



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

Programa de Doctorado
Ingeniería Agraria, Alimentaria, Forestal y del Desarrollo Rural Sostenible

TESIS DOCTORAL

INTEGRACIÓN DE SENSORES REMOTOS Y PRÓXIMOS PARA EL ESTUDIO DE LA DINÁMICA ESPACIOTEMPORAL DEL COMPORTAMIENTO ANIMAL EN PASTOREO

*INTEGRATION OF REMOTE AND PROXIMATE SENSORS FOR
THE STUDY OF THE SPATIOTEMPORAL DYNAMICS
OF ANIMAL GRAZING BEHAVIOR*

Jéssica Aimeé Hassán Vásquez

Dirigida por:

Dr. Francisco Maroto Molina
Dr. José Emilio Guerrero Ginel

Córdoba, abril de 2023

TITULO: *Integración de sensores remotos y próximos para el estudio de la dinámica espaciotemporal del comportamiento animal en pastoreo*

AUTOR: *Jéssica Aimée Hassán Vásquez*

© Edita: UCOPress. 2023
Campus de Rabanales
Ctra. Nacional IV, Km. 396 A
14071 Córdoba

<https://www.uco.es/ucopress/index.php/es/>
ucopress@uco.es



TÍTULO DE LA TESIS: Integración de sensores remotos y próximos para el estudio de la dinámica espaciotemporal del comportamiento animal en pastoreo.

DOCTORANDO/A: Jéssica Aimeé Hassán Vásquez.

INFORME RAZONADO DEL/DE LOS DIRECTOR/ES DE LA TESIS

La presente Tesis doctoral se ha realizado dentro del Programa de Doctorado “Ingeniería Agraria, Alimentaria, Forestal y del Desarrollo Rural Sostenible” de la Universidad de Córdoba y cumple con los requisitos de la normativa vigente en cuanto a originalidad y relación con el programa de doctorado. La metodología empleada es la adecuada y los resultados obtenidos son relevantes desde el punto de vista científico y de utilidad práctica.

La doctoranda Dña. Jéssica A. Hassán Vásquez, ha realizado su actividad investigadora con interés, cumpliendo tanto el Plan de Investigación como el de Formación, superando en este último caso los requisitos necesarios, tal como exige la actual normativa de los Estudios de Doctorado.

De los resultados de su investigación, que se plasman en su tesis doctoral, se han generado un artículo científico y un capítulo de libro. A continuación, se detallan los productos derivados de la tesis.

Artículo científico en revista indexada en el Journal Citation Reports (JCR):

Hassán Vásquez, J.A., Maroto Molina, F., Guerrero Ginel, J.E. (2022). GPS tracking to monitor the spatiotemporal dynamics of cattle behavior and their relationship with feces distribution. *Animals* 12(18), 2383; <https://doi.org/10.3390/ani12182383>

Factor de impacto (2021): 3.231

Categoría y posición: Agriculture, Dairy & Animal Science 13/62 (Q1), Veterinary Sciences 16/144 (Q1)

Capítulo de libro (con revisión por pares en editorial de prestigio):

Hassán Vásquez, J.A., Maroto Molina, F., Guerrero Ginel, J.E. (2022). Integration of precision livestock farming and remote sensing to enhance grazing management in agrosilvopastoral systems: practical considerations. En: T. Banhazi, V. Halas and F. Maroto-Molina (eds.) Practical Precision Livestock Farming (pp. 175-191). Wageningen Academic Publishers. Wageningen, Países Bajos. https://doi.org/10.3920/978-90-8686-934-3_11

Como directores consideramos que la presente Tesis Doctoral reúne las exigencias científicas necesarias para ser defendida con el fin de obtener el título de Doctor por la Universidad de Córdoba.

Por todo ello, se autoriza la presentación de la Tesis Doctoral.

Córdoba, abril de 2023

Firma de los directores

**MAROTO
MOLINA
FRANCISCO -
74695610M**

Firmado digitalmente por MAROTO MOLINA FRANCISCO - 74695610M
Fecha: 2023.04.07 13:42:10 +02'00'

Fdo.: Francisco Maroto Molina

**GUERRERO
GINEL JOSE
EMILIO -
24096630J**

Firmado digitalmente por GUERRERO GINEL JOSE EMILIO - 24096630J
Nombre de reconocimiento (DN): c=ES, serialNumber=IDCES-24096630J, givenName=JOSE EMILIO, sn=GUERRERO GINEL, cn=GUERRERO GINEL JOSE EMILIO - 24096630J
Fecha: 2023.04.07 12:34:06 +02'00'

Fdo.: José Emilio Guerrero Ginel

Agradecimientos:

A mi Dios por siempre estar en mi vida, en mi andar, siendo la luz que me guía y que siempre pone en mi camino tantas personas maravillosas que me regalan hermosos recuerdos.

*A mis hijos y marido que han sido los más sacrificados en tiempo y atención para poder sacar adelante este proyecto de superación familiar... Al estilo español... "Os amo"
"Carlos, Iker, Hanna y mi Jaime"*

A mis hermanos y toda mi familia a la distancia, quienes cada uno siempre ponen un granito de arena en mi costal de amor y felicidad.

Muy especialmente quiero agradecer a José Emilio Guerrero y Paco Maroto, que han sido dos tutores muy capaces en todos los sentidos, son unos profesionales admirables de mucha capacidad y fabulosas personas, ya que esta etapa de mi vida ha sido complicada, tanto personal como académicamente, pero constructivamente positiva. Gracias a ambos por estar "disponibles y dispuestos" y por vuestra gran paciencia y dedicación, creo que juntos formáis un gran equipo de trabajo y estoy muy feliz y orgullosa de haberos tenido como directores de esta tesis. De igual forma al Licenciado Felipe Molina por su apoyo y confianza al prestarme su finca para desarrollar mi trabajo.

Al gran Sergio Andicoberry, por compartir conmigo su experiencia y conocimientos, por siempre estar ahí para ayudarme con el uso del QGIS; y a mi primera amiguita 100% cordobesa, Helena.

Por último, pero no menos importante, quiero expresar mi eterno agradecimiento al Instituto de Innovación Agropecuaria de Panamá (IDIAP), en especial al Dr. Axel Villalobos, por apoyarme y tener confianza en mí, al concederme el permiso laboral para mi superación profesional, e igualmente le agradezco al Dr. Arnulfo Gutiérrez por su apoyo.

A tod@s, ¡GRACIAS!

Dedicado,

*A la memoria de mis padres por ser la roca en los cimientos de mi vida,
hasta el cielo y más allá.*

Índice de contenidos

Resumen	7
Abstract	9
Introducción	11
Objetivos	15
Revisión bibliográfica	17
Materiales y Métodos	26
Características del área de estudio	27
Animales monitorizados	29
Caracterización de los factores que afectan el comportamiento animal en pastoreo	31
Seguimiento de la distribución de las heces	35
Procesamiento de la información de los collares GPS	37
Análisis espacial geostatístico.....	38
Índice de selección de Jacobs	39
Modelización de la posición del ganado y la distribución del estiércol	40
Resultados y Discusión	42
Caracterización del comportamiento animal.....	43
Factores que afectan la distribución del ganado en las áreas de pastoreo	45
Relación entre la presión animal y el cambio en la vegetación (NDVI)	55
Autocorrelación espacial de las posiciones GPS y las heces	68
Relación de los patrones espaciales y temporales con la distribución de las heces.....	72
Calibración y validación de los modelos de predicción de la distribución de las heces.....	77
Conclusiones	85
Referencias Bibliográficas	89

Índice de tablas

Tabla 1. Características de los animales monitoreados con collares GPS.....	31
Tabla 2. Estadísticos de la presencia de animales, medida en posiciones GPS, número de segmentos de trayectoria y tiempo total de permanencia y la acumulación de heces en las parcelas de muestreo.....	64
Tabla 3. Análisis de vecinos más próximos según datos de los collares GPS.	70
Tabla 4. Distribución de las posiciones GPS y de las heces en función de los factores espaciales.....	73
Tabla 5. Índice de selección de Jacobs para la distribución de los animales y estiércol según los factores	76
Tabla 6. Modelos de predicción validados en el ámbito temporal.....	78
Tabla 7. Modelos de predicción validados en el ámbito espacial.....	79

Índice de figuras

Figura 1. Distribución geográfica de las dehesas en la Península Ibérica	19
Figura 2. Finca Las Albaidas en la Campiñuela Baja de Córdoba.....	27
Figura 3. Datos de temperatura y precipitación del área de estudio	28
Figura 4. Áreas de pastoreo en la finca “Las Albaidas”	29
Figura 5. Animales en pastoreo en finca Las Albaidas.	29
Figura 6. Bovino con dispositivo de rastreo GPS en collar.....	30
Figura 7. Distribución de las parcelas fijas de muestreo de heces en la finca del estudio	36
Figura 8. Marcado de las heces individuales para evitar el doble recuento.....	36
Figura 9. Patrones espaciales de agrupamiento y dispersion.	39
Figura 10. Procedimiento para el pronóstico del número de heces.	41
Figura 11. Actividades de los animales distribuidas en las 24 horas del día.	43
Figura 12. Distribución de las actividades diarias de los animales por estación del año.....	44
Figura 13. Distribución de los datos GPS según momento del día y estación del año.	45
Figura 14. Mapa del modelo digital del terreno según el porcentaje de pendiente. 46	
Figura 15. Superficie disponible y presión animal (datos GPS ha ⁻¹) para las categorías de pendiente.	46
Figura 16. Mapa de los sitios del terreno según exposición a la luz solar.....	47
Figura 17. Superficie disponible y presión animal para las categorías de exposición al sol.	48
Figura 18. Mapa de elevaciones.....	48

Figura 19. Superficie disponible y presión animal para las categorías de elevación (msnm).....	49
Figura 20. Mapa de los rangos de distancia al punto de agua.....	50
Figura 21. Superficie disponible y presión animal para las categorías de distancia al agua.....	51
Figura 22. Tipos de cobertura y distribución de la fracción de cabida cubierta.	52
Figura 23. Superficie disponible y posiciones GPS de los animales según las categorías de la fracción de cabida cubierta.....	53
Figura 24. Distribución de los sitios ecológicos.....	54
Figura 25. Superficie disponible y presión animal por sitio ecológico.	54
Figura 26. Evolución del NDVI en los dos periodos del estudio: a) primer periodo (invierno) y b) segundo periodo (final de invierno, primavera e inicio de verano). 55	
Figura 27. Evolución del NDVI de febrero a junio 2021.....	56
Figura 28. Relación entre el cambio del NDVI y la presencia de animales por píxel.	57
Figura 29. Distribución geográfica de la presencia de animales y cambio del NDVI.	58
Figura 30. Relación entre el cambio del NDVI y la presencia de animales por píxel que corresponden al comportamiento de pastoreo.....	60
Figura 31. Relación entre el cambio del NDVI y la presencia de animales para los datos del comportamiento de pastoreo y los píxeles con menos del 10% de cabida cubierta.....	61
Figura 32. Mapa de la relación entre el cambio del NDVI y la presencia de animales para los datos del comportamiento de pastoreo y los píxeles con menos del 10% de cabida cubierta.....	62
Figura 33. Gráficas de caja para las posiciones GPS y la acumulación de heces.	65

Figura 34. Relación lineal entre el recuento de heces y la presencia de animales, estimada como recuento de posiciones GPS (a, d), recuento de segmentos de trayectoria (b, e) o tiempo de permanencia en la parcela (c, f), incluyendo (a, b, c) y excluyendo (d, e, f) “	66
Figura 35. Coeficiente de correlación entre el número de heces y el número de posiciones por parcela, por semana y por semana acumulada.	67
Figura 36. Coeficiente de correlación entre el número de heces y el número de posiciones por parcela acumulada.	68
Figura 37. Hotspots según la presencia animal y de heces.	68
Figura 38. Distribución de los datos GPS y de heces en las 90 parcelas.	69
Figura 39. Mapa de autocorrelación espacial de los hotspots y coldspots en las 90 parcelas.	71
Figura 40. Porcentaje semanal de heces en los dos puntos principales de deposición de heces en función de la temperatura ambiente.	74
Figura 41. Efecto de la interacción temperatura ambiente-distancia al agua en la distribución de las heces.	75
Figura 42. Efecto de la interacción temperatura ambiente-cubierta del dosel en la distribución de las heces.	75
Figura 43. Relación entre el número observado de heces y el predicho para el mejor modelo de la Tabla 6 y para el modelo equivalente que excluye los datos del GPS. (a) Conjunto de datos de calibración, (b) Conjunto de datos de validación.	80

Resumen

Los sistemas agrosilvopastorales son ecosistemas complejos que ocupan grandes áreas en diferentes regiones del mundo. A pesar de su importancia para proporcionar numerosos servicios ecosistémicos, incluida la producción de alimentos, su futuro está amenazado por varias razones, entre las cuales podemos destacar su baja rentabilidad económica, que compromete su sostenibilidad. Esta situación está llevando a una intensificación de estos ecosistemas y a una simplificación de la gestión, muchas veces de forma imprudente.

Una potencial solución para mitigar la problemática de los sistemas agrosilvopastorales es el desarrollo e implementación de tecnologías asociadas al paradigma de la ganadería de precisión (“Precision Livestock Farming”, PLF), las cuales tienen el potencial de proporcionar datos que, vinculados con herramientas de apoyo a la toma de decisiones, pueden mejorar la provisión de servicios ecosistémicos y la sostenibilidad. La presente Tesis Doctoral aborda el estudio de la dinámica espaciotemporal del ganado en pastoreo continuo en fincas de dehesa mediante la integración de datos obtenidos con sensores próximos (collares GPS) y remotos (satélites Sentinel 2) con otras fuentes de datos abiertos sobre el entorno: datos meteorológicos, edafológicos, topográficos, etc.

Mediante el uso de las posiciones GPS, se ha caracterizado la distribución del ganado vacuno sobre el terreno en sus componentes espacial y temporal, identificando los sitios de mayor concentración de posiciones (hotspots) y los de menor presencia animal (coldspots). El ganado mostró una fuerte preferencia por los terrenos llanos (pendiente <10%) y las zonas cercanas al agua (<100 m del abrevadero), correspondiendo la mayor parte las posiciones en estas zonas a un comportamiento de descanso.

Partiendo de la caracterización de la intensidad de uso de distintas zonas de pastoreo, se ha estudiado el efecto de la presencia animal sobre, por un lado, la evolución de la vegetación, estimada a partir de datos remotos (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada – NDVI – calculado con datos de Sentinel 2), y, por el otro, sobre la uniformidad de la distribución de las heces en el territorio,

siendo este último un aspecto importante desde el punto de vista del reciclaje de nutrientes en el sistema productivo.

Con las tecnologías utilizadas ha sido posible cuantificar un aspecto crítico del comportamiento en pastoreo, como es la dispersión del ganado y su comportamiento en las distintas épocas del año, concluyéndose que los collares GPS pueden proporcionar datos significativos sobre la distribución y el comportamiento de los animales, que pueden utilizarse para modelar la distribución de las heces, e igualmente es un método muy útil para determinar los sitios preferentemente utilizados por los animales (hotspots), lo cual brinda una herramienta para mejorar las estrategias de gestión del pastoreo de cara a favorecer su sostenibilidad.

Abstract

Agrosilvopastoral systems are complex ecosystems that occupy large areas in different regions of the world. Despite its importance in providing numerous ecosystem services, including food production, its future is threatened for several reasons, among which we can highlight its low economic profitability, which compromises its sustainability. This situation is leading to an intensification of these ecosystems and a simplification of management, often unwisely.

A potential solution to mitigate some of the problems of agrosilvopastoral systems is the development and implementation of technologies associated with the new paradigm of precision livestock farming (PLF), which have the potential to provide data that, linked to decision support systems, may improve the provision of ecosystems services and sustainability. This Doctoral Thesis addresses the study of the spatiotemporal dynamics of cattle under continuous grazing management on dehesa farms through the integration of data gathered by nearby sensors (GPS collars) and remote sensors (Sentinel 2 satellites) with other sources of open data, such as meteorological records, soil and topography data, etc.

Using GPS positions, the distribution of cattle on the ground has been characterized in its spatial and temporal components, identifying the sites with the highest concentration of positions (hotspots) and those with the least animal presence (coldspots). Cattle showed a strong preference for flat terrain (slope <10%) and areas close to water (<100 m from the watering trough). Most of the positions in these areas corresponding to resting behavior.

Based on the characterization of the use intensity of different grazing areas, we studied the effect of animal presence on the evolution of vegetation, estimated from remote data (Normalized Difference Vegetation Index – NDVI – calculated from Sentinel 2 data), and on the uniformity of the distribution of feces, this last aspect being important from the point of view of nutrient recycling.

With the technologies used, it has been possible to quantify a critical aspect of grazing behavior, such as the dispersion of cattle and their behavior at different time scales, concluding that GPS collars can provide significant data on the

distribution and behavior of cattle, which can be used to model the distribution of feces. It is also very useful to determine the preferred sites (hotspots), which provides a tool to improve grazing management strategies in order to favor its sustainability.

Introducción

INTRODUCCIÓN

La ganadería es un sector clave dentro de la agricultura, contribuyendo al cumplimiento de la agenda 2030 en lo concerniente a la seguridad alimentaria, la nutrición, el alivio de la pobreza y el crecimiento económico. En España alrededor de un 40% de la Producción Final Agraria proviene de la actividad ganadera. El ganado bovino es uno de los más importantes de España, tanto por número de cabezas como por su distribución geográfica, destacando entre sus usos tanto la producción de carne como la producción de leche y derivados lácteos. Asimismo, cabe destacar que el ganado vacuno está fuertemente ligado al tejido social del medio rural español (MAPA, 2022).

En España, según indica el anuario de estadística agraria (MAPA, 2020) el 19% (9.446.884 ha) de la superficie total agraria corresponde a la categoría “pastos”, que incluyen pastizales (65%), prados naturales (12%) y eriales a pastos (23%). A nivel mundial, cerca de una cuarta parte de la superficie de la tierra se usa en pastoreo y más del 20% de estas áreas son pastizales con alta degradación causada por el sobrepastoreo, lo que a su vez provoca la compactación de los suelos, la erosión y el deterioro de los servicios ecosistémicos (Steinfeld et al., 2006), todo ello en un contexto de creciente demanda de alimentos para una población mundial estimada para el año 2050 en alrededor de 10 mil millones de personas.

Los nuevos paradigmas en la gestión de pastos identifican la importancia del monitoreo de la distribución espacial y temporal del ganado, con el fin de mejorar su manejo, mitigando así los efectos negativos en las áreas de pastoreo, y favoreciendo la provisión de servicios ecosistémicos (Rodríguez-Ortega et al., 2014; Rouquette y Aiken, 2019). Comprender el comportamiento de los animales, es decir, cómo los animales que pastan en un campo se distribuyen y se mueven a través de las áreas de pastoreo y qué actividades realizan en cada área, es crucial para desarrollar estrategias de manejo que aumenten la productividad potencial de los sistemas de pastoreo y también disminuyan su impacto negativo en el medioambiente (por ejemplo, las pérdidas o acumulación de nutrientes en el agua o suelo y las emisiones de gases de efecto invernadero).

En este contexto los sistemas ganaderos tienen el reto de mantener un equilibrio entre la producción y el medioambiente, más cuando hay evidencias de

impactos negativos en los ecosistemas en relación con la composición de la comunidad vegetal o el desplazamiento de la vida silvestre (Ganskopp y Bohnert, 2009). También es importante señalar que la disminución de la ganadería extensiva se puede asociar con los procesos de despoblamiento en entornos rurales (Brennan et al., 2021), que dificultan el manejo del ganado por la escasez de mano de obra para distintas actividades ganaderas, como el pastoreo.

En España, en los últimos años, la ganadería extensiva y el pastoreo han ido adquiriendo un protagonismo creciente en diferentes ámbitos, no sólo en áreas técnicas relacionadas con la agricultura y la ganadería, sino cada vez más en cuestiones relacionadas con la sostenibilidad, la conservación del patrimonio natural, la prevención y mitigación del cambio climático, el desarrollo rural o la ordenación y gestión del territorio, entre otros aspectos (Ruiz-Mirazo et al. 2017).

El debate social sobre la mitigación del cambio climático mediante la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en la agricultura se centra en gran medida en la ganadería, especialmente en la producción de rumiantes. Estudios recientes demuestran que existe una relación directa entre la extensificación ganadera y la reducción de la huella de carbono (Reyes-Palomo et al., 2022). En la ganadería extensiva de vacuno, destacan las zonas de las dehesas, que son sistemas de pastizales con árboles dispersos de encina, alcornoque u otras especies, y donde solía predominar el ganado de razas autóctonas españolas, como la Avileña-Negra Ibérica, la Morucha y la Retinta (Milán et al., 2006). Hoy día, gran parte de estas razas han sido desplazadas por razas foráneas con una mayor producción cárnica, sobre todo la Limusina.

En los sistemas de pastoreo, las aplicaciones de la ganadería de precisión (PLF) podrían ofrecer a los ganaderos un medio de control y gestión en tiempo real, pudiendo mejorar potencialmente los resultados productivos. La PLF forma parte de la agricultura 4.0, la cual comprende un conjunto de tecnologías (equipos, software y sistemas) enfocadas en la digitalización de los procesos agrícolas, con el propósito de mejorar el proceso de producción de principio a fin, haciéndolo más rápido, económico y sostenible. Además, la PLF puede apoyar la investigación sobre el comportamiento animal y la conservación de los pastizales en la ganadería extensiva.

En el mundo actual, los sectores agroganaderos se ven obligado a adaptarse a entornos cada vez más complejos y dinámicos, donde el acceso rápido a la información para la toma de decisiones es un factor clave. Según Aquilani et al. (2022), las técnicas de PLF son herramientas que pueden ayudar en la toma de decisiones, en la investigación sobre el comportamiento de los animales y en la conservación de las áreas de pastoreo del ganado, evitando tanto la sobre como la subutilización de las mismas, y mejorando el bienestar de los animales.

Objetivos

OBJETIVOS

La presente Tesis Doctoral ha evaluado el uso de sensores próximos y remotos para el monitoreo del comportamiento del ganado vacuno en el sistema de manejo extensivo de las dehesas españolas. Para ello se establecieron un objetivo general y tres objetivos específicos que permitirían estudiar diferentes aspectos del comportamiento animal y sus efectos sobre el ecosistema, como se describe a continuación.

El objetivo general fue evaluar el potencial de la integración de los datos provenientes de sensores próximos y remotos, con datos del entorno y del manejo ganadero, para apoyar la toma de decisiones en la gestión pastoral.

El objetivo general se dividió en los siguientes objetivos específicos:

1. Evaluar el potencial de los collares GPS para el análisis del uso de las áreas destinadas al pastoreo.
2. Analizar la dinámica del uso de sitios por los animales y su relación con la evolución de la vegetación a través del índice NDVI calculado a partir de imágenes satélite.
3. Determinar los principales factores que influyen en la distribución de los animales en las áreas de pastoreo y su relación con la distribución de las heces animales.

Revisión bibliográfica

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Los sistemas agrosilvopastorales son sistemas de producción complejos que combinan árboles, arbustos, pastos, cultivos y animales. Tienen sus raíces en principios ecológicos sólidos y exigen habilidades para gestionar la complejidad del uso de la tierra. A este tenor existen variantes o diseños que se practican a pequeña y gran escala en las regiones templadas y tropicales del mundo (Sharrow et al., 2009). Estos sistemas ocupan grandes áreas en varios continentes y desempeñan un papel clave en la prestación de numerosos servicios ecosistémicos, como la producción de alimentos, el almacenamiento de carbono, la retención de agua, la conservación del suelo, la biodiversidad, y el paisaje (Shin et al., 2020).

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), como parte de la agenda global 2030, plantean estrategias para prevenir, detener y revertir la degradación de los ecosistemas. En este contexto, la Red Global de Sistemas Silvopastoriles promueve el escalamiento de estos sistemas en el mundo (Chará et al., 2019). La gestión adecuada de estos complejos sistemas requiere habilidades muy específicas, para preservar o mejorar su estado y funcionalidad (von Müller et al., 2017). Sin embargo, la tendencia actual es la reducción de la complejidad de los sistemas (por ejemplo, eliminando arbustos, reduciendo la diversidad de los pastos, etc.) en lugar de mejorar su gestión, lo que tiene grandes implicaciones en su sostenibilidad económica, ecológica y social.

La evidencia científica de los beneficios ecológicos y económicos del agrosilvopastoreo se ha ido acumulando rápidamente en los últimos años. Sin embargo, también ha revelado algunas de las lagunas de la investigación, las cuales deben ser abordadas para así ayudar a mejorar no solo la sostenibilidad económica y ambiental de estos sistemas, sino también su aceptabilidad social.

De una forma simplificada podemos decir que una expresión poco antropizada de un sistema silvopastoral es la sabana, que es un sistema de sucesión media de pastizales intercalados con árboles y arbustos (Freeman y Jose, 2009). Según Fedehesa (2022), los ecosistemas ganaderos de las dehesas, cuyo paisaje es considerado como la sabana de Europa, ocupan unos cuatro millones de hectáreas en España y aproximadamente un millón de hectáreas en Portugal, siendo un paisaje característico de la Península Ibérica (Figura 1).

La dehesa es un ecosistema antrópico complejo derivado del bosque mediterráneo con un papel clave en la conservación de suelos y de la biodiversidad (Díaz y Pulido, 2009). Estos sistemas están formados por pastizales con plantas herbáceas utilizadas en el pastoreo de diferentes especies en libertad, entre ellas, los cerdos ibéricos, el ganado vacuno, ovino y caprino. Aparecen diferentes especies arbóreas, entre las más comunes las pertenecientes al género *Quercus*, que se protegen y se podan para producir bellotas con la que se alimentan los cerdos ibéricos en otoño durante la montanera (Parsons, 1962). El sotobosque se suele desbrozar cada 7 o 10 años para evitar que los arbustos se apoderen del espacio. Las encinas se espacian para maximizar la productividad global, equilibrando la luz para las especies herbáceas del sotobosque, el uso del agua en los suelos y la producción de bellotas para los cerdos (Joffre et al., 1999).



Figura 1. Distribución geográfica de las dehesas en la Península Ibérica

Fuente: Fedehesa (2022)

Una mayor presión animal sobre las dehesas puede provocar daños ambientales, especialmente cuando no se acompaña de una mejora en la gestión de los pastos. En España, la práctica desaparición de los pastores por limitaciones económicas y sociales ha llevado a la generalización de los sistemas de pastoreo continuo, en los que los animales pastan libremente en cada cercado o potrero durante varias semanas o meses. Actualmente, la sostenibilidad de las dehesas está

amenazada por varios factores, entre ellos la intensificación de la producción animal buscando una mayor rentabilidad económica (Maroto-Molina et al., 2018).

Mejorar la gestión de estos ecosistemas, sobre la base del análisis de la dinámica espaciotemporal de la distribución de los animales en los pastos, es un factor clave, ya que puede determinar las interacciones entre animales, vegetación y suelo, así como mejorar las estrategias de manejo específicas, para poder alcanzar la mayor eficacia y eficiencia del sistema favoreciendo una mayor sostenibilidad ambiental, social y económica (Draganova et al., 2016; White et al., 2001).

Al contrario de lo que cabría esperar respecto a la homogeneidad del pastoreo de los animales en el campo, en realidad la relación animal-territorio es compleja, ya que el comportamiento animal se ve afectado por múltiples factores (Cuchillo Hilario et al., 2017). El ganado, como parte integral de los sistemas, puede aumentar la eficiencia del uso de los recursos y la intensidad del uso de la tierra, pero también puede ser un motor para el deterioro de los recursos naturales y la pérdida de servicios ecosistémicos (Lusiana et al., 2012). De hecho, cuando los animales muestran una fuerte preferencia por determinadas partes del terreno disponible, pueden producirse problemas de sobrepastoreo.

En este contexto, Solano et al. (2018) demostraron que el movimiento y la distribución espacial del ganado se ve afectado por la ubicación de los comederos y bebederos en la pradera. En la literatura científica se han identificado varios factores con un efecto significativo en el comportamiento de pastoreo y la distribución de los animales. Algunos de estos son la carga ganadera (Tomkins et al., 2009), la ubicación del agua y la sombra (White et al., 2001), las condiciones climáticas (Bailey y Brown, 2011), las características de los pastos (Manning et al., 2017a), y la topografía del terreno (Raynor et al., 2021).

En la actualidad vivimos una revolución digital en la agricultura en la que se han acuñado diferentes términos como *agricultura inteligente* (smart farming) y *agricultura de precisión* (precision farming), y se están desarrollando e implementando diversas tecnologías para el seguimiento de los animales y los cultivos, como sensores remotos montados en plataformas aéreas (drones, satélites...) para monitorizar los campos y proporcionar datos continuos para,

potencialmente, mejorar la toma de decisiones a escala de la explotación agraria (Trotter et al., 2010; Walter et al., 2017; Morgan-Davies et al., 2018; Veissier, 2019)

Cabe señalar que la primera aplicación masiva de ganadería de precisión, años antes de que se acuñara el término Precision Livestock Farming (PLF), fue el medidor electrónico de producción individual de leche (Cox, 2003; Berckmans, 2006). La ganadería de precisión tiene como principio fundamental aumentar la eficiencia y reducir el impacto medioambiental mejorando el proceso del monitoreo y manejo en tiempo real de las unidades de producción más pequeñas (el enfoque por animal); buscando el aumento de la producción de alimentos y el bienestar animal de manera sostenible (Halachmi y Guarino, 2016; Tedeschi et al. 2021).

La información alineada con el medioambiente, la producción y el bienestar animal podrían integrarse en un enfoque ganadero de precisión (Laca, 2009), lo que representa una herramienta integradora para mejorar la sostenibilidad de los sistemas de pastoreo de rumiantes mediante el diseño de granjas inteligentes (Odintsov Vaintrub et al. 2021; Aquilani et al., 2022). En el mismo sentido, la ganadería de precisión es esencial para detectar animales que necesitan atención adicional debido a problemas de salud o bienestar, ya que el tiempo que un ganadero puede dedicar a cada animal se ve disminuido debido al tamaño creciente de los rebaños y las crecientes demandas de eficiencia.

Conocer cómo el ganado utiliza las áreas de pastoreo nos permitirá manejar adecuadamente estas áreas evitando tanto la sobre como la subutilización de estas y por ende su degradación. Específicamente, el monitoreo del comportamiento del ganado en los pastos ha sido de gran interés en los últimos años y las técnicas utilizadas para esto han cambiado al ritmo de los avances tecnológicos. Actualmente, los Sistemas de Posicionamiento Global (GPS) se está convirtiendo en una herramienta estándar en los estudios de comportamiento vacuno (Schwager et al., 2007).

Los estudios de georreferenciación del ganado podrían ser utilizados para el diseño de sistemas más favorables y eficientes, con una mayor comprensión y caracterización del impacto de la distribución del ganado en el medioambiente. Estudios realizados por Franklin et al. (2009), han demostrado que el uso de bebederos en potreros próximos a parches de bosques riparios, reducen

considerablemente el número de visitas por parte del ganado a estas áreas, reduciendo asimismo el impacto asociado.

En la producción de ganado, tecnologías como la identificación electrónica, el control de peso y las puertas automáticas están comenzando a tener un impacto en los sistemas de producción; así como el uso de sensores para medir temperatura, para ver la frecuencia de acceso a los comederos y bebederos, y otros aspectos relacionados con el comportamiento, lo cual puede permitir adelantarse a identificar problemas subclínicos y clínicos. Es frecuente que los animales enfermos disminuyen sus tiempos de alimentación, bajando la frecuencia de acceso a comederos y bebederos, aumentando el tiempo que pasan descansando, por lo que, en teoría, los cambios en los comportamientos podrían indicar la probabilidad de un problema o enfermedad (Theurer et al., 2013; Yazdanbakhsh et al., 2017).

Otros estudios han sido realizados para determinar comportamientos más específicos con dispositivos como acelerómetros, podómetros, y sensores de presión de banda nasal, utilizados en el control de la alimentación y la reproducción de vacas u ovejas, estudiando los comportamientos principales del tiempo de rumia por día, las masticaciones de rumia por bolo y la frecuencia de posiciones en pie o acostadas, estando estos comportamientos relacionados de manera directa con los parámetros de la salud del rebaño (Zehner et al., 2017, Rombach et al., 2018).

En el mismo sentido, Werner et al., (2018), utilizaron sensores integrados de inclinación y balanceo en ovejas para determinar dos categorías de actividad de animales, activo e inactivo, con más del 90% de precisión. Arcidiacono et al. (2017) analizaron la alimentación de las vacas y la actividad conductual en pie. Igualmente, Fukasawa et al. (2018) estudiaron la postura para dormir, estableciendo una correlación entre lo observado con tomas en video y los datos proporcionados por acelerómetros, lo que dio lugar a un 95% de concordancia entre ambos dispositivos.

Los principales comportamientos de pastoreo, rumia y otras actividades han sido estudiados mediante herramientas de PLF (Decandia et al. 2018). En sus trabajos de investigación combinaron los datos de un acelerómetro y de GPS. Venter et al. (2019) realizaron el análisis del comportamiento animal y compararon tres enfoques de manejo: el pastoreo durante toda la temporada, el pastoreo rotacional, y el pastoreo holístico planificado, determinando que el enfoque de manejo no cambió el tiempo asignado a diferentes comportamientos de los animales, pero que el pastoreo holístico planificado sí evitó la utilización irregular del forraje a nivel espacial.

Riaboff et al. (2020) señalan que el comportamiento es influenciado por el ambiente externo, principalmente por la presencia de otros animales en la finca. Aunque el desarrollo de sensores está avanzando, todavía hay poca implementación de soluciones basadas en sensores en las granjas comerciales (Werner et al., 2018).

Para el análisis del comportamiento animal, los sistemas de información geográfica (SIG o en inglés GIS) permiten sistematizar y complementar los patrones del movimiento animal, integrando factores externos en el estudio del comportamiento. A diferencia de las observaciones directas, es posible la asociación de numerosos parámetros espaciales, tales como la distancia total recorrida en un intervalo definido de tiempo y con esto estimar patrones diarios de movimiento en el comportamiento de los animales (Ganskopp et al., 2000; Schlecht et al., 2004; León et al., 2006; Schwager et al., 2007; Guo et al., 2009; Schutz et al., 2009; Monti et al., 2021).

Desde la primera década del S.XXI, se le ha dado una mayor utilidad al uso de collares GPS en vacas (Ganskopp et al., 2000; Turner et al., 2000; Schlecht et al., 2004; Schwager et al., 2007; Putfarken et al., 2008; Franklin et al., 2009; Guo et al., 2009; Feldt y Schlecht, 2016; Bailey et al., 2018; Bailey et al., 2021; Rivero et al., 2021). De igual forma, han sido utilizados exitosamente para el estudio del manejo de pastoreo mixto por especies como ovejas y vacas (Putfarken et al., 2008; Swain et al., 2011). Integrando la información recabada con los collares GPS con otros datos de sistemas de información geográfica, es posible relacionar aspectos de movimiento y comportamiento animal con las condiciones ecológicas.

Rivero et al. (2021) han publicado una extensa revisión en este tema específico, donde analizan la literatura científica de los últimos 21 años (2000-2020) relativa a la preferencia de uso del ganado en pastoreo utilizando collares dotados con GPS. Una buena síntesis es la realizada por di Virgilio et al. (2018), en la que indica que caracterizar y comprender el comportamiento y la distribución espacial de los animales en las praderas es crucial para desarrollar estrategias de gestión que favorezcan la productividad y, al mismo tiempo, eviten o disminuyan el posible impacto negativo del pastoreo en el medioambiente.

Ungar et al. (2005) evaluaron la eficacia de collares GPS para predecir la actividad de ganado vacuno en dos sistemas intensivos de pastoreo, haciendo énfasis en la alta potencialidad de esta herramienta. En el mismo sentido, Williams (2016) señalan que los sensores de posicionamiento GPS de bajo coste brindan la oportunidad de monitorear los movimientos de las vacas y reconocer las actividades de estas a nivel de explotación comercial y como al procesar previamente los datos de posición de las vacas, se obtienen altas tasas de clasificaciones correctas, utilizando técnicas estándar de aprendizaje automático para reconocer las actividades de las vacas.

El desarrollo de estrategias de gestión sostenible del pastoreo requiere una comprensión de la forma en que los animales utilizan la vegetación disponible (Harmse et al., 2022). Como se mencionó anteriormente, los dispositivos de seguimiento por GPS pueden permitir caracterizar la distribución de los animales y el comportamiento de pastoreo, mientras que los índices de vegetación, como el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), podrían utilizarse para seguir la evolución de la biomasa (Cao et al., 2016).

Asegurar la disponibilidad de forraje es un desafío para los gestores de los sistemas de pastoreo, sobre todo en praderas espacialmente heterogéneas. Los pastizales suelen ser demasiado grandes e inaccesibles para determinar la acumulación de biomasa y la cubierta vegetal solo mediante estudios sobre el terreno (Flynn et al., 2008).

El sistema ganadero actual está en continuo cambio, siempre buscando la eficiencia y la reducción de impactos negativos en el ecosistema, todo esto a través del uso de tecnología, dejando atrás los métodos invasivos de observaciones a pequeña escala (Umstätter et al., 2008; Fuhlendorf et al., 2017; Carvalho, 2013). Por

lo tanto, el desarrollo de índices espectrales derivados de sensores remotos ha sido de particular interés para los administradores de pastizales, como un medio más rentable para medir las características, la biomasa y su disponibilidad (Fern et al., 2018).

En la actualidad, para los investigadores, los datos obtenidos por teledetección se han convertido en la principal fuente para la estimación de la biomasa. Los datos del NDVI de alta resolución pueden utilizarse como herramienta de gestión del pastoreo para determinar la variabilidad espacial de las zonas productivas en los pastizales e identificar las zonas de pastoreo preferidas. Asimismo, se pueden usar para investigar las interacciones de los animales con el pasto (Flynn et al., 2008; Harmse et al., 2022).

Según indican Manning et al. (2017b) se ha demostrado que el comportamiento del ganado cambia en respuesta a la disminución del NDVI, destacando cómo las tecnologías del sistema global de navegación por satélite (GNSS) pueden ser utilizadas en el futuro como herramientas de gestión para ayudar a los productores a manejar mejor el ganado, para gestionar la intensidad de pastoreo y la utilización de los potreros. En la literatura científica existente para el caso de las dehesas españolas, el NDVI calculado a través de imágenes de teledetección se ha utilizado para estimar la producción primaria neta, la tasa de crecimiento de los pastos y la productividad (Catorci et al., 2021; Edirisinghe et al., 2011, Fernández-Habas et al. 2021).

Materiales y Métodos

MATERIALES Y MÉTODOS

En las siguientes secciones se describen las características de los materiales empleados, la recolección y el procesamiento de los datos, y los métodos del análisis estadístico.

Características del área de estudio

El trabajo de campo de la presente Tesis Doctoral se llevó a cabo en una explotación comercial de dehesa denominada "Las Albaidas", situada en el municipio de Córdoba, España. La finca tiene un único potrero con una superficie de 23,1 hectáreas y una altitud media de 150 metros sobre el nivel del mar. Las coordenadas del centroide del potrero son $37^{\circ}54'39.1''$ N y $4^{\circ}44'42.3''$ W. En la Figura 2, se muestra características de la finca, donde el único punto de agua para el ganado y el corral están ubicados en el extremo sureste del pastizal.

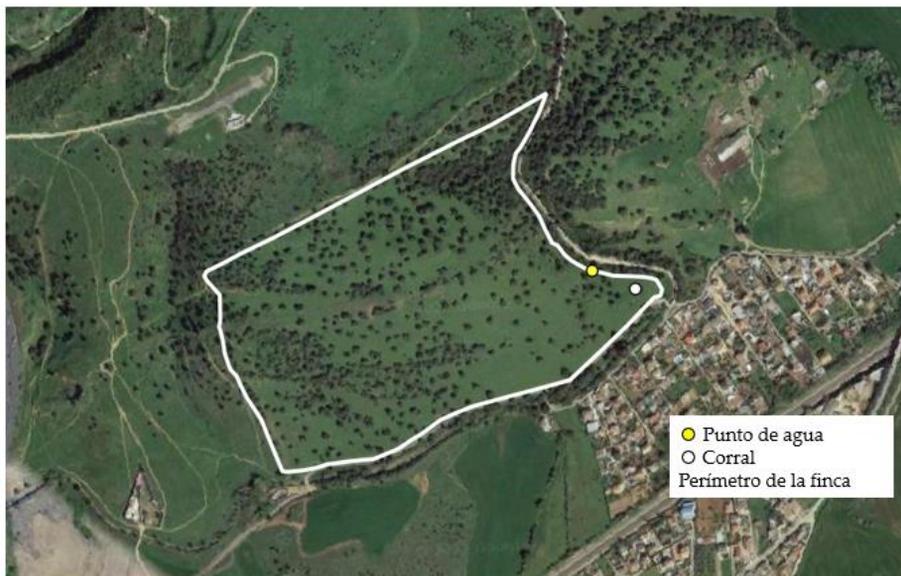


Figura 2. Finca Las Albaidas en la Campiñuela Baja de Córdoba.

El clima es de tipo mediterráneo. Puede definirse como mediterráneo típico (Csa) según la clasificación climática de Köppen (1900). La Figura 3, muestra los valores semanales de temperatura y precipitación registrados en el sitio durante los dos periodos estudiados. Los datos climáticos se obtuvieron de los registros diarios

de una estación agrometeorológica situada en el "Campus de Rabanales" (Villalobos y Testi, 2021), que se encuentra a sólo 2,1 km de la finca "Las Albaidas".

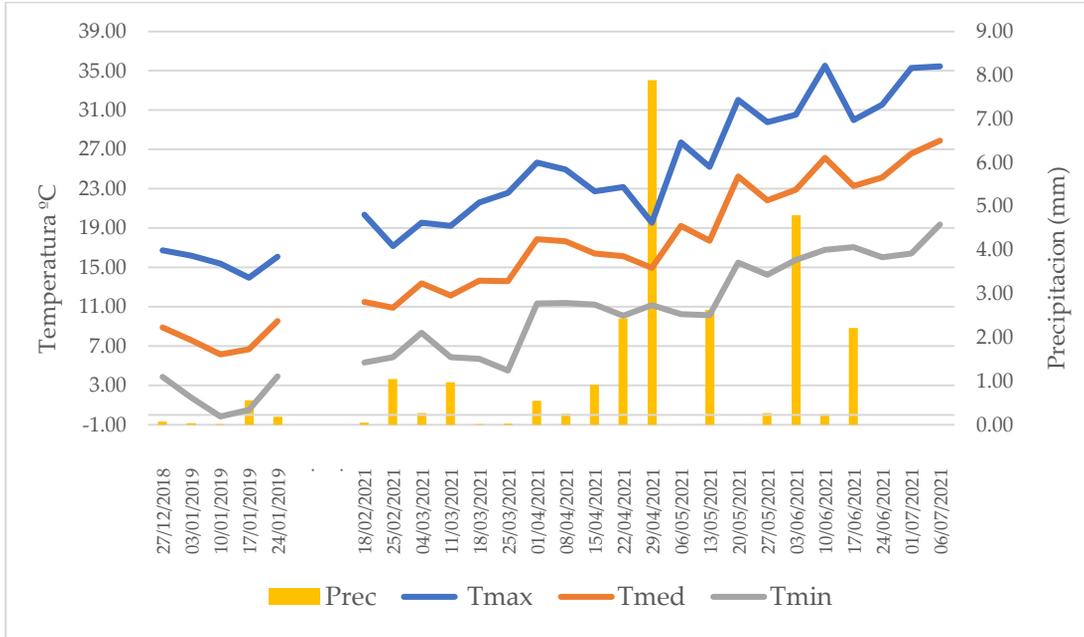


Figura 3. Datos de temperatura y precipitación del área de estudio
Fuente: Elaboración propia a partir de Villalobos y Testi (2021).

La fracción de cabida cubierta, es decir, la proyección vertical de las copas de los árboles sobre el suelo (González et al. 2010) es del 25%. El estrato arbóreo está compuesto principalmente por encinas (*Quercus ilex*, L.), aunque también están presentes algunos alcornoques (*Quercus suber*, L.) y acebuches (*Olea Europaea*, L.). El estrato arbustivo es casi inexistente, salvo en los bordes del potrero. La capa de pasto está formada por vegetación natural, incluyendo diversas especies de gramíneas y leguminosas, como *Dactylis glomerata*, L., *Hordeum murinum*, L., *Lolium perenne*, L., *Poa bulbosa*, L., *Medicago arabica*, H., *Ornithopus compressus*, L. y *Trifolium sub-terraneum*, L. (Figura 4).



Figura 4. Áreas de pastoreo en la finca “Las Albaidas”

Animales monitorizados

El rebaño monitorizado estaba compuesto por 18 animales bovinos (Figura 5). Las razas manejadas eran Retinta y mestiza, siendo los machos de raza Limousin, las edades estaban comprendidas entre 1 y 8 años. Los animales eran manejados con libre pastoreo en las 23,1 hectáreas, con una suplementación mineral *ad libitum*.



Figura 5. Animales en pastoreo en finca Las Albaidas.

Los collares GPS para ganado utilizados (Figura 6) son de la empresa Digitanimal S.L. (<https://digitanimal.com>), los cuales se manejan a través de una aplicación para smartphone y un interfaz web para el monitoreo durante las 24 horas.



Figura 6. Bovino con dispositivo de rastreo GPS en collar.

El sistema de seguimiento incluía los siguientes componentes: GPS, batería de litio con una duración aproximada de un año, carcasa IP67 resistente al agua y al polvo, y módulo de comunicaciones de baja potencia y largo alcance (LPWA por sus siglas en inglés) basado en Sigfox (<https://www.sigfox.es>), que permitía la transmisión de los datos de localización de los collares al servidor en tiempo casi real (Maroto-Molina et al., 2019).

Del rebaño total se monitorearon 7 animales adultos utilizando los dispositivos GPS (Tabla 1). Los animales se seleccionaron por consejo del ganadero para que fueran representativos del comportamiento del rebaño.

Tabla 1. Características de los animales monitoreados con collares GPS

Id. Collar	DIB	Fecha nacimiento	Sexo	Raza
AD123	2404	29/08/2017	H	Mestiza (Ret x Lim)
AD296	2405	01/02/2018	M	Limosim
AD282	2406	01/02/2018	H	Mestiza (Ret x Lim)
AC007	2409	20/06/2018	M	Mestiza (Ret x Lim)
AB282	3866	20/06/2018	M	Limosim
AD669	3867	01/04/2018	H	Mestiza (Ret x Lim)
AD258	3880	25/07/2019	H	Mestiza (Ret x Lim)
AD360	3885	28/02/2019	H	Mestiza (Ret x Lim)
AD107	3886	28/02/2019	H	Mestiza (Ret x Lim)
AC009	3887	02/03/2019	H	Mestiza (Ret x Lim)
AB016	1428	05/07/2020	H	Mestiza (Ret x Lim)

El monitoreo se dividió en dos periodos, según la frecuencia de datos registrados por los collares GPS:

- a) Periodo 1: de un rebaño total de 11 bovinos se monitorizaron 6 animales en un primer periodo de 35 días (23 de diciembre de 2018 a 26 de enero del 2019) donde los collares GPS fueron programados para registrar datos cada 5 minutos.
- b) Periodo 2: de un rebaño total de 18 bovinos se monitorizaron 7 animales en un segundo periodo de 147 días (7 de febrero a 3 de julio de 2021) donde se programaron los collares para recoger datos cada 30 minutos, con el fin de tener una mayor duración de la batería.

Caracterización de los factores que afectan el comportamiento animal en pastoreo

Varios factores pueden afectar al comportamiento y la distribución del ganado en los pastos, algunos de los cuales muestran una variabilidad temporal, mientras que otros sólo tienen una variación espacial. En cuanto a la variabilidad

espacial del comportamiento del ganado, se estudiaron los siguientes factores utilizando fuentes de datos abiertos: la pendiente del terreno, la elevación, la exposición al sol, la cobertura del dosel (fracción de cabida cubierta), la distancia al punto de agua, y los sitios ecológicos.

Pendiente

La pendiente se considera uno de los principales factores abióticos que determinan la selección del hábitat del ganado (Kaufmann et al., 2013). En esta Tesis, la pendiente se calculó para cada píxel de 5 × 5 m dentro de la finca utilizando el modelo digital de elevaciones publicado por el Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA 2022a) y el software de código abierto QGIS (<https://qgis.org>). Los píxeles rasterizados se promediaron para que coincidieran con la cuadrícula de 10 × 10 m de las imágenes Sentinel 2, que se utilizaron para caracterizar la dinámica de la vegetación. Para el análisis de la preferencia de sitio según los datos de los collares GPS se agruparon en 4 categorías de pendiente del 5% que iban del <5% a >20%, a diferencia para el caso del análisis de la distribución de la heces se agruparon en 10 categorías desde 0% hasta el 50%.

Exposición al sol

También se utilizó el modelo digital de elevaciones para obtener la exposición al sol de cada píxel. Los datos de exposición solar, que se expresaron en grados relativos al azimut, se agruparon en una de las nueve categorías siguientes: norte (337,5° a 22,5°), noreste (22,5° a 67,5°), este (67,5° a 112,5°), sureste (112,5° a 157 5°), sur (157,5° a 202,5°), suroeste (202,5° a 247,5°), oeste (247,5° a 292,5°), noroeste (292,5° a 337,5°) y ninguna para los píxeles con una pendiente inferior al 10% que se consideraron terreno llano y, por tanto, sin efecto de la exposición solar.

Elevación del terreno

Los datos de elevación, obtenidos de nuevo del modelo digital del terreno, las categorías se agruparon cada 5 m , las que iban de 135 a 175 m sobre el nivel del

mar, esto se utilizó para la interpretación de preferencia de uso por los animales según los datos provenientes de los collares con GPS.

Cobertura arbórea

Se obtuvo un shapefile de la cabida cubierta con QGIS siguiendo un procedimiento semiautomático que consistía en la agrupación de píxeles de una ortofotografía de alta resolución (25 x 25 cm), que también estaba disponible en la página web del PNOA (PNOA, 2022b). Se utilizó un algoritmo de agrupación de k-means para agrupar los píxeles de la ortofotografía en 10 categorías en función de sus valores para las bandas roja, verde y azul. Después, cada clúster se reclasificó en 2 categorías ("árbol" o "pasto") lo que se es basado en una inspección visual de la ortofotografía y contrastada con las observaciones de campo. El archivo shape resultante se simplificó eliminando los polígonos correspondientes a la categoría "árbol" con una superficie inferior a 1 m². Este nuevo shapefile se intersecó con la malla de Sentinel, lo que permitió calcular un porcentaje de cobertura de dosel para cada píxel, obteniéndose 4 categorías según el área cubierta del píxel (0, 0-25%, 15-50%, >50%).

Distancia al agua

A través de la imagen fotogramétrica del PNOA, se georreferenció el punto de agua y se hizo una clasificación de la distancia de cada píxel, para tener una medida uniforme se utilizó la coordenada del centroide de cada píxel de 10 x 10 metros, a partir de la cual se calculó con QGIS la distancia euclidiana (Ecuación 1) entre el punto de agua presente en el prado y cada píxel. Para el análisis de los datos de los collares en la preferencia de sitio por los animales se consideraron las 10 categorías cada 50 m (0 m hasta 650 m) y para el análisis de la distribución de las heces se redujeron las categoría a 4 (<50 m; 50- 100 m; 100-200 m; >200 m) .

$$d_w = \sqrt{(x_w - x_{pn})^2 + (y_w - y_{pn})^2} \quad \text{Ecuación 1.}$$

Donde:

d_w : distancia al agua (m) desde el píxel n

x_w, y_w : coordenadas UTM del abrevadero

x_{pn}, y_{pn} : coordenadas UTM del centroide del píxel n

Sitio ecológico

Los sitios ecológicos son el componente básico de los sistemas de clasificación de tipos de tierras, que describen el potencial ecológico y la dinámica de los ecosistemas de las zonas terrestres. Un sitio ecológico puede definirse como un tipo distintivo de tierra con características edáficas y físicas específicas que difieren de otros tipos de tierra en su capacidad para producir un tipo y cantidad de vegetación y en su capacidad para responder de manera similar a las acciones de gestión y a las perturbaciones naturales (Struckhoff et al., 2017). Se siguió la metodología de identificación de sitios propuesta por Gastó et al. (1993) y su adaptación a los ecosistemas de dehesa (LIFE bioDehesa, 2017). Los sitios se definieron mediante un código numérico en el que: 1) el primer número se refiere a la categoría de la pendiente: en este estudio, 2 para pendientes entre 0 y 10% y 3 para pendientes superiores al 10%; 2) los dos números siguientes se refieren al tipo de suelo: 47 para los cambisoles y 59 para los luvisoles, de acuerdo con el Mapa de Suelos de Andalucía publicado por REDIAM (2022); y 3) el último número se refiere a la exposición al sol: 1 para solana (pendiente orientada al sur), 2 para umbría (pendiente orientada al norte) y 8 para no expuesto. Por ejemplo, un sitio ecológico definido como 3471 corresponde a un terreno con una pendiente superior al 10% y orientado al sur (en el hemisferio norte), siendo el tipo de suelo cambisol.

En cuanto a los factores que influyen en la variabilidad temporal del comportamiento animal, se recogieron datos sobre la dinámica del clima y la vegetación a partir de fuentes de datos abiertos.

Temperatura

Para la caracterización de las condiciones climáticas durante el estudio, se utilizaron los registros diarios de la estación agrometeorológica situada en el "Campus de Rabanales". Se registraron diariamente las variables de temperatura media, máxima y mínima ($^{\circ}\text{C}$), así como la precipitación (mm), entre otras variables climáticas. Esta variación se relaciona con las estaciones consideradas en el ensayo.

Monitoreo de los pastos

Se utilizaron los datos espectrales proporcionados por los satélites Sentinel 2 (Agencia Espacial Europea, ESA) para seguir la evolución de la vegetación durante el estudio. Las imágenes libres de nubes disponibles para los períodos estudiados se descargaron del Copernicus Open Access Hub (<https://scihub.copernicus.eu>) y se procesaron con un script personalizado implementado en Google Earth Engine (Gorelick et al. 2017). Se calcularon los valores del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) en cada píxel de 10 x 10 m para ocho fechas del periodo 1 (23 y 30 de diciembre, 2, 7, 9, 12, 14 y 27 de enero) y 31 fechas del periodo 2 (15 y 22 de febrero, 12, 14, 17, 22 y 24 de marzo, 1, 3, 16, 18 y 23 de abril, 1, 6, 11, 13, 16, 18, 26 y 28 de mayo, 2, 7, 10, 12, 20, 25, 27 y 30 de junio, 2, 5 y 7 de julio). Los satélites Sentinel 2, normalmente, recopilan una imagen de un lugar determinado cada cinco días, pero en aquellos lugares donde se cruzan varias órbitas (por ejemplo, el área de estudio), la frecuencia de los datos de imagen es mayor. Sin embargo, las nubes (y las sombras de las nubes) pueden ser una limitación para el uso de los datos de Sentinel 2, incluso en entornos mediterráneos, donde hay muchos días soleados durante todo el año. En este caso, la disponibilidad de imágenes libres de nubes se consideró óptima en términos de toma de decisiones relacionadas con el manejo de pastos.

Seguimiento de la distribución de las heces

El monitoreo de la distribución de las heces en el pastizal se realizó durante el segundo periodo. Para esto se establecieron 90 parcelas circulares de muestreo, teniendo cada parcela una superficie de 78,5 m² (5 m de radio) y una separación de aproximadamente 50 m entre los centros de parcelas contiguas (Figura 7).

Los centros de las parcelas se georreferenciaron con un receptor GPS Garmin Etrex 10 y se marcaron en el suelo con pilotes de piedra. La zona muestreada representaba el 3,1% de la superficie total del pasto.



Figura 7. Distribución de las parcelas fijas de muestreo de heces en la finca del estudio



Figura 8. Marcado de las heces individuales para evitar el doble recuento.

Las parcelas de muestreo se examinaron semanalmente desde el 15 de febrero de 2021 (invierno) hasta el 2 de julio de 2021 (verano). El número de heces nuevas por semana dentro de cada parcela se registró en un archivo de MS Excel. Una vez registradas, las heces se marcaron con una pica (Figura 8) para evitar el doble recuento en las semanas siguientes.

Procesamiento de la información de los collares GPS

La información proporcionada por los rastreadores GPS de Digitanimal puede incluir datos faltantes cuando la conectividad Sigfox no está disponible. Los datos perdidos podrían tener un impacto importante en el análisis de los datos. Por ello, antes del recuento de posiciones, los datos brutos se preprocesaron de acuerdo con los siguientes pasos:

- 1) Los puntos situados fuera de los límites de la finca se consideraron errores.
- 2) Los días con uno o más dispositivos con tres horas consecutivas sin datos se excluyeron del análisis de datos.
- 3) Las trayectorias diarias se calcularon utilizando el paquete “trajr” (McLean y Skowron Volponi, 2018) del software de código abierto RStudio (R Core Team, 2022). Seguidamente, se re-muestrearon esas trayectorias para obtener las posiciones por animal y día en marcas de tiempo estandarizadas, es decir, 288 posiciones animal⁻¹ día⁻¹ para el periodo 1 (cada 5 min) y 48 posiciones animal⁻¹ día⁻¹ para el periodo 2 (cada 30 min).

En ambos periodos las posiciones GPS estandarizadas se utilizaron para estimar la presión animal en cada zona del cercado, expresada como número de posiciones de ganado por unidad de superficie y de tiempo. Las unidades de área fueron polígonos del paisaje, píxeles de 10 x 10 m de la cuadrícula de Sentinel 2 o parcelas de muestreo, dependiendo del objetivo del análisis de datos.

La resolución temporal de los dispositivos (intervalo de tiempo entre posiciones GPS) afecta al número de posiciones por unidad de superficie. Para controlar este efecto, en el periodo 2, además del número de posiciones, se calculó el número de segmentos de las trayectorias que se cruzaron con cada parcela de muestreo. Estos segmentos se originan al conectar dos localizaciones GPS consecutivas con una línea recta, utilizando la resolución temporal en los datos de los collares GPS cada 30 min

Como tercer indicador de presión animal se usó el tiempo empleado por el animal dentro de cada parcela de muestreo considerando que cada segmento (línea

recta entre posiciones consecutivas) se refería a 30 minutos para las trayectorias remuestreadas (Ecuación 2). Es decir, si la longitud total de un segmento de trayectoria era "x", pero la intersección de ese segmento con una parcela de muestreo particular tenía una longitud de "y", el tiempo que el animal "i" pasó en esa parcela "j" se estimó según la siguiente fórmula:

$$Tiempo_{ij} = 30 * \frac{y_i}{x_i} \quad \text{Ecuación 2.}$$

Por otro lado, dado que los animales realizan diferentes actividades en los pastizales, se utilizó la velocidad media entre dos posiciones GPS consecutivas para clasificar actividades. Estudios anteriores también han utilizado esta estrategia (Anderson et al., 2012; Cheleuitte-Nieves et al., 2020; Trotter et al., 2010). Aunque esos estudios utilizaron distintas frecuencias de datos de GPS, en promedio, encontraron que el ganado pasa aproximadamente el 57,5% de su tiempo descansando, el 40,0% pastando y el 2,5% caminando. Por lo tanto, se calcularon los percentiles 57,5 y 97,5 de la distribución de las velocidades medias entre puntos consecutivos para clasificar las ubicaciones del ganado como correspondientes al descanso (baja velocidad entre puntos consecutivos), al pastoreo (velocidad media) o al desplazamiento (alta velocidad).

De igual forma, con el fin de analizar la dinámica de agrupación o dispersión con respecto al centroide del rebaño a lo largo de la jornada y por época, se consideraron periodos de actividad diaria de 6 horas, distribuidos en: mañana (7:00-12:00), mediodía (13:00-18:00), tarde (19:00-00:00) y, noche (1:00-6:00).

Análisis espacial geoestadístico

Los datos de posiciones de los collares GPS y del número de heces por parcela se representaron espacialmente utilizando el software QGIS. Inicialmente se aplicó el análisis de estadística espacial a través del índice de vecino más próximo o cercano, el cual se expresa como la relación entre la distancia media observada y la distancia media esperada. La distancia esperada es la distancia promedio que hay entre vecinos en una distribución hipotética aleatoria. En este sentido, mide la

distancia entre cada centroide de entidad y la ubicación del centroide de su vecino más cercano. Si el índice es menor que 1, se considera que el patrón exhibe clustering o agrupamiento; si el índice es mayor que 1, la tendencia es la dispersión (Figura 9).

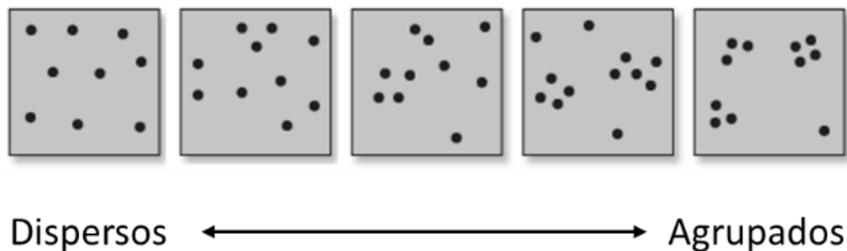


Figura 9. Patrones espaciales de agrupamiento y dispersión.
Fuente: Modificado a partir de Esri (2022).

Para determinar geoestadísticamente la significancia de la distribución (si hay o no agrupamiento espacial) en los datos del número de heces y puntos GPS, se elaboraron mapas de autocorrelación espacial con el estadístico G_i^* de Getis-Ord, considerando los cambios de época en el conjunto de las 90 parcelas de muestreo. Según indican Siabato et al. (2019), el análisis de autocorrelación espacial ayuda a determinar el grado en el que las unidades de análisis priorizan la conformación de clústeres, señalando los sitios de mayor concentración de datos (hotspots) o con menor concentración (coldspots).

Índice de selección de Jacobs

Como se ha explicado anteriormente, la distribución del ganado en el cercado se estimó mediante el recuento de los puntos GPS de todo el ganado por unidad de superficie y por semana. Además, el índice de selección de Jacobs (1974), con valores de 0 (indiferencia), 1 (preferencia), y -1 (evitación), se calculó semanalmente para el ganado mediante la siguiente fórmula:

$$JSI = \frac{r-p}{r+p-2*r*p} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

JSI es el valor del índice de selección de Jacobs para una unidad de área dada,
r es la fracción de heces o posiciones GPS en esa unidad de área, y
p es la fracción de esa unidad de área en el potrero.

Modelización de la posición del ganado y la distribución del estiércol

Para modelar la relación entre las posiciones del ganado y la distribución de las heces en el terreno, se utilizó un procedimiento de regresión por pasos. El número de heces dentro de cada parcela por semana se utilizó como variable dependiente y el número de posiciones GPS por parcela por semana como variable independiente. Alternativamente, el número de segmentos de trayectoria y el tiempo de permanencia en la parcela también se utilizaron como variables independientes. Además, se estudió el efecto de separar los puntos, segmentos o tiempos correspondientes al comportamiento de descanso o pastoreo.

En todos los modelos se incluyeron como covariables datos sobre la pendiente, la exposición, la cabida cubierta, la distancia al agua, las variables meteorológicas y el NDVI. Los valores de P inferiores a 0,05 se consideraron estadísticamente significativos. Para comprobar el efecto de los dominios espacial y temporal en los modelos obtenidos, la variable dependiente, es decir, el número de heces por parcela se agregó espacialmente (una frente a cuatro parcelas) y temporalmente (una frente a seis semanas) en rondas sucesivas de calibración del modelo.

La validación del modelo también se realizó considerando ambos dominios. La Figura 10 sintetiza el procedimiento.

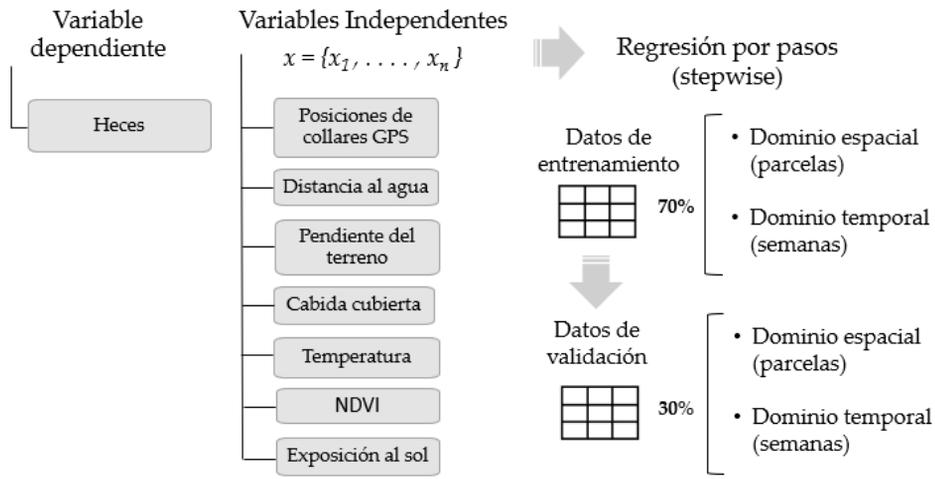


Figura 10. Procedimiento para el pronóstico del número de heces.

En la primera ronda, los modelos se calibraron con los datos correspondientes al 70% de las parcelas de muestreo y se validaron con el 30% restante. A continuación, se utilizaron los datos del 70% de las semanas para la calibración y el último 30% para la validación. Los cálculos estadísticos se realizaron en IBM SPSS® Statistics 25 y RStudio.

Resultados y Discusión

RESULTADOS

Caracterización del comportamiento animal

En la Figura 11 se puede observar las distancias medias recorridas por los animales en un periodo de 24 horas, donde más de la mitad del tiempo (58%) lo dedicaron a descansar, ya que los animales se movían a menor velocidad y en distancias menores a 50 m/30 minutos.

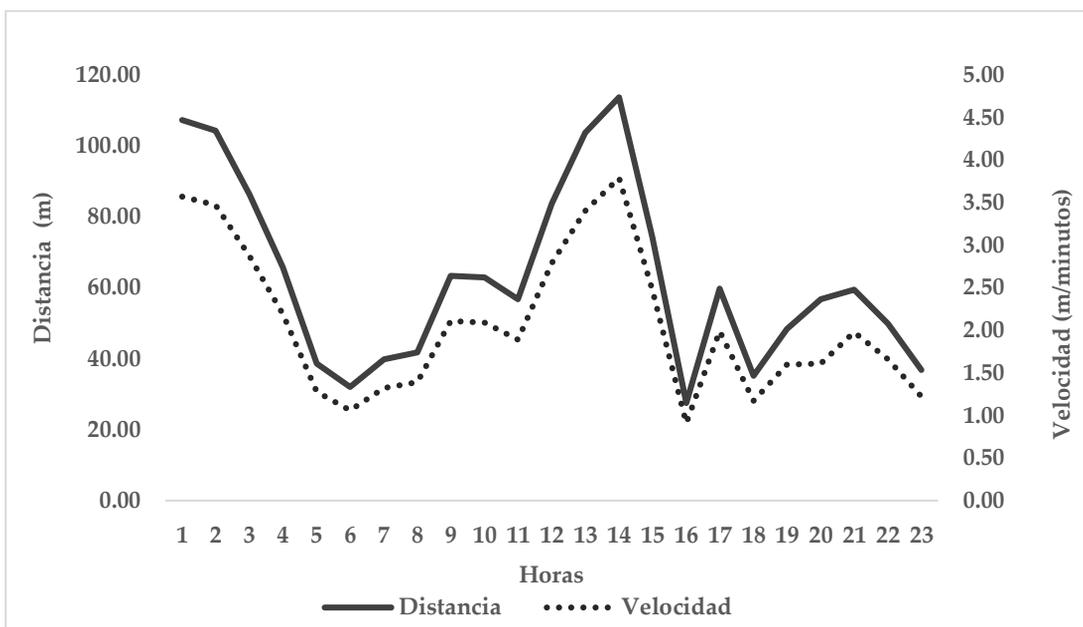


Figura 11. Actividades de los animales distribuidas en las 24 horas del día.

Un aspecto importante que resaltar es el comportamiento de los animales en las distintas estaciones del año. En la Figura 12, se representa la relación entre los periodos de actividad (pastoreo y descanso) y el tiempo que dedican cada una en las diferentes estaciones del año.

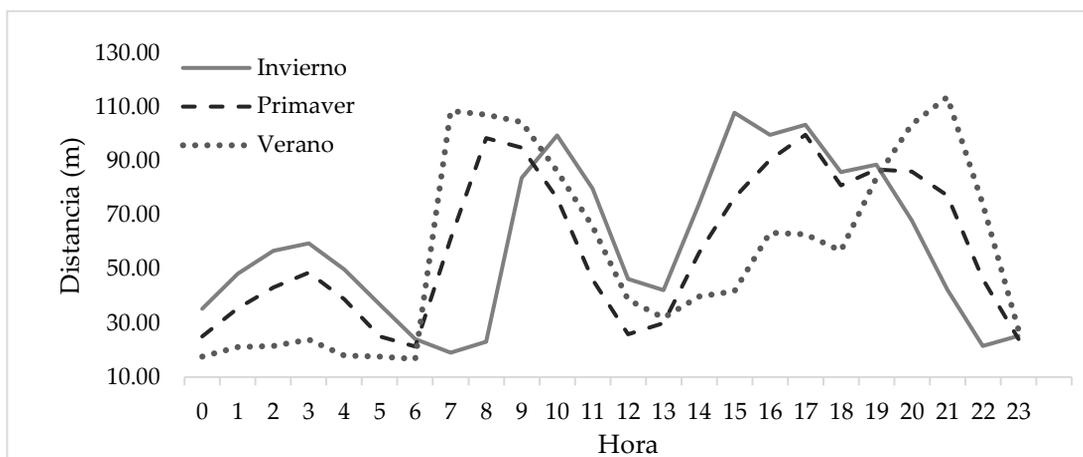


Figura 12. Distribución de las actividades diarias de los animales por estación del año.

Durante la primavera y el verano, con días calurosos y noches cálidas, los animales preferían utilizar las últimas horas de sol para pastar, en sustitución del pastoreo en las horas centrales del día, cuando las temperaturas pueden ser incómodas para ellos. En las horas de la mañana en la estación de verano, los animales concentran el mayor tiempo de actividad (5 h) iniciando a las 6:00 am, mientras que en la tarde tienen un periodo más corto de actividad (3 h); a diferencia en invierno los animales tienen menor tiempo de actividad al mediodía (3 h), y el mayor en la tarde (6 h). Cabe señalar que para el invierno el periodo de horas luz es más corto en comparación al verano (3 h menos).

A pesar de que el número de animales monitorizados con GPS en este trabajo es relativamente pequeño, se ha estudiado la heterogeneidad del comportamiento intra-rebaño, según el momento del día y la estación del año. En la Figura 13, se observa la posición de las coordenadas del centro (centroides) de las posiciones GPS del rebaño, pudiéndose distinguir dos patrones de comportamiento repetitivos en las tres épocas. El primero, donde los centroides de la mañana y mediodía se mantienen cerca del punto de agua, donde hay una pendiente suave, y el segundo patrón se da en la tarde y noche, donde los centroides están en la zona de mayor elevación de la finca y más distantes del punto de agua. De igual forma, se observó una variación de la posición de los centroides considerando el mismo momento del

día, pero en las diferentes épocas. Podemos señalar que hay cambios en la posición de la coordenada del centroide ya que la distancia mayor entre los centroides de la noche se da en verano con una diferencia de entre 90 a 120 m respecto a las otras épocas y para el mediodía hay una variación de 161 m de la posición del centroide para verano.

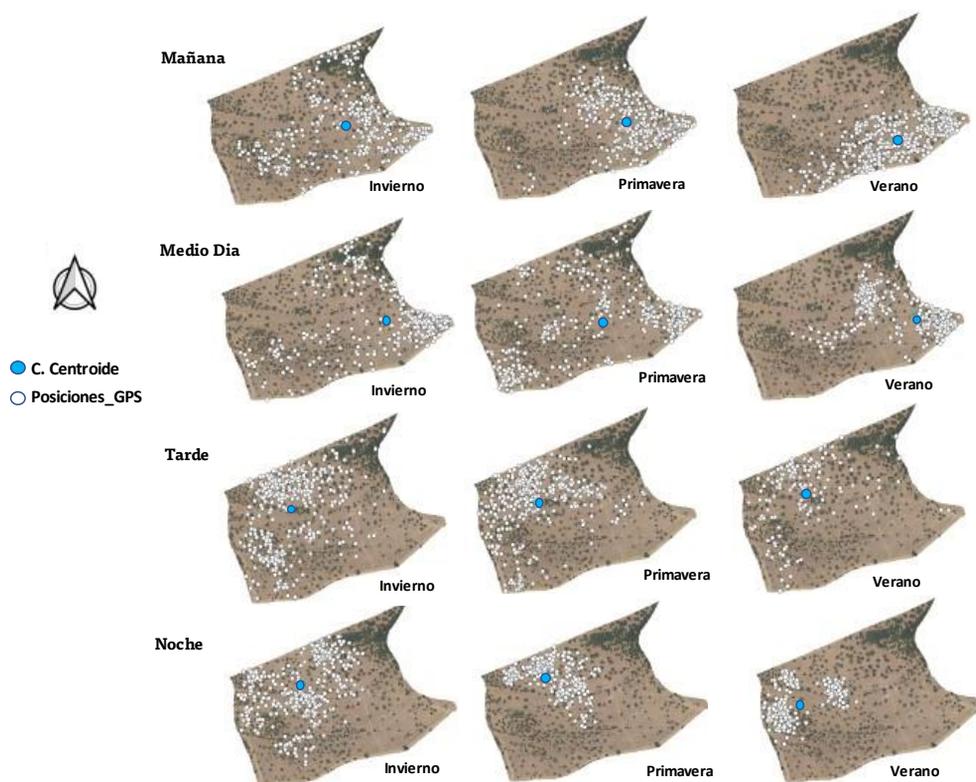


Figura 13. Distribución de los datos GPS según momento del día y estación del año.

Factores que afectan la distribución del ganado en las áreas de pastoreo

La actividad animal está estrechamente relacionada con las variables de entorno. En la Figura 14, se pueden observar las categorías de la pendiente en el conjunto de la finca, donde en aproximadamente el 60% de la superficie del pastizal predominan las pendientes entre el 5% y el 15%.

En ambos periodos del estudio se observó que el ganado mostró preferencia por el terreno llano con pendiente por debajo del 5%, especialmente en relación con

el comportamiento de descanso, donde se acumuló más del 50% de los datos GPS (Figura 15). No se encontraron diferencias en la presión de los animales para las categorías de pendiente superiores al 15%, donde Rivero et al. (2021) señalan que resultados similares fueron observados por otros autores.

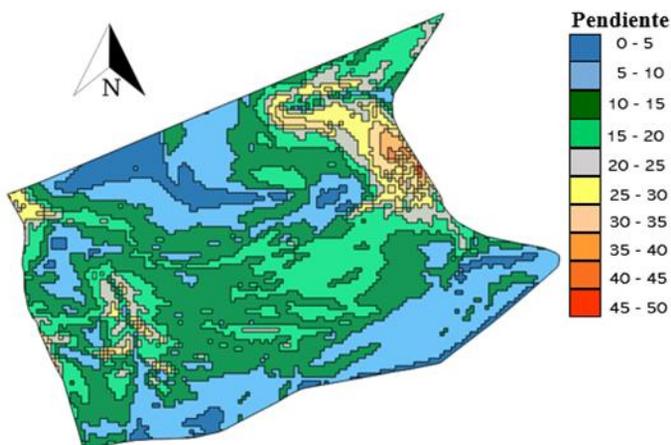


Figura 14. Mapa del modelo digital del terreno según el porcentaje de pendiente.

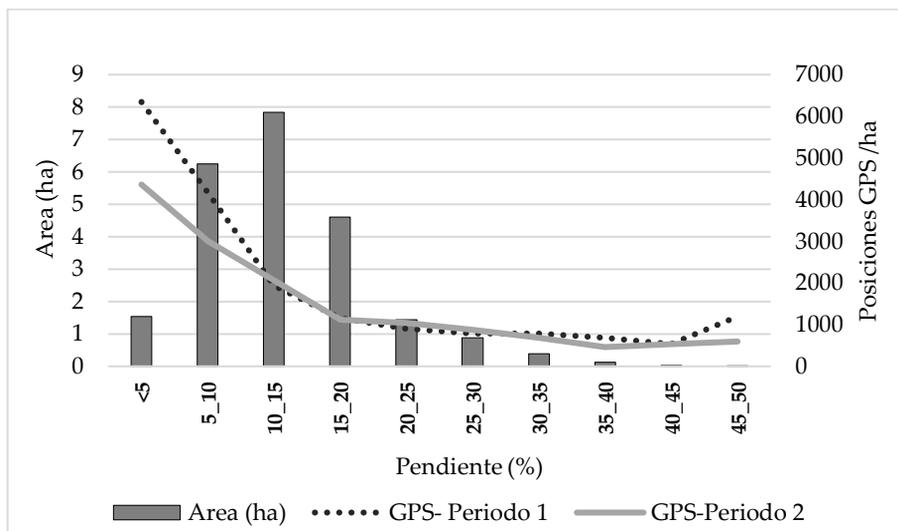


Figura 15. Superficie disponible y presión animal (datos GPS ha⁻¹) para las categorías de pendiente.

Las características del terreno en relación con su orientación al sol se pueden observar en la Figura 16. En cuanto a la exposición al sol de las laderas, la categoría con mayor presión (23% de los datos GPS) de los animales fue la de "sin exposición", ya que este terreno se corresponde con el terreno llano. En la Figura 17 se puede observar que durante el periodo 1 (invierno), el ganado mostró una ligera preferencia por las laderas orientadas al noreste y al este (soleadas por la mañana), mientras que en el periodo 2 (sobre todo en primavera) esa preferencia se decantó por las laderas orientadas al oeste (soleadas por la tarde). Esto se debió probablemente a una estrategia de adaptación del ganado destinada a gestionar las temperaturas ambientales como ya sugirieron Gaughan et al. (2019). En invierno, con noches frías, el ganado utilizaba las laderas orientadas al este para aumentar la temperatura corporal a primera hora de la mañana.

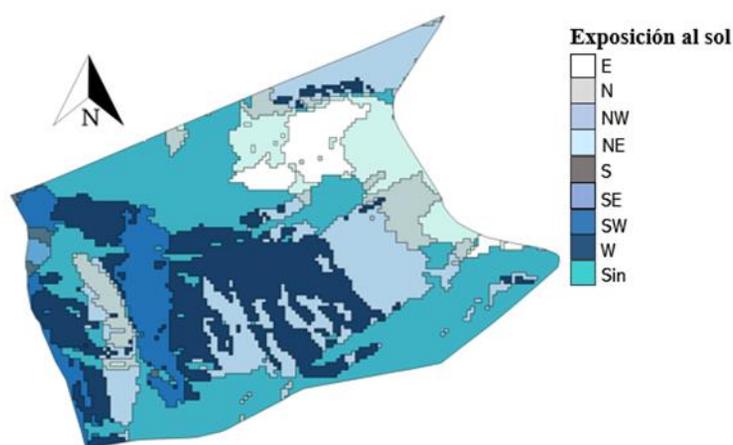


Figura 16. Mapa de los sitios del terreno según exposición a la luz solar.

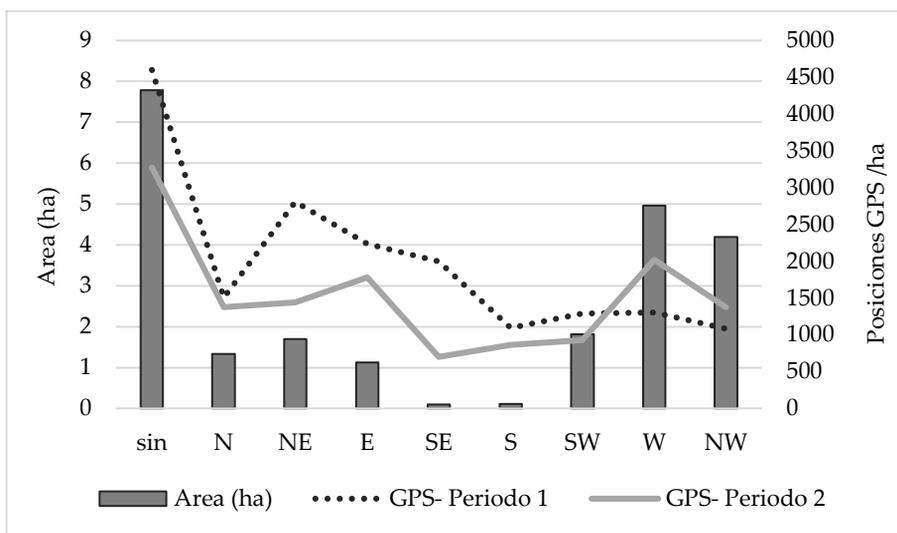


Figura 17. Superficie disponible y presión animal para las categorías de exposición al sol.

En el caso de la elevación (Figura. 18), la superficie disponible estaba homogéneamente distribuida entre las categorías, excepto para los 135-140 msnm con menor presencia (4% del terreno).

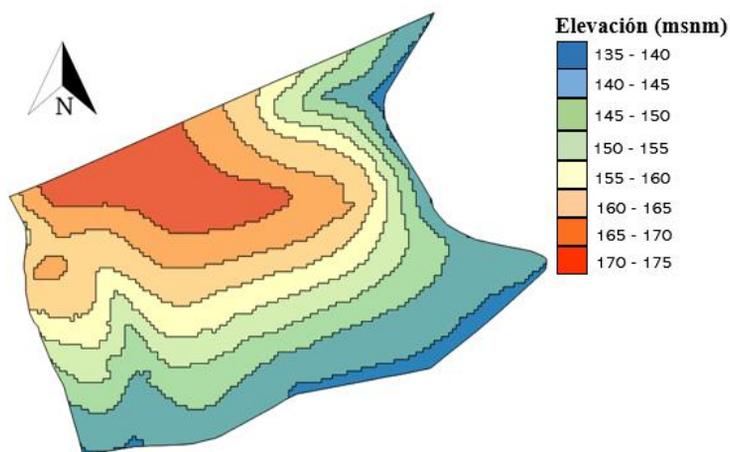


Figura 18. Mapa de elevaciones.

El ganado mostró una preferencia tanto por las zonas más bajas (< 145 msnm) como por las de mayor elevación (> 160 msnm) en ambos periodos, evitando los sitios de elevación media (Figura 19). Los animales seleccionaron las zonas bajas porque estaban más cerca del abrevadero y las zonas altas porque eran planas. En este caso, es plausible que el ganado prefiriera entre las zonas planas las más elevadas para descansar, porque esas son mejores para observar el entorno, ya que las vacas y sus crías son más vulnerables en las zonas bajas. Estos resultados son un ejemplo de las limitaciones prácticas de estudiar uno por uno el efecto de distintos factores sobre el comportamiento de los animales, ya que claramente existen interacciones entre los mismos, debido a que su distribución sobre el terreno no es aleatoria.

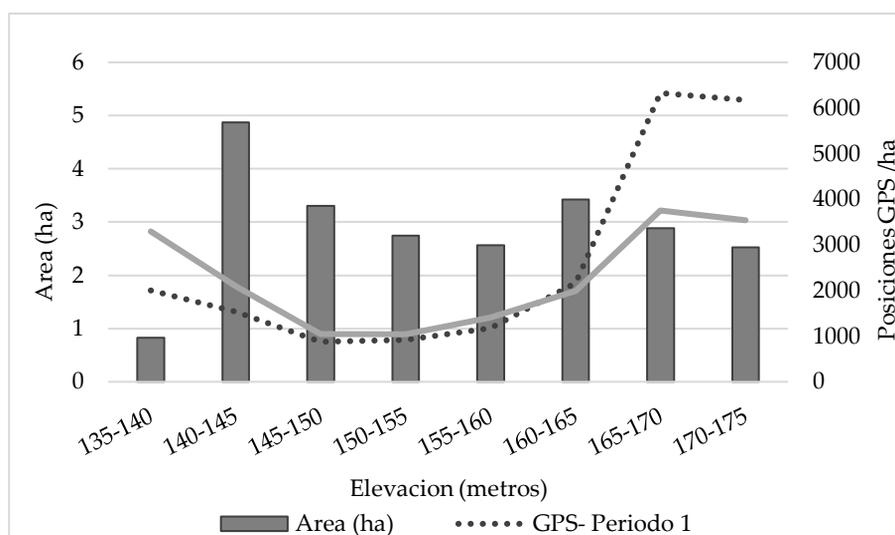


Figura 19. Superficie disponible y presión animal para las categorías de elevación (msnm).

El acceso al agua se considera el factor más importante de la distribución del ganado a escala de potrero y puede influir en la preferencia de uso del paisaje (Putfarken et al., 2008). Los animales en pastoreo suelen preferir ruminar y descansar en zonas pequeñas cercanas a los abrevaderos (González et al., 2014). En la explotación en la que se ha realizado este trabajo existe un solo punto de agua

permanente (Figura 20). Aunque durante los días de lluvia se formen algunos charcos temporales, la preferencia del ganado por el agua limpia fue evidente.

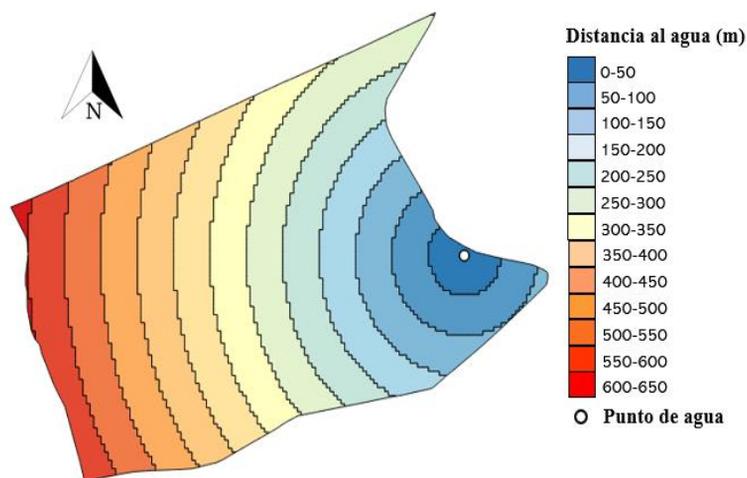


Figura 20. Mapa de los rangos de distancia al punto de agua.

En este estudio, se observó una preferencia por las zonas más cercanas a los abrevaderos en ambos periodos. En la Figura 21, en relación con el primer periodo se observa que las posiciones del GPS mostraron una menor preferencia por las áreas cerca del agua, lo que podemos relacionar con la época y el contenido de humedad de los pastos. Diferente fue la dinámica observada para el segundo periodo, donde hay más variación en la acumulación de las posiciones GPS, mostrándose el mayor pico de datos cercanos al punto de agua (< 150 m), marcando una preferencia de los animales por el uso de estas áreas. Esto correspondería a las horas del día relacionadas con un comportamiento de descanso por la mañana, lo que podría interpretarse en parte como rumia.

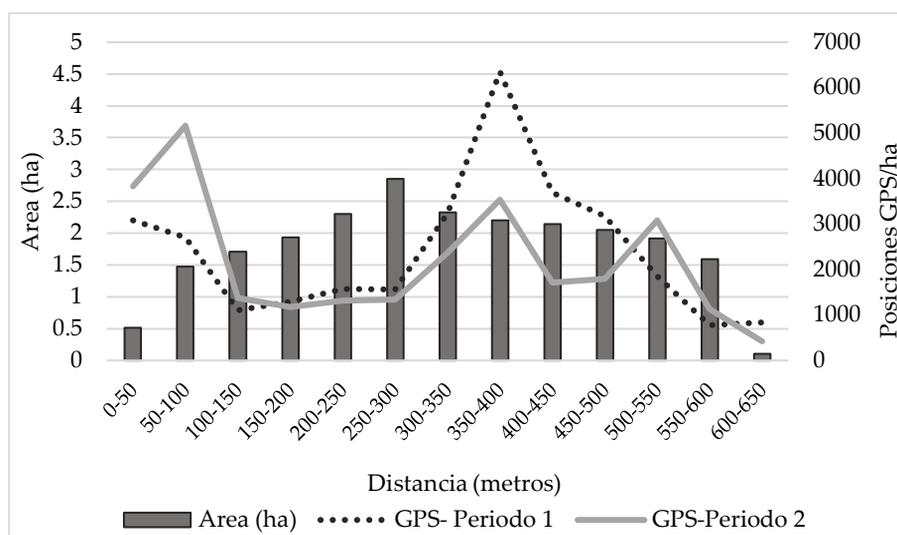


Figura 21. Superficie disponible y presión animal para las categorías de distancia al agua.

En el periodo 1, para el descanso durante la noche el ganado eligió zonas entre 350 y 400 m hasta el punto de agua, que corresponden a una zona plana y elevada del pastizal, siendo mayor el rango de la preferencia para el periodo 2, donde el ganado mostró una preferencia por distancias entre 350 m y 550 m del punto de agua, ya que en la zona más alejada la fracción de cabida cubierta es mayor. Es importante señalar que, como se mencionó anteriormente, la preferencia por los píxeles cercanos al agua fue mayor durante el periodo 2, cuando las temperaturas eran más altas, lo que sugiere una interacción significativa entre la preferencia de los animales y las condiciones climáticas.

En cuanto al porcentaje de cabida cubierta, en la Figura 22, se aprecia la distribución de las áreas según el tipo de cobertura y según el porcentaje de cabida cubierta por píxel.

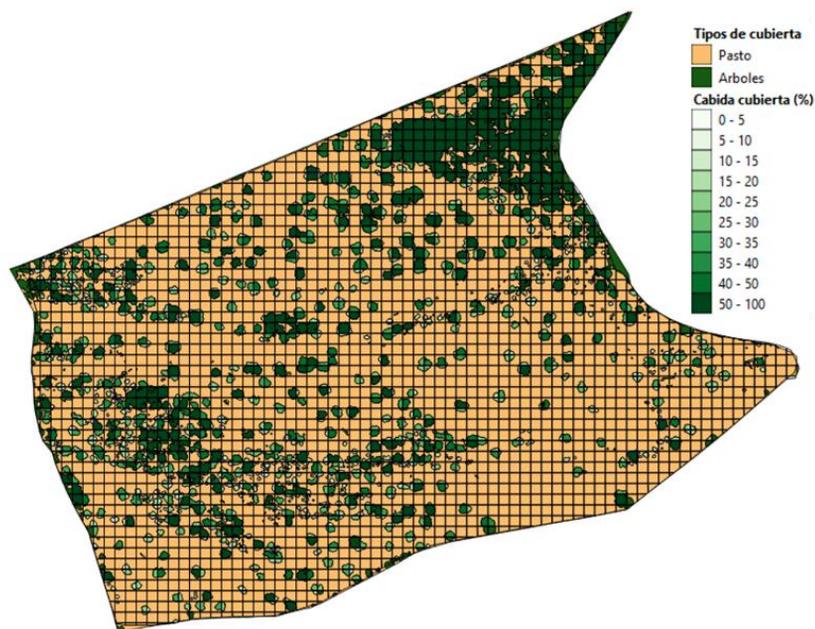


Figura 22. Tipos de cobertura y distribución de la fracción de cabida cubierta.

En la Figura 23, se muestra como en la superficie disponible, el estrato de pastos es predominante, correspondiente a la categoría 0% de cabida cubierta. Por otro lado, en el segundo periodo los píxeles con una alta fracción de cabida cubierta (70% - < 90%) tienen el mismo número de posiciones por hectárea que los píxeles sin árboles, principalmente en las posiciones correspondientes al comportamiento de pastoreo. Sin embargo, las zonas con una cabida cubierta de las copas de los árboles superior al 90% parecen mostrar una preferencia menor en ambos periodos. Cabe señalar que principalmente durante la primavera y el verano los animales prefirieron zonas donde la sombra de los árboles evitaba un calentamiento excesivo del terreno durante el día.

Estos resultados son importantes para los sistemas agrosilvopastorales, ya que se han visto perjudicados por algunas políticas, por ejemplo, por la definición de pastos permanentes de la Política Agrícola Común (PAC), que estableció que el terreno bajo la copa de los árboles no podía considerarse zona de pastos, dificultando el acceso a algunas subvenciones para las explotaciones de dehesa (Beaufoy y Ruiz-Mirazo, 2013).

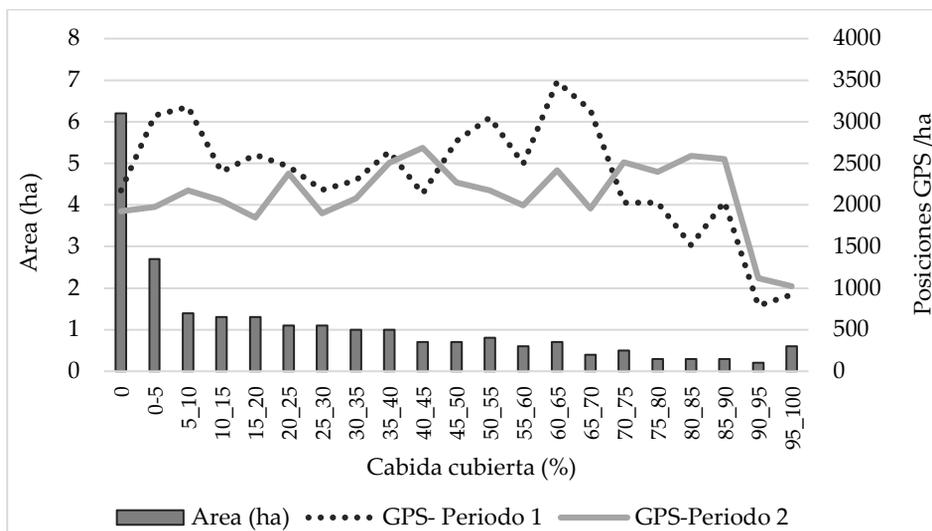


Figura 23. Superficie disponible y posiciones GPS de los animales según las categorías de la fracción de cubida cubierta.

En cuanto a los sitios ecológicos, los animales mostraron una fuerte preferencia por el sitio 2478 en ambos periodos (Figura 24 y 25). Este sitio corresponde a un terreno plano y al tipo de suelo cambisol que ocupa más superficie, dividido en una zona baja cercana al abrevadero y una zona alta que los animales utilizaban principalmente para el descanso nocturno. También se observó una mayor preferencia de los animales por los sitios expuestos al sol durante el periodo 1 (bajas temperaturas) y por los sitios no expuestos durante el periodo 2 (temperaturas cálidas), lo que apoya los resultados explicados anteriormente.

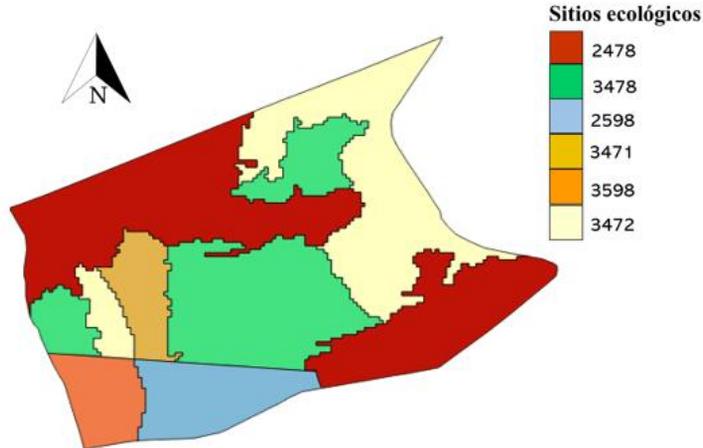


Figura 24. Distribución de los sitios ecológicos.

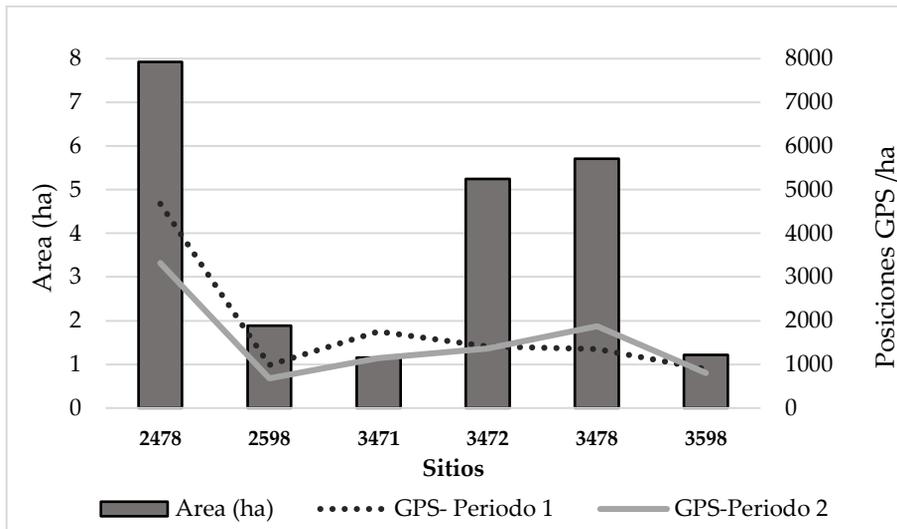


Figura 25. Superficie disponible y presión animal por sitio ecológico.

Llama la atención que el sitio 2598, que sólo difiere del 2478 en el tipo de suelo, tuviera la menor presencia de animales en ambos periodos. Podría atribuirse a una mayor distancia del agua, pero otros sitios aún más alejados del agua mostraron una mayor preferencia. Probablemente, el tipo de suelo afectó a las características de la vegetación, lo que explicaría en parte estos resultados.

En cualquier caso, es importante tener en cuenta las posibles interacciones entre los factores estudiados, especialmente cuando se trabaja a escala de explotación o de potrero. Cuando los animales seleccionan un determinado lugar, están eligiendo la combinación de varios factores que están vinculados en ese lugar.

Relación entre la presión animal y el cambio en la vegetación (NDVI)

Estimando el cambio en la disponibilidad de los pastos a través de los cambios en los valores del NDVI (Figura 26). En el primer periodo (invierno) la variación del NDVI fue pequeña, a diferencia del segundo periodo, donde hubo mucha mayor variación, ya que este periodo comenzó a finales del invierno y llegó hasta inicios del verano, cuando el pasto se agosta en las condiciones de la dehesa española.

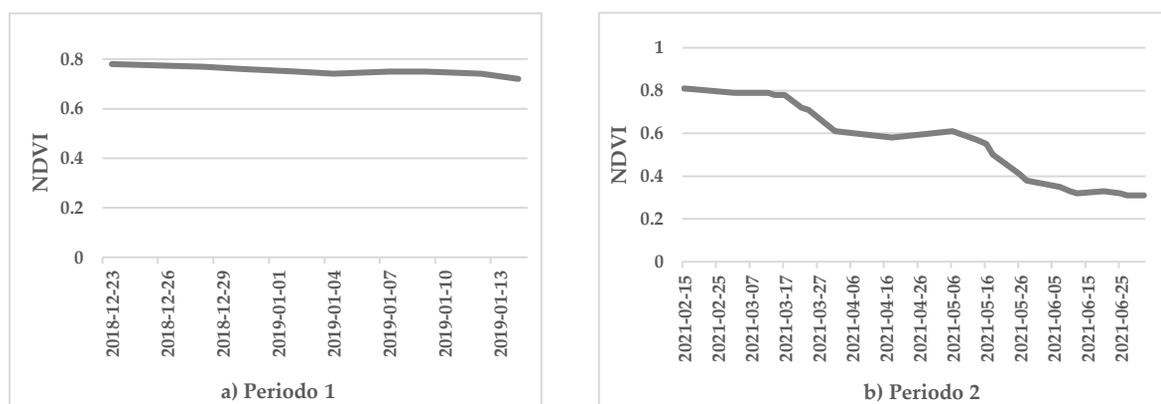


Figura 26. Evolución del NDVI en los dos periodos del estudio: a) primer periodo (invierno) y b) segundo periodo (final de invierno, primavera e inicio de verano).

Durante el primer período los valores de NDVI se mantuvieron superiores a 0,70 en el 87% del área. En el periodo 2 se observa cómo fue la evolución con una evidente disminución a valores del NDVI, siendo menores a 0,45 en el 70% del área en la época de verano. En la figura 27, se evidencia como los valores mayores del NDVI principalmente en la época del verano son las áreas donde están los árboles.

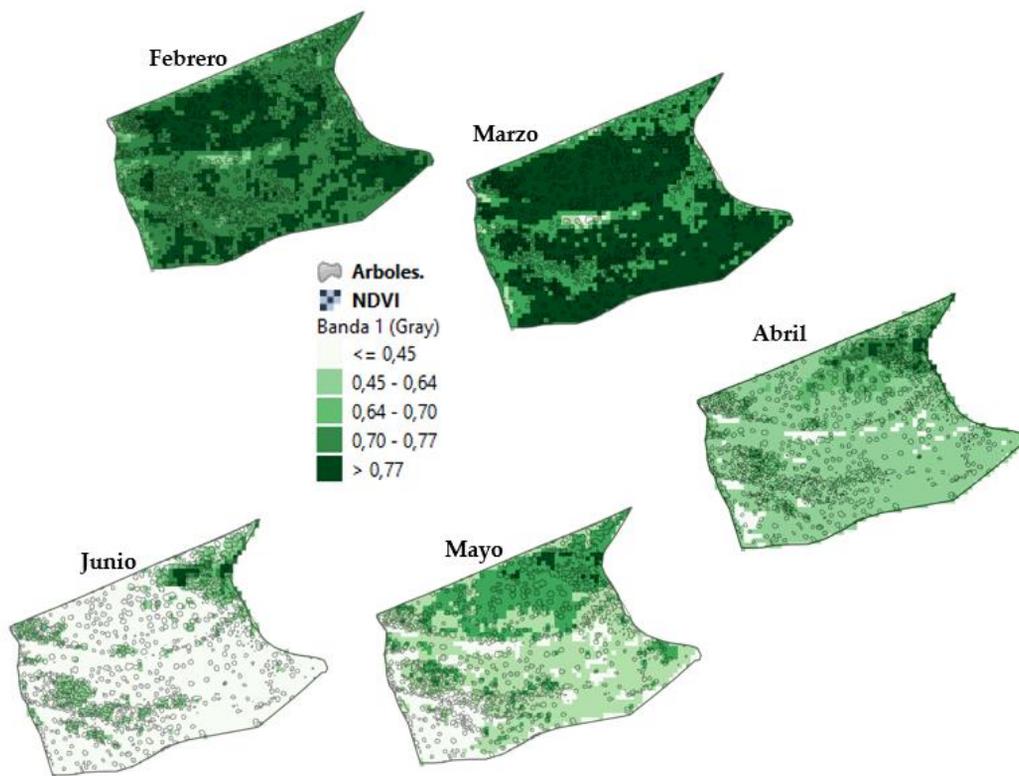


Figura 27. Evolución del NDVI de febrero a junio 2021.

La relación entre el cambio en el NDVI y la presencia de animales se muestra en la Figura 28 a través de la cuantificación de las localizaciones por metro cuadrado, para cada píxel de 10×10 m del pastizal.

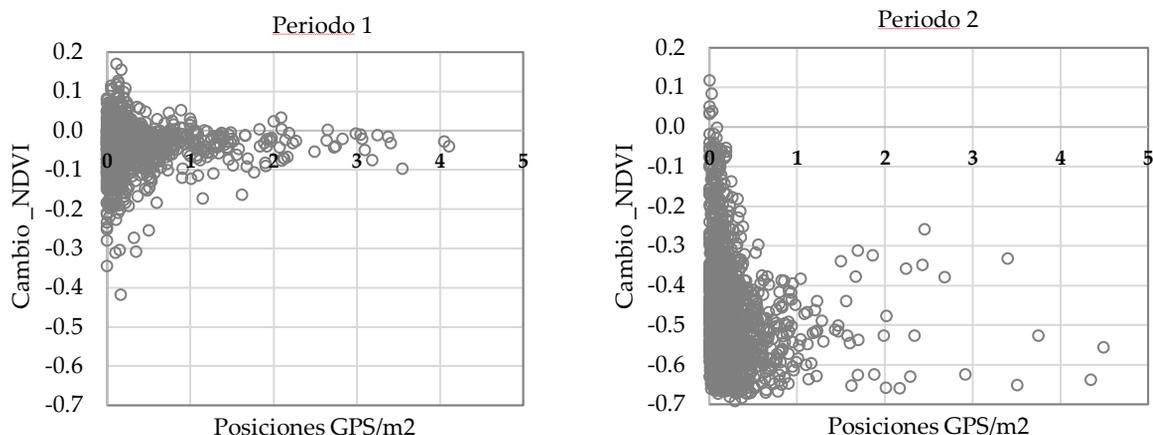


Figura 28. Relación entre el cambio del NDVI y la presencia de animales por píxel.

En la Figura 29, se muestra la distribución geográfica de los píxeles con un cambio bajo, medio y alto del NDVI, así como con una presencia de animales alta, media y baja (Figura 34). Las categorías baja, media y alta se definieron a partir de los valores de los percentiles 33 y 66.

En el periodo 1, los píxeles con mayor disminución del NDVI no correspondieron con los píxeles con mayor presencia de animales. Los animales pasaron la mayor parte del tiempo en los píxeles correspondientes al sitio 2478, cerca del abrevadero o en zonas elevadas. Sin embargo, la mayor disminución del NDVI se produjo en los píxeles alejados correspondiente a los límites del pastizal y en los píxeles de la zona central del prado (sitios 3471 y 3478).

Las observaciones de campo confirmaron que los píxeles del centro del potrero corresponden a una zona rocosa donde el suelo era frágil y tenía poca capacidad de retención de agua. Por lo tanto, el rápido descenso del NDVI en esta zona se debía a las características del lugar, no a la presencia de animales. Teóricamente, estos píxeles rocosos deberían formar parte de un sitio ecológico diferenciado según Gastó et al. (1993). Sin embargo, los datos disponibles no son lo suficientemente detallados como para identificar estas diferencias a escala de potrero.

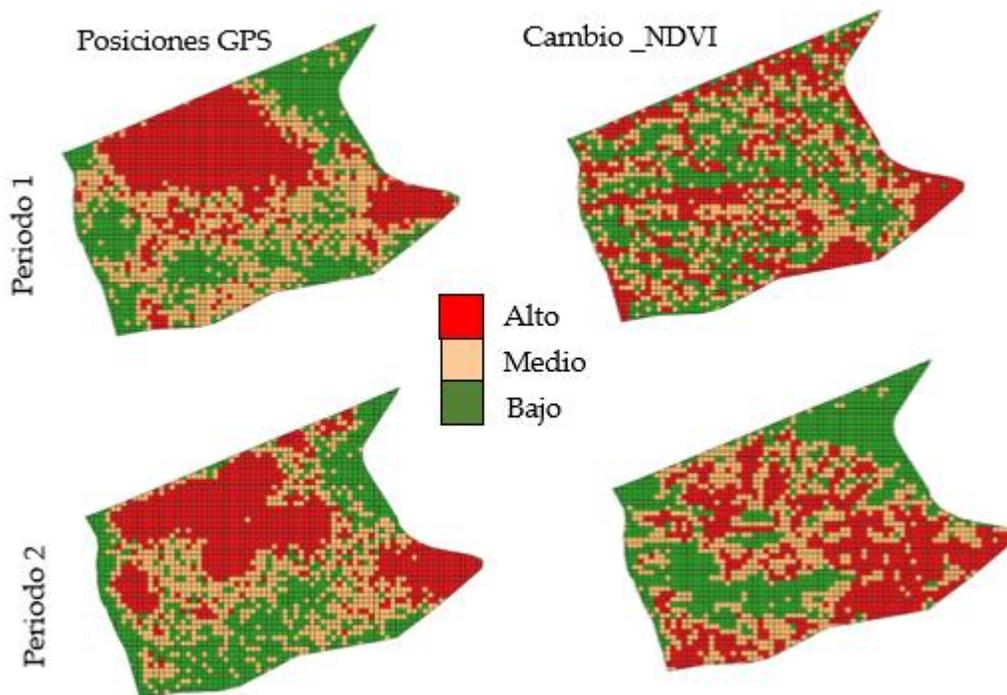


Figura 29. Distribución geográfica de la presencia de animales y cambio del NDVI. *Los colores de los píxeles van del verde (33% de los valores más bajos) al rojo (33% de los valores más altos).*

En relación con los píxeles situados entre los sitios 2478 y 2598, las observaciones de campo sugieren que la mayoría de estos píxeles deberían formar parte del sitio 2598 (tipo de suelo luvisol). Este es un ejemplo de las limitaciones actuales de las fuentes de datos abiertas, ya que el Mapa de Suelos de Andalucía se refiere a una escala 1:400.000, que no es adecuada para diferenciar los tipos de suelo a escala de potrero (las inexactitudes de cientos de metros podrían ser normales).

En el periodo 2, todos los píxeles con una alta disminución del NDVI también tenían una alta presión animal (la mayoría de estos píxeles corresponden a las zonas cercanas al abrevadero). Sin embargo, numerosos píxeles con una baja presencia de animales también tenían una alta disminución del NDVI. De nuevo, estos píxeles se referían principalmente a la zona rocosa del centro del pastizal o al sitio 2598.

Por otro lado, había algunos píxeles con una baja disminución del NDVI y una presión animal media, estos correspondían a zonas con una alta cobertura de copas, donde los animales pasaban algún tiempo descansando durante los días cálidos. La baja disminución del NDVI en estos píxeles no se debía a la existencia de pastos verdes, ya que las imágenes de satélite proporcionaban datos principalmente sobre las copas de los árboles en esos casos. Como las encinas son plantas de hoja perenne, los cambios del NDVI en los píxeles con una alta proporción de cobertura arbórea fueron limitados a lo largo del año, especialmente en comparación con los píxeles dominados por la vegetación herbácea. Estos resultados son de gran importancia para el desarrollo de herramientas de apoyo a la decisión basadas en imágenes remotas para sistemas agrosilvopastorales. Podemos resumir que para utilizar correctamente los datos de teledetección es necesaria una caracterización previa de la cobertura arbórea.

También es importante señalar que el periodo 2 tuvo una disminución del NDVI mucho mayor que el periodo 1 debido a la duración del periodo y a la estacionalidad (el periodo 2 incluía el comienzo del verano, cuando los pastos se marchitan en los sistemas mediterráneos). La relación entre la disminución del NDVI y la densidad de datos del GPS fue mejor en el periodo 2, lo que sugiere que los datos de teledetección probablemente no son lo suficientemente sensibles como para controlar cambios relativamente pequeños en el estado de la vegetación. Por tanto, las decisiones a corto plazo podrían basarse en datos de mayor resolución, por ejemplo, los proporcionados por drones o sensores sobre el terreno.

Como los animales realizan diferentes actividades en los pastos y se espera que el pastoreo sea el tipo de comportamiento más relacionado con el consumo de la vegetación, la Figura 30, muestra la relación entre la evolución del NDVI y la presión animal cuando se consideran sólo los puntos de datos del GPS correspondientes al comportamiento de pastoreo.

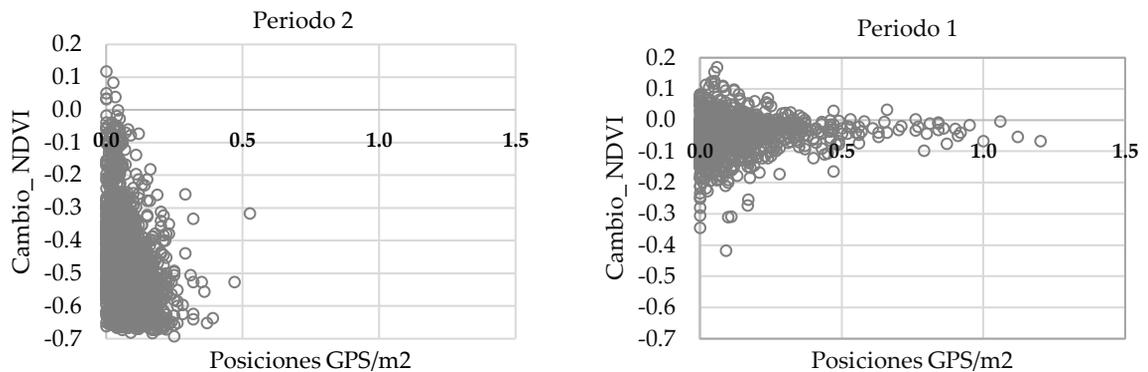


Figura 30. Relación entre el cambio del NDVI y la presencia de animales por píxel que corresponden al comportamiento de pastoreo.

Los resultados fueron muy similares a los obtenidos cuando no se tuvo en cuenta el comportamiento de los animales, aunque se redujo significativamente el intervalo de la variable “posiciones GPS por metro cuadrado”. Por lo tanto, los píxeles con los valores más altos para esa variable correspondían a zonas utilizadas principalmente para el comportamiento de descanso.

Por otro lado, para evitar el efecto de las copas de los árboles sobre el NDVI, la Figura 31 muestran la relación entre el cambio del NDVI y la presión animal sólo para los datos de comportamiento de pastoreo en los píxeles con menos del 10% de cobia cubierta, que se pueden considerar correspondientes en su mayoría a pastos.

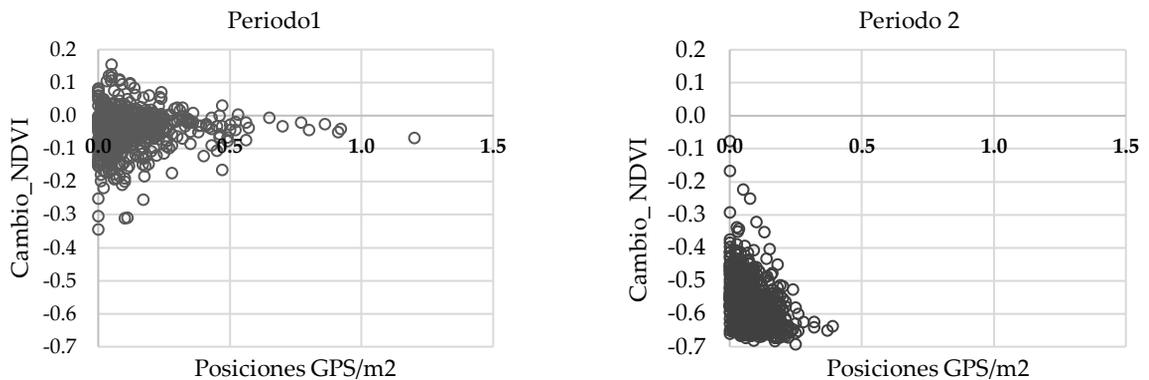


Figura 31. Relación entre el cambio del NDVI y la presencia de animales para los datos del comportamiento de pastoreo y los píxeles con menos del 10% de cubiada cubierta.

En la Figura 32, se muestra la relación entre el cambio del NDVI y la presión animal para los píxeles con más de 0,5 localizaciones por metro cuadrado en el periodo 1. No obstante, en la Figura 33, se aprecia que los píxeles con un alto descenso del NDVI y una baja presión animal seguían siendo numerosos en ambos periodos, correspondiendo en su mayoría al sitio 2598 y a las zonas cercanas. En esta explotación, el tipo de suelo, que define en parte el sitio ecológico, fue al menos tan importante como la presión animal para explicar la evolución del NDVI tanto en períodos cortos como largos. Las relaciones entre las variables estudiadas mejoraron ligeramente cuando no se consideraron los píxeles con alta fracción de cubiada cubierta.

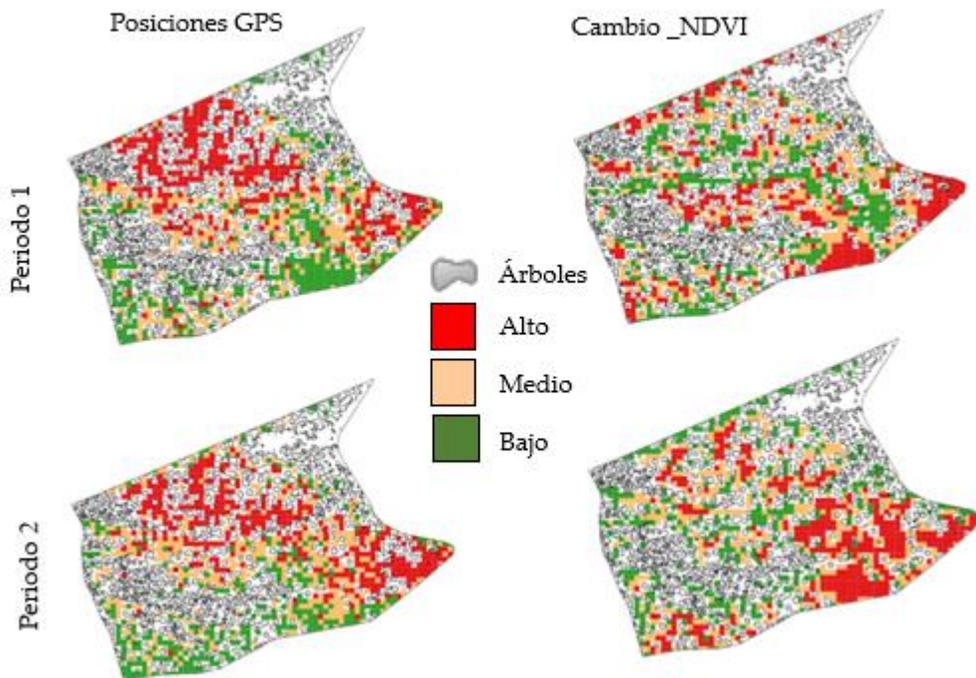


Figura 32. Mapa de la relación entre el cambio del NDVI y la presencia de animales para los datos del comportamiento de pastoreo y los píxeles con menos del 10% de cabida cubierta.

Es importante señalar que en la finca estudiada se utilizó un sistema de pastoreo continuo. Teóricamente, esto significaría que, durante los periodos de crecimiento de la vegetación (sobre todo en otoño y primavera en los sistemas mediterráneos), la biomasa puede aumentar rápidamente en las zonas donde los animales están menos presentes y, simultáneamente, disminuir en las zonas preferidas.

En esta sección hemos examinado como el seguimiento casi en tiempo real del pastoreo del ganado y de las características de la vegetación mediante la integración de datos de GPS y satélite podría servir como herramienta de apoyo a la toma de decisiones para los ganaderos, lo que les podría permitir tomar algunas decisiones, por ejemplo, incluir nuevos abrevaderos en diferentes lugares del prado, con el fin de mejorar el rendimiento y la sostenibilidad del sistema. También adecuar el

manejo restringiendo el acceso de los animales a algunas zonas cuando la biomasa caiga por debajo de un límite inferior. Sin embargo, algunos factores clave, como la pendiente o la distribución de la capa de árboles, no pueden ser modificados fácilmente por los ganaderos.

Relación entre la distribución de los animales y las heces en el terreno

El número total de posiciones GPS tras la consideración de las trayectorias fue de 110.880 para el periodo 1, correspondiente a 288 posiciones diarias, y de 44.688 posiciones durante el periodo 2, lo que corresponde a un promedio de 48 posiciones diarias por animal.

Como se ha explicado en Materiales y Métodos, la presencia de los animales en las parcelas de muestreo se representó con tres indicadores diferentes: el número de posiciones GPS, el número de segmentos de trayectoria, y el tiempo total que los animales pasaron dentro de la parcela.

En la Tabla 2, se muestran los valores estadísticos de tendencia central y dispersión, así como el número de datos atípicos y extremos, para la presencia de animales y la acumulación de heces. La distribución de los datos presenta un sesgo positivo, tal como indican los valores de la media mayores que la mediana, y la mediana con valores mayores que la moda.

Tabla 2. Estadísticos de la presencia de animales, medida en posiciones GPS, número de segmentos de trayectoria y tiempo total de permanencia y la acumulación de heces en las parcelas de muestreo.

	Nº de ítem por parcela de muestreo (período 2 completo)			
	Posiciones GPS	Segmentos	Tiempo	Heces
Media	20,38	145,67	10,48	28,16
Desviación estándar	46,60	158,61	23,23	50,82
Varianza	2.171,79	25.156,88	539,56	2.582,22
Mínimo	0	9	0	1
Máximo	379	1251	188	442
Rango	379	1242	188	441
1 ^{er} cuartil	5,00	67,25	3,00	9,25
Mediana	10,00	114,50	5,00	15,00
3 ^{er} cuartil	16,00	163,00	8,00	30,00
Rango intercuartílico	11,00	95,75	5,00	20,75
Moda	7,00	45,00	2,00	13,00
Extremos bajos	0	0	0	0
Valores atípicos bajos	0	0	0	0
Valores atípicos altos	4	1	3	7
Extremos altos	5	3	7	2

Como puede observarse mediante los estadísticos (Tabla 2) y las gráficas de caja “boxplot” (Figura 33), estadísticamente no identificamos valores atípicos y extremos bajos; sin embargo, si identificamos valores atípicos y extremos altos en 9 de las parcelas, de las cuales 5 presentaron valores extremos y 4 valores atípicos para el número de posiciones GPS, mientras que, para el número de heces, 2 parcelas presentaron valores extremos y 7 valores atípicos. Al revisar espacialmente la ubicación de estas parcelas las mismas están próximas a los sitios “hotspots” cercanos al punto de agua y a las zonas de descanso.

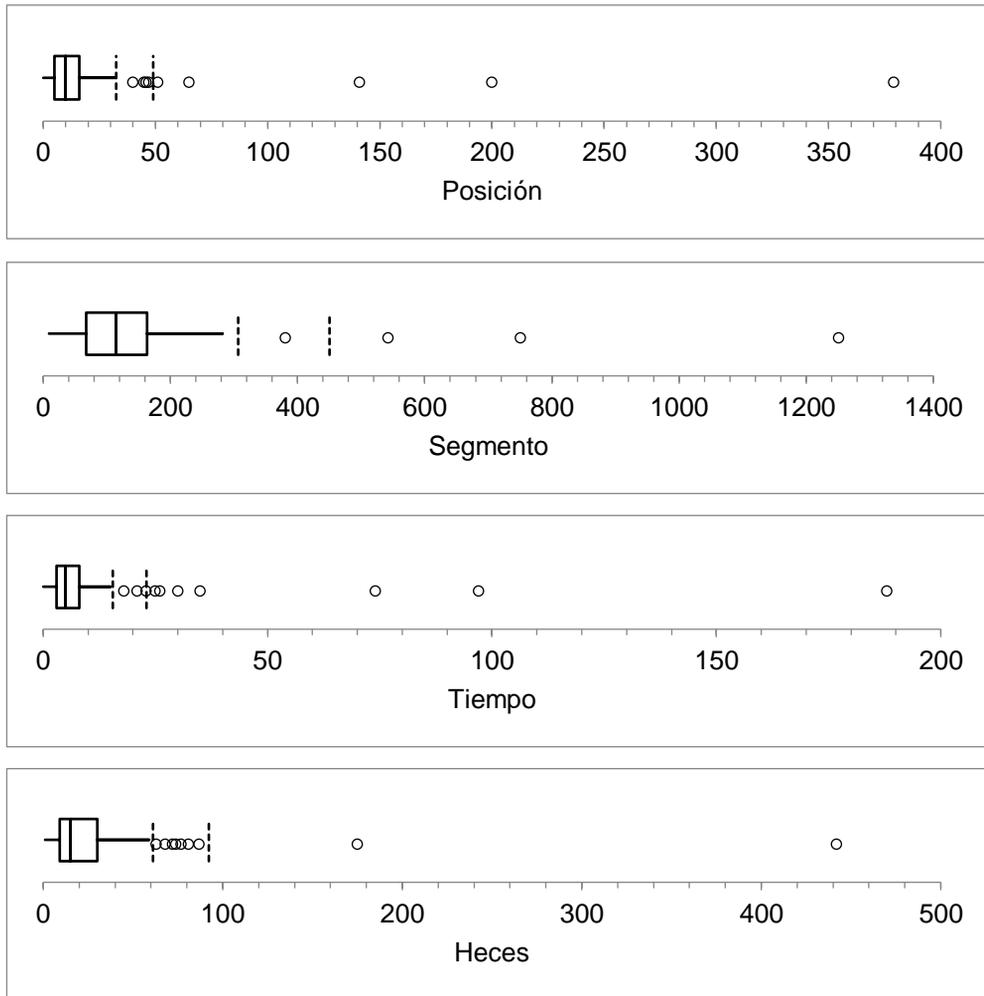
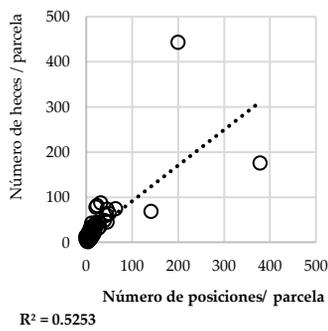


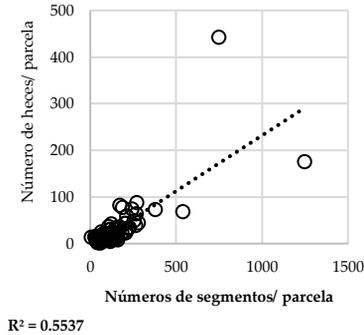
Figura 33. Gráficas de caja para las posiciones GPS y la acumulación de heces.

La representación gráfica de la relación lineal entre el número de heces y la presencia de animales en las parcelas de muestreo incluyendo y excluyendo las dos parcelas con valores extremos de acumulación de heces se muestra a continuación (Figura 34). Los coeficientes de determinación fueron similares en todos los casos, oscilando entre 0,5 y 0,6. No obstante, se obtuvieron resultados ligeramente mejores cuando se utilizó como variable independiente el número de segmentos que se cruzan en cada parcela.

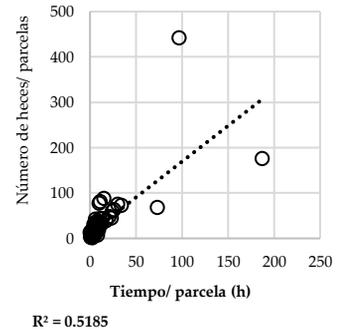
En la Figura 34, gráficas (a), (b) y (c) se pueden identificar los puntos calientes “hotspots” (valores extremos) que acumulan la mayor parte de las heces, donde el recuento total de heces fue de 175 y 442 para todo el periodo, es decir 2,2 y 5,6 heces por m² a lo largo de las 19 semanas. Como los datos de los puntos calientes tuvieron un gran efecto de palanca en la relación entre el recuento de las heces y la presencia de animales, las figuras (d), (e) y (f) muestran la correlación entre ambas variables sin incluir los puntos calientes. Los valores de los coeficientes de determinación no se ven muy afectados cuando se excluyen los datos de los puntos calientes, aunque la relación entre el número de heces y el número de segmentos mejoró y mostró la mayor linealidad.



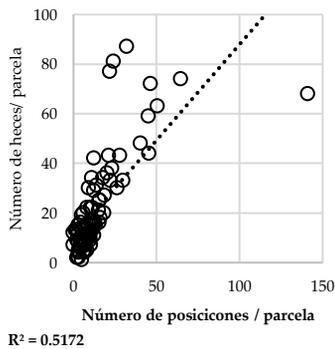
(a)



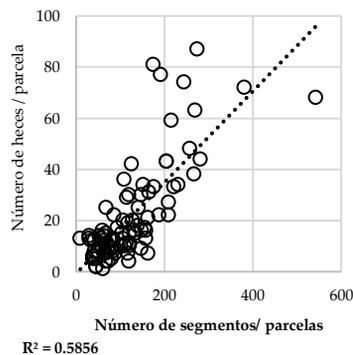
(b)



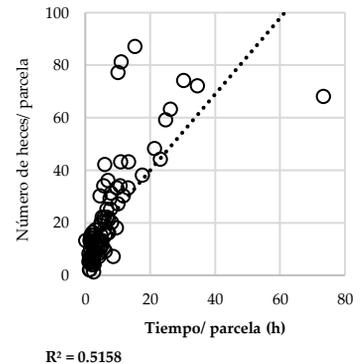
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 34. Relación lineal entre el recuento de heces y la presencia de animales, estimada como recuento de posiciones GPS (a, d), recuento de segmentos de

trayectoria (b, e) o tiempo de permanencia en la parcela (c, f), incluyendo (a, b, c) y excluyendo (d, e, f) “

En las figuras 35 y 36 se pueden observar los dominios temporal y espacial de la relación entre la distribución de las heces y la presencia de animales. El coeficiente de correlación entre el número de heces y el número de posiciones GPS por parcela y por semana mostró una gran variación entre semanas, oscilando entre 0,09 en la semana 1 y 0,63 en la semana 3. Cuando se utilizaron las semanas acumuladas, el máximo coeficiente de correlación (0,72) correspondió a la suma de los datos de las 19 semanas del estudio, pero se alcanzó un $r > 0,6$ con sólo 10 semanas acumuladas y un $r > 0,5$ con 6 semanas acumuladas. En cuanto al componente espacial de la correlación entre las variables estudiadas, cuando se agregaron los datos de 1 a 4 parcelas (cercanas entre sí), los valores del coeficiente de correlación sólo mejoraron ligeramente, lo que significa que el dominio temporal tuvo una mayor importancia para los modelos que correlacionan la distribución de las heces y animales.

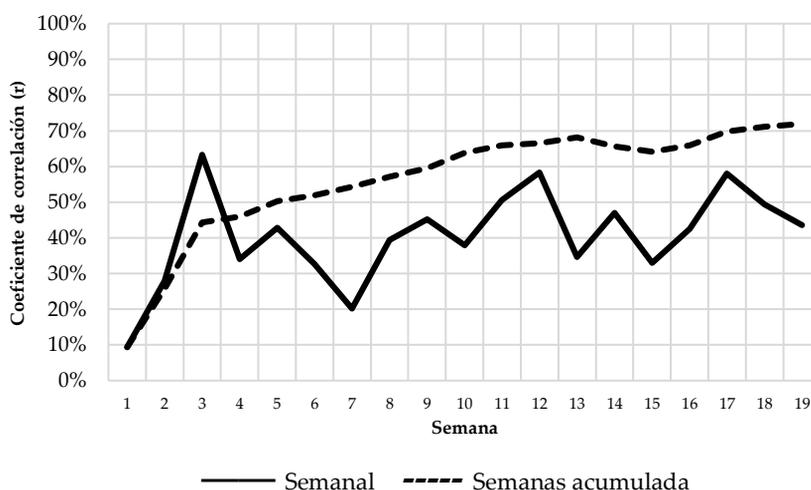


Figura 35. Coeficiente de correlación entre el número de heces y el número de posiciones por parcela, por semana y por semana acumulada.

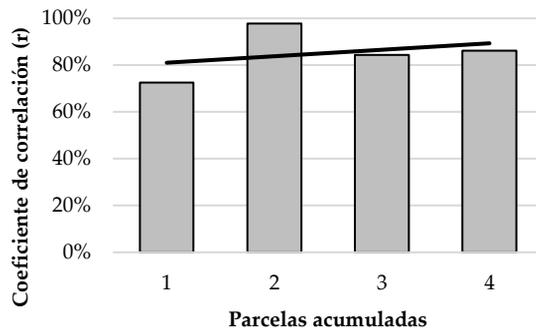


Figura 36. Coeficiente de correlación entre el número de heces y el número de posiciones por parcela acumulada.

Autocorrelación espacial de las posiciones GPS y las heces

En la Figura 37, se muestran a modo de mapa de calor, las posiciones de los datos GPS y de las heces. Se observa con sombreado gris a negro oscuro las áreas de mayor acumulación de datos. En la imagen de la izquierda para el caso de las posiciones GPS es más evidente que durante las horas de la tarde y noche los animales tienden a tener diferentes campamentos (puntos rojo y crema) en las áreas de mayor altura.

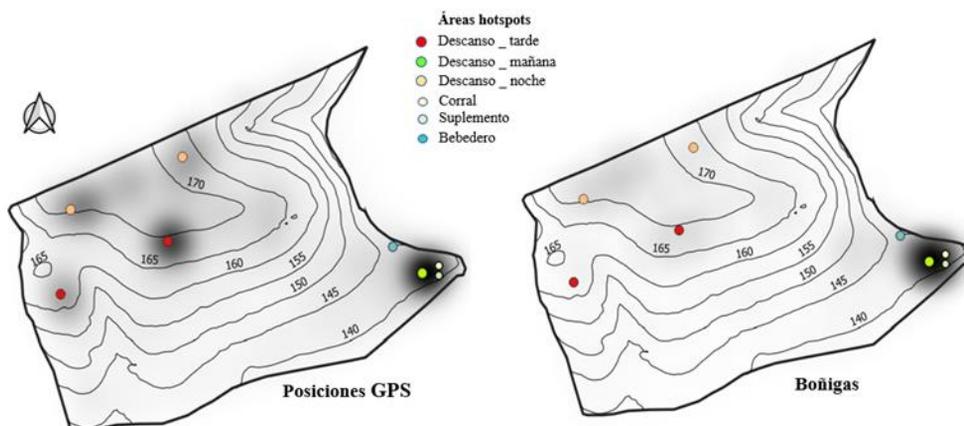


Figura 37. Hotspots según la presencia animal y de heces.

Otra forma de visualizar la distribución espacial de los datos de los collares GPS y del recuento de heces es a través de la representación 3D del número y la posición de los animales y de las heces. En la Figura 38, se muestra la distribución espacial de ambas variables donde se puede observar un gran paralelismo en la distribución de ambas.

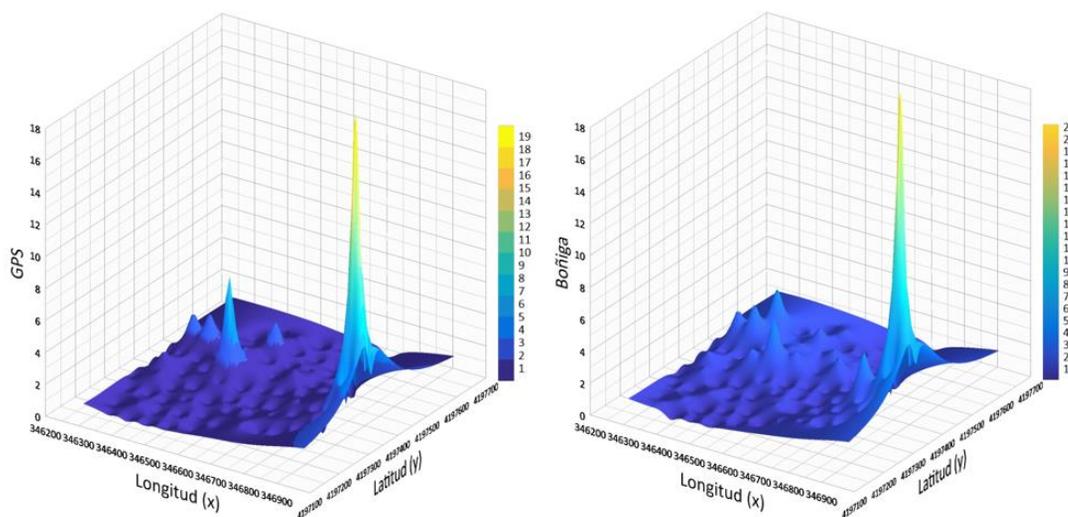


Figura 38. Distribución de los datos GPS y de heces en las 90 parcelas.

En la Tabla 3, se presentan los valores para el patrón de la distribución espacial mediante el algoritmo de vecinos más próximos de todas las posiciones GPS generadas por los collares de los animales, donde el valor acumulado del índice de vecindad se estimó en 0,60, y donde por semana se determinó el valor observado y esperado de la distancia media, siendo los valores en la distancia media observada menor que la esperada, indicándonos ambos valores que hay cierta tendencia al agrupamiento.

Tabla 3. Análisis de vecinos más próximos según datos de los collares GPS.

Semana	Distancia media observada	Distancia media esperada	Índice vecino más próximo	Número de datos	Z-Score
1	4,19	6,02	0,70	2544	-29,36
2	4,02	5,97	0,67	2640	-32,12
3	4,68	6,90	0,68	1966	-27,36
4	4,09	6,31	0,65	2330	-32,46
5	4,22	6,39	0,66	2349	-31,44
6	4,02	5,98	0,67	2639	-32,16
7	4,49	6,85	0,66	2016	-29,63
8	4,19	6,20	0,68	2352	-30,12
9	4,20	6,29	0,67	2352	-30,84
10	4,19	6,24	0,67	2351	-30,48
11	4,26	6,31	0,68	2302	-29,80
12	4,33	6,34	0,68	2350	-29,32
13	4,35	6,32	0,69	2303	-28,53
14	3,98	6,30	0,63	2352	-34,20
15	4,38	6,45	0,68	2252	-29,11
16	4,35	6,22	0,70	2346	-27,86
17	4,35	6,44	0,68	2352	-30,14
18	4,10	5,90	0,69	2687	-30,33
19	3,67	5,34	0,69	2364	-34,59

El análisis de los patrones de agrupamiento (hotspots y coldspots) mediante el G_i^* de Getis-Ord se muestra en la Figura 39, donde a través de los mapas de autocorrelación espacial se visualiza la distribución según los valores de puntuación Z estadísticamente significativos.

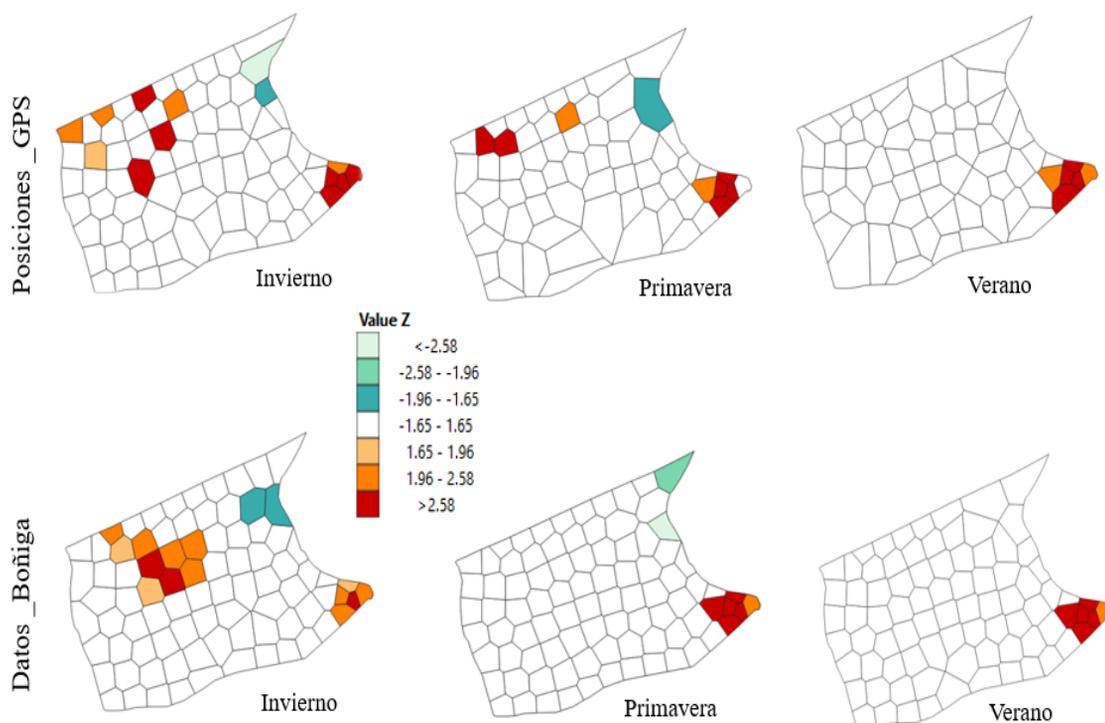


Figura 39. Mapa de autocorrelación espacial de los hotspots y coldspots en las 90 parcelas.

En las 90 parcelas se identificaron zonas con comportamiento similar, de los cuales el 7% corresponden a sitios “coldspots”, estos sitios son áreas que los animales no utilizan habitualmente ($-2,58 \leq Z \leq 1,96$), y están situados al noreste de la finca, correspondiendo a un espacio muy sombreado y húmedo. Por otro lado, cerca del 21% son sitios “hotspots” que corresponden a espacios cercanos al punto de agua y a zonas de descanso. Debe destacarse que el comportamiento espacial en invierno y primavera fue similar, pero en verano existe una mayor cantidad de posiciones GPS y también de heces cerca del punto de agua, y en el resto del espacio no hemos encontrado diferencias significativas en la distribución territorial de ambas variables. Finalmente, el tercer grupo corresponde al 72 % de la superficie donde la distribución territorial es homogénea estadísticamente.

Relación de los patrones espaciales y temporales con la distribución de las heces

Un total de 1838 posiciones fueron localizadas dentro de las 90 parcelas de muestreo durante el período experimental, lo que significa el 4,1% de todas las posiciones recogidas por los collares GPS. Estos datos se consideraron representativos del comportamiento del ganado en todo el prado, porque, como se explica en la sección de materiales y métodos, las parcelas de muestreo representaban el 3,1% de la superficie del prado.

Sin embargo, como se muestra en la Tabla 4, la distribución de los animales en los pastos no fue uniforme. Aunque sólo el 37,0% del terreno disponible podía considerarse llano (con una pendiente inferior al 10%), el 52,3% de las posiciones de la locación se encontraban en zonas llanas. La desproporción fue aún mayor en el caso de la distribución de las heces, ya que el 62,5% de las heces se depositaron en estas zonas.

El efecto de la exposición al sol no estaba claro, pero se ha observado una tendencia a reducir el número de heces en las laderas orientadas al oeste en relación con el número de posiciones. El ganado utilizó esas laderas sobre todo para el pastoreo nocturno durante el final de la primavera y el verano, mientras que la mayoría de las heces se concentraron en las zonas de descanso. El estrato arbóreo no afectó a la distribución de los animales, ya que los píxeles con una elevada cabida cubierta mostraron una proporción similar de posiciones que los píxeles sin árboles. Sin embargo, sí afectó a la distribución de las heces, ya que el número de heces en las zonas sin árboles fue el doble que en el resto.

Tabla 4. Distribución de las posiciones GPS y de las heces en función de los factores espaciales

Factor	Categoría	% Área	% Posiciones	% Heces
Pendiente	< 5%	7,82	13,83	20,05
	5-10%	29,17	38,47	42,46
	10-20%	51,33	42,71	34,69
	> 20%	11,67	4,98	2,80
Exposición al sol	Sin	36,99	52,31	62,51
	Norte	15,82	10,48	11,17
	Este	8,14	6,38	7,06
	Sur	2,38	0,88	2,25
	Oeste	36,66	29,96	17,01
Cubierta cubierta	0%	26,88	29,74	51,30
	0-25%	33,74	32,85	27,35
	25-50%	19,65	20,35	15,31
	>50%	19,73	18,73	6,04
Distancia al agua	< 50 m	2,21	4,03	5,92
	50-100 m	6,36	15,91	36,70
	100-200 m	15,76	9,36	6,43
	>200 m	75,67	70,70	50,95

Se observó una fuerte preferencia por las zonas situadas a menos de 100 m del abrevadero. La mayor parte de las posiciones en estas zonas correspondían al comportamiento de descanso durante la mañana, parte del cual podría corresponder a la rumia. Para el descanso nocturno, el ganado prefirió las zonas planas y elevadas situadas entre 350 y 550 m del abrevadero. El efecto de la distancia al agua en la distribución de las heces fue mayor que en la distribución de los animales, ya que el 42,6% de las deposiciones (19,94% de las posiciones del ganado) se registraron en parcelas de muestreo situadas a menos de 100 m del abrevadero, mientras que esta zona representaba sólo el 8,6% de la superficie disponible.

La variabilidad temporal de la distribución de los animales influyó en la distribución de las heces. Dos únicas parcelas de muestreo situadas en una zona llana entre 50 y 100 m del abrevadero, que representaban el 2,2% de la superficie

total muestreada, acumularon el 24,3% de los excrementos durante todo el periodo de estudio (hotspots). Ese porcentaje varió entre semanas, oscilando entre el 8,0% y el 41,2% (Figura 40). Dicho porcentaje se incrementó con la temperatura debido a la mayor presencia de animales en zonas cercanas al agua durante los días cálidos (Figura 41). Mientras que los animales pasaron la mayor parte del tiempo en zonas alejadas del abrevadero (>200 m) durante los días con una temperatura media inferior a 15° C, el tiempo se distribuyó por igual entre las zonas alejadas y las situadas entre 50 y 100 m del agua cuando la temperatura media se elevó a 22° C y más.

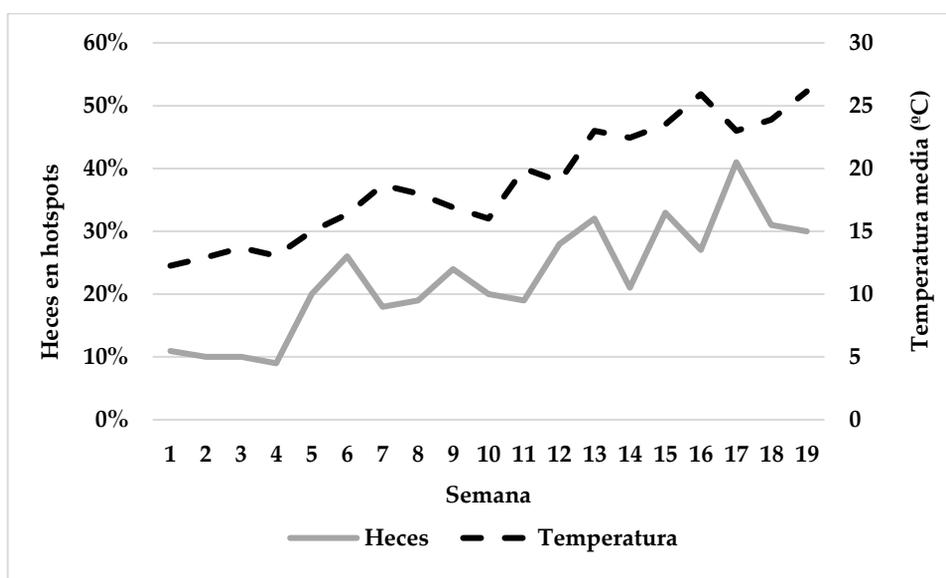


Figura 40. Porcentaje semanal de heces en los dos puntos principales de deposición de heces en función de la temperatura ambiente.

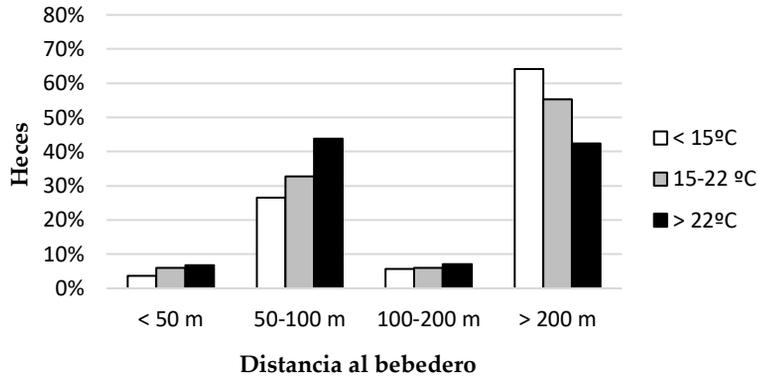


Figura 41. Efecto de la interacción temperatura ambiente-distancia al agua en la distribución de las heces.

También se observó una interacción entre la temperatura ambiente y la cobertura de las copas de los árboles para la distribución de las heces (Figura 42). Aunque la mayoría de las heces se depositaron en zonas sin cobertura arbórea, esta proporción fue aún mayor en los días cálidos. Es posible que el ganado pase más tiempo bajo los árboles con temperaturas más altas, pero esto no aumentó la deposición de estiércol en estas zonas, por el contrario, se redujo el número de heces en las zonas con alta fracción de cabida cubierta (>50%).

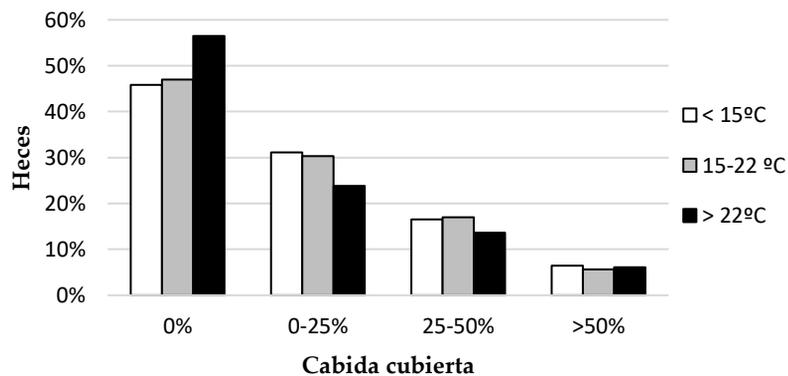


Figura 42. Efecto de la interacción temperatura ambiente-cubierta del dosel en la distribución de las heces.

En la Tabla 5 se muestran los valores del índice de selección de Jacobs según cada factor, siendo en promedio 0,30 y 0,45 para las posiciones GPS y para las heces, respectivamente.

Tabla 5. Índice de selección de Jacobs para la distribución de los animales y estiércol según los factores

Factores	Categoría	Posiciones (%)	Heces (%)	ISJ Posiciones	ISJ Heces	Sig.
Pendiente	< 5%	13,49	20,05	0,29 ± 0,15 ^c	0,36 ± 0,19 ^c	
	5-10%	37,37	42,46	0,20 ± 0,08 ^c	0,29 ± 0,14 ^c	*
	10-20%	44,72	34,69	-0,17 ± 0,12 ^b	-0,36 ± 0,14 ^b	***
	> 20%	4,41	2,8	-0,48 ± 0,18 ^a	-0,54 ± 0,28 ^a	
Exposición al sol	Sin	50,86	62,51	0,30 ± 0,13 ^c	0,45 ± 0,13 ^c	***
	Norte	8,06	11,17	-0,27 ± 0,15 ^b	-0,18 ± 0,18 ^b	
	Este	6,37	7,06	-0,21 ± 0,16 ^b	-0,26 ± 0,20 ^b	
	Sur	0,98	2,25	-0,51 ± 0,22 ^a	-0,49 ± 0,28 ^a	
	Oeste	33,72	17,01	-0,13 ± 0,16 ^b	-0,37 ± 0,10 ^{ab}	***
Cabida cubierta	0	25,59	51,3	-0,03 ± 0,08 ^a	0,21 ± 0,15 ^b	***
	0-25%	34,23	27,35	0,01 ± 0,05 ^{ab}	-0,15 ± 0,14 ^a	***
	25-50%	20,97	15,31	0,04 ± 0,05 ^b	-0,09 ± 0,21 ^a	*
	>50%	19,22	6,04	-0,02 ± 0,10 ^a	-0,24 ± 0,24 ^a	**
Distancia al agua	< 50 m	3,55	5,92	0,20 ± 0,18 ^c	0,20 ± 0,29 ^b	
	50-100 m	16,21	36,7	0,46 ± 0,11 ^d	0,64 ± 0,12 ^c	***
	100-200 m	8,81	6,43	-0,32 ± 0,07 ^a	-0,50 ± 0,20 ^a	***
	>200 m	71,43	50,95	-0,10 ± 0,11 ^b	-0,36 ± 0,18 ^a	***

Calibración y validación de los modelos de predicción de la distribución de las heces

Para evaluar las posibilidades de estimar la distribución de las heces en tiempo casi real a partir de los datos de los collares GPS y/o las fuentes de datos abiertas, se desarrollaron varios modelos basados en la regresión paso a paso.

Como variables de entrada se utilizaron alternativamente el número de posiciones GPS, el número de segmentos de trayectoria y el tiempo empleado en las parcelas de muestreo. También se calcularon los modelos obtenidos sin considerar los datos de los collares GPS, sino solo las variables del entorno.

Las covariables incluidas en los modelos de predicción tras el proceso de selección de variables paso a paso difieren entre rondas, aunque la distancia al agua y la pendiente se incluyeron en la mayoría de los modelos. Para evaluar el efecto de los dominios espacial y temporal, se calcularon modelos con datos por parcela y por semana, considerando todas las combinaciones posibles.

La Tabla 6 y 7, incluye las estadísticas de los modelos de predicción calibrados con datos de las semanas 1 a 13 y validados con datos de las semanas 14 a 19. Estos modelos cambiaron poco cuando se consideraron las posiciones, los segmentos o el tiempo como variables independientes. En algunos casos, el procedimiento por pasos seleccionó el número de posiciones o segmentos correspondientes al comportamiento de descanso como más significativo para predecir el número de heces que el número total de posiciones/segmentos, lo que sugiere que la deposición de las heces puede producirse preferentemente en zonas de descanso.

Los errores de los modelos se redujeron significativamente al incluir los datos de los collares GPS en los modelos de predicción, mostrando su valor añadido para el seguimiento de la distribución de las heces, y al agregar los datos tanto en el ámbito espacial como en el temporal. En general, los errores de validación fueron significativamente mayores que los correspondientes a la calibración, lo que demuestra que la relación entre el recuento de heces y las variables independientes fue diferente durante las primeras y las últimas semanas del ensayo. El mejor modelo se obtuvo con datos agregados para 4 parcelas y 6 semanas y segmentos de trayectoria como variable independiente ($R^2=0,82$).

Tabla 6. Modelos de predicción validados en el ámbito temporal

Dominio espacial	Dominio temporal	Variable GPS	CONS	Coeficientes*						R ²	MAEc**	MAEv**
				GPS	CC	DA	ES	NDVI	PE			
1 parcela	1 semana	-	3,382			-0,003			-0,097	0,097	1,324	1,912
1 parcela	1 semana	posición	2,172	0,479***		-0,002			-0,059	0,321	1,116	1,646
1 parcela	1 semana	segmento	1,872	0,186***		-0,002			-0,049	0,356	1,068	1,625
1 parcela	1 semana	tiempo	1,896	0,935		-0,002			-0,053	0,320	1,092	1,625
1 parcela	6 semanas	-	21,895			-0,020			-0,633	0,156	1,002	1,503
1 parcela	6 semanas	posición	11,282	0,512		-0,009			-0,322	0,508	0,709	1,116
1 parcela	6 semanas	segmento	-0,576	0,173						0,539	0,687	1,113
1 parcela	6 semanas	tiempo	4,879	1,199	-6,785					0,512	0,862	1,202
4 parcelas	1 semana	-	18,670			-0,013	-0,012		-0,586	0,291	0,864	1,400
4 parcelas	1 semana	posición	5,846	0,697***	-12,760	-0,003		20,025		0,529	0,679	1,146
4 parcelas	1 semana	segmento	4,930	0,250***	-10,092	-0,003		14,484		0,576	0,636	1,085
4 parcelas	1 semana	tiempo	3,595	1,363	-10,286			16,476		0,526	0,665	1,104
4 parcelas	6 semanas	-	99,713			-0,087			-3,336	0,380	0,737	1,303
4 parcelas	6 semanas	posición	20,231	0,757	-56,944					0,743	0,440	0,879
4 parcelas	6 semanas	segmento	19,528	0,299***	-46,765					0,828	0,363	0,802
4 parcelas	6 semanas	tiempo	17,450	1,590	-48,280					0,773	0,399	0,850

* Abreviaturas: GPS = número de posiciones, segmentos o suma de tiempos, CC = cabida cubierta, DA = distancia al agua, ES = exposición solar, NDVI = índice de vegetación de diferencia normalizada, PE = pendiente.

** Error absoluto medio (calibración y validación) expresado por parcela y semana.

*** Los datos se refieren únicamente al comportamiento en reposo.

Tabla 7. Modelos de predicción validados en el ámbito espacial

Dominio espacial	Dominio temporal	Variable GPS	CONS	Coeficientes*								R ²	MAEc**	MAEv**	
				GPS	CC	DA	ES	NDVI	PE	TP	TM				
1 parcela	1 semana	-	2,016		0,014	-0,003				-0,103	0,064		0,167	1,207	2,128
1 parcela	1 semana	Posiciones	1,742	0,366	-0,005	-0,002	-0,002			-0,061	0,052		0,451	1,058	1,984
1 parcela	1 semana	Segmentos	1,033	0,122		-0,001	-0,003			-0,055	0,045		0,470	2,237	3,003
1 parcela	1 semana	Tiempo	1,769	0,797	-0,007	-0,001	-0,003			-0,058	0,049		0,471	1,100	2,063
1 parcela	6 semanas	-	-9,061		9,141	-0,021				-0,651		0,865	0,293	0,934	1,790
1 parcela	6 semanas	Posiciones	-8,697	0,408	-4,843	-0,009	-0,017			-0,356		0,747	0,746	0,587	1,558
1 parcela	6 semanas	Segmentos	2,686	0,142			-0,024	-18,290		-0,302	0,394		0,779	0,527	1,635
1 parcela	6 semanas	Tiempo	-7,385	0,839	-4,902	-0,009	-0,018			-0,354		0,710	0,760	0,554	1,538
4 parcelas	1 semana	-	29,546		-21,261	-0,016	-0,058	-30,183	-0,715	0,333			0,360	1,241	1,603
4 parcelas	1 semana	Posiciones	11,772	0,913*	-29,115		-0,036	-19,093		0,217			0,590	0,900	1,234
4 parcelas	1 semana	Segmentos	9,053	0,332*	-22,751		-0,029	-18,016		0,197			0,641	0,844	1,124
4 parcelas	1 semana	Tiempo	11,994	1,850*	-28,989		-0,036	-17,675		0,197			0,600	0,894	1,223
4 parcelas	6 semanas	-	129,717			-0,167				-3,777			0,323	1,170	0,886
4 parcelas	6 semanas	Posiciones	31,117	1,073*	-93,624								0,657	0,722	0,572
4 parcelas	6 semanas	Segmentos	12,547	0,393*									0,707	0,597	0,557
4 parcelas	6 semanas	Tiempo	31,002	2,140*	-92,531								0,667	0,712	0,522

Abreviatura: GPS = posiciones, segmentos, o suma del tiempo, CC = cabida cubierta, DA = distancia al agua, ES = exposición solar, NDVI = índice de vegetación de diferencia normalizada, PA = pendiente, TP = temperatura promedio, TM = temperatura máxima

** Error absoluto medio (calibración y validación) expresado por parcela y semana.

La Figura 43, muestra la relación entre el número de heces observado y el predicho utilizando este modelo, tanto para los conjuntos de datos de calibración como de validación.

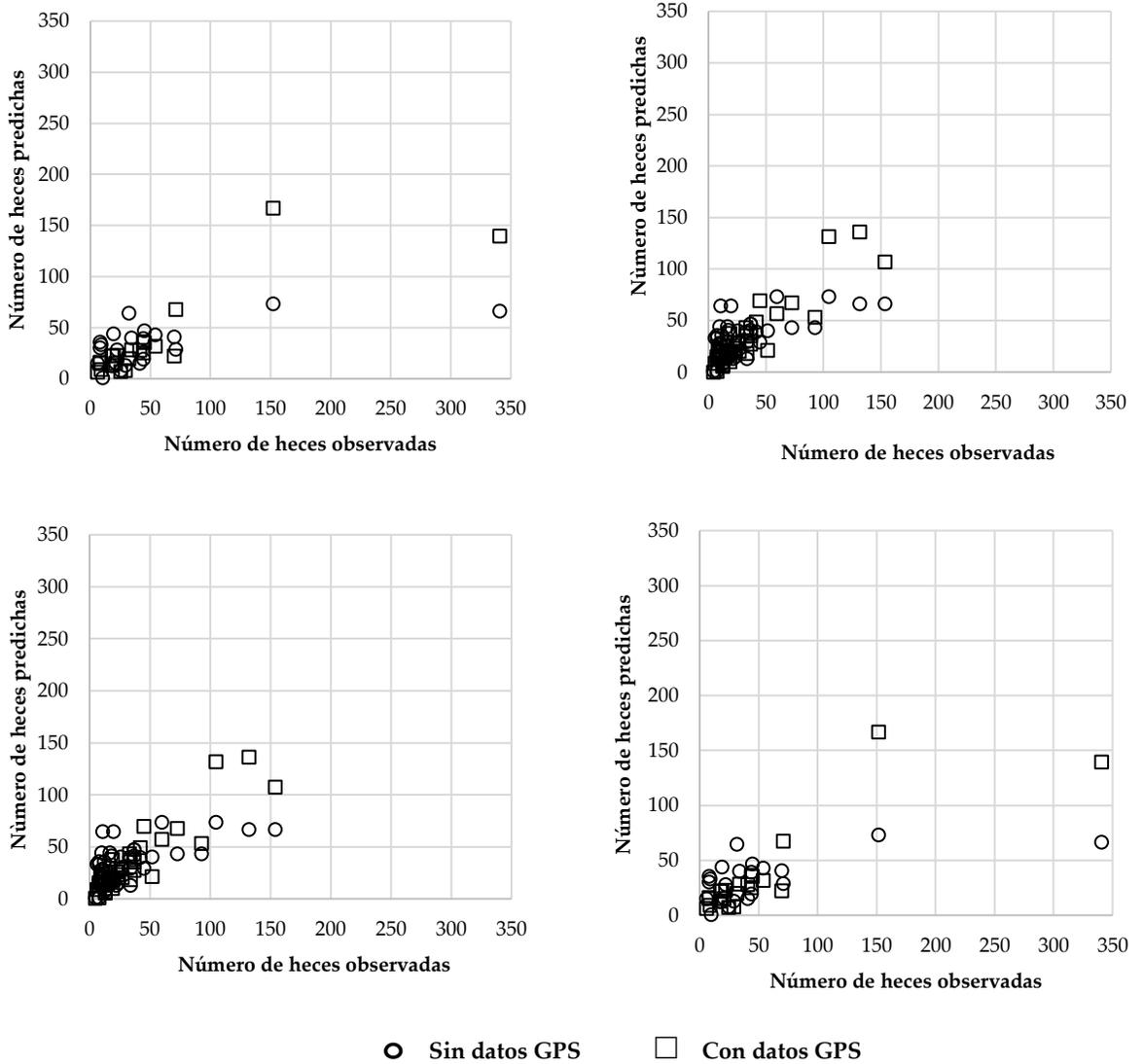


Figura 43. Relación entre el número observado de heces y el predicho para el mejor modelo de la Tabla 6 y para el modelo equivalente que excluye los datos del GPS.
 (a) Conjunto de datos de calibración, (b) Conjunto de datos de validación.

El mejor modelo no fue capaz de predecir adecuadamente el número de heces en los dos puntos calientes (cada uno de los cuales incluye 4 parcelas de muestreo), que acumularon más de 300 heces en las últimas 6 semanas del experimento. De hecho, el número máximo de heces en el conjunto de datos de calibración fue de 154. Sin embargo, la inclusión de los datos del GPS en el modelo permitió identificar los dos puntos calientes, ya que eran las únicas parcelas que tenían más de 100 excrementos predichos.

DISCUSIÓN

Complementariamente a las importantes aportaciones en los últimos años al conocimiento del pastoreo y su impacto, ha sido señalada por diferentes autores la necesidad de profundizar en el conocimiento del comportamiento de los animales en pastoreo, particularmente en lo referente a diferenciar el comportamiento individual de los animales y del rebaño, pero también a completar los argumentos para mejorar las estrategias y la gestión del pastoreo (White et al. 2001; Swain et al. 2011; Draganova et al. 2016; Becciolini and Ponzetta, 2018; Venter et al. 2019).

Según señalan Liao et al. (2018) la modelación futura de la selección de recursos ganaderos debe basarse en datos de rastreo GPS a más largo plazo e incorporar factores ambientales y culturales para interpretar mejor la complejidad asociada con el comportamiento del ganado en sistemas de pastoreo extensivo.

A pesar de las limitaciones del ensayo experimental, principalmente contar con pocos animales monitorizados con collares GPS y un espacio pastoral de menos de 25 ha, en este estudio se han abordado, desarrollado y cuantificado aproximaciones que han permitido una mejor comprensión de los patrones de pastoreo utilizando tecnologías de ganadería de precisión (PLF).

En nuestro caso, la utilización de collares GPS para monitorizar la localización del ganado, los modelos digitales del terreno, los datos meteorológicos obtenidos de estaciones automatizadas, la cuantificación automática de la cobertura arbórea con técnicas de reconocimiento visual y el seguimiento del comportamiento de la vegetación con imágenes satelitales de frecuencia semanal, se han mostrado especialmente útiles para identificar patrones de pastoreo, puntos de atracción del

ganado, el tiempo y el espacio dedicado a cada actividad en el pastizal, así como el cambio estacional de estas actividades.

Aspectos que coinciden con los resultados obtenidos por diversos autores (Handcock et al., 2009; Laca 2009; Rivero et al. 2021) y que nos indican que estas tecnologías están permitiendo desarrollar un enfoque integral que vincule el obtener beneficios en la producción, el bienestar animal, reducir los efectos medio ambientales y la provisión de servicios ecosistémicos (Banhazi et al., 2022). En esta misma dirección conducen los trabajos de Bailey et al. (2018) cuando indican que los avances tecnológicos recientes pueden hacer que el seguimiento en tiempo real o casi en tiempo real en los pastizales sea factible y rentable, así como la combinación de software, GPS, DEM y GIS permiten la cuantificación rápida, del uso por parte del ganado del espacio pastoral.

En cuanto al comportamiento del rebaño, nuestros resultados coinciden con los de Pandey et al. (2009) y Venter et al. (2019), que demostraron que la agrupación de los puntos GPS del ganado (distancia de los individuos al centroide del rebaño) se veía afectada por la época del año. También observamos que esta distancia dependía del tipo de actividad que realizaban los animales, con una distancia media máxima durante el pastoreo. En este sentido, el estudio nos ha permitido cuantificar un aspecto crítico del comportamiento en pastoreo como es la dispersión del rebaño en las distintas zonas de pastoreo dependiendo de la época del año, de la actividad realizada por los animales (descanso, pastoreo o desplazamiento), lo que coincide con algunos de los resultados de Cheleuitte-Nieves et al. (2018), que encontraron que la distancia total de todos los miembros al centro de la manada fue menor durante el invierno y mayor durante el verano.

Hemos cuantificado la preferencia por los sitios altos para el descanso por parte del ganado, así como, que con el incremento de la temperatura los animales pasaban más tiempo en las áreas donde habitualmente descansan, aspecto que ha sido señalado en otros trabajos donde se identificó que el ganado acampa en las zonas de mayor elevación (Trotter et al. 2010) y en trabajos como el de Gou et al (2019), donde señalan que la densidad de animales pastando y la pendiente tiene una relación negativa. También son importantes las coincidencias de nuestros resultados con los obtenidos por White et al. (2001) y Dubeux Jr. et al. (2014), en relación con que han determinado que en ambientes cálidos la posición de la

sombra y el agua tienen un mayor efecto sobre el comportamiento y la distribución de los animales en el espacio.

Una aportación importante de nuestro estudio ha sido incorporar en la gestión del pastoreo la distribución espacial de las heces, corroborando la importancia de identificar puntos calientes de acumulación de heces y también los puntos fríos donde la deposición de estas es pequeña o nula, tal cual como sugieren otras investigaciones (Eriksen y Kristensen 2001; White et al. 2001; McGechan y Topp 2004).

Aunque hay trabajos interesantes, entre ellos el de Silva et al. (2013), que han concluido que la temperatura y la humedad relativa influyeron significativamente en la dispersión de las heces, no hay muchos estudios previos sobre la modelización de la relación entre la presencia de animales y la deposición de heces (Yoshitoshi et al. 2016; Sheidai-Karkaj et al. 2022). En todo caso se puede concluir que son necesarios trabajos en condiciones mediterráneas.

La metodología utilizada ha permitido desarrollar varios modelos que permiten realizar una estimación de los sitios de deyección, principalmente a partir de las posiciones de los animales medidas por los collares GPS y también con características del territorio, datos meteorológicos y distintos focos de atracción para los animales. En el presente estudio, el ganado mostró una fuerte preferencia por los terrenos llanos y las zonas cercanas al agua, de acuerdo con estudios anteriores realizados por (Rivero et al. 2021; Yoshitoshi et al. 2016; Sheidai-Karkaj et al. 2022). En consecuencia, estos factores influyeron en la distribución de las heces dentro del pastizal.

En este tenor, nuestro trabajo corrobora y amplía los resultados obtenidos por Koch et al. (2018), que nos indican que con la predicción de los sitios de la deposición de la hece del ganado se puede reducir el riesgo de contaminación en fuentes de agua y suelo, y recomiendan un manejo del ganado que impida una excesiva presión en determinados espacios. En la misma dirección coincidimos con los resultados obtenidos por Yamada et al. (2011) que nos indican que se puede reducir el uso de fertilizantes en áreas con pendiente suave, alrededor de cercas, bolas de sal, y zonas de refugio, ya que estas áreas reciben nutrientes en mayores

cantidades por la descomposición de la hece y pueden llegar a tener efectos negativos por exceso de nutrientes.

Nuestros resultados también coinciden con lo sugerido por Hirata et al. (2011), cuando nos señalan que el patrón espacial de la distribución de la hece no es uniforme, lo que representa una dinámica espaciotemporal en relación con el comportamiento animal. Lomillos et al. (2017) señalan que estas herramientas podrían ayudar a desarrollar estrategias de manejo para modificar la distribución del ganado en las áreas de pastoreo, lo que permitiría la disminución del sobrepastoreo y la acumulación de nutrientes limitada a áreas pequeñas en sitios de descanso a través de la ubicación estratégica de puntos de agua, sombra, etc.

Finalmente podemos decir que se han desarrollado modelos de estimación que permiten identificar patrones espaciales de pastoreo asociados a la distancia al agua (especialmente en estaciones cálidas), la sombra, la dinámica del pasto, aspectos ya señalados por Yoshitoshi et al. (2020), así como la influencia del clima y la topografía del terreno con la distribución de la carga fecal como ha sido señalado anteriormente por Tate et al. (2003), Auerswald et al. (2010) y Homburger et al. (2015).

Especialmente relevante es la observación de Carnevalli et al. (2019) en su estudio señalan que la distribución de la hece estuvo relacionada con la presencia de sombra, siendo los sitios donde la mayor concentración de hece se encontró justo debajo de la copa del árbol o a los alrededores de este donde hay reflejo de la sombra. En el mismo sentido, Carpinelli et al. (2020) en sistemas sin árboles tuvo una mayor concentración de hece en lugares cercanos a los puntos de agua, puertas y vallas, a diferencia del sistema con árboles donde la distribución espacial de hece fue más uniforme, lo que se asemeja con los resultados de nuestro estudio.

Todo ello proporciona al productor herramientas útiles para tomar decisiones con el propósito de mejorar el manejo y el bienestar del ganado, lo que coincide con otros resultados referenciados en la literatura científica (Monteiro et al. 2021; Ganskopp y Bohnert 2009; Searle et al., 2010; Trotter et al., 2010; Di Virgilio et al., 2018; Tedeschi et al., 2021).

Conclusiones

CONCLUSIONES

- Los sistemas agrosilvopastorales como las dehesas son ecosistemas complejos en los que las interacciones entre animales y paisaje muestran una gran heterogeneidad espacial y temporal y los datos y el conocimiento actualmente disponibles presentan limitaciones para caracterizar la complejidad tanto del comportamiento animal como de la configuración espacial y de las respuestas de los diferentes componentes del sistema agrosilvopastoral.
- Los conceptos de sitio ecológico y cobertura de la cubierta vegetal han demostrado ser útiles para comprender mejor las interacciones entre animales y pastos y la monitorización de la posición de los animales podría ser un paso importante para desarrollar herramientas de apoyo a la toma de decisiones por parte de los agricultores con el fin de mejorar la rentabilidad, reducir el impacto ambiental y mejorar la provisión de servicios ecosistémicos.
- La integración de los datos provenientes de los collares GPS, modelos digitales del terreno, estaciones meteorológicas automatizadas, la clasificación y cuantificación automática de la cobertura arbórea, y el seguimiento del comportamiento de la vegetación con imágenes satélites se ha mostrado especialmente útil para identificar y monitorizar patrones de pastoreo en sistemas de dehesa. De igual forma, han sido eficaces para determinar los atrayentes y los sitios preferentemente utilizados por los animales, siendo herramientas importantes para desarrollar estrategias de gestión sostenible de los territorios de dehesa.
- Los distintos métodos utilizados para medir el comportamiento de los animales y particularmente la distribución de las heces son robustos, coherentes en sus resultados y permiten la interpretación de los patrones de pastoreo. Los modelos desarrollados a partir de las posiciones de los animales pueden ser útiles para poder cuantificar la importancia de factores estructurales del pasto como la distribución de

los árboles y también para mejorar los efectos de las heces en el suelo y la vegetación.

- Con las tecnologías utilizadas es posible cuantificar un aspecto crítico del comportamiento en pastoreo como es la utilización por el rebaño de las distintas zonas de pastoreo y su comportamiento en las distintas épocas del año, así como la actividad realizada por los animales como descanso y pastoreo.
- La aproximación y las tecnologías utilizadas permiten avanzar en el desarrollo de un enfoque integral del pastoreo que vincule el obtener beneficios en la producción, el bienestar animal y reducir los efectos medioambientales y podemos añadir que son factibles, rápidas, escalables y eficientes.
- En general, la identificación y caracterización de los principales impulsores de la distribución de los animales puede permitir a los ganaderos tomar algunas decisiones como incluir nuevos abrevaderos o áreas de descanso y realizar la suplementación en otros lugares del pasto con el fin de mejorar el rendimiento y la sostenibilidad del sistema.

Referencias Bibliográficas

BIBLIOGRAFÍA

- Anderson, D. M.; Winters, C.; Estell, R. E.; Fredrickson, E. L.; Doniec, M.; Detweiler, C.; Nolen, B. (2012). Characterising the spatial and temporal activities of free-ranging cows from GPS data. *The Rangeland Journal*. 34(2). 149-161. <https://doi.org/10.1071/RJ11062>
- Aquilani, C., Confessore, A., Bozzi, R., Sirtori, F., & Pugliese, C. (2022). Review: Precision Livestock Farming technologies in pasture-based livestock systems. *Animal*, 16(1), 100429.
- Arcidiacono, C., Porto, S. M. C., Mancino, M., & Cascone, G. (2017). Development of a threshold-based classifier for real-time recognition of cow feeding and standing behavioural activities from accelerometer data. *Computers and electronics in agriculture*, 134, 124-134. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.01.021>
- Auerswald, K.; Mayer, F.; Schnyder, H. (2010) Coupling of spatial and temporal pattern of cattle excreta patches on a low intensity pasture. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 88. 275-288. doi: 10.1007/s10705-009-9321-4.
- Bailey, D. W.; Brown, J. R. (2011). Rotational Grazing Systems and Livestock Grazing Behavior in Shrub-Dominated Semi-Arid and Arid Rangelands. *Rangeland Ecology & Management*. 64(1). 1-9. <https://doi.org/10.2111/REM-D-09-00184.1>
- Bailey, D.W.; Trotter, M.G.; Knight, C.W.; Thomas, M.G. (2018). Use of GPS tracking collars and accelerometers for rangeland livestock production research. *Translational Animal Science* 2. 81-88. doi: 10.1093/tas/txx006.
- Bailey, D. W., Trotter, M. G., Tobin, C., & Thomas, M. G. (2021). Opportunities to apply precision livestock management on rangelands. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 611915. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.611915>
- Banhazi, T., Halas, V., & Maroto-Molina, F. (Eds.). (2022). *Practical Precision Livestock Farming: Hands-on experiences with PLF technologies in commercial and R&D settings*. Wageningen Academic Publishers. <https://doi.org/10.3920/978-90-8686-934-3>
- Beaufoy, G., & Ruiz-Mirazo, J. (2013). Ingredientes para una nueva Política Agraria Común en apoyo de los sistemas ganaderos sostenibles ligados al territorio. *Pastos*, 43(2), 25-34.

- Becciolini, V.; Ponzetta, M. P. (2018). Inferring behaviour of grazing livestock: Opportunities from GPS telemetry and activity sensors applied to animal husbandry. *Eng. Rural Dev*, 17, 192-198.
- Berckmans, D. (2006). Automatic on-line monitoring of animals by precision livestock farming. *Livestock production and society*, 287, 27-30.
- Brennan, J., Johnson, P., & Olson, K. (2021). Classifying season long livestock grazing behavior with the use of a low-cost GPS and accelerometer. *Computers and Electronics in Agriculture*, 181, 105957.
- Cao, X., Ganjurjav, H., Liang, Y., Gao, Q., Zhang, Y., Li, Y., ... & Danjiu, L. (2016). Temporal and spatial distribution of grassland degradation in northern Tibet based on NDVI. *Acta Prataculturae Sinica*, 25(3), 1-8.
- Carnevali, R.; Mello, A.; Shozo, L.; Crestani, S.; Coletti, A.; Eckstein, C. (2019) Spatial distribution of dairy heifers' dung in silvopastoral systems. *Ciência Rural*. 49. doi: 10.1590/0103-8478cr20180796.
- Carpinelli, S.; da Fonseca, A.F.; Weirich Neto, P.H.; Dias, S.H.; Pontes, L.D. (2020) Spatial and Temporal Distribution of Cattle Dung and Nutrient Cycling in Integrated Crop–Livestock Systems. *Agronomy*. 10. doi: 10.3390/agronomy10050672.
- Carvalho, P. d. F. (2013). Harry Stobbs Memorial Lecture: Can grazing behavior support innovations in grassland management. *Tropical Grasslands*, 1(2), 137-155
- Catorci, A., Lulli, R., Malatesta, L., Tavoloni, M., & Tardella, F. M. (2021). How the interplay between management and interannual climatic variability influences the NDVI variation in a sub-Mediterranean pastoral system: Insight into sustainable grassland use under climate change. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 314, 107372. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107372>
- Chará, J., Reyes, E., Peri, P. L., Otte, J., Arce, E., & Schneider, F. (2019). Sistemas silvopastoriles y su contribución al uso eficiente de los recursos y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: Evidencia desde América Latina. *FAO y CIPAV*.
- Cheleuitte-Nieves, C.; Perotto-Baldivieso, H.L.; Wu, X.B.; Cooper, S.M. (2018) Association patterns reveal dispersal-aggregation dynamics among cattle in a South Texas Rangeland. *USA. Ecological Processes*. 7. 29. doi: 10.1186/s13717-018-0141-9.
- Cheleuitte-Nieves, C., Perotto-Baldivieso, H. L., Wu, X. B., & Cooper, S. M. (2020). Environmental and landscape influences on the spatial and temporal distribution of a

- cattle herd in a South Texas rangeland. *Ecological Processes*, 9, 1-18. <https://doi.org/10.1186/s13717-020-00245-6>
- Cox, S. (Ed.). (2003). *Precision livestock farming*. Wageningen Academic Publishers.
- Cuchillo Hilario, M., Wrage-Mönnig, N., & Isselstein, J. (2017). Behavioral patterns of (co-) grazing cattle and sheep on swards differing in plant diversity. *Applied Animal Behaviour Science*, 191, 17-23. <https://doi.org/10.1016/j.applanim.2017.02.009>
- Decandia, M., Giovanetti, V., Molle, G., Acciaro, M., Mameli, M., Cabiddu, A., ... & Dimauro, C. (2018). The effect of different time epoch settings on the classification of sheep behaviour using tri-axial accelerometry. *Computers and Electronics in Agriculture*, 154, 112-119. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.09.002>
- di Virgilio, A.; Morales, J.; Lambertucci, S.; Shepard, E.; Wilson, R. (2018). Multi-dimensional Precision Livestock Farming: A potential toolbox for sustainable rangeland management. *PeerJ*. 6. doi: 10.7717/peerj.4867.
- Díaz, M.; Pulido, F. (2009). *Dehesas perennifolias de Quercus spp. Bases ecológicas preliminares para la conservación de los tipos de hábitat de interés comunitario en España*. Ministerio de Medio Ambiente. y Medio Rural y Marino. Madrid. 69.
- Draganova, I.; Yule, I.; Stevenson, M.; Betteridge, K. (2016). The effects of temporal and environmental factors on the urination behaviour of dairy cows using tracking and sensor technologies. *Precision Agriculture*. 17. 407-420. <http://dx.doi.org/10.1007/s11119-015-9427-4>.
- Dubeux Jr, J.C.B.; Sollenberger, L.E.; Vendramini, J.M.B.; Interrante, S.M.; Lira Jr. M.A. (2014). Stocking Method. Animal Behavior. and Soil Nutrient Redistribution: How are They Linked? *Crop Science* 54. 2341-2350. <https://doi.org/10.2135/cropsci2014.01.0076>.
- Edirisinghe, A.; Hill, M. J.; Donald, G. E. & Hyder, M. (2011). Quantitative mapping of pasture biomass using satellite imagery. *International Journal of Remote Sensing*. 32(10). 2699-2724. doi: 10.1080/01431161003743181
- Eriksen, J.; Kristensen, K. (2001). Nutrient excretion by outdoor pigs: a case study of distribution. utilization and potential for environmental impact. *Soil Use and Management*. 17. 21-29. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2001.tb00004.x>.
- Esri. (2022). *Promedio de vecinos más cercanos (Estadística espacial)*. Disponible en <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/2.8/tool-reference/spatial-statistics/average-nearest-neighbor.htm>

- Fedehesa. (2022). Concepto de dehesa. Federación Española de la Dehesa. Consultado 7 enero de 2022. Disponible en <http://fedehesa.org/concepto-de-dehesa/>
- Feldt, T., & Schlecht, E. (2016). Analysis of GPS trajectories to assess spatio-temporal differences in grazing patterns and land use preferences of domestic livestock in southwestern Madagascar. *Pastoralism*, 6(1), 1-17. <https://doi.org/10.1186/s13570-016-0052-2>
- Fern, R. R., Foxley, E. A., Bruno, A., & Morrison, M. L. (2018). Suitability of NDVI and OSAVI as estimators of green biomass and coverage in a semi-arid rangeland. *Ecological Indicators*, 94, 16-21. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.06.029>
- Fernández-Habas, J.; García Moreno, A. M.; Hidalgo-Fernández, M. T.; Leal-Murillo, J. R.; Abellanas Oar, B., Gómez-Giráldez, P. J.; Fernández-Rebollo, P. (2021). Investigating the potential of Sentinel-2 configuration to predict the quality of Mediterranean permanent grasslands in open woodlands. *Science of The Total Environment*, 791, 148101. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148101>
- Franklin, D. H., Cabrera, M. L., Byers, H. L., Matthews, M. K., Andrae, J. G., Radcliffe, D. E., Calvert, V. H. (2009). Impact of water troughs on cattle use of riparian zones in the Georgia Piedmont in the United States. *Journal of animal science*, 87(6), 2151-2159. <https://doi.org/10.2527/jas.2008-1522>
- Freeman, J.E.; Jose, S. (2009) The role of herbicide in savanna restoration: Effects of shrub reduction treatments on the understory and overstory of a longleaf pine flatwoods. *Forest Ecology and Management*. 257. 978-986. doi: 10.1016/j.foreco.2008.10.041.
- Fuhlendorf, S. D., Fynn, R. W., McGranahan, D. A., & Twidwell, D. (2017). Heterogeneity as the Basis for Rangeland Management. *Rangeland Systems: Processes, Management and Challenges*, 169-196.
- Fukasawa, M., Komatsu, T., Higashiyama, Y., & Oshibe, A. (2018). The use of accelerometer to measure sleeping posture of beef cows. *Animal Science Journal*, 89(2), 488-493. <https://doi.org/10.1111/asj.12931>
- Ganskopp, D., Cruz, R., & Johnson, D. E. (2000). Least-effort pathways?: a GIS analysis of livestock trails in rugged terrain. *Applied Animal Behaviour Science*, 68(3), 179-190. [https://doi.org/10.1016/S0168-1591\(00\)00101-5](https://doi.org/10.1016/S0168-1591(00)00101-5)
- Ganskopp, D.C.; Bohnert, D.W. (2009). Landscape nutritional patterns and cattle distribution in rangeland pastures. *Applied Animal Behaviour Science*. 116. 110-119. doi: 10.1016/j.applanim.2008.10.006.

- Gastó Coderch, J.; Cosio, F.; Panario, D. (1993). Clasificación de ecorregiones y determinación de sitio y condición. Manual de aplicación a municipios y predios rurales. Santiago. Chile: Red de Pastizales Andinos.
- Gaughan, J. B.; Sejian, V.; Mader, T. L. & Dunshea, F. R. (2019). Adaptation strategies: ruminants. *Animal Frontiers*. 9(1). 47-53. doi: 10.1093/af/vfy029
- González, I.L.C.; Guerrero, J.M.; García-Ferrer, A.; Carrascosa, F.J.M.; de la Orden, M.S. (2010). Utilización de imágenes de satélite de alta resolución espacial en la determinación de la fracción de cabida cubierta en sistemas adehesados. In *La información geográfica al servicio de los ciudadanos: de lo global a lo local. Proceedings of the XIV Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica*, pp. 62-71.
- González, L. A.; Bishop-Hurley, G.; Henry, D. & Charmley, E. (2014). Wireless sensor networks to study, monitor and manage cattle in grazing systems. *Animal Production Science*. 54(10). 1687-1693. <https://doi.org/10.1071/AN14368>
- Gorelick, N.; Hancher, M.; Dixon, M.; Ilyushchenko, S.; Thau, D.; Moore, R. (2017) Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sens. Environ*, 202, 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- Gou, X.; Tsunekawa, A.; Peng, F.; Zhao, X.; Li, Y.; Lian, J. (2019). Method for Classifying Behavior of Livestock on Fenced Temperate Rangeland in Northern China. *Sensors (Basel)*. 19. 5334. doi: 10.3390/s19235334.
- Guo, Y., Poulton, G., Corke, P., Bishop-Hurley, G. J., Wark, T., & Swain, D. L. (2009). Using accelerometer, high sample rate GPS and magnetometer data to develop a cattle movement and behaviour model. *Ecological Modelling*, 220(17), 2068-2075. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2009.04.047>
- Halachmi, I., & Guarino, M. (2016). Precision livestock farming: a 'per animal' approach using advanced monitoring technologies. *Animal*, 10(9), 1482-1483. <https://doi.org/10.1017/S1751731116001142>
- Handcock, R.N.; Swain, D.L.; Bishop-Hurley, G.J.; Patison, K.P.; Wark, T.; Valencia, P.; Corke, P.; O'Neill, C.J. (2009). Monitoring Animal Behaviour and Environmental Interactions Using Wireless Sensor Networks. *GPS Collars and Satellite Remote Sensing. Sensors (Basel)*. 9. 3586-3603. doi: 10.3390/s90503586.
- Harmse, C. J., Gerber, H., & Van Niekerk, A. (2022). Evaluating Several Vegetation Indices Derived from Sentinel-2 Imagery for Quantifying Localized Overgrazing in a Semi-

- Arid Region of South Africa. *Remote Sensing*, 14(7), 1720.
<https://doi.org/10.3390/rs14071720>
- Hirata, M.; Ogura, S.-i.; Furuse, M. (2011). Fine-scale spatial distribution of herbage mass, herbage consumption and fecal deposition by cattle in a pasture under intensive rotational grazing. *Ecological Research*. 26. 289-299. doi: 10.1007/s11284-010-0782-3.
- Homburger, H.; Lüscher, A.; Scherer-Lorenzen, M.; Schneider, M.K. (2015). Patterns of livestock activity on heterogeneous subalpine pastures reveal distinct responses to spatial autocorrelation. *environment and management. Movement Ecology*. 3. 35. doi: 10.1186/s40462-015-0053-6.
- Jacobs, J. (1974). Quantitative measurement of food selection. *Oecologia*, 14(4), 413-417.
- Joffre, R.; Rambal, S. & Ratte, J. P. (1999). The dehesa system of southern Spain and Portugal as a natural ecosystem mimic. *Agroforestry Systems* 45. 57-79.
- Kaufmann, J.; Bork, E. W.; Alexander, M. J.; Blenis, P. V. (2013). Habitat selection by cattle in Foothill landscapes following variable harvest of aspen forest. *Forest Ecology and Management*. 306. 15-22. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.06.004>.
- Koch, B.; Homburger, H.; Edwards, P.J.; Schneider, M.K. (2018). Phosphorus redistribution by dairy cattle on a heterogeneous subalpine pasture. quantified using GPS tracking. *Agriculture. Ecosystems & Environment*. 257. 183-192.
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.10.002>.
- Köppen, W. (1900). Versuch einer Klassifikation der Klimate. vorzugsweise nach ihren Beziehungen zur Pflanzenwelt.(Schluss). *Geographische Zeitschrift*. 6(12. H). 657-679.
- Laca, E. (2009). Precision livestock production: Tools and concepts. *Revista Brasileira De Zootecnia-Brazilian Journal of Animal Science-REV BRAS ZOOTECHN*. 38. pp.123-132. doi: 10.1590/S1516-35982009001300014.
- León, E. A., Stevenson, M. A., Duffy, S. J., Ledesma, M., & Morris, R. S. (2006). A description of cattle movements in two departments of Buenos Aires province, Argentina. *Preventive Veterinary Medicine*, 76(1-2), 109-120.
<https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2006.04.010>
- LIFE bioDehesa (2017). http://www.uco.es/investigacion/proyectos/biodehesa/wp-content/uploads/02_Metodologia_clinica_sit_adehesados.pdf
- Liao, C., Clark, P. E., Shibia, M., & DeGloria, S. D. (2018). Spatiotemporal dynamics of cattle behavior and resource selection patterns on East African rangelands: evidence from

- GPS-tracking. *International Journal of Geographical Information Science*, 32(7), 1523-1540. <https://doi.org/10.1080/13658816.2018.1424856>
- Lomillos, J.; Alonso, M.; García, J.; Lacasa, V. (2017). Monitoring lidia cattle with GPS-GPRS technology; a study on grazing behaviour and spatial distribution. *Veterinaria México OA*. 4. doi: 10.21753/vmoa.4.4.405.
- Lusiana, B., van Noordwijk, M., & Cadisch, G. (2012). Land sparing or sharing? Exploring livestock fodder options in combination with land use zoning and consequences for livelihoods and net carbon stocks using the FALLOW model. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 159, 145-160.
- Manning, J.; Cronin, G.; González, L.; Hall, E.; Merchant, A.; Ingram, L. (2017a). The Behavioural Responses of Beef Cattle (*Bos taurus*) to Declining Pasture Availability and the Use of GNSS Technology to Determine Grazing Preference. *Agriculture*. 7. 45. <https://doi.org/10.3390/agriculture7050045>.
- Manning, J.; Cronin, G.; González, L.; Hall, E.; Merchant, A.; Ingram, L. (2017b). The effects of global navigation satellite system (GNSS) collars on cattle (*Bos taurus*) behaviour. *Applied Animal Behaviour Science*. 187. 54-59. <https://doi.org/10.1016/j.applanim.2016.11.013>
- MAPA (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación). (2020). Anuario de Estadística Agraria. 2020. Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación, Madrid, España. (Consultado: 3 de octubre de 2022) Disponible en: <https://www.mapa.gob.es/es/estadistica/temas/publicaciones/anuario-de-estadistica/default.aspx>
- MAPA (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación). (2022). Ganado bovino. (Consultado: 3 de octubre de 2022) Disponible en: <https://www.mapa.gob.es/es/ministerio/servicios/informacion/plataforma-de-conocimiento-para-el-medio-rural-y-pesquero/observatorio-de-tecnologias-probadas/sistemas-prodnut-animal/ganado-bovino.aspx>
- Maroto-Molina, F.; Gómez-Cabrera, A.; Guerrero Ginel, J.; Garrido-Varo, A.; Adame-Siles, J.; Perez-Marin, D.C. (2018). Caracterización y tipificación de explotaciones de dehesa asociadas a cooperativas: un caso de estudio en España. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*. 9. 812-832. doi: 10.22319/rmcp.v9i4.4534.
- Maroto-Molina, F.; Navarro, J.; Príncipe-Aguirre, K.; Gómez-Maqueda, I.; Guerrero Ginel, J.; Garrido-Varo, A.; Pérez-Marín, D. A. (2019). Low-Cost IoT-Based System to Monitor the Location of a Whole Herd. *Sensors*. 19. 2298. doi: 10.3390/s19102298.

- McGechan, M.B.; Topp, C.F.E. (2004). Modelling environmental impacts of deposition of excreted nitrogen by grazing dairy cows. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 103. 149-164. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2003.10.004>.
- McLean, D. J. & Skowron Volponi, M. A. (2018). trajr: An R package for characterisation of animal trajectories. *Ethology*. 124(6). 440-448. <https://doi.org/10.1111/eth.12739>
- Milán, M. J.; Bartolomé, J.; Quintanilla, R.; García-Cachán, M. D.; Espejo, M., Herráiz, P. L.; Piedrafita, J. (2006). Structural characterisation and typology of beef cattle farms of Spanish wooded rangelands (dehesas). *Livestock science*, 99(2-3), 197-209.
- Monteiro, A.; Santos, S.; Gonçalves, P. (2021). Precision Agriculture for Crop and Livestock Farming—Brief Review. *Animals*. 11 (8). 2345. <https://doi.org/10.3390/ani11082345>.
- Morgan-Davies, C.; Lambe, N.; Wishart, H.; Waterhouse, T.; Kenyon, F.; McBean, D.; McCracken, D. (2018). Impacts of using a precision livestock system targeted approach in mountain sheep flocks. *Livestock Science*. 208. 67-76. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2017.12.002>
- Odintsov Vaintrub, M.; Levit, H.; Chincarini, M.; Fusaro, I.; Giammarco, M.; Vignola, G. (2021). Review: Precision livestock farming, automats and new technologies: possible applications in extensive dairy sheep farming. *Animal*. 15. 100143. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2020.100143>.
- Pandey, V., Kiker, G. A., Campbell, K. L., Williams, M. J., & Coleman, S. W. (2009). GPS monitoring of cattle location near water features in South Florida. *Applied Engineering in Agriculture*, 25(4), 551-562. doi: 10.13031/2013.27465
- Parsons, J. J. (1962). The Acorn-Hog Economy of the Oak Woodlands of Southwestern Spain. *Geographical Review*. 52(2). 211–235. <https://doi.org/10.2307/212957>
- PNOA. (2022a). PNOA_MDT05_ETRS89_HU30_0923_LID. CC-BY 4.0 <https://ign.es>
- PNOA. (2022b). PNOA-MA-OF-ETRS89-HU30-H50-0923. CC-BY 4.0 <https://ign.es>
- Putfarken, D.; Dengler, J.; Lehmann, S.; Härdtle, W. (2008). Site use of grazing cattle and sheep in a large-scale pasture landscape: A GPS/GIS assessment. *Applied Animal Behaviour Science*. 111(1). 54-67. <https://doi.org/10.1016/j.applanim.2007.05.012>
- QGIS. (2022). QGIS Geographic Information System. Open-Source Geospatial Foundation Project. <https://qgis.org>.

- R Core Team. (2022). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna. Austria. URL <http://www.R-project.org/>.
- Raynor, E. J., Gersie, S. P., Stephenson, M. B., Clark, P. E., Spiegel, S. A., Boughton, R. K., ... & Augustine, D. J. (2021). Cattle grazing distribution patterns related to topography across diverse rangeland ecosystems of North America. *Rangeland Ecology & Management*, 75, 91-103. <https://doi.org/10.1016/j.rama.2020.12.002>
- REDIAM. (2022). Mapa de suelos de Andalucía 1:400.000. <https://descargasrediam.cica.es>.
- Reyes-Palomo, C., Aguilera, E., Llorente, M., Díaz-Gaona, C., Moreno, G., & Rodríguez-Estévez, V. (2022). Carbon sequestration offsets a large share of GHG emissions in dehesa cattle production. *Journal of Cleaner Production*, 358, 131918.
- Riaboff, L.; Couvreur, S.; Madouasse, A.; Roig-Pons, M.; Aubin, S.; Massabie, P.; Chauvin, A.; Bédère, N.; Plantier, G. (2020). Use of Predicted Behavior from Accelerometer Data Combined with GPS Data to Explore the Relationship between Dairy Cow Behavior and Pasture Characteristics. *Sensors* 20. doi: 10.3390/s20174741.
- Rivero, M.J.; Grau-Campanario, P.; Mullan, S.; Held, S.; Stokes, J.; Lee, M.; Cardenas, L. (2021). Factors Affecting Site Use Preference of Grazing Cattle Studied from 2000 to 2020 through GPS Tracking: A Review. *Sensors*. 21. 2696. doi: 10.3390/s21082696.
- Monti, F., Robert, A., Dominici, J. M., Sforzi, A., Bagur, R. T., Navarro, A. M., ... & Bentaleb, I. (2021). Using GPS tracking and stable multi-isotopes for estimating habitat use and winter range in Palearctic ospreys. *Oecologia*, 195, 655-666. <https://doi.org/10.1007/s00442-021-04855-5>
- Rodríguez-Ortega, T., Oteros-Rozas, E., Ripoll-Bosch, R., Tichit, M., Martín-López, B., & Bernuès, A. (2014). Applying the ecosystem services framework to pasture-based livestock farming systems in Europe. *animal*, 8(8), 1361-1372.
- Rombach, M., Münger, A., Niederhauser, J., Südekum, K. H., & Schori, F. (2018). Evaluation and validation of an automatic jaw movement recorder (RumiWatch) for ingestive and rumination behaviors of dairy cows during grazing and supplementation. *Journal of dairy science*, 101(3), 2463-2475. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-12305>
- Rouquette Jr, M., & Aiken, G. (Eds.). (2019). *Management strategies for sustainable cattle production in southern pastures*. Academic Press.
- Ruiz-Mirazo, J.; Herrera, P. M.; Barba, R.; & Busqué, J. (2017). Definición y caracterización de la ganadería extensiva en España. Fundación Entretantos y Plataforma por la

- Ganadería Extensiva y el Pastoralismo). Ed.: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPAMA). Madrid, España.
- Schlecht, E., Hülsebusch, C., Mahler, F., & Becker, K. (2004). The use of differentially corrected global positioning system to monitor activities of cattle at pasture. *Applied Animal Behaviour Science*, 85(3-4), 185-202. <https://doi.org/10.1016/j.applanim.2003.11.003>
- Searle, K.R.; Hunt, L.P.; Gordon, I.J. (2010). Individualistic herds: Individual variation in herbivore foraging behavior and application to rangeland management. *Applied Animal Behaviour Science*. 122. 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.applanim.2009.10.005>.
- Schütz, K. E., Rogers, A. R., Cox, N. R., & Tucker, C. B. (2009). Dairy cows prefer shade that offers greater protection against solar radiation in summer: Shade use, behaviour, and body temperature. *Applied Animal Behaviour Science*, 116(1), 28-34. <https://doi.org/10.1016/j.applanim.2008.07.005>
- Schwager, M., Anderson, D. M., Butler, Z., & Rus, D. (2007). Robust classification of animal tracking data. *Computers and Electronics in Agriculture*, 56(1), 46-59. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2007.01.002>
- Sharrow, S.H.; Brauer, D.; Clason, T.R. (2009). Silvopastoral Practices. In *North American Agroforestry: An Integrated Science and Practice*; H. "Gene" Garrett. Ed.; Wiley: New York, NY, USA. 2ed. chapter 6. pp 105-131.
- Sheidai-Karkaj, E., Haghiyan, I., Mofidi-Chelan, M., Sharifian-Bahreman, A., & Siroosi, H. (2022). Determining and comparing grazing zones based on animals' dung in semi-steppe rangelands: The case of North Iran. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 21(3), 180-186. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2021.08.002>
- Siabato, Willington & Guzmán-Manrique, Jhon. (2019). La autocorrelación espacial y el desarrollo de la geografía cuantitativa. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 28(1), 1-22. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v28n1.76919>
- Silva, R.; Neiva, J.; Santos, A.; Cândido, M.; Sousa, A.; Lopes, M.; da Silva, R.; Carneiro, L. (2013). Spatial distribution of feces and estimates of nitrogen return by dairy cows on mombasa grass pastures. *Revista Brasileira de Zootecnia*. 42. 369-380. doi: 10.1590/S1516-35982013000500010.
- Shin, S.; Soe, K. T.; Lee, H.; Kim, T. H.; Lee, S. & Park, M. S. (2020). A systematic map of agroforestry research focusing on ecosystem services in the Asia-Pacific Region. *Forests*. 11(4). 368. <https://doi.org/10.3390/f11040368>.

- Solano, J., Averós, X., Clemente, N., Aguirre, V., Estevez, I., & Orihuela, A. (2018). Location of supplementary feed and water troughs on the sward affects movement and spatial distribution of Brahman cattle (*Bos indicus*). *Applied Animal Behaviour Science*, 208, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.applanim.2018.08.011>
- Steinfeld, H., Gerber, P., Wassenaar, T. D., Castel, V., Rosales, M., Rosales, M., & de Haan, C. (2006). *Livestock's long shadow: environmental issues and options*. Food & Agriculture Org..
- Struckhoff, A. N.; Wallace, D. & Young, F. (2017). Ecological sites: A useful tool for land management. In In: Kabrick, John M.; Dey, Daniel C.; Knapp, Benjamin O.; Larsen, David R.; Shifley, Stephen R.; Stelzer, Henry E. eds. *Proceedings of the 20th Central Hardwood Forest Conference; 2016 March 28-April 1; Columbia, MO. General Technical Report NRS-P-167*. Newtown Square, PA: US Department of Agriculture, Forest Service. Northern Research Station: 72-76. (pp. 72-76).
- Swain, D.; Friend, M.; Bishop-Hurley, G.J.; Handcock, R.; Wark, T. (2011). Tracking livestock using global positioning systems - are we still lost? *Anim. Prod. Sci.* 51. 167-175. doi: 10.1071/an10255.
- Tate, K.W.; Atwill, E.R.; McDougald, N.K.; George, M.R. (2003). Spatial and temporal patterns of cattle feces deposition on rangeland. 56. 432-438. doi: 10.2307/4003833 10.2458/azu_jrm_v56i5_tate.
- Tedeschi, L.O.; Greenwood, P.L.; Halachmi, I. (2021). Advancements in sensor technology and decision support intelligent tools to assist smart livestock farming. *Journal of Animal Science*. 99. doi: 10.1093/jas/skab038.
- Theurer, M. E., Amrine, D. E., & White, B. J. (2013). Remote noninvasive assessment of pain and health status in cattle. *Veterinary Clinics: Food Animal Practice*, 29(1), 59-74. <https://doi.org/10.1016/j.cvfa.2012.11.011>
- Tomkins, N.W.; O'Reagain, P.J.; Swain, D.; Bishop-Hurley, G.; Charnley, E. (2009). Determining the effect of stocking rate on the spatial distribution of cattle for the subtropical savannas. *The Rangeland Journal*. 31. 267-276.
- Trotter, M.G.; Lamb, D.W.; Hinch, G.N.; Guppy, C.N. (2010). GNSS Tracking of livestock: Towards variable fertilizer strategies for the grazing industry. In *Proceedings of the 10th International Conference on Precision Agriculture (ICPA)*. Denver, United States of America. 18th - 21st July. 2010.

- Turner, L. W., Udal, M. C., Larson, B. T., & Shearer, S. A. (2000). Monitoring cattle behavior and pasture use with GPS and GIS. *Canadian Journal of Animal Science*, 80(3), 405-413. <https://doi.org/10.4141/A99-093>
- Ungar, E. D., Henkin, Z., Gutman, M., Dolev, A., Genizi, A., & Ganskopp, D. (2005). Inference of animal activity from GPS collar data on free-ranging cattle. *Rangeland Ecology & Management*, 58(3), 256-266. [https://doi.org/10.2111/1551-5028\(2005\)58\[256:IOAAFG\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.2111/1551-5028(2005)58[256:IOAAFG]2.0.CO;2)
- Veissier, I.; Kling-Eveillard, F.; Richard, M.; Silberberg, M.; De Boyer Des Roches, A.; Terlouw, C.; Ledoux, D.; Meunier, B.; & Hostiou, N. (2019). Élevage de précision et bien-être en élevage: La révolution numérique de l'agriculture permettra-t-elle de prendre en compte les besoins des animaux et des éleveurs. *INRA Prod. Anim*, 32(2), 281-290
- Venter, Z. S.; Hawkins, H.-J.; Cramer, M. D. (2019). Cattle don't care: Animal behaviour is similar regardless of grazing management in grasslands. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 272, 175-187.
- Villalobos, F.J.; Testi, L. Estaciones del Instituto de Agricultura Sostenible (CSIC). Córdoba. Estación "UCO Banco Germoplasma Olivo" (Rabanales. Córdoba). Available online: <http://www.uco.es/grupos/meteo/> (accessed on 14 sep 2021).
- Von Müller, A. R.; Renison, D.; Cingolani, A. M. (2017). Cattle landscape selectivity is influenced by ecological and management factors in a heterogeneous mountain rangeland. *The Rangeland Journal*. 39(1). 1-14. <https://doi.org/10.1071/RJ15114>
- Walter, A., Finger, R., Huber, R., & Buchmann, N. (2017). Smart farming is key to developing sustainable agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(24), 6148-6150. <https://doi.org/10.1073/pnas.1707462114>
- Werner, J., Leso, L., Umstatter, C., Niederhauser, J., Kennedy, E., Geoghegan, A., ... & O'Brien, B. (2018). Evaluation of the RumiWatchSystem for measuring grazing behaviour of cows. *Journal of neuroscience methods*, 300, 138-146. <https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2017.08.022>
- White, S.; Sheffield, R.; Washburn. S.; King, L.; Green. J. Spatial and Time Distribution of Dairy Cattle Excreta in an Intensive Pasture System. *Journal of environmental quality* (2001). 30. 2180-2187. [https://doi: 10.2134/jeq2001.2180](https://doi:10.2134/jeq2001.2180).
- Williams, M. L., Mac Parthaláin, N., Brewer, P., James, W. P. J., & Rose, M. T. (2016). A novel behavioral model of the pasture-based dairy cow from GPS data using data mining

- and machine learning techniques. *Journal of dairy science*, 99(3), 2063-2075. <https://doi.org/10.3168/jds.2015-10254>
- Yamada, D.; Higashiyama, M.; Yamaguchi, M.; Shibuya, T.; Shindo, K.; Tejima, S. (2011). Spatial Distribution of Cattle Dung Excretion and Dung Nutrients on a Sloping Pasture. *Japanese Journal of Grassland Science* (2011). 57. 129-135. doi: 10.14941/grass.57.129.
- Yazdanbakhsh, O., Zhou, Y., & Dick, S. (2017). An intelligent system for livestock disease surveillance. *Information Sciences*, 378, 26-47. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2016.10.026>
- Yoshitoshi, R., Watanabe, N., Yasuda, T., Kawamura, K., Sakanoue, S., Lim, J., & Lee, H. J. (2016). Methodology to predict the spatial distribution of cattle dung using manageable factors and a Bayesian approach. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 220, 135-141. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.12.025>
- Yoshitoshi, R.; Watanabe, N.; Lim, J. (2020). Spatial Distribution of Grazing Sites and Dung of Beef Cows in a Sloping Pasture. *Japan Agricultural Research Quarterly: JARQ* (2020). 54. 299-306. doi: 10.6090/jarq.54.299.
- Zehner, N., Umstätter, C., Niederhauser, J. J., & Schick, M. (2017). System specification and validation of a noseband pressure sensor for measurement of ruminating and eating behavior in stable-fed cows. *Computers and Electronics in Agriculture*, 136, 31-41. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.02.021>