

Córdoba, septiembre de 2021

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y de Montes



Máster en Ingeniería Agronómica
Trabajo Fin de Máster

**Uso de dispositivos IoT-GPS para la caracterización
de los factores que determinan la selección de
hábitat por el ganado vacuno en pastoreo**

Diego Varona Renuncio

Directores: Dr. Francisco Maroto Molina
Prof.^a Dra. Dolores C. Pérez Marín

ÍNDICE GENERAL

1.- INTRODUCCIÓN	1
2.- MATERIALES Y MÉTODOS	2
2.1.- Localización del estudio	2
2.2.- Animales monitorizados	3
2.3.- Fuentes de datos	4
2.3.1.- Modelo digital del terreno	4
2.3.2.- Imágenes satelitales	4
2.3.3.- Información meteorológica	5
2.3.4.- Infraestructuras de la finca	5
2.4.- Procesamiento de los datos	5
2.4.1.- Definición de la resolución espacial y temporal	5
2.4.2.- Procesamiento de los datos GPS	7
2.4.3.- Procesamiento de las imágenes Sentinel-2	8
2.4.4.- Procesamiento de datos meteorológicos	9
2.4.5.- Procesamiento del modelo digital del terreno	9
2.4.6.- Distancias a bebederos, puertas y cercas	10
2.4.7.- Cálculo de la fracción de cabida cubierta	10
2.5.- Análisis de datos	11
3.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN	13
3.1.- Efectos sobre la selección de hábitat	13
3.1.1.- Pendiente	15
3.1.2.- Orientación	16
3.1.3.- NDVI	17
3.1.4.- Temperatura y precipitación	18
3.1.5.- Distancia a los bebederos	18
3.1.6.- Distancia a las puertas	19
3.1.7.- Distancia a las cercas	19
3.1.8.- Fracción de cabida cubierta	20
3.1.9.- Área disponible	20
3.1.10.- Preferencia en el periodo anterior	20
3.2.- Validación de los modelos	21
4.- CONCLUSIONES	23
5.- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	24

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Periodos estudiados y parcelas ocupadas por el rebaño	6
Tabla 2. Descripción de las variables utilizadas en los modelos aditivos generalizados	12
Tabla 3. Modelos GAM para actividad alta y disponibilidad de pasto verde.....	13
Tabla 4. Modelos GAM para actividad alta y ausencia de pasto verde	14
Tabla 5. Modelos GAM para actividad baja y disponibilidad de pasto verde.....	14
Tabla 6. Modelos GAM para actividad baja y ausencia de pasto verde	15
Tabla 7. Tasa de acierto de los modelos de ausencia/presencia en los colectivos de calibración y validación....	22
Tabla 8. Error cuadrático de los modelos cuantitativos en los colectivos de calibración y validación	23

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Perímetro y cercados de la finca “Fuente del Perro”	3
Figura 2. Distribución de edades de los animales monitorizados.....	3
Figura 3. Localizador GPS de Digitanimal S.L.	4
Figura 4. Evolución anual del NDVI en la finca “Fuente del Perro”	7
Figura 5. Promedio de las distancias entre ubicaciones consecutivas en función de la hora del día.....	8
Figura 6. Mapas de pendiente y orientación elaborados a partir del MDT	10
Figura 7. Fracción de cabida cubierta para cada píxel de 10 x 10 m	11
Figura 8. Efectos de la pendiente sobre la selección de hábitat del rebaño.....	16
Figura 9. Efectos de la orientación sobre la selección de hábitat del rebaño	17
Figura 10. Efectos de la NDVI del pasto sobre la selección de hábitat del rebaño	18
Figura 11. Efectos de la distancia a los bebederos sobre la selección de hábitat del rebaño.....	19
Figura 12. Efectos de la distancia a las cercas sobre la selección de hábitat del rebaño	20
Figura 13. Efecto de la preferencia en el periodo anterior sobre la selección de hábitat del rebaño	21
Figura 14. Validación visual de la capacidad predictiva de los modelos de ausencia/presencia (actividad alta y disponibilidad de pasto verde).....	22
Figura 15. Validación visual de la capacidad predictiva de los modelos cuantitativos (actividad alta y disponibilidad de pasto verde).....	23

1.- INTRODUCCIÓN

El impacto de los procesos de digitalización en la agricultura y la ganadería ha sido muy importante en los últimos años, y cabe esperar que lo sea aún más en el futuro. Las tecnologías digitales suponen un cambio de paradigma en el manejo de las explotaciones, gracias al acceso a datos en tiempo real y al seguimiento del estado de las mismas de forma remota (Wolfert et al, 2017).

Los retos a los que se enfrenta la ganadería actual requieren el desarrollo de prácticas y tecnologías que permitan mejorar la eficiencia y la rentabilidad de las explotaciones, respetando el bienestar de los animales y reduciendo el impacto medioambiental asociado a la actividad ganadera. En el caso concreto de la ganadería extensiva, uno de los retos más importantes es la optimización de la relación animal-ambiente, con el fin de evitar los efectos negativos del infrapastoreo y el sobrepastoreo, la acumulación de heces, etc. La comprensión de los factores que determinan cómo los animales se distribuyen en su entorno y cómo usan los recursos disponibles en el mismo puede facilitar la consecución del citado objetivo.

La literatura científica identifica diversos factores relacionados con las características del entorno que influyen en la distribución del ganado en pastoreo: proximidad a fuentes de agua y cercados (Raynor et al, 2021; Rivero et al., 2021; Roath and Krueger, 1982), topografía (Ganskopp and Vavra, 1987; Rivero et al., 2021), tipo de vegetación (Parsons et al., 2003; Rivero et al. 2021), presencia de caminos (Ganskopp et al., 2000), cantidad y calidad del pasto (Ganskopp and Bohnert, 2009; Smith et al., 1992) o condiciones ambientales (Ganskopp et al, 2007).

El estudio de los factores que afectan al comportamiento y la selección de hábitat requiere una monitorización continua del ganado, que es muy costosa si se basa en la observación directa (Maroto et al., 2019). El desarrollo de collares GPS conectados a redes de largo alcance y baja potencia (Internet de las Cosas, IoT por sus siglas en inglés) permite un seguimiento automático y remoto del ganado extensivo, multiplicando la disponibilidad de datos sobre el comportamiento animal. Además, los datos recogidos con collares GPS se pueden combinar con los obtenidos con otros sensores o de fuentes de datos abiertos (Handcock et al, 2009). Así, la disponibilidad de imágenes satelitales multiespectrales a través de la misión Sentinel-2 permite disponer de información cuantitativa y cualitativa relativa al estado de los pastos (Ali et al., 2016; Filho et al, 2020). Los modelos digitales del terreno, disponibles a nivel estatal, pueden aportar información de gran utilidad para estudiar la selección de hábitat, como la pendiente o la orientación de una determinada zona, y cuando se acompañan de datos levantados sobre el terreno (bebederos, cercados, etc.), permiten georreferenciar la proximidad de los recursos para los animales. Finalmente, el empleo de datos procedentes de la red nacional de estaciones meteorológicas permite una mejor comprensión de los factores que determinan el comportamiento animal. La integración de toda esta información puede ayudar a llevar a cabo una gestión óptima de los recursos pastables mediante, por ejemplo, la anticipación de episodios de sobrepastoreo, la mejora del diseño y ubicación de los cercados y otras instalaciones para el manejo del ganado, etc.

Para el estudio de la selección de hábitats en base a datos GPS, tradicionalmente, se han usado los índices de selección (Ivlev, 1961; Jacobs, 1974). No obstante, tanto el número como la complejidad de las herramientas estadísticas que pueden usarse para estudiar la distribución de especies animales han aumentado exponencialmente en los últimos años (Elith et al, 2006). Concretamente, los modelos aditivos generalizados (Generalized Additive Models, GAM por sus siglas en inglés) se presentan como una herramienta estadística especialmente adecuada para la modelización ecológica. Por un lado, al contrario de lo que ocurre con los índices de selección, los GAM permiten una aproximación multivariante, considerando conjuntamente el efecto de distintos factores en la selección de hábitats. Por otro lado, muestran un equilibrio entre el poder predictivo y la interpretabilidad, que permite analizar en profundidad los factores que afectan y condicionan la distribución de las especies (Guisan et al, 2002).

El objetivo general de este Trabajo Fin de Máster (TFM) es el estudio de los factores que determinan la selección del hábitat del ganado vacuno en la dehesa, usando modelos aditivos generalizados alimentados con datos procedentes de sensores y de fuentes de datos abiertos.

2.- MATERIALES Y MÉTODOS

2.1.- Localización del estudio

Los datos utilizados en este estudio se recogieron entre julio de 2019 y julio de 2020 en una finca de dehesa (Fuente del Perro) situada en el Término Municipal de Pedroche, en el norte de la provincia de Córdoba. Se accede a la finca desde la carretera que une Pedroche con Villanueva de Córdoba (CO-6101). La temperatura media del periodo monitorizado fue de 17 °C, con una temperatura mínima de -0,7 °C y una máxima de 40,2 °C, mientras que la precipitación acumulada fue de 538 mm.

La finca “Fuente del Perro” cuenta con una superficie total de 208 ha, las cuales están divididas en 25 cercados (Figura 1), con una superficie comprendida entre 0,2 y 28,7 ha. La mayor parte de los cercados son utilizados por el ganado vacuno según el criterio del ganadero (algunos cercados pequeños se usan para proteger las edificaciones presentes en la finca o para alojar cerdos ibéricos). La finca está dominada por el ecosistema de la dehesa, un sistema agrosilvopastoral caracterizado por la presencia de arbolado disperso y un estrato inferior de pasto y matorrales. Este ecosistema es el más representativo en lo que concierne al ganado extensivo en el suroeste de la Península Ibérica, ocupando una superficie total de 5,8 millones de hectáreas (Joffre et al., 1999).



Figura 1. Perímetro y cercados de la finca “Fuente del Perro”

2.2.- Animales monitorizados

La finca “Fuente del Perro” cuenta con un rebaño de vacas nodrizas de raza Limusina de unas 75 cabezas (el número de vacas cambia ligeramente a lo largo del año). De estas, un total de 49 animales fueron monitorizados con collares GPS: 32 vacas reproductoras, 16 novillas de dos años y un toro. La distribución de edades de los animales monitorizados al comienzo del experimento se recoge en la Figura 2.

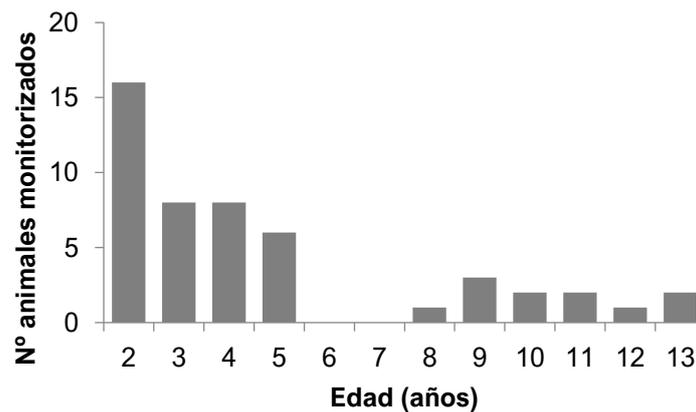


Figura 2. Distribución de edades de los animales monitorizados

Para el seguimiento de los animales se han usado los collares GPS comercializados por la empresa española Digitanimal S.L. Estos dispositivos cuentan con una unidad GPS para recoger los datos de ubicación de los animales, un módulo de comunicaciones IoT basado en la tecnología SigFox, el cual permite transmitir inalámbricamente los datos desde el collar a un servidor, un microcontrolador, una batería de litio y una carcasa IP67 (Figura 3). Cuentan

además con un acelerómetro y una sonda de temperatura, si bien la información recogida por estos sensores no se ha utilizado en el presente TFM. Los collares de Digitanimal S.L. están programados para capturar datos en intervalos de 30 minutos, y enviar un mensaje que incluye la siguiente información: identificador del collar, marca temporal, posición del animal en el sistema de coordenadas geográficas (latitud y longitud), aceleración media y máxima en los ejes XYZ y temperatura superficial del animal.



Figura 3. Localizador GPS de Digitanimal S.L.

Fuente: <https://digitanimal.com>

2.3.- Fuentes de datos

Junto a los datos procedentes de los collares GPS, se han utilizado las siguientes fuentes de datos abiertos, completados con la información levantada en campo.

2.3.1.- Modelo digital del terreno

El modelo digital del terreno (MDT) que se encuentra disponible en abierto para toda España procede de la interpolación de datos LIDAR del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA). Los datos usados en este TFM corresponden a la hoja 859 y pertenecen al vuelo del año 2014, siendo el paso de malla de 5 metros.

2.3.2.- Imágenes satelitales

Las imágenes satélites de mayor resolución disponibles como datos abiertos corresponden a la misión Copernicus de la Agencia Espacial Europea (ESA). Se han empleado las imágenes de los satélites Sentinel-2 con un nivel de procesamiento 2A, que corresponde a imágenes ortorrectificadas con niveles de reflectancia por debajo de la atmósfera. Dichas imágenes fueron obtenidas a través del servicio Copernicus Open Access Hub (<https://scihub.copernicus.eu/>). Las imágenes Sentinel-2 contienen 13 bandas espectrales en el espectro visible, infrarrojo cercano e infrarrojo de onda corta. La resolución espacial de las bandas utilizadas en el estudio (rojo e infrarrojo cercano) es de 10 metros. La resolución temporal de las imágenes es de unos

cinco días, cuando se combinan los satélites Sentinel-2A y 2B. Sin embargo, no todas las imágenes disponibles son utilizables. Estas fueron filtradas a partir de los metadatos contenidos en las propias imágenes, descartando aquellas con una proporción de nubes superior al 10%. Finalmente, se usaron 70 imágenes de un total de 148 disponibles en el periodo monitorizado.

2.3.3.- Información meteorológica

Los datos climáticos utilizados en este TFM corresponden a la estación meteorológica más cercana a la finca estudiada, que está situada en la localidad de Villanueva de Córdoba (38° 19' 59.0" N, 4° 36' 32.0" W) a una distancia de 11 km, habiéndose obtenido a través del portal de datos abiertos de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Las variables utilizadas han sido la temperatura ambiental y la precipitación, disponibles con una resolución temporal de una hora.

2.3.4.- Infraestructuras de la finca

Junto a los datos abiertos descritos en los apartados anteriores, se ha obtenido la ubicación de las infraestructuras de la finca que pueden tener efecto en el comportamiento animal, en concreto de los bebederos, las cercas y las puertas. Las coordenadas de las ubicaciones de los bebederos y las puertas fueron capturadas por el ganadero con la ayuda de un teléfono móvil. Las cercas se han georreferenciado con el software QGIS 3.10.14, usando la ortofoto de máxima actualidad del PNOA (hoja 859) como base. Esta imagen corresponde al vuelo de 2019 y presenta una resolución espacial de 0,25 metros, habiéndose obtenido a partir de un vuelo fotogramétrico realizado con una cámara digital de alta resolución (Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, 2019). Las ortofotos de máxima actualidad son suministradas en formato ECW (Enhanced Compression Wavelet) con las 3 bandas espectrales correspondientes al rojo, verde y azul.

2.4.- Procesamiento de los datos

2.4.1.- Definición de la resolución espacial y temporal

Los datos usados en este TFM presentan diferencias importantes en la resolución espacial y temporal. Respecto a la resolución temporal, los datos GPS están disponibles cada 30 minutos, mientras que los meteorológicos corresponden a intervalos horarios y los satelitales a periodos de 5-10 días, en función de si se usan uno o los dos satélites Sentinel-2. Por otro lado, los datos derivados del modelo digital del terreno o los correspondientes a las infraestructuras de la finca no presentan variabilidad temporal. En cuanto a la resolución espacial, los datos GPS tienen una resolución inferior a un metro el modelo digital tiene una resolución espacial de 5 m, las imágenes Sentinel de 10 m, y los datos climáticos no presentan variabilidad espacial dentro de los límites de la "Fuente del Perro". Estas diferentes resoluciones dificultan la integración de los datos.

Por tanto, para la integración de los datos y el uso de GAM se han ajustado los datos disponibles a una resolución espacial de 10 m y una resolución temporal de 10 días. La Tabla

1 describe los periodos de 10 días estudiados, indicando además en qué cercado o cercados estaba el rebaño en dicho periodo, lo cual se ha deducido de un análisis visual de las posiciones GPS, completado con los comentarios y notas del ganadero. Cuando los animales cambiaron de cercados en periodos menores de 10 días, los datos correspondientes no se han incluido en el estudio. Por otro lado, cuando el rebaño se dividía en dos o más grupos de animales distribuidos en parcelas diferentes, los datos se han tratado por separado como si correspondiesen a distintos rebaños y periodos.

Tabla 1. Periodos estudiados y parcelas ocupadas por el rebaño

Periodo	Inicio	Fin	Cercados	Pasto disponible
1	11/07/2019	20/07/2019	16-18-20	NO
2	21/07/2019	30/07/2019		
3	10/08/2019	19/08/2019		
4	20/08/2019	29/08/2019		
5	30/08/2019	08/09/2019		
6	09/09/2019	18/09/2019		
7	19/09/2019	28/09/2019		
8	29/09/2019	08/10/2019		
9	09/10/2019	18/10/2019		
10	19/10/2019	28/10/2019		
11a	29/10/2019	07/11/2019	6-8-9-10-11-12-13	SÍ
11b	29/10/2019	07/11/2019		
12a	08/11/2019	17/11/2019		
12b	08/11/2019	17/11/2019		
13	18/11/2019	27/11/2019		
14a	28/11/2019	07/12/2019		
14b	28/11/2019	07/12/2019		
15a	08/12/2019	17/12/2019		
15b	08/12/2019	17/12/2019		
16a	18/12/2019	27/12/2019		
16b	18/12/2019	27/12/2019		
17	28/12/2019	06/01/2020		
18	07/01/2020	16/01/2020		
19a	17/01/2020	26/01/2020		
19b	17/01/2020	26/01/2020		
19c	17/01/2020	26/01/2020		
20a	27/01/2020	05/02/2020		
20b	27/01/2020	05/02/2020		
21	17/03/2020	27/03/2020	8-9-10-11-12-13-14	
22	28/03/2020	05/04/2020		
23	06/04/2020	15/04/2020		
24	06/05/2020	15/05/2020	1-4-5-7-12	
25	16/05/2020	25/05/2020		
26	05/06/2020	14/06/2020	6-7-8-9-11	NO
27	25/06/2020	04/07/2020		

En la Tabla 1 también se indica, para cada periodo, la existencia o no de pasto verde en la finca, al ser este un factor determinante del comportamiento animal. Esta información se ha deducido del estudio de la evolución anual de los valores del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) en el cercado o grupo de cercados en los que se encontraban los animales.

La Figura 4 presenta la evolución del NDVI en la finca “Fuente del Perro” durante el periodo estudiado.

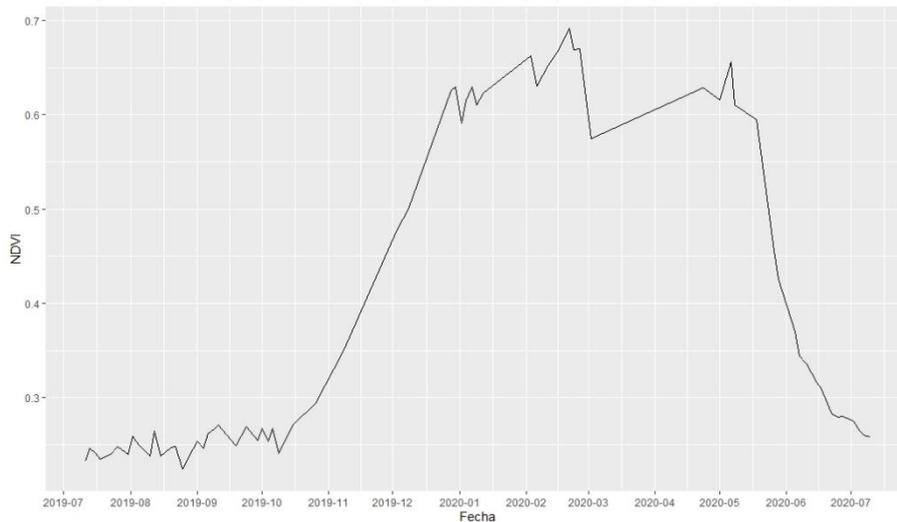


Figura 4. Evolución anual del NDVI en la finca “Fuente del Perro”

2.4.2.- Procesamiento de los datos GPS

En primer lugar, se realizó un filtrado espacial de las ubicaciones del ganado, eliminando aquellos datos que se encontraban fuera del perímetro de la dehesa “Fuente del Perro”, correspondientes a errores del GPS o a collares que no estaban aún colocados en un animal. Adicionalmente, es necesario tener en cuenta que los dispositivos GPS comercializados por Digitanimal S.L. pueden presentar fallos en el envío de datos a la nube debido a la falta de cobertura SigFox, lo cual provoca falta de datos o “gaps” en la serie de datos de posición de un determinado animal. Por ello, con objeto de que todos los animales contaran con los mismos datos de posición cada día, en primer lugar, se eliminaron aquellos días en los que un collar presentaba tres o más horas consecutivas sin datos.

Seguidamente, se procedió a calcular las trayectorias recorridas por los animales a partir de sus posiciones diarias con la ayuda del paquete *trajr* (McLean & Skowron Volponi, 2018) del software R (R Core Team, 2021). Las trayectorias así obtenidas se suavizaron con la función *TrajSmoothSG* (usando un polinomio de orden 3 y un tamaño de ventana de 5 m) y se remuestrearon cada 30 minutos con la función *TrajResampleTime*. De este modo, se obtuvieron trayectorias completas para todos los animales monitorizados, cada una ellas con 48 posiciones sincronizadas (ubicaciones de distintos collares referidas a las mismas marcas temporales). En un análisis preliminar de los datos, se observó que las zonas utilizadas por los animales para descansar difieren de las utilizadas para otras actividades, por lo que se decidió separar las ubicaciones GPS en dos grupos: posiciones correspondientes a actividad alta (pastoreo y desplazamiento) y posiciones correspondientes a actividad baja (descanso y rumia). Los acelerómetros son una buena herramienta para discernir los comportamientos del ganado (Guo et al, 2009; Anderson et al, 2012), pero los datos de aceleración recogidos por los collares de Digitanimal S.L. usados en este estudio resultaron insuficientes para este fin, debido a su baja resolución temporal. Se optó entonces por determinar el comportamiento de los animales en

base a la velocidad media de desplazamiento entre dos puntos (Trotter et al., 2010; Cheleuitte-Nieves et al., 2020). A partir de las trayectorias normalizadas y suavizadas, se determinó la distancia euclídea entre cada ubicación de un animal y la siguiente, obteniéndose una estima de la distancia recorrida en cada intervalo de 30 minutos. Analizando gráficamente la distribución diaria de las distancias entre posiciones consecutivas (Figura 5), se determinó un límite de 50 metros para diferenciar entre actividad alta, correspondiente al pastoreo y el desplazamiento, y baja, asociada con el descanso y la rumia.

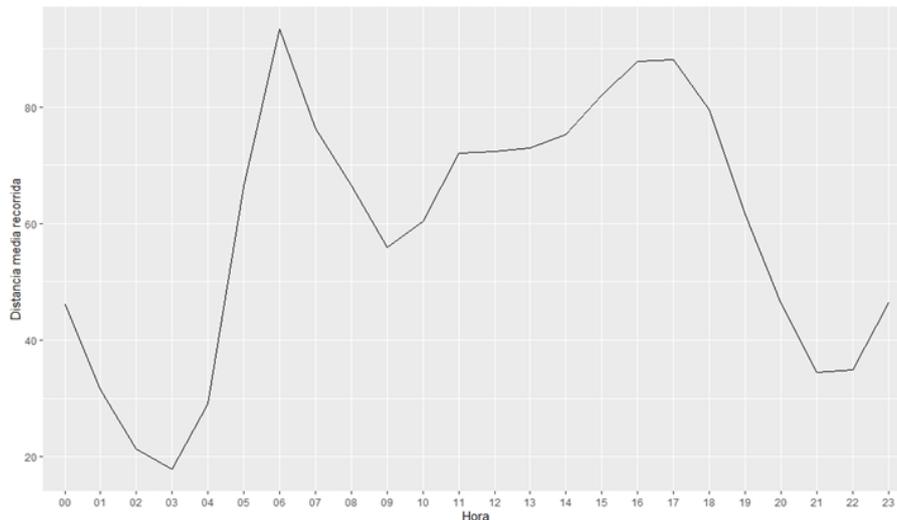


Figura 5. Promedio de las distancias entre ubicaciones consecutivas en función de la hora del día

Finalmente, con las posiciones diarias de cada animal correspondientes a actividad alta o baja, se obtuvo la nube de puntos correspondiente a las posiciones del rebaño para cada nivel de actividad durante cada periodo de 10 días, la cual se usó para calcular el ámbito de hogar con el paquete *adehabitatHR*. El ámbito de hogar o “home range” es un concepto ampliamente usado en estudios ecológicos de especies animales y se refiere al área utilizada por un animal o grupo de animales durante sus actividades normales (Burt, 1944).

Existen diferentes métodos para estimar el ámbito de hogar. En el presente trabajo, se ha estimado el ámbito de hogar del rebaño a través de la distribución de utilización (UD), que se define como la función bivalente que define la densidad de probabilidad de que el rebaño se encuentre en un punto en función de sus coordenadas geográficas. Usando este método, se puede definir el ámbito de hogar como el mínimo área en la cual el rebaño puede ser encontrado con una determinada probabilidad (Calenge, 2006). El parámetro de suavizado es determinante para la estimación de la distribución de utilización, el cual, en este caso, se ha calculado a través del método “Least Square Cross Validation” (Calenge, 2006) Finalmente, se ha obtenido la distribución de utilización sobre una rejilla de 10 x 10 m, correspondiente a los píxeles de Sentinel-2, y se ha usado la probabilidad de encontrar al rebaño en cada cuadrícula como la variable dependiente de los modelos aditivos generalizados.

2.4.3.- Procesamiento de las imágenes Sentinel-2

Existen numerosas metodologías basadas en la sensorización remota para el seguimiento del estado de los pastos, siendo los índices de vegetación una de las más populares. El índice

de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) es un índice adimensional que recoge la diferencia entre la reflectancia visible e infrarroja de la cobertura del suelo, y se puede utilizar para estimar la tasa fotosintética (vegetación verde) en una superficie (Herring & Weier, 2000). El índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI) es una adaptación del NDVI que puede ser una buena alternativa cuando existe una baja densidad vegetal y la exposición de la superficie del suelo es relevante (Huete, 1998). En este trabajo se han calculado ambos índices para cada píxel de 10 x 10 m utilizando las bandas 4 y 8 de las imágenes Sentinel-2 usando las siguientes fórmulas:

$$NDVI = \frac{B8 - B4}{B8 + B4} \quad SAVI = \frac{B8 - B4}{(B8 + B4 + 0.5) \times (1.5)}$$

Si bien el tiempo de revisita de los satélites Sentinel-2 es de 10 días, algunos períodos estudiados no cuentan con imágenes válidas debido a la presencia de nubes. En dichos casos, se ha llevado a cabo una interpolación lineal de los datos de NDVI.

2.4.4.- Procesamiento de datos meteorológicos

Para adaptar los datos meteorológicos a la resolución temporal definida se han calculado las siguientes variables: temperatura máxima, media y mínima durante cada periodo de 10 días, precipitación acumulada durante los 10 días, número de horas con una temperatura superior a los 20 grados en el período de 10 días, y número de horas con una temperatura superior a los 25 grados en el período de 10 días.

2.4.5.- Procesamiento del modelo digital del terreno

A partir del modelo digital del terreno y utilizando el software libre QGIS, se obtuvieron los datos de pendiente y orientación para una resolución de 10 m. En el caso de la orientación, se definieron nueve clases: 0, N, NE, E, SE, S, SO, O y NO, donde 0 incluye aquellas zonas que tienen una pendiente inferior al 5%. Los mapas resultantes se recogen a continuación:

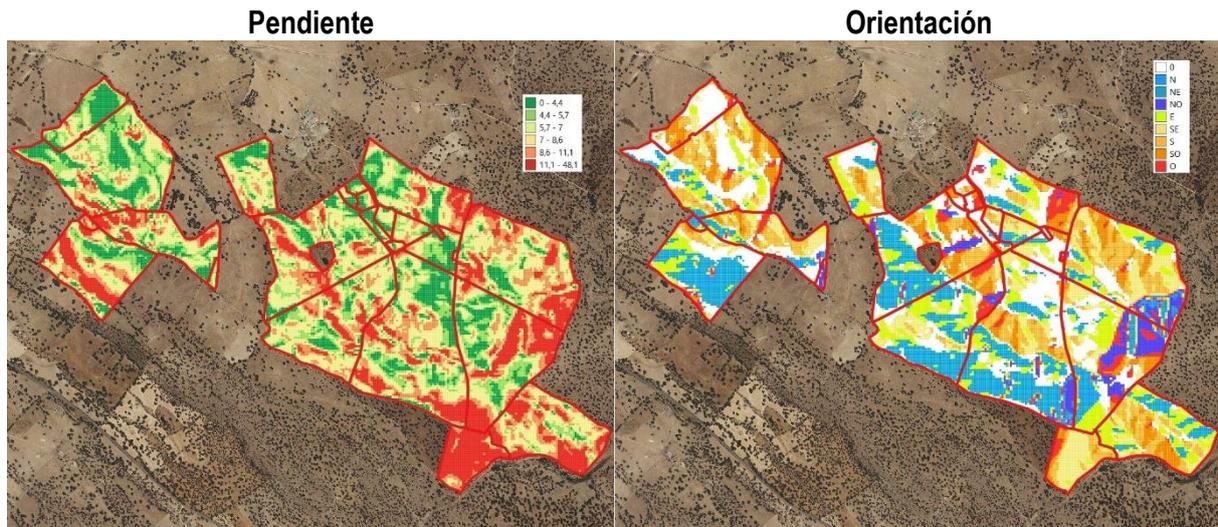


Figura 6. Mapas de pendiente y orientación elaborados a partir del MDT

2.4.6.- Distancias a bebederos, puertas y cercas

Se ha calculado la distancia lineal entre el centroide de cada píxel de la malla de 10 x 10 m y el bebedero y la puerta correspondientes al cercado o conjunto de cercados en los que se encontraban los animales en cada periodo. En caso de existir varios bebederos o puertas, se ha considerado la distancia a los más cercanos a cada píxel. Del mismo modo, se ha calculado la distancia desde el centroide de cada píxel al cerramiento perimetral más cercano en cada caso.

2.4.7.- Cálculo de la fracción de cabida cubierta

Una de las características diferenciadoras de los ecosistemas de dehesa es la presencia de arbolado, que puede afectar al comportamiento animal a través de la provisión de sombra e, incluso, por las características diferenciales de la vegetación que crece junto a los árboles (Rivero et al., 2021). La fracción de cabida cubierta es un concepto que deriva del ámbito forestal. Se define como la proporción del terreno que se encuentra cubierta por la proyección vertical de las copas de los árboles (Jennings et al, 1999). El cálculo de esta variable se ha realizado sobre la ortofotografía del PNOA, que cuenta con un tamaño de píxel de 25 cm, facilitando la delimitación de la fracción de cabida cubierta de cada árbol individual. Se ha seguido un proceso de clasificación semiautomático de los píxeles de la imagen, usando un algoritmo de “clustering” de los valores espectrales de las bandas visibles. Se obtuvieron un total de 10 clústeres, los cuales, mediante un análisis visual de la imagen, se decidió si correspondían a copa arbolada o a otros elementos del paisaje. Finalmente, esta capa reclasificada vectorizó para obtener el porcentaje de cabida cubierta en cada píxel de 10 x 10 m (Figura 7).

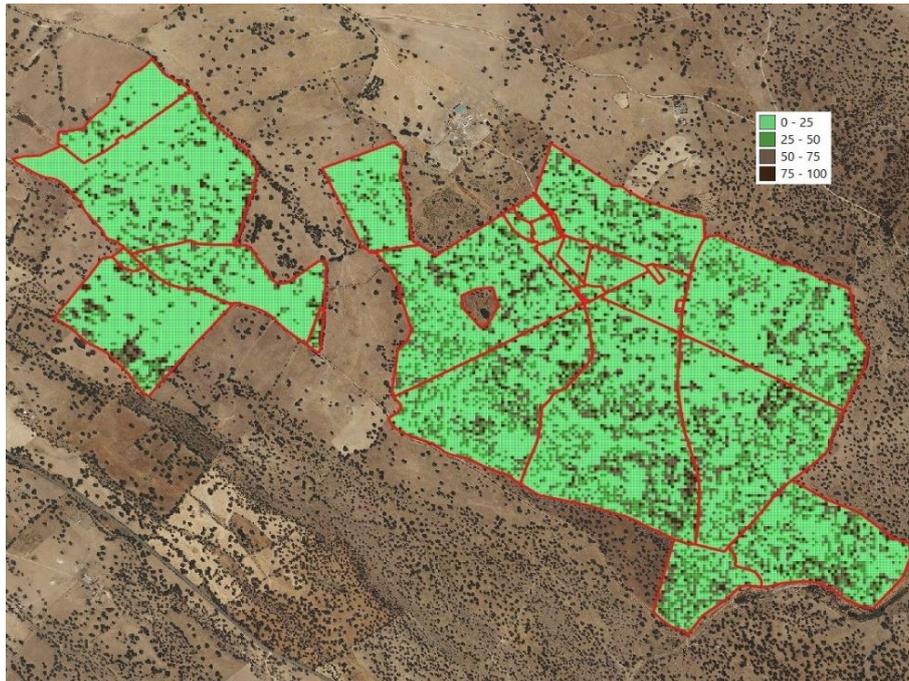


Figura 7. Fracción de cabida cubierta para cada píxel de 10 x 10 m

2.5.- Análisis de datos

El objetivo del análisis de datos llevado a cabo en este TFM es doble: por un lado, estudiar la varianza de la utilización del terreno por parte de los animales, identificando los factores que la determinan y su contribución relativa a la misma, y, por el otro, predecir la distribución del ganado en base a datos abiertos y/o levantados en campo referidos a las características más importantes de la finca o cercado en cuestión (topografía, infraestructuras, etc.). Para abordar ambos retos se han elaborado modelos GAM considerando la distribución de utilización (UD) como variable dependiente y los datos disponibles sobre el terreno, el clima, las infraestructuras, etc. como variables independientes (Tabla 2).

Aquellas variables con un valor constante en la componente espacial, como son las meteorológicas, fueron incluidas en los modelos como grupos con efecto aleatorio, debido a que la escasa variabilidad de estos datos (solo cambian entre periodos) no permite analizarlos como una variable continua. Además de las características del entorno, se han usado como variables independientes el área del cercado o conjunto de cercados en los que se encontraba el rebaño en cada momento, entendiéndose que ésta es el área máxima a disposición de los animales, y la probabilidad de encontrar al rebaño en cada celda de 10 x 10 m en el periodo de 10 días anterior, para considerar en el modelo la estabilidad de las preferencias de los animales por determinadas zonas. Las variables independientes se han incluido en los modelos de una en una, comenzando por aquellas que explicaban un mayor porcentaje de la varianza, evaluando la adecuación de incluir nuevas variables o no mediante el criterio de información de Akaike (AIC, por sus siglas en inglés) (Akaike, 1974), el cual proporciona un medio para la selección de modelos, evaluando el balance o “trade-off” entre la bondad de ajuste de un modelo y su complejidad.

Tabla 2. Descripción de las variables utilizadas en los modelos aditivos generalizados

Tipo de variable	Acrónimo	Descripción
Dependiente	UD	Probabilidad continua de encontrar al rebaño en la celda
	UD_BIN	Probabilidad discreta de encontrar al rebaño en la celda (ausencia/presencia)
Independiente	DIST_BEB	Distancia mínima desde el centroide de la celda hasta el bebedero más próximo disponible para el rebaño (m)
	DIST_CERCA	Distancia mínima desde el centroide de la celda hasta el punto más próximo de las cercas (m)
	DIST_PUERTA	Distancia mínima desde el centroide de la celda hasta la puerta más próxima (m)
	PENDIENTE	Pendiente media de la celda (%)
	FCC	Fracción de cabida cubierta de la celda (%)
	FCC_G2	2 grupos: 1) FCC de la celda inferior al 25% 2) FCC de la celda igual o superior al 25%
	NDVI	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada de la celda
	ORIENTACION	Orientación de la celda
	HORAS_T20	2 grupos: 1) Temperatura superior a 20 grados durante menos de 100 horas (en los 10 días) 2) Temperatura superior a 20 grados durante 100 o más horas (en los 10 días)
	PREC_G3	3 grupos: 1) Precipitación acumulada igual o inferior a 5 mm 2) Precipitación acumulada superior a 5 mm e inferior a 20 mm 3) Precipitación acumulada igual o superior a 20 mm
AREA_G2	2 grupos: 1) Área inferior a 60 hectáreas 2) Área igual o superior a 60 hectáreas	
UD_ANT	Probabilidad discreta de encontrar al rebaño en la celda durante el período anterior	

Los modelos aditivos generalizados (GAM) son una extensión de los modelos lineales generalizados que permiten modelizar de forma flexible relaciones no-lineales entre la variable dependiente y las variables independientes (Guisan et al, 2002). Estos modelos utilizan una función de unión para captar la relación entre la variable dependiente y las variables independientes no paramétricas. Los modelos GAM vienen dados por la siguiente expresión:

$$g(\mu) = \beta_0 + \sum_{i=1}^k f_n(x_n)$$

Donde $g(\mu)$ es una función de unión, β_0 es una constante, $f_n(x_n)$ es una función suavizada que describe la relación entre $g(\mu)$ y el n -ésimo factor, y k es el número de variables predictoras.

Los modelos aditivos generalizados fueron implementados en dos pasos. En primer lugar, se modeló el componente de ausencia-presencia de los datos (animales presentes o no en cada píxel), a través de una función logística. A continuación, se modelaron los píxeles con una probabilidad superior a 0, mediante una función beta. Este procedimiento ha sido sugerido por diversos autores para estudiar el uso del terreno por los animales (Barry & Welsh, 2002; Welsh et al, 1996). Se obtuvieron modelos separados para los periodos con presencia o ausencia de

pasto verde en la finca (ver apartado 2.4.1) y para las ubicaciones GPS correspondientes a actividad alta y baja (ver apartado 2.4.2). Para valorar la capacidad predictiva de los GAM, se seleccionó un periodo de 10 días al azar, que no fue utilizado para la calibración de los modelos, siendo posteriormente predicho con los modelos obtenidos. La implementación de los modelos GAM se ha llevado a cabo con la ayuda del paquete *mgcv* (Wood, 2017) del software R.

3.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1.- Efectos sobre la selección de hábitat

Los GAM obtenidos con la metodología descrita en el presente documento explican entre un 11% y un 33% de la varianza del ámbito de hogar del rebaño de vacuno en la finca “Fuente del Perro”. Todas las variables independientes planteadas fueron significativas y su inclusión en los modelos mejoró los resultados de modelos más simples, aun cuando su contribución a la explicación de la varianza fue pequeña en la mayor parte de los casos. Las Tablas 3, 4, 5 y 6 recogen las características de los modelos finales elaborados.

Tabla 3. Modelos GAM para actividad alta y disponibilidad de pasto verde

Tipo de modelo (Varianza explicada)	Variables incluidas	Varianza explicada
Ausencia/Presencia (26,60 %)	DIST_BEB	10,40 %
	NDVI_FCC_G2	9,05 %
	PREC_G3	4,94 %
	AREA_G2	3,72 %
	PENDIENTE	3,45 %
	DIST_PUERTA	1,93 %
	ORIENTACION	1,86 %
	UD_ANT	1,37 %
	DIST_CERCA	0,64 %
	HORAS_T20	0,43 %
	FCC	0,31 %
Modelo cuantitativo (33,00 %)	AREA_G2	11,00 %
	DIST_BEB	7,31 %
	DIST_CERCA	6,06 %
	UD_ANT	5,39 %
	PREC_3	5,04 %
	PENDIENTE	2,15 %
	ORIENTACION	1,53 %
	NDVI_FCC_G2	1,16 %
	DIST_PUERTA	0,86 %
	HORAS_T20	0,24 %
	FCC	0,03 %

En una situación de actividad alta, asimilable a pastoreo, con presencia de pasto verde en la finca, los parámetros que más influyen en la distribución de los animales son la distancia a los bebederos y el área del cercado en el que se encuentran los animales. La variable NDVI, anidada con los grupos de FCC, tiene un peso importante en el modelo de presencia/ausencia (los animales pastan en zonas de NDVI alto con FCC baja) pero no tanto en el cuantitativo. Por otro lado, la distribución de utilización en el periodo anterior tiene una importancia mayor en el caso del modelo cuantitativo.

Tabla 4. Modelos GAM para actividad alta y ausencia de pasto verde

Tipo de modelo (Varianza explicada)	Variables incluidas	Varianza explicada
Ausencia/Presencia (26,60 %)	DIST_BEB	8,98 %
	DIST_CERCA	8,84 %
	UD_ANT	8,19 %
	HORAS_T20	5,02 %
	ORIENTACION	3,99 %
	PREC_G3	2,05 %
	DIST_PUERTA	1,16 %
	NDVI_FCC_G2	0,79 %
	PENDIENTE	0,70 %
	FCC	0,32 %
Modelo cuantitativo (29,60 %)	DIST_CERCA	11,70 %
	UD_ANT	8,61 %
	DIST_BEB	6,26 %
	ORIENTACION	3,97 %
	DIST_PUERTA	3,47 %
	PENDIENTE	1,81 %
	PREC_G3	0,35 %
	NDVI_FCC_G2	0,31 %
	FCC	0,16 %
	HORAS_T20	0,10 %

En ausencia de pasto verde (Tabla 4), sobre todo en verano, los animales pastan fundamentalmente en las zonas cercanas a los bebederos y a las cercas, donde se les proporciona el suplemento. También tiene un gran peso la distribución de utilización en el periodo anterior, ya que los animales no cambian las zonas de alimentación entre periodos.

Tabla 5. Modelos GAM para actividad baja y disponibilidad de pasto verde

Tipo de modelo (Varianza explicada)	Variables incluidas	Varianza explicada
Ausencia/Presencia (15,10 %)	UD_ANT	10,70 %
	NDVI_FCC_G2	1,49 %
	DIST_PUERTA	1,26 %
	DIST_BEB	1,18 %
	HORAS_T20	0,87 %
	DIST_CERCA	0,87 %
	PREC_G3	0,79 %
	ORIENTACION	0,77 %
	PENDIENTE	0,52 %
	AREA_G2	0,51 %
	FCC	0,04 %
Modelo cuantitativo (11,40 %)	UD_ANT	3,30 %
	DIST_BEB	2,54 %
	DIST_CERCA	2,28 %
	NDVI_FCC_G2	1,30 %
	PENDIENTE	0,90 %
	HORAS_T20	0,77 %
	DIST_PUERTA	0,50 %
	PREC_G3	0,40 %
	ORIENTACION	0,15 %
	AREA_G2	0,09 %
FCC	0,08 %	

Tabla 6. Modelos GAM para actividad baja y ausencia de pasto verde

Tipo de modelo (Varianza explicada)	Variables incluidas	Varianza explicada
Ausencia/Presencia (20,60 %)	UD_ANT	13,50 %
	DIST_CERCA	6,53 %
	DIST_BEB	3,35 %
	ORIENTACION	1,96 %
	DIST_PUERTA	1,55 %
	PENDIENTE	1,12 %
	NDVI_FCC_G2	0,63 %
	PREC_G3	0,55 %
	FCC	0,18 %
	HORAS_T20	0 %
Modelo cuantitativo (16,50 %)	DIST_BEB	5,26 %
	UD_ANT	4,20 %
	DIST_CERCA	2,90 %
	ORIENTACION	2,22 %
	DIST_PUERTA	1,59 %
	PENDIENTE	0,28 %
	HORAS_T20	0,19 %
	FCC	0,15 %
	PREC_G3	0,10 %
	NDVI_FCC_G2	0,02 %

En actividad baja, asimilable a descanso, tanto con pasto verde como sin él (Tablas 5 y 6, respectivamente), la variable más destacada es la distribución de utilización en el periodo anterior, con un peso importante en los modelos de ausencia/presencia, lo cual denota que los animales tienen zonas de descanso que mantienen a lo largo del tiempo. La distancia a los bebederos explica un mayor porcentaje de la varianza de los modelos de actividad baja cuando no hay pasto verde, ya que los animales eligen zonas de descanso más cercanas a los mismos en la época seca y calurosa.

Se observa que en la mayoría de los modelos las variables con más peso son la distancia a los bebederos, la distancia a las cercas y la preferencia en el período anterior. En cuanto a las diferencias entre modelos, cabe destacar que los modelos de actividad alta explican un mayor porcentaje de la varianza, posiblemente debido a la mayor variabilidad de la distribución de utilización del terreno en pastoreo que en descanso.

Una de las ventajas de los GAM es que permiten analizar en detalle el efecto de cada uno de los factores incluidos en los modelos multivariantes. Los resultados al respecto se recogen a continuación.

3.1.1.- Pendiente

La pendiente del terreno es considerada un factor fundamental en la selección de hábitat del vacuno por razones energéticas, ya que los animales adaptan sus movimientos en función de las condiciones del terreno (Ganskopp & Bohnert, 2009, Shepard et al, 2013). Los resultados obtenidos en este TFM muestran que la pendiente explica entre un 0,28% y un 3,45% de la varianza de los datos de ámbito de hogar. Independientemente del nivel de actividad y de la disponibilidad de pasto verde, el rebaño muestra un rechazo de las pendientes que superan el

10-15% (Figura 8). Para interpretar las curvas incluidas en la Figura 8 y siguientes, deben tenerse en cuenta que el eje Y representa la preferencia de los animales. Si los valores de la curva están por encima de cero, la preferencia del animal por esa tipología de terreno es superior a la media, mientras que los valores por debajo de cero indican rechazo. Las líneas discontinuas hacen referencia al intervalo de confianza de la curva para cada valor del factor estudiado, pendiente en este caso. Valores cercanos a cero con intervalos de confianza amplios deben interpretarse como la ausencia de preferencia o rechazo por parte de los animales.

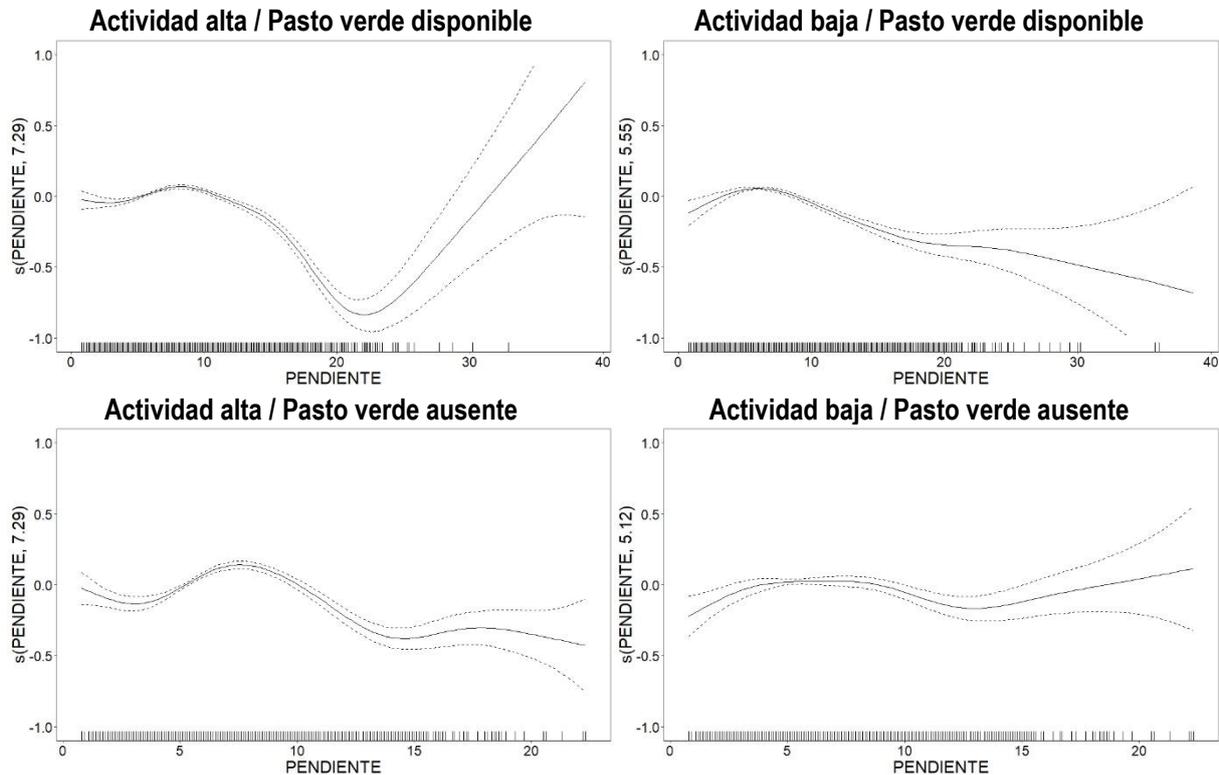


Figura 8. Efectos de la pendiente sobre la selección de hábitat del rebaño

Varios trabajos científicos confirman los resultados obtenidos (Ganskopp & Vavra, 1987; Ganskopp et al, 2007). Los motivos detrás de esta selección en grandes herbívoros pueden estar relacionados con la escasez de recursos hídricos y alimenticios en las zonas con mayores pendientes (Wall et al, 2006).

3.1.2.- Orientación

No se han encontrado trabajos en la literatura científica que estudien específicamente el efecto de la orientación del terreno sobre la selección de hábitat del ganado vacuno, aunque la orientación puede suponer una exposición diferencial a los rayos de sol y, por tanto, cambios en la cantidad y calidad de la vegetación. Los resultados muestran que esta variable explica entre un 0,15% y un 3,97% de la varianza. En actividad baja (descanso y rumia), no se observan diferencias claras entre orientaciones. En actividad alta (pastoreo y desplazamiento), existe una preferencia por zonas con una orientación noroeste y oeste. También por zonas con orientación norte cuando no hay pasto verde disponible, es decir, en verano (Figura 9).

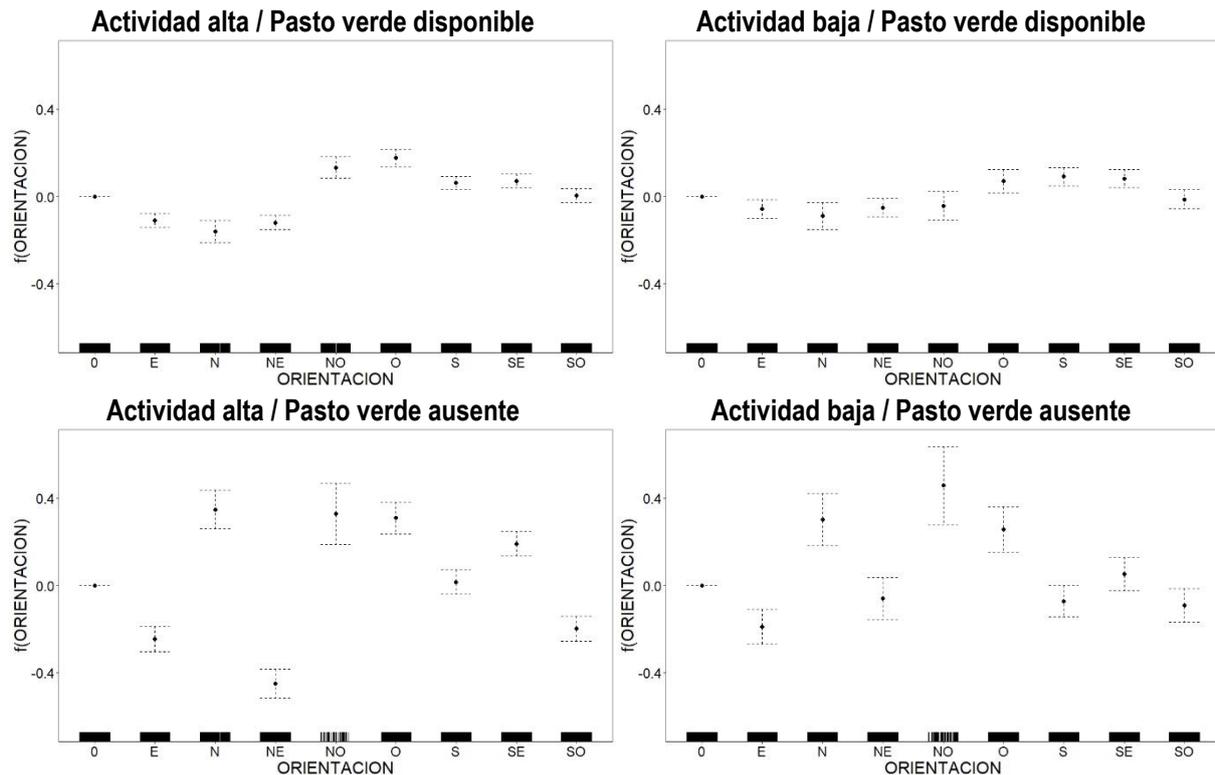


Figura 9. Efectos de la orientación sobre la selección de hábitat del rebaño

3.1.3.- NDVI

En principio, el ganado selecciona comunidades de plantas donde puedan alimentarse con forraje de alta calidad. Por ello, los rebaños pasan más tiempo en zonas donde la disponibilidad y calidad del forraje es más alta (Ganskopp et al, 2007). Debido a la presencia de arbolado disperso en la dehesa, se ha anidado esta variable, para diferenciar la influencia del NDVI en píxeles con solo pasto (FCC menor o igual al 25%) y píxeles con arbolado (FCC mayor al 25%). Los resultados muestran que esta variable explica entre un 0,02% y un 9,05% de la varianza. En los períodos de disponibilidad de pasto verde, se observa una mayor influencia de esta variable sobre la selección de hábitat del ganado que en ausencia de pasto verde. En la figura 10 se ha representado el efecto de la variable NDVI sobre la selección de hábitat del ganado solamente en aquellos píxeles con FCC menor o igual al 25%, para mostrar únicamente la influencia del pasto. En los períodos de disponibilidad de pasto verde, y, sobre todo, en actividad alta (pastoreo y desplazamiento), se observa una influencia positiva del NDVI del pasto, es decir, que el rebaño selecciona preferentemente aquellas zonas con un mayor NDVI. Sin embargo, en ausencia de pasto verde no se observan diferencias claras.

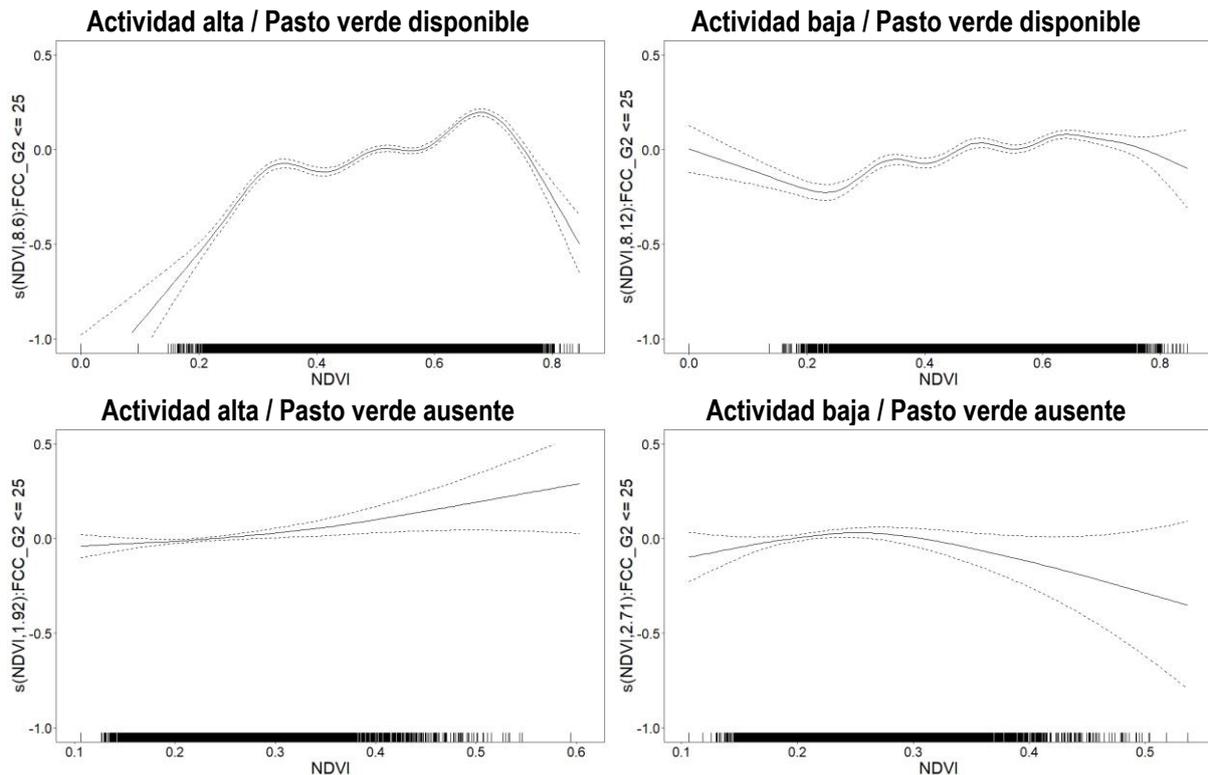


Figura 10. Efectos de la NDVI del pasto sobre la selección de hábitat del rebaño

3.1.4.- Temperatura y precipitación

De acuerdo con la literatura científica, el clima es uno de los factores externos que mayor impacto tiene sobre la distribución del ganado (Halász et al, 2016). En este caso, la precipitación y la temperatura ambiental se han incluido en los modelos como factores aleatorios. La escasa variabilidad de las variables utilizadas, debido a la baja resolución temporal de los períodos seleccionados, determina la escasa capacidad explicativa de ambas variables (varianza explicada entre 0% y 4,94% para ambas variables). Además, la separación de los modelos en función de la disponibilidad de pasto verde ya permite captar la variabilidad en los datos meteorológicos entre los meses secos (final de primavera-comienzo de otoño) y los meses con lluvias (final de otoño-comienzos de primavera).

3.1.5.- Distancia a los bebederos

El agua es considerada como el factor más determinante en la distribución espacial del ganado (Ganskopp, 2001; Putfarken et al., 2008; Rivero et al., 2021). Los resultados obtenidos confirman esta hipótesis, siendo la distancia a los bebederos una de las variables con mayor importancia relativa en la mayoría de los modelos obtenidos. Sin embargo, existen diferencias importantes en los efectos de la distancia a los bebederos entre los distintos modelos (Figura 11). Cuando hay disponibilidad de pasto, el rebaño selecciona preferentemente zonas a una distancia superior a los 500 metros de los bebederos, tanto en actividad alta como en actividad baja. En ausencia de pasto y actividad alta, el ganado sigue seleccionado zonas moderadamente alejadas de la fuente de agua, aunque más cercanas que en los periodos en que dispone de pasto verde. Sin embargo, en actividad baja, el rebaño ocupa las zonas más cercanas a los bebederos.

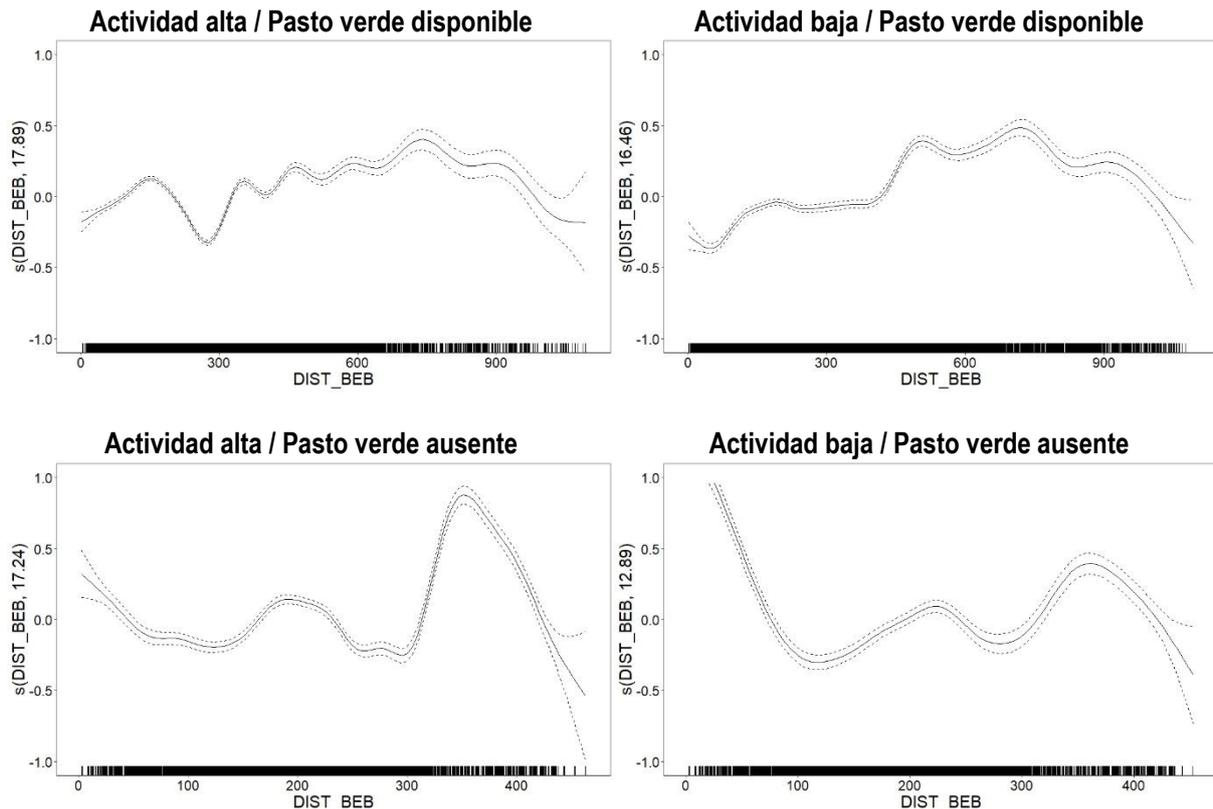


Figura 11. Efectos de la distancia a los bebederos sobre la selección de hábitat del rebaño

Estos resultados no coinciden exactamente con los de Ganskopp et al (2007). Según estos autores el ganado vacuno pastorea preferentemente en las zonas más cercanas a las fuentes de agua. Sin embargo, a medida que los recursos alimenticios en estas zonas disminuyen, el ganado utilizará zonas más distantes. En este caso se observa que cuando los recursos forrajeros son más escasos el ganado se queda más cerca del agua, posiblemente porque en esas zonas más cercanas se les aporta también la alimentación suplementaria, aspecto para el que no se dispone de datos en este TFM.

3.1.6.- Distancia a las puertas

Las puertas representan una barrera física para la distribución espacial del ganado, y al mismo tiempo pueden suponer un estímulo, al representar la zona por la que accede el ganadero con la alimentación suplementaria. Esta variable aporta una varianza explicada a los modelos entre un 0,50% y un 3,47%. No se han observado tendencias claras en los datos que puedan ser explicadas por el comportamiento del rebaño.

3.1.7.- Distancia a las cercas

Las cercas también representan una barrera física para la distribución espacial del ganado. El uso de cercas está asociado con la gestión de las zonas de pasto, tarea que tradicionalmente asume el ganadero. La varianza explicada para los diferentes modelos varía entre un 0,87% y un 11,70%. El efecto de la distancia a las cercas es similar en todos los casos. La probabilidad de encontrar al rebaño aumenta a medida que aumenta la distancia a las cercas. Es decir, el

rebaño selecciona preferentemente las zonas más alejadas de los cerramientos. No se han encontrado referencias en la literatura sobre el efecto de esta variable.

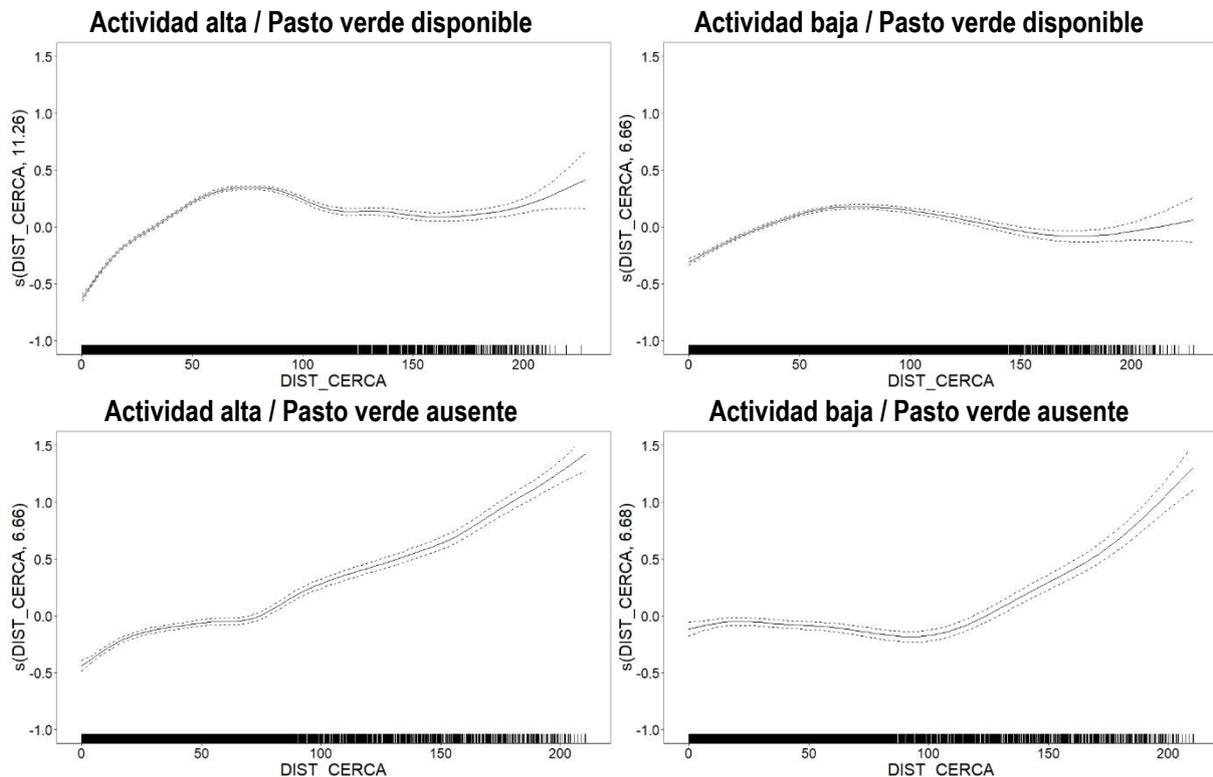


Figura 12. Efectos de la distancia a las cercas sobre la selección de hábitat del rebaño

3.1.8.- Fracción de cabida cubierta

La fracción de cabida cubierta (FCC) presenta una importancia residual en los modelos obtenidos. Sin embargo, algunos autores han destacado la importancia de las zonas de cobijo en relación con el clima, especialmente cuando estas se encuentran cerca de fuentes de agua (Larson-Praplan et al, 2015). Un análisis de las interacciones entre la fracción de cabida cubierta y las variables climáticas podría aportar perspectivas útiles en este sentido.

3.1.9.- Área disponible

El manejo de los animales influye de forma importante en la selección del hábitat. La superficie disponible en cada momento es una de las decisiones que debe tomar el ganadero. En este caso, al igual que con las variables climáticas, existe una escasa variabilidad de los datos, lo que explica su escaso peso en los modelos. Además, en los períodos con ausencia de pasto, no existe variabilidad, ya que durante este período se ha mantenido al rebaño en la misma área.

3.1.10.- Preferencia en el periodo anterior

Algunos estudios sugieren que los animales en pastoreo retienen información acerca de los factores bióticos y abióticos del entorno en una especie de memoria a largo plazo, sobre

todo la localización de fuentes de agua, de las zonas de cobijo o de las zonas de alimentación (Bailey et al., 1996; Bailey, 2005). De esta forma, maximizan la ingesta de nutrientes, minimizan el esfuerzo de desplazamiento y mantienen el confort térmico (Ganksopp et al, 2007). En este caso, el tiempo transcurrido entre periodos es corto (10 días) y los resultados observados sugieren que la preferencia de los animales por determinados píxeles en un periodo es una de las variables que mejor explica la selección de hábitat del rebaño en el periodo siguiente, aportando una varianza explicada entre el 1,37% y el 13,40%. El efecto es variable en función de los modelos, pero hay una clara tendencia a seleccionar zonas que ya han sido previamente seleccionadas en el período anterior, con un efecto mayor en los períodos de actividad alta.

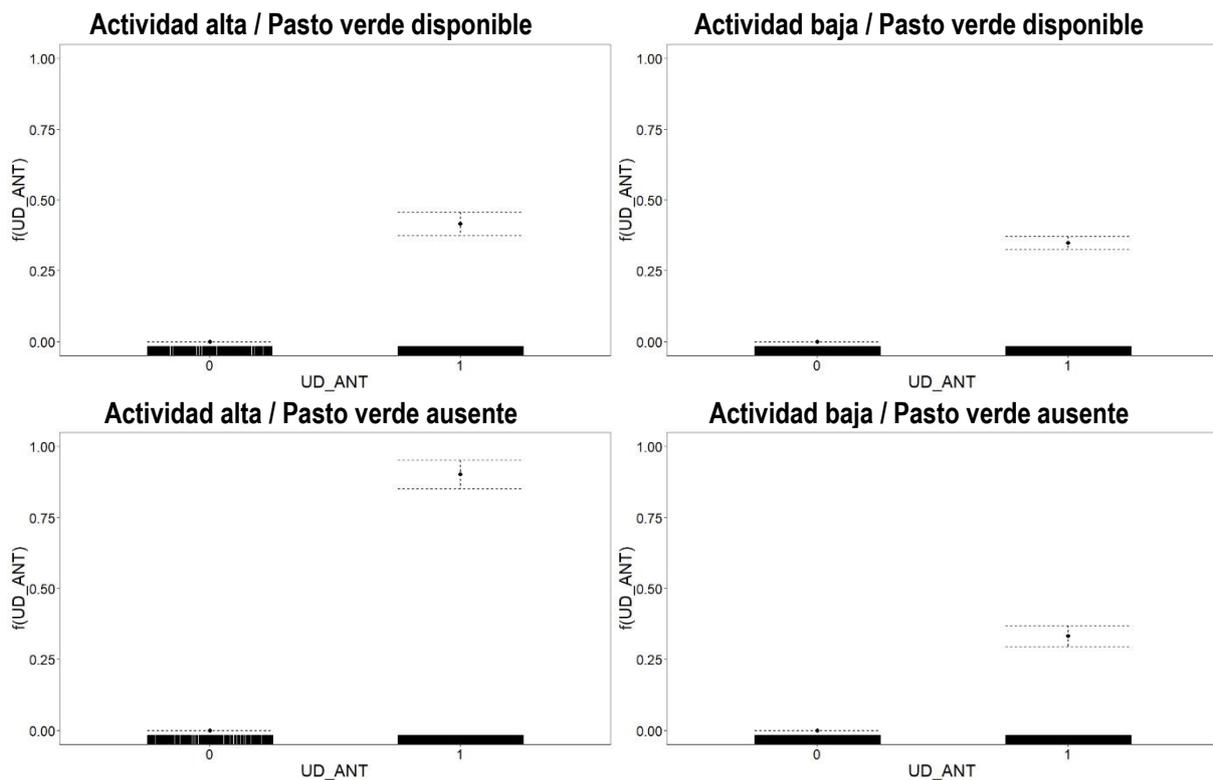


Figura 13. Efecto de la preferencia en el periodo anterior sobre la selección de hábitat del rebaño

Los resultados recogidos en este apartado y los anteriores deben interpretarse teniendo en cuenta que los modelos GAM, si bien permiten evaluar la importancia relativa de las variables predictoras y analizar el efecto que éstas tienen sobre la respuesta, pueden ser problemáticos a la hora de comparar diferentes zonas o datos con diferentes resoluciones, ya que su naturaleza empírica incorpora las interacciones bióticas y los efectos estocásticos negativos que pueden variar de una región a otra (Guisan et al, 2002). Por lo tanto, en futuros estudios es importante analizar el posible sobreajuste que puede aparecer al desarrollar estos modelos.

3.2.- Validación de los modelos

La validación externa de los modelos es crucial para evaluar su capacidad predictiva. Idealmente se deberían utilizar datos totalmente diferentes (distintos animales, explotaciones, años, etc.) para la validación externa de los modelos, pero, ante la no disponibilidad de este tipo de datos, en este TFM se ha optado por mantener un período de cada uno de los modelos fuera

del colectivo de calibración, para después predecir la distribución de utilización (UD) de dicho periodo y así evaluar la capacidad predictiva de los modelos.

Para los modelos de ausencia/presencia (Tabla 7), aquellos en los que el rebaño tiene una actividad alta (pastoreo y desplazamiento), se observa un porcentaje de aciertos adecuado en el periodo de validación, cercano al del colectivo de calibración. Sin embargo, en actividad baja, la capacidad predictiva es mucho menor, observándose además grandes diferencias en el porcentaje de aciertos entre los colectivos de calibración y validación.

Tabla 7. Tasa de acierto de los modelos de ausencia/presencia en los colectivos de calibración y validación

Modelo	Colectivo de calibración (% aciertos)	Periodo de validación (% aciertos)
Actividad alta / Pasto verde disponible	90,98	79,78
Actividad baja / Pasto verde disponible	73,91	38,14
Actividad alta / Pasto verde ausente	90,30	83,59
Actividad baja / Pasto verde ausente	72,14	59,96

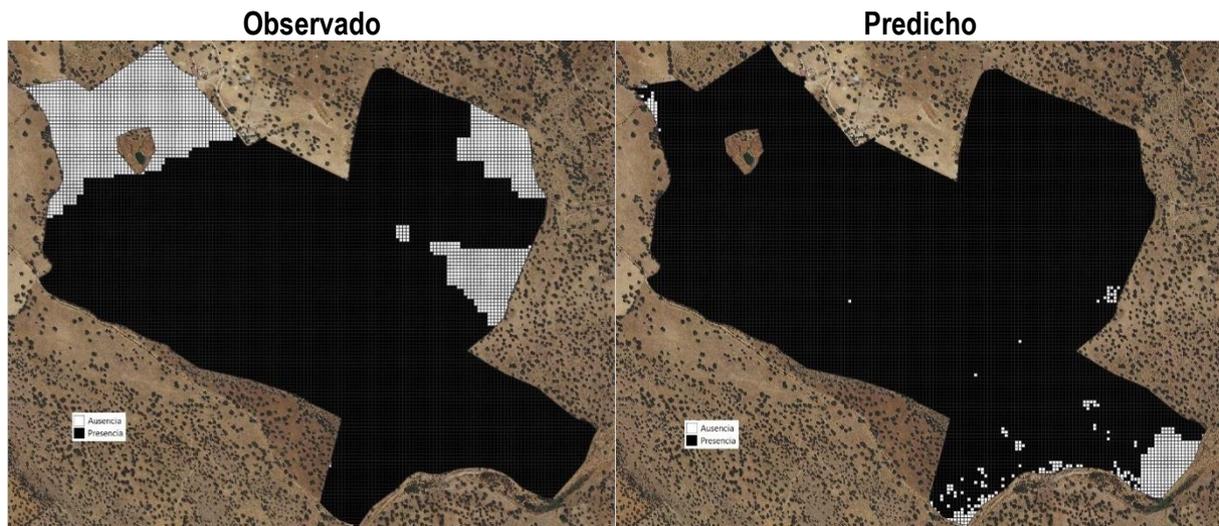


Figura 14. Validación visual de la capacidad predictiva de los modelos de ausencia/presencia (actividad alta y disponibilidad de pasto verde)

La tendencia observada en los modelos de ausencia/presencia se vuelve a detectar en los modelos cuantitativos (Tabla 8), siendo el error cuadrático medio muy superior en los modelos de actividad baja respecto a los modelos de actividad alta.

Tabla 8. Error cuadrático de los modelos cuantitativos en los colectivos de calibración y validación

Modelo	Colectivo de calibración (RMSE)	CV (RMSE) Calibración	Periodo de validación (RMSE)	CV (RMSE) Validación
Actividad alta / Pasto verde disponible	0,00026	1,13	0,00013	1,70
Actividad baja / Pasto verde disponible	0,00102	3,66	0,00116	3,91
Actividad alta / Pasto verde ausente	0,00035	1,24	0,00040	1,36
Actividad baja / Pasto verde ausente	0,00176	3,56	0,00210	4,20

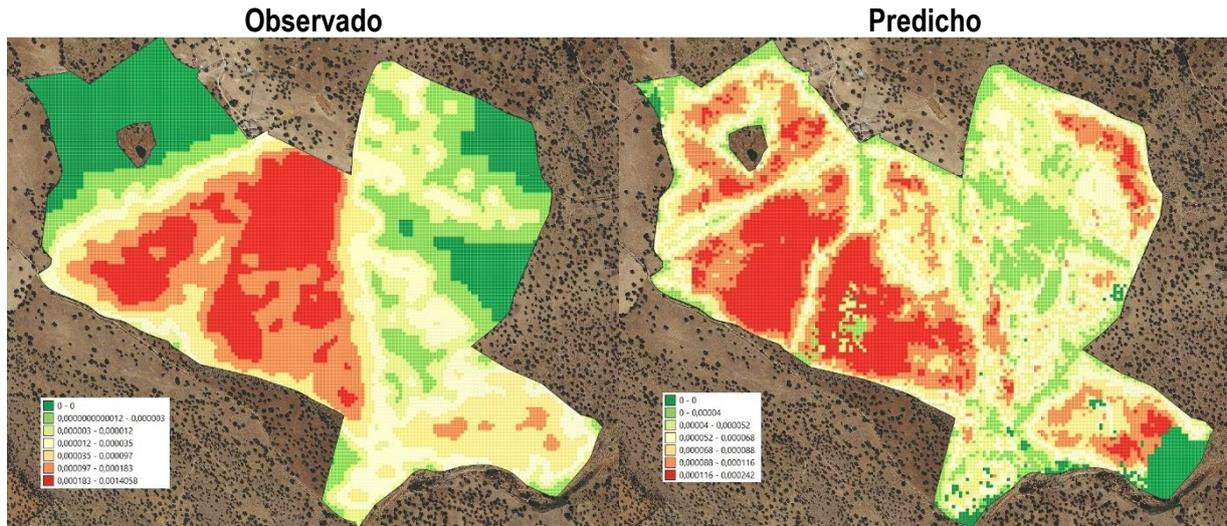


Figura 15. Validación visual de la capacidad predictiva de los modelos cuantitativos (actividad alta y disponibilidad de pasto verde)

4.- CONCLUSIONES

Este TFM demuestra que los modelos aditivos generalizados (GAM) son una herramienta estadística adecuada para mejorar el conocimiento de los factores que determinan la selección del hábitat del ganado vacuno en la dehesa. Los factores con más peso en la selección de hábitat identificados son la disponibilidad de agua y recursos alimenticios y la preferencia de selección de hábitat en períodos anteriores, cuya influencia ya había sido identificada previamente en la literatura científica. La distancia a los cercados perimetrales también ha sido identificada como uno de los principales factores, sin embargo, este factor no ha sido previamente identificado en la literatura. No obstante, la metodología presentada permite además cuantificar la importancia relativa de estos factores bajo circunstancias diversas. Si bien los GAM han mostrado gran capacidad para captar la importancia relativa de las variables independientes y los efectos de las mismas sobre la distribución de los animales, su capacidad predictiva es baja, con la excepción de los modelos de ausencia/presencia con actividad alta y disponibilidad de pasto verde. Estos resultados son prometedores, pero deben validarse en otros estudios. La escasa capacidad predictiva de los GAM puede deberse, entre otras razones, a que no tienen en cuenta la correlación espacial entre los píxeles. En definitiva, estos modelos pueden ser utilizados para comprender la importancia de las variables que afectan al comportamiento del ganado, pero es

necesario llevar a cabo más investigaciones antes de intentar utilizarlos para predecir el comportamiento animal en base a las características del entorno.

5.- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ali, I., Cawkwell, F., Dwyer, E., Barrett, B., & Green, S. (2016). Satellite remote sensing of grasslands: from observation to management. *Journal of Plant Ecology*, 9(6), 649-671.
- Akaike, H. (1974). A new look at the statistical model identification. *IEEE transactions on automatic control*, 19(6), 716-723.
- Bailey, D. W., Gross, J. E., Laca, E. A., Rittenhouse, L. R., Coughenour, M. B., Swift, D. M., & Sims, P. L. (1996). Mechanisms that result in large herbivore grazing distribution patterns. *Rangeland Ecology & Management/Journal of Range Management Archives*, 49(5), 386-400.
- Bailey, D. W. (2005). Identification and creation of optimum habitat conditions for livestock. *Rangeland Ecology & Management*, 58(2), 109-118.
- Barry, S. C., & Welsh, A. H. (2002). Generalized additive modelling and zero inflated count data. *Ecological Modelling*, 157(2-3), 179-188.
- Burt, W. H. (1943). Territoriality and home range concepts as applied to mammals. *Journal of mammalogy*, 24(3), 346-352.
- Calenge, C. (2006) The package adehabitat for the R software: a tool for the analysis of space and habitat used by animals. *Ecological Modelling*, 197, 1035.
- 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, 39.
- Elith, J., Graham, C. H., Anderson, R. P., Dudík, M., Ferrier, S., Guisan, A., Hijmans, R. J., Huettmann, F., Leathwick, J. R., Lehmann, A., Li, J., Lohmann, L. G., Loiselle, B. A., Manion, G., Moritz, C., Nakamura, M., Nakazawa, Y., Overton, J. McC. M., Townsend Peterson, A., Phillips, S. J., Richardson, K., Scachetti-Pereira, R., Schapire, R. E., Soberón, J., Williams, S., Wisz, M. S., & E. Zimmermann, N. (2006). Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*, 29(2), 129-151.
- Filho, M. G., Kuplich, T. M. & De Quadros, F. L. F. (2020) Estimating natural grassland biomass by vegetation indices using Sentinel 2 remote sensing data. *International Journal of Remote Sensing*, 41(8), 2861-2876.
- Ganskopp, D., & Vavra, M. (1987). Slope use by cattle, feral horses, deer, and bighorn sheep. *Northwest Science*, 61, 74-81.
- 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.
- Ganskopp, D. (2001). Manipulating cattle distribution with salt and water in large arid-land pastures: a GPS/GIS assessment. *Applied Animal Behaviour Science*, 73(4), 251-262.

- Ganskopp, D., George, M., Bailey, D., Borman, M., Surber, G., & Harris, N. (2007). Factors and practices that influence livestock distribution. University of California Division of Agriculture and Natural Resources, 8217, 20.
- Ganskopp, D. C., & Bohnert, D. W. (2009). Landscape nutritional patterns and cattle distribution in rangeland pastures. *Applied Animal Behaviour Science*, 116(2-4), 110-119.
- Guisan, A., Edwards, T. C., & Hastie, T. (2002). Generalized linear and generalized additive models in studies of species distributions: setting the scene. *Ecological modelling*, 157(2-3), 89-100.
- 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.
- Halász, A., Nagy, G., Tasi, J. E., Bajnok, M., & Mikó, J. (2016). Weather regulated cattle behaviour on rangeland. *Applied Ecology and Environmental Research*, 14(4), 149-158.
- 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*, 9(5), 3586-3603.
- Herring, D., Weier, J. (2000). Measuring vegetation (NDVI & EVI). NASA Earth Observatory.
- Huete, A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote sensing of environment*, 25(3), 295-309.
- Ivlev, V. (1961). *Experimental ecology of the feeding of fishes*. Yale University Press.
- Jacobs, J. (1974). Quantitative measurement of food selection. *Oecologia*14(4), 413-417.
- Jennings, S. B., Brown, N. D., & Sheil, D. (1999). Assessing forest canopies and understorey illumination: canopy closure, canopy cover and other measures. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 72(1), 59-74.
- Joffre, R., Rambal, S., & Ratte, J. P. (1999). The dehesa system of southern Spain and Portugal as a natural ecosystem mimic. *Agroforestry systems*, 45(1), 57-79.
- Larson-Praplan, S., George, M. R., Buckhouse, J. C., & Laca, E. A. (2015). Spatial and temporal domains of scale of grazing cattle. *Animal Production Science*, 55(3), 284-297.
- Maroto-Molina, F., Navarro-García, J., Príncipe-Aguirre, K., Gómez-Maqueda, I., Guerrero-Ginel, J. E., Garrido-Varo, A., & Pérez-Martín, D. C. (2019). A low-cost IoT-based system to monitor the location of a whole herd. *Sensors (Switzerland)*, 19(10), 2298.
- McLean, D. J., & Skowron Volponi, M. A. (2018). trajr: An R package for characterisation of animal trajectories. *Ethology*, 124(6), 440-448.
- Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (2019). Plan Nacional de Observación del Territorio. Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA).

- Parsons, C. T., Momont, P. A., Del Curto, T., McInnis, M., & Porath, M. L. (2003). Cattle distribution patterns and vegetation use in mountain riparian areas. *Journal of Range Management*, 56(4), 334-341.
- 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(1-2), 54-67.
- R Core Team (2021). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Raynor, E. J., Gersie, S. P., Stephenson, M. B., Clark, P. E., Spiegel, S. A., Boughton, R. K., Bailey, D.W., Cibils, A., Smith, B.W., Derner, J.D., Estell, R.E., Nielson, R.M., & Augustine, D. J. (2021). Cattle grazing distribution patterns related to topography across diverse rangeland ecosystems of North America. *Rangeland Ecology & Management*, 75, 91-103.
- Rivero, M. J., Grau-Campanario, P., Mullan, S., Held, S. D. E., Stokes, J. E., Lee, M. R. F., & Cardenas, L. M. (2021). Factors Affecting Site Use Preference of Grazing Cattle Studied from 2000 to 2020 through GPS Tracking: A Review. *Sensors*, 21(8), 2696.
- Roath, L. R., & Krueger, W. C. (1982). Cattle grazing and behavior on a forested range. *Journal of Range Management*, 35, 332-338.
- Shepard, E. L., Wilson, R. P., Rees, W. G., Grundy, E., Lambertucci, S. A., & Vosper, S. B. (2013). Energy landscapes shape animal movement ecology. *The American Naturalist*, 182(3), 298-312.
- Smith, M. A., Rodgers, J. D., Skinner, Q. D. (1992). Declining forage availability effects on utilization and community selection by cattle. *Journal of Range Management*, 45, 391-395.
- 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. *Proceedings of the 10th International Conference on Precision Agriculture*, Denver, Colorado.
- Wall, J., Douglas-Hamilton, I., & Vollrath, F. (2006). Elephants avoid costly mountaineering. *Current Biology*, 16(14), R527-R529.
- Welsh, A. H., Cunningham, R. B., Donnelly, C. F., & Lindenmayer, D. B. (1996). Modelling the abundance of rare species: statistical models for counts with extra zeros. *Ecological Modelling*, 88(1-3), 297-308.
- Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M. J. (2017). Big data in smart farming - a review. *Agricultural systems*, 153, 69-80.
- Wood, S. N. (2017) *Generalized Additive Models: An Introduction with R* (2nd edition). Chapman and Hall/CRC.