida mediante observaciones de comportamiento animal y estimaciones de los costos energéticos para las distintas actividades. En el presente trabajo, a través de la técnica HR-O₂P, se busca obtener resultados más precisos en la cuantificación de esta ineficiencia.

2.3 HIPÓTESIS

La inclusión de árboles en baja densidad mejora la productividad de vaquillonas de carne en verano, consecuencia de un ambiente térmico más favorable. Este efecto será explicado por una disminución de los requerimientos de mantenimiento asociados a la termorregulación, una menor producción de calor, un aumento del consumo individual, lo que en conjunto resultaría en una mayor eficiencia animal.

3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 LOCALIDAD Y PERÍODO EXPERIMENTAL

El experimento fue realizado en el marco del proyecto FPTA 405: *Evaluación y optimización de sistemas silvopastoriles sostenibles*. El mismo se desarrolló durante el verano de 2025 (del 7 al 17 de febrero) en el establecimiento “Mi Capricho”, ubicado en la localidad Buena Vista, Cerro Largo, Uruguay ($32^{\circ}11'20.3''S$ $54^{\circ}14'23.3''O$).

El estudio se desarrolló en la *Primera Plataforma de Investigación, Docencia y Extensión en Sistemas Silvopastoriles* de Uruguay, perteneciente al Polo Agroforestal del CUCEL, CENUR Noreste, Universidad de la República (Udelar), una plataforma experimental de largo plazo diseñada para estudios interdisciplinarios en sistemas silvopastoriles (Fedrigo et al., 2024).

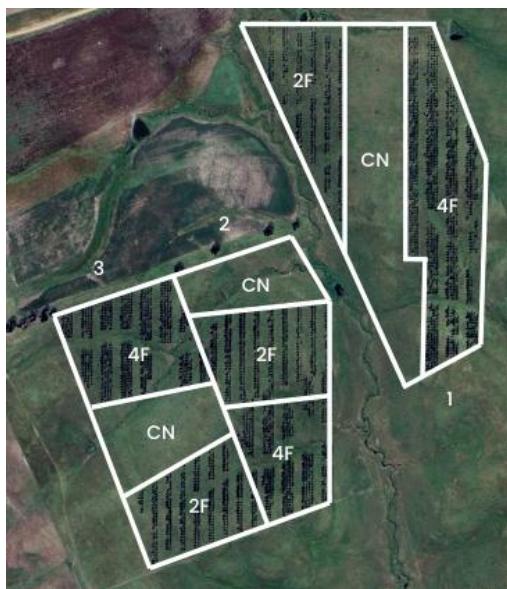
La masa de forraje se determinó mediante jaulas de exclusión al pastoreo, ubicándose cuatro jaulas por potrero. En cada jaula se midió la altura del dosel herbáceo y posteriormente se colectaron muestras de forraje mediante corte manual a nivel del suelo (hand-clipping). A partir de la masa de forraje cosechada y la altura registrada en cada jaula, se ajustó una regresión entre ambas variables, que permitió estimar la tasa de crecimiento del pastizal, expresada como kilogramos de forraje por centímetro de altura (Hall, 2024). La carga animal promedio durante el experimento fue de 2,3 UG/ha y la disponibilidad de forraje promedio fue de 1532 kg MS/ha.

3.2 DISEÑO EXPERIMENTAL ANIMALES Y TRATAMIENTOS

El experimento se realizó sobre 27 hectáreas de *Eucalyptus grandis* plantados el 21/10/2020 con un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones y tres tratamientos (Figura 3): control sin árboles (CON), filas dobles de árboles con 5 m entre árboles y 20 m de callejón ($5\times5+20$) a una densidad de 160 árboles/ha (2F), y filas cuádruples con 5 m entre árboles y 20 m de callejón ($5\times5+20$) a una densidad de 240 árboles/ha (4F). La orientación de las filas es norte-sur, y la base forrajera es CN. Se utilizaron 36 vaquillonas de raza Brangus y cruzas de 18 meses de edad con un PV promedio al inicio del experimento 349 ± 12 kg y se asignaron de manera aleatoria 4 vaquillonas por tratamiento y por bloque.

Figura 3

Diseño espacial del experimento, establecimiento “Mi Capricho”, localidad Buena Vista, Cerro Largo, Uruguay



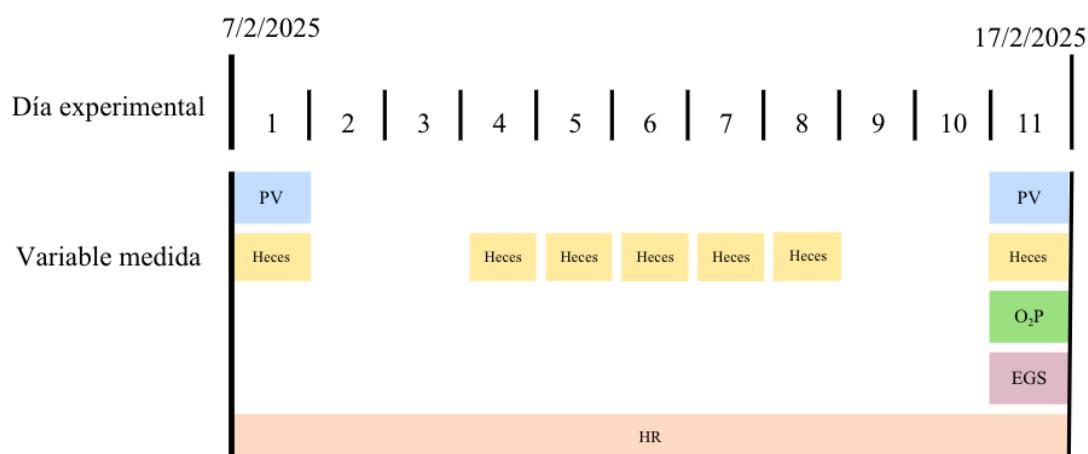
Nota. Adaptado de Google Earth (2023).

3.3 MEDICIONES EXPERIMENTALES

El período experimental tuvo una duración de 11 días, dentro de los cuales se destacan tres momentos claves, correspondientes a la instalación y chequeo de cinturones y sensores de frecuencia cardiaca, finalizando con las mediciones de oxígeno y ecografías de grasa subcutánea. Durante el transcurso del experimento se recolectaron muestras de heces de manera diaria (Figura 4).

Figura 4

Secuencia temporal de las actividades experimentales



Las vaquillonas se pesaron cuatro veces desde el 11/12 al 25/2 (cada 20 o 30 días) (J. Escalano, comunicación personal, 26 de mayo, 2025) y se determinó GMD como la pendiente de la regresión lineal del PV individual y la fecha de pesada que, a su vez, se

ajustó por el espesor de grasa subcutánea (EGS) que se midió al final del período por ultrasonografía. La ER-tej se estimó utilizando el PV vacío (EBW) y la GMD en el cuerpo vacío (EBG) (Eq.1; National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine [NASEM], 2016).

$$\text{ER-tej (MJ/d)} = 0.266 \times \text{EBW}^{0.75} \times \text{EBG} \ 1.097 \ [\text{Eq.1}]$$

donde, EBW = 0.817 x PV (kg/d) y EBG = GMD (kg/dia) x 0.817

La HP fue determinada mediante el método O₂P-HR, que se basa en la estimación diaria de consumo de oxígeno (VO₂) a través del monitoreo de la HR a lo largo del día (Brosh, 2007). Este método comprende dos mediciones de HR, una de corto plazo (15 min), donde la relación entre VO₂ y HR (O₂P) se calibra para cada animal mediante mediciones simultáneas de ambas variables, y otra de largo plazo, en la que la HR se registra durante varios días consecutivos. En ambos casos, se tomaron registros de HR en intervalos de 5 segundos, usando transmisores de HR H10 y un reloj registrador de datos RCX3 (Polar®, Polar Electro Oy, Kempele, Finland) colocados en los animales mediante cinturones elastizados posicionados alrededor del tórax, detrás de las patas delanteras. Las mediciones a largo plazo fueron registradas a lo largo de todo el experimento, durante estas mediciones las vaquillonas llevaban a cabo su rutina experimental con la menor interacción humana posible para asegurar el funcionamiento correcto de los dispositivos de registro de HR. El VO₂, para la determinación del O₂P, se midió por 15 min con las vaquillonas encepas minimizando el estrés animal, a través de un sistema respiratorio circuito abierto utilizando una máscara facial cubriendo el hocico y colectando el aire exhalado por las vaquillonas. El flujo de aire del sistema fue medido y controlado por un flujo másico modelo (Flow-Kit 500, Sable Systems International, Las Vegas, NV, USA) y se analizaron muestras de aire con un sistema metabólico de campo (FMS, Sable Systems International). Los registros de flujo de aire y la concentración de O₂ fueron procesados y corregidos a valores de punto de rocío a presión de temperatura estándar (STD) utilizando el software ExpeData (Sable Systems International). Muestras de aire fueron colectadas antes y después de cada medición individual para establecer una base y el VO₂ se calculó como el flujo de aire STD del sistema multiplicado por la diferencia en la concentración de O₂ entre la línea base y el aire exhalado por la vaca. El sistema respiratorio fue chequeado mediante la inyección de cantidades conocidas de N₂ y comparándolas con datos provenientes de FMS para calcular la recuperación de N₂ (McLean & Tobin, 1987). La recuperación de N₂, promedio fue 105 ± 6%. La HP total a lo largo del día se cuantifica a partir de los datos individuales de HR (latidos/min) y el O₂P [Eq.2 y Eq. 3].

$$\text{HP específico (kJ/kg PV}^{0.75}/\text{d}) = \text{HR (latidos/min)} \times \text{O}_2\text{P (L de O}_2/\text{kg PV}^{0.75}/\text{latido)} \\ \times 20.47 \ (\text{kJ/L de O}_2) \times 60 \ \text{min/h} \times 24 \ \text{h/d} \ [\text{Eq. 2}].$$

$$\text{HP (MJ/d)} = \text{HP específico (kJ/kg PV}^{0.75}/\text{d}) * \text{PV}^{0.75} \ (\text{kg}) / 1000 \ [\text{Eq.3}].$$

Durante el periodo de estudio, se colectaron muestras de heces en un total de siete días a horas diferentes que se secaron en una estufa de aire forzado a una temperatura de 60°C durante 3 a 5 días (a peso constante) y luego fueron molidas a 1mm para ser compuestas por animal para el período experimental para su análisis químico. En las heces, se determinó el contenido de cenizas y N total (Horwitz & Latimer, 2005). La digestibilidad de la materia orgánica (DMO) se estimó mediante la ecuación propuesta por Tafernaberry et al. (2024) desarrollada para forraje de CN [Eq. 4].

$$\text{Digestibilidad de MO (DMO)} = 0,31411 e^{0,02995} \times \text{NFC} \text{ [Eq. 4].}$$

donde, NFC es el contenido de N fecal en la MO (g N/kg OM).

A su vez, se colectaron muestras de pastura mediante hand-clipping (Hall, 2024) que fueron compuestas por tratamiento y bloque (parcela) para su análisis de composición química. En las muestras de pastura se determinó la concentración de cenizas, N total (método Kjeldahl), FDN y extracto etéreo (EE; (Horwitz & Latimer, 2005), y se estimó la concentración de EB a partir de los calores de combustión de carbohidratos, proteínas y lípidos (NASEM, 2016).

Los resultados de composición química del forraje se presentan en la siguiente tabla (Tabla 1).

Tabla 1
Resultados de composición química (% base seca) según tratamiento

	Tratamiento ¹			SEM	P-valor ²
	CON	2F	4F		
MO (%)	92,3 ^a	91,4 ^{ab}	90,8 ^b	0,28	0,04
FDN (%)	66,2	65,4	66,2	0,96	0,55
PC (%)	7,5	7,4	7,2	0,3	0,7
EE (%)	1,8	2,0	1,8	0,8	0,9
EB (MJ/d)	15,9	15,8	15,7	0,09	0,18

Nota. ¹Tratamientos: control sin árboles (CON), filas dobles de árboles con 5 m entre árboles y 20 m de callejón (5x5+20) a una densidad de 160 árboles/ha (2F), y filas cuádruples con 5 m entre árboles y 20 m de callejón (5x5+20) a una densidad de 240 árboles/ha (4F).²MO: materia orgánica, PC: proteína cruda, FDN: fibra detergente neutro, EE: extracto etéreo y EB: energía bruta. a,b,c: Medias con literales diferentes indican difieren con P<0,05

Se registraron datos de precipitación (mm), temperatura (°C), velocidad del viento (m/s), humedad relativa (%) y radiación (W/m²) durante el período experimental de la Estación Experimental Bernardo Rosengurtt (EEBR) y se calcularon el ITH (Thom, 1959; Eq.5) y el ITH ajustado por radiación y velocidad del viento, variables que pueden afectar

la capacidad del animal de disipar el calor (Mader et al., 2006; Eq. 6). Estos indicadores son ampliamente utilizados para estimar el estrés calórico al que están sometidos los animales de producción.

$$ITH = (1,8 \times T^\circ + 32) - (0,55 - 0,55 \times HR / 100) \times (1,8 \times T^\circ - 26) \quad [\text{Eq.5}].$$

$$ITH \text{ ajustado} = 6,8 + ITH - (3,075 \times VV) + (0,0114 \times RAD) \quad [\text{Eq. 6}].$$

dónde, T es la temperatura del aire en °C, HR la humedad relativa en %, VV la velocidad del viento en m/s (convertida a partir de km/h) y RAD la radiación solar en W/m².

3.4 CÁLCULOS Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO

El CEM fue estimado como la suma de HP total + ER-tej (Brosh, 2007; NASEM, 2016). La concentración de EM del forraje se estimó en base a la ecuación propuesta por Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO, 2007) para forrajes [Eq. 7] y el CMS como el CEM (MJ/d) dividido la concentración de EM (MJ/kg MS).

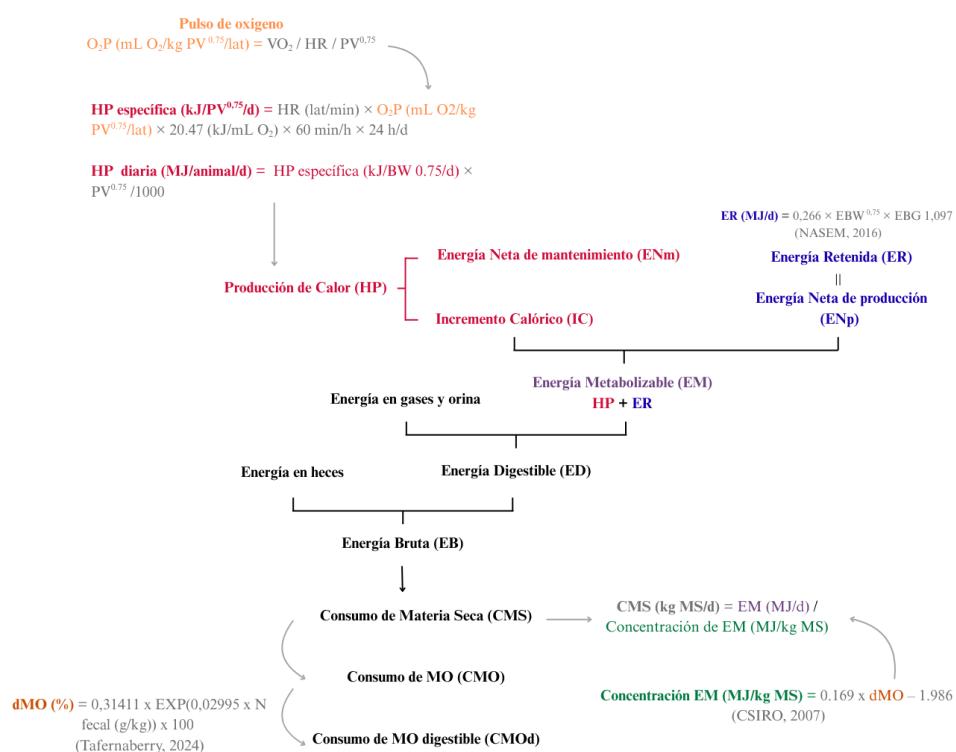
$$\text{Concentración de EM (MJ/kg MS)} = 0,169 \text{ DMO} - 1,986 \quad [\text{Eq. 7}].$$

Donde, DMO es la digestibilidad de la materia orgánica

El siguiente esquema (Figura 5), sintetiza los cálculos realizados en este trabajo, con las respectivas referencias bibliográficas.

Figura 5

Representación esquemática de la secuencia de cálculos



La RHP se calculó como la diferencia entre la producción total de calor real y la HP esperada para un determinado nivel de producción y PV (animales más eficientes presentan una menor RHP). El cálculo de HP esperada se basa en la pendiente y la intersección de una regresión lineal múltiple que depende del $PV^{0,75}$ de las vaquillonas y la GMD, teniendo en cuenta la varianza del modelo, correspondiente a la RHP (Asher et al., 2018).

$$HP = \beta_0 + \beta_1 ADG + \beta_2 mBW + \beta_3 EGS + RHP \text{ [Eq. 8].}$$

Por otra parte, se evalúa la eficiencia alimenticia o conversión alimenticia (kg de ganancia/kg consumido) relacionando el consumo animal con la energía retenida. Los datos de respuesta productiva (ie. CMS, CEM, digestibilidad, PV, GMD, EGS, ER-tej, HP e indicadores de eficiencia) se analizaron utilizando el paquete estadístico SAS (SAS® OnDemand for Academics; SAS Institute, Cary, NC, USA), mediante modelos lineales mixtos, a través del procedimiento MIXED. El modelo incluyó el tratamiento (CON, 2F y 4F) como efecto fijo y el bloque como efecto aleatorio. Adicionalmente, para el análisis de GMD se incluyó el EGS como covariante ya que $P < 0,05$. Los datos con patrones a lo largo del día (HR y HP) fueron analizados usando modelos mixtos de medidas repetidas considerando el tratamiento, la hora del día y su interacción como efectos fijos y el bloque y la vaquillona como efectos aleatorios. La significancia de los efectos fijos se evaluó mediante análisis de varianza (ANOVA) de tipo III. Las comparaciones entre tratamientos se realizaron a partir de las medias ajustadas del modelo, utilizando pruebas de comparaciones múltiples según el análisis de Tukey ($\alpha = 0,05$). Además, se realizaron contrastes específicos (efecto presencia de árboles; CON vs. 2F + 4F y efecto densidad de árboles; 2F vs. 4F) para evaluar hipótesis dirigidas y complementar la interpretación de los efectos observados. Se consideró que las medias eran diferentes cuando $P \leq 0,05$ y se identificaron tendencias cuando $0,05 < P < 0,10$. La verificación de supuestos del modelo (normalidad y homogeneidad de varianzas) se realizó mediante análisis de residuos y gráficos de dispersión.

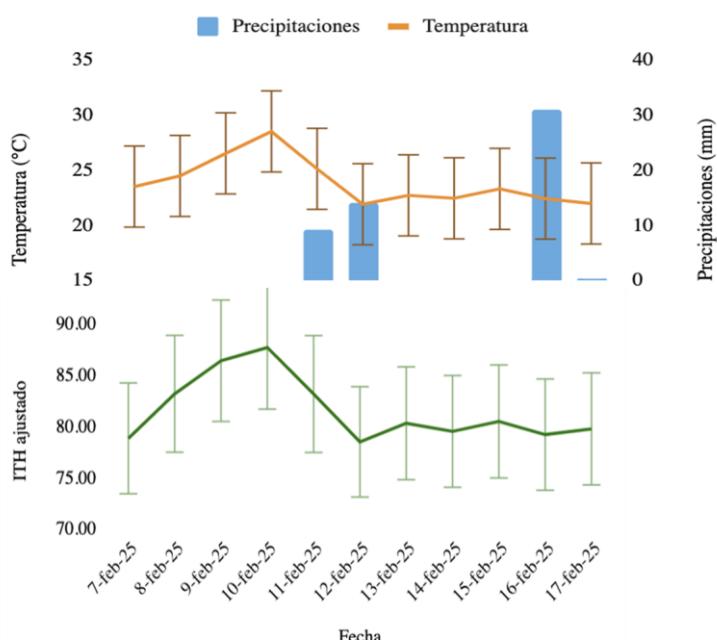
4 RESULTADOS

4.1 CONDICIONES CLIMÁTICAS

Los registros meteorológicos de la región (Figura 6) indican que se registraron precipitaciones (mm) en cuatro días. La precipitación total acumulada durante el experimento fue de 54 mm, la mayor de ellas el 16 de febrero con un volumen de 31 mm. La temperatura (promedio diario) máxima del experimento se registró el 10 de febrero y fue de 28 °C. Posterior a esa fecha la temperatura se mantuvo estable en valores promedio en torno a 23 °C. El ITH ajustado fue mayor a 75 durante todo experimento, indicando que las vaquillonas control estuvieron expuestas a condiciones de estrés térmico continuo. El ITH promedio del experimento fue de 81,5 donde se registraron además eventos de olas de calor, definidos como tres o más días consecutivos con $ITH \geq 79$, lo que refleja la ocurrencia de condiciones ambientales extremas.

Figura 6

Condiciones climáticas durante el período experimental



4.2 RESPUESTA PRODUCTIVA Y PARTICIÓN DE LA ENERGÍA

El PV promedio, la GMD y el EGS de las vaquillonas durante el período evaluado no difirió entre tratamientos ($P \geq 0,36$) y promediaron 348 ± 13 kg, 156 ± 5 g/d y $4,4 \pm 0,1$ mm respectivamente (Tabla 2). Por lo tanto, la ER-tej, expresada tanto en MJ/d o por unidad de $PV^{0,75}$ (kJ/kg $PV^{0,75}$ por día) tampoco fue diferente ($P \geq 0,60$) entre tratamientos con valores promedio de $19,5 \pm 0,6$ y 243 ± 3 , respectivamente (Tabla 2).

Si bien la HR, el VO_2 y el O_2P fueron similares ($P \geq 0,17$) entre tratamientos, la HP (MJ/d o kJ/kg $PV^{0,75}$ por día) tendió ($P \leq 0,09$) a ser afectada por los tratamientos, siendo mayor ($P = 0,04$) cuando las vaquillonas pastoreaban sin (CON) que con (2F y 4F) presencia de árboles, no siendo afectada ($P = 0,63$) por la densidad de los árboles (Tabla 3). El CEM, expresado tanto en MJ/d o por unidad de $PV^{0,75}$ (kJ/kg $PV^{0,75}$ por día) fue

afectado por el tratamiento ($P < 0,05$) ya que fue 16% mayor en las vaquillonas CON que en las vaquillonas 2F y 4F que no se diferenciaron entre sí (Tabla 3).

La DMO del forraje (%) tendió ($P = 0,07$) a diferir entre tratamientos, siendo mayor ($P = 0,05$) en el tratamiento CON que en el 2F e intermedia en el 4F que no fue diferente de ninguno de los dos. Sin embargo, el análisis de contrastes indica que la DMO del forraje aumentó ($P = 0,02$) sin la presencia de árboles, pero no fue afectada por la densidad de los árboles (Tabla 2). De manera similar, la concentración EM (MJ/kg MS) promedio fue mayor ($P = 0,05$) para el tratamiento CON que para 2F e intermedia para el 4F que no difirió de ninguno de los otros tratamientos (7,95, 7,69 y $7,74 \pm 0,13$ MJ/kg MS, respectivamente). El CMS (kg/d) tendió a ser diferente ($P = 0,06$) y el consumo de materia orgánica digestible (CMOd, kg/d) fue ($P < 0,05$) afectado por los tratamientos, ya que las vaquillonas CON consumieron 1,4 kg MS/d y 0,9 kg MO digestible/d más que las vaquillonas 2F y 4F que no se diferenciaron entre sí. Sin embargo, el CMS expresado como % del PV no difirió entre tratamiento y promedió $2,4 \pm 0,12\%$ (Tabla 2) aunque el análisis de contraste indicó que fue mayor ($P < 0,05$) en ausencia que en presencia de árboles. Asimismo, el CMOD (kg/d o %PV/d) fue mayor ($P < 0,05$) para las vaquillonas CON que para las 2F y 4F.

Si bien la eficiencia de conversión alimenticia (GMD/CMS) no difirió ($P = 0,82$) entre tratamientos (Tabla 2), la eficiencia en el uso de la energía consumida, evaluada a través de las relaciones ER-tej/CEM y ER-tej/HP, fue menor ($P < 0,05$) para el tratamiento CON que 2F e intermedia para el 4F que no difirió de ninguno de los dos tratamientos. El análisis de contrastes indica que estas relaciones fueron menores en ausencia que presencia de árboles (Tabla 3). En acuerdo, la relación RHP/GMD fue mayor ($P < 0,05$) en CON que en 2F y 4F.

Tabla 2
Variables productivas, consumo y eficiencia de conversión

	Tratamiento ¹			SEM	P-valor	CON vs. 2F+4F ²
	CON	2F	4F			
Peso vivo promedio, kg	350	331	354	13	0,40	0,68
Ganancia media diaria (GMD), g/d	143	176	147	5	0,90	0,78
Espesor de grasa subcutánea, mm	4,3	4,3	4,5	0,12	0,36	0,48
Digestibilidad materia orgánica (DMO), %	58,7 ^a	57,2 ^b	57,6 ^{ab}	0,79	0,07	<0,05
Consumo de materia seca (CMS), kg/d	9,2 ^a	7,9 ^b	7,9 ^b	0,4	0,06	<0,05
Consumo de materia seca (CMS), %PV/d	2,6	2,4	2,3	0,12	0,13	0,05
Consumo de MO digestible (CMOD), kg/d	5,4 ^a	4,5 ^b	4,5 ^b	0,24	<0,05	<0,05
Consumo de MO digestible (CMOD), %PV/d	1,4 ^a	1,2 ^b	1,2 ^b	0,06	0,03	0,05
Eficiencia de conversión (GMD/CMS), g/kg	18	21	22	7	0,8	0,54

Nota. ¹Tratamientos: control sin árboles (CON), filas dobles de árboles con 5 m entre árboles y 20 m de callejón (5x5+20) a una densidad de 160 árboles/ha (2F), y filas cuádruples con 5 m entre árboles y 20 m de callejón (5x5+20) a una densidad de 240 árboles/ha (4F). ²Valor de P para el contraste ausencia vs. presencial de árboles. a, b, c: Medias con literales diferentes indican que difieren con $P < 0,05$

Tabla 3

Pulso de O₂, partición de energía e indicadores de eficiencia de uso de la energía consumida

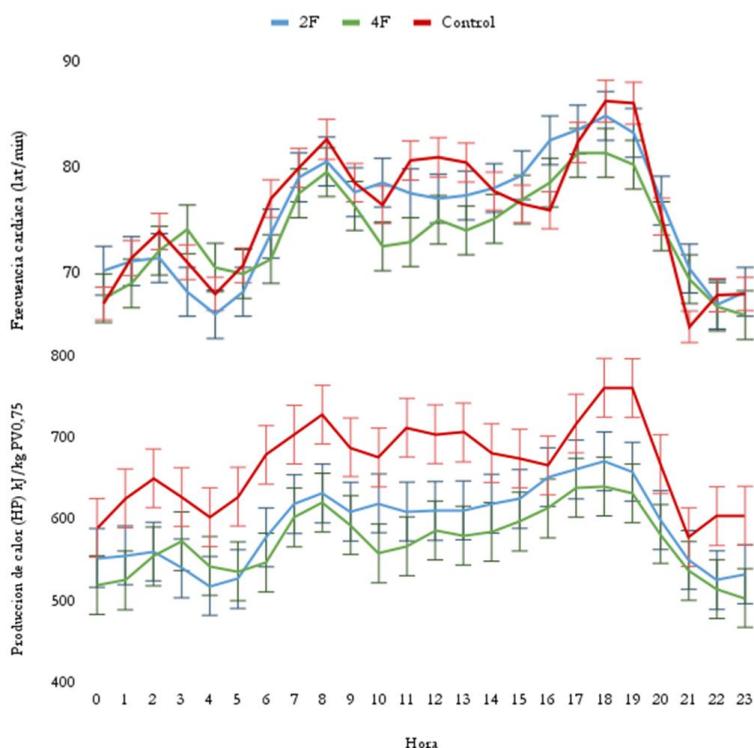
	Tratamiento ¹			SEM	P-valor	CON vs. 2F+4F ²
	CON	2F	4F			
Frecuencia cardíaca, latidos/min	76	75	74	1,8	0,70	0,54
Consumo de O ₂ (VO ₂), mL	23,7	23,6	21,3	1,3	0,17	0,30
Pulso de O ₂ , $\mu\text{LO}_2/\text{PV}^{0,75}$ por latido	0,292	0,268	0,279	0,013	0,44	0,26
<i>Partición de energía, MJ/d</i>						
Consumo de energía metabolizable (CEM)	72,6 ^a	58,1 ^b	60,6 ^b	2,8	<0,05	<0,05
Energía retenida en tejido (ER-tej)	19,7	18,7	20,0	0,6	0,29	0,64
Producción de calor (HP)	53,3 ^a	45,2 ^b	45,6 ^{ab}	3,1	0,09	0,04
Producción residual de calor (RHP)	4,77 ^a	-	-	2,57	0,05	<0,05
<i>Partición de energía, kJ/kgPV^{0,75} por d</i>						
Consumo de energía metabolizable (CEM)	907 ^a	792 ^b	766 ^b	36	<0,05	0,03
Energía retenida en tejido (ER-tej)	243	242	244	3	0,75	0,77
Producción de calor (HP)	668 ^a	592 ^{ab}	573 ^b	34	0,07	0,02
Producción residual de calor (RHP)	60,2 ^a	-	-	32,4	0,05	<0,05
<i>Eficiencia de uso de la energía consumida</i>						
ER-tej/CEM	0,27 ^a	0,31 ^b	0,29 ^{ab}	0,01	<0,05	<0,05
ER-tej/HP	0,38 ^a	0,45 ^b	0,43 ^{ab}	0,02	<0,05	<0,05
RHP/GMD	65 ^a	-21 ^b	-38 ^b	32	<0,05	<0,05

Nota. ¹Tratamientos: control sin árboles (CON), filas dobles de árboles con 5 m entre árboles y 20 m de callejón (5x5+20) a una densidad de 160 árboles/ha (2F), y filas cuádruples con 5 m entre árboles y 20 m de callejón (5x5+20) a una densidad de 240 árboles/ha (4F). ²Valor de P para el contraste ausencia vs. presencial de árboles. a, b, c: Medias con literales diferentes indican que difieren con $P < 0,05$

Tanto HR como HP se vieron afectadas por la hora del día y por la interacción del tratamiento x hora ($P < 0,03$). Para ambas variables, en todos los tratamientos se ve una tendencia al aumento al inicio y final del día (6:00 a 9:00 hs y 17:00 a 19:00 hs, respectivamente), registrándose los valores mínimos durante la noche (Figura 7, Anexo A). La HP en 4F fue menor que en CON durante casi todo el día, siendo máximas entre las 10:00 y 3:00 h mientras que las diferencias entre CON y 2F se observó en menos horas por día.

Figura 7

Frecuencia cardíaca (lat/min) y producción de calor (kJ/kg PV^{0,75}) a lo largo del día



5 DISCUSIÓN

En este trabajo se demostró que la eficiencia alimenticia, medida a través de la RHP y de las relaciones de ER-tej/CEM, ER-tej/HP y RHP/GMD, fue superior en vaquillonas en SSP que sobre CN sin la presencia de árboles (2F y 4F vs. CON), con un efecto menor y no claro de la densidad de árboles del SSP. La mejora en la eficiencia no se vio acompañada de una mejora en la productividad, pero si de un menor CMS, CMOD y CEM, lo que indicaría que la eficiencia estuvo determinada por un uso diferencial de la energía consumida a nivel del metabolismo y en la partición de la energía entre mantenimiento y producción.

En contraste con resultados previos (Cal Díaz et al., 2023; Cuartas Cardona et al., 2013; Lapetina, 2008; Simeone et al., 2014) la respuesta productiva, en términos de PV, GMD y EGS, no fue diferente entre tratamientos. Si bien no todos los estudios mencionados fueron realizados bajo sistemas silvopastoriles, y utilizaron distintos arreglos, densidades de árboles u otros tipos de sistemas de provisión de sombra, en todos ellos se enfatiza el efecto de la sombra sobre la respuesta productiva de los animales. En este sentido, resulta de particular relevancia para la comparación de resultados el trabajo de Cal Díaz et al. (2023), debido a la similitud en las condiciones de evaluación. De manera consistente con lo reportado por Huertas et al. (2021) y Lara et al. (2023), mencionados en los antecedentes, en el presente estudio tampoco se registraron diferencias en PV ni en GMD en vaquillonas manejadas en sistemas de pastura abierta y en sistemas silvopastoriles. La GMD está directamente asociada con el CMS y nutrientes (Bianchi, 1982). Considerando el CMS promedio de las vaquillonas en el presente trabajo (2,4% PV) y utilizando el programa *UPIC PRO* (Beretta & Simeone, 2012) con las condiciones ambientales, la composición de la dieta y duración del experimento se estimó una GMD posible de 300 g/d. Este valor estimado de GMD es entre 2 y 3 veces mayor a la GMD de las vaquillonas observada en este trabajo, lo que podría indicar que las condiciones ambientales - afectando la pastura y/o la utilización del forraje por el animal - limitó el desempeño productivo de las vaquillonas. En el presente trabajo, durante el periodo experimental, la región presentó un ITH promedio de 81,5, lo que según bibliografía indica estrés térmico ($ITH > 75$). Estos elevados valores de ITH, podrían haber afectado la GMD ya sea en animales con acceso a sombra (2F y 4F) como a PS (CON). Se ha reportado que el estrés térmico reduce el CMS y la GMD (Habeeb et al., 2023), pero también modifica el metabolismo energético y la partición de nutrientes, modificando el uso de sustratos energéticos hacia un mayor uso de carbohidratos y menor uso de ácidos graso como fuente de energía, incrementando los requerimientos de mantenimiento y reduciendo la fracción de energía disponible para crecimiento, por lo que la menor GMD no se debe únicamente a la caída en el consumo (Dahl et al., 2020).

Si bien no se detectaron diferencias en la respuesta productiva entre tratamientos, el CMS, CMOD y CEM (kg o MJ/d) fue mayor en vaquillonas control (sin presencia de árboles) que en los SSP. De manera similar a lo reportado en el presente estudio, Cuartas Cardona et al. (2013) reportaron que el CMS y CEM fue casi 50% superior en toros pastoreando especies tropicales (*Leucaena leucocephala* y *Cynodon plectostachyus*) a PS que en SSP mientras que Lemes et al. (2021) encontraron un mayor PV final, CC y CMS en vaquillonas y vacas en SSP. Uno de los principales factores que afecta el CMS de pastura es la altura y biomasa disponible; a mayor altura y densidad se obtiene una mayor masa por bocado debido a un aumento en la accesibilidad del alimento que se traduce a mayor consumo (Wade & Agnusdel, 2001). Tonini et al. (2023) reporta que el sombreado

por parte de los árboles disminuye la radiación interceptada, la tasa fotosintética y consecuentemente la producción de forraje del sotobosque. Sin embargo, como consecuencia del manejo del pastoreo del experimento, la disponibilidad de forraje del CN durante el mes de febrero fue similar entre tratamientos y estuvo en promedio en los 1532 kg MS/ha, manejando cargas elevadas (2,30 UG/ha en promedio). La carga animal, resultado del manejo del pastoreo del experimento, estuvo muy por encima que la recomendada por Martínez y Pereira (2011) como dotación segura en CN (ej, 0,5 UG/ha en Basaltos Rojos Superficiales y 0,90 UG/ha en Areniscas de Tacuarembó) o las de los SSP (0,6 a 0,9 UG/ha; Sancho et al., 2021), por lo que podría también estar limitando la respuesta productiva en los tratamientos con presencia de árboles.

Por otra parte, la calidad del forraje puede afectar el CMS, ya que existe una relación lineal positiva entre CMS y la digestibilidad de la MS cuando la digestibilidad es moderada (Detmann et al., 2014). La menor digestibilidad del forraje puede causar un efecto de llenado del TGI en los animales, disminuyendo así el CMS individual (Allen, 2000; Mertens, 1987). A pesar de que en acuerdo con lo reportado por Neel et al. (2016), la dMO tendió a ser mayor en las vaquillonas pastoreando en CN sin la presencia de árboles que en los SSP, la digestibilidad estuvo en el rango de 55-60% no pareciendo ser una limitante principal en el consumo de forraje. De hecho, cuando se expresan en función de PV o del $PV^{0,75}$, el CMS no difirió entre tratamientos, pero los CMOD y CEM fueron 16% mayores en las vaquillonas pastoreando en ausencia vs. presencia de árboles, indicando que las pérdidas en heces, pero no en orina y gases, fueron menores en el tratamiento CON. Los resultados de nuestro experimento muestran que las concentraciones de PC y FDN del forraje ofrecido (hand-clipping) no fueron diferentes entre tratamientos, pero se observó un mayor contenido de MO y por lo tanto, un mayor contenido de CHO solubles, rápidamente degradables en el tratamiento CON, mejorando posiblemente la digestibilidad aparente del forraje y el contenido energético potencial del forraje. En concordancia con esto, se detectaron diferencias significativas en la concentración de EM del forraje en presencia vs. ausencia de árboles, siendo mayor en CON (7,95 vs. $7,72 \pm 0,13$ MJ/kg MS).

Cal Díaz et al. (2023) observaron que en Uruguay los tratamientos con sombra de árboles de ocho años presentaron una mejora en la calidad del CN, reflejada en mayores contenidos de PC y menores valores de FDN, debido a que las plantas redirigen nutrientes hacia las láminas foliares para aumentar su eficiencia fotosintética (Cruz, 1997). En este ensayo los árboles de los SSP tenían aproximadamente cuatro años y medio de edad. A esta edad, el rodal se encuentra en una etapa de crecimiento activo y aún no ha alcanzado su máxima expresión estructural ni funcional. Si bien *Eucalyptus grandis* se trata de una especie de rápido crecimiento, muestra su superioridad productiva recién a partir del sexto año y el máximo se alcanza a los 10 u 11 años (Balmelli & Resquin, 2010). No se han reportado estudios específicos sobre el efecto de la edad de los árboles sobre la calidad del forraje y la producción de biomasa. Sin embargo, cuanto mayor es la influencia del componente arbóreo hay una tendencia a que se vean los impactos de la sombra sobre el tapiz como y la mejora de la calidad en términos de PC (J. Fedrigó, comunicación personal, 21 de octubre, 2025). Por lo que es probable esperar que, a mayor edad de los árboles, y consecuentemente, mayor influencia del componente arbóreo en los SSP, la mejora de la calidad del forraje sea mayor pudiendo tener mayores impactos en los indicadores productivos en acuerdo con Cal Díaz et al. (2023).

En contraste con otros reportes (Hou et al., 2021; Kim et al., 2023; Kovács et al. 2018) que indican menores HR de animales bajo sombra, en este trabajo ni la HR ni el O₂P se diferenciaron entre tratamientos. Sin embargo, Brosh et al. (1998) no reportan

diferencias en HR ni en O₂P en vaquillonas de carne por efectos de la radiación solar. La HR promedio y el O₂P que representa la tasa metabólica, determinados en este experimento se encuentran en los rangos reportados por Marín et al. (2024) para vaquillonas Hereford (82 lat/min; 0,267 - 0,295 mLO₂/PV^{0,75}/latido) y por Gómez Zabala (2022) para vacas de cría (62,5 lat/min; 0,291 mLO₂/PV^{0,75}/latido) pastoreando CN.

Sin embargo, en acuerdo con otros trabajos (Brosh, 2007; Gómez Zabala, 2022; Jasinsky et al., 2019) que indican una alta correlación entre el CEM y la HP, la HP fue mayor en las vaquillonas pastoreando en ausencia vs. en presencia de árboles. La HP es la suma de la HP de mantenimiento (HPm) y la HP para producción (HPp) (Miron et al., 2008). En el presente trabajo, la ER-tej no difirió entre tratamientos lo que indicaría que no sería esperable diferencias en la HPp por lo que la mayor HP de las vaquillonas pastoreando en ausencia de árboles estaría asociada a una mayor HPm. De hecho, la EM destinada a mantenimiento (EMm) estimada a partir del CEM y la EM destinada a ganancia de peso (EMm = CEM – (ER-tej/kg), donde la eficiencia de uso de la energía metabolizable para ganancia, kg= 0,57; NASEM, 2016) promedió 417,6 kJ/kgPV^{0,75} por d, lo que implica que un 49,5% de la EM consumida fue destinada a mantenimiento. Este valor es un poco inferior con los requerimientos de EMm estimados utilizando los sistemas de alimentación de Australia y Estados Unidos para ganado de carne (510 y 502 kJ/kgPV^{0,75} por d, para CSIRO, 2007 y NASEM, 2016, respectivamente) pero en el rango de los reportados por Cottrill et al. (1990) que mencionan valores de EMm para vaquillonas y vacas (389 a 796 kJ/kgPV^{0,75} por d de EMm). Más aún, en promedio la EMm reportada en este trabajo fue comparable con la EMm reportada por Marín et al. (2024) para vaquillonas de alta eficiencia (bajo RHP) Hereford pastoreando CN (434 kJ/kgPV^{0,75} por d). Sin embargo, contrario a lo esperado debido a que en este trabajo los animales se encontraban en condiciones de pastoreo y estrés calórico, los valores de EMm estimados se encuentran en el rango inferior de los valores de referencia. El costo del mantenimiento de los tejidos se asocia al constante recambio de proteínas y grasas, cuya eficiencia de síntesis varía según el tejido: entre 10-40 % para proteína y 60-80 % para grasa. Animales más cercanos a pesos adultos tienden a una mayor deposición de grasa en sus tejidos, por lo que su kg es mayor (Ferrell & Jenkins, 1985). Un kg mayor determinaría que la EM para ganancia de peso fuese menor y consecuentemente sería mayor la EMm (diferencia entre EM total y EM para ganancia de peso). El presente estudio se realizó en vaquillonas de 345 kg PV promedio (63% de su peso adulto), en las cuales el kg podría ser mayor al utilizado en la estimación de la EMm por una mayor deposición de grasa vs. proteína en el tejido corporal. Particularmente, estudios centrados en la partición energética en SSP son escasos. Cuartas Cardona et al. (2013) reportaron valores de EMm promedio de 445,7 kJ/kgPV^{0,75} por d en toros jóvenes (320 kg PV promedio). Las diferencias entre resultados, aunque leves, pueden explicarse por la categoría utilizada en ambos experimentos (toros jóvenes vs. vaquillonas) y mayores requerimientos de termorregulación producto de temperaturas promedio mayores durante el período experimental (26 °C vs. 24°C). En este sentido, el valor estimado de EMm del presente estudio se considera coherente en comparación con lo estimado por sistemas de alimentación internacionales y, en específico, con lo reportado para SSP.

La presencia de árboles disminuyó los requerimientos estimados de EMm en un 26,3% (480,8 vs. 354,3 kJ/kgPV^{0,75} por d de EMm para CON vs. 2F y 4F, respectivamente). El requerimiento de energía para mantenimiento incluye el costo para las funciones de metabolismo basal, la termorregulación y el costo de actividad (CSIRO, 2007), pudiendo estos dos últimos factores explicar las diferencias encontradas entre las vaquillonas pastoreando sin y con árboles. En este sentido, a pesar de que en el presente

experimento no existieron diferencias en el tiempo en que las vaquillonas dedicaron a pastorear, la tasa de ingestión fue mayor en el tratamiento CON que en los tratamientos con árboles (2F y 4F) (A. Díaz & L. Umpiérrez, comunicación personal, 2025), lo que podría sugerir una mayor tasa de bocado ya que el tamaño de bocado está fuertemente determinado por la altura y la densidad de pastura (Forbes, 1988; Hodgson, 1985). Si bien Talmón Travers (2025) determinó que la tasa de bocado no afectó el costo energético de la actividad de pastoreo en vacas lecheras, Di Marco y Aello (2001) reportan en novillos de carne que la tasa de bocado es uno de los componentes del comportamiento que mayor efecto tiene sobre el costo energético de pastoreo; incrementándose los requerimientos energéticos por actividad de pastoreo de 8 a 18% cuando la tasa de bocado aumenta de moderada a alta. De manera similar, Gómez Zabala (2022) indica una asociación entre el costo energético de pastoreo y la tasa de bocado en vacas de cría pastoreando alta y baja oferta de forraje del CN.

A su vez, A. Díaz y L. Umpiérrez (comunicación personal, 2025) reportan un mayor tiempo de no pastoreo (descanso + rumia) paradas en CON que en 2F y 4F (273, 244 y 211 min/d, respectivamente) y un mayor tiempo echadas en el tratamiento de 4F que en los 2F y CON (638 vs. 581 y 588 min/d, respectivamente). Se ha reportado (Susenbeth et al., 2004; Talmón et al., 2023) que el costo energético de la postura puede incrementarse entre un 6,5 hasta un 19,2% para vacas lecheras y novillos de pie en comparación con cuando están echadas. Asimismo, los animales pueden disipar el calor mediante convección, conducción, radiación y evaporación (Atrian & Aghdam Shahryar, 2012) y el cambio de postura afecta las pérdidas sensibles de calor (convección, conducción y radiación). Sejian et al. (2018) indican que los animales aumentan el tiempo de pie y disminuyen el tiempo echados cuando están frente a un estrés térmico, ya que la postura parada ayuda a disipar el calor al maximizar la exposición de la piel al flujo de aire y reducir la ganancia de calor del suelo. Por otra parte, las pérdidas de calor por evaporación del agua a partir de la piel y del sistema respiratorio (aumento del sudor y jadeo) constituyen otra forma de disminuir la temperatura corporal, ya que la evaporación es un proceso endotérmico que absorbe energía calórica (en promedio 2,4 MJ/kg agua). En este sentido, el costo energético asociado al jadeo varía entre un 7% (jadeo leve) y un 18% (jadeo con la boca abierta) del requerimiento de ENm, dependiendo de la intensidad de este (NASEM, 2016). Si bien en este trabajo no se midió la tasa respiratoria, como se mencionó anteriormente, la HR y el VO₂ no variaron entre tratamientos. Brosh et al. (1998) tampoco reportan diferencias en HR ni en VO₂ en vaquillonas de carne por efectos de la radiación solar, pero observaron aumentos de la tasa respiratoria y la temperatura rectal en los animales más expuestos a la radiación solar. En el mismo sentido, Oliveira et al. (2025) indican que las vaquillonas Nellore expuestas a condiciones de estrés térmico (ITH = 83,3) incrementan la tasa respiratoria y la temperatura rectal. Si bien no contamos con datos del microclima generado por los tratamientos, en el segundo año de evaluación de los tratamientos en el marco del proyecto FPTA, los SSP presentaron menores valores de índice de temperatura y humedad del globo negro, así como reducciones en la radiación incidente y la velocidad del viento durante las horas de mayor carga térmica (C. Viñoles, comunicación personal, 2025), lo que podría sugerir un menor estrés térmico en las vaquillonas pastoreando SSP.

Los cambios comportamentales y fisiológicos asociados al estrés térmico podrían incrementar el costo energético de mantenimiento (ENm) y disminuir la partición de la energía consumida hacia producción. De hecho, si bien no encontramos diferencias en la eficiencia de conversión alimenticia, probablemente por la alta variación en la GMD dentro de los tratamientos (coef. de variación = 117%), como se refleja en los indicadores

ER-tej/CEM y ER-tej/HP, la eficiencia de utilización de la energía consumida fue mayor para los SSP (2F y 4F) vs. CON, lo que podría atribuirse a menores requerimientos de termorregulación de las vaquillonas bajo estudio por acceso a sombra.

En acuerdo con Asher et al. (2018), que mencionan que existe una relación positiva entre la eficiencia alimenticia individual, medida como RFI y el CEM y HP, las vaquillonas CON presentaron mayores valores de RHP acompañados con mayor CMS y CEM y HP. De la misma manera, Marín et al. (2024) determina que la GMD no difirió, pero el CMS y CEM, así como la HP fue mayor para vaquillonas Hereford pastoreando CN de alto (menos eficiente) que bajo RHP. Si bien los resultados no son estrictamente comparables debido a las diferencias en los animales (ie. raza), la duración del experimento y en las condiciones climáticas bajo las cuales se llevaron a cabo, Marín et al. (2024) reportó que la diferencia en HP entre ambos grupos fue de casi 8 MJ/d entre grupos de alta y baja eficiencia comparable con la diferencia reportada en este trabajo entre las vaquillonas pastoreando SSP vs. CN sin árboles (7,5 MJ/d).

Coinciendo con lo reportado por Talmón et al. (2020), las curvas de HR y HP a lo largo del día presentan una alta correlación, con valores mínimos y máximos en los mismos momentos del día. Brosh (2007) explica que la variación de ambas variables para animales en confinamiento estuvo dada por el momento de suministro y consumo de alimento. Sin embargo, trabajos en vacas lecheras en pastoreo con suplementación (Talmón et al., 2020) y en vacas de cría en pastoreo de CN (Gómez Zabala, 2022) reportan que los picos de HP se dan en momentos similares a los reportados en el presente trabajo (uno a las 8:00 h y otro a las 18:00 h), explicados por el aumento de la actividad de pastoreo y consumo de forraje luego del amanecer y antes del atardecer (Gregorini et al., 2006). De hecho, el patrón de pastoreo a lo largo día de las vaquillonas en este trabajo (A. Díaz & L. Umíérrez, comunicación personal, 2025) siguió la misma tendencia que las curvas tanto de HP como de HR. Esto indica que las fluctuaciones diarias de la HP en animales en pastoreo continuo, se ven explicadas por patrones diferenciales de comportamiento animal asociado al consumo de forraje.

Finalmente, la densidad de plantación y el arreglo espacial son aspectos fundamentales para el éxito del SSP, ya que definen el microclima, la radiación transmitida hacia el interior del bosque y la productividad del tapiz (Silveira, 2023). Sin embargo, en nuestro trabajo no se observaron diferencias significativas entre los tratamientos 2F y 4 F para la mayoría de las variables estudiadas, comportándose a nivel de la respuesta animal de manera similar. Asimismo, trabajos recientes (Escalona et al. 2024; Llanos et al., 2024) que compararon las mismas densidades utilizadas en el presente experimento, no hallaron diferencias en la GMD de terneros ni en la GMD y cantidad de terneros destetados por vaca entorada. En ambos casos, los árboles se encontraban en etapas tempranas de crecimiento. En términos generales, la investigación que evalúa el efecto de distintas densidades arbóreas en SSP aún se encuentra en desarrollo, por lo que la bibliografía disponible refiere mayormente a sistemas con árboles jóvenes, dificultando la comparación entre estudios. En este contexto, el presente trabajo aporta evidencia complementaria al cuantificar la partición de la energía consumida en SSP en dos densidades diferentes, sin observar efectos significativos de la misma, en concordancia con los resultados previamente reportados.

6 CONCLUSIONES

Las vaquillonas en SSP (2F y 4F) consumieron menos MS, MOd y EM, y presentaron una menor HP que las vaquillonas pastoreando CN sin árboles (CON), sin detectarse diferencias en el PV, la GMD ni el EGS entre tratamientos durante el período experimental. Estos resultados sugieren que, bajo condiciones limitantes de verano y durante un período acotado del año, la presencia de árboles en las densidades evaluadas redujo los requerimientos energéticos de mantenimiento, probablemente asociados a menores costos de termorregulación y a cambios en el comportamiento animal vinculados al confort térmico. La menor partición del CEM a mantenimiento en los SSP se reflejó en una mayor eficiencia en el uso de la energía consumida, evidenciada por mayores ER-tej/CEM y ER-tej/HP, y menores RHP y RHP/GMD. En este contexto, los SSP evaluados presentaron ventajas en eficiencia energética y bienestar animal respecto a sistemas de CN sin sombra. Sin embargo, la densidad de árboles (2F vs. 4F) no mostró efectos claros sobre el consumo, la partición ni la eficiencia de la energía consumida. El número de animales, la duración del ensayo, la edad de los árboles y las condiciones meteorológicas extremas del período limitan la extrapolación de estos resultados, justificando la necesidad de continuar investigando en esta área.

7 BIBLIOGRAFÍA

- Aello, M. S. (2014). Índice de conversión alimenticia en la cría vacuna: Factores que lo afectan. En Grupo de Nutrición Animal de la Unidad Integrada Balcarce (Eds.), *Nutrición animal aplicada* (pp. 105-119). INTA.
- Allen, M. S. (2000). Effects of diet on short-term regulation of feed intake by lactating dairy cattle. *Journal of Dairy Science*, 83(7), 1598-1624.
[https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(00\)75030-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(00)75030-2)
- Asher, A., Shabtay, A., Cohen-Zinder, M., Aharoni, Y., Miron, J., Agmon, R., Halachmi, I., Orlov, A., Haim, A., Tedeschi, L. O., Carstens, G. E., Johnson, K. A., & Brosh, A. (2018). Consistency of feed efficiency ranking and mechanisms associated with inter-animal variation among growing calves. *Journal of Animal Science*, 96(3), 990-1009. <https://doi.org/10.1093/jas/skx045>
- Atrian, P., & Aghdam Shahryar, H. (2012). Heat stress in dairy cows (a review). *Research in Zoology*, 2(4), 31-37.
<http://article.sapub.org/10.5923.j.zoology.20120204.03.html>
- Balmelli, G., & Resquin, F. (2010). Productividad de diferentes especies de *Eucalyptus* sobre areniscas de Tacuarembó - Rivera. En M. Bemhaja & O. Pittaluga (Eds.), *30 años de investigación en suelos de arenas* (pp. 305-312). INIA.
- Barragán, W., Mahecha, L., Moreno, J., & Cajas, Y. (2017). Comportamiento ingestivo diurno y estrés calórico en vacas pastoreando en sistemas silvopastoriles y en una pradera sin árboles. *Livestock Research for Rural Development*, 29(12), Artículo e234. <https://www.lrrd.cipav.org.co/lrrd29/12/wils29234.html>
- Beatty, D. T., Barnes, A., Taylor, E., Pethick, D., McCarthy, M., & Maloney, S. K. (2006). Physiological responses of Bos taurus and Bos indicus cattle to prolonged, continuous heat and humidity. *Journal of Animal Science*, 84(4), 972-985. <https://doi.org/10.2527/2006.844972x>
- Beretta, V., & Simeone, Á. (2012). *UPIC PRO: Predicción de la performance animal en ganado de carne* (Versión 1.0) [Software]. MH Soluciones Lógicas.
<http://www.upic.com.uy/upicpro/ingresar>
- Berry, D. P., & Crowley, J. J. (2012). Residual intake and body weight gain: A new measure of efficiency in growing cattle. *Journal of Animal Science*, 90(1), 109-115. <https://doi.org/10.2527/jas.2011-4245>
- Bianchi, J. L. (1982). *Relación de distintos parámetros de la pastura con el consumo y ganancia en peso de novillos en pastoreo* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Colibri.
<https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/handle/20.500.12008/27479>
- Boscana, M., Busconi, A., & Bentancur, O. (2023). Wood production and financial return in two silvopastoral systems. *Agrociencia Uruguay*, 27, Artículo e793.
<https://doi.org/10.31285/agro.27.793>
- Brosh, A. (2007). Heart rate measurements as an index of energy expenditure and energy balance in ruminants: A review. *Journal of Animal Science*, 85(5), 1213-1227. <https://doi.org/10.2527/jas.2006-298>

- Brosh, A., Aharoni, Y., Degen, A. A., Wright, D., & Young, B. A. (1998). Effects of solar radiation, dietary energy, and time of feeding on thermoregulatory responses and energy balance in cattle in a hot environment. *Journal of Animal Science*, 76(10), 2671-2677. <https://doi.org/10.2527/1998.76102671x>
- Bueno, H., Bobadilla, P., & Huertas, S. (2017). Silvopastoreo: Una opción productiva sostenible. *Revista Plan Agropecuario*, (167), 32-34. https://www.planagropecuario.org.uy/uploads/magazines/articles/181_2787.pdf
- Cal Díaz, D. S., Irazabal Fernandez, R., & Peretti Sarli, M. B. (2023). *Efectos del estrés calórico sobre la productividad en vacas para carne* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Colibri. <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/handle/20.500.12008/41690>
- Capper, J. L., & Cady, R. A. (2020). The effects of improved performance in the U.S. dairy cattle industry on environmental impacts between 2007 and 2017. *Journal of Animal Science*, 98(1), 1-14. <https://doi.org/10.1093/jas/skz291>
- Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization. (2007). *Nutrient requirements of domesticated ruminants*.
- Contreras-Santos, J. L., Falla-Guzmán, C. K., Rodríguez, J. L., Fernando-Garrido, J., Martínez-Atencia, J., & Aguayo-Ulloa, L. (2022). Reserva de carbono en sistemas silvopastoriles: Un estudio en el Medio Sinú, Colombia. *Agronomía Mesoamericana*, 34(1), Artículo e49138. <https://doi.org/10.15517/am.v34i1.49138>
- Cottrill, B., Dawson, L., Yan, T., & Xue, B. (1990). *A review of the energy, protein and phosphorus requirements of beef cattle and sheep*. DEFRA.
- Cruz, P. (1997). Effect of shade on the carbon and nitrogen allocation in a perennial tropical grass, *Dichanthium aristatum*. *Journal of Experimental Botany*, 48(1), 15-23.
- Cuartas Cardona, C. A., Naranjo, J. F., Tarazona, A. M., & Barahona, R. (2013). Uso de la energía en bovinos pastoreando sistemas silvopastoriles intensivos con *Leucaena leucocephala* y su relación con el desempeño animal. *Revista CES Medicina Veterinaria y Zootecnia*, 8(1), 70-81. <https://revistas.ces.edu.co/index.php/mvz/article/view/2858/2065>
- Dahl, G. E., Tao, S., & Laporta, J. (2020). Heat stress impacts immune status in cows across the life cycle. *Frontiers in Veterinary Science*, 7, Artículo e116. <https://doi.org/10.3389/fvets.2020.00116>
- De Oliveira, C. C., Alves, F. V., Martins, P. G. M. de A., Karvatte Junior, N., Alves, G. F., de Almeida, R. G., Mastelaro, A. P., & da Costa e Silva, E. V. (2019). Vaginal temperature as indicative of thermoregulatory response in Nellore heifers under different microclimatic conditions. *PLoS ONE*, 14(10), Artículo e0223190. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0223190>
- Detmann, E., Valente, É. E. L., Batista, E. D., & Huhtanen, P. (2014). An evaluation of the performance and efficiency of nitrogen utilization in cattle fed tropical grass pastures with supplementation. *Livestock Science*, 162, 141-153. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2014.01.029>

- Di Marco, O. N., & Aello, M. S. (2001). Energy expenditure due to forage intake and walking of grazing cattle. *Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia*, 53(1), 105-110. <https://doi.org/10.1590/S0102-09352001000100017>
- Dirección General Forestal. (2025). *Superficie forestal del Uruguay (bosques plantados): Período 1975–2023*. MGAP. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/2025-02/Superficie%20Plantado%20Informe%202024.pdf>
- Echeverrigaray Quillet, J. J., & Quintela Martínez, J. (2024). *Evaluación productiva y ambiental de un sistema silvopastoril de Eucalyptus grandis con destino a madera sólida* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Colibri. <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/handle/20.500.12008/47423>
- Escalona, J., González, C. M., Llanos, P. N., Fedrigo, J., Benítez, V., & Viñoles, C. (2024). Effect of tree density on predatory behavior of weaned calves in *Eucalyptus grandis* silvopastoral systems during winter. *Agroforestry Systems*, 98, 1955-1966. <https://doi.org/10.1007/s10457-024-01016-4>
- Fedrigo, J. K., Báez, F., Santa Cruz, R., & Viñoles, C. (2021). Heat tolerance in cows of British breeds and their crosses with Bonsmara under grazing conditions. *Journal of Thermal Biology*, 102, Artículo e103118. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2021.103118>
- Fedrigo, J. K., Benítez, V., de Souza, M., Morales, V., Piñeyro, P., Viana, V., Blumetto, O., Cancela, H., Bertoncelli, P., Laufer, G., González-Barrios, P., Siri, P., Báez, F., García, L., Ciganda, V., Pravia, V., & Viñoles, C. (2024). Understanding the changes induced by the incorporation of trees in low densities into livestock systems: Relevance of a long-term interdisciplinary experimental platform. *Agroforestry Systems*, 98, 2337-2352. <https://doi.org/10.1007/s10457-024-01065-9>
- Fedrigo, J. K., Benítez, V., Santa Cruz, R., Posse, J. P., Barro, R., Hernández, J., Mantero, C., Morales Olmos, V., Silveira, E. D., & Viñoles, C. (2018). Oportunidades y desafíos para los sistemas silvopastoriles en Uruguay. *Sociedad de Medicina Veterinaria del Uruguay*, 54(209), 20-30. <https://www.revistasmvu.com.uy/index.php/smvu/article/view/83>
- Fedrigo, J. K., Santa Cruz, R., Benítez, V., Courdin, V., Ferreira, G., Posse, J. P., & Viñoles, C. (2019). Dynamics of forage mass, air temperature and animal performance in a silvopastoral system of Uruguay. *Agroforestry Systems*, 93(6), 2197–2204. <https://doi.org/10.1007/s10457-018-0335-2>
- Ferrell, C. L., & Jenkins, T. G. (1985). Cow type and the nutritional environment: Nutritional aspects. *Journal of Animal Science*, 61(3), 725-741.
- Forbes, T. D. (1988). Researching the plant-animal interface: The investigation of ingestive behavior in grazing animals. *Journal of Animal Science*, 66(9), 2369-2379. <https://doi.org/10.2527/jas1988.6692369x>
- Gallo, L. (2006). Sistemas silvopastoriles: ¿Por qué sistema silvopastoril? *Revista Plan Agropecuario*, (119), 30-32. https://www.planagropecuario.org.uy/publicaciones/revista/R119/R119_30.pdf

- Geremia, E. V. (2016). *Estrutura do dossel forrageiro e comportamento ingestivo de novilhas em Brachiaria brizantha cv. Piatã sob regimes de sombra em área de integração lavoura-pecuária-floresta* [Disertación doctoral]. Universidade de São Paulo.
- Gómez Zabala, J. (2022). *Estimación del gasto energético en vacas de cría con diferentes requerimientos nutricionales en pastoreo de campo natural y praderas mejoradas* [Tesis de maestría, Universidad de la República]. Colibri. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/35861>
- Google Earth. (2023). *Google Earth Pro* (versión 7.3.6.10155) [Software] <https://www.google.com/intl/es/earth/about/versions/>
- Gregorini, P., Tamminga, S., & Gunter, S. A. (2006). Behavior and daily grazing patterns of cattle. *The Professional Animal Scientist*, 22(3), 201-209. [https://doi.org/10.15232/S1080-7446\(15\)31095-0](https://doi.org/10.15232/S1080-7446(15)31095-0)
- Habeeb, A. A., Osman, S. F., Team, F. E. I., & Gad, A. E. (2023). The detrimental impact of high environmental temperature on physiological response, growth, milk production, and reproductive efficiency of ruminants. *Tropical Animal Health and Production*, 55(6), Artículo e388. <https://doi.org/10.1007/s11250-023-03805-y>
- Hall, M. (2024, 9 de julio). *Determining pasture yield: Direct and indirect methods of determining pasture yield*. Penn State Extension. <https://extension.psu.edu/determining-pasture-yield>
- Hernández, J., del Pino, A., Salvo, L., & Arrarte, G. (2009). Nutrient export and harvest residue decomposition patterns of a Eucalyptus dunnii Maiden plantation in temperate climate of Uruguay. *Forest Ecology and Management*, 258(2), 92-99. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.03.050>
- Hodgson, J. (1985). The control of herbage intake in the grazing ruminant. *Proceedings of the Nutrition Society*, 44(2), 339-346. <https://doi.org/10.1079/PNS19850054>
- Horwitz, W., & Latimer, G. W., Jr. (Eds.). (2005). *Official methods of analysis of AOAC International* (18th ed.). AOAC International.
- Hou, Y., Zhang, L., Dong, R. Y., Liang, M. Y., Lu, Y., Sun, X. Q., & Zhao, X. (2021). Comparing responses of dairy cows to short-term and long-term heat stress in climate-controlled chambers. *Journal of Dairy Science*, 104(2), 2346-2356. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-18946>
- Huertas, S. M., Bobadilla, P. E., Alcántara, I., Akkermans, E., & van Eerdenburg, F. J. C. M. (2021). Benefits of silvopastoral systems for keeping beef cattle. *Animals*, 11(4), Artículo e992. <https://doi.org/10.3390/ani11040992>
- INTA Informa. (2015). *Silvopastoril: Diseño integral del sistema* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=8yGgOxGGUMs>
- Jasinsky, A., Mattiauda, D. A., Ceriani, M., Casal, A., & Carriquiry, M. (2019). Heat production and body composition of primiparous Holstein cows with or without grazing pastures in early lactation. *Livestock Science*, 225, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2019.04.017>

- Kim, W.-S., Nejad, J. G., Park, K.-K., & Lee, H.-G. (2023). Heat stress effects on physiological and blood parameters, and behavior in early fattening stage of beef steers. *Animals*, 13(7), Artículo e1130. <https://doi.org/10.3390/ani13071130>
- Kovács, L., Kézér, F. L., Ruff, F., Jurkovich, V., & Szenci, O. (2018). Heart rate, cardiac vagal tone, respiratory rate, and rectal temperature in dairy calves exposed to heat stress in a continental region. *International Journal of Biometeorology*, 62, 1791-1797. <https://doi.org/10.1007/s00484-018-1581-8>
- Lapetina, J. (2008). *Sombra, abrigo y más: Incorporación de áreas arboladas a la ganadería*. Hemisferio Sur.
- Lara, J. E., Zimerman, M., Torres, J. C., Viana, H. J. A., Ortega Masague, M. F., Vega Parry, H. E. V., Martínez, J. A., Suárez, F. A., & Colcombet, L. (2023). Recría de vaquillonas de raza Criollo Argentino en un sistema silvopastoril y cielo abierto, en la Llanura Deprimida de Tucumán, Argentina. En J. E. Rivera, C. Viñoles, J. Fedrigo, A. Bussoni, P. Peri, L. Colcombet, E. Murguetio, A. Quadrelli, & J. Chará (Eds.), *Hacia una diversificación sostenible: XII Congreso Internacional de Sistemas Silvopastoriles* (p. 264). CIPAV.
- Lawrence, P., Kenny, D. A., Earley, B., Crews, D. H., & McGee, M. (2011). Grass silage intake, rumen and blood variables, ultrasonic and body measurements, feeding behavior, and activity in pregnant beef heifers differing in phenotypic residual feed intake. *Journal of Animal Science*, 89(10), 3248-3261. <https://doi.org/10.2527/jas.2010-3774>
- Lemes, A. P., Garcia, A. R., Pezzopane, J. R. M., Brandão, F. Z., Watanabe, Y. F., Cooke, R. F., Sponchiado, M., de Paz, C. C. P., Camplesi, A. C., Binelli, M., & Gimenes, L. U. (2021). Silvopastoral system is an alternative to improve animal welfare and productive performance in meat production systems. *Scientific Reports*, 11(1), Artículo e14092. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-93609-7>
- Llanos, P. N., González, C. M., Fedrigo, J. K., Benitez, V., & Viñoles, C. (2024). Impact of tree density in silvopastoral systems on thermal environment and productivity of beef cattle grazing native grasslands during summer. *Research Square*. Publicación anticipada en línea. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-5421232/v1>
- Mader, T. L., Davis, M. S., & Brown-Brandl, T. (2006). Environmental factors influencing heat stress in feedlot cattle. *Journal of Animal Science*, 84(3), 712-719. <https://doi.org/10.2527/2006.843712x>
- Marín, M. F. (2023). *Evaluación de la eficiencia de uso de la energía de vaquillonas Hereford en pastoreo* [Tesis de maestría, Universidad de la República]. Colibri. <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/handle/20.500.12008/36989>
- Marín, M. F., Naya, H., Espasandin, A. C., Navajas, E., Devincenzi, T., & Carriquiry, M. (2024). Energy efficiency of grazing Hereford heifers classified by paternal residual feed intake. *Translational Animal Science*, 8(1), Artículo etxae005. <https://doi.org/10.1093/tas/txae005>

- Martínez, M., & Pereira, M. (Eds.). (2011). *Pautas para el manejo del campo natural*. Instituto Plan Agropecuario.
<https://www.planagropecuario.org.uy/uploads/filemanager/source/2021/Librillos/pdf/Pautas%20para%20el%20manejo%20del%20campo%20natural.pdf>
- McDonald, P., Edwards, R. A., & Greenhalgh, J. F. D. (1985). *Animal nutrition* (3rd ed.). Longman.
- McLean, J. A., & Tobin, G. (1987). *Animal and human calorimetry*. Cambridge University Press.
- Mertens, D. R. (1987). Predicting intake and digestibility using mathematical models of ruminal function. *Journal of Animal Science*, 64(5), 1548-1558.
<https://doi.org/10.2527/jas1987.6451548x>
- Miron, J., Adin, G., Solomon, R., Nikbachat, M., Zenou, A., Shamay, A., Brosh, A., & Mabjeesh, S. Y. (2008). Heat production and retained energy in lactating cows held under hot summer conditions with evaporative cooling and fed two rations differing in roughage content and in vitro digestibility. *Animal*, 2(6), 843-848.
<https://doi.org/10.1017/S1751731108001900>
- Morales García, Y. B. (2022). *Gasto energético en vaca lechera pastoreando festuca* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Colibri.
<https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/handle/20.500.12008/42087>
- Munka, C. (2010). *Variación del índice de área foliar y de la evapotranspiración en Pinus taeda debido al manejo silvicultural* [Tesis de maestría, Universidad de la República]. Colibri. <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/bitstream/20.500.12008/1799/1/0036mun.pdf>
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2016). *Nutrient requirements of beef cattle* (8th rev. ed.). National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/19014>
- National Research Council. (2000). *Nutrient requirements of beef cattle* (7th rev. ed.). National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/9791>
- Neel, J. P. S., Felton, E. E. D., Singh, S., Sexstone, A. J., & Belesky, D. P. (2016). Open pasture, silvopasture and sward herbage maturity effects on nutritive value and fermentation characteristics of cool-season pasture. *Grass and Forage Science*, 71(2), 259-269. <https://doi.org/10.1111/gfs.12172>
- Oficina de Estadísticas Agropecuarias. (2024). *Anuario estadístico agropecuario 2024*. MGAP.
- Oliveira, C. P., de Sousa, F. C., da Silva, A. L., Schultz, É. B., Valderrama Londoño, R. I., & de Souza, P. A. (2025). Heat stress in dairy cows: Impacts, identification, and mitigation strategies: A review. *Animals*, 15(2), Artículo e249.
<https://doi.org/10.3390/ani15020249>
- Pigurina, G., Methol, M., Acosta, Y., Bassewitz, H., & Mieres, J. (1991). *Guía para la alimentación de rumiantes*. INIA.
<https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/2955/1/111219220807113951.pdf>

- Real Academia Española. (s.f.). Sotobosque. En *Diccionario de la lengua española* (23^a ed.). <https://dle.rae.es/sotobosque>
- Russo, R. O., & Botero Botero, R. (2005). *El componente arbóreo como recurso forrajero en los sistemas silvopastoriles*. Sitio Argentino de Producción Animal. https://www.produccion-animal.com.ar/produccion_y_manejo_pasturas/manejo_%20silvopastoril/42-componente_arboreo.pdf
- Sage, R. F., & McKown, A. D. (2006). Is C4 photosynthesis less phenotypically plastic than C3 photosynthesis? *Journal of Experimental Botany*, 57(2), 303-317.
- Sancho, L., Arocena, I., & Ordeig, L. (2021). *Definición, caracterización y cuantificación del área bajo sistemas silvopastoriles, para el seguimiento de las contribuciones establecidas en la Contribución Determinada a nivel Nacional de Uruguay*. MAP; MGAP; GEF; PNUD. https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/sites/ministerio-ambiente/files/documentos/noticias/informe_final.pdf
- Sejian, V., Bhatta, R., Gaughan, J. B., Dunshea, F. R., & Lacetera, N. (2018). Review: Adaptation of animals to heat stress. *Animal*, 12(suppl. 2), s431-s444. <https://doi.org/10.1017/S1751731118001945>
- Short, R. E., Bellows, R. A., Staigmiller, R. B., Berardinelli, J. G., & Custer, E. E. (1990). Physiological mechanisms controlling anestrus and infertility in postpartum beef cattle. *Journal of Animal Science*, 68(3), 799-816. <https://doi.org/10.2527/1990.683799x>
- Silveira, D. (2023). *Efecto de la sombra sobre la productividad y estructura de comunidades de campo natural* [Tesis doctoral, Universidad de la República]. Colibri. <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/handle/20.500.12008/41339>
- Simeone, A., Beretta, V., & Caorsi, C. J. (2014). Forestación y ganadería: Cuantificando el efecto de la sombra y el abrigo de los montes sobre la performance animal. En A. Simeone, & V. Beretta (Eds.), *16^a Jornada Anual de la Unidad de Producción Intensiva de Carne: Propuestas tecnológicas en ganadería para un país ganadero, agrícola y forestal* (pp. 24-27). UPIC.
- Sotelo, F., Coore, N., Soares de Lima, G., Hernández, C., Bertoncelli, P., & Fedrigo, J. K. (2021). El árbol y sus efectos en el microclima y en la productividad de forraje. En J. E. Rivera, L. Colcombet, R. Santos-Gally, E. Murgueitio, M. Díaz, R. M. Mauricio, P. Peri, & J. Chará (Eds.), *Sistemas silvopastoriles: Ganadería sostenible con arraigo e innovación* (pp. 315-324). CIPAV.
- Susenbeth, A., Dickel, T., Südekum, K.-H., Drochner, W., & Steingaß, H. (2004). Energy requirements of cattle for standing and for ingestion, estimated by a ruminal emptying technique. *Journal of Animal Science*, 82(1), 129-136
- Tafernaberry, A. I., Savian, J. V., Kessler, J. D., Ciappesoni, G., Jaurena, M., Fernández-Turren, G., & De Barbieri, I. (2024). Using faecal nitrogen as a marker to estimate intake and digestibility in sheep fed multi-species native forage. *Animal Feed Science and Technology*, 314(11), Artículo e115996. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2024.115996>

- Talmón Travers, D. (2025). *Mantenimiento: ¿El componente subvalorado de la eficiencia energética de vacas lecheras en pastoreo?* [Disertación doctoral, Universidad de la República]. Colibri. <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/handle/20.500.12008/50444>
- Talmón, D., Garcia-Roche, M., Mendoza, A., Mattiauda, D. A., & Carriquiry, M. (2020). Energy partitioning and energy efficiency of two Holstein genotypes under a mixed pasture-based system during mid and late lactation. *Livestock Science*, 239, Artículo e104166. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2020.104166>
- Talmón, D., Zhou, M., Carriquiry, M., Aarnink, A. J. A., & Gerrits, W. J. J. (2023). Effect of animal activity and air temperature on heat production, heart rate, and oxygen pulse in lactating Holstein cows. *Journal of Dairy Science*, 106(2), 1475-1487. <https://doi.org/10.3168/jds.2022-22257>
- Thom, E. C. (1959). The discomfort index. *Weatherwise*, 12(2), 57-61. <https://doi.org/10.1080/00431672.1959.9926960>
- Tonini, H., Moraes Genro, T. C., Trentin, G., Foggiatto, L., Schlic, F. E., & Fonseca, A. E. (2023). Relações entre o espaçamento arbóreo e características do campo nativo em sistemas silvopastoris no bioma Pampa. En J. E. Rivera, C. Viñoles, J. Fedrigo, A. Bussoni, P. Peri, L. Colcombet, E. Murgueitio, A. Quadrelli, & J. Chará (Eds.), *Hacia una diversificación sostenible: XII Congreso Internacional de Sistemas Silvopastoriles* (pp. 58-63). CIPAV.
- Varella, A. C., Barro, R. S., da Silva, J. L. S., Porfirio-da-Silva, V., & de Saibro, J. C. (2016). Silvopastoral systems in the cold zone of Brazil. En J. C. G. M. Peri, G. D. Martínez Pastur, & M. Rusch (Eds.), *Silvopastoral systems in Southern South America* (pp. 231-255). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24109-8_10
- Vázquez-Carrillo, M. F., Montelongo-Pérez, H. D., González-Ronquillo, M., Castillo-Gallegos, E., & Castelán-Ortega, O. A. (2021). Partición de la energía bruta consumida y el aporte de energía metabolizable en bovinos F1. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 8(2). Artículo e2976. <https://doi.org/10.19136/era.a8n2.2976>
- Viñoles Gil, C., Fedrigo, J. K., Benítez, V., García, L., & Báez, F. (2022). Avances en el conocimiento sobre Sistemas Silvopastoriles en Uruguay. *Archivos Latinoamericanos de Producción Animal*, 30(Suppl. 1), 43-53. <https://doi.org/10.53588/alpa.300505>
- Wade, M. H., & Agnusdei, M. (2001). *Morfología y estructura de las especies forrajeras y su relación con el consumo*. Sitio Argentino de Producción Animal. https://www.produccion-animal.com.ar/produccion_y_manejo_pasturas/pastoreo%20sistemas/76-morfologia_y_structura_de_forrajeras.pdf
- Wang, Z., Pote, J., & Huang, B. (2003). Responses of cytokinins, antioxidant enzymes, and lipid peroxidation in shoots of creeping bentgrass to high root-zone temperatures. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 128(5), 648-655. <https://doi.org/10.21273/jashs.128.5.0648>

8 ANEXO

RESUMEN CONGRESO ALPA

PRODUCCIÓN DE CALOR DE VAQUILLONAS DE CARNE EN SISTEMAS SILVOPASTORILES

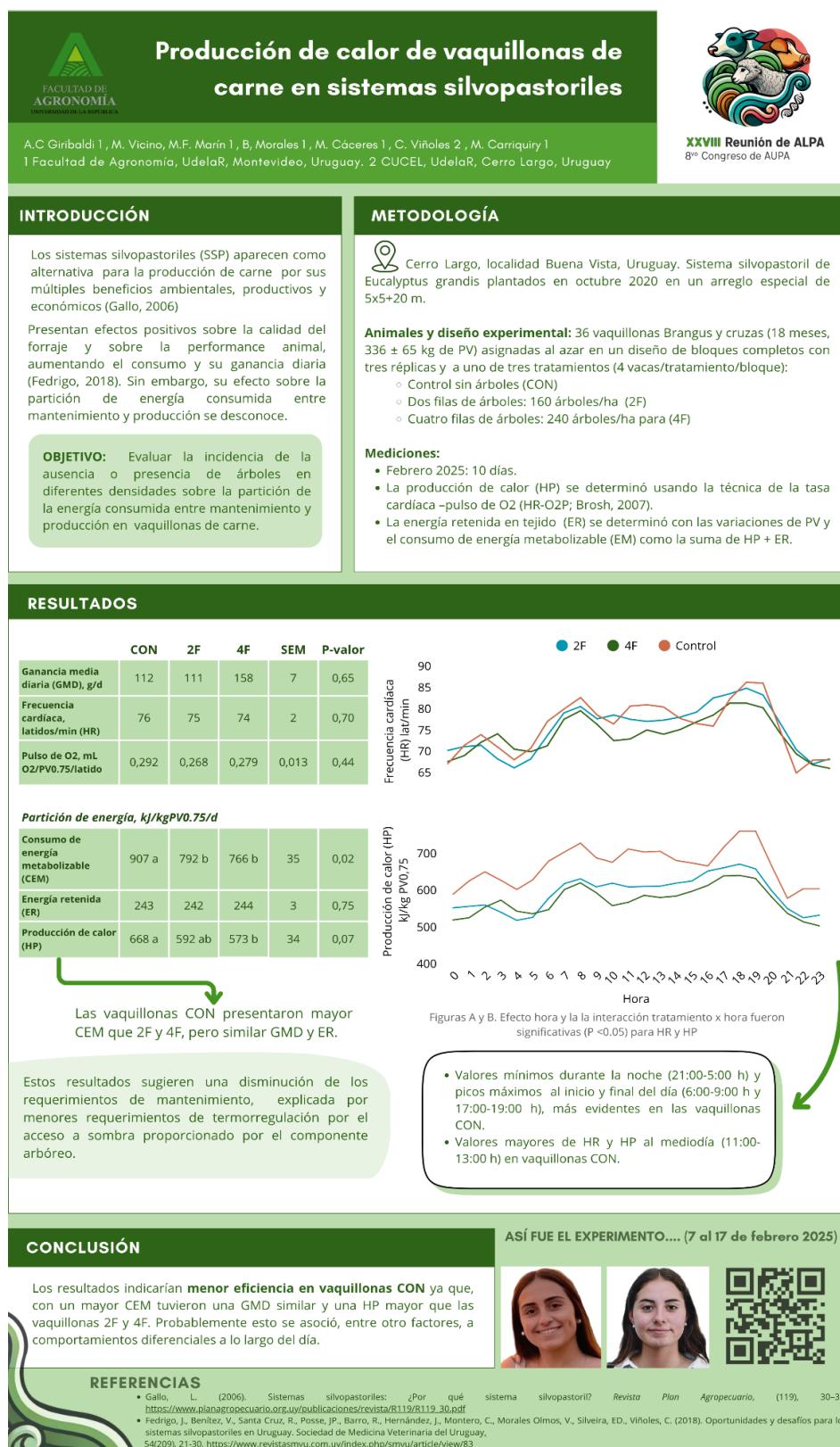
A.C Giribaldi¹, M. Vicino, M.F. Marín¹, B, Morales¹, M. Cáceres¹, C. Viñoles², M. Carriquiry¹

¹Facultad de Agronomía, Udelar, Montevideo, Uruguay. ²CUCEL, Udelar, Cerro Largo, Uruguay

Con el fin de evaluar la incidencia de la ausencia o presencia de árboles en diferentes densidades sobre la partición de la energía consumida entre mantenimiento y producción se cuantificó la producción de calor (HP) y la ganancia de peso (GDP) en 36 vaquillonas Brangus y cruzas (336 ± 65 kg) asignadas al azar a un diseño de bloques completos con tres tratamientos: control sin árboles (CON), dos filas de árboles (2F) y cuatro filas de árboles (4F) con tres repeticiones (4 vacas/tratamiento/bloque). La HP se determinó usando la técnica de tasa cardíaca (HR)-pulso de oxígeno durante 15 días en verano. Los datos fueron analizados con un modelo mixto y las medias se consideraron diferentes si $P < 0,05$. Si bien la HR no difirió entre tratamientos ($75 \pm 1,8$ lat/min), la HP promedio fue mayor para las vaquillonas CON que 2F y 4F (668, 592 y 573 ± 34 kJ/kg PV^{0,75}) mientras que no se observaron diferencias entre tratamientos en la GDP ($127 \pm 0,7$ g/d). A su vez, tanto la HR como la HP fueron afectadas por la hora del día y por la interacción tratamiento x hora ya que se observaron valores mínimos durante la noche (21:00-5:00 h) y picos máximos al inicio y final del día (6:00-9:00 h y 17:00-19:00 h), siendo éstos más evidentes en las vaquillonas CON, en las cuales también se observan valores mayores de HR y HP al mediodía (11:00-13:00 h). Estos resultados sugieren un menor requerimiento de energía para mantenimiento en vaquillonas 4F ya que tuvieron una GDP similar con menor HP que las vaquillonas CON y 2F y que probablemente esto se asoció, entre otro factores, a comportamientos diferenciales a lo largo del día.

Palabras clave: bioenergética, ganadería, silvopastoreo

Figura A1
E-poster presentado en ALPA 2025



Nota. Tomado de Garibaldi et al. (2025)

Bibliografía Anexo:

Garibaldi, A. C., Vicino, M., Marín, M. F., Morales, V., Cáceres, M., Viñoles, C., Carriquiry, M. (2025, 22 de setiembre). *Producción de calor de vaquillonas de carne en sistemas silvopastoriles* [Póster]. XXVIII Reunión de ALPA, 8^{vo} Congreso de AUPA, Punta del Este, Maldonado.