



Universidad de Jaén

Facultad de Ciencias
Experimentales

**TECNOLOGÍAS GRÁFICAS, DE ANÁLISIS DEL TERRENO Y
POSICIONAMIENTO ESPACIAL
APLICADAS AL ESTUDIO Y LA GESTIÓN DE LA FAUNA
SILVESTRE EN ECOSISTEMAS
MEDITERRANEOS**

Autor: José Manuel Valderrama Zafra

Directores de la tesis:

Dra. Dña. Concepción Azorit Casas
Biología Animal, Biología Vegetal y Ecología
Dra. Dña. Antonia Oya Lechuga
Estadística e Investigación Operativa
Dr. D. Miguel A. Rubio Paramio
Ingeniería Gráfica, Diseño y Proyectos

Fecha: 22/04/2024

ISBN:
Licencia CC

RUJA



Universidad de Jaén

Escuela de Doctorado

Facultad de Ciencias Experimentales

Departamento de Biología Animal, Biología Vegetal y Ecología

PROGRAMA DE DOCTORADO

EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE LA TIERRA Y DEL MEDIO AMBIENTE

**TECNOLOGÍAS GRÁFICAS, DE ANÁLISIS DEL
TERRENO Y POSICIONAMIENTO ESPACIAL
APLICADAS AL ESTUDIO Y LA GESTIÓN DE LA FAUNA
SILVESTRE EN ECOSISTEMAS
MEDITERRANEOS**

Memoria presentada por

José Manuel Valderrama Zafra

para optar la Grado de Doctor

Jaén, 2024

Vº Bº de los Directores:

AZORIT CASAS
CONCEPCION
ENCINA -
26009293L
Dra. Concepción Azorit Casas

Firmado digitalmente
por AZORIT CASAS
CONCEPCION
ENCINA - 26009293L
Fecha: 2024.04.23
10:43:05 +02'00'

*Departamento de Biología Animal,
Biología Vegetal y Ecología*

OYA
LECHUGA
ANTONIA -
26025503Z
Dra. Antonia Oya Lechuga

Firmado digitalmente
por OYA LECHUGA
ANTONIA -
26025503Z
Fecha: 2024.04.23
10:49:54 +02'00'

*Departamento de Estadística
e Investigación Operativa*

RUBIO
PARAMIO
MIGUEL ANGEL
- 51670276V
Dr. Miguel A. Rubio Paramio

Firmado digitalmente por RUBIO
PARAMIO MIGUEL ANGEL - 51670276V
Nombre de reconocimiento (DN): c=ES,
serialNumber=IDCES-51670276V,
givenName=MIGUEL ANGEL,
sn=RUBIO PARAMIO, cn=RUBIO
PARAMIO MIGUEL ANGEL - 51670276V
Fecha: 2024.04.23 11:49:13 +02'00'

*Departamento de Ingeniería
Gráfica, Diseño y Proyectos*

Esta Tesis Doctoral se ha realizada dentro del Programa de Doctorado en Ciencia y Tecnología de la Tierra y del Medio Ambiente de la Universidad de Jaén (línea de investigación: Ecología, Biología Animal y Biología Vegetal), bajo la tutorización y dirección de la Dra. Concepción Azorit Casas (Área de Zoología del Departamento de Biología Animal, Biología Vegetal y Ecología. PAI-RNM-175 Biodiversidad y Desarrollo Sostenible) y la codirección de la Dra. Antonia Oya Lechuga (Departamento de Estadística e Investigación Operativa. PAI-FQM-245 Estadística Teórica y Aplicada e Investigación Operativa) y el Dr. Miguel Ángel Rubio Paramio (Área de Expresión Gráfica en la Ingeniería del Departamento de Ingeniería Gráfica, Diseño y Proyectos. PAI-TIC-159 Investigación y Desarrollo en Ingeniería Gráfica, Diseño Industrial y SIG).

El doctorando es miembro del grupo de investigación RNM-175 Biodiversidad y Desarrollo Sostenible. La investigación ha sido financiada con ayudas al Grupo de Investigación RNM-175 "Biodiversidad y Desarrollo Sostenible" del Plan Propio de la Universidad de Jaén, a través del Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) Comisión Europea y de la Consejería de Innovación Ciencia y Empresa de la Junta de Andalucía (PAIDI2020 Plan Andaluz de Investigación, Desarrollo e Innovación-Fondos FEDER 2014-2020), así como, con el Proyecto PID2022-1426610B-I00 (TRACKINGIS-DEER) de la Convocatoria de Generación de Conocimiento 2022 del Ministerio de Ciencia e Innovación, España, y con la colaboración del Organismo Autónomo de Parques Nacionales (OAPN), del Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico, España.

Algunos de los principales resultados de investigación han sido publicados en revistas de impacto internacional:

En la revista Ecological Informatics, Q1 en JCR 2022, categoría "Ecology", se han publicado:

- **Valderrama-Zafra, J. M.**, Fernández-Rodríguez, P., Oya, A., Carrasco, R., Rubio-Paramio, M. A., Garrido-Carretero, M. S., y Azorit, C., 2022. Assessing 3D vs. 2D habitat metrics in a Mediterranean ecosystem for a wiser wildlife management. Ecological Informatics, 69, 101623. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101623>.

- **Valderrama-Zafra, J. M.**, Rubio-Paramio, M. A., García-Molina, D. F., Mercado-Colmenero, J. M., Oya, A., Carrasco, R, y Azorit, C., 2024. Impact of topographic factors on animal field pathings: Analysis and prediction of deer movement patterns. Ecological Informatics, 80, 102487. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2024.102487>

En la revista The Journal of Wild Management, Q3 en JCR, categoría “Ecology” y Q1 JCR, categoría “Zoology”, se ha publicado:

- Garrido-Carretero, M. S., Azorit, C., de Lacy-Pérez de los Cobos, M. C., **Valderrama-Zafra, J. M.**, Carrasco, R., y Gil-Cruz, A. J., 2023. Improving the precision and accuracy of wildlife monitoring with multi-constellation, multi-frequency GNSS collars. The Journal of Wildlife Management, 87(4), e22378. <https://doi.org/10.1002/jwmg.22378>.

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría aprovechar esta página en blanco para expresar mi satisfacción por haber luchado contra mi peor enemigo, yo mismo, y haberle vencido para poder llegar hasta aquí, por supuesto no sin la ayuda de toda la gente que nombraré a continuación.

Como no empezar agradeciendo enormemente a mi tutora la Dra. Concha Azorit por su dedicación, paciencia y buen hacer, y sobre todo por la predisposición en todo momento para atenderme. Por supuesto a mis co-directores, la Dra. Antonia Oya cuya participación ha arrojado luz clarificadora en todo momento, y muy especialmente al Dr. Miguel Ángel Rubio, que además de un pilar fundamental en esta tesis, es compañero y gran amigo.

A Rafa Carrasco por sus aportaciones puntuales pero claves en los enfoques y derroteros de este trabajo. Por supuesto, a los responsables del parque Natural por permitirme el acceso para los trabajos de campo, en especial a D. Javier Moro.

A mi compañero de fatigas Juan M. Montalvo, que cada vez que uno de los dos flaqueaba, el otro empujaba. En general, a todos mis compañeros de Departamento, siempre pendientes de mí durante estos años de duro trabajo y siempre dispuestos a ayudar. No me quiero olvidar de Diego e Irene que con su inestimable ayuda en los tramos finales han hecho posible llegar a la meta.

A mis tíos Isabel y Manuel por creer en mí, y darme la oportunidad de demostrarlo, espero que estéis orgullosos. Un recuerdo especial a un gran compañero y amigo que nos dejó Dr. D. Francisco Mozas Martínez.

A toda mi familia, a mis hermanas para las que me hubiese gustado haber sido mejor hermano mayor, especialmente a mis padres por su lucha continua por darnos lo mejor, os quiero.

Mención especial a mi hijo José Manuel por ser tan grande, José no me tienes que demostrar nada ya eres sobradamente mejor que yo.

Y finalmente a mi querida esposa M^a. Ángeles por llenar mi vida de luz, belleza y mucho amor.

ÍNDICE

RESUMEN	17
ABSTRACT.....	23
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	29
1.1. ÁREA DE ESTUDIO	39
CAPÍTULO 2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS DE TRABAJO.....	49
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA GENERAL	55
3.1. DESARROLLOS TRIDIMENSIONALES EN VERDADERA MAGNITUD. DIFERENCIAS CON LA CONSIDERACIÓN PLANA.	57
3.2. FACTORES TOPOGRÁFICOS QUE INFLUYEN EN EL MOVIMIENTO ANIMAL	63
3.3. PRECISIÓN EN LA GEOLOCALIZACIÓN. ANÁLISIS TECNOLÓGICO.	67
3.4. CAMINOS DE MENOR COSTE ENERGÉTICO.....	69
CAPÍTULO 4. RESULTADOS.	71
4.1. EVALUACIÓN DE LAS MÉTRICAS DE HÁBITAT 3D FRENTE A 2D EN UN ECOSISTEMA MEDITERRÁNEO PARA UNA GESTIÓN MÁS INTELIGENTE DE LA FAUNA SALVAJE.	73
4.2. IMPACTO DEL FACTOR TOPOGRÁFICO EN LOS RECORRIDOS DE LOS ANIMALES EN EL CAMPO: ANÁLISIS Y PREDICCIÓN DE LOS PATRONES DE MOVIMIENTO DE LOS CIERVOS.	103
4.3. MEJORA DE LA PRECISIÓN Y EXACTITUD DEL SEGUIMIENTO DE LA FAUNA SALVAJE CON COLLARES GNSS MULTICONSTELACIÓN Y MULTIFRECUENCIA	127
4.4. EVALUACIÓN LAS RUTAS DE MENOR ESFUERZO EN EL DESPLAZAMIENTO ANIMAL.	155
CAPÍTULO 5. DISCUSIÓN GENERAL	163
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES	171
BIBLIOGRAFÍA.....	175
ANEXOS	195
ANEXO I: ASSESSING 3D VS. 2D HABITAT METRICS IN A MEDITERRANEAN ECOSYSTEM FOR A WISER WILDLIFE MANAGEMENT.....	197

ANEXO II: IMPACT OF TOPOGRAPHIC FACTORS ON ANIMAL FIELD PATHINGS: ANALYSIS AND PREDICTION OF DEER MOVEMENT PATTERNS.	199
ANEXO III: IMPROVING THE PRECISION AND ACCURACY OF WILDLIFE MONITORING WITH MULTI- CONSTELLATION, MULTI-FREQUENCY GNSS COLLARS.....	201

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Entorno de Sierra Morena Oriental.	40
Fig. 2. Zona general de estudio. Cotos de caza en Sierra Morena Oriental, Jaén (España).	41
Fig. 3. Localización de la finca Lugar Nuevo en Sierra Morena (Jaén, España).	45
Fig. 4. Paisaje del monte Lugar Nuevo.	46
Fig. 5. Monte Lugar Nuevo. Parque Natural de la Sierra de Andújar (Jaén)	47
Fig. 6. Zonas de test para dispositivos GNSS.	48
Fig. 7. Proyección tridimensional de una de las fincas de caza (a). Modelo digital de triángulos del terreno (b).	57
Fig. 8. Metodología gráfica para calcular la superficie proyectada 2D/3D.	59
Fig. 9. Zonificación según orografía de la zona.	60
Fig. 10. Zonificación en cuadrículas de 1km.	61
Fig. 11. Trayectorias digitalizadas de animales.	66
Fig. 12. Área de estudio y fincas de caza en Sierra Morena, Jaén (España).	80
Fig. 13. Diferentes escalas utilizadas en el análisis. La escala de paisaje es toda el área de estudio con diferentes estados de caza categorizados en verde según el índice de incremento de superficie (índice SI).	82
Fig. 14. Trayectorias 2D frente a trayectorias 3D en una simulación por especie.	84
Fig. 15. Trayectorias simuladas de conejos (A) y lobos (B) en zonas anidadas.	85
Fig. 16. Trayectorias simuladas de ciervos (A) y lince (B) en zonas anidadas.	85
Fig. 17. Incremento porcentual ajustado de la superficie en función de la altitud para cada parcela de 1 km.	92
Fig. 18. Incremento medio de la distancia y errores estándar para cada especie en cada parcela.	95
Fig. 19. Mapa de localización de la zona de estudio dentro de la finca Lugar Nuevo (Parque Natural Sierra de Andújar, España).	111
Fig. 20. A. Ejemplo de múltiples trayectorias paralelas (se toman las más largas y prominentes) y B. Imagen de una zona plana con múltiples trayectorias.	114
Fig. 21. Imágenes panorámicas con el movimiento de los cérvidos.	115
Fig. 22. Organigrama de la metodología desarrollada trabajo de campo/oficina.	117
Fig. 23. Representación gráfica de las trayectorias digitales de los animales resultantes.	119

Fig. 24. Comparación de recorridos de campo GPS con recorridos digitalizados.	121
Fig. 25. Representación de la regresión lineal generada para el análisis de los factores topográficos de la zona estudiada.	122
Fig. 26. Representación digital gráfica de las trayectorias animales resultantes.	123
Fig. 27. Fuentes de error que afectan a las señales del sistema mundial de navegación por satélite (GNSS) y magnitudes típicas del error GNSS residual. ρ_s es el vector espacial relativo al geocentro, ρ_r es el vector de posición geocéntrica del dispositivo GNSS y ρ es el alcance geométrico a cada satélite.	131
Fig. 28. A) Localización de los pilares geodésicos STB2 y STB3 para el ensayo estático realizado en el Campus de la Universidad de Jaén, España, del 16 al 25 de febrero de 2021 mostrando el receptor y la antena geodésicos del sistema global de navegación por satélite (GNSS) (A1), el receptor GNSS de bajo coste y la antena de parche activo (LCR; A2), el collar GNSS multifrecuencia (MFC; A3) y el collar GNSS monofrecuencia (SFC; A4). B) Rutas R1, R2 y R3 para la prueba cinemática realizada en Jaén, España, en junio de 2021 y 2022 mostrando el equipo para la ruta R1 (LCR, MFC y SFC, ordenador portátil y mochila; B1) y equipo y vehículo para las rutas R2 y R3 (B2).	134
Fig. 29. El diagrama de flujo para la transformación de las coordenadas geocéntricas (X, Y, Z) en coordenadas geodésicas (latitud $[\phi]$, longitud $[\lambda]$ y altura del elipsoide $[h]$), la estimación del error de medición en las componentes norte y este (N_i y E_i) de la posición i -ésima registrada por los dispositivos de los sistemas mundiales de navegación por satélite (GNSS) en comparación con la referencia (R), el valor medio de los errores de medición (μ_N , μ_E), el error medio de localización (μ_{LE}), las desviaciones típicas de las componentes norte y este (σ_N y σ_E), la desviación típica circular (σ_C) y la probabilidad de error circular (CEP).	141
Fig. 30. A) Gráficos de dispersión de los errores de localización durante las sesiones S1, S2 y S3 para un receptor de sistemas mundiales de navegación por satélite (GNSS) de bajo coste (LCR; izquierda) y para un collar GNSS multifrecuencia (MFC; derecha). La etiqueta del eje vertical (N) se refiere a la dirección norte y la etiqueta del eje horizontal (E) se refiere a la dirección este. Se utilizó una solución de posicionamiento puntual preciso (PPP) para establecer la referencia. B) Número de satélites (SV) y valores de dilución horizontal de precisión (HDOP) por sesión (S1-S3) para el LCR (izquierda) y el MFC (derecha). El eje horizontal muestra el tiempo en horas. Realizamos la prueba estática A en la Universidad de Jaén, España, del 16 al 18 de febrero de 2021.	144

Fig. 31. Gráficos de dispersión de los errores de localización (la etiqueta N del eje vertical se refiere a la dirección norte y la etiqueta E del eje horizontal se refiere a la dirección este) durante las sesiones S4 y S5, histograma del error de localización, y número de satélites (SV) y valores de dilución horizontal de la precisión (HDOP) (el eje horizontal muestra el tiempo en horas) para el collar GNSS multifrecuencia (MFC; A) y para el collar GNSS monofrecuencia (SFC; B). Se utilizó una solución de posicionamiento puntual preciso (PPP) para establecer la referencia. En el gráfico de dispersión del SFC, 4 registros (los valores más grandes del histograma) están fuera de los rangos de error dibujados y no son visibles. Realizamos la prueba estática B en la Universidad de Jaén, España, del 18 al 25 de febrero de 2021.	146
Fig. 32. Definición planimétrica y altimétrica de la ruta R1, a pie (sesión S6), y de la ruta R2, en coche (sesión S7), con un receptor de sistemas mundiales de navegación por satélite (GNSS) de bajo coste (LCR; línea blanca), un collar GNSS multifrecuencia (MFC; puntos azules) y un collar GNSS monofrecuencia (SFC; puntos rojos). Realizamos la prueba cinemática C en Jaén, España, los días 18 y 19 de junio de 2021. Figura parcialmente derivada de ortofotografías del Programa Nacional de Ortofotografía de España PNOA-2019 CC-BY, scne.es.	148
Fig. 33. Definición planimétrica y altimétrica de la ruta R3, en coche (sesión S9), con un receptor de sistemas mundiales de navegación por satélite (GNSS) de bajo coste (LCR; línea blanca), un collar GNSS multifrecuencia (MFC; puntos azules) y un collar GNSS monofrecuencia (SFC; puntos rojos). Realizamos la prueba cinemática C en Jaén, España, el 20 de junio de 2022. Figura parcialmente derivada de ortofotografías del Programa Nacional de Ortofotografía de España PNOA-2019 CC-BY, scne.es. ...	149
Fig. 34. Mapa general con las trayectorias digitalizadas en la zona y detalle en dos zonas de las rutas simuladas, las naturales y las de menor cota.	159
Fig. 35. Perfil altimétrico longitudinal de un ejemplo de trayectoria donde se representa el significado gráfico de cada uno de los parámetros atribuidos a las trayectorias.	160
Fig. 36. Ruta 321 condicionada por cercados artificiales.	161

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores utilizados para las simulaciones en cada especie focal. Se han utilizado valores que coinciden con el etograma de movimiento para 1 y 2 <i>Oryctolagus cuniculus</i> , 2 <i>Cervus elaphus</i> , 3 <i>Canis lupus</i> y 4 <i>Lynx pardinus</i>	62
Tabla 2. Resumen estadístico descriptivo de las variables de interés en la zona de estudio.....	88
Tabla 3. Resumen estadístico descriptivo de las variables consideradas en el diseño experimental y resultados para las aproximaciones de área geométrica 3D, así como resultados del índice de incremento de superficie en referencia al área proyectada 2D. 90	
Tabla 4. Resumen del GLM para modelizar el aumento porcentual de la superficie. Resultados del análisis de comparación post hoc de las parcelas basado en el método LSD con p-valores ajustados de Holm.	91
Tabla 5. Resumen estadístico descriptivo del aumento de la distancia para cada especie en cada parcela. Resultados de las comparaciones por pares entre parcelas para cada especie utilizando el método LSD con p-valores ajustados de Holm.....	94
Tabla 6. Valores estadísticos resumidos en trayectorias digitalizadas 3D de animales.	120
Tabla 7. Descripción de las pruebas estáticas y cinemáticas y de las sesiones de observación (S0 a S9) realizadas en Jaén, España, de febrero de 2021 a junio de 2022 con un receptor geodésico de sistemas mundiales de navegación por satélite (GNSS), un receptor GNSS multifrecuencia (LCR) de bajo coste, un collar GNSS multifrecuencia (MFC) y un collar GNSS monofrecuencia (SFC).	140
Tabla 8. Repetibilidad de los parámetros de evaluación de la prueba estática A de las prestaciones de los dispositivos del sistema mundial de navegación por satélite (GNSS) realizada en la Universidad de Jaén (España) durante las sesiones S1, S2 y S3 del 16 al 18 de febrero de 2021: número de fijaciones correctas (n_f), tasa de fijaciones correctas (FSR), error medio de localización (μ_{LE}), desviación típica circular (σ_c), probabilidad de error circular (CEP), número medio de satélites utilizados (SV) y dilución horizontal media de la precisión (HDOP).....	143
Tabla 9. Resultados de los parámetros de evaluación de la prueba estática B del rendimiento de los dispositivos del sistema mundial de navegación por satélite (GNSS) realizada en la Universidad de Jaén, España, el 18 de febrero (sesión S4) y el 25 de febrero (sesión S5) de 2021: número de fijaciones con éxito (n_f), tasa de éxito de las	

fijaciones (FSR), error medio de localización (μ_{LE}), desviación típica circular (σ_C), probabilidad de error circular (CEP), número medio de satélites utilizados (SV) y dilución horizontal media de la precisión (HDOP).	145
Tabla 10. Resultados de los parámetros de evaluación para la prueba cinemática C y las rutas R1 (18 de junio de 2021, sesión S6), R2 (19 de junio de 2021, sesión S7, y 20 de junio de 2022, sesión S8), y R3 (21 de junio de 2022, sesión S9) realizadas en Jaén, España, con el collar GNSS multifrecuencia (MFC) y el collar GNSS monofrecuencia (SFC): número de fijaciones correctas (n_f), tasa de fijaciones correctas (FSR), error localización relativo (RLE), número de satélites utilizados (SV) y dilución horizontal de la precisión (HDOP).	151
Tabla 11. Comparativa de resultados estadísticos los tres tipos de trayectorias (métodos de comparación no paramétricos: esfuerzo menor cota = esfuerzo naturales < esfuerzo simuladas).	162

RESUMEN

La presente Tesis Doctoral tiene como objetivo general el estudio de la influencia que presentan los factores topográficos sobre diversos parámetros biológicos y ecológicos relacionados con el movimiento y comportamiento de los animales en ecosistemas mediterráneos del sur de España. También valida y pone a punto el uso de metodologías topográficas y geomáticas para el seguimiento y monitorización de la fauna silvestre. La transferencia de los resultados de esta investigación podrá aportar herramientas para la gestión sostenible de la fauna silvestre en zonas especiales de conservación.

En muchos estudios ecológicos y biológicos realizados hasta el momento participan componentes relacionadas con el territorio donde habita la fauna silvestre. Estos factores de estudio pueden ser de distinto tipo: bióticos (depredadores, alimento, tipo de vegetación en la zona, etc.) y abióticos (presencia de agua, temperatura, accidentes naturales, etc.), pero también la morfología, la geografía de la zona, la altitud, la pendiente, la orientación de las laderas o la rugosidad del terreno influyen, en función de la escala de estudio, en determinados aspectos de la vida animal. Aunque son muchos los autores que reconocen la importancia de este grupo de factores vinculados al terreno, hasta la fecha son muy pocos los estudios que los tienen en cuenta.

Con el fin de valorar la influencia que tiene esta consideración tridimensional del espacio en las superficies o áreas, se realiza un análisis dimensional tanto 2D como 3D en cotos de caza mayor con distintas características topográficas dentro del entorno geográfico donde se desarrolla el estudio, Sierra Morena (Jaén, España), determinando el porcentaje de diferencia entre ambas. Dentro de este mismo análisis se estudia la influencia que tiene en esta consideración la escala de trabajo y la variación morfológica del terreno, llevando a cabo un estudio sobre espacios diferente tamaño (de 1 a 4 km de lado) en distintas zonas, con distintas diferencias de altitud. Asimismo, se simulan las trayectorias de distintas especies animales que naturalmente habitan en la zona: conejo (*Oryctolagus cuniculus*), ciervo (*Cervus elaphus*), lobo (*Canis lupus*) y lince (*Lynx pardinus*). Basándose en el cálculo realizado con la función de Hawth en ArcGIS se replican 15 trayectorias por especie y zona, considerando distintas localizaciones en función de su morfología, y se analiza la diferencia porcentual de longitud entre la proyección plana de cada trayectoria animal y su desarrollo espacial tridimensional. Estos aspectos se han desarrollado en un primer artículo publicado (Valderrama-Zafra et al., 2022. Assessing 3D vs. 2D habitat metrics in a Mediterranean ecosystem for a wiser

wildlife management. Ecological Informatics, 69, 101623. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101623>). Se pone de manifiesto la relevancia de la consideración tridimensional del terreno, demostrando que debe ser tomada en cuenta en los distintos estudios ecológicos y biológicos en los que intervienen parámetros como, distancias o áreas.

Por otro lado, entender y rastrear los patrones de movimiento de los animales es importante desde el punto de vista de la conservación y el uso sostenible de los recursos naturales. Muchos factores influyen en la trayectoria de desplazamiento de los animales dentro de sus respectivos hábitats, como la presencia de depredadores naturales, la disponibilidad de recursos, la memoria social o las características topográficas del entorno. Nos centramos ahora en conocer el impacto de los factores topográficos en la dinámica de movimiento. Se genera una base de datos de trayectorias de animales. Esta base de datos se generó a partir de una metodología gráfica novedosa basada en la identificación de huellas de animales sobre ortofotos de gran resolución (PNOA 0.50m/pixel) y contraste en campo para evitar confusiones con accidentes geográficos. Una vez generada la base de datos de trayectorias se infirieron los factores topográficos asociados a cada una de ellas. Se diseñó un modelo estadístico de regresión lineal basado en los factores topográficos que afectan al movimiento con el fin de inferir las trayectorias entre dos puntos designados dentro del área de estudio. En este modelo se tuvieron en cuenta los aspectos tridimensionales del terreno destacados en el primer artículo. Los resultados se han publicado en un segundo artículo (Valderrama-Zafra et al., 2024. Impact of topographic factors on animal field pathings: Analysis and prediction of deer movement patterns. Ecological Informatics, 80, 102487. ISSN 1574-9541. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2024.102487>).

A partir de la aplicación de las técnicas que se han desarrollado e implementado, se adquiere un conocimiento más detallado de los factores topográficos que condicionan las trayectorias animales y su relación con el consumo energético requerido. Actualmente, en un artículo en elaboración, estamos trabajando en la consideración del consumo energético como motivación para la elección de rutas de desplazamiento animal, sobre todo a escala cercana y en ausencia de otros factores determinantes. Esto permitirá estimar corredores ecológicos sobre los que teóricamente se muevan los animales de una manera más óptima.

Un aspecto importante para la gestión sostenible y/o conservación de especies animales es la mejora de los sistemas de posicionamiento por satélite en el seguimiento de la fauna silvestre. Para ello se ha probado experimentalmente la influencia de los módulos multifrecuencia, multiconstelación en el rendimiento de los collares con la tecnología GNSS (Sistema Mundial de Navegación por Satélite) utilizados para monitorizar la vida silvestre. Se han aplicado pruebas estáticas y cinemáticas diseñadas para evaluar y comparar el rendimiento de los collares, equipados con un chipset de frecuencia única frente a un chipset multifrecuencia. Se ha evaluado la disponibilidad y continuidad de las soluciones, el número de satélites utilizados, la precisión, la dilución de la precisión y la exactitud de los parámetros de calidad para dispositivos GNSS. Este estudio se aborda en un tercer artículo (Garrido-Carretero et al., 2023. Improving the precision and accuracy of wildlife monitoring with multi-constellation, multi-frequency GNSS collars. The Journal of Wildlife Management, 87-4, e22378. <https://doi.org/10.1002/jwmg.22378>) en el marco del Proyecto PID2022-1426610B-I00 (TRACKINGIS-DEER).

La disponibilidad de grandes conjuntos de datos en periodos relativamente cortos de tiempo mejorará el conocimiento de las funciones de consumo energético, la estimación de corredores de desplazamiento y los hábitos de movimiento en función del terreno, así como la gestión y conservación de especies que es esencial en Zonas Especiales de Conservación (ZEC) de la Red Natura 2000, como el caso de especies cinegéticas que comparten hábitats con especies emblemáticas en zonas de Sierra Morena Oriental.

ABSTRACT

The general objective of this doctoral thesis is to study the influence of topographic factors on several biological and ecological parameters related to the movement and behavior of animals in Mediterranean ecosystems of southern Spain. It also validates and fine-tunes the use of topographic and geomatic methodologies for wildlife tracking and monitoring. The transfer of the results of this research may provide tools for the sustainable management of wildlife in special areas of conservation.

Many ecological and biological studies carried out so far involve components related to the territory where wildlife lives in. These study factors can be of different types: biotic (predators, food, type of vegetation in the area, etc.) and abiotic (presence of water, temperature, natural features, etc.), but also the morphology, the geography of the area, the altitude, the slope, the orientation of the slopes or the roughness of the terrain influence, depending on the scale of the study, certain aspects of animal life. Although many authors recognize the importance of this group of terrain-related factors, very few studies have taken them into account to date.

In order to assess the influence that this three-dimensional consideration of space has on the surfaces or areas, a 2D and 3D dimensional analysis is carried out in big game hunting areas with different topographic characteristics within the geographical environment where the study is developed, Sierra Morena (Jaén, Spain), determining the percentage of difference between the two. Within this same analysis, the influence that the scale of work and the morphological variation of the terrain have on this consideration is studied, carrying out a study on spaces of different size (from 1 to 4 km on each side) in different areas, with different differences in altitude. The trajectories of different animal species that naturally inhabit the area are also simulated: rabbit (*Oryctolagus cuniculus*), deer (*Cervus elaphus*), wolf (*Canis lupus*) and lynx (*Lynx pardinus*). Based on the calculation made with the Hawth function in ArcGIS, 15 trajectories per species and area are replicated, considering different locations according to their morphology, and the percentage difference in length between the flat projection of each animal trajectory and its three-dimensional spatial development is analyzed. These aspects have been developed in a first published article (Valderrama-Zafra et al., 2022. Assessing 3D vs. 2D habitat metrics in a Mediterranean ecosystem for a wiser wildlife management. Ecological Informatics, 69, 101623.

<https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101623>). The relevance of the three-dimensional consideration of the terrain is highlighted, demonstrating that it must be taken into account in the different ecological and biological studies in which parameters such as distances or areas are involved.

On the other hand, understanding and tracking animal movement patterns is important from the scope of conservation and sustainable use of natural resources. Many factors influence the movement trajectory of animals within their respective habitats, such as the presence of natural predators, resource availability, social memory or topographic features of the environment. We now focus on understanding the impact of topographic factors on movement dynamics. A database of animal trajectories is generated with a high level of detail. This database was generated from a novel graphic methodology based on the identification of animal tracks on high resolution orthophotos (PNOA 0.50m/pixel) and field contrast to avoid confusion with geographical features. Once the trajectory database was generated, the topographic factors associated with each trajectory were inferred. A linear regression statistical model based on topographic factors affecting movement was designed to infer trajectories between two designated points within the study area. This model took into account the three-dimensional aspects of the terrain highlighted in the first article. The results have been published in a second paper (Valderrama-Zafra et al., 2024. Impact of topographic factors on animal field pathings: Analysis and prediction of deer movement patterns. *Ecological Informatics*, 80, 102487. ISSN 1574-9541. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2024.102487>).

From the application of the techniques that have been developed and implemented, a more detailed knowledge of the topographic factors that condition animal trajectories and their relationship with the required energy consumption is acquired. Currently, in an article in preparation, we are working on the consideration of energy consumption as a motivation for the choice of animal movement routes, especially at a nearby scale and in the absence of other determining factors. This will allow us to estimate ecological corridors along which animals theoretically move in a more optimal way.

An important aspect for the sustainable management and/or conservation of animal species is the improvement of satellite positioning systems in wildlife monitoring. To

this end, the influence of multi-frequency, multi-constellation modules on the performance of GNSS (Global Navigation Satellite System) collars used for wildlife monitoring has been experimentally tested. Static and kinematic tests designed to evaluate and compare the performance of collars equipped with a single frequency chipset versus a multi-frequency chipset have been applied. Availability and continuity of solutions, number of satellites used, accuracy, accuracy dilution and accuracy of quality parameters for GNSS devices have been evaluated. This study is addressed in a third article (Garrido-Carretero et al., 2023. Improving the precision and accuracy of wildlife monitoring with multi-constellation, multi-frequency GNSS collars. The Journal of Wildlife Management, 87-4- e22378. <https://doi.org/10.1002/jwmg.22378>) under Project PID2022-1426610B-I00 (TRACKINGIS-DEER).

The availability of large data sets in relatively short periods of time will improve the knowledge of energy consumption functions, the estimation of movement corridors and movement habits depending on the terrain, as well as the management and conservation of species which is essential in Special Areas of Conservation (SAC) of the Natura 2000 Network, such as the case of hunting species that share habitats with emblematic species in areas of the Eastern Sierra Morena.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

El entorno geográfico donde se desarrolla la vida silvestre constituye una parte intrínseca influyente en muchos factores ecológicos y biológicos. Esta consideración espacial ha sido tradicionalmente proyectada en un entorno bidimensional, pero las tecnologías actuales permiten considerar ese hábitat geográfico como realmente es, un elemento tridimensional. Esto hará que se tenga un mejor conocimiento de muchos aspectos vitales de la vida animal.

Dado que la tecnología geoespacial ha ido evolucionando en los últimos años, se presentan desafíos y oportunidades en áreas como la cartografía digital, la teledetección, los Sistemas de Información Geográfica (SIG), la topografía y la fotogrametría, entre otras. Estas tecnologías pueden ser aplicadas de forma versátil en otras disciplinas como la Biología o la Ecología para conseguir mejorar el conocimiento de numerosos aspectos de la fauna silvestre.

La Geomática, es la ciencia que engloba esas tecnologías geoespaciales como la Cartografía, la Topografía, la Teledetección y los SIG, integrando la recopilación, el análisis, la gestión y la representación de datos espaciales utilizando tecnologías y herramientas avanzadas.

Los orígenes de la Geomática se remontan a las antiguas civilizaciones de egipcios, babilonios o griegos, cuando comenzaron a crear mapas rudimentarios para representar su entorno (Horowitz, 1988; Harrell y Storemyr, 2009). Estos primeros mapas eran a menudo dibujos a mano que mostraban características geográficas y distancias relativas.

Durante la Edad Media, los avances en la navegación impulsaron la creación de mapas más precisos y detallados (Peterson, 2005; Morse, 2007). Los viajes de exploración durante el Renacimiento llevaron a un mayor interés en la Cartografía, y se desarrollaron técnicas más avanzadas para medir la tierra y representarla en mapas.

La Topografía, ciencia de medir y representar las características físicas de la Tierra, experimentó avances significativos en el siglo XIX (Harris, 1974; Picón, 2003). La introducción de instrumentos de medición más precisos y técnicas de triangulación permitieron la creación de mapas topográficos más detallados.

El siglo XX marcó un hito en la historia de la Geomática con la invención y proliferación de tecnologías como la fotografía aérea, la teledetección satelital y los Sistemas de Posicionamiento Global (GPS). Estas tecnologías revolucionaron la forma en que se recopilaban los datos geoespaciales y la creación de mapas. Los SIG también comenzaron a desarrollarse, permitiendo la gestión y el análisis computerizado de datos geográficos (Longley, 2005; Burrough et al., 2015; Monmonier, 2019).

La Geomática ha seguido evolucionando en el siglo XXI con avances en tecnologías de teledetección, como imágenes de alta resolución capturadas desde satélites y drones (De Smith et al., 2007). Los SIG se han vuelto más sofisticados y accesibles, lo que ha llevado a su adopción en una amplia gama de campos, desde la planificación urbana hasta la gestión de desastres. En resumen, la historia de la Geomática es un viaje que ha evolucionado desde simples representaciones manuales de la Tierra hasta la integración de tecnologías avanzadas para recopilar, analizar y gestionar datos geoespaciales con un impacto significativo en la forma en que entendemos y gestionamos nuestro entorno.

Hoy en día, la Geomática se aplica en diversos campos como la gestión ambiental, la planificación urbana, la agricultura de precisión, la navegación, la arqueología, la epidemiología y muchos otros. La disponibilidad de datos geoespaciales precisos y las herramientas para analizarlos han permitido tomar decisiones más informadas y eficientes en una variedad de disciplinas. Esta versatilidad de la Geomática permite actualmente su aplicación en fenómenos ecológicos y biológicos. La Biología, entendida como la ciencia que estudia la vida en sus diversas formas, comprende numerosas áreas incluidas en ella como la genética, la fisiología, la biología celular, etc. Son la Ecología y la Biología Ambiental las ramas de la Biología en las que el potencial de la Geomática resulta de mayor interés. La Ecología es la rama de la Biología que aborda las interacciones entre organismos y su entorno natural, mientras que la Biología ambiental considera aspectos como la conservación, la gestión de recursos naturales y la sostenibilidad.

La Ecología trata de comprender patrones y procesos que inciden en la distribución y abundancia de las especies en la Tierra. De entre los distintos aspectos que toman parte de esta ciencia podemos destacar el estudio de los complejos sistemas formados por organismos vivos y su entorno (ecosistemas), y la variedad de especies de vida en la Tierra, lo que se conoce como biodiversidad, que es algo esencial para el equilibrio y

salud de los ecosistemas. Otros aspectos importantes que no escapan a la Ecología son el impacto humano en el medio ambiente, que está directamente relacionado con la biodiversidad y los ecosistemas, la deforestación, la contaminación, el cambio climático o la pérdida de hábitats, así como los problemas de conservación, entendidos como el conjunto de prácticas y políticas destinadas a preservar y proteger la biodiversidad y los ecosistemas. Esto incluye cuestiones como la gestión sostenible de los recursos naturales, la promoción de prácticas respetuosas con el medio ambiente, o la creación de áreas protegidas. En definitiva, la Ecología es vital para comprender los complejos sistemas naturales y para desarrollar estrategias que mejoren la sostenibilidad y la conservación de la biodiversidad en nuestro planeta (Bailey et al., 1996; Van Langevelde y Prins, 2008).

En un contexto en el que el seguimiento de los ecosistemas es un requisito clave de las directivas europeas sobre protección de la naturaleza, es necesario desarrollar y aplicar métodos avanzados de análisis de datos para seguir mejorando la evaluación, la gestión y el seguimiento de los hábitats y la fauna silvestre (Rogers et al., 2012).

En el campo de la ecología animal, es muy común considerar la representación simplificada del terreno de forma bidimensional (2D). Sin embargo, son escasos los estudios que consideran que la medida real del área o la distancia tiene un componente espacial tridimensional (3D) determinado por los cambios que implican aspectos de la superficie topográfica como la rugosidad, las pendientes o la altitud del terreno (Rogers et al., 2012; Monterroso et al., 2013; Tracey et al., 2014; Torres-Pulliza et al., 2020; Heit et al., 2021). Resulta llamativo que a pesar de que la vida animal se ve claramente afectada por el medio físico en el que se desarrolla, no son muchos los autores o estudios científicos que consideran la tridimensionalidad del terreno como determinante en la estimación de aspectos de la vida animal, cuando muchos de ellos se hacen eco de su importancia. El área del hábitat generalmente se calcula a partir de una medición 2D asumiendo una topografía plana homogénea. Sin embargo, los estudios ecológicos que ignoran los valores 3D corren el riesgo de malinterpretar la información debido al hecho de que el enfoque 2D subestima la distancia y el área del hábitat en comparación con una medición 3D (Dorner et al., 2002; Monterroso et al., 2013). Las estimaciones de área en 3D proporcionan una mejor medida de la variación topográfica y el patrón

espacial del hábitat, especialmente en áreas con relieve pronunciado (Blaschke et al., 2004; Hoechstetter et al., 2008; Wang et al., 2017).

La consideración tridimensional del espacio es también de gran importancia en la gestión de ecosistemas. Determinados aspectos ecológicos están estrechamente relacionados con la medición del área geográfica en la que se desarrollan, o de la longitud que se recorre. Así, por ejemplo, la capacidad de carga, entendida como el tamaño máximo de la población animal que puede ser sostenido por un entorno específico (FAO, 1991; Abbas et al., 2012; Möst et al., 2015) es también un concepto estrechamente relacionado con el tamaño del área que se está analizando (Cheng et al., 2017; Meshesha et al., 2019). Las cuotas de caza suelen ser estimadas a partir de los cálculos de densidad de población, siendo este último un parámetro en el que se relaciona el número de animales por unidad de superficie, y por lo tanto también puede estar afectado por la precisión en la que se estime el tamaño del territorio a considerar. Más aun habiéndose observado que las cuotas de caza tienen relación con la superficie, siendo más precisas las estimas cuando los datos sobre bolsas de caza se comunican por zonas (Lindström y Bergqvist, 2022).

Estos factores pueden ser especialmente relevantes para casos con implicaciones económicas, como sucede en la evaluación de los subsidios productivos en espacios agrarios y forestales estrechamente ligados con la superficie (Rogers et al., 2012). También la estimación de las densidades de ungulados es especialmente importante en el caso de fincas cerradas con densidades de individuos elevadas (Azorit, 2005; Nugent et al., 2011). Por lo tanto, el éxito a largo plazo de la conservación basada en áreas requiere que la medición del área sea fiable, utilizando una medición 3D exacta. Con ello se conseguirá asegurar cálculos económicos correctos para financiaciones o subvenciones, por superficie de explotación, relacionadas con políticas agrarias o climáticas, ya que los indicadores de superficie serán más reales. Una buena planificación para afrontar el cambio climático y hacer que la conservación de la biodiversidad sea una parte mucho más importante de las políticas de gestión del territorio (Rogers et al., 2012; Maxwell et al., 2020).

Por otro lado, las longitudes recorridas por los animales en sus desplazamientos influyen también en otros aspectos biológicos y ecológicos (Hanski et al., 1994; Lachica et al., 1997; Minetti et al., 2002; Fernández et al., 2016; Adachi et al., 2017; Lempidakis

et al., 2018;), como por ejemplo en el consumo energético, algo que está estrechamente relacionado con la configuración topográfica del paisaje (Fedak y Seeherman, 1979; Lempidakis et al., 2018). Según las características dinámicas y locomotrices de las distintas especies la configuración espacial tridimensional del paisaje las afectará de distinta manera (Monterroso et al., 2013).

La distancia es un parámetro métrico fundamental en el análisis espacial y el modelado. En los casos de estudio de las distancias recorridas por los animales en sus trayectorias, se utilizan principalmente técnicas planimétricas por parte de los diversos autores para obtener las trayectorias de los animales, y las distancias geodésicas o tridimensionales se calcula sobre modelos digitales, que se ajustan en cuanto a su resolución para optimizar los tiempos de cálculo, lo que provoca cierto nivel de error o incertidumbre con respecto a los resultados de la medida (Qiang et al., 2021), lo que provoca que se utilicen mayoritariamente técnicas planimétricas de medición sobre mapas y planos 2D. Algunos autores confirman que las técnicas planimétricas pueden subestimar aspectos del comportamiento y la ecología de los animales (Farhadinia et al., 2020; Heit et al., 2021).

Los estudios mencionados anteriormente ponen de manifiesto la importancia de la consideración tridimensional del espacio natural donde los animales desarrollan su actividad. Esta consideración tridimensional permite contemplar la heterogeneidad del terreno, que está estrechamente relacionada con factores topográficos como la variabilidad altitudinal, la rugosidad o la pendiente del terreno.

Las nuevas tecnologías, unidas a la mejora en la calidad y cantidad de datos topográficos a gran escala, abren una importante línea de trabajo en este sentido, y una herramienta fundamental es el modelado preciso de los Modelos Digitales del Terreno (MDT) y su aplicación a la medición de diversos parámetros de la superficie terrestre para aplicaciones ecológicas (Jenness, 2004; Korpela et al., 2009; Rogers et al., 2012).

No habría que dejar de lado el estudio de la influencia que tienen los factores a escala cercana en el movimiento de los animales, que puede constituir una tarea fundamental en el ámbito de la gestión y conservación de la fauna silvestre. Hay un importante grupo de factores que gobiernan la definición de las trayectorias realizadas por los animales, y se entrelazan con la dinámica tanto de los propios animales como de sus hábitats. Entre

estos factores se encuentran los atributos topográficos de la superficie del terreno, la disponibilidad de recursos en el medio ambiente, la composición estructural del hábitat, al comportamiento adquirido que surge del aprendizaje del individuo en su constante interacción con el ambiente, la memoria social incrustada en las comunidades animales y la presencia de depredadores naturales. Estudios de investigación anteriores han establecido los rangos de hábitat de los animales en función de la complejidad de su locomoción dentro de estos lugares. Entre los factores que más influyen en la demarcación del hábitat los más importantes son los factores topográficos, tal y como afirman Lempidakis et al. (2018).

Se pueden considerar numerosos factores que tienen que ver con las decisiones que el animal toma a la hora de moverse y que influyen en sus patrones de movimiento como, por ejemplo, la disponibilidad de recursos (Kauffman et al., 2021) o la presencia de depredadores (Kenward et al., 2018). El primero de ellos determina hacia dónde se dirige el animal y el segundo influye en la decisión de la ruta elegida. Cuando un animal decide desplazarse hacia una zona de confort en su hábitat, las razones que le llevan a realizar una determinada ruta se ven reducidas a factores como la presencia de obstáculos naturales o artificiales; aunque, como indicó Shepard et al. (2013), la consideración de los paisajes energéticos marca las características ecológicas de la locomoción animal y la optimización del consumo de energía resulta muy relevante a la hora de desplazarse. Estudios realizados por Lachica y Aguilera (2000), o los propios de Lachica et al. (1997), demostraron que el consumo de energía en el movimiento de los animales está directamente relacionado con la distancia vertical acumulada y la distancia recorrida. Por lo tanto, se puede considerar que, en los desplazamientos en ambientes libres de impedimentos naturales o artificiales, los movimientos se rigen principalmente por necesidades fundamentales como alimentación, refugio, hidratación u otros requerimientos esenciales (Abrahms et al., 2021; Kauffman et al., 2021). Sin embargo, el principio general que gobierna estos movimientos parece ser la minimización del gasto energético.

Por tanto, se precisa conocer en qué medida los factores topográficos afectan a las decisiones de desplazamiento a escala cercana, desvinculándolos de esos otros factores fundamentales, y encontrar qué parámetros topográficos concretos intervienen con más intensidad.

Se hace necesario localizar las trayectorias reales de los animales de forma lo más precisa posible y a una escala cercana para entender con detalle los factores topográficos implicados en las trayectorias definidas por los animales en sus desplazamientos. En los últimos años, la monitorización de la vida silvestre ha experimentado una profunda transformación con la mejora de las técnicas de análisis de datos. La evolución de la tecnología de rastreo GPS rentable y duradera (Riotte-Lambert y Matthiopoulos, 2020) ha dado paso a una nueva era en la que los datos pueden recopilarse con mayor frecuencia y precisión ininterrumpida (Fernández-Rodríguez et al., 2023), y la mejora en la precisión de los dispositivos GNSS ha permitido una cuantificación más completa de la movilidad animal (Garrido-Carretero et al., 2023). Existen otras técnicas para la captura de trayectorias de animales, como la basada en cámaras de trampeo o videotrampeo (Klasen y Steinhage, 2022), que permiten obtener incluso trayectorias 3D a escala cercana. En entornos controlados, se pueden utilizar tecnologías como Bluetooth (Morita et al., 2020), aunque lógicamente en estos casos las longitudes de las trayectorias registradas serán limitadas.

En la mejora de los sistemas de posicionamiento por satélite puede estar la clave para mejorar el monitoreo de animales silvestres. El Sistema Mundial de Navegación por Satélite (GNSS) combina todos los sistemas de posicionamiento por satélite actualmente disponibles (Hofmann-Wellenhof et al., 2008). Un sistema GNSS está compuesto por una constelación de satélites y una red de estaciones de control. Estos satélites transmiten a dispositivos GNSS la información horaria y orbital para aplicaciones de navegación y posicionamiento (Alonso et al., 2020; Caporali y Zurutuza, 2021). Actualmente hay 4 sistemas satelitales de posicionamiento global desplegados: el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) de los Estados Unidos, el Sistema Ruso GLObalnaya NAvigatsionnaya Sputnikovaya (GLONASS), el sistema europeo Galileo y el sistema chino BeiDou. Estos sistemas conducen a un sistema multiconstelación y multifrecuencia denominada multi-GNSS (Teunissen y Montenbruck, 2017). Las mejoras tecnológicas en los dispositivos GNSS, debidas principalmente a su capacidad multifrecuencia, reducen el tiempo de adquisición de la señal y aumentan la disponibilidad, fiabilidad, continuidad y precisión del posicionamiento GNSS, especialmente en entornos complejos como las zonas montañosas y el entorno forestal (Pan et al., 2019). Desde la década de 1990, el uso de collares GPS para estudiar y monitorear la vida silvestre ha crecido constantemente y la

literatura demuestra la variada información que se puede obtener de la investigación basada en collares GPS (Rodgers et al., 1996; Bowman et al., 2000; Rodgers, 2001). Sin embargo, las tecnologías basadas en satélites utilizadas hasta la fecha tienen sus limitaciones en el rendimiento inconsistente del collar (pérdida de datos por correcciones fallidas e inexactitud o error de ubicación) y pueden producir datos que no son adecuados para todos los estudios ecológicos, e incluso pueden conducir a resultados sesgados si se analizan sin tener en cuenta la calidad de los datos.

Así, en esta tesis cuantificamos la diferencia dimensional entre la consideración plana y su verdadera magnitud tridimensional, de las zonas donde los animales desarrollan su actividad. Esto se analizará desde dos puntos de vista: áreas o superficies y trayectorias lineales. Determinamos los factores de los que depende esa diferencia en las medidas 2D y 3D, bajo tres consideraciones: la escala de trabajo, la morfología de la zona y la especie sujeta a estudio. Esto se ha llevado a cabo en los cotos de caza de Sierra Morena Oriental (Jaén, España).

Se han estudiado los factores topográficos que influyen en los movimientos y desplazamientos animales, en ausencia de otros factores implicados. Este estudio se ha llevado a cabo a partir de trayectorias definidas digitalmente de forma precisa y cercana con una novedosa metodología gráfica. Esto nos ha permitido desarrollar un modelo predictivo con el que podemos simular la trayectoria ideal entre dos puntos para un animal. Este trabajo se ha desarrollado en el Monte Lugar Nuevo, en el Parque Natural de la Sierra de Andújar. Estas mismas rutas nos han permitido conocer el consumo energético, basándonos en los estudios de Lachica (1997), durante el movimiento animal y poder estimar caracterizar el uso de rutas de mínimo coste energético en el desplazamiento de los cérvidos.

Por último, se ha llevado a cabo un estudio de distintas tecnologías GNSS para valorar cual es más adecuada e implementarla en collares para seguimiento de animales. Esto nos permitirá conocer más datos de sus trayectorias y mejorar el ajuste de los modelos estimados. Todo este trabajo se llevó a cabo en la zona de la Sierra Sur de Jaén y en la propia Universidad de Jaén.

1.1. Área de estudio

El área de estudio principal de la tesis es Sierra Morena Oriental con una extensión de 2.241km² en la provincia de Jaén (España). En tres de los de los estudios nos hemos centrado en el monte Lugar Nuevo, en el Parque Natural de la Sierra de Andújar. El estudio con dispositivos GNSS se llevó a cabo en dos localizaciones, una en la propia Universidad de Jaén, y otra en la Sierra Sur de Jaén, cercana a la localidad de Valdepeñas de Jaén (Jaén).

1.1.1. Sierra Morena, el reborde meridional de la Meseta.

Desde una perspectiva geográfica macroespacial, Sierra Morena Oriental se sitúa al sur de la Península Ibérica, limitada por el valle del Guadalquivir al sur y la submeseta sur al norte. La porción oriental de Sierra Morena exhibe un relieve más accidentado, caracterizado por suaves colinas cubiertas de dehesas en las áreas cercanas al valle del Guadalquivir y que contrastan con elevaciones de pronunciadas pendientes a medida que nos acercamos a la interfaz con la Meseta Central.

Sierra Morena Oriental (Fig. 1) tradicionalmente ha sido un enclave poco visitado, casi deshabitado y escasamente explotado. Su economía de tipo marginal ha estado basada en usos tradicionales, siendo la gran superficie forestal la que ha estado principalmente dedicada a la caza, con el ciervo como la especie cinegética más apreciada (Azorit, 2005).



Fig. 1. Entorno de Sierra Morena Oriental.

Sierra Morena es una importante zona de caza y territorio designado como Zona de Especial Conservación (ZEC) dentro de la Red Europea Natura 2000 por su importancia ecológica y nivel de conservación. Los estudios realizados se llevaron a cabo considerando todas las fincas de caza mayor de Sierra Morena Oriental (38°21' N, 3°50' W) (Fig. 2), en la provincia de Jaén. Son 145 fincas de caza con una alta variabilidad de extensión superficial, donde menos del 56% son de una extensión inferior a 1000 hectáreas, y sobre el 27% se sitúa entre las 1.000 y las 2.000 hectáreas, mientras que solo el 17% aproximadamente supera esta última magnitud (Azorit et al., 2012a). Estas divisiones territoriales tienen límites definidos artificialmente, lo que significa que cada una presenta una amplia variabilidad tanto en su vegetación como en su relieve, con altitudes que van desde los 200 hasta los 1.500 metros sobre el nivel del mar, lo que lo hace muy conveniente para estudios de tipo topográfico. En algunas fincas actividad ganadera, pero la caza de ungulados silvestres es generalmente la actividad económica predominante. Las tasas de captura son notoriamente altas en comparación con otras regiones de Europa, y en las últimas dos décadas se ha observado un incremento en el número de animales cazados, con un aumento especialmente marcado durante años secos para regular las densidades de población (Azorit, 2005, 2006). El ciervo (*Cervus elaphus*) es la especie más abundante, seguido por el jabalí (*Sus scrofa*) (Azorit y Moro, 2010). La densidad de población del gamo (*Dama dama*) ha experimentado un notable

aumento desde la década de 1950, cuando fue introducido en algunas reservas de caza (Azorit et al., 2012b), al igual que la del muflón (*Ovis aries musimon*) (Azorit et al., 2020). En contraste, una población aislada y en peligro de extinción de corzos también se encuentra presente en esta área (Azorit y Muñoz-Cobo, 1997).

Esta zona montañosa está cubierta por bosques mediterráneos bien conservados dominados por *Quercus ilex*, *Q. faginea* y *Quercus suber* con una composición diversa de matorral que alberga poblaciones estables de varias especies protegidas emblemáticas como el linco ibérico (*L. pardinus*), el buitre negro (*Aegypius monachus*) y el águila imperial (*Aquila adalberti*) (Guzmán et al., 2004). También se ha documentado la presencia del lobo ibérico (*Canis lupus signatus*) en algunas zonas (Muñoz-Cobo et al., 2000).

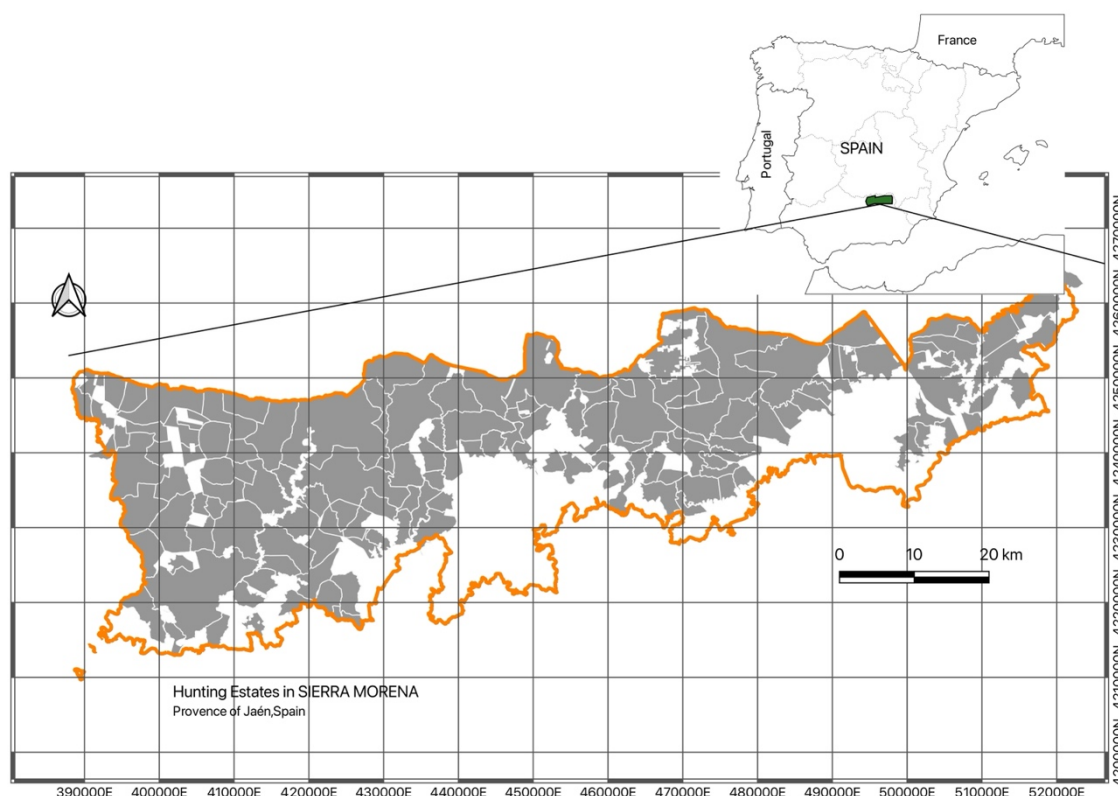


Fig. 2. Zona general de estudio. Cotos de caza en Sierra Morena Oriental, Jaén (España).

1.1.1.1. Relieve y geología

Sierra Morena es el borde meridional erosionado de la meseta central. Su formación se debió al hundimiento de la meseta en la Depresión Bética durante la era Mesozoica. Posteriormente, durante el Plioceno, se produjo un levantamiento del antiguo macizo hercínico, provocando una importante erosión fluvial y la desaparición de los materiales triásicos y miocenos. Se formaron grandes fallas como la del Guadalquivir, que redirigieron algunos afluentes que antes formaban parte de la cuenca del Guadiana. Sierra Morena está formada predominantemente por cuarcitas, gneises y pizarras del Cámbrico, junto con restos del Devónico y el Carbonífero. En el suroeste afloran rocas ígneas como los granitos, mientras que los esquistos y conglomerados se encuentran en lugares concretos como Despeñaperros. La zona que bordea la depresión del Guadalquivir comprende materiales miocenos, arcillas, margas, conglomerados y areniscas. Los materiales cuaternarios, principalmente conglomerados y sedimentos aluviales, están presentes en las terrazas fluviales. Sierra Morena Oriental presenta un relieve caracterizado por una amplia superficie de aplanamiento labrada sobre materiales mayoritariamente metasedimentarios, con altitudes entre 650 y 700 metros. Estas formas ocupan posiciones interfluviales de los ríos Jándula y Yeguas, con desniveles máximos de hasta 400 metros. Al norte, están limitadas por la alineación Sa Quintana-Sa Calderones, con altitudes máximas de 1.290 metros en Burcio del Pino. Hacia el sur, aparecen morfologías graníticas asociadas al batolito de Los Pedroches. En la cara meridional de Sierra Quintana, en posiciones de piedemonte, se encuentran depósitos tipo raña entre 700 y 800 metros de altitud. Estos depósitos presentan un carácter conglomerático con cantos principalmente cuarcíticos. A pie de estas rañas y sobre la superficie de aplanamiento labrada sobre el zócalo, se encuentran depósitos fluviales colgados unos 300 metros por encima de la red fluvial actual, compuestos principalmente por cantos rodados de naturaleza cuarcítica y matriz arenosa (Granados y Espejo, 2001).

1.1.1.2. Hidrología, Climatología y edafología

Su red hidrográfica se enmarca completamente en la cuenca del Guadalquivir, siendo alimentada por numerosos afluentes. Morfológicamente hablando se caracteriza por un encajonamiento de los ríos que se adaptan a las líneas de fractura, con pendientes de

tipo medio. El régimen que presenta estos ríos es estrictamente pluvial y suelen tener carácter torrencial, acusando un fuerte estiaje en los meses de verano.

Entre los principales ríos encontramos, de Oeste a Este: el Guadalquivir, el Arenoso y el Arenosillo, el río Yeguas, el Jándula, el Rumblar y sus dos afluentes, el Pinto y el Grande; el Guadalén, con sus afluentes el Dañador y el Montizón; por último, el río Guadalimar y su afluente el Guadalmena.

La climatología de la zona descrita está influenciada por la singular estructura del Valle del Guadalquivir que permite el paso de masas nubosas de oeste a este, lo que da lugar a importantes precipitaciones durante la primavera y el otoño. Las temperaturas máximas se producen en julio y agosto, con mínimas en enero y febrero, y las variaciones térmicas son pronunciadas, con temperaturas promedio de aproximadamente 33 °C; los inviernos son fríos con lluvias muy irregulares. Las lluvias están estrechamente relacionadas con la altitud, aumentando de 600 a 800 litros/m² (Alaminos Tereno, 2001) de promedio anual en las áreas periféricas, y con hasta más de 1.500 l/m² registrados en los picos más altos de la región occidental. Los picos de precipitaciones se observan en noviembre-diciembre y marzo, siendo el verano el periodo más seco. A partir de los mapas de cultivos y aprovechamiento, se identifican dos zonas climáticas: un clima mediterráneo continental en la zona montañosa del norte, con humedad mediterránea seca, y un clima mediterráneo subtropical en el sector sur, con mayores precipitaciones y una importante evapotranspiración.

Sierra Morena Oriental presenta una capacidad agrológica pobre, cuyo desarrollo está limitado por la topografía y el sustrato rocoso sobre el que se asienta, lo cual favorece también unas condiciones de alta susceptibilidad a la erosión. Los suelos son poco desarrollados, con notables afloramientos de roca madre, pedregosos en las capas superficiales y con tonalidades rojizas debido al carácter silíceo de los componentes geológicos. Son impermeables y poco fértiles, con una constante pérdida de la cobertura vegetal y los estratos superiores del suelo debido a las fuertes escorrentías en episodios de precipitaciones torrenciales (Ruiz González et al., 1986).

La franja septentrional de la Sierra se caracteriza por amplias extensiones de matorral y encinares cubiertos de pastizales, que proporcionan abundante alimento al ganado. Estas zonas de vegetación crecen sobre suelos lavados con un régimen de humedad seco y

sustratos ácidos como pizarras, cuarcitas y esquistos. Municipios como Andújar, Baños de la Encina, Vilches, La Carolina, Santa Elena y Santisteban del Puerto presentan este tipo de sustrato.

En zonas del área central y oriental de la Sierra predominan los olivares y los cultivos herbáceos, aptos tanto para la agricultura como para el pastoreo. Aquí los suelos se desarrollan sobre conglomerados y sustratos básicos, principalmente en municipios como Puente de Génave, Génave, Villarrodrigo, La Puerta de Segura y Navas de San Juan.

El noroeste del área de estudio, incluyendo municipios como Montoro, Andújar, Marmolejo y Villanueva de la Reina, constituye una zona de transición entre la Sierra y la depresión del Guadalquivir. Predominan las dehesas de encinas, que sirven de importantes zonas de invernada para el ganado trashumante. Los suelos son de tipo Inceptisol y Entisol.

En la parte más occidental, sobre sustratos metamórficos, se encuentran tres tipos de suelos asociados. Las laderas más empinadas presentan suelos Xerorthents ocupados por pastos y matorrales con encinas y alcornoques. Las pendientes menos pronunciadas, con pastos y olivares, presentan suelos Xerochrepts, mientras que las zonas más llanas con cultivos de cereales se caracterizan por suelos Haploxeralfs. Estos tipos de suelo están presentes en municipios como Adamuz, Montoro y Villafranca de Córdoba.yy

1.1.2. Lugar Nuevo: Parque Natural de la Sierra de Andújar

En cuento a los estudios de escala cercana para determinar factores topográficos de influencia, el área de estudio se localizó en *Lugar Nuevo*, en Sierra Morena de Jaén, que además pertenece al Parque Natural de Sierra de Andújar, (Fig. 3, Fig. 4 y Fig. 5), monte público gestionado por el Organismo Autónomo de Parques Nacionales (38° 9' N 4° 3' W) con una superficie de unos 95 km², se encuentran en el noroeste de la provincia de Jaén, en una zona periférica de la vertiente sur de Sierra Morena.

Esta zona nos permite trabajar sin la influencia que podrían tener los cerramientos en cotos más pequeños (en Sierra Morena Oriental las zonas cinegéticas están cercadas por vallas).

El grupo de investigación RNM175 ha venido desarrollando en esta zona diversos proyectos de investigación. El proyecto de excelencia con referencia P07-RNM-03087 (Consejería de Economía, Innovación, Ciencia y Empleo, Junta de Andalucía) y como el PID2022-1426610B-I00 (Ministerio de Ciencia e Innovación, España) con una innovadora propuesta de seguimiento animal con collares GNSS.

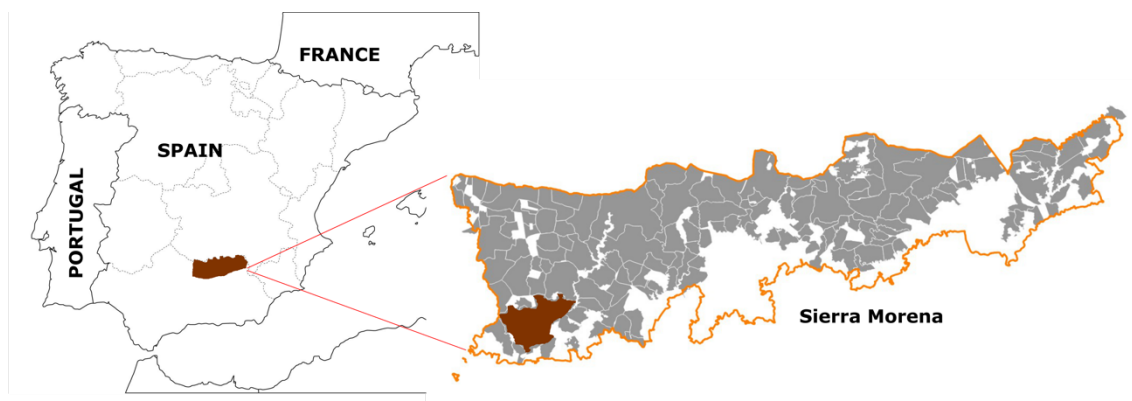


Fig. 3. Localización de la finca Lugar Nuevo en Sierra Morena (Jaén, España).

Desde un punto de vista topográfico Lugar Nuevo se caracteriza por su variabilidad altitudinal, con unos 500 metros de desnivel entre las zonas más bajas y las más altas, y con un amplio rango de pendientes de terreno variando entre 0° y 68°, lo que la convierte en una zona idónea para este estudio.

Las comunidades vegetales presentes son las típicas de suelos silíceos y de los ecosistemas mediterráneos, como las “dehesas” constituyendo la parte dominante del sistema agroforestal. Las principales formaciones vegetales existentes en las fincas de estudio son: monte mediterráneo, matorral, pinar de repoblación, herbazal, monte adehesado, vegetación de ribera y lentiscar-acebuchar. La vegetación mediterránea está dominada por arbusto de hoja perenne y estas especies de árboles son, en general, más palatables y nutritivas que las de hoja caduca (Castro et al., 1978; Álvarez y Ramos, 1991; Burtthey, 1991). La cubierta arbustiva dominante es de jara (*Cistusladanifer*) y otras como lentisco (*Pistacea* sp.), aligustre (*Phillyrea* sp.), acebuche (*Olea europaea* var. *sylvestris*) y romero (*Rosmarinus officinalis*). Además, más del 50% de Lugar Nuevo está cubierto por repoblaciones de coníferas (principalmente *Pinus* sp., con densidades forestales de 200 a más de 1.000 árboles/ha) (Rodríguez-Estévez et al.,

2007). Según la densidad y orientación de la masa de pinos, podemos estar ante arbustos o sotobosque de matas (Tornero, 2005).



Fig. 4. Paisaje del monte Lugar Nuevo.

La zona se caracteriza por la gran diversidad de sistemas naturales de alto valor ecológico que presentan, por las especies protegidas vegetales y faunísticas que albergan y por sus recursos naturales. Entre las especies cinegéticas nos encontramos con el ciervo (*Cervus elaphus*) y el gamo (*Dama dama*), también cohabitan otras especies de ungulados como son el jabalí (*Sus scrofa*), el corzo (muy escaso) (*Capreolus capreolus*), el muflón (*Ovis musimon*) y la cabra montés (*Capra pyrenaica*). Otras especies de interés presentes en el área de estudio son mamíferos como el lince ibérico (*Lynx pardinus*) en peligro de extinción, presencia relictas del lobo Ibérico (*Canis lupus*), En cuanto a las aves, cabe citar el águila imperial ibérica (*Aquila adalberti*), el buitre negro (*Aegypius monachus*) y la cigüeña negra (*Ciconia nigra*).

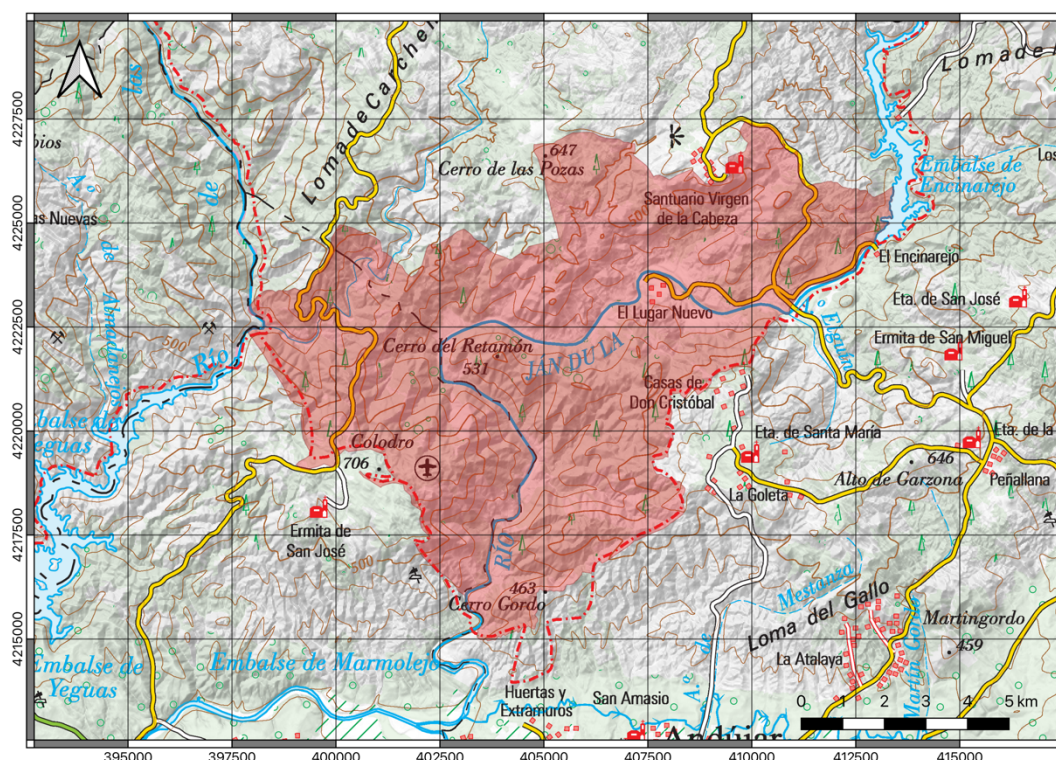


Fig. 5. Monte Lugar Nuevo. Parque Natural de la Sierra de Andújar (Jaén)

1.1.3. Sierra Sur de Jaén

Para el testeo y mediciones de los distintos tipos de collares GNSS se optó por realizar las tareas de campo en la zona de la comarca de la Sierra Sur de Jaén, concretamente en la localidad de Valdepeñas de Jaén. Es una zona en la que nos encontramos colinas y valles con cubierta vegetal mediterránea, con zonas de pinos y olivares. Se caracteriza por presentar un paisaje multifuncional caracterizado por una variedad de usos forestales, agrarios y ganaderos. Posee un clima continental mediterráneo caracterizado por inviernos suaves y veranos prolongados, cálidos y secos, que a menudo resultan en periodos de sequía. Las escasas precipitaciones se concentran principalmente en primavera y otoño. La zona de estudio alberga un variado grupo de herbívoros como el conejo (*Oryctolagus cuniculus*) y ungulados como el jabalí (*Sus scrofa*) y la cabra doméstica y salvaje (*Capra pyrenaica*) y el ciervo (*Cervus elaphus*), carnívoros como el zorro (*Vulpes vulpes*) y especies protegidas, entre las que destacan el águila perdicera (*Aquila fasciata*) y el azor (*Accipiter gentilis*).

Las pruebas estáticas de posicionamiento se llevaron a cabo en el Campus de la Universidad de Jaén ($37^{\circ}47'16''\text{N}$, $3^{\circ}46'40''\text{W}$), a una altitud aproximada de 455 m sobre el nivel medio del mar (Fig. 6A-6B). Para las pruebas cinemáticas se seleccionaron varias rutas en zonas montañosas en un entorno rural de la Sierra Sur de Jaén (Fig. 6C), cerca de la localidad de Valdepeñas de Jaén ($37^{\circ}36'6''\text{N}$, $3^{\circ}45'24''\text{W}$). Las zonas presentan gran variabilidad altimétrica, entre los 580m y los 1.500m, una característica necesaria para nuestro testeo.

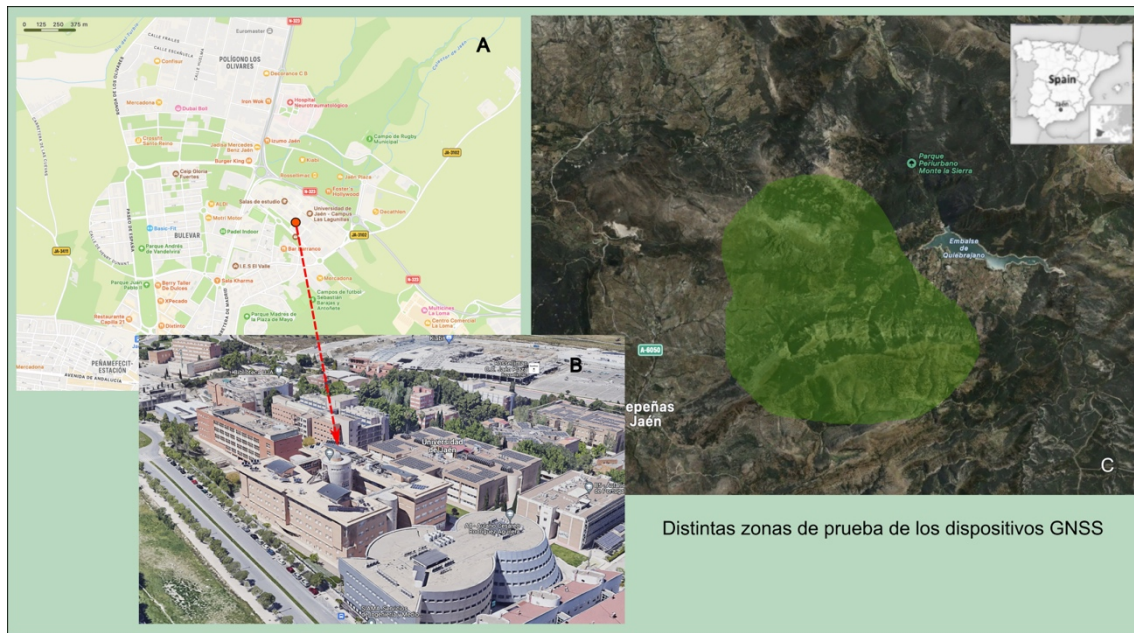


Fig. 6. Zonas de test para dispositivos GNSS.

CAPÍTULO 2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS DE TRABAJO

El objetivo general de la presente tesis doctoral es el estudio de la influencia que presentan los factores topográficos sobre diversos parámetros biológicos y ecológicos relacionados con el movimiento y comportamiento de los animales en ecosistemas mediterráneos del sur de España. El movimiento animal es un aspecto fundamental en la vida silvestre, tanto por la motivación de las propias especies como por la influencia mutua que se ejerce entre el espacio geográfico y la especie que lo habita. Se pretende mejorar el conocimiento de esos factores del medio físico, siempre desde el punto de vista del análisis del terreno y las técnicas de posicionamiento espacial abordadas desde las tecnologías gráficas y geomáticas.

Para alcanzar dicho objetivo general, se plantean los siguientes objetivos específicos:

I - Con ayuda de las nuevas tecnologías, cuantificar la diferencia dimensional entre la consideración de una determinada zona donde los animales desarrollan su actividad como geoméricamente plana, y su verdadera magnitud tridimensional. Se analizará desde dos puntos de vista:

- Áreas: Diferencias existentes entre la medida del área de una parcela o finca utilizando ambas consideraciones.
- Trayectoria Lineal: Diferencias en la medición de distancias recorridas por los animales considerando ambas mediciones, plana y tridimensional.

II - Determinar los factores que influyen en la diferencia entre la consideración plana y la consideración tridimensional. Se estudiará desde tres puntos de vista:

- La escala de trabajo. El tamaño de la zona puede ser determinante en el orden de magnitud de la diferencia métrica del área medida.
- La morfología de la zona: considerar si la complejidad topográfica, las diferencias de altitud o la pendiente influyen en las diferencias métricas.
- La especie animal sujeta a estudio.

Estos objetivos han sido desarrollados en la siguiente publicación, que puede consultarse íntegramente en el Anexo I de esta memoria:

- Valderrama-Zafra, J. M., Fernández-Rodríguez, P., Oya, A., Carrasco, R., Rubio-Paramio, M. A., Garrido-Carretero, M. S., y Azorit, C., 2022. Assessing 3D vs. 2D habitat metrics in a Mediterranean ecosystem for a wiser wildlife management. *Ecological Informatics*, 69, 101623. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101623>.

III - Estudiar a escala cercana las trayectorias de los animales sobre el terreno para determinar los diferentes factores topográficos que influyen en sus movimientos, en ausencia de otros factores fundamentales implicados en el movimiento animal.

- Desarrollar un modelo predictivo de movimiento animal a escala cercana en función de los factores topográficos determinados, para poder simular la ruta más probable que seguirán los animales entre dos puntos.

Los resultados referentes al objetivo III, han sido publicados en el artículo que puede consultarse en el Anexo II de la memoria:

- Valderrama-Zafra, J. M., Rubio-Paramio, M. A., García-Molina, D. F., Mercado-Colmenero, J. M., Oya, A., Carrasco, R., Azorit, C., 2024. Impact of topographic factors on animal field pathings: Analysis and prediction of deer movement patterns. *Ecological Informatics*, 80, 102487. ISSN 1574-9541. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2024.102487>.

IV – El objetivo principal era evaluar el rendimiento del collar, comparando los errores de localización y otros parámetros de calidad de los collares GNSS equipados con módulos GNSS monofrecuencia o multifrecuencia mediante pruebas estáticas y cinemáticas.

Los resultados referentes a este objetivo han sido publicados en un artículo jcr que puede consultarse en el Anexo III de esta memoria:

- Garrido-Carretero, M. S., Azorit, C., de Lacy-Pérez de los Cobos, M. C., Valderrama-Zafra, J. M., Carrasco, R., y Gil-Cruz, A. J., 2023. Improving

the precision and accuracy of wildlife monitoring with multi-constellation, multi-frequency GNSS collars. The Journal of Wildlife Management, 87(4), e22378. <https://doi.org/10.1002/jwmg.22378>.

V – Caracterizar el uso de rutas de mínimo coste energético en el desplazamiento de los cérvidos.

Este último objetivo está en desarrollo en un nuevo artículo en elaboración.

Las **hipótesis** de trabajo que planteamos son las siguientes:

Es un hecho evidente que el conocimiento detallado de los factores y parámetros implicados en las decisiones del movimiento animal es de suma importancia en la gestión de muchos aspectos ecológicos y biológicos. Se ha indicado anteriormente que en la mayoría de los estudios llevados a cabo sobre el movimiento animal o su consumo energético se asume una concepción espacial bidimensional. La principal hipótesis de trabajo es: **(1) Una parametrización tridimensional de los estudios ecológicos y biológicos en los que estén implicados aspectos como la distancia o el área proporcionará resultados más adecuados de los parámetros ecológicos implicados.** Entendemos que, con ayuda de las nuevas tecnologías, podremos realizar un estudio que cuantifique la diferencia dimensional que existe entre considerar una determinada zona donde los animales desarrollan su actividad como geométricamente plana, frente a considerar su verdadera magnitud tridimensional. Este estudio se debe contemplar bajo dos puntos de vista: superficial (diferencias entre las medidas de áreas de parcelas o fincas) y lineal (diferencias entre las distancias recorridas por los animales en sus movimientos).

Consideramos que los **(2) Factores como la escala de trabajo, la complejidad topográfica o el comportamiento específico de los animales influyen en las variaciones entre ambas consideraciones, plana y tridimensional del espacio.** En este caso, estudiaremos esta hipótesis desde tres puntos de vista: la escala de trabajo (tamaño de la zona), la morfología de la zona (complejidad topográfica), y la especie animal sujeta a estudio.

En ausencia de otros factores como la vegetación, obstáculos naturales o artificiales, etc., pretendemos: **(3) Ver la influencia de los diferentes factores topográficos en sus**

movimientos, y de ser así, estimar qué factores son más determinantes implicados en el movimiento animal. A continuación, consideramos que se podrá desarrollar un modelo predictivo de movimiento animal a escala cercana a partir de los parámetros obtenidos, para inferir la ruta más probable que seguirán los animales entre dos puntos.

Como consecuencia de la necesidad de conocer con detalle el movimiento de los animales partimos de la hipótesis: **(4) El dispositivo GNSS multifrecuencia multiconstelación proporciona información mas precisa y òptima en relación a dispositivos convencionales.**

Actualmente se está trabajando en la hipótesis de que **(5) los cérvidos usan rutas de mínimo consumo de energía en sus desplazamientos**, especialmente en los casos en los que no hay influencias de otros factores, ya sean naturales o artificiales.

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA GENERAL

3.1. Desarrollos tridimensionales en verdadera magnitud. Diferencias con la consideración plana.

La cuantificación del nivel de diferencia superficial entre una consideración plana y una consideración tridimensional se realiza mediante técnicas gráficas, a partir de las mediciones de área en 145 cotos de caza de Sierra Morena, en la provincia de Jaén, sobre una superficie de más de 2.200 hectáreas.

Se valoraron las diferencias en las estimaciones de área, comparando la superficie plana y la superficie desarrollada tridimensionalmente. Previamente se caracterizó cada coto topográficamente en una base de datos geográfica con diferentes variables, como la altitud y la pendiente con valores máximos, mínimos y medios. Se obtuvieron las medidas del área 2D proyectada sobre el plano horizontal, así como la medida 3D, desarrollando la superficie digital del terreno como una malla de triángulos sobre el plano en un entorno vectorial ayudándonos de un software de dibujo asistido por ordenador (CAD) (Fig. 7). Todos estos cálculos se basaron en un modelo digital del terreno específico para el software de análisis usado conocido como modelo escalable del terreno (STM). EL STM se generó a partir de datos LiDAR (light detection and ranging) del MDT05 del Instituto Geográfico Nacional (IGN).

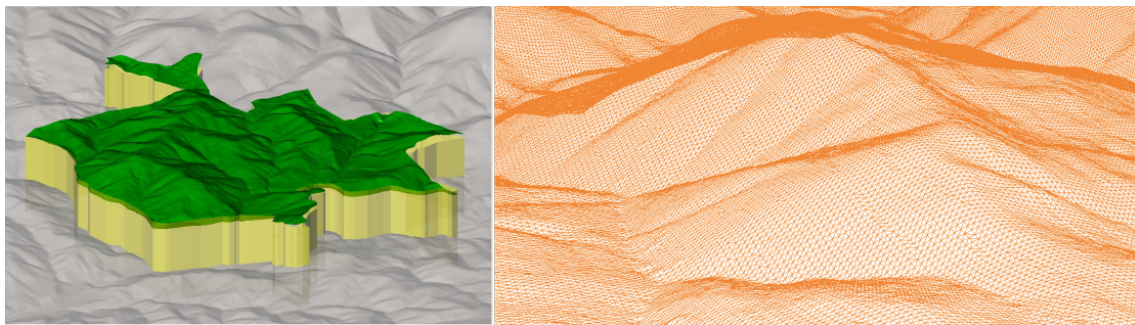


Fig. 7. Proyección tridimensional de una de las fincas de caza (a). Modelo digital de triángulos del terreno (b).

El problema que se plantea para la obtención de las superficies de geométricas o 3D de una zona tan extensa es el tamaño de la nube de puntos que se genera con los datos LiDAR. Antiguamente este problema era menor, dado que las fuentes de datos

cartográficos estaban a escalas más pequeñas, y por lo tanto, con mucha menor densidad y precisión. La cantidad de información y la precisión que tenemos ahora con el LiDAR es por un lado algo destacable y que aporta mucha fidelidad a los estudios que se realicen, pero por otro lado se presenta un reto en cuanto a su gestión gráfica, principalmente. En nuestro caso hemos sido capaces de manejar un MDT de toda la zona dado que hemos usado el modelo de datos comentado STM, que presenta la peculiaridad de hacer una generalización en la nube de puntos en función de la escala de visualización. Esto hace que su manejo gráfico sea liviano. En cuanto a los cálculos que se lleven a cabo sobre ese modelo de datos, usaran toda la precisión disponible.

Una vez que tenemos el STM de todas las fincas de caza, para calcular su superficie real, se extraen los modelos digitales escalables de cada una de ellas utilizando su contorno que está en formato vectorial (Fig. 7). Básicamente lo que hacen las herramientas de medición 3D es desarrollar cada una de las caras de la malla o triángulos sobre el plano y hacer la suma de todas ellas, es como extender la superficie completa sobre el plano (Ver Fig. 8).

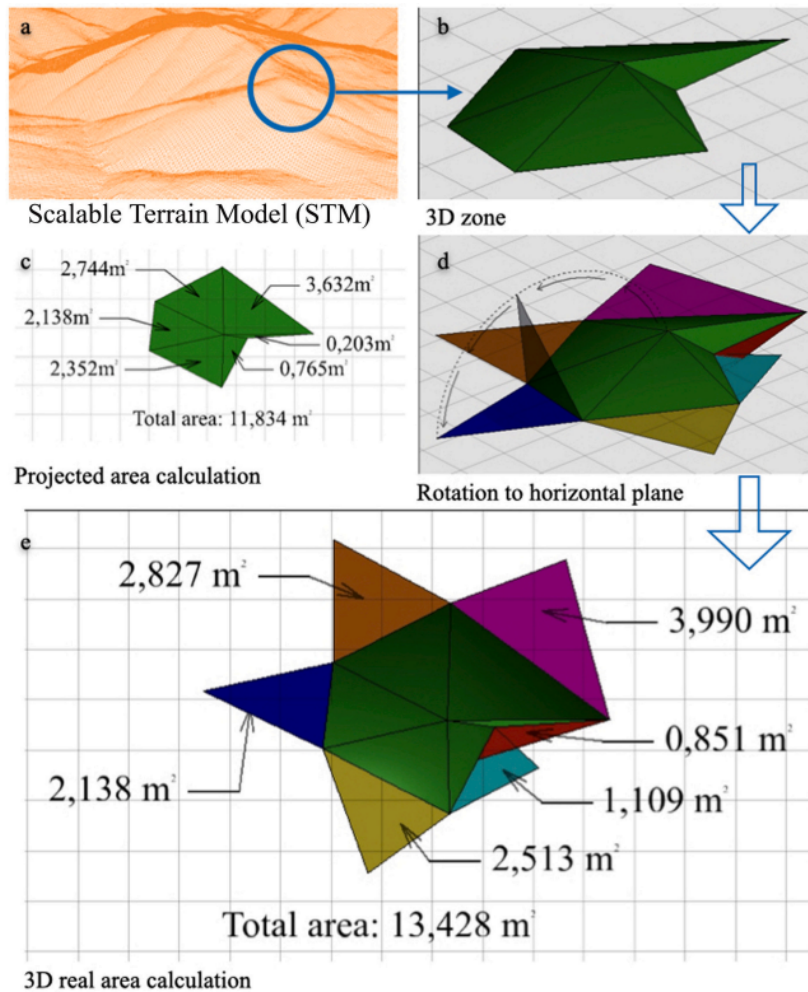


Fig. 8. Metodología gráfica para calcular la superficie proyectada 2D/3D.

El análisis métrico de los 145 cotos de caza permitió estimar un índice de *incremento de superficie (SI)* (1), que expresa el aumento porcentual en función de la superficie.

$$SI = [(\text{Área 3D} - \text{Área 2D}) / \text{Área 2D}] \cdot 100 \dots \dots \dots (1)$$

La variabilidad de tamaño en la muestra de superficies estudiada permitió adoptar un enfoque de modelado a escala múltiple para analizar las relaciones entre las áreas 3D y 2D. Con objeto de analizar cómo la escala participa en la diferencia entre ambas consideraciones espaciales se establecieron tres tipos de zonas de estudio en función del SI obtenido, y en ellas se muestrearon zonas cuadradas de distinta magnitud (1km, 2km y 4km de lado). Sobre ellas se volvió a estimar el SI y algunos otros parámetros relacionados con factores topográficos de la superficie (Fig. 9). La Fig. 9 muestra una clasificación con la variable visual valor implementando un cambio en el tono verde

para clasificar las distintas fincas en función de porcentaje de SI obtenido en ellas. Las zonas de estudio que se clasifican usando la variable visual tono sitúan a cada una de ellas en función de esa diferencia de área en la medida de superficie estimada por el SI

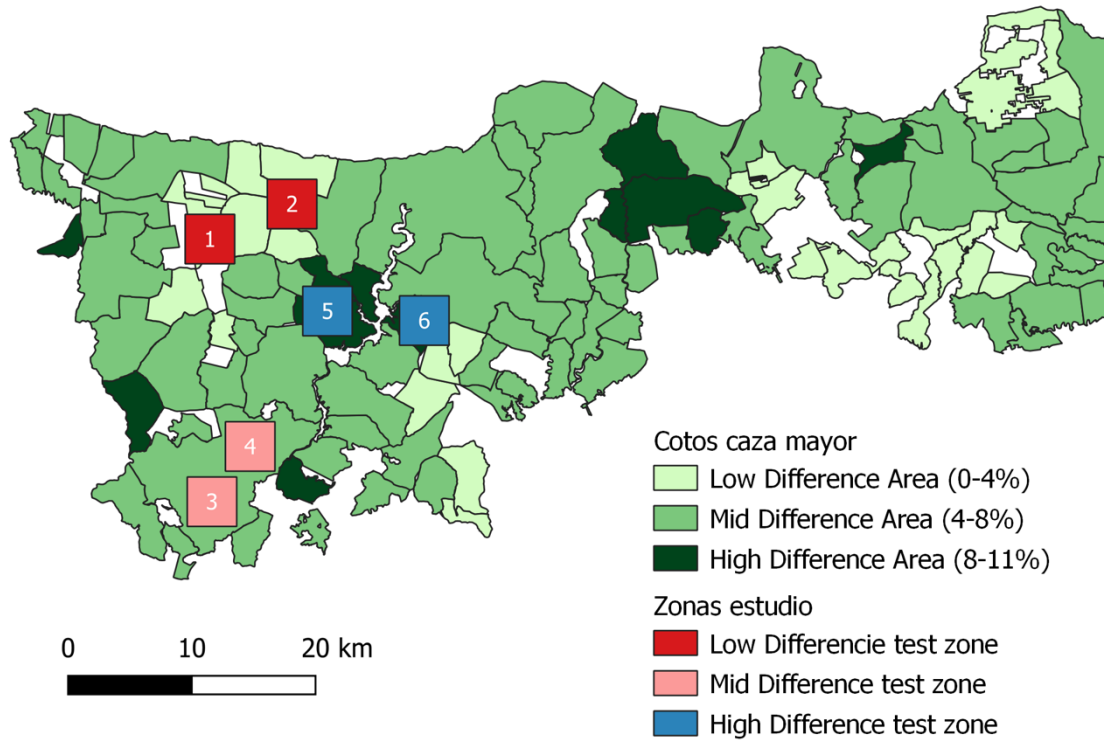


Fig. 9. Zonificación según orografía de la zona.

En cuanto a la evaluación de las diferencias en la estimación de la longitud de las trayectorias de animales, se estableció la hipótesis de que puede haber diferencias sustanciales en función de la distancia recorrida y el incremento de altura, y de que estas diferencias pueden afectar de forma desigual a las distintas especies de animales en función de su rango de hábitat y distancia de movimiento. Para estudiar este supuesto se simuló 15 rutas replicadas en cuatro especies animales distintas (conejo (*Oryctolagus cuniculus*), ciervo (*Cervus elaphus*), lobo (*Canis lupus*) y lince (*Lynx pardinus*)), asumiendo 24 correcciones por ruta (24h base). Para cada animal se seleccionaron diferentes valores de distancia de movimiento, distancia recorrida

(máxima, media y desviación estándar, DE), media o ángulo de giro (media y DE) (Tabla 1), siempre siguiendo una distribución gaussiana y asumiendo un modelo de camino aleatorio correlado. Para ello, se utilizó la herramienta de Hawth para ArcGIS (Beyer, 2004). Los valores se obtuvieron siguiendo las recomendaciones y conocimientos de expertos en la materia para cada especie. De forma simulada se generaron caminos que comenzaron en el centro de cada una de las parcelas cuadradas de 4 km utilizadas para analizar las diferencias de área, excepto en el caso de los caminos de *Leporidae*, donde también se utilizó el centroide de 1 km (Fig. 10). En cada ruta calculamos la longitud 2D y la longitud 3D utilizando el MDT y añadiendo información de superficie mediante la herramienta implementada en 3D ArcGIS, que considera los valores Z (altitud) en polilíneas para calcular una distancia 3D.

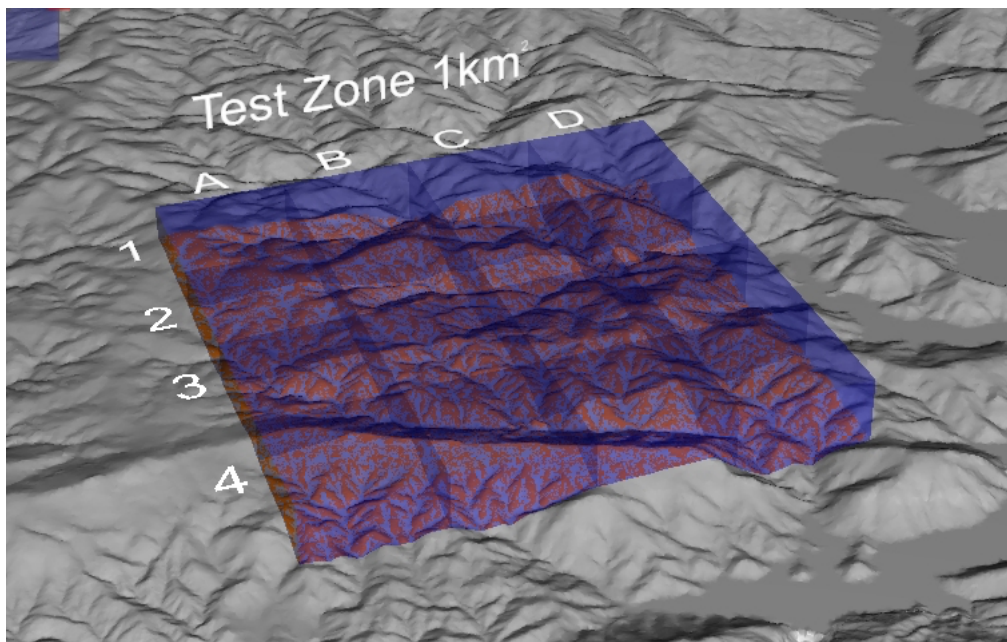


Fig. 10. Zonificación en cuadrículas de 1km.

Tabla 1. Valores utilizados para las simulaciones en cada especie focal. Se han utilizado valores que coinciden con el etograma de movimiento para 1 y 2 *Oryctolagus cuniculus*, 2 *Cervus elaphus*, 3 *Canis lupus* y 4 *Lynx pardinus*.

Especies focales	Max. Long. Paso	Media Long. Paso	Media giro ángulo $\pm$ DE
Leporidae ¹	500 m	50 $\pm$ 55	0 $\pm$ 180
Cérvidos ³	2000 m	500 $\pm$ 200	0 $\pm$ 180
Canidae ⁴	4000 m	1000 $\pm$ 500	0 $\pm$ 180
Felidae ⁵	1000 m	350 $\pm$ 180	0 $\pm$ 180

A continuación, se realiza el análisis estadístico de los datos obtenidos utilizando el software R v.3.6.1 (R Core Team, 2019). En particular, se lleva a cabo un análisis descriptivo de las variables consideradas para los 145 cotos (superficie proyectada, superficie geométrica, aumento porcentual de la superficie, altitud y pendiente), así como un análisis de correlación a través del coeficiente de Spearman para detectar posibles relaciones en ellas. Además, el análisis estadístico de la variable incremento porcentual de superficie SI en ecuación (1) se complementa con la estimación del intervalo de confianza para el valor promedio. Las estimaciones del tamaño de las áreas, así como de las longitudes de los caminos de los animales basadas en aproximaciones 2D, producían mediciones subestimadas, especialmente en áreas con paisajes más escarpados con rangos de altitud y pendientes más altos. Se estimó el 5% como umbral en valores de diferencia en áreas 3D frente a 2D para deber ser tenidas en cuenta en cálculos incluidos en factores ecológicos. También se demostró que a nivel del paisaje la medida del área de estudio aumentaba una media de un 5,61% cuando se consideraba su tridimensionalidad espacial, encontrándose valores de entre un 1,5% y alrededor del 11% de diferencia en función del tamaño de la zona muestreada, estando estos valores estrechamente relacionados con la variación de altitud y de pendiente.

Para evaluar el efecto de la escala en la medida del área de una parcela tanto en 2D como en 3D, se diseñó un experimento de medidas repetidas para comparar las tres escalas (1 x 1 km, 2 x 2 km, 4 x 4 km), llevándose a cabo el análisis de los datos a través de la función ezanova del paquete ez del software R. Asimismo, para evaluar

estas diferencias de superficie en función de las características de las parcelas se aplica un modelo lineal general (GLM).

El análisis de las variaciones en la medida de la distancia recorrida por diferentes especies (*Oryctolagus cuniculus*, *Cervus elaphus*, *Canis lupus* y *Lynx pardinus*), con los métodos 2D y 3D, se realiza ajustando GLMs para cada especie y considerando las parcelas como factor categórico y la diferencia de altitud como covariable. Las parcelas se compararon por pares utilizando el método LSD (Least Significant Difference), con p-valores ajustados mediante el método de Holm, para explorar las diferencias significativas detectadas en los GLMs ajustados.

El estudio realizado también muestra que, al igual que en el análisis de superficies descrito anteriormente, el aumento en las mediciones de longitud de trayectorias utilizando 3D es mayor en rangos de altitud mayores. Este aumento se da para todas las especies. La diferencia de altitud, y por lo tanto la pendiente, también se muestran como factores determinantes en el aumento porcentual de la diferencia en distancias. Esto se relaciona directamente con las características ecológicas de la especie de estudio. En principio, cabe pensar que especies con un rango de hábitat mayor recorren más distancia y por lo tanto se deben ver más afectadas por la consideración tridimensional del espacio que habitan. No obstante, se observa que el rango de altitud tiene un efecto positivo en el aumento de las distancias medidas para todas las especies. Los análisis demuestran que, en las áreas pequeñas, con una acusada heterogeneidad de la superficie topográfica, los conejos, con un rango de hábitat menor, destacan por encima del resto de especies en sus índices de diferencia, mientras que el lobo, que recorre distancias mayores y tiene rango de hábitat mayor, presenta diferencias menores porque se diluye el efecto de los cambios de altitud. Estos aspectos se antojan fundamentales en distintas condiciones ecológicas, pero son vitales en cuestiones como las presiones selectivas, donde se sabe que aquellos animales que se mueven eficientemente por el hábitat tendrán condiciones óptimas (Tucker, 1970; Dickinson et al., 2000; Nathan et al., 2008).

3.2. Factores topográficos que influyen en el movimiento animal

Para poder determinar con garantías la influencia de los factores topográficos a una escala cercana y precisa sobre el terreno se hace necesario una metodología de registro de paso de animales precisa y de escala muy cercana. Para ello, se desarrolla una

metodología de detección y registro de trayectorias de animales basada en imágenes aéreas y satelitales de gran resolución. Se registran las huellas dejadas por los cérvidos sobre el terreno en una zona de unas 270 hectáreas dentro del monte *Lugar Nuevo*, en el Parque Natural de la Sierra de Andújar (Jaén). Se diseña un procedimiento de registro de las trayectorias sobre las ortofotos del PNOA (Plan Nacional de Ortofotos de máxima Actualidad), y posteriormente, se contrastan los resultados en campo para corroborar que los elementos digitalizados se corresponden con huellas de paso de animales y no con otro tipo de accidente topográfico.

La digitalización de trayectorias se realiza sobre las ortofotos PNOA con una resolución de entre 0,25m y 0,50m pixel. La dificultad que presentaba esta tarea radicaba en asegurarse de barrer todo el espacio geográfico deseado a las escalas de trabajo, entre 1/600 y 1/300, a las que las trazas eran identificables, para ello hubo que dividir el espacio en sectores y diseñar una forma de seguimiento (Norte-Sur o Este-Oeste) para no dejarnos zonas sin reconocer en las imágenes (Fig. 19). Para toda esta fase se usó el entorno SIG proporcionado por QGIS, y en el proceso de digitalización hubo que tener en cuenta:

- **Huellas inducidas por la lluvia:** Los senderos formados en las laderas por la lluvia se parecen a las huellas de animales. Sin embargo, los rastros de lluvia siguen sistemáticamente la pendiente más pronunciada, por lo que no se tienen en cuenta.
- **Indicadores de uso:** Los senderos con mayor distancia y más huellas indican un mayor tráfico de animales.
- **Identificación del movimiento de los rebaños:** Entre los rastros paralelos, se presume que el más prominente es el movimiento de un rebaño completo.
- **Selección del terreno:** Se excluyen del análisis los senderos situados en zonas llanas o con pendientes mínimas. Estas regiones se utilizan principalmente para el pastoreo y carecen de movimientos significativos entre puntos de interés.
- **Influencia medioambiental:** Las zonas húmedas cercanas a arroyos o ríos facilitan una identificación más clara de las huellas. Por el contrario, las huellas son menos nítidas en regiones con vegetación o hierba, aunque sigue habiendo paso de animales.

- **Limitaciones en terreno rocoso:** Los rastros completos de animales son indetectables en terrenos rocosos debido a la ausencia de huellas en las rocas.
- **Interrupciones por obstáculos:** Los obstáculos naturales como las masas de agua continuas o intermitentes, la entrada o salida de zonas boscosas, el terreno rocoso y las carreteras interrumpen las trayectorias de desplazamiento de los animales.

La metodología desarrollada se empleó para digitalizar más de 400 trayectorias de cérvidos con una longitud acumulada superior a 50 km (Fig. 11). Se utilizó un modelo digital del terreno basado en datos LiDAR con una densidad de puntos de 0,50 puntos/m². En cada una de las rutas se recopilaban valores como: distancias acumuladas verticales tanto ascendidas como descendidas, cotas máximas y mínimas alcanzadas en el recorrido, o distancias totales recorridas tanto en el plano proyectado (2D) como en su desarrollo espacial (3D). A partir de estos datos, se generó un modelo que, utilizando las variables topográficas de las trayectorias obtenidas a partir de la digitalización del terreno, permitía generar trayectorias digitales teóricas de animales análogas entre dos puntos del terreno objeto de estudio. Por último, se realizó un análisis de regresión lineal a partir de los resultados obtenidos para conseguir modelar la relación entre los principales parámetros topográficos de las trayectorias digitales de los animales. Con ello, se consiguió estimar, a partir de dos puntos cualesquiera del terreno objeto de estudio, trayectorias digitales de animales similares a las trayectorias reales recopiladas.

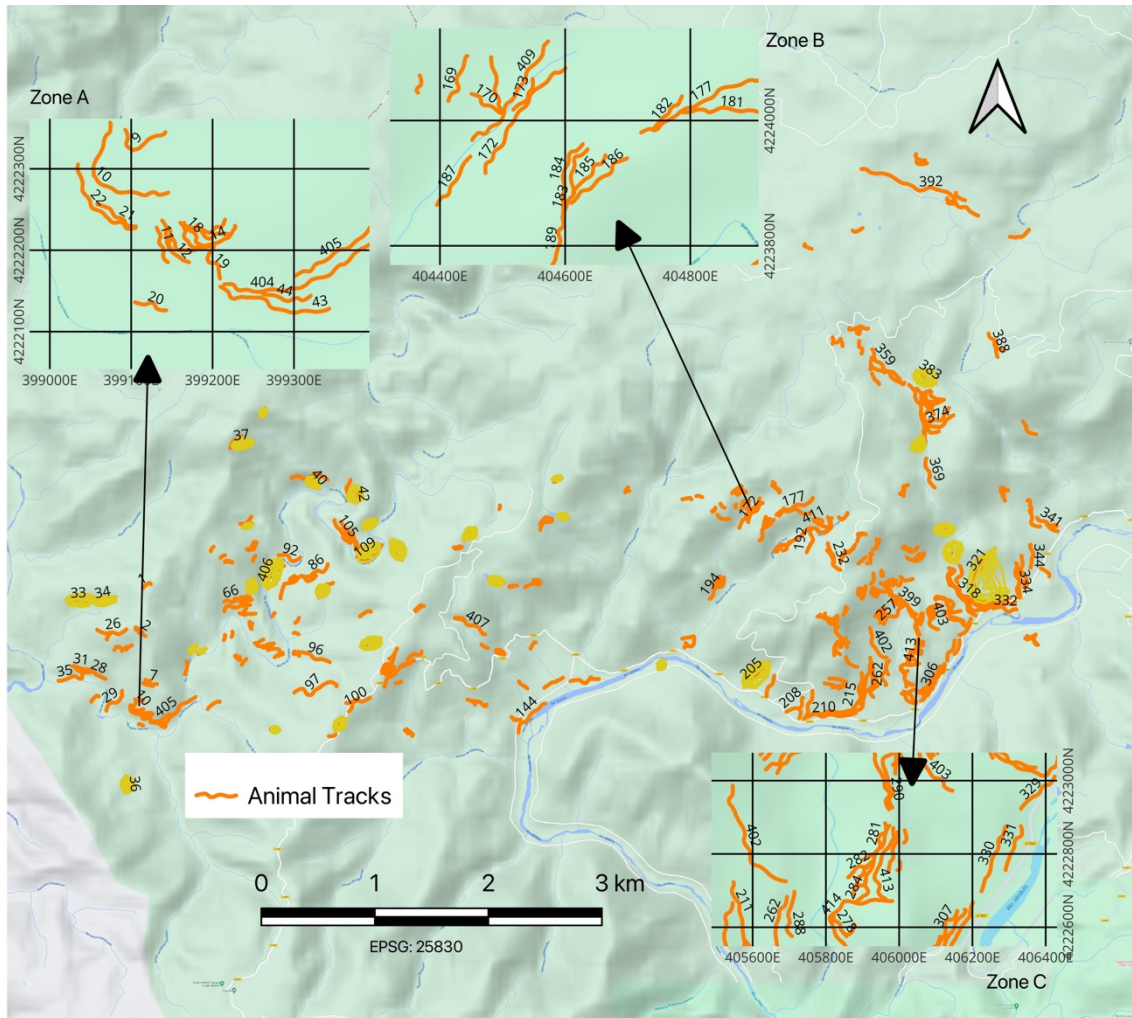


Fig. 11. Trayectorias digitalizadas de animales.

Esta nueva metodología de registro de trayectorias resultó eficaz, especialmente a una escala cercana. No entraba en conflicto con otras metodologías, las complementaba. Se apreció claramente que, en ausencia de otros factores, son los factores topográficos los que determinan la trayectoria más eficaz en el desplazamiento de los cérvidos en estas zonas, estando esta eficacia relacionada con cuestiones de menor esfuerzo, ya que en la naturaleza es vital esta consideración. La distancia vertical ascendida o descendida y la longitud tridimensional fueron los factores más influyentes. Los resultados demostraron la utilidad de la metodología presentada que, al proporcionar y relatar información topográfica valiosa sobre las áreas de movimiento y tránsito, pueden orientar las prácticas de manejo sostenible de las poblaciones de cérvidos y sus hábitats.

Al objeto de evaluar cómo los factores topográficos influyen en las decisiones de los animales a la hora de desplazarse se ajustó un modelo de regresión lineal a partir de los

parámetros topográficos longitud 3D y la suma de la distancia vertical ascendida o descendida (ascenso+descenso) y se usó para analizar la relación entre ellos.

3.3. Precisión en la geolocalización. Análisis tecnológico.

La metodología de reconocimiento de trayectorias desarrollada en el anterior estudio no está exenta de algunas carencias, de forma que en zonas boscosas o en zonas rocosas no se refleja el paso de animales, provocando la discontinuidad en los trazados. Tampoco se determina el sentido del movimiento del animal en cada caso (trayecto de ida o de vuelta), ni la temporalidad. Estas carencias pueden verse resueltas o completadas conjugando otros métodos de monitoreo como el marcado de animales con collares GNSS. Para que esto sea efectivo, es importante determinar el tipo de dispositivo fiable a utilizar ya que cabe la posibilidad de usar dispositivos GNSS multiconstelación o multifrecuencia o de frecuencia única. Necesitamos que estos dispositivos mantengan una continua recepción de datos en entornos adversos, ya sea por la vegetación o por la escarpada topografía, así como una configuración de satélites que permitan una precisión adecuada.

Para ello se llevó a cabo un estudio que tuvo como objetivo probar experimentalmente la influencia de los módulos multiconstelación-multifrecuencia en el rendimiento de los collares GNSS, utilizados para monitorear la vida silvestre. Se aplicaron pruebas estáticas y cinemáticas diseñadas para evaluar y comparar el rendimiento de los collares GNSS equipados con un chipset de frecuencia única frente a un chipset de frecuencia múltiple. Se evaluó la disponibilidad y continuidad de las soluciones, el número de satélites utilizados, la dilución de la precisión, la exactitud, y la repetitividad de estos parámetros de calidad para dispositivos GNSS. El estudio fue realizado en el sureste de España, concretamente en la Sierra Sur de la provincia de Jaén. Las pruebas estáticas se realizaron en el campus de la Universidad de Jaén. Para las pruebas cinemáticas se seleccionaron tres rutas en zonas montañosas en un entorno rural (Fig. 6).

En este estudio se utilizaron dos receptores terrestres y dos collares GNSS. Las pruebas estáticas se realizaron en la azotea del edificio A3 de la Universidad de Jaén en un entorno totalmente controlado y de horizonte celeste despejado. Se colocaron los receptores en pilares de estructura de alta precisión, horizonte despejado y sin obstáculos para evitar interferencias. Se usó un receptor Leica Geosystems GR10 y una

antena geodésica LEIAR10 de gran precisión para estimar las posiciones de referencia en modo estático.

Las pruebas cinemáticas se realizaron cerca de la localidad de Valdepeñas de Jaén, se realizaron una ruta a pie, en un entorno montañoso y de bosques para simular la trayectoria de un mamífero salvaje, y dos rutas en coche con distintas características, distintas velocidades y todas las rutas se hicieron con los dispositivos GNSS con el objetivo de analizar su rendimiento en movimiento. Las distancias recorridas varían desde los 6km para la ruta a pie, hasta los 50 km por pistas forestales para las de coche, con velocidades, para estas últimas, de entre 20 y 30 km/h.

En este caso, las líneas de referencia se obtuvieron con el receptor GNSS multifrecuencia (LCR) de bajo costo. Frente a las posiciones obtenidas en ambos casos con los equipos terrestres se compararon los datos obtenidos por los collares GNSS multifrecuencia (MFC). Los estudios comparativos se realizaron a dos niveles: a nivel paramétrico, se registraron distintos parámetros sobre la medida de la señal, y también nivel posicional real sobre el terreno, así como de comportamiento general a lo largo del tiempo.

El rendimiento de un dispositivo GNSS se evalúa a través de parámetros estadísticos como la disponibilidad y continuidad de soluciones, el número de satélites utilizados, la dilución de la precisión (DOP), precisión, exactitud y repetibilidad. Se realizan pruebas estáticas o en movimiento registrando datos como el tiempo universal coordinado (UTC), posición y número de satélites seguidos. La disponibilidad se relaciona con la capacidad de obtener correcciones exitosas del GNSS, mientras que la continuidad se refiere a mantener su funcionamiento sin interrupciones durante la vida útil de la batería, evaluada por la tasa de éxito de correcciones. El número de satélites utilizados indica la cantidad considerada para el posicionamiento.

En modo estático ambos dispositivos (LCR y MFC) corrigieron al 100% de forma exitosa, con errores medios de localización por debajo del metro en el LCR y sobre el metro y medio para MFC. Se observó una mayor dispersión del error circular entre ambos, aunque los errores de localización entre los collares no difirieron significativamente.

En el estudio cinemático se compararon las posiciones obtenidas por los collares GNSS tanto multifrecuencia como monofrecuencia con las líneas de referencia previamente definidas por el receptor terrestre GNSS. Se aprecia claramente que las posiciones registradas por el collar multifrecuencia son más precisas que las obtenidas con el monofrecuencia en los distintos experimentos. En definitiva, según las pruebas estáticas el collar MFC se caracteriza por un rendimiento más estable y mejor que el collar SFC, así como la desviación circular estandar y el círculo de error probable. Podemos decir lo mismo de los resultados arrojados en las pruebas cinemáticas, y añadir que en estas condiciones en el caso del collar SFC (monofrecuencia) el número de satélites se reduce drásticamente en entornos de cielo obstruido y vegetación densa, afectando directamente a su rendimiento, que se ve claramente mejorado por el dispositivo MFC.

3.4. Caminos de menor coste energético

Toda vez que se definan con precisión los distintos recorridos que los animales realizan, ya sea con técnicas gráficas o mediante mediciones GNSS de collares (según lo expuesto en los apartados anteriores) se pretende determinar, si en ausencia de otros factores distintos a los topográficos, influye el consumo energético en la elección de las rutas de desplazamiento animal, o mejor dicho si de alguna manera los animales se mueven por trayectorias de mínimo coste energético.

Hay estudios que ponen de manifiesto la relación entre movimiento, consumo energético y factores topográficos (KorZeniowska et al., 2018; Anjitha Krishna et al., 2019; Wangdi et al., 2019; Valderrama-Zafra et al., 2024). En los trabajos de Lachica (1997) se llega a una expresión en la que el consumo energético se obtiene a partir de la distancia horizontal recorrida por el animal (longitud 2D) y la distancia vertical acumulada ascendida y descendida en un entorno controlado de laboratorio.

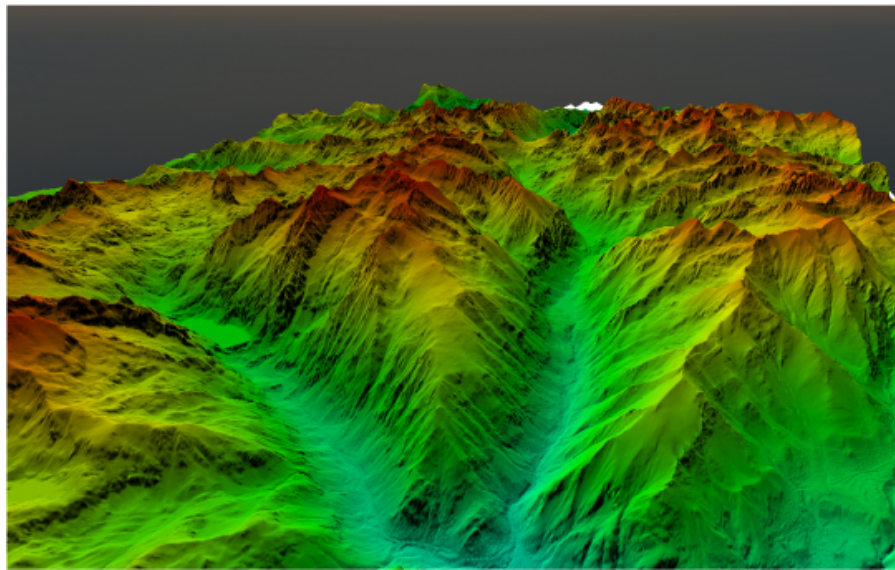
Con base en los trabajos de Lachica (1997) y Lachica y Aguilera (2000), y viendo los factores topográficos que intervienen en ella, nos plantemos crear una base de datos geográfica de recorridos de animales, para cuantificar esos factores. Para ello, se llevaron a cabo observaciones en 31 trayectos dentro del área de estudio en la finca Lugar Nuevo, en el Parque Natural de Andújar (Jaén). Las trayectorias fueron digitalizadas en diferentes zonas topográficas para evitar interferencias naturales o artificiales que pudieran alterar el comportamiento del animal. Se utilizaron ortofotos de

alta resolución para detectar las huellas animales, principalmente del servicio PNOA, y se empleó el software SIG (QGIS) para la digitalización de las trayectorias. Se generaron también trayectorias simuladas de forma aleatoria entre los puntos inicial y final de las trayectorias reales observadas. Además, se calcularon trayectorias de menor costo de movimiento utilizando el algoritmo de Least Cost Path (LCP) sobre un Modelo Digital del Terreno (MDT) de alta precisión generado a partir de datos LiDAR. Este estudio proporciona información sobre el gasto energético asociado al desplazamiento animal en diferentes tipos de terreno.

Después de generar las distintas trayectorias (naturales, simuladas y de menor cota), se procedió a inferirles los atributos topográficos necesarios para los análisis posteriores. Esto incluyó calcular el desnivel total ascendido y descendido para cada trayectoria, utilizando el algoritmo "Ascender a lo largo de una línea" de QGIS. Antes de esto, se asignaron datos altimétricos a todos los vértices de las trayectorias utilizando el algoritmo "Drape" de QGIS, y se densificaron para una definición altimétrica precisa. Para calcular la distancia total recorrida, se generaron dos nuevos atributos en cada trayectoria ("Long2D" y "Long3D") utilizando la calculadora de campos de QGIS. Además, se determinaron la elevación máxima y mínima alcanzada para cada trayectoria.

El estudio realizado analiza el costo energético real del desplazamiento animal en terrenos utilizando una expresión previamente definida y trayectorias de animales obtenidas mediante una metodología descrita en un estudio reciente.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS.



4.1. Evaluación de las métricas de hábitat 3D frente a 2D en un ecosistema mediterráneo para una gestión más inteligente de la fauna salvaje.

Artículo:

Valderrama-Zafra, J. M., Fernández-Rodríguez, P., Oya, A., Carrasco, R., Rubio-Paramio, M. A., Garrido-Carretero, M. S., y Azorit, C., 2022. Assessing 3D vs. 2D habitat metrics in a Mediterranean ecosystem for a wiser wildlife management. *Ecological Informatics*, 69, 101623. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101623>

Cuartil: (2022) Q1 JCR (ECOLOGY). Índice de calidad 5.1

4.1.1. Introducción

En el ámbito de la ecología animal, es frecuente utilizar una representación simplificada del terreno en dos dimensiones. No obstante, son escasos los estudios que reconocen que el área real posee una dimensión espacial tridimensional, influenciada por pequeñas variaciones en la rugosidad, la pendiente o la altitud del terreno (Rogers et al., 2012; Monterroso et al., 2013; Tracey et al., 2014; Torres-Pulliza et al., 2020; Heit et al., 2021). El área de hábitat suele calcularse a partir de una medición 2D con el supuesto de una topografía plana homogénea. Sin embargo, los estudios ecológicos que ignoran los valores 3D corren el riesgo de ser malinterpretados debido a que el enfoque 2D subestima la distancia y el área del hábitat en comparación con una medición 3D (Dorner et al., 2002; Monterroso et al., 2013). Por lo tanto, se ha sugerido que las estimaciones de área en 3D dan una mejor medida de la variación topográfica y del patrón espacial del hábitat, especialmente en zonas con relieve escarpado (Blaschke et al., 2004; Hoechstetter et al., 2008; Wang et al., 2017).

Esta complejidad del paisaje se incorpora en forma de cambios de altitud o pendiente mediante el uso de modelos digitales del terreno en una gran variedad de disciplinas. Algunos autores sólo la abordan desde el punto de vista del aumento del coste energético del movimiento animal en función de la pendiente (Lachica et al., 1997; Minetti et al., 2002; Lempidakis et al., 2018). Otros se centran en la distribución de la vegetación en función de la pendiente y el relieve (Dorner et al., 2002; Blaschke et al., 2004; Lassueur et al., 2006; Wu et al., 2020), la distribución espacial de las propiedades del suelo en el paisaje agrícola (Florinsky et al., 2002), la predicción de los comportamientos erosivos de los suelos y la migración de agua y otras sustancias a lo largo de la superficie terrestre (Florinsky, 1998; Martínez-Aguirre et al., 2016; Korzeniowska et al., 2018; Anjitha Krishna et al., 2019) o las restricciones topográficas en las prácticas de uso del suelo en función del relieve (Putz et al., 2018). Wu et al. (2012) lo desarrollan en su estudio de una cuenca hidrográfica, y Wang et al. (2017) en su estudio de glaciares.

A pesar de los estudios que destacan la importancia de la estructura tridimensional del terreno, la mayoría de los estudios siguen utilizando un enfoque bidimensional en el cálculo de áreas y longitudes. Desde la ecología de poblaciones y la teoría de

metapoblaciones (Hanski et al., 1994) hasta la ecología de movimientos y los análisis de distribución espacial de animales, los ecólogos suelen basar sus resultados en una medición plana del área del hábitat. El área de campeo de los animales que está relacionada con diferentes variables del hábitat como la vegetación (Fernández et al., 2016; Ward et al., 2018), la orientación (Singleton et al., 2010), la altitud (Escobar-Flores et al., 2015) y la pendiente (Lovari et al., 2017; Wangdi et al., 2019), suele ser una medida planar del área del hábitat. En este sentido, Heit et al. (2021) revisaron la literatura sobre estimación del área de distribución de animales terrestres publicada entre 2000 y 2019. Solo el 0,7% ($n = 8$) de los 1.203 estudios incorporaron la complejidad del paisaje en la estimación del área de distribución, aunque más del 22,0% ($n = 271$) reconocieron la importancia de la complejidad del paisaje para el movimiento de los animales.

En un contexto de gestión de ecosistemas, muchas decisiones también deben basarse en una medición de la superficie. Por ejemplo, la capacidad de carga, un concepto de gestión útil utilizado para calcular el tamaño máximo de la población animal que puede soportar un entorno específico (Abbas et al., 2012; FAO, 1991; Möst et al., 2015), también es un concepto estrechamente relacionado con el tamaño del área analizada (Cheng et al., 2017; Meshesha et al., 2019). En el mismo contexto, los cupos de caza dependen de las densidades de caza y, por tanto, existe un factor de tamaño de área en su cómputo (Acevedo et al., 2014; López-Montoya et al., 2017). Además de a las áreas, este eje de altitud 3D también puede afectar a otros campos científicos en los que el cálculo de la longitud importa (Hanski et al., 1994; Lachica et al., 1997; Minetti et al., 2002; Fernández et al., 2016; Adachi et al., 2017; Lempidakis et al., 2018;). En el análisis del movimiento animal, la distancia y la velocidad se basan normalmente en modelos horizontales en los que el cálculo de las distancias reales recorridas rara vez tiene en cuenta los cambios de altura y pendiente del terreno. Sin embargo, el gasto o coste energético que supone el movimiento está estrechamente relacionado con la distancia recorrida pero también con un conjunto de factores relacionados con la configuración 3D del paisaje (Fedak y Seeherman, 1979; Lempidakis et al., 2018), como puede ser un movimiento contra la pendiente (Shepard et al., 2013). Este efecto de la morfología del terreno sobre las distancias estimadas recorridas por los individuos también puede variar en función de las características ecológicas de la especie objeto de estudio (Dickinson et al., 2000; Andersen et al., 2015; Razen et al., 2016). En concreto,

esto puede ser interesante según las distancias recorridas en movimiento y el carácter sedentario o dispersivo de la especie. Aunque en general todas las especies suelen tener un área de distribución definida donde desarrollan su actividad vital, algunas especies, por ejemplo, los conejos, son locales y la mayoría de sus trayectorias de movimiento son cortas, limitándose a unas pocas hectáreas dentro de una misma zona (Bond et al., 2001; Börger et al., 2008; Devillard et al., 2008). Otras son especies más dispersivas en las que las distancias recorridas son de varios kilómetros y con áreas de hogar a otra escala espacial, por ejemplo, los lobos (Andersen et al., 2015; Razen et al., 2016) y algunos ungulados (Teitelbaum y Mueller, 2019). Por el contrario, algunos carnívoros como el lince ibérico (*Lynx pardinus*) pueden incluso variar su comportamiento de residente a dispersivo (Gastón et al., 2016). Por tanto, existe una implicación potencial del tamaño del área de campeo en las métricas de longitud (Monterroso et al., 2013).

En la actualidad, el desarrollo de herramientas de gestión de información vectorial tridimensional, junto con la proliferación de datos cartográficos precisos, permiten generar modelos digitales del terreno muy precisos en formatos que permiten obtener resultados y parámetros que antes eran difíciles de alcanzar. Varios estudios han introducido técnicas novedosas para incorporar la componente espacial 3D evaluando aspectos como los cambios de rugosidad, pendiente o altitud del terreno. Por ejemplo, Torres-Pulliza et al. (2020) estudiaron cómo los hábitats estructuralmente complejos, como los arrecifes de coral, tienden a contener más especies y mayores abundancias totales, y la superficie y la densidad de huecos aumentan con la complejidad tridimensional. Hoechstetter et al. (2008), siguiendo el método de triangulación desarrollado por Jenness (2004), incluyeron las propiedades del relieve en análisis de paisajes a gran escala utilizando una metodología extremadamente compleja. Monterroso et al. (2013) y Tracey et al. (2014) utilizaron enfoques similares para estimar el área de distribución en 3D. Además, se han propuesto diferentes enfoques para modelos triangulares a partir de modelos de elevación raster y se han probado en estudios comparativos con diferentes métricas de paisaje (Stupariu et al., 2010).

El uso de datos procedentes de la tecnología LiDAR (light detection and ranging) ha ganado mucha popularidad en diversas aplicaciones como la navegación, la robótica, la teledetección y los sistemas de conducción asistida (Raj et al., 2020). También tienen cada vez más relevancia en la modelización de modelos digitales de elevación (MDE)

aplicados a la medición de la superficie del terreno en aplicaciones ecológicas (Jenness, 2004; Korpela et al., 2009; Rogers et al., 2012) y predicciones de eventos naturales asociados al cambio climático (Muhadi et al., 2020), así como contribuyen al conocimiento de la evolución de ciertos eventos que ocurren en la superficie terrestre (Gökgöz y Baker, 2015; Xia et al., 2020). En un contexto en el que el seguimiento de los ecosistemas es un requisito clave de las directivas europeas sobre la naturaleza, es necesario desarrollar, aplicar y evaluar métodos avanzados de análisis de datos para seguir mejorando la evaluación, la gestión y el seguimiento de los hábitats y la vida silvestre (Rogers et al., 2012).

Por ello, mediante un estudio empírico en hábitats prioritarios europeos del sur de España evaluamos hasta qué punto varían los patrones métricos del hábitat tanto a escala de conjunto como de parche, medidos con métodos 3D frente a 2D, y si es posible que las variaciones estén asociadas a la escala, la complejidad topográfica o el comportamiento animal específico. Analizamos las áreas y los tipos de animales en los que el uso de enfoques 3D es más influyente para obtener resultados fiables en estudios ecológicos, así como sus implicaciones prácticas. En un primer paso, evaluamos si existe un efecto de la escala en los resultados esperados, asumiendo que las diferencias en los cálculos deberían aumentar a medida que incrementamos el área medida. En un segundo momento, intentamos determinar si las diferencias en los resultados utilizando métricas 3D frente a 2D varían en función de factores topográficos como la altitud y la pendiente. En este caso esperamos que aquellas zonas con mayores diferencias en las alturas del terreno sean aquellas donde el efecto de las diferencias entre ambas métricas de área sea mayor, mientras que en las longitudes lineales esperamos un efecto diferente según la distancia alcanzada y el relieve de la forma del terreno. Para este análisis comparativo, 2D versus 3D, el presente estudio utiliza los últimos avances técnicos como el uso de un entorno vectorial (CAD) de mayor precisión en la fase de obtención de las métricas sobre el terreno. Por último, evaluamos cómo afecta la inclusión de un componente 3D a las mediciones de área y lineales en un contexto ecológico como es el movimiento animal. Esperamos que aquellos animales con un mayor rango de movimientos se vean más afectados por el tipo de medición considerada, probablemente debido a pendientes más pronunciadas y mayores desniveles de las áreas cubiertas. Discutimos si las variaciones de las métricas de hábitat en 3D frente a 2D son lo

suficientemente grandes como para tener implicaciones significativas para la gestión y conservación de la fauna en los ecosistemas mediterráneos.

4.1.2. Área de estudio

En Europa, el seguimiento de hábitats es esencial según las directivas de conservación de la naturaleza, especialmente en Zonas Especiales de Conservación (ZEC) dentro de la red Natura 2000. Sierra Morena, en el sur de España, es una de estas zonas, reconocida tanto por su importancia ecológica como por ser un área de caza. Nuestro estudio se enfocó en la Sierra Morena oriental, abarcando unos 2.241 km² en Jaén (Fig. 12). Con 145 cotos de caza cerrados, la zona muestra variabilidad en tamaño de fincas, con predominio de áreas menores a 1000 ha (Azorit et al., 2012a). La demarcación artificial resulta en diversidad de vegetación y relieve, con altitudes entre 200 y 1.500 m. La caza de ungulados es la actividad económica principal, con tasas de captura superiores a otras regiones europeas y un aumento anual en capturas, especialmente durante años secos ajustando las densidades de población (Azorit, 2005, 2006). Ciervos y jabalíes son las presas más importantes, seguidos por gamos y muflones. También se encuentra una población aislada de corzos amenazados en la zona. El ciervo (*Cervus elaphus*) es la caza más abundante e importante junto con el jabalí (*Sus scrofa*) (Azorit y Moro, 2010). La densidad de población del gamo (*Dama dama*) ha aumentado considerablemente desde la década de 1950, cuando se introdujo en algunas reservas de caza (Azorit et al., 2012b), así como la del muflón (*Ovis aries musimon*) (Azorit et al., 2020). Por el contrario, una población aislada y amenazada de corzo también está presente en esta zona (Azorit y Muñoz-Cobo, 1997).

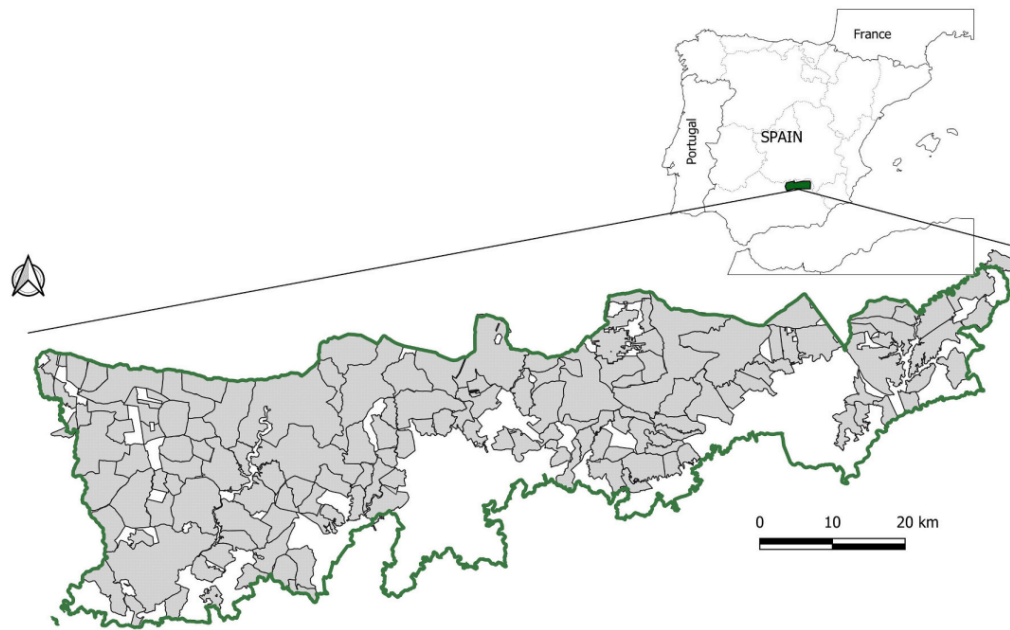


Fig. 12. Área de estudio y fincas de caza en Sierra Morena, Jaén (España).

4.1.3. Materiales y métodos

4.1.3.1. Descripción de métodos y variables para los enfoques 3D frente a 2D.

En primer lugar, obtuvimos una estructura topográfica 2D del hábitat de la zona de estudio a partir de diferentes variables medidas a partir de una base de datos SIG. Las características topográficas (altitud, valores máximos, mínimos y medios) de la zona se obtuvieron a partir de un modelo digital del terreno (MDT) de alta precisión generado a partir de datos LiDAR del MDT05 (paso de malla 5m) (0,25 a 0,50 m/píxel) con una densidad de 0,5 puntos/m² y una precisión altimétrica (RMSE Z: RootMean Square Error in Z component) mejor que 40 cm, disponible en el Instituto Geográfico Nacional (IGN). Posteriormente, la pendiente (en grados) se obtuvo a partir del MDT. Todas las estimaciones se realizaron utilizando QGIS (QGIS V. 3.14.16-Pi, edición 2020).

Existen diferentes técnicas para obtener métricas 3D a partir de MDE basados en datos raster (Blaschke et al., 2004; Jenness, 2004; Hoechstetter et al., 2008; Stupariu et al., 2010). En nuestro caso, considerando la componente de altitud 3D en las estimaciones, desarrollamos un modelo vectorial procesado sobre el software Bentley Descartes

Systems (Bentley Descartes CONNECT edition (Nº de versión 10.16.00.15), 2021) y sus módulos de realidad que comprenden un conjunto de herramientas específicas para trabajar con modelos digitales del terreno (STM) a gran escala. Con el software propio de Bentley se utilizaron las formas poligonales de cada una de las fincas cinegéticas de la zona de estudio para recortar sobre el STM y obtener una malla 3D de triángulos para cada una de ellas (Fig. 7). Con las herramientas de medición de áreas se obtuvieron las áreas geométricas 3D de cada finca, y fijando el plano horizontal en la medición se obtuvo el área 2D del proyecto.

4.1.3.2. Evaluación de las diferencias en las estimaciones de superficie

Se adoptó un enfoque de modelado a escala múltiple para analizar las relaciones entre las áreas 3D y 2D. La escala del paisaje se relaciona con diferentes fincas de caza mayor en Sierra Morena (Fig. 12 y Fig. 13), por lo que primero delimitamos sus límites con la versión cartográfica más actualizada de las áreas cinegéticas del sur de España, un fichero vectorial de 2014/15 disponible en la Red de Información Ambiental de Andalucía (REDIAM). Finalmente seleccionamos 145 fincas cinegéticas en la zona de Sierra Morena. Para cada finca cinegética calculamos la altitud mínima, máxima, media y pendiente utilizando el modelo MDT y software SIG. Posteriormente, utilizando el software CAD (Bentley Descartes CONNECT edition (Nº de versión 10.16.00.15), 2021) y el modelo STM para cada una de estas fincas, siguiendo una modificación de Campbell et al. (2004), calculamos las superficies 2D y 3D y un porcentaje de incremento de superficie denominado índice de incremento de superficie (índice SI) (1).

Después del nivel de paisaje se desarrollaron tres escalas anidadas con una serie de parcelas cuadradas de un incremento de escala doble, empezando con una escala local de una parcela de 1 km² y terminando en una parcela de 4 km² (Fig. 13), todas en diferentes fincas de caza que fueron previamente categorizadas según el índice de incremento de superficie descrito anteriormente (ver la sección de análisis estadístico para más detalles). Finalmente, tenemos 2 parcelas de 4 × 4 km para cada categoría de fincas de caza, que se dividen en 4 parcelas de 2 × 2 km y 16 parcelas de 1 × 1 km (Fig. 13). Para cada escala, se obtuvieron mediciones de superficie en 2D y 3D y se estimó la altitud mínima, máxima y media, así como las pendientes medias, máximas y mínimas,

utilizando la función estadística de zonas del software QGIS (QGIS V. 3.14.16-Pi, edición 2020) y el MDT y un mapa de pendientes de la zona generado a partir de él.

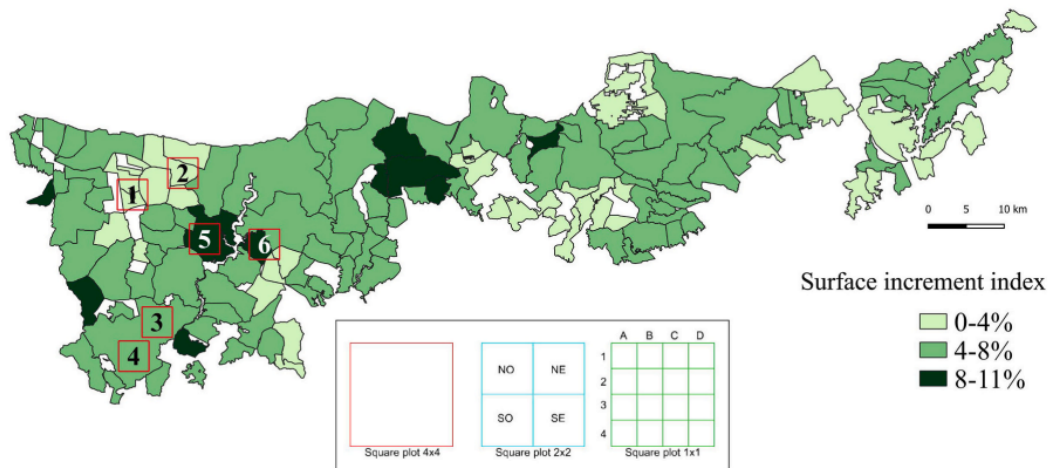


Fig. 13. Diferentes escalas utilizadas en el análisis. La escala de paisaje es toda el área de estudio con diferentes estados de caza categorizados en verde según el índice de incremento de superficie (índice SI).

También se muestran en la Fig. 13 escalas anidadas con una escala local de parcelas de 1×1 km en verde, parcelas de 2×2 km en azul y parcelas de 4×4 km en rojo.

4.1.3.3. Evaluación de las diferencias en las estimaciones de la longitud del recorrido de los animales

Además del área, la longitud también es susceptible de sufrir cambios en función de la métrica utilizada (2D o 3D). Para establecer cómo el uso de un eje 3D puede afectar al movimiento de las especies, hemos simulado los movimientos de cuatro tipos de especies que habitan en nuestra zona de estudio y que difieren en su comportamiento en cuanto a área de distribución y distancias de movimiento. Simulamos 15 trayectorias replicadas por especie, asumiendo 24 fijaciones por trayectoria (base 24 h). Para cada animal se seleccionaron diferentes valores de distancia de movimiento, distancia recorrida (máxima, media y DE) media o ángulo de giro (media y DE) (Tabla 1), siguiendo siempre una distribución gaussiana y asumiendo un modelo de camino aleatorio correlacionado. Para ello se utilizó la herramienta de Hawth para ArcGIS (Beyer, 2004). Los valores se obtuvieron siguiendo las recomendaciones y

conocimientos de expertos en la materia para cada especie. Todos los senderos simulados comenzaron en el centro de cada una de las parcelas cuadradas de 4 km utilizadas para analizar las diferencias de área, excepto en el caso de los senderos de *Leporidae*, donde también utilizamos el centroide de 1 km (Fig. 14, Fig. 15 y Fig. 16). En cada sendero calculamos la longitud 2D y la longitud 3D usando el MDT y añadiendo información de superficie usando la herramienta implementada en ArcGIS 3D que considera los valores de Z (altitud) en las polilíneas para calcular una distancia 3D.

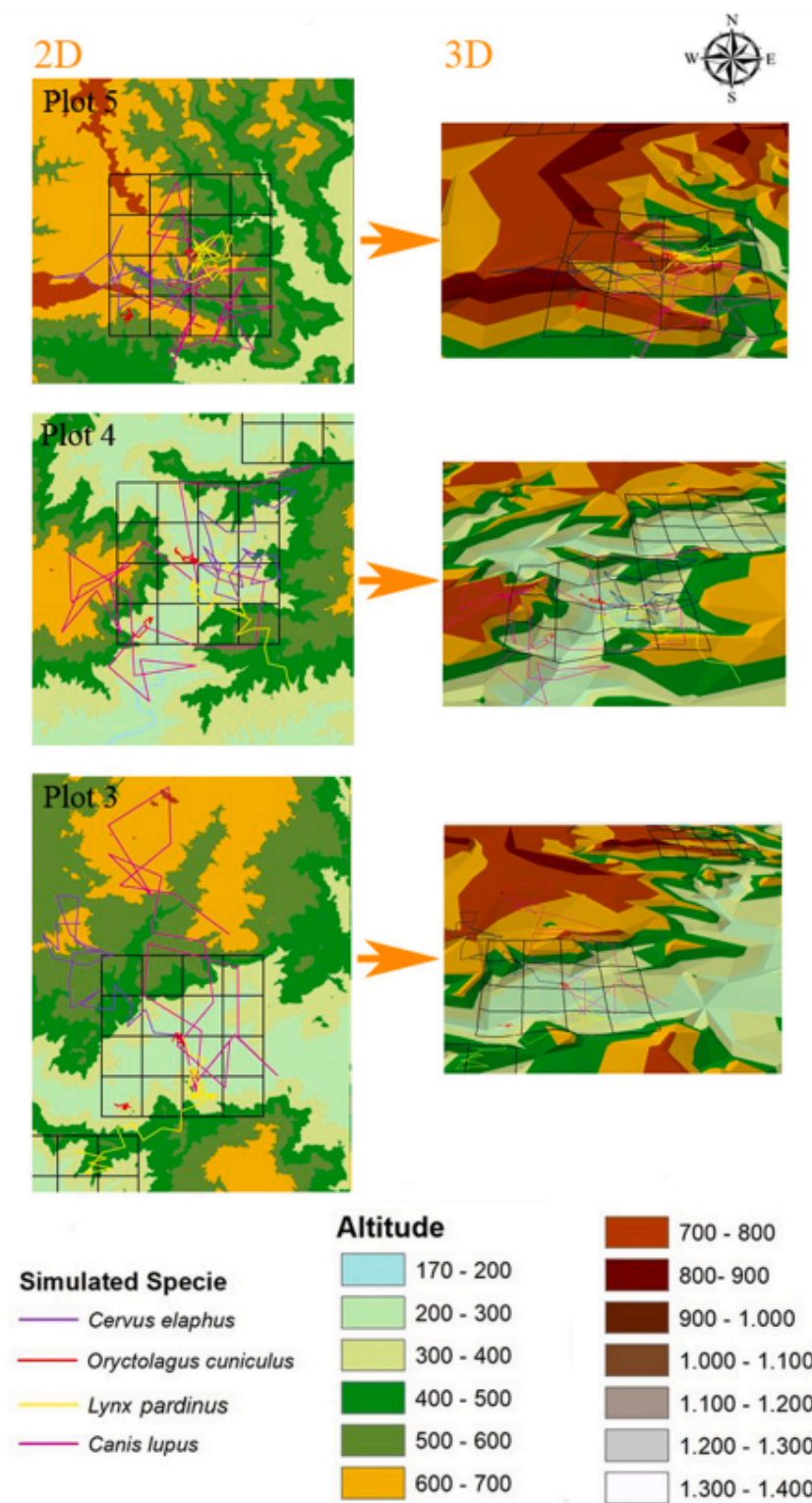


Fig. 14. Trayectorias 2D frente a trayectorias 3D en una simulación por especie.

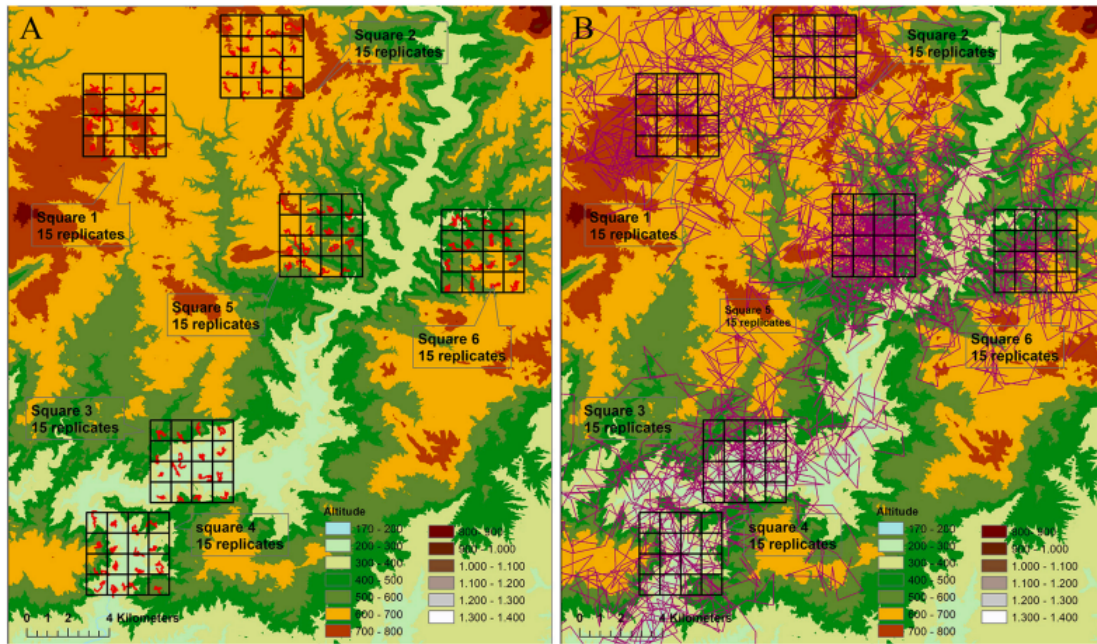


Fig. 15. Trayectorias simuladas de conejos (A) y lobos (B) en zonas anidadas.

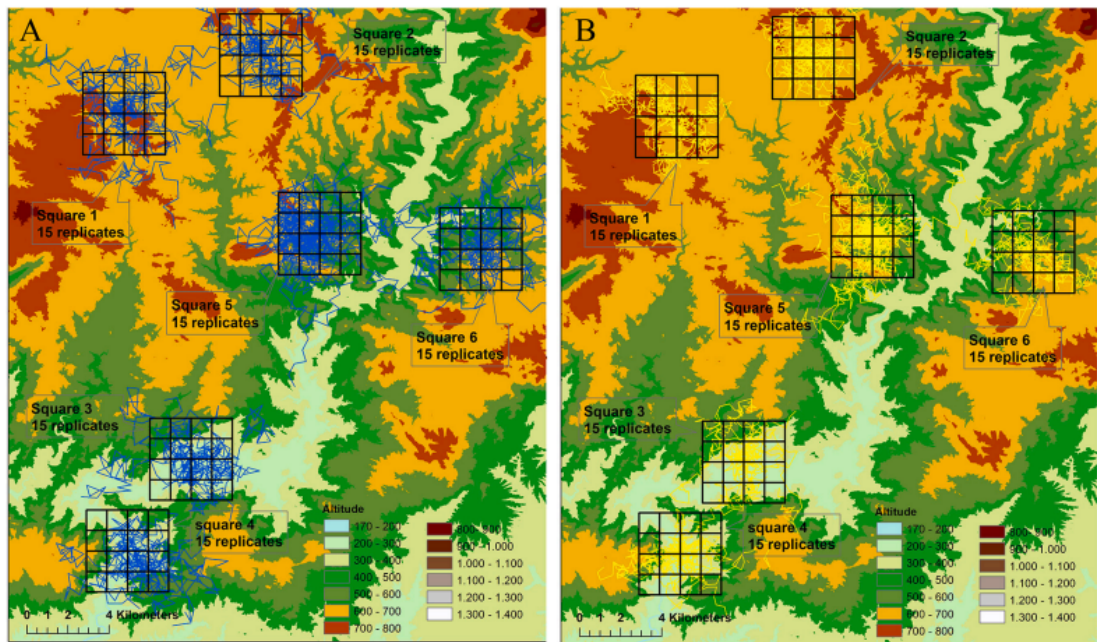


Fig. 16. Trayectorias simuladas de ciervos (A) y lince (B) en zonas anidadas.

4.1.3.4. Análisis estadístico

Todos los análisis estadísticos se realizaron utilizando el software R v.3.6.1 (R Core Team, 2019). En primer lugar, se realiza un análisis estadístico descriptivo para resumir las características básicas sobre las variables de interés (superficie proyectada,

superficie geométrica, incremento porcentual de superficie, altitud y pendiente) para los 145 cotos. Además, con el fin de detectar las posibles relaciones entre estas variables se incluye un análisis de correlación mediante el coeficiente de correlación de Spearman. El análisis estadístico de la variable incremento porcentual de superficie se complementa con la estimación del intervalo de confianza del incremento medio, previa comprobación de la normalidad de la muestra de esta variable en las fincas consideradas mediante el test de Shapiro-Wilk. Para evaluar el efecto de la escala utilizada para medir la superficie de una parcela con ambas técnicas (métodos 2D y 3D) se aplicó un diseño experimental. Para ello, atendiendo a las diferencias entre las fincas respecto al índice de incremento de superficie, se clasificó el área de estudio en tres categorías de menor a mayor rango de incremento porcentual de superficie: bajo (0-4%), medio (4-8%) y alto (8-11%) (Fig. 13). A continuación, se seleccionaron dos parcelas de cada tipo y se utilizó un diseño de medidas repetidas para comparar las tres escalas (1×1 km, 2×2 km y 4×4 km) utilizadas para medir la superficie de una parcela (Fig. 13). Dado que se aplican diferentes tratamientos o escalas a las mismas unidades experimentales, el diseño experimental más adecuado es un diseño de medidas repetidas, y el análisis estadístico de los datos se realizó con la función *ezanova* del paquete *ez* de R, que incluye correcciones de esfericidad cuando la prueba de Mauchly rechaza este supuesto (Lawson, 2015).

En una segunda aproximación, para evaluar la influencia de las características de las parcelas en el incremento porcentual de la superficie se aplicó un modelo lineal general (GLM). En la exploración preliminar de los datos nos enfrentamos a datos no normales y heterocedásticos y a variables continuas altamente correlacionadas (aumento porcentual de la superficie, altitud y pendiente), por lo que se realizó una transformación previa de los datos consistente en un logaritmo para satisfacer los supuestos subyacentes del modelo, y se eliminó la variable pendiente para evitar la colinealidad (Zuur et al., 2010). Se ajustó un GLM para explicar el aumento porcentual de la superficie (como variable de respuesta) en función de las parcelas, considerando al mismo tiempo la influencia del rango de altitud como covariable. En el modelo se introdujo la parcela como factor (variable explicativa nominal con seis niveles), el rango de altitud como variable cuantitativa y también se consideró la interacción entre ambas. En concreto, se ajustó el siguiente modelo con interacción.

$$\log Y = \alpha + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_1 \times X_2 + \varepsilon \quad (2)$$

Donde Y es el aumento porcentual de la superficie, X_1 es el rango de altitud, X_2 es un factor que toma cuatro valores (correspondientes a las cuatro parcelas), $X_1 \times X_2$ es un término de interacción y, por último, ε es un error gaussiano.

El ajuste del modelo se analizó con respecto al nivel de desviación explicado (cuanto más alto, mejor) y R-cuadrado ajustado (McCullagh y Nelder, 1989). El análisis gráfico de los residuos no reveló violaciones de los supuestos del modelo (Zuur et al., 2010). Una vez detectadas diferencias significativas entre parcelas, se llevó a cabo un análisis de comparación post-hoc basado en el método de la diferencia mínima significativa (LSD) con p-valores ajustados por Holm para controlar la tasa de error total (Bretz et al., 2010).

El último objetivo fue analizar las variaciones en la medida de la distancia recorrida por diferentes especies (*Oryctolagus cuniculus*, *C. elaphus*, *C. lupus* y *L. pardinus*) utilizando métodos 2D y 3D.

Para ello se ajustó el siguiente GLM con el fin de explicar el incremento porcentual de la distancia para cada especie, incluyendo la parcela como factor y el rango de altitud como covariable:

$$f(Y) = \alpha + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \varepsilon \quad (3)$$

Donde X_1 es el rango de altitud, X_2 es un factor con cuatro valores correspondientes a las parcelas y $f(Y)$ es el incremento de superficie transformado. La variable de respuesta fue previamente transformada mediante la raíz cuadrada en los modelos de conejo, lobo y lince y transformada logarítmicamente en el modelo de ciervo para satisfacer los supuestos subyacentes de las técnicas estadísticas empleadas. Por último, las parcelas se compararon por pares utilizando el método LSD con p-valores ajustados por Holm para explorar las diferencias significativas detectadas por el modelo ajustado correspondiente.

4.1.4. Resultados

4.1.4.1. Evaluación de las diferencias de superficie

4.1.4.1.1. Escala del paisaje

En la Tabla 2 se presenta un resumen estadístico descriptivo de las variables de interés (superficie proyectada 2D y superficie geométrica 3D en hectáreas, índice de incremento superficial, altitud y diferencias de pendiente) correspondientes a los 145 cotos. Además, se utiliza un coeficiente de correlación para medir la fuerza de la relación entre la variable índice de incremento superficial y las diferencias de altitud y pendiente. Existe una gran variabilidad en el tamaño de las fincas, que oscila aproximadamente entre 500 y 10.150 ha (la superficie oficial proyectada), donde el 75% son de menos de 1.729 ha y sólo el 25% superan este valor.

Tabla 2. Resumen estadístico descriptivo de las variables de interés en la zona de estudio.

Variable	Media	Mediana	Q1	Q3	Rango	Min	Max	DE
2D Área Proyectada	1545.60	969.43	649.71	1728.99	9656.01	492.89	10,148.9	1621.79
3D Área geométrica	1640.46	1002.45	690.49	1825.65	10,342.2	509.13	10,851.3	1742.93
Índice de incremento de superficie (%) ^{ab}	5.61	5.56	3.99	7.14	9.95	1.10	11.05	2.23
Dif. Altitud ^{ac}	329.40	291.37	226.20	409.37	658.62	100.44	759.06	145.79
Dif. pendiente ^{bc}	62.26	61.21	54.27	73.16	43.22	39.75	82.97	11.50

Coeficiente de correlación de Spearman entre pares de variables con la misma letra: a 0,6720, b 0,5504, c 0,6334.

Existen notables diferencias entre la superficie proyectada y la geométrica, aportando esta segunda medición un incremento de superficie que oscila entre el 1,10% y el 11,05%, lo que supone una diferencia total en la medición de la superficie de las fincas de 13,755 ha. De hecho, el aumento medio de superficie es igual a 5,61 y el 75% de las fincas alcanzan un aumento superior al 3,99%. Un intervalo de confianza del 95% para el aumento medio de la superficie es (5,2409; 5,9739). Además, existe una alta correlación positiva entre el aumento de superficie y las diferencias de altitud y pendiente.

4.1.4.1.2. Parcelas anidadas

Los resultados de un diseño de medidas repetidas entre superficies de parcelas proyectadas (2D) y geométricas (3D) a tres escalas permiten concluir que no existen diferencias significativas entre las escalas (estadístico $F = 2,065$ con un valor $p > 0,05$ tras la corrección por ϵ de Greenhouse-Geisser y un valor $p > 0,05$ tras la corrección por ϵ de Huynh-Feldt). La Tabla 3 resume algunas estadísticas descriptivas de los datos obtenidos a partir del diseño experimental. Obsérvese que el valor del área geométrica 3D mostrado para cada parcela corresponde a la suma de las n observaciones obtenidas con cada escala, es decir, $n = 1$ para 4×4 km, $n = 4$ para 2×2 km y $n = 16$ para 1×1 km, respectivamente. Es importante destacar las grandes diferencias entre las parcelas en relación con el aumento de la superficie, así como con la altitud y la pendiente. De hecho, para evaluar estas diferencias ajustamos un GLM para el logaritmo del incremento porcentual de superficie obtenido con los datos a escala de 1 km y considerando la parcela como un factor con seis niveles y el rango de altitud como una variable continua (2). El análisis de correlación entre las variables continuas de interés (incremento porcentual de superficie, rango de altitud y rango de pendiente) proporcionó correlaciones positivas significativas altas (p -valor $< 0,001$ en los tres casos) siendo la correlación entre incremento porcentual de superficie y rango de altitud la más alta, por lo que esta última se consideró como covariable en el GLM.

Tabla 3. Resumen estadístico descriptivo de las variables consideradas en el diseño experimental y resultados para las aproximaciones de área geométrica 3D, así como resultados del índice de incremento de superficie en referencia al área proyectada 2D.

		Baja		Media		Alta	
		Plot 1	Plot 2	Plot 3	Plot 4	Plot 5	Plot 6
Altitud	Min	604.98	599.43	230.21	197.69	356.44	352
	Max	749.40	747.20	575.36	663.31	742.04	679.53
	Rango	144.42	147.77	345.16	465.63	385.61	327.53
Pendiente	Min	0.02	0	0	0	0.02	0
	Max	41.13	47.09	73.55	63.50	63.87	73.35
	Rango	41.13	47.09	73.55	63.50	63.87	73.35
4 x 4 km	3D Área geométrica	1620.24	1620.05	1709.74	1773.86	1743.76	1740.91
	Índice incremento superficie (%)	1.52	1.51	7.13	11.14	9.26	9.08
2 x 2 km	3D Área geométrica	1616.19	1615.01	1705.53	1769.52	1739.48	1736.52
	Índice incremento superficie (%)	1.52	1.45	7.13	11.15	9.23	9.08
1 x 1 km	3D Área geométrica	1608.07	1607.92	1696.99	1760.6	1730.72	1727.91
	Índice incremento superficie (%)	1.52	1.51	7.13	11.15	9.26	9.09

(Índice SI): $[(3D \text{ area} - 2D \text{ area}) / 2D \text{ area}] \cdot 100$.

No habiéndose detectado diferencias significativas entre las 3 escalas en relación al índice de incremento superficial medio, se ajusta a los datos obtenidos con la escala a 1 km un GLM que permite estimar el índice de incremento superficial en función del rango de altitud en cada una de las parcelas, tal y como se muestra en la Tabla 4 y en la

Fig. 17. Los resultados del modelo ajustado se resumen en la Tabla 4 y se pueden visualizar mejor en la Fig. 17, que muestra los valores en la escala original de la variable de respuesta y las curvas ajustadas para cada parcela en función del rango de altitud. Las curvas ajustadas para cada parcela también se muestran en la Tabla 4. En general, estos resultados muestran que el incremento de superficie difiere entre parcelas, excepto en el caso de las parcelas 1 y 2.

Tabla 4. Resumen del GLM para modelizar el aumento porcentual de la superficie. Resultados del análisis de comparación post hoc de las parcelas basado en el método LSD con p-valores ajustados de Holm.

Parámetros modelo	Media	Estimada	Se	Modelos ajustado por cuadro
Altitude range (ar)		0.012 ¹	0.004	
Plot 1	0.369 ^d	-0.540 ²	0.279	plot 1: $\exp.(-0.540 + 0.012 \text{ ar})$
Plot 2	0.353 ^d	-0.019	0.392	plot 2: $\exp.(-0.540 - 0.019 + (0.012 + 0.001) \text{ ar})$
Plot 3	1.880 ^c	1.110 ¹	0.369	plot 3: $\exp.(-0.540 + 1.110 + (0.012 - 0.006) \text{ ar})$
Plot 4	2.401 ^a	2.416 ¹	0.430	plot 4: $\exp.(-0.540 + 2.416 + (0.012 - 0.010) \text{ ar})$
Plot 5	2.151 ^b	0.960 ¹	0.419	plot 5: $\exp.(-0.540 + 0.960 + (0.012 - 0.004) \text{ ar})$
Plot 6	2.081 ^{bc}	0.557	0.401	plot 6: $\exp.(-0.540 + 0.557 + (0.012 - 0.001) \text{ ar})$
Ar x plot 2		0.001	0.005	
Ar x plot 3		-0.006	0.004	
Ar x plot 4		-0.010 ¹	0.004	
Ar x plot 5		-0.004	0.004	
Ar x plot 6		-0.001	0.004	

Las medias por cuadro con la misma letra no difieren significativamente (p-value >0.05). ¹ p-values <0.05, ² p-values <0.1.

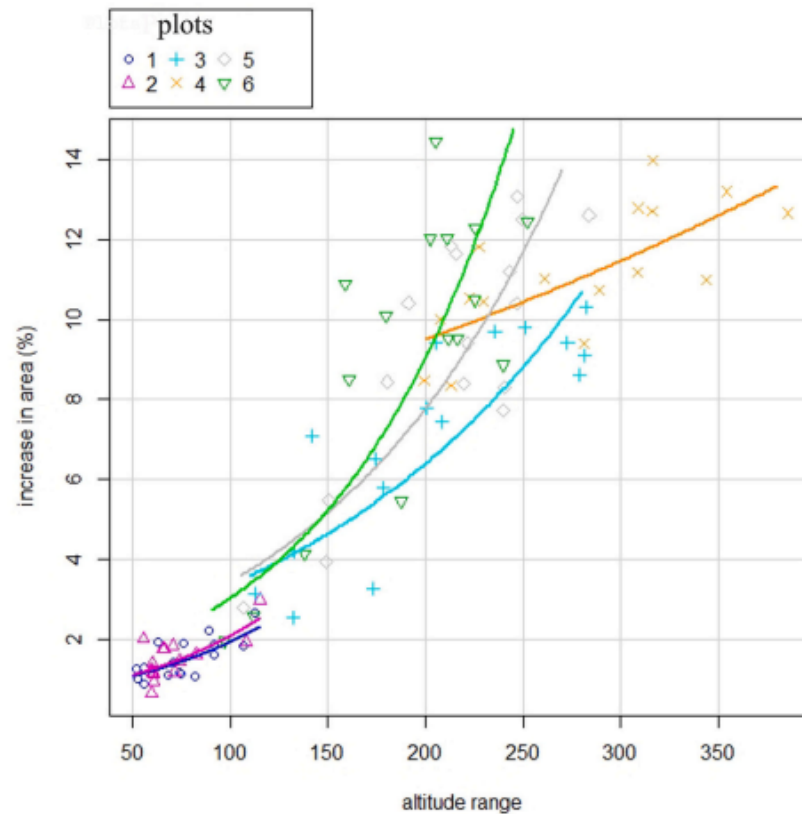


Fig. 17. Incremento porcentual ajustado de la superficie en función de la altitud para cada parcela de 1 km.

Además, existe una relación significativa y positiva entre el aumento de superficie y el rango altitudinal que cambia ligeramente entre parcelas, ya que la interacción es significativa en el caso de la parcela 4. Del análisis de comparación post-hoc de las parcelas basado en el método LSD con p-valores ajustados por Holm que también se muestra en la Tabla 4, encontramos diferencias claramente significativas entre la parcela 4 y el resto (p -valor $< 0,05$), mientras que las parcelas 1 y 2 no difieren significativamente ni tampoco las parcelas 5 y 6 (p -valor = 0,8844 en ambos casos).

4.1.4.2. Evaluación de las diferencias en las estimaciones de la longitud del recorrido de los animales.

Por último, se analiza cómo afectan las diferencias observadas entre las dos técnicas de medición (proyectada y geométrica) a la distancia recorrida por varias especies (conejo, lobo, lince y ciervo), es decir, se considera como variable de respuesta el incremento

porcentual de la distancia recorrida. La Tabla 5 muestra el incremento medio de la distancia y las desviaciones típicas para 15 simulaciones realizadas para cada especie en cada parcela y se representan gráficamente en la Fig. 18. En general, la variación del incremento de distancia entre parcelas parece comportarse de forma similar para todas las especies consideradas, excepto en el caso del lobo que presenta mayores diferencias entre las parcelas 1 y 2. Hemos ajustado GLMs (3) que explican el incremento de superficie en función de las parcelas y el rango altitudinal para cada especie con la variable dependiente transformada mediante la raíz cuadrada en los modelos de conejo, lobo y lince y transformada logarítmicamente en el modelo de ciervo. Los modelos estimados muestran un ajuste global muy bueno en términos del nivel de desviación explicada, que oscila entre el 75,41% y el 87%. Para todos los modelos ajustados, el rango de altitud tiene un efecto positivo significativo en el aumento de la distancia, de modo que cuanto mayor es la diferencia en el rango de altitud, mayor es el aumento de la distancia. Además, como era de esperar, existen diferencias en el incremento medio de la distancia entre parcelas, siendo mayor el incremento medio en las parcelas 3 a 6 en comparación con la primera parcela. Sólo en el caso del lobo se detectan diferencias significativas entre las parcelas 1 y 2 respecto al incremento medio de la distancia. Los resultados de las comparaciones por pares entre parcelas mediante el método LSD con p-valores ajustados por Holm se muestran en la Tabla 5. A diferencia de los resultados obtenidos en las comparaciones entre pares de parcelas respecto al incremento medio de superficie, ahora los incrementos medios de distancia recorrida por las 4 especies en la parcela 4 no difieren significativamente de las parcelas 5 y 6. Además, sólo en el caso del lobo se detectan diferencias significativas entre las parcelas 1 y 2.

Tabla 5. Resumen estadístico descriptivo del aumento de la distancia para cada especie en cada parcela. Resultados de las comparaciones por pares entre parcelas para cada especie utilizando el método LSD con p-valores ajustados de Holm.

Especies		Plot 1	Plot 2	Plot 3	Plot 4	Plot 5	Plot 6
Conejo	Media	0.725 ^a	0.778 ^a	3.505 ^b	5.266 ^c	4.129 ^{bc}	4.968 ^{bc}
	Sd	0.323	0.425	2.207	2.082	2.148	2.946
Lobo	Media	0.985 ^a	2.138 ^b	2.928 ^c	4.150 ^d	4.272 ^d	3.566 ^d
	Sd	0.301	1.098	0.776	0.774	0.979	1.440
Lince	Media	0.829 ^a	0.840 ^a	3.270 ^b	4.534 ^c	4.645 ^c	4.278 ^c
	Sd	0.234	0.571	0.964	0.900	0.895	1.340
Ciervo	Media	0.777 ^a	1.176 ^a	2.846 ^b	4.503 ^c	3.744 ^{bc}	4.454 ^c
	Sd	0.169	0.739	0.838	0.483	1.337	1.507

Para cada especie, las parcelas con la misma letra no difieren significativamente (p-valor >0,05).

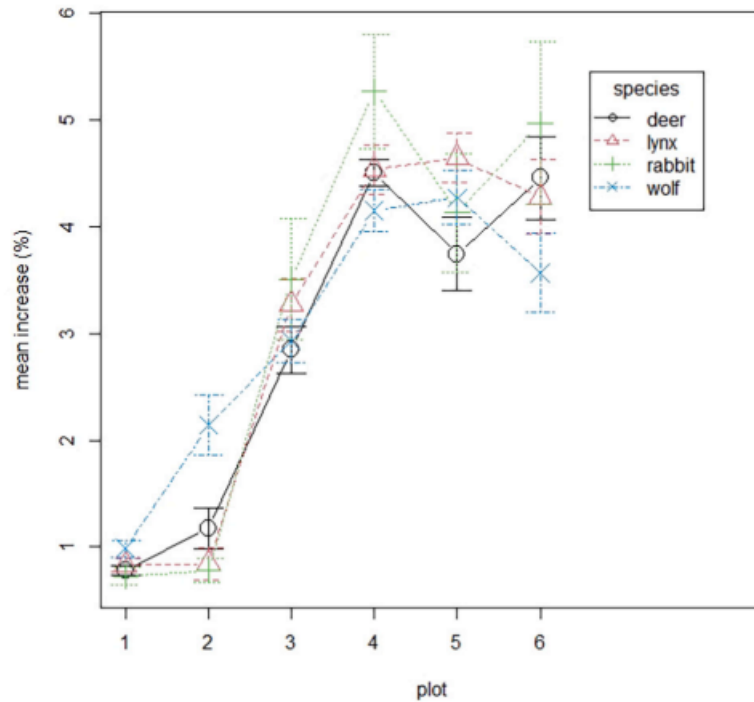


Fig. 18. Incremento medio de la distancia y errores estándar para cada especie en cada parcela.

4.1.5. Discusión

Nuestros resultados revelaron que las estimaciones del tamaño de las superficies, así como de la longitud de las trayectorias de los animales, basadas en enfoques 2D producen mediciones subestimadas, especialmente en zonas con paisajes más escarpados, con mayores rangos de altitud y pendientes. Nuestro estudio muestra la necesidad de que los investigadores consideren un enfoque tridimensional para el análisis tanto de superficies como de trayectorias en el contexto de los estudios ecológicos, de gestión y de comportamiento animal. Campbell et al. (2004) sugirieron el 5% como umbral para considerar los valores de diferencia como relevantes para que el componente tridimensional se tenga en cuenta en los cálculos del área de distribución de los ciervos. Aunque otros investigadores señalan que los estudios realizados en zonas con una pendiente media superior a $16,3^\circ$ o con un rango altitudinal superior a 1800 m deberían tener en cuenta la topografía de la zona, nosotros hemos encontrado diferencias del 5% en zonas con un rango altitudinal de tan sólo 150 m. Además, hemos encontrado una métrica subestimada del 10% utilizando enfoques 2D en zonas con una

pendiente media superior al 40% o con un rango altitudinal de unos 400 m (Tabla 4, Fig. 17).

4.1.5.1. Diferencias en área

Las superficies proyectadas en 2D y geométricas en 3D difieren en todos los escenarios analizados. A escala de paisaje, nuestra área de estudio experimenta un incremento del 5,61% cuando se utiliza el eje 3D para la estimación de la superficie. A esta escala vemos que el 75% de las fincas alcanzan un incremento de entre el 4% y el 11,05%, mientras que a escala de 1 km este incremento varía entre el 1,52% y el 11,15%, estando ambos valores de incremento de superficie estrechamente relacionados con la altitud y la pendiente.

El área de estudio, Sierra Morena en la provincia de Jaén, configura un paisaje fragmentado en fincas cinegéticas, una gran mayoría delimitadas por vallados que impiden el libre movimiento de las especies cinegéticas entre fincas (Muñoz-Cobo y Azorit, 1996). Estas unidades territoriales son artificiales en su delimitación y por tanto en cada una de ellas encontraremos una gran variabilidad tanto en la vegetación como en el relieve del terreno. Por lo que la importancia de nuestro estudio y la infravaloración de la aproximación 2D dependerá en gran medida de la configuración del paisaje en cada finca en particular.

La consideración del eje 3D puede ser interesante en zonas montañosas con marcados cambios de altitud y rango de pendiente del terreno. No habiéndose detectado diferencias significativas entre las 3 escalas en relación al índice de incremento superficial medio, se ajusta un GLM a los datos obtenidos a la escala de 1 km que nos permite estimar el índice de incremento superficial en función del rango de altitud en cada una de las parcelas, tal y como se muestra en la Tabla 4 y en la Fig. 17. La Fig. 17 muestra que en cuatro de las seis parcelas los valores del índice de incremento superficial son superiores al 5%. Concretamente, en la parcela 3 a partir de una altitud aproximada de 175 m se alcanza un índice de incremento superficial del 5%. En las parcelas 5 y 6, este valor de índice de incremento se alcanza a partir de una altitud aproximada de 150 m y en el caso de la parcela 4, el índice de incremento superficial supera el 9% para todos los valores de rango de altitud.

Aunque no existen diferencias significativas entre escalas (p -valor = 0.2098) sí existen algunas

diferencias entre parcelas pertenecientes a diferentes categorías de paisaje. La parcela 4, incluida en el rango medio del índice de incremento superficial (Fig. 13 y Tabla 3) a nivel de polígonos, está finalmente más cerca de las parcelas de rango alto (parcelas 5 y 6) que pertenecen a polígonos con mayores diferencias entre 2D y 3D, que de la parcela 3 (ver Fig. 13). Es evidente que estas diferencias están relacionadas con la configuración del paisaje de cada finca. La heterogeneidad del paisaje y el tamaño de la finca en estudio son factores a tener en cuenta.

Este ajuste 3D tiene consecuencias económicas y ecológicas que afectan a la valoración para evaluar las subvenciones a la producción en espacios agrarios y forestales estrechamente ligados a la superficie (Rogers et al., 2012). En este sentido, en las fincas de más de quince hectáreas el mantenimiento de una superficie de interés ecológico de al menos el 5% de la superficie cultivable de la finca (<https://www.europarl.europa.eu>) es un requisito para obtener subvenciones adicionales en Europa. Lo mismo ocurre en las fincas de caza mayor en las que al menos el 5% de la superficie de la finca debe estar denominada como zona protegida en la que esté prohibida la caza. (Decreto 126/201725 de julio, por el que se establece el Reglamento de Ordenación de la Caza en Andalucía). La estimación de las densidades de ungulados es especialmente importante en el caso de estas fincas cerradas de Sierra Morena con densidades existentes de hasta 55-60 individuos por km² (Azorit, 2005; Nugent et al., 2011). Este número variará en función de si se considera un área 2D o una superficie 3D y ayudará a determinar los cupos de caza. Así pues, el éxito a largo plazo de la conservación basada en áreas requiere una superficie fiable basada en enfoques 3D para garantizar una financiación adecuada, planificar el cambio climático y hacer que la conservación de la biodiversidad sea una parte mucho más importante de las políticas territoriales y de gestión (Rogers et al., 2012; Maxwell et al., 2020).

4.1.5.2. Diferencias en las longitudes de las trayectorias de animales.

La distancia es la métrica más fundamental en el análisis y el modelado espacial. Sin embargo, hay pocos conocimientos sobre cómo medir la distancia en una superficie de terreno digital y una gran incertidumbre con respecto a estas mediciones (Qiang et al., 2021).

Aunque Tracey et al. (2014) desarrollaron una nueva aproximación a los estimadores de densidad Kernel basados en el movimiento para especies voladoras, terrestres o

acuáticas utilizando esta tercera dimensión *z* que representa la altitud, la elevación o la profundidad, el análisis ecológico suele basarse en la dimensión 2D de los datos.

Los enfoques planimétricos pueden subestimar aspectos del comportamiento y la ecología del desplazamiento animal (Farhadinia et al., 2020; Heit et al., 2021), por lo que cuestiones como el análisis del desplazamiento animal y la conectividad se verán afectadas por la inclusión o no de este eje de altitud 3D en las estimaciones (Bailleul et al., 2010; Belant et al., 2012; Adachi et al., 2017;). Nuestros resultados indican una diferencia significativa entre los dos enfoques, lo que sugiere que, en la mayoría de los casos, un enfoque en 2D falsea la escala espacial del comportamiento animal que se produce en 3D. Al igual que en Heit et al. (2021) inferimos que la complejidad del paisaje representa una importante fuente de sesgo que resulta en la subestimación de las longitudes de las trayectorias de los animales terrestres. Dada la influencia de la complejidad del paisaje, la aplicación de la metodología 3D permite una investigación ecológica fiable y una gestión de la fauna más sensata. Nuestro análisis también muestra que, al igual que en el análisis de superficie descrito anteriormente, el aumento de las mediciones de longitud utilizando 3D es mayor en el rango de altitud más alto. El rango de altitud tiene un efecto positivo en el aumento de las longitudes de distancia medidas para todas las especies, de modo que cuanto mayor es la diferencia en el rango de altitud mayor es el aumento de la distancia observada.

Como era de esperar existen diferencias entre parcelas en el incremento medio de las medidas de distancia, siendo el incremento medio mayor en las parcelas 3 a 6 en comparación con las dos primeras parcelas en todas las especies estudiadas (Fig. 18). Es decir, el incremento de la longitud 3D es mayor en las parcelas con mayor rango altitudinal (Fig. 14). Este efecto de la heterogeneidad del terreno sobre la estimación de las distancias alcanzadas por los individuos puede interpretarse a partir de las características ecológicas de las especies estudiadas (Farhadinia et al., 2020). En concreto, puede ser interesante en función de las distancias alcanzadas en movimiento y del carácter sedentario o dispersivo de la especie. Todas las especies suelen tener un área de distribución definida donde desarrollan su actividad vital. Sin embargo, algunas especies son más locales y la mayoría de sus movimientos son cortos, limitándose a unas pocas hectáreas dentro de una misma área, frente a otras especies más dispersivas

con las que las distancias alcanzadas son de varios kilómetros y con áreas de hogar a otra escala espacial.

La ecología de la especie objeto de estudio determina hasta qué punto es interesante el uso de los ajustes 3D. Las especies que suelen estar asociadas a zonas montañosas, con bajas densidades, distribución dispersa y que tienen un comportamiento esquivo están obviamente más sujetas a estos errores (Monterroso et al., 2013). Dentro de la fauna de mamíferos de nuestra área de estudio tales especies incluyen el lobo y el lince. En el caso de especies protegidas como el lince ibérico, el hábitat disponible es fundamental para la supervivencia futura de la especie y dependerá en gran medida de las medidas de superficie (Guzmán et al., 2012). Además, las medidas de gestión para esta especie se basan en estimaciones precisas de la densidad de la principal especie presa, es decir, los conejos. La densidad de conejos se suele calcular a partir de recuentos de letrinas en un área preseleccionada de 2,5 km² o 1 km² (Guzmán et al., 2012) y posteriormente, en base a esta densidad, se programan sueltas de conejos como medida para reforzar la población de lince. Esta densidad es también un valor limitante en la preselección de las zonas de reintroducción del lince. En zonas donde el rango altitudinal es elevado, las densidades estimadas a partir de la superficie 2D pueden ser muy diferentes. Especies como los conejos, con las áreas de distribución más pequeñas, tendrán valores proporcionalmente mayores cuando se utilice 3D en los cálculos de área o longitud. Con los desplazamientos más cortos restringidos a 1 km al cuadrado, podemos ver que el conejo destaca por encima de las demás especies en todas las parcelas cuando hay grandes diferencias de altitud o por debajo de ellas cuando nos encontramos en zonas más llanas. El área de distribución del conejo refleja, en cierto modo, el paisaje local.

Los lobos, por su parte, pueden recorrer largas distancias diarias en su búsqueda de alimento (Andersen et al., 2015; Razen et al., 2016). En este caso, estos desplazamientos más largos diluyen en cierta medida el efecto local del terreno. En aquellas zonas con menor incremento de superficie y menor rango altitudinal (parcelas 1 y 2) el lobo alcanza zonas de distancia con mayor pendiente y mayores cambios de altitud mientras que las trayectorias de otras especies responden más al relieve del terreno en estas parcelas concretas. Por el contrario, en las parcelas 4 y 6, vinculadas a zonas con mayores cambios de altitud y pendiente, el lobo muestra un incremento

menor porque de alguna manera "escapa" al marcado efecto de los cambios de altitud. Baste decir que el efecto se diluye.

Se sabe que las presiones selectivas optimizan aquellos animales que se mueven eficientemente a través del hábitat, como el espacio físico donde el animal pasa su vida (Tucker, 1970; Dickinson et al., 2000; Nathan et al., 2008). Los paisajes energéticos, como el conjunto de factores que pueden influir en aspectos fundamentales de los movimientos animales (Pyke, 1978; Fedak y Seeherman, 1979; Lachica et al., 1997; Minetti et al., 2002; Wilson et al., 2008; Lempidakis et al., 2018), deben considerar también el trabajo adicional que realizan los animales, en función de la superficie real recorrida (Minetti et al., 2002; Shepard et al., 2013). A la escala de nuestro estudio, el método de cálculo 3D utilizado es de gran importancia para especies con un área de distribución similar a la del lince y el ciervo, como se desprende de los resultados de la Tabla 5.

4.1.6. Conclusiones

Nuestros resultados confirman que los estudios ecológicos que ignoran los componentes tridimensionales (3D) corren el riesgo de ser malinterpretados debido a que el enfoque bidimensional (2D) subestima las distancias y la superficie del paisaje.

La altitud y la amplitud de la pendiente son factores determinantes para considerar este componente espacial tridimensional a la hora de calcular áreas y distancias, ya que existe una elevada correlación positiva entre el aumento del área o longitud y la altitud y la pendiente.

La complejidad del paisaje, más que el tipo de especie, está relacionada con las diferencias en las métricas de los recorridos de los animales. Sin embargo, en especies como el ciervo y el lince, los ejes 3D son esenciales para una estimación precisa de la longitud del recorrido, especialmente en un paisaje heterogéneo.

Los nuevos datos cartográficos disponibles, los modelos digitales del terreno y el aumento general de la precisión han mejorado sustancialmente la metodología y permiten la aplicación de técnicas más precisas para la obtención de los parámetros tridimensionales y superficiales del terreno. Además, a través de los GLMs ajustados, que nos permiten estimar el índice de incremento superficial (índice SI) en función del

rango altitudinal, proporcionamos un método básico para estimar los errores potenciales producidos por un simple análisis 2D en nuestra zona de estudio.

Por lo tanto, aprovechando estas herramientas animamos a los investigadores a implementar estos estudios considerando el componente topográfico 3D. El uso de estas métricas de hábitat 3D proporciona resultados más precisos que los enfoques 2D con implicaciones de largo alcance para una gestión y conservación más sabia de la fauna en los ecosistemas mediterráneos.



4.2. Impacto del factor topográfico en los recorridos de los animales en el campo: análisis y predicción de los patrones de movimiento de los ciervos.

Artículo:

Valderrama-Zafra, J. M., Rubio-Paramio, M. A., García-Molina, D. F., Mercado-Colmenero, J. M., Oya, A., Carrasco, R, Azorit, C., 2024. Impact of topographic factors on animal field pathings: Analysis and prediction of deer movement patterns. *Ecological Informatics*, 80, 102487. ISSN 1574-9541. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2024.102487>

Cuartil: (2022) Q1 JCR (ECOLOGY). Índice de calidad 5.1

4.2.1. Resumen

Comprender y rastrear las complejidades de los patrones de movimiento de los animales es de suma importancia en el manejo de la vida silvestre, los esfuerzos de conservación y el uso sostenible de los recursos naturales. Infinidad de factores influyen en la trayectoria de desplazamiento de los animales dentro de sus respectivos hábitats, entre ellos: la estructura del hábitat, la disponibilidad de recursos, la presencia de depredadores naturales, la memoria social, los atributos topográficos del entorno, etc.

Numerosos estudios han intentado delinear los límites espaciales de los hábitats de los animales dilucidando las complejidades de su dinámica de movimiento. Estas investigaciones han puesto de relieve el profundo impacto de factores como la topografía ambiental y la presencia de impedimentos naturales y otras estructuras antropogénicas en la movilidad animal, pero muy pocos han analizado los factores topográficos a una escala espacial tridimensional cercana.

Esta investigación se centra en una metodología novedosa para identificar trayectorias animales a escala cercana y evaluar la influencia de factores topográficos en estas trayectorias, concretamente de las manadas de ciervos del sur de España. Para comprender los patrones de movimiento, se analizan los transectos registrados en el campo debido al uso continuado por parte de los ciervos. La información topográfica se obtuvo en dos pasos: primero con un análisis gráfico de ortofotos para la incorporación del conjunto de datos suficiente. En segundo lugar, se verificó la veracidad de estos datos mediante la tecnología de rastreo del Sistema de Posicionamiento Global (GPS). La integración de datos de múltiples fuentes con Sistemas de Información Geográfica (SIG) permitió automatizar el análisis. A continuación, se diseñó un modelo estadístico de regresión lineal, basado tanto en las longitudes de ascenso y descenso como en la longitud total del camino recorrido, para inferir las trayectorias entre dos puntos designados dentro del área de estudio. A partir de variables topográficas obtenidas en el entorno de estudio, como la pendiente, la diferencia de elevación (distancia vertical acumulada) y la longitud 3D de las trayectorias de los transectos, se establece la influencia de estas variables en las decisiones de movimiento de los animales dentro de su hábitat con el fin de facilitar su posterior predicción.

Las pruebas analíticas de las trayectorias han demostrado que el comportamiento de movimiento de los cérvidos es predecible. Los resultados demuestran la utilidad de la metodología presentada que, al proporcionar y recopilar información topográfica valiosa sobre las áreas de movimiento y tránsito, puede orientar las prácticas de manejo sostenible de las poblaciones de ciervos y sus hábitats.

4.2.2. Introducción

El estudio y análisis de las trayectorias de desplazamiento de los animales constituye una tarea fundamental en el ámbito de la gestión y conservación de la fauna salvaje. La definición de estas trayectorias se rige por un conjunto de factores que se entrelazan con la dinámica tanto de los propios animales como de sus hábitats. Entre estos factores se encuentran los atributos topográficos del terreno, la disponibilidad de recursos en el entorno, la composición estructural del hábitat, la influencia duradera de la memoria social arraigada en las comunidades animales y la presencia de depredadores naturales. Investigaciones anteriores han establecido los rangos de hábitat de los animales basándose en la complejidad de su locomoción dentro de estos dominios. Entre los factores que más influyen en la demarcación del hábitat los más importantes son los topográficos, tal y como afirman Lempidakis et al. (2018), Zonneveld (1995), y Wiens y Moss (2005), ya que las dificultades del terreno podrían condicionar a los animales durante sus desplazamientos. Además, los obstáculos naturales, incluidos ríos, lagos, barrancos, carreteras, edificios y otras estructuras antropogénicas, ejercen influencias sobre la locomoción animal, manifestándose a menudo como barreras infranqueables, como se observa en el trabajo de Panzacchi et al. (2016). Al mismo tiempo, deben evaluarse las interacciones en el ámbito de la cubierta vegetal y la heterogeneidad ambiental, aspectos explorados por Shepard et al. (2013), Masello et al. (2017) y Kauffman et al. (2021), que muestran sus funciones sustanciales en la conformación de los patrones de movimiento animal. Complementando estas investigaciones basadas en el terreno, ciertos estudios pivotan hacia el ámbito de la cognición animal, mostrando cómo la memoria social o individual influye en la selección de trayectorias a diferentes escalas espaciales. En esta línea se sitúan los estudios desarrollados por Spencer (2012), Schlägel y Lewis (2014), Guo et al. (2019), que examinan los efectos de la memoria espacial y la información dinámica a la hora de guiar las decisiones de movimiento de los animales.

Por otro lado, la disponibilidad de recursos emerge como un factor crucial relacionado con los patrones de movimiento de los animales. Kauffman et al. (2021) se centran en el rastreo de recursos y las facetas ecológicas, determinando los mecanismos que rigen dichos patrones. Complementando este concepto, Kenward et al. (2018) realizaron un estudio de investigación sobre el impacto de los depredadores naturales en la dinámica de movimiento de los animales, descubriendo su papel como agentes de influencia. Paralelamente, Masello et al. (2017) profundizan en los aspectos multifacéticos que rodean la migración, determinando los agentes causales, las consecuencias y las implicaciones para la conservación de los movimientos animales a gran escala.

Las trayectorias de los animales, consideradas dentro de los paisajes heterogéneos que atraviesan, exponen a los individuos a diversos elementos ambientales que pueden repercutir positiva o negativamente en procesos a largo plazo como la reproducción y la supervivencia (Edelhoff et al., 2016). A una escala más amplia, los procesos y patrones espaciales emergentes están influenciados por las decisiones de movimiento de los animales (Seidel et al., 2018). En el campo de la ecología del movimiento, se han realizado muchos estudios sobre las métricas del uso del espacio por parte de los individuos, por ejemplo, rangos de hogar, redes de proximidad/sociales y funciones de selección (Cumming y Cornélis 2012; Lele et al., 2013; Pinter-Wollman et al., 2013).

En entornos libres de impedimentos naturales o artificiales, los movimientos de los animales se rigen principalmente por necesidades fundamentales como la alimentación, el refugio, la hidratación u otros requisitos esenciales (Kaufman et al., 2021 y Abrahms et al., 2021). En tales contextos, las rutas terrestres pueden ofrecer innumerables posibilidades. Sin embargo, el principio general que guía estos desplazamientos parece ser la minimización del gasto energético o las trayectorias de desplazamiento con menores pendientes y desniveles, ya que ningún factor parece suplantar este objetivo.

Aspectos como el consumo energético y su relación con la pendiente (Anjitha Krishna et al., 2019), la rugosidad del terreno (Korzeniowska et al., 2018) y la elevación (Wangdi et al., 2019) influyen significativamente en el comportamiento de sus movimientos. En este ámbito, otros estudios se centraron en los factores topográficos para determinar los patrones de movimiento. Shepard et al. (2013) mostraron el papel fundamental de los paisajes energéticos a la hora de esculpir las facetas ecológicas de la locomoción animal, mientras que Lachica y Aguilera (2000) estimaron los costes

energéticos asociados a la locomoción del cerdo ibérico a partir de diversos comportamientos de movimiento. Además, Lachica et al. (1997) realizaron investigaciones exhaustivas sobre el gasto energético en diferentes pendientes en cabras granadinas (*Capra hircus*), evaluando el impacto de la topografía del terreno en el consumo energético.

En los últimos años, el campo del seguimiento de la fauna salvaje ha experimentado una profunda transformación, impulsada por notables avances tecnológicos y técnicas de análisis de datos. En la actualidad, la llegada de la tecnología de seguimiento por GPS, rentable y de larga duración (Riotte-Lambert y Matthiopoulos, 2020), ha dado paso a una nueva era en la que los datos pueden obtenerse con mayor frecuencia y precisión ininterrumpida (Fernández-Rodríguez et al., 2023), lo que permite una cuantificación más exhaustiva de la movilidad de los animales. Además, se ha producido una notable evolución en el análisis de las trayectorias de movimiento de los cérvidos, pasando de la modelización bidimensional (2D) a la tridimensional (3D), mejorando la precisión y exactitud, y optimizando las estrategias de gestión de la fauna silvestre, como destacan Valderrama-Zafra et al. (2022).

El uso de estas tecnologías, incluidos los actuales dispositivos GNSS, permite su aplicación en los campos de la ecología y la biología (Garrido-Carretero et al., 2023). Existen otras tecnologías que permiten analizar la trayectoria de los animales a escala cercana. Metodologías basadas en el trampeo con cámaras o videocámaras (Klasen y Steinhage, 2022) permiten obtener incluso trayectorias 3D a escala cercana. En entornos controlados, se pueden utilizar otras tecnologías como Bluetooth (Morita et al., 2020).

Como expusieron Seidel et al. (2018), también existen varias publicaciones especiales en la comunidad SIG relativas al análisis cuantitativo del movimiento y la ecología espacial (Skidmore et al., 2011, Laffan et al., 2012, 2014, 2016, Dodge et al., 2016). A pesar de estas revisiones de dominios específicos y publicaciones especiales más amplias, sigue siendo necesaria una exposición que proporcione una visión general de las métricas y herramientas utilizadas para analizar los datos de movimiento de los animales.

Laube y Purves (2011) realizaron algunos trabajos de investigación con animales marcados con dispositivos GPS y recogieron datos de menos de un segundo para

investigar cuestiones de escala, granularidad e incertidumbre en la evaluación de los parámetros de movimiento. Según Seidel et al. (2018), los resultados de este estudio deberían ser de gran interés para los ecólogos, que suelen recopilar datos fijos mucho más separados en el espacio-tiempo y luego invocan una suposición de línea recta sobre la naturaleza de las trayectorias entre dos puntos consecutivos cualesquiera de sus datos o suponen una difusión gaussiana, a menudo basándose en un método de puente browniano para construir trayectorias probables entre dichos puntos (Horne et al., 2007). En la actualidad, la gran mayoría de los estudios sobre el movimiento de los animales se han llevado a cabo utilizando distintos tipos de dispositivos de seguimiento. Sin embargo, esta tecnología presenta un problema: la tasa de recogida de datos está condicionada por la duración de la alimentación eléctrica de los dispositivos. Fernández-Rodríguez et al. (2023) realizaron un estudio sobre la importancia del análisis previo de los tiempos de adquisición de datos GPS en collares de ungulados, con el fin de optimizar el intervalo y el consumo de batería sin pérdidas significativas de información. Esto permite conocer la posición de los animales en un momento concreto de su movimiento, pero, dependiendo de la especie, la conexión de estos puntos no muestra el detalle del movimiento animal. Con la ayuda de la metodología desarrollada en este estudio ambas pueden complementarse, permitiéndonos conocer los detalles de los movimientos del animal por el terreno entre los puntos de seguimiento. A esta escala tan cercana, los factores que más influyen en el movimiento de los animales son los topográficos.

Esta parametrización detallada permitirá también estimar los costes energéticos a partir de los resultados formulados por otros autores (Lachica et al., 1997). La estimación a escala cercana de los patrones de movimiento permite actuar con mayor precisión en aspectos de conservación y gestión de especies. La metodología propuesta en este estudio de investigación se centra en analizar a una escala cercana donde el animal se ve obligado a tomar decisiones constantemente a lo largo de su ruta. En consecuencia, es fundamental evaluar los factores topográficos implicados ya que, a esta escala menor, aparte de la vegetación residual el factor más influyente a considerar en el movimiento del animal es la topografía del terreno. Su movimiento está estrechamente relacionado con aspectos topográficos que condicionan su navegación y selección de hábitat. Un segundo objetivo del presente manuscrito es validar una metodología de seguimiento basada en datos cartográficos y tecnologías topográficas destinada a digitalizar y

verificar las trayectorias de movimiento de los cérvidos, registradas en el campo y visibles en ortofotos.

Se propone un enfoque novedoso, consistente en la detección y el análisis continuos de los transectos registrados sobre el terreno por los cérvidos mediante la utilización de herramientas gráficas del Sistema de Información Geográfica (SIG), facilitadas por ortofotos aéreas de alta resolución. Esta metodología permite descifrar de forma exhaustiva las pautas de desplazamiento de los cérvidos. La sinergia entre los datos telemétricos y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) sirve de eje para automatizar el análisis de los datos de seguimiento de la fauna salvaje, como ya destacó Ganskopp et al., (2000). Además, la utilización de un SIG aumenta la visualización e interpretación de la información espacial, ofreciendo un enfoque eficaz para comprender los patrones de movimiento.

Con esta metodología podemos relacionar el seguimiento de animales mediante collares y el conocimiento del movimiento animal a escala cercana.

4.2.3. Área natural de estudio

El análisis topográfico realizado en este estudio abarca un área de 270 ha dentro de la finca Lugar Nuevo (38°09'12,6"N, 4°03'07,4"W), con una superficie de más de 9.000 ha del Parque Natural Sierra de Andújar (ver Fig. 19). Esta finca presenta un paisaje ideal desde el punto de vista biológico, forestal, topográfico y morfológico, con un rango de elevación de 200 a 700 metros sobre el nivel del mar. Esta zona montañosa está cubierta por bosques mediterráneos bien conservados, dominados por *Quercus ilex*, *Q. faginea* y *Q. suber*, con una composición arbustiva diversa que alberga poblaciones estables de varias especies protegidas emblemáticas: el lince ibérico (*Lynx pardinus*), el buitre negro (*Aegypius monachus*) y el águila imperial ibérica (*Aquila adalberti*), además de las especies de ungulados cinegéticos como el ciervo rojo (*Cervus elaphus*) y el jabalí (*Sus scrofa*) (Azorit y Moro, 2010), o gamo (*Dama dama*) (Azorit et al., 2012a), el muflón (*Ovis aries musimon*) (Azorit et al., 2020) y una población mermada de corzos (*Capreolus capreolus*) (Azorit y Muñoz-Cobo, 1997).

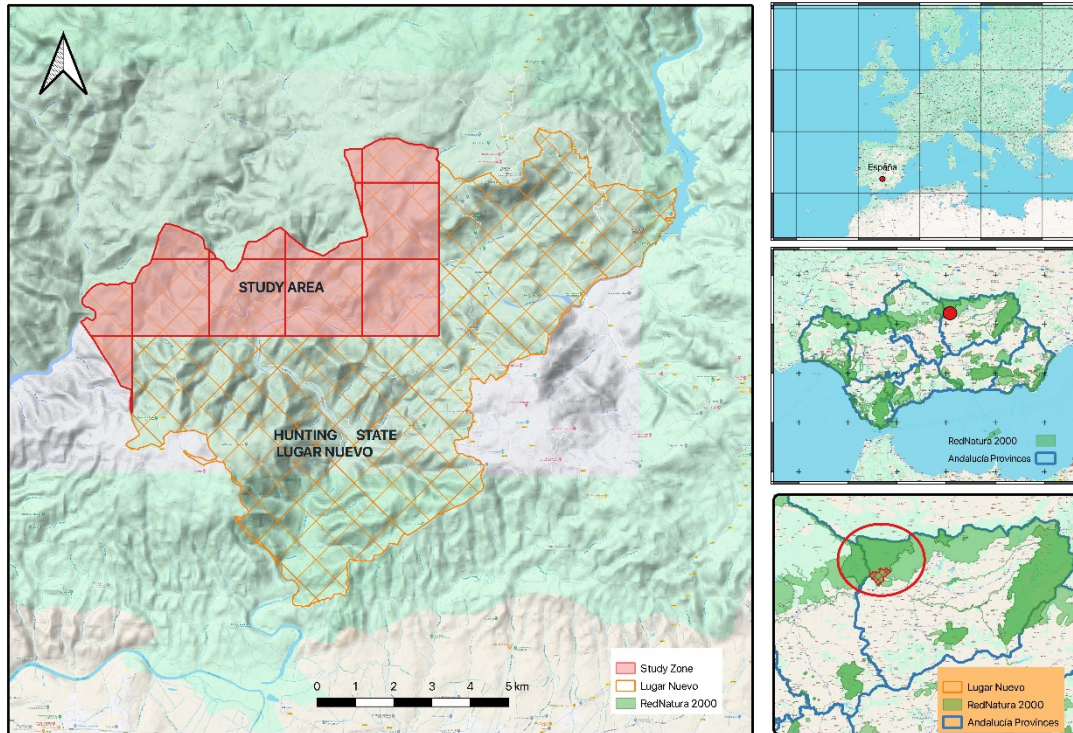


Fig. 19. Mapa de localización de la zona de estudio dentro de la finca Lugar Nuevo (Parque Natural Sierra de Andújar, España).

4.2.4. Materiales y métodos

La metodología desarrollada en este manuscrito se centra en el reconocimiento, digitalización y adquisición precisa de las trayectorias de los animales mediante técnicas de reconocimiento ortofotográfico y mediciones con instrumentos topográficos. Con ello se pretende analizar los factores topográficos del terreno que influyen en el movimiento y selección de rutas de los animales en la zona de estudio. Este proceso se llevará a cabo con la detección, digitalización y análisis de transectos registrados sobre el terreno por los ciervos mediante la utilización de herramientas gráficas del Sistema de Información Geográfica (SIG), facilitadas por ortofotos aéreas de alta resolución. Esta metodología permite descifrar de forma exhaustiva los patrones de movimiento de los cérvidos, lo cual es de vital importancia para comprender el comportamiento de la fauna salvaje en un área específica y para establecer patrones de movimiento dentro del territorio. Esta información es fundamental en diversos campos de estudio, como la ecología, la conservación de especies y la gestión de hábitats.

En la actualidad, los avances tecnológicos en el análisis digital de ortofotos y las técnicas topográficas permiten la adquisición precisa de datos actualizados para definir las principales características y propiedades de un terreno o entorno natural. Gracias a estos avances, la metodología desarrollada en este trabajo de investigación permite tanto la modelización de las principales propiedades y características topográficas de un terreno o entorno natural como la determinación de los movimientos realizados por los animales que lo habitan. En consecuencia, la metodología propuesta en este manuscrito puede agruparse en tres fases principales: Fase 1: se lleva a cabo el análisis de las principales fuentes de adquisición de ortofotos de la zona de estudio y la selección de las más adecuadas para su tratamiento digital. El desarrollo técnico de esta operación se realiza dentro de un sistema de información geográfica utilizando el software de código abierto QGIS (QGIS, edición 2023). En concreto, este software permite acceder a un amplio repositorio de imágenes de satélite para establecer la base cartográfica de la zona de estudio. A modo de ejemplo, se puede utilizar Bing Maps, así como Google Maps, uno de los repositorios más populares incorporados en el software. Sin embargo, para el presente trabajo se emplean ortofotos nacionales y regionales actualizadas del servicio de mapas web del PNOA (Plan Nacional de Ortofotos Aéreas) y del IECA (Instituto de Cartografía de Andalucía). Debido a su actualidad y precisión, finalmente se decidió utilizar las imágenes del PNOA (resolución de 0,5m Pixel / 0,25m Pixel).

Para una gestión visual y gráfica adecuada, el área de estudio se dividió en zonas más pequeñas (véase la Fig. 19). Además, estas zonas se recorrieron mediante un barrido de norte a sur utilizando una ventana cartográfica a escala 1/600. Posteriormente, al final de cada barrido se repitió el proceso de oeste a este. Posteriormente, al final de cada barrido se repitió el proceso de oeste a este. Cuando se identificaron determinadas características del terreno, se digitalizaron. Para ello se aumentó la escala de trabajo, pasando a digitalizar la cartografía del terreno 2 a escala 1/300 con el fin de conseguir una mayor precisión.

Posteriormente, se digitalizaron los rastros de animales identificados a través de las ortofotos asociadas al área de estudio. De nuevo, para este caso, la digitalización vectorial se realizó dentro del software de información geográfica QGIS con precisión y utilizando un sistema de coordenadas adecuado. Para el desarrollo de esta digitalización se han considerado las siguientes hipótesis:

- La huella de los rastros producidos en las laderas por la lluvia es similar a la que dejan las huellas de animales. Sin embargo, la diferencia entre ambas radica en que las primeras siempre siguen la línea de mayor pendiente y, por tanto, se descartan directamente.
- Los senderos con mayor distancia y mayor número de huellas indican que son utilizados por un mayor número de animales.
- Cuando hay un conjunto de trayectorias con geometría paralela se selecciona la que más destaca, ya que se supone que es el movimiento de un rebaño completo (véase la Fig. 20a).
- En la zona de estudio, las trayectorias generadas en regiones llanas o con pendiente mínima no se tendrán en cuenta en el desarrollo de la metodología. Estas regiones planas son utilizadas por los animales para pastar y además no están implicadas en movimientos significativos entre dos puntos de interés, por lo que nos quedamos con lo más destacada que va hacia el bosque. (véase la Fig. 20b).
- Cabe destacar que en las zonas húmedas cercanas a arroyos o cauces de ríos es más fácil identificar las huellas porque éstas son más claramente visibles en el suelo. En cambio, en zonas con más vegetación o hierba distinguir las huellas no es tan sencillo, aunque esto no implica que los animales no atraviesen estas regiones.
- En las zonas rocosas no es posible detectar trayectorias completas de animales, ya que su paso no deja huellas en las rocas.
- En general, las trayectorias de los desplazamientos de los animales se ven interrumpidas por los siguientes obstáculos naturales: masas de agua continuas o intermitentes, la entrada o salida de zonas boscosas o arboladas, el paso por terrenos rocosos y, por último, la presencia de una carretera o camino asfaltado.

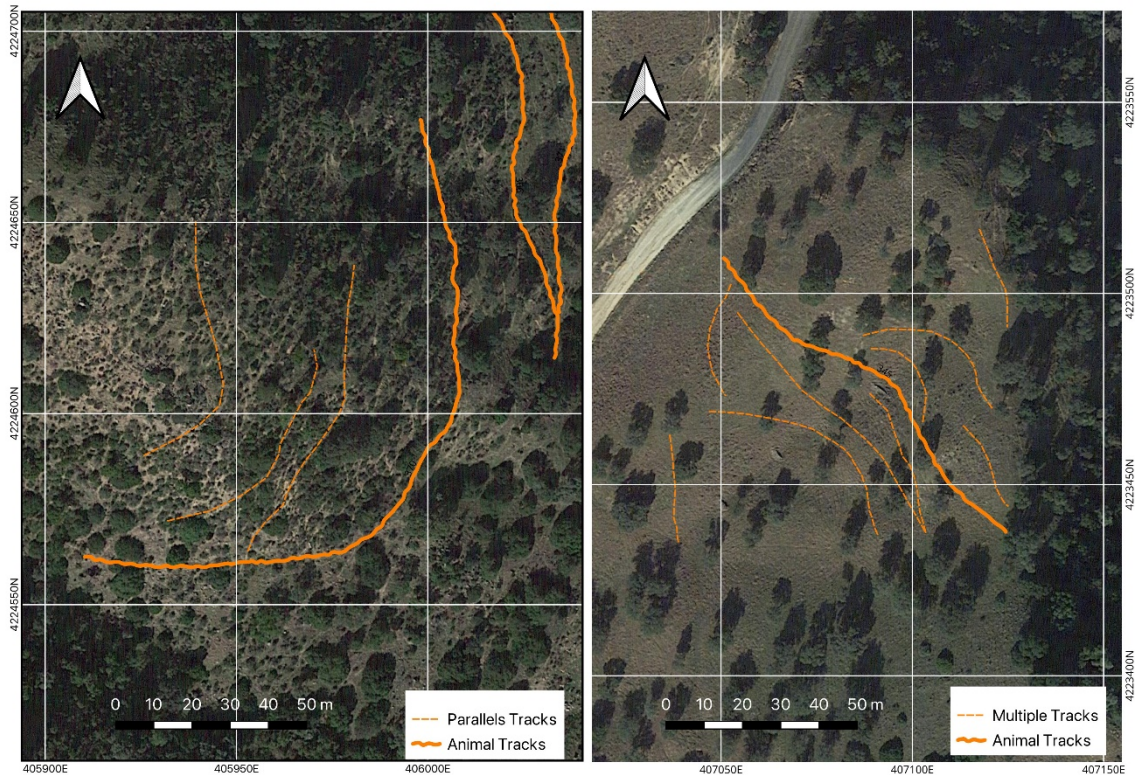


Fig. 20. A. Ejemplo de múltiples trayectorias paralelas (se toman las más largas y prominentes) y B. Imagen de una zona plana con múltiples trayectorias.

La digitalización de las huellas de animales, tal como se propone, proporciona información crucial para comprender los patrones de movimiento de la fauna y su influencia en el ecosistema. La Fig. 21 ilustra un ejemplo real de digitalización de la trayectoria de un animal en una región de la zona de estudio. Como se puede observar, es evidente que los animales se mueven típicamente en fila, manteniendo la tipología de sendero que se ha digitalizado en esta fase del estudio.



Fig. 21. Imágenes panorámicas con el movimiento de los cérvidos.

Posteriormente, para la generación de las trayectorias animales espaciales resultantes sobre la información cartográfica digital del área de estudio, se emplean capas de fricción. La definición de estas capas de fricción se realiza utilizando un Modelo Digital del Terreno (MDT) de alta precisión generado a partir de datos LiDAR del MDT05 (paso de malla 5m) (0,25 a 0,50 m/pixel) con una densidad de 0,5 puntos/m² y una precisión altimétrica (RMSE Z: Root-Mean Square Error en componente Z) mejor que 40 cm, disponible en el Instituto Geográfico Nacional (IGN). Posteriormente, la pendiente (en grados) se obtuvo a partir del MDT (Modelo Digital del Terreno). Todos los cálculos se realizaron utilizando QGIS. En consecuencia, las trayectorias digitales de animales generadas presentan una precisión análoga a la establecida para el MDT.

Estas trayectorias se enriquecieron con atributos calculados digitalmente a partir de capas de fricción generadas en el sistema de información geográfica QGIS. Los atributos que componen finalmente la base de datos de las trayectorias animales resultantes son los siguientes:

- ID: Identificador numérico único de la trayectoria.
- Ascenso: Distancias ascendentes acumuladas en la trayectoria (inferidas de la capa de elevación).
- Descenso: Distancias de descenso acumuladas en la trayectoria (deducidas de la capa de elevación).
- Elevación máxima: Elevación máxima en la trayectoria (inferida de la capa de elevación).

- Mínima elevación: Elevación mínima en la trayectoria (inferida de la capa de elevación).
- PendienteMáx: Pendiente máxima de la trayectoria (deducida de la capa de pendiente).
- PendienteMín: Pendiente mínima de la trayectoria (deducida de la capa de pendiente).
- Longitud2D: Longitud proyectada en el plano horizontal de la trayectoria.
- Length3D: Longitud espacial tridimensional de la trayectoria (inferida de la capa de 30 elevaciones).

Fase 2: para comprobar que la modelización digital de las huellas y las trayectorias animales definidas es válida, se realiza una verificación sobre el terreno. La fase 2 consiste en el trazado preciso en campo de un porcentaje estimado de rutas para comprobar su correspondencia con la realidad física. Es decir, a partir de las trayectorias animales digitales resultantes, y utilizando las correcciones de la Red Andaluza de Posicionamiento (RAP), se realiza una verificación real e in situ mediante un dispositivo de medición GPS. El equipo de campo utilizado es el Trimble Geoexplorer Geo7x, un receptor y antena GNSS de doble frecuencia con tecnología Trimble R-Track. Alcanza una precisión centimétrica con correcciones diferenciales (precisión horizontal de 10 mm + 1 ppm RMS y precisión vertical de 15 mm + 1 ppm RMS).

Una vez finalizado el proceso de digitalización de las trayectorias de los animales y la verificación experimental de las mismas en la región del terreno objeto de estudio se genera un modelo, a partir de las variables topográficas de las trayectorias obtenidas de la digitalización del terreno, para generar trayectorias digitales de animales análogas a partir de dos puntos del terreno objeto de estudio. Para ello, se propone establecer, a partir de los resultados obtenidos, un análisis de regresión lineal, utilizando el software de cálculo numérico Matlab R2, que permita modelizar la relación entre los principales parámetros topográficos de las trayectorias digitales de animales. Todo ello con el fin de generar, a partir de dos puntos cualesquiera del terreno objeto de estudio, trayectorias digitales de animales similares a las obtenidas anteriormente.

Por último, la Fig. 22 muestra el diagrama de flujo de la metodología desarrollada para el reconocimiento y la digitalización de los recorridos de los animales en la zona de estudio, sin necesidad de marcarlos ni de controlarlos.

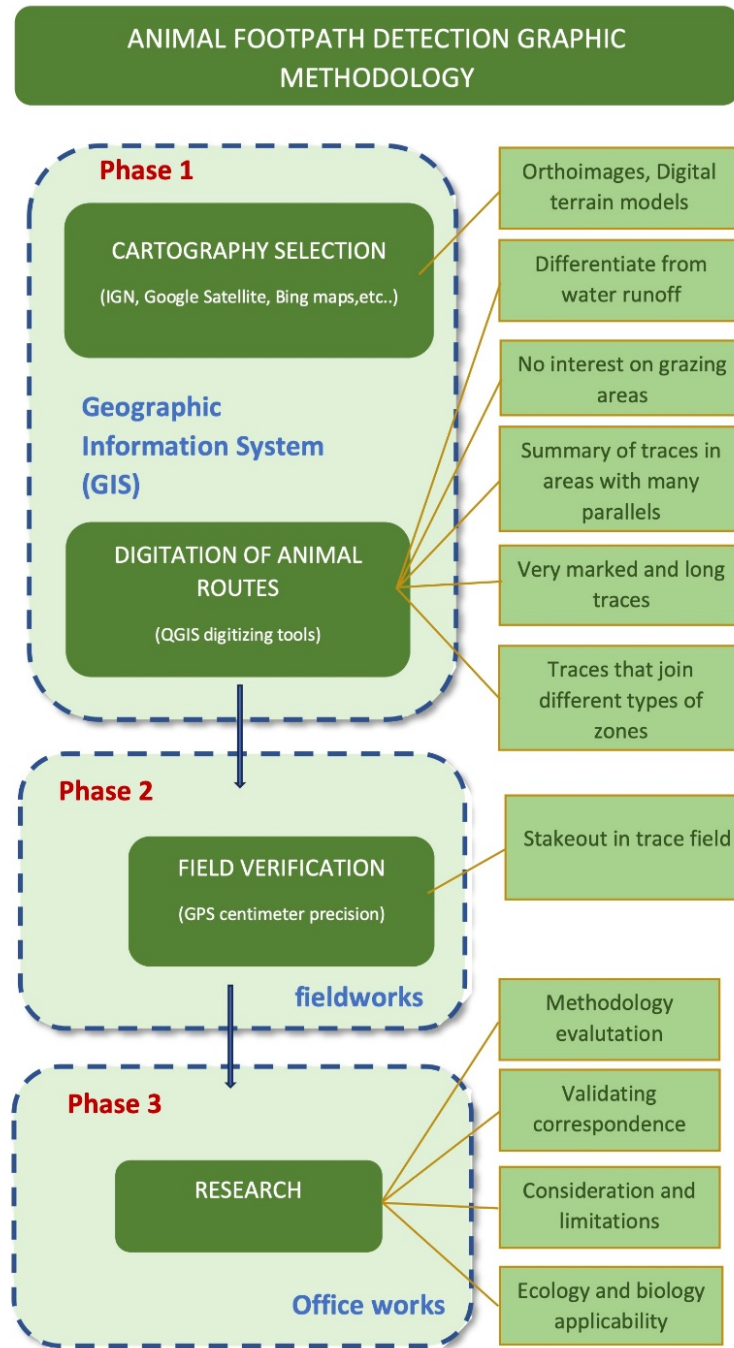


Fig. 22. Organigrama de la metodología desarrollada trabajo de campo/oficina.

4.2.5. Resultados

La aplicación de la metodología de reconocimiento gráfico de huellas de animales a partir de ortofotos ha arrojado resultados significativos y reveladores sobre el comportamiento de la fauna salvaje en la zona de estudio. Su aplicación y utilización es sencilla y requiere una formación básica. En concreto, este trabajo de investigación ha permitido la digitalización de un total de 413 trayectorias muestreadas (ver Fig. 23), abarcando aproximadamente kilómetros de movimientos de animales. Existen estudios que utilizan técnicas de detección automática de trayectorias sobre el terreno (Sahani y Ghosh, 2021), lo que ayudaría en nuestra propuesta, pero el tamaño de la huella animal de la trayectoria dificulta su aplicación. Esta metodología proporciona una visión detallada y cercana del movimiento del animal, mientras que el seguimiento de animales marcados nos da una visión más amplia debido a los tiempos de recogida de datos, actualmente limitados por la tecnología. El seguimiento monitorizado de animales nos permite determinar sus hábitats, grandes desplazamientos y movimientos migratorios, etc. La metodología aquí presentada nos permite profundizar en el detalle de estos movimientos a una escala mucho más cercana, y entendemos que, a esta escala, la topografía es el factor determinante en el movimiento de los animales.

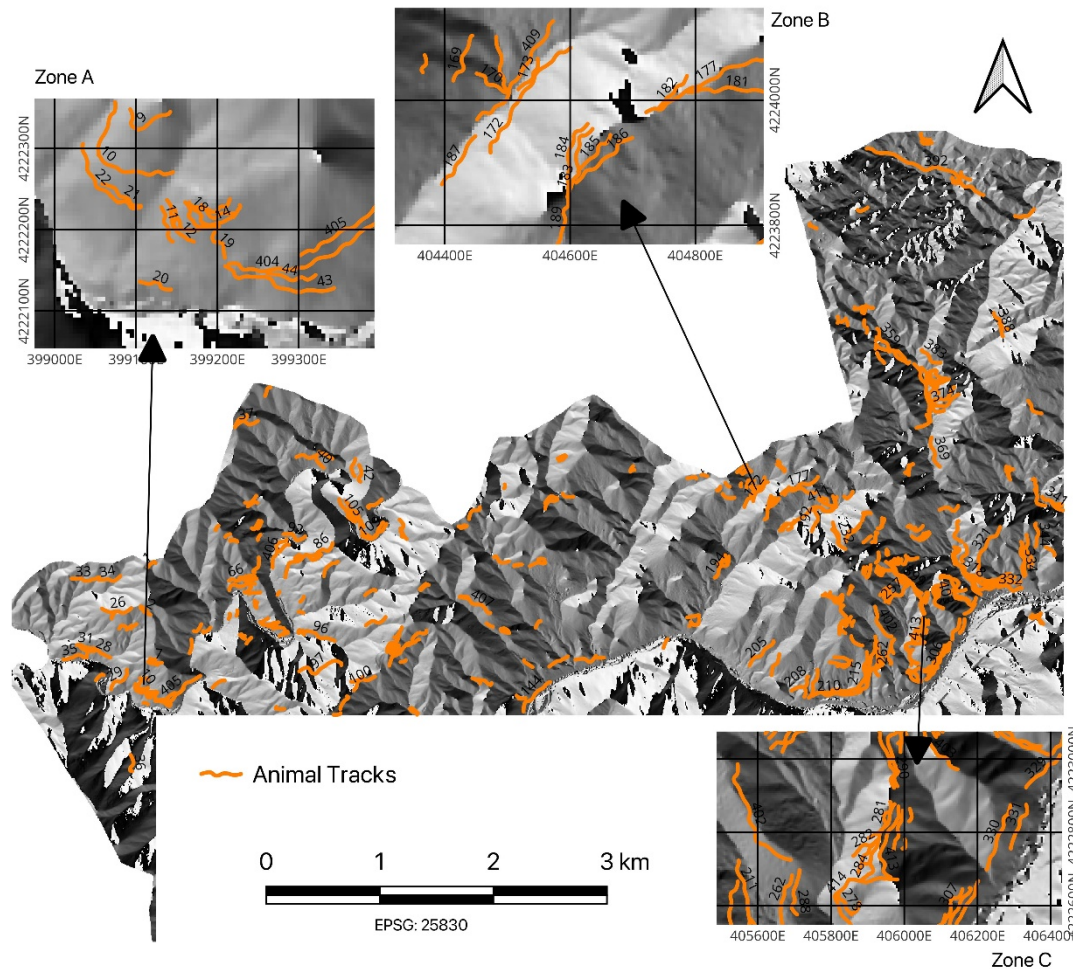


Fig. 23. Representación gráfica de las trayectorias digitales de los animales resultantes.

La Tabla 6 se genera como primer resultado obtenido sobre los datos asociados a cada trayectoria generada a partir de las diferentes capas de fricción (MDT y Pendientes). En ella se muestran los valores medios y otros parámetros estadísticos de longitud de trayectoria, pendiente máxima, pendiente mínima, altura máxima y altura mínima comparados con los valores generales de la zona geográfica. Esto ya nos está proporcionando una descripción a escala cercana de los hábitos de movimiento de estos animales, como el hecho de que los animales se mueven aprovechando al máximo la región de gran altitud de la zona de estudio, ya que las elevaciones de las trayectorias oscilan entre 224 y 645 metros. Sin embargo, tomando como referencia el parámetro de la pendiente, los animales prefieren desplazarse por caminos con una pendiente menor, entre 0° y 32° , con valores de pendiente del terreno que oscilan entre 0° y 68° . Además,

la descripción gráfica de los desplazamientos de los animales se obtiene a escala detallada (véase la Fig. 20), de modo que la localización de los desplazamientos de los animales en toda la zona de estudio puede verificarse de forma rápida y directa. Este proceso digital contribuye a reducir el tiempo y los costes asociados al seguimiento de una especie. Evidentemente, los métodos tradicionales de marcaje y seguimiento de animales no sólo no entran en conflicto con esta metodología, ya que subyacen problemas como la obtención de la dirección espacio temporal del movimiento del ejemplar, limitaciones en la digitalización de trayectorias referidas a problemas con zonas rocosas o boscosas, o el problema de zonas donde las ortofotos no presentan la resolución necesaria para su uso, o no existen, sino que la complementan.

Tabla 6. Valores estadísticos resumidos en trayectorias digitalizadas 3D de animales.

	Long. Track [m]	Pendiente Max. [°]	Pendiente Min. [°]	Pendiente Max. [m]	Pendiente Min. [m]
Media	127.9	27.2	13.8	384.2	369.5
Mediana	99	27.7	13.7	382.7	360.1
Desviación Std.	97	6.6	7.8	90.6	92.3
Minima	13.4	7.2	0.3	228.6	225.1
Maxima	834.1	45.9	31.8	630.6	622.3
Valores área	-	68.9	-	644.2	224.5
Geográfica					

En este contexto, las herramientas desarrolladas por Calenge et al. (2009) para discernir y analizar el comportamiento animal a través de trayectorias GPS pueden ser valiosas para comprender la información detallada obtenida en la descripción gráfica del movimiento. Del mismo modo, Fernández-Rodríguez et al. (2023) sobre el intervalo de adquisición de datos en collares GNSS destaca la importancia de la precisión temporal en el seguimiento de animales, un aspecto crucial a la hora de verificar y validar las trayectorias digitales.

Para validar la metodología, algunas de las trayectorias muestreadas fueron reconsideradas en campo con la idea de verificar que lo que se reconocía gráficamente no eran otros accidentes geográficos, sino huellas de animales. Los resultados obtenidos en el trabajo de campo muestran que las trayectorias digitales de los animales obtenidas coinciden significativamente con las trayectorias reales en el lugar determinado (ver Fig. 24). En cuanto al nivel de coincidencia, puede variar ligeramente, dado que ha transcurrido algún tiempo entre la obtención de la ortofotografía y la realización de la

revisión de campo y las manadas de animales pueden haber variado ligeramente su paso en algunos puntos.

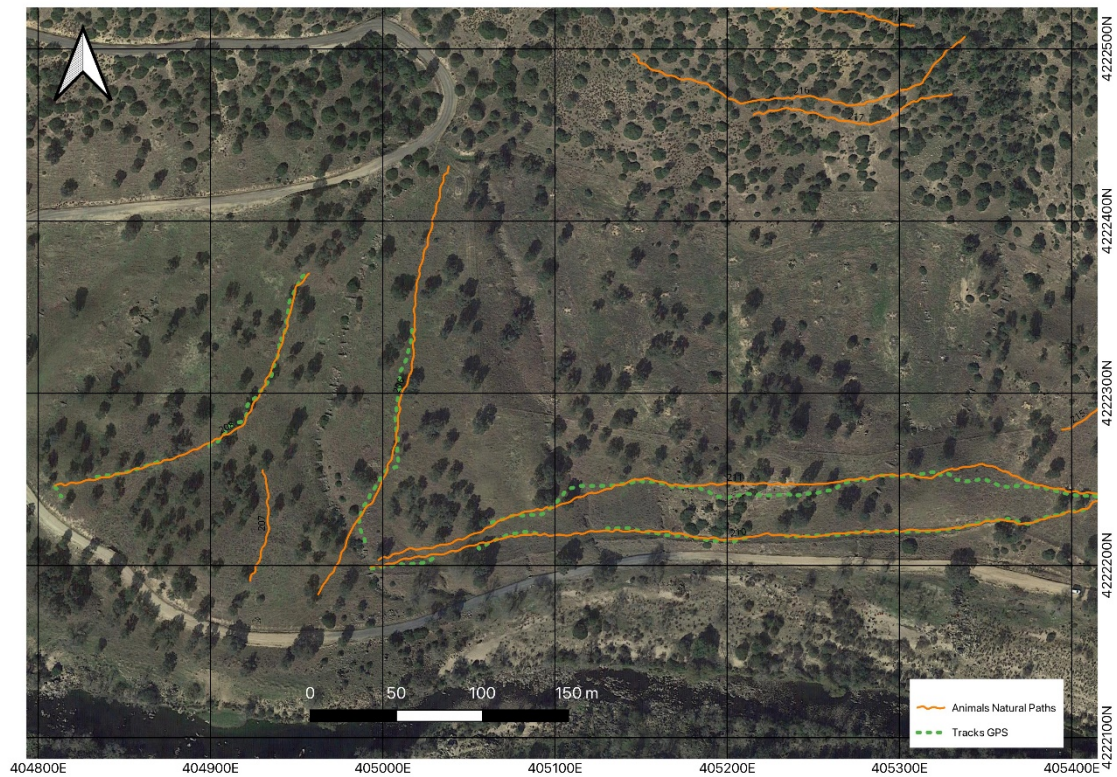


Fig. 24. Comparación de recorridos de campo GPS con recorridos digitalizados.

En este punto, pueden incorporarse las conclusiones de Morita et al. (2020) sobre las diferencias individuales en las trayectorias de los animales, que podrían explicar las variaciones observadas en el nivel de concordancia entre las trayectorias digitales y las reales. Además, el trabajo de Marshall et al. (2022) sobre la medición 3D del comportamiento animal podría contribuir al debate, ya que la validación de campo también podría beneficiarse de herramientas avanzadas de medición 3D para evaluar la precisión de las trayectorias digitales en contextos naturales y oclusivos. Entendemos que el grado de aproximación es adecuado a lo que se pretende demostrar, es decir, que lo que se aprecia en la ortofoto coincide con la realidad sobre el terreno en cuanto al paso de animales por la zona. Esta afirmación se ve reforzada por la información aportada por Klasen y Steinhage (2022) sobre cómo el uso de sistemas de seguimiento basados en cámaras puede evitar problemas comunes en el seguimiento tradicional, apoyando así la fiabilidad de la metodología propuesta.

Finalmente, una vez validado el proceso digital de generación de trayectorias para el desplazamiento de los animales, es importante evaluar cómo los factores topográficos del terreno influyen o condicionan la selección de las rutas de desplazamiento de los animales. Para ello, a partir de los parámetros topográficos obtenidos del modelo digital del terreno en cada una de las trayectorias digitales resultantes de los animales, se aplica un modelo de regresión lineal para analizar la relación entre la variable dependiente Ascenso+Descenso y la longitud 3D (L3D). En particular, la pendiente estimada en el modelo es igual a 0,2272 y este coeficiente es significativamente diferente de cero (valor $p < 0,01$). En términos de bondad de ajuste, el modelo ajustado explica más del 90% de la variabilidad total de Ascenso + Descenso. La Fig. 25 muestra el diagrama de dispersión junto con la línea de regresión ajustada.

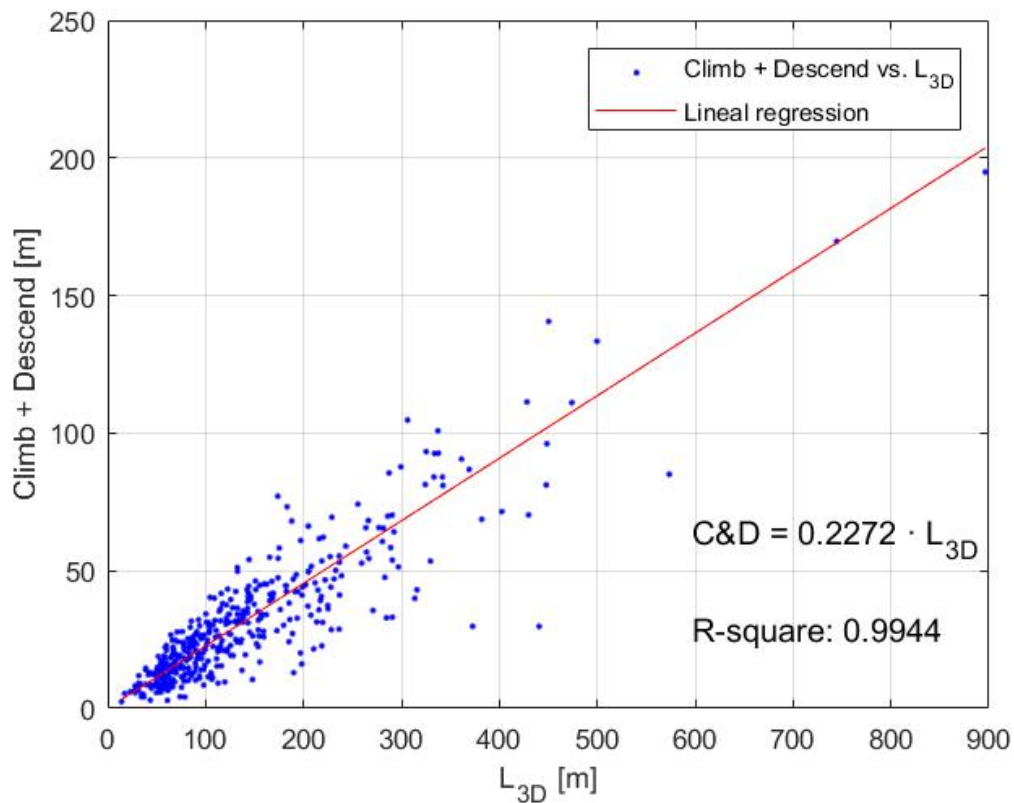


Fig. 25. Representación de la regresión lineal generada para el análisis de los factores topográficos de la zona estudiada.

De forma similar a la contribución de los autores basada en puntos de localización que predicen distribuciones espaciales de especies (Zaniewski et al., 2002), nosotros basamos nuestras predicciones en trayectorias de senderos 3D y regresión lineal

relacionando parámetros topográficos del terreno y fuimos capaces de predecir la localización de las rutas preferidas por los ciervos en el área de estudio. Para evaluar el modelo ajustado, se programó un conjunto de posibles trayectorias digitales alternativas desde dos puntos del área de estudio, como se muestra en la Fig. 26, con sus correspondientes parámetros topográficos. A partir de la ecuación estimada derivada del modelo de regresión lineal, se seleccionó la trayectoria mejor ajustada.

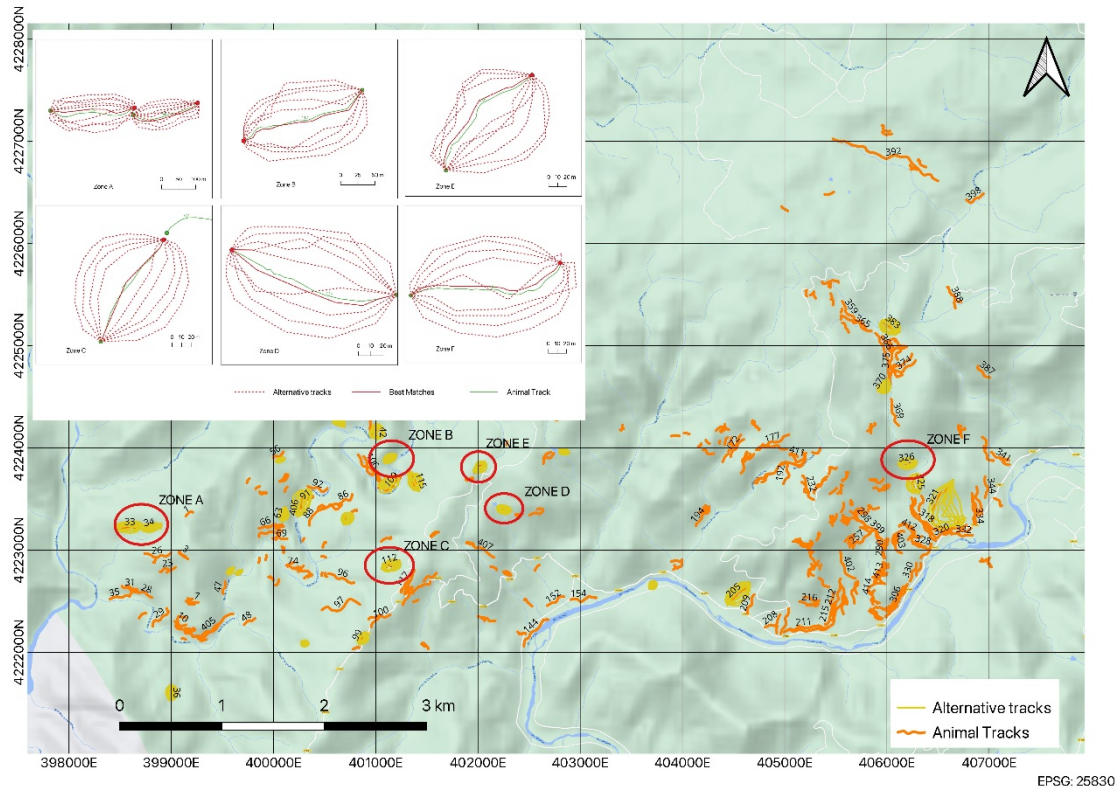


Fig. 26. Representación digital gráfica de las trayectorias animales resultantes.

Este modelo ajustado, basado en el análisis de parámetros topográficos del terreno, ha sido evaluado y validado para cada una de las trayectorias digitales resultantes en el área de estudio. Adicionalmente, proporciona información valiosa para promover la conservación del hábitat natural de las especies y sus principales rutas de desplazamiento, así como la posibilidad de implementar mecanismos de asistencia o preservación de las especies y generar nuevos corredores naturales potenciales para las mismas. Además, ayuda a reducir el tiempo y los costes asociados a las tareas de mantenimiento relacionadas con los especímenes animales, mejorando la sostenibilidad

de estas operaciones y creando un entorno menos invasivo y más seguro para los animales.

Como se muestra en la Fig. 26, el modelo ajustado se ha evaluado y validado utilizando información de un conjunto específico de trayectorias digitales previamente analizadas. De esta forma, se generan diferentes trayectorias alternativas a partir de dos puntos cualesquiera dentro del área de estudio (ver Fig. 26), y considerando la información sobre sus parámetros topográficos asociados, se determina cuál de ellas se aproxima mucho a la trayectoria real del animal. Como puede observarse en la Fig. 26, la selección de la trayectoria simulada resultante del modelo de regresión lineal se asemeja mucho a la trayectoria real. Cabe señalar que esta validación se ha verificado con éxito para cada trayectoria digital generada.

Los factores topográficos que determinan el desplazamiento de los animales, en ausencia de otros impedimentos naturales o artificiales, son principalmente la pendiente acumulada a lo largo de la ruta y la longitud total. No parece que la altitud absoluta del camino desempeñe un papel importante. A partir de las distintas trayectorias de animales obtenidas mediante digitalización comparadas con distintas alternativas aleatorias para desplazarse de un punto a otro (véase la Fig. 26), se han analizado los factores descritos anteriormente. En muchos casos, se ha comprobado que la trayectoria seguida por el animal tiene la mejor pendiente acumulada y la distancia más corta. En otros casos, el animal mejora la pendiente, pero una de las alternativas es más ventajosa en términos de distancia, o viceversa (en el 54% de los casos). En los casos en que la ruta elegida por el animal no tiene los mejores parámetros, está muy cerca de ellos. En este último caso, entendemos que algún factor puede haber influido en la selección de la ruta, que, lógicamente no se tuvo en cuenta en las alternativas aleatorias.

4.2.6. Conclusiones

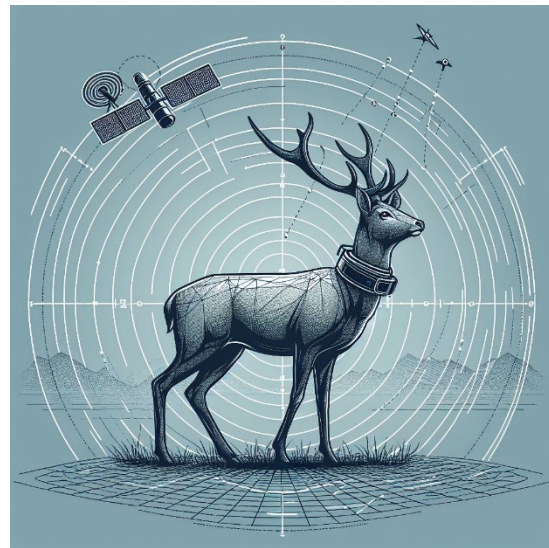
Los resultados obtenidos respaldan plenamente la metodología propuesta, que utiliza tecnologías punteras como los sistemas de información geográfica (SIG), ortofotos de alta resolución y dispositivos GNSS para verificar las trayectorias de movimiento. Esta metodología destaca por su versatilidad y aplicabilidad en diversos terrenos y hábitats, lo que la convierte en una valiosa herramienta tanto para la investigación científica como para la gestión de la conservación de la fauna. Se muestra como un complemento,

a una escala más cercana, al seguimiento de animales con dispositivos de rastreo, mejorando sus limitaciones, como la falta de visibilidad en determinadas zonas o bajo ciertas características morfológicas del terreno, donde algunos puntos de localización obtenidos con el seguimiento pueden ayudar a completar o conectar determinadas rutas. Además, el seguimiento monitorizado ayudaría a determinar la variable espacio temporal del movimiento del animal, es decir, con la metodología propuesta tenemos el trazado de la ruta, pero desconocemos la dirección del movimiento, mientras que si se complementa con técnicas tradicionales se puede determinar esta variable. Por otro lado, con las técnicas tradicionales no conocemos el detalle a escala cercana del movimiento del animal, sino la localización exacta en un momento determinado. Con nuestra metodología, podemos determinar con detalle cuáles son las rutas preferidas para conectar estos puntos adquiridos con las tecnologías tradicionales de seguimiento de especies y qué factores topográficos influyen en ellas.

La metodología aquí desarrollada ha sido validada y verificada mediante trabajo de campo. Mediante mediciones precisas con técnicas de topografía GPS, se ha comprobado que cada una de las trayectorias digitales generadas mediante herramientas SIG se ajustan a las trayectorias reales realizadas por los animales sobre el área de estudio.

Esta metodología alimenta el conocimiento de los parámetros geográficos en los que se mueven los animales y amplía la comprensión de los movimientos de los cérvidos, contribuyendo significativamente a la toma de decisiones en las estrategias de conservación de la fauna y proporcionando una base sólida para la gestión sostenible de las poblaciones de cérvidos y sus hábitats.

Las pruebas analíticas de las trayectorias han demostrado que el comportamiento de movimiento de los cérvidos es predecible. Los resultados demuestran la utilidad de la metodología presentada que, al proporcionar y relatar valiosa información topográfica sobre las áreas de movimiento y tránsito, puede orientar las prácticas de gestión sostenible de las poblaciones de cérvidos y sus hábitats.



4.3. Mejora de la precisión y exactitud del seguimiento de la fauna salvaje con collares GNSS multiconstelación y multifrecuencia

Artículo:

Garrido-Carretero, M. S., Azorit, C., de Lacy-Pérez de los Cobos, M. C., Valderrama-Zafra, J. M., Carrasco, R., y Gil-Cruz, A. J. (2023). Improving the precision and accuracy of wildlife monitoring with multi-constellation, multi-frequency GNSS collars. *The Journal of Wildlife Management*, 87(4), e22378. <https://doi.org/10.1002/jwmg.22378>

Cuartil: (2022) Q3 JCR (ECOLOGY); (2022) Q1 JCR (ZOOLOGY). Indicio de calidad: 2.3

4.3.1. Introducción

El término sistema mundial de navegación por satélite (GNSS) abarca cada uno de los sistemas de posicionamiento por satélite y la combinación de varios sistemas (Hofmann-Wellenhof et al., 2008). Un sistema GNSS está compuesto por una constelación de satélites y una red de estaciones de control. Estos satélites transmiten a los dispositivos GNSS la información horaria y orbital para aplicaciones de navegación y posicionamiento (Alonso et al., 2020, Caporali y Zurutuza 2021). Actualmente existen 4 sistemas de posicionamiento global por satélite desplegados: el Sistema de Posicionamiento Global de Estados Unidos (GPS), el sistema ruso GLObalnaya NAvigatsionnaya Sputnikovaya Sistema (GLONASS), el sistema europeo Galileo y el sistema chino BeiDou. Estos sistemas dan lugar a un sistema multiconstelación y multifrecuencia denominada multi-GNSS (Teunissen y Montenbruck 2017). Puede encontrarse una descripción detallada del segmento espacial en Pan et al. (2019). Una vez que los sistemas GPS, GLONASS, Galileo y BeiDou estén completamente desplegados, habrá más de 140 satélites disponibles para aplicaciones de navegación y posicionamiento (Li et al., 2022). El número de señales y servicios GNSS ya desplegados ha permitido nuevos niveles de rendimiento en términos de precisión, cubriendo una amplia gama de áreas de aplicación, como la topografía y la geomática (Garrido et al., 2018, 2019; Tunini et al., 2022), la ingeniería (Barzaghi et al., 2018, Pipitone et al., 2018, Xiao et al., 2019), y ciencias ambientales (Awange 2018), y estudios recientes muestran las ventajas de las soluciones multiconstelación que consideran varias técnicas de posicionamiento GNSS (Gao et al., 2019, Liu et al., 2020, Dardanelli et al., 2021, Li et al., 2021, Paziewski et al., 2021). Con el actual escenario multiconstelación, un dispositivo GNSS que antes era capaz de recibir señales satelitales de unos 8 satélites GPS a cielo abierto ahora puede acceder a más de 30 satélites, aunque a costa de una menor duración de la batería. Más satélites y más señales disponibles mejoran la precisión de la posición. Además, la disponibilidad de un mayor número de satélites permite al receptor GNSS elegir el subconjunto mejor distribuido geométricamente para obtener una solución de gran precisión (Weiss 2021). Además, la integración de datos multifrecuencia conduce a una mayor precisión, un menor tiempo de convergencia y un mejor rendimiento en la resolución de ambigüedades (Geng y Guo 2020, Xin et al., 2020, Psychas et al., 2021).

Un único receptor GNSS mide la pseudodistancia a los satélites visibles y determina la posición del receptor (longitud, latitud y altura) con una precisión de unos pocos metros, así como el sesgo del reloj en el modo de posicionamiento de punto único. Las fuentes de error que afectan a las señales GNSS y, por tanto, a la estimación de la posición, se asignan a 3 grupos principales (Seeber 2003): errores del satélite (reloj del satélite y órbita del satélite), error del receptor (ruido del reloj del receptor) y errores de propagación de la señal (ionosfera, troposfera y trayectos múltiples; Fig. 27). La ionosfera es un medio dispersivo, por lo que la refracción de la señal GNSS depende de sus frecuencias. Este efecto puede minimizarse combinando diferentes frecuencias (modelo de combinación libre de ionosfera). Para un receptor de una sola frecuencia, el retardo ionosférico es el error de pseudodistancia dominante. La troposfera también produce un retardo en las señales GNSS. Dado que la troposfera es un medio no dispersivo, este efecto depende de la trayectoria de la señal GNSS. Puede modelarse como una función del ángulo de elevación del satélite. En la literatura científica existen varios modelos troposféricos (por ejemplo, Sastamoinen, Hopfield) (Xu, 2007). La multitrayectoria se produce cuando las señales GNSS se reflejan en una superficie o en objetos cercanos a la antena GNSS, como árboles. Las señales reflejadas interfieren con las señales que llegan directamente de los satélites, lo que constituye una de las principales fuentes de error en el entorno forestal (Grala y Brach, 2009). El multitrayecto afecta tanto a las mediciones de fase portadora como a las de pseudodistancia y puede reducirse mitigando las señales GNSS de baja elevación.

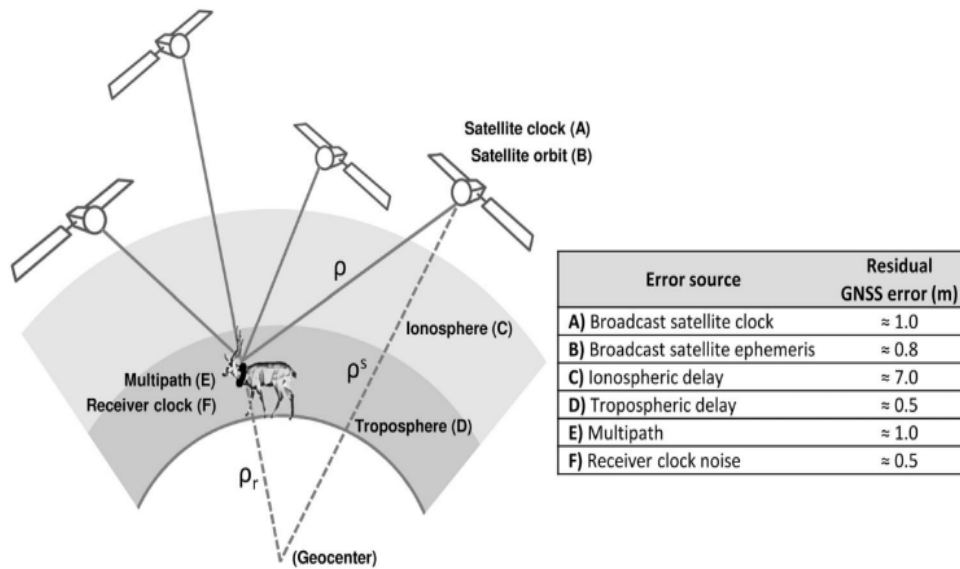


Fig. 27. Fuentes de error que afectan a las señales del sistema mundial de navegación por satélite (GNSS) y magnitudes típicas del error GNSS residual. ρ_s es el vector espacial relativo al geocentro, ρ_r es el vector de posición geocéntrica del dispositivo GNSS y ρ es el alcance geométrico a cada satélite.

Las mejoras tecnológicas en los dispositivos GNSS, debidas principalmente a su capacidad multifrecuencia, reducen el tiempo de adquisición de la señal y aumentan la disponibilidad, fiabilidad, continuidad y precisión del posicionamiento GNSS, especialmente en entornos complejos como las zonas montañosas y el entorno forestal (Pan et al., 2019). Los módulos GNSS multifrecuencia de código y fase ofrecen nuevas oportunidades a las aplicaciones actuales y abren la puerta a aplicaciones emergentes que requieren una gran precisión. Una aplicación de la tecnología GNSS que puede beneficiarse de los módulos GNSS multifrecuencia es el seguimiento de animales salvajes con collares satelitales. Las tecnologías de localización de animales salvajes han evolucionado considerablemente en las últimas décadas. Desde los años 90, el uso de collares GPS para el estudio y seguimiento de la fauna salvaje no ha dejado de crecer, y la bibliografía demuestra la variada información que puede obtenerse de la investigación basada en collares GPS (Rodgers et al., 1996, Bowman et al., 2000, Rodgers, 2001). Sin embargo, las tecnologías basadas en satélites utilizadas hasta la fecha tienen sus limitaciones y el funcionamiento irregular de los collares (pérdida de datos por fallos en la fijación e inexactitud o error en la localización) puede producir datos que no sean adecuados para todas las cuestiones ecológicas o dar lugar a resultados sesgados si se analizan sin tener en cuenta la calidad de los datos. Además,

las características del hábitat y el comportamiento animal influyen en la transmisión de la señal, afectando a la tasa de éxito de la fijación y al error de localización (Cain et al., 2005). Frair et al. (2010) muestran que algunos parámetros, como las estimaciones del área de campeo, son robustos a la imprecisión de la localización. Sin embargo, las localizaciones con sesgo de hábitat y las rutas de movimiento imprecisas, también afectadas por el intervalo de fijación, pueden resultar inadecuadas para los análisis ecológicos. La literatura científica reciente contiene numerosos ejemplos de cómo se utilizan los datos de los collares GPS en el seguimiento de la fauna silvestre para modelar el hábitat (Laguna et al., 2021), e identificar el movimiento de los animales y el uso del paisaje (Wittemyer et al., 2019, Gray et al., 2022), las estrategias migratorias (Peterson et al., 2022), lugares de depredación (Irvine et al., 2022), lugares de nacimiento (Dion et al., 2019, Marchand et al., 2021, Hooven et al., 2022) y lugares de captura (Hampton et al., 2020, Bengsen et al., 2021), o para definir el comportamiento social (Davis et al., 2018, Wielgus et al., 2021). Las mejoras en la tecnología GNSS permiten una recopilación de datos más fiable de los collares; por lo tanto, se pueden investigar nuevas cuestiones ecológicas. Actualmente, los dispositivos GNSS tienen el potencial de recopilar grandes cantidades de soluciones de seguimiento de animales, 24 horas al día, en todas las condiciones meteorológicas e incluso en condiciones desfavorables debidas a la topografía, la cubierta vegetal o el comportamiento animal.

Este estudio se centra en las mejoras de posicionamiento introducidas por un módulo multiconstelación multifrecuencia en un collar GNSS. El objetivo principal era evaluar el rendimiento del collar, comparando los errores de localización y otros parámetros de calidad de los collares GNSS equipados con módulos GNSS monofrecuencia o multifrecuencia mediante pruebas estáticas y cinemáticas. La hipótesis de este estudio era que el collar GNSS multifrecuencia multiconstelación proporciona información precisa y a escala cercana en comparación con el collar monofrecuencia.

4.3.2. Área de estudio

Este estudio se llevó a cabo en la provincia de Jaén (sureste de España) desde febrero de 2021 hasta junio de 2022. El área de estudio se caracteriza por una topografía que combina colinas y valles con una cubierta forestal mediterránea, moderadamente

alterada por olivares convencionales y plantaciones de pinos, y muestra un paisaje multifuncional caracterizado por una variedad de usos forestales, agrarios y ganaderos.

Las pruebas estáticas se realizaron en el Campus de la Universidad de Jaén ($37^{\circ}47'16''\text{N}$, $3^{\circ}46'40''\text{W}$), a una altitud aproximada de 455 m sobre el nivel medio del mar (Fig. 28A). Para las pruebas cinemáticas se seleccionaron 3 rutas, R1, R2 y R3, a lo largo de 3 zonas montañosas en un entorno rural de la provincia de Jaén (Fig. 28B). La primera zona ($37^{\circ}46'48''\text{N}$, $3^{\circ}50'3''\text{W}$), delimitada por R1, abarca 120 ha con una elevación que oscila entre 579-735 m sobre el nivel medio del mar. La segunda, R2 ($37^{\circ}36'6''\text{N}$, $3^{\circ}45'24''\text{W}$), tiene 2.320 ha y una elevación sobre el nivel medio del mar de 927-1.516 m. La última, R3 ($37^{\circ}42'32''\text{N}$, $3^{\circ}41'31''\text{W}$), abarca 12.400 ha con una elevación media de 850 m sobre el nivel medio del mar.



Fig. 28. A) Localización de los pilares geodésicos STB2 y STB3 para el ensayo estático realizado en el Campus de la Universidad de Jaén, España, del 16 al 25 de febrero de 2021 mostrando el receptor y la antena geodésicos del sistema global de navegación por satélite (GNSS) (A1), el receptor GNSS de bajo coste y la antena de parche activo (LCR; A2), el collar GNSS multifrecuencia (MFC; A3) y el collar GNSS monofrecuencia (SFC; A4). B) Rutas R1, R2 y R3 para la prueba cinemática realizada en Jaén, España, en junio de 2021 y 2022 mostrando el equipo para la ruta R1 (LCR, MFC y SFC, ordenador portátil y mochila; B1) y equipo y vehículo para las rutas R2 y R3 (B2).

4.3.3. Metodología

4.3.3.1. Dispositivos GNSS

En este estudio utilizamos 4 dispositivos GNSS diferentes: 2 receptores terrestres y 2 collares (Figura V-2). El equipo GNSS geodésico estaba compuesto por un receptor GR10 de Leica Geosystems y una antena de grado geodésico LEIAR10 con un gran plano de tierra y radomo incorporado (Leica Geosystems, St. Gallen, Suiza). La aplicación general de esta antena GNSS es en estaciones de referencia de funcionamiento continuo (CORS) y para aplicaciones de posicionamiento de alta precisión. El receptor GR10 es capaz de observar hasta 60 satélites y soportar el

seguimiento paralelo de múltiples señales, incluyendo GPS (L1/L2P/L2C/L5), GLONASS (L1/L2/L3/L5), Galileo (E1/E5a/E5b/E6) y BeiDou (B1/B2/ B3). En condiciones estándar, la precisión nominal (media cuadrática) en modo estático de fase diferencial, línea de base hasta 30 km, es de 5 mm + 0,5 ppm para componentes horizontales y 10 mm + 0,5 ppm para componentes verticales (Leica Geosystems 2011). Utilizamos este dispositivo GNSS en la prueba estática para estimar las posiciones de referencia.

El receptor GNSS multifrecuencia de bajo coste (LCR) es una placa de aplicación U-blox C099-F9P que incluye un módulo de posicionamiento de alta precisión ZED-F9P (U-blox, Thalwil, Suiza). Este receptor, que ofrece una amplia usabilidad, ha sido objeto de numerosas investigaciones (Hamza et al., 2021; Janos y Kuras, 2021; Wielgocka et al., 2021). Con una antena de parche GNSS multibanda activa con base magnética, el módulo GNSS ZED-F9P rastrea todas las constelaciones GNSS y procesa señales GPS (L1C/A, L2C), GLONASS (L1OF, L2OF), Galileo (E1B/C, E5b) y BeiDou (B1I, B2I). Para mitigar el efecto multitrayectoria, la antena de parche debe instalarse sobre un plano de tierra metálico de 10 cm de diámetro. También se han implementado algoritmos antijamming y antispoofing para descartar señales no deseadas (U-blox AG 2021a). El software gratuito U-center (U-blox AG 2021b) permite configurar y gestionar el receptor y recoger los mensajes de salida y las coordenadas. El fabricante especifica como término asociado a la precisión de la posición horizontal un error circular probable (CEP) igual a 1,5 m para 24 horas de observación estática (U-blox AG 2020). La probabilidad CEP es del 50%. La desviación típica circular, σ_c (probabilidad del 39,4%), es una función de las desviaciones típicas para una estación horizontal (Ec. (4)).

$$\sigma_c \simeq (1/2)(\sigma_N + \sigma_E) \quad (4)$$

El factor de conversión entre σ_c y CEP para la distribución circular normal es 1.1774 (Greenwalt and Shultz 1962; Ec. (5)).

$$\text{CEP} = 1.1774 \sigma_c \quad (5)$$

En este estudio probamos 2 collares GNSS, con un diseño y componentes similares, pero con módulos GNSS y prestaciones diferentes. Ambos collares incluían un módulo

GNSS y una antena, un microprocesador y componentes electrónicos auxiliares unidos a sensores adicionales. Cada collar tenía un número de serie único, que se inserta en todos los nombres de los archivos de datos producidos. La información sobre la posición del collar se extrae de la señal de la National Marine Electronics Association (NMEA). La principal diferencia entre los collares era que el collar GNSS multifrecuencia (MFC) estaba equipado con el mismo módulo ZED-F9P y antena de parche multibanda activa que el LCR; por lo tanto, esperábamos una precisión de posición horizontal similar. El collar GNSS de frecuencia única (SFC) estaba equipado con un módulo U-blox IT530M y una antena. Este módulo multi-GNSS recibe señales GPS (L1^{C/A}), GLONASS (L1) y QZSS (L1^{C/A}). Aunque se trata de un módulo de una sola frecuencia, al utilizar satélites GPS y GLONASS en paralelo puede mejorar la disponibilidad de la posición en condiciones de visibilidad obstruida de los satélites. La precisión de posición (CEP) declarada por el fabricante es de 3,0 m (U-blox AG 2013). Las precisiones indicadas por los fabricantes corresponden a condiciones ideales. Las condiciones atmosféricas reales, el efecto multitrayectoria, la visibilidad de los satélites y la geometría de la constelación dan lugar a valores superiores. Utilizamos el LCR para evaluar el rendimiento de la MFC en la prueba estática y para definir las pistas de referencia en la prueba cinemática.

4.3.3.2. Pruebas estáticas y cinemáticas

Para evaluar las prestaciones de los dispositivos GNSS en modo estático, realizamos la prueba en 2 pilares geodésicos situados en el edificio de Ciencia y Tecnología del Campus de la Universidad de Jaén, identificados como STB2 y STB3. Dichos pilares cuentan con una monumentación de alta precisión, buena visibilidad del cielo y un entorno libre de multitrayecto. Cada pilar geodésico está compuesto por un cilindro de 1,20 m de altura y 0,30 m de diámetro, apoyado sobre una base de hormigón con centro reforzado para asegurar la colocación precisa y estable de los dispositivos GNSS.

En las pruebas cinemáticas, movimos los collares GNSS por un entorno de bosque y montaña para simular la trayectoria de un mamífero salvaje. Recorrimos 3 rutas, identificadas como R1, R2 y R3, a pie (R1) y en coche (R2 y R3) para analizar el rendimiento de los dispositivos GNSS en movimiento. Caminamos los 6,3 km de la ruta R1 por un sendero a una velocidad normal para simular el movimiento de los animales. Recorrimos la ruta R2 de 25,8 km por una pista forestal a una velocidad media de 20

km/hora. Recorrimos la ruta R3 de 50 km por pistas forestales y caminos rurales a una velocidad media de 30 km/hora. Recogimos las 3 rutas con el LCR, el MFC y el SFC simultáneamente, por lo que supusimos que no había diferencias en sus condiciones de observación.

El rendimiento de un dispositivo GNSS se caracteriza por varios parámetros estadísticos de calidad. Normalmente, los procedimientos de certificación suponen un archivo de registro de posición durante un largo intervalo de tiempo en una posición conocida o sobre una trayectoria conocida en pruebas cinemáticas. Los datos GNSS, incluyendo el tiempo de adquisición en Tiempo Universal Coordinado (UTC), la posición y el número de satélites de seguimiento se registran en diferentes escenarios. Para analizar el rendimiento del posicionamiento GNSS con un receptor GNSS de bajo coste y 2 collares GNSS, seleccionamos la disponibilidad y la continuidad de las soluciones, el número de satélites utilizados, la dilución de precisión (DOP), la precisión, la exactitud y la repetibilidad de los parámetros de calidad. La disponibilidad de la solución o fijaciones satisfactorias GNSS es la capacidad de un dispositivo GNSS para proporcionar una posición dentro del área de cobertura. Este término está relacionado con los collares GNSS (SFC y MFC). La posición del collar siempre se estima utilizando el posicionamiento de punto único con observaciones de pseudodistancia de código. La continuidad es la capacidad de realizar su función sin interrupciones durante la vida útil estimada de la batería. Este parámetro se evalúa mediante la tasa de éxito de fijación, dividiendo el número de fijaciones con éxito por el número de intentos de fijación (Fischer et al., 2018). El número de satélites utilizados es el número de satélites considerados para el cálculo de la posición del receptor. En el posicionamiento GNSS, una buena geometría de los satélites es crucial para garantizar la robustez de la solución. El DOP es una descripción de la contribución puramente geométrica a la incertidumbre de posición. Indica la fuerza geométrica de la constelación de satélites en la época temporal de la medición (Gao et al., 2017). Este parámetro adimensional disminuye cuando las condiciones son favorables. Los términos estándar son la dilución horizontal de la precisión (HDOP) y la dilución vertical de la precisión (VDOP). Un número bajo de satélites produce valores altos de HDOP y VDOP que disminuyen la precisión del posicionamiento. Los valores inferiores a 2 se consideran valores óptimos. La precisión y la exactitud representan conceptos cualitativos. La precisión proporciona la conformidad entre una posición GNSS estimada y la posición verdadera (la posición de

referencia determinada con un nivel máximo de precisión). Según la Organización Internacional de Normalización (2012), el error de medición es la diferencia entre el valor medido (posición GNSS recogida) y el valor de referencia (posición de referencia estimada). Así pues, una posición es más precisa que otra si el error de medición es menor. Se calcula el valor medio del error de medición para las componentes norte y este. La precisión horizontal se evalúa mediante el error medio de localización, que es la distancia euclidiana media entre la posición de cada collar GNSS y la posición de referencia (Forin-Wiart et al., 2015). La precisión describe la dispersión de las posiciones de collar calculadas para un collar GNSS que permanece estacionario. La precisión se calcula en términos de la desviación circular estándar (σ_c) y el círculo de error probable (CEP), basada en la desviación estándar para las componentes norte y este (σ_N y σ_E). Para analizar la repetibilidad de los parámetros de calidad, realizamos 3 sesiones de observación independientes correspondientes a 3 días consecutivos. En cada lugar de prueba, realizamos el estudio GNSS en condiciones de repetibilidad: el mismo observador y los mismos dispositivos GNSS utilizados en las mismas condiciones, en el mismo lugar y durante un breve periodo de tiempo (Taylor y Kuyatt 1994). Utilizamos 2 muestras de posición independientes de 2 sesiones de observación utilizando el mismo collar GNSS para determinar si las diferencias entre los errores medios de localización eran significativas (nivel de significación 0,05) utilizando una prueba *t de student* (Teunissen 2000).

Para las pruebas estáticas, colocamos los dispositivos GNSS en los pilares geodésicos en condiciones de cielo abierto (Tabla 7). Para estimar las posiciones de referencia, colocamos 2 receptores GNSS geodésicos en los pilares geodésicos STB2 y STB3. La sesión preliminar (S0) fue una sesión de 24 horas con una frecuencia de muestreo de 30 segundos. Para comparar el rendimiento del LCR y el MFC (prueba A), utilizamos 3 sesiones de observación independientes, de 8 horas cada una, en los pilares STB2 y STB3, identificadas como S1, S2 y S3. Para cada sesión, establecimos una tasa de fijación de 10 minutos, completando un tamaño de muestra de 48 posiciones por sesión. En cada intento de fijación, el collar GNSS está programado para recoger información del satélite durante un máximo de 240 segundos. Recogimos las posiciones del LCR utilizando una frecuencia de muestreo de 1 segundo y extrajimos las posiciones del software U-center identificando la época UTC común con el MFC. Además, realizamos

2 sesiones de 24 horas, no simultáneas (S5 y S6), con collares GNSS para resaltar las mejoras introducidas por el módulo GNSS multifrecuencia en comparación con un módulo de frecuencia única (prueba B). Mantuvimos la frecuencia de fijación de 10 minutos, ampliando el tamaño de la muestra a 144 registros. Ambos collares GNSS están programados para retener la información del satélite antes de intentar una localización fija en modo continuo, siguiendo la configuración estándar de los collares GPS (Moriarty et al., 2015). Para la determinación precisa de las coordenadas de referencia, procesamos los archivos de formato de intercambio independiente del receptor (RINEX) de 24 horas en modo de posicionamiento de punto preciso (Zumberge et al., 1997) utilizando el software de código abierto RTKLib versión 2.4.3 (Takasu 2010). En el modo de posicionamiento preciso por puntos, RTKLib aplica un proceso de estimación de filtro de Kalman ampliado (Gelb 1974). La solución de posicionamiento puntual preciso se basa en la combinación ionosfera limpia con observaciones no diferenciadas de satélites GNSS. El método utiliza efemérides precisas, desplazamiento del centro de fase y variación del centro de fase proporcionados por el Servicio Internacional GNSS y aplica un modelo troposférico para eliminar el efecto troposférico con retardo total cenital estimado. La ambigüedad de fase inicial se estima como un valor flotante. Para evitar los efectos multitrayectoria, se utiliza un ángulo de corte de 8° . Una vez procesados los datos GNSS y estimado un valor de referencia (posición verdadera) para cada lugar de prueba, las coordenadas geocéntricas (X, Y, Z) o geodésicas (latitud, longitud y altura del elipsoide) de todas las posiciones recogidas por los dispositivos GNSS se transforman en sus componentes horizontales norte y este. Aunque los levantamientos realizados con dispositivos GNSS arrojan coordenadas tridimensionales en el sistema geocéntrico, por conveniencia estas coordenadas se convierten a coordenadas geodésicas (Meyer 2010). Considerando una posición de referencia con coordenadas geocéntricas $(X, Y, Z)_R$, y una posición GNSS registrada con coordenadas $(X, Y, Z)_i$, es práctica común transformar los componentes tridimensionales $(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)$ en un sistema geodésico local de componentes norte, este y vertical. El sistema geodésico local está centrado en la posición de referencia y los ejes norte y este están en un plano horizontal local. El sistema local o topocéntrico está vinculado al sistema de coordenadas geocéntrico a través de un conjunto de rotaciones tridimensionales (Ghilani y Wolf 2010). Considerando la posición de referencia estimada por el modo de posicionamiento puntual preciso, N_i y E_i

representan el error de medición en las componentes norte y este, respectivamente, de la i -ésima posición registrada. Se genera una muestra de componentes (N, E) por sesión (Fig. 29).

Tabla 7. Descripción de las pruebas estáticas y cinemáticas y de las sesiones de observación (S0 a S9) realizadas en Jaén, España, de febrero de 2021 a junio de 2022 con un receptor geodésico de sistemas mundiales de navegación por satélite (GNSS), un receptor GNSS multifrecuencia (LCR) de bajo coste, un collar GNSS multifrecuencia (MFC) y un collar GNSS monofrecuencia (SFC).

Test	Test ID	Sesión ID	Fecha (DOY-Día del año)	Longitud	Dispositivo GNSS (Lugar Geodésico o ruta)
Estático	-	S0	15 Feb 2021 (046)	24 hr	Geodetic (STB2 and STB3)
	A	S1	16 Feb 2021 (047)	8 hr	LCR (STB3) and MFC (STB2)
		S2	17 Feb 2021 (048)	8 hr	LCR (STB3) and MFC (STB2)
		S3	18 Feb 2021 (049)	8 hr	LCR (STB3) and MFC (STB2)
	B	S4	18 Feb 2021 (049)	24 hr	MFC (STB2)
		S5	25 Feb 2021 (056)	24 hr	SFC (STB3)
Cinemático	C	S6	18 Jun 2021 (169)	90 min	LCR, MFC and SFC (R1)
		S7	19 Jun 2021 (170)	90 min	LCR, MFC and SFC (R2)
		S8	20 Jun 2021 (171)	100 min	LCR, MFC and SFC (R2)
		S9	20 Jun 2021 (171)	100 min	LCR, MFC and SFC (R3)

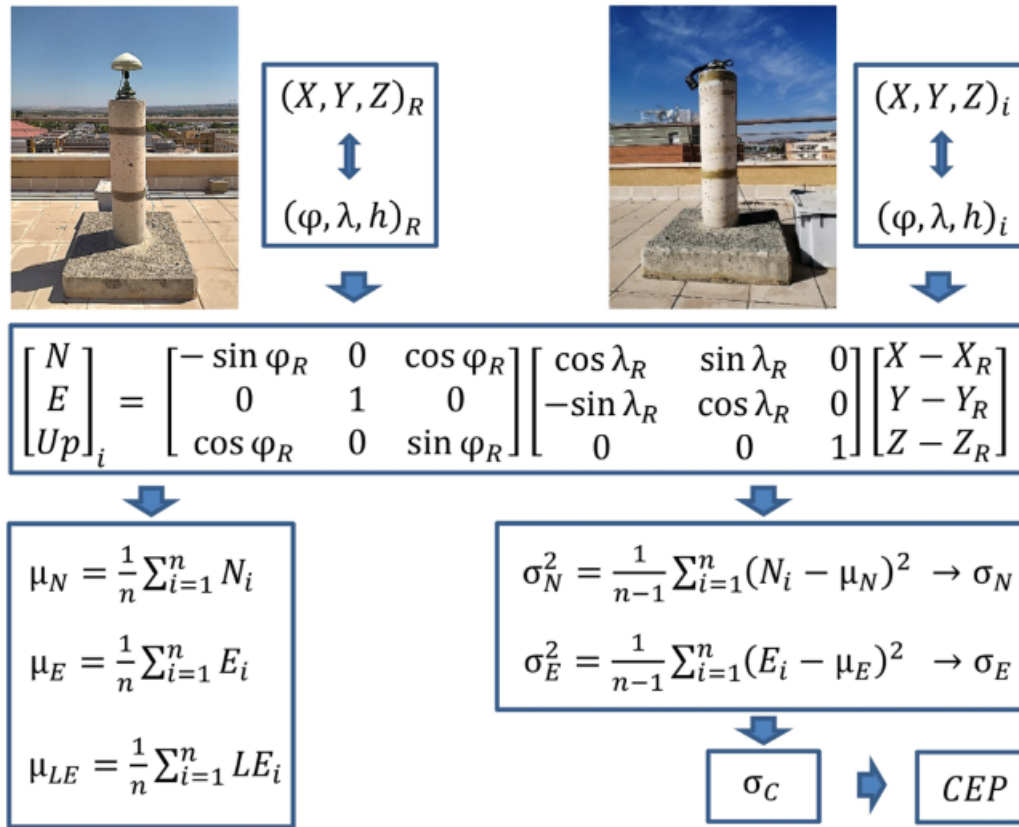


Fig. 29. El diagrama de flujo para la transformación de las coordenadas geocéntricas (X, Y, Z) en coordenadas geodésicas (latitud $[\varphi]$, longitud $[\lambda]$ y altura del elipsoide $[h]$), la estimación del error de medición en las componentes norte y este (N_i y E_i) de la posición i -ésima registrada por los dispositivos de los sistemas mundiales de navegación por satélite (GNSS) en comparación con la referencia (R), el valor medio de los errores de medición (μ_N , μ_E), el error medio de localización (μ_{LE}), las desviaciones típicas de las componentes norte y este (σ_N y σ_E), la desviación típica circular (σ_C) y la probabilidad de error circular (CEP).

Para analizar el rendimiento de los collares GNSS en movimiento, comparamos las fijaciones correctas de la MFC y la SFC recogidas en la época UTC más cercana con un seguimiento de referencia. Definimos los tracks de referencia para R1, R2 y R3 utilizando el LCR a una velocidad de fijación programada de 1 segundo. Ambos collares GNSS están programados con una tasa de fijación de 10 minutos para obtener localizaciones espaciadas uniformemente. Además, Moriarty y Epps (2015) sugieren que los intervalos de fijación cortos pueden reducir el error del GPS al retener la información satelital y pueden aumentar la cantidad de datos recopilados sobre mamíferos en libertad asociados con áreas de cobertura vegetal. Informamos de los mismos parámetros de evaluación que para las pruebas estáticas: el número de fijaciones con éxito, la tasa de éxito de las fijaciones, el número de satélites utilizados y

el HDOP. Calculamos la precisión relativa como el error de localización relativo, la distancia más corta entre las posiciones correspondientes de los collares GNSS y la pista GNSS de referencia (polilínea generada por los segmentos definidos por cada par de posiciones consecutivas obtenidas con el LCR). Realizamos 4 sesiones de observación cinemática, S6 a S9, sobre las rutas R1, R2 y R3 (Tabla 7). Para analizar la repetibilidad de los resultados cinemáticos, realizamos 2 sesiones de observación independientes en la ruta R2 (S7 y S8).

4.3.4. Resultados

4.3.4.1. Test estáticos

En el test A, en la que se compararon el LCR y el MFC, ambos dispositivos GNSS mostraron una tasa de éxito del 100%. El error medio de localización fue de 0,464-0,751 m para el LCR y de 1,36-1,40 m para el MFC (Tabla 8), lo que dio lugar a posiciones estimadas más agrupadas del LCR (Fig. 28). El LCR tuvo un círculo de error probable que osciló entre 0,334 m (S1) y 0,389 m (S3). Este valor varió de 0,90 m (S2) a 1,09 m (S1) para el MFC. Para la MFC, los errores medios de localización no difirieron significativamente entre S1 y S2 ($t = -0,208$, $P = 0,835$), entre S2 y S3 ($t = 0,198$, $P = 0,843$), ni entre S1 y S3 ($t = -0,007$, $P = 0,994$). Para el LCR, el número de satélites duplicó los valores del MFC (Tabla 8). El HDOP fue siempre inferior a 2 para ambos dispositivos GNSS (es decir, los resultados del HDOP indicaron fijaciones de alta calidad). Se observó un ligero sesgo en los gráficos de dispersión de las posiciones registradas por la MFC, más evidente en la dirección norte. Esto se debió al número de decimales considerados por la MFC. El LCR mostraba todos los dígitos registrados en la frase NMEA, mientras que el MFC sólo consideraba 7 dígitos. El redondeo al número entero más próximo introdujo un sesgo en las coordenadas estimadas próximas al CEP asociado al módulo ZED-F9P utilizado por el LCR, en este caso en el nivel de 30 cm.

Tabla 8. Repetibilidad de los parámetros de evaluación de la prueba estática A de las prestaciones de los dispositivos del sistema mundial de navegación por satélite (GNSS) realizada en la Universidad de Jaén (España) durante las sesiones S1, S2 y S3 del 16 al 18 de febrero de 2021: número de fijaciones correctas (n_f), tasa de fijaciones correctas (FSR), error medio de localización (μ_{LE}), desviación típica circular (σ_C), probabilidad de error circular (CEP), número medio de satélites utilizados (SV) y dilución horizontal media de la precisión (HDOP).

Test A Parametro	Receptor Bajo-coste GNSS (LCR)			Multi-frecuencia GNSS (MFC)		
	S1	S2	S3	S1	S2	S3
n_f	48	48	48	48	48	48
FSR	100%	100%	100%	100%	100%	100%
$\mu_{LE} \pm SD$ (m)	0.464 ± 0.247	0.526 ± 0.286	0.751 ± 0.331	1.36 ± 0.79	1.40 ± 0.89	1.36 ± 0.81
σ_C (m)	0.283	0.312	0.331	0.92	0.76	0.85
CEP (m)	0.334	0.367	0.389	1.09	0.90	1.00
SV $\pm$ SD	28 ± 2.2	28 ± 2.3	27 ± 2.0	15 ± 7.5	15 ± 8.2	15 ± 7.1
HDOP $\pm$ SD	0.5 ± 0.1	0.5 ± 0.1	0.5 ± 0.1	0.9 ± 0.2	0.9 ± 0.2	0.8 ± 0.2

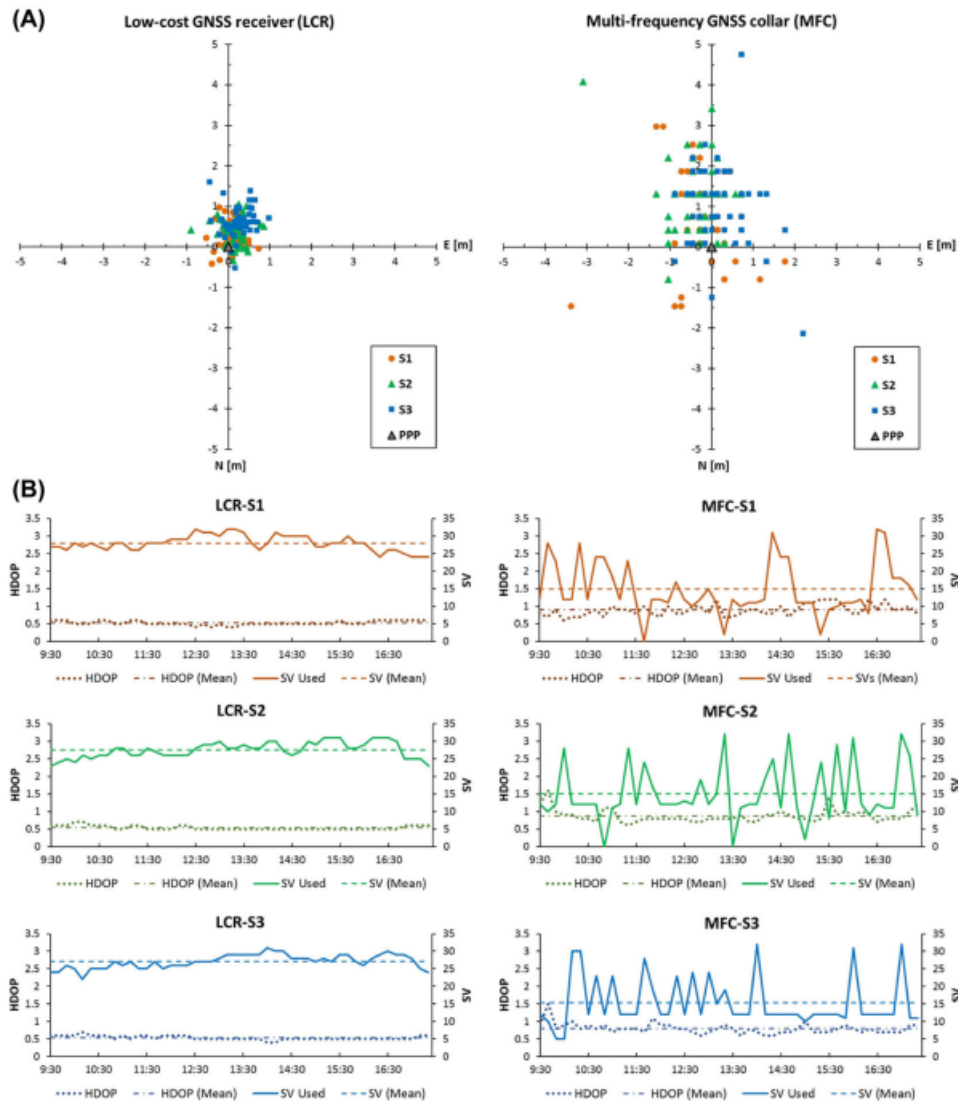


Fig. 30. A) Gráficos de dispersión de los errores de localización durante las sesiones S1, S2 y S3 para un receptor de sistemas mundiales de navegación por satélite (GNSS) de bajo coste (LCR; izquierda) y para un collar GNSS multifrecuencia (MFC; derecha). La etiqueta del eje vertical (N) se refiere a la dirección norte y la etiqueta del eje horizontal (E) se refiere a la dirección este. Se utilizó una solución de posicionamiento puntual preciso (PPP) para establecer la referencia. B) Número de satélites (SV) y valores de dilución horizontal de precisión (HDOP) por sesión (S1-S3) para el LCR (izquierda) y el MFC (derecha). El eje horizontal muestra el tiempo en horas. Realizamos la prueba estática A en la Universidad de Jaén, España, del 16 al 18 de febrero de 2021.

En el test B, en la que se compararon las posiciones estáticas del MFC y el SFC, ambos collares mostraron tasas de éxito de fijación del 100% (Tabla 9). Claramente, el SFC presentó un error medio de localización mayor (11,96 m) que el MFC (1,15 m) y un menor número de satélites rastreados (Fig. 31); Tabla 9), lo que tuvo un impacto directo en los valores HDOP. El círculo de desviación estándar estimado y el círculo de error probable fueron mucho mayores para el SFC que para el MFC (Tabla 9).

Tabla 9. Resultados de los parámetros de evaluación de la prueba estática B del rendimiento de los dispositivos del sistema mundial de navegación por satélite (GNSS) realizada en la Universidad de Jaén, España, el 18 de febrero (sesión S4) y el 25 de febrero (sesión S5) de 2021: número de fijaciones con éxito (n_f), tasa de éxito de las fijaciones (FSR), error medio de localización (μ_{LE}), desviación típica circular (σ_C), probabilidad de error circular (CEP), número medio de satélites utilizados (SV) y dilución horizontal media de la precisión (HDOP).

Test B parámetro	Multi-frequency GNSS collar (MFC) S4	Single-frequency GNSS collar (SFC) S5
n_f	144	144
FSR	100%	100%
$\mu_{LE} \pm SD$ (m)	1.15 ± 0.70	11.96 ± 13.05
σ_C (m)	0.83	12.39
CEP (m)	0.98	14.59
SV $\pm$ SD	14 ± 6.6	8 ± 2.2
HDOP $\pm$ SD	0.8 ± 0.1	1.3 ± 1.1

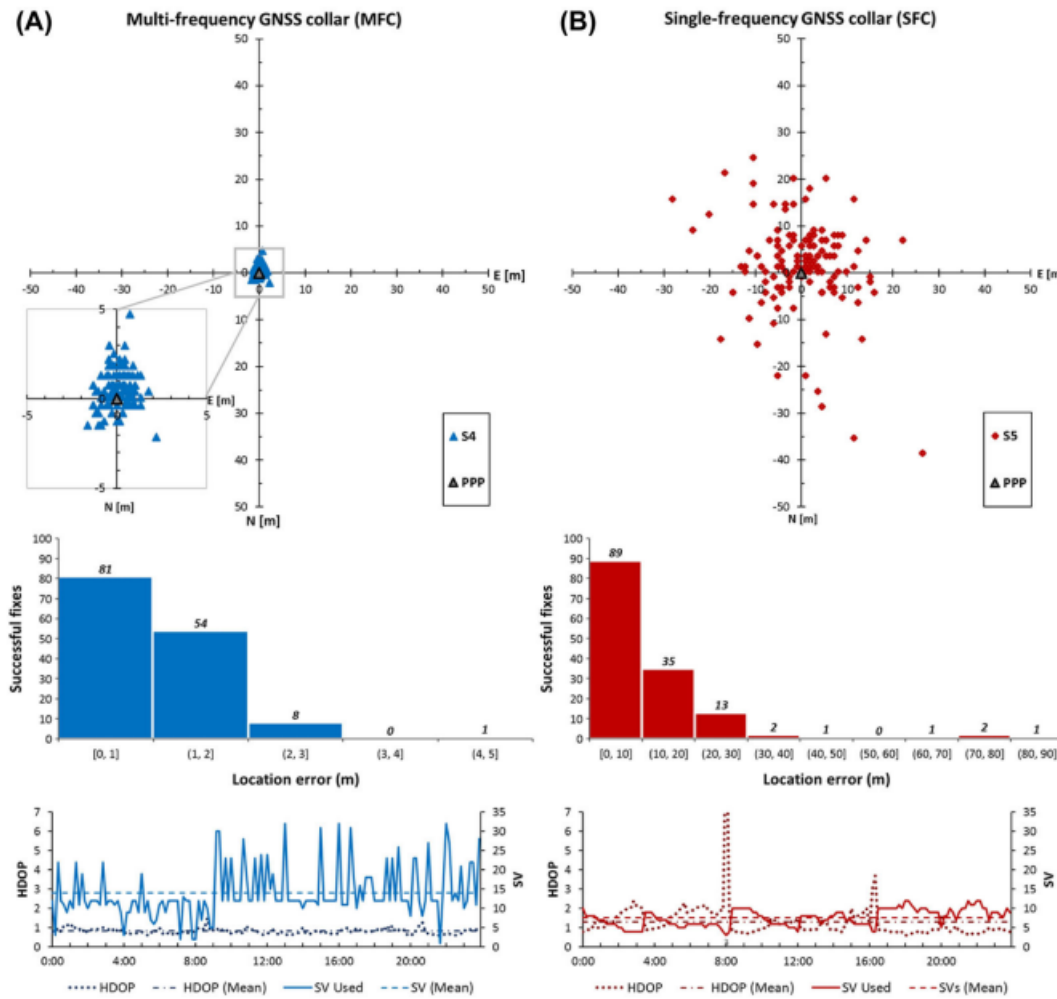


Fig. 31. Gráficos de dispersión de los errores de localización (la etiqueta N del eje vertical se refiere a la dirección norte y la etiqueta E del eje horizontal se refiere a la dirección este) durante las sesiones S4 y S5, histograma del error de localización, y número de satélites (SV) y valores de dilución horizontal de la precisión (HDOP) (el eje horizontal muestra el tiempo en horas) para el collar GNSS multifrecuencia (MFC; A) y para el collar GNSS monofrecuencia (SFC; B). Se utilizó una solución de posicionamiento puntual preciso (PPP) para establecer la referencia. En el gráfico de dispersión del SFC, 4 registros (los valores más grandes del histograma) están fuera de los rangos de error dibujados y no son visibles. Realizamos la prueba estática B en la Universidad de Jaén, España, del 18 al 25 de febrero de 2021.

4.3.4.2. Test cinemáticos

Las secciones de las rutas R1 y R2 diferían en la cobertura de la cubierta vegetal, el cielo abierto, la condición del bosque y la altitud (Fig. 32). Para R1 y R2, las posiciones para el MFC coincidieron aproximadamente con la ruta de referencia definida por el LCR; sin embargo, las posiciones se desviaron ligeramente de la ruta de referencia para el SFC (Fig. 32A, B). Por ejemplo, en un punto, la distancia entre la posición del SFC y la pista de referencia era de 5,6 m (Fig. 32B).

Esta fue aproximadamente la distancia media a la pista de referencia para este collar GNSS en R1. La distancia máxima al track de referencia para R2 considerando la solución SFC fue de 16.8 m (Fig. 32D). La MFC presentó valores medios para el error relativo de localización <2 m, mientras que los valores correspondientes para la SFC se situaron en torno a los 5 m.



Fig. 32. Definición planimétrica y altimétrica de la ruta R1, a pie (sesión S6), y de la ruta R2, en coche (sesión S7), con un receptor de sistemas mundiales de navegación por satélite (GNSS) de bajo coste (LCR; línea blanca), un collar GNSS multifrecuencia (MFC; puntos azules) y un collar GNSS monofrecuencia (SFC; puntos rojos). Realizamos la prueba cinemática C en Jaén, España, los días 18 y 19 de junio de 2021. Figura parcialmente derivada de ortofotografías del Programa Nacional de Ortofotografía de España PNOA-2019 CC-BY, scne.es.

En R3 se diferenciaron claramente tres secciones altimétricas (Fig. 33). Para la MFC, el error de localización relativo en un entorno cubierto con una topografía compleja fue ligeramente mayor que en un entorno abierto. En ambos casos, la MFC presentó un error de localización relativo menor que la SFC y la distancia máxima a la pista de referencia fue de 9,4 m para la SFC (Fig. 33A) y de 5,4 m para la MFC (Fig. 33B).



Fig. 33. Definición planimétrica y altimétrica de la ruta R3, en coche (sesión S9), con un receptor de sistemas mundiales de navegación por satélite (GNSS) de bajo coste (LCR; línea blanca), un collar GNSS multifrecuencia (MFC; puntos azules) y un collar GNSS monofrecuencia (SFC; puntos rojos). Realizamos la prueba cinemática C en Jaén, España, el 20 de junio de 2022. Figura parcialmente derivada de ortofotografías del Programa Nacional de Ortofotografía de España PNOA-2019 CC-BY, scne.es.

Ambos collares GNSS alcanzaron una tasa de éxito de fijación del 100% en todas las rutas y sesiones de observación (Tabla 10). La distancia más corta desde el MFC y el SFC a la pista de referencia R1 mostró un valor medio de 1,16 m y 5,38 m, alcanzando valores máximos de 2,21 m y 10,29 m, respectivamente. El número de satélites utilizados se redujo drásticamente en estas condiciones cinemáticas para el SFC, afectando a los valores de HDOP. Para R2 (S7), los valores medios de la distancia más corta estimada a la pista de referencia fueron de 1,96 m para el MFC y de 4,80 m para el SFC. Los valores máximos alcanzados fueron 4,02 m y 16,80 m, respectivamente. El número medio de satélites utilizados y los valores de HDOP fueron similares para ambos collares en esta sesión. El MFC mantuvo estable el valor medio de satélites utilizados y los valores HDOP en R1 y R2. En nuestro análisis de repetibilidad, la sesión repetida en la ruta R2 (S8) indicó valores similares a la sesión anterior para el error de localización relativo medio, el número de satélites y los valores HDOP. Para R3 (S9), el SFC alcanzó valores muy similares a las sesiones anteriores para la localización relativa media, con un valor medio igual a 4,75 m. Este valor se redujo a 2,09 m con el MFC.

Tabla 10. Resultados de los parámetros de evaluación para la prueba cinemática C y las rutas R1 (18 de junio de 2021, sesión S6), R2 (19 de junio de 2021, sesión S7, y 20 de junio de 2022, sesión S8), y R3 (21 de junio de 2022, sesión S9) realizadas en Jaén, España, con el collar GNSS multifrecuencia (MFC) y el collar GNSS monofrecuencia (SFC): número de fijaciones correctas (n_f), tasa de fijaciones correctas (FSR), error localización relativo (RLE), número de satélites utilizados (SV) y dilución horizontal de la precisión (HDOP).

Test C Parameter	Route R1		Route R2		Route R3			
	S6		S7		S8		S9	
	MFC	SFC	MFC	SFC	MFC	SFC	MFC	SFC
n_f	9	9	8	8	10	10	10	10
FSR (%)	100	100	100	100	100	100	100	100
RLE (m)			0.34					
Min.	0.07	3.35	4.02	0.01	0.19	0.02	0.20	0.15
Max.	2.21	10.29	1.96	16.80	3.36	12.91	5.43	9.38
x	1.16	5.38	1.31	4.80	1.16	4.72	2.09	4.75
SD	0.74	2.47		5.33	0.96	4.53	1.67	3.49
SV used			7					
Min.	9	4	12	7	8	5	5	5
Max.	12	4	10	9	11	7	12	7
x	12	4	2	8	9	6	10	6
SD	1	0		1	1	1	3	1
HDPOP			0.7					
Min.	0.8	1.8	2.1	1.0	0.8	1.0	0.8	1.0
Max.	1.2	2.6	1.3	1.7	1.7	1.6	2.6	1.9
x	0.9	2.0	0.5	1.3	1.3	1.4	1.3	1.4
SD	0.2	0.3		0.3	0.2	0.2	0.6	0.3

4.3.5. Conclusiones

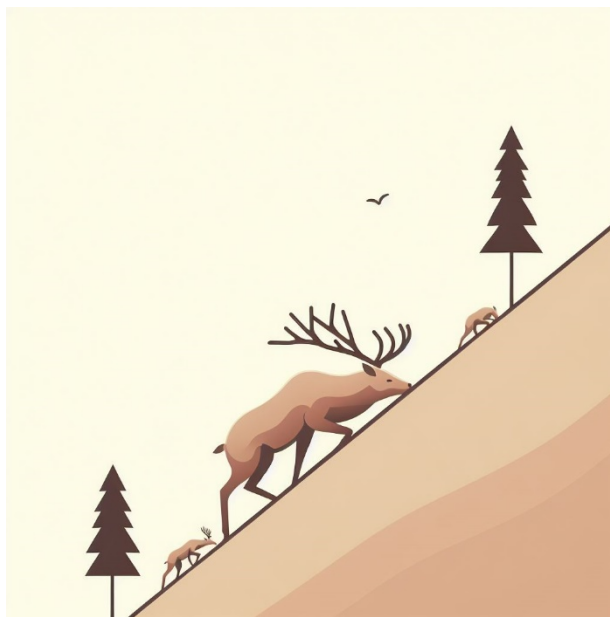
Analizamos la fiabilidad que puede ofrecer la tecnología GNSS más reciente para su uso en aplicaciones de fauna salvaje. Este trabajo supone un paso adelante con respecto a las pruebas anteriores de rendimiento de collares GPS realizadas en las últimas décadas (Cargnelutti et al., 2007, Yamazaki et al., 2009, Forin-Wiart et al., 2015, Schwartz et al., 2017). Confirmamos el alto rendimiento del nuevo collar GNSS multifrecuencia en condiciones estáticas. No obstante, los resultados sugirieron un rendimiento diferente en modo estático para el LCR y el MFC, a pesar de que ambos están equipados con el mismo módulo GNSS y se han probado en condiciones de observación muy similares. El MFC mostró una estrecha concordancia con el CEP comunicado por el fabricante del módulo ZED-F9P. El número de satélites utilizados por el MFC fue casi la mitad del utilizado por el LCR. En el futuro se realizarán pruebas adicionales para comprender y explicar mejor este aspecto. El LCR mostró un mejor rendimiento que el MFC, probablemente debido a la alta frecuencia de muestreo y a las avanzadas tecnologías de detección de interferencias y suplantación de identidad aplicadas por el LCR. Ambos dispositivos GNSS presentaron un rendimiento homogéneo a lo largo de las sesiones de observación. Basándonos en las pruebas estáticas, la MFC se caracteriza por un rendimiento estable y mejor que la SFC en términos de precisión, exactitud y capacidad de seguimiento de satélites GNSS. A la vista de los resultados, confirmamos que la desviación circular estándar y el círculo de error probable fueron mejores en aproximadamente un orden de magnitud para el MFC en comparación con el SFC. Los resultados de ambos collares GNSS fueron coherentes con los declarados por el fabricante de los módulos GNSS.

Realizamos la prueba cinemática en un entorno forestal para probar los collares GNSS en movimiento. Una vez más, el MFC mostró un mejor rendimiento que el SFC, con un valor medio de error relativo de localización aproximadamente 3 veces inferior al del SFC. El número de satélites se reduce drásticamente en condiciones cinemáticas para el SFC, lo que afecta a los valores HDOP. Incluso en localizaciones bajo un entorno de cielo obstruido, debido a la presencia de vegetación densa, la MFC mostró un mejor rendimiento en términos de precisión relativa que la SFC. Aunque la MFC ha mostrado resultados más precisos que la SFC, en las próximas fases de prueba se repetirá la

prueba cinemática con una tasa de fijación más fina y durante un período de tiempo más largo para describir los patrones de error de la MFC en entornos de dosel abierto y cerrado.

Aún quedan varios retos en esta investigación, como el análisis de la calidad de las mediciones brutas GNSS, el diseño de dispositivos GNSS óptimos y más pequeños, la aplicación de los algoritmos de corrección diferencial para mejorar la precisión de las posiciones de los collares, el análisis de los ajustes de los collares GNSS y los efectos del entorno en las soluciones de datos de los collares. No obstante, el uso de estos dispositivos GNSS fiables y precisos nos permitirá ampliar el conocimiento del comportamiento animal y las interacciones entre especies en un área de estudio específica. El prototipo de collar GNSS multiconstelación multifrecuencia ha sido especialmente diseñado para monitorizar ciervos rojos ibéricos (*Cervus elaphus hispanicus*) y gamos (*Dama dama*) en poblaciones silvestres simpátricas del sur de España (Azorit et al., 2012a) para explicar las diferentes estrategias de alimentación de ambas especies y comprender mejor si el gran solapamiento de dietas detectado implica competencia interespecífica por los recursos. Además, este collar GNSS puede adaptarse a otros mamíferos silvestres para obtener datos precisos para análisis de comportamiento con enfoques que ya consideran la heterogeneidad y las 3 dimensiones del paisaje (Valderrama-Zafra et al., 2022).

El desarrollo de las tecnologías de teledetección aumentará la disponibilidad de información espacialmente continua, facilitando un uso más extendido de las variables estructurales de la vegetación en la modelización de hábitats y, por tanto, mejorando la planificación de la conservación (Gastón et al., 2019). Otro tema de investigación importante es la combinación de la tecnología GNSS y la información espacial a escala cercana proporcionada por los avances en la monitorización remota a través de cámaras en vehículos aéreos no tripulados, y el uso de dispositivos GNSS que proporcionan localizaciones precisas en tiempo real. La determinación precisa de las ubicaciones en tierra combinada con imágenes adquiridas a distancia permite a los investigadores analizar casi en tiempo real las interacciones entre los animales y el paisaje.



4.4. Evaluación las rutas de menor esfuerzo en el desplazamiento animal.

Artículo:
En elaboración.

4.4.1 Introducción

Con todos los estudios y avances realizados se ha puesto de manifiesto que conocer los detalles y motivos de la elección de rutas por parte de los animales es algo fundamental en aspectos ecológicos. Comprender el movimiento de los cérvidos es fundamental para la conservación de estas especies y la gestión de sus hábitats. Los estudios sobre su ecología de movimiento pueden proporcionar información valiosa para la planificación de áreas protegidas, la mitigación de conflictos con humanos y la conservación de la biodiversidad en general. Que se definan con precisión los distintos recorridos que los animales realizan, ya sea con técnicas gráficas o mediante mediciones GNSS de collares (según lo expuesto en los apartados anteriores) permitirá determinar, si en ausencia de otros factores distintos a los topográficos, influye el consumo energético en la elección de las rutas de desplazamiento animal.

En los estudios llevados a cabo por Lachica tanto en 1997 como en el año 2000 con Aguilera, con cabras, se estableció en entorno controlado de laboratorio, que factores determinaban el consumo energético durante el movimiento animal. Hay estudios que ponen de manifiesto la relación entre movimiento, consumo energético y factores topográficos (Anjitha Krishna et al., 2019; KorZeniowska et al., 2018; Valderrama-Zafra et al., 2024; Wangdi et al., 2019). En los trabajos de Lachica se llega a una expresión en la que el consumo energético depende de la distancia horizontal recorrida por el animal (Long2D) y la distancia vertical acumulada ascendida y descendida (Climb y Descent).

Con objeto de analizar el coste energético real del desplazamiento animal sobre el terreno nos basamos en la expresión anteriormente descrita y en trayectorias recorridas por animales obtenidas sobre el terreno utilizando la metodología descrita por Valderrama-Zafra et al., 2024. En esta metodología se utilizan ortoimágenes de gran resolución para detectar las huellas animales.

4.4.2 Metodología

El estudio se realiza sobre 31 trayectos obtenidos en el área de estudio dentro de la finca Lugar Nuevo, en el Parque Natural de Andújar (Jaén). La digitalización de las trayectorias se realiza en zonas de distintas características topográficas en cuanto a

variabilidad de altitud, procurando que no existan impedimentos, naturales ni artificiales, que modifiquen u obligasen al animal a elegir otra ruta por otra razón distinta que su mínimo esfuerzo. Una de las trayectorias si se definió en una zona que obligaba a un desvío por un vallado artificial, al objeto de introducir un factor diferente y comprobar la hipótesis nula (no se si esto está bien dicho). La digitalización de las trayectorias naturales de los animales se realizó en un entorno GIS con el software QGIS. Se emplean ortofotos nacionales y autonómicas actualizadas del servicio web de mapas del PNOA (Plan Nacional de Ortofotos Aéreas) y del IECA (Instituto de Cartografía de Andalucía). Debido a su calidad y precisión, finalmente se decidió utilizar imágenes PNOA (resolución de 0,5 m Pixel / 0,25 m Pixel).

Posteriormente a la digitalización de las trayectorias naturales observadas de los animales, se crearon entre los puntos de inicio y fin de las trayectorias anteriores, unas nuevas trayectorias que llamaremos “simuladas”. Estas trayectorias simuladas se generan de forma totalmente aleatoria entre los puntos inicial y final de la trayectoria natural o real que ha sido observada del animal. Se hace de forma manual y no siguen ningún criterio particular, más que el hecho de su viabilidad física en el terreno de no verse interrumpidas por ningún obstáculos natural o artificial.

Por último, con el fin de tener otra trayectoria que tuviese un criterio de generación relacionado con el de menor coste de movimiento se calcularon las trayectorias, entre los puntos de inicio y fin de las trayectorias naturales, de menor cota. Para obtener estas trayectorias se utilizó el algoritmo de Least Cost Path (LCP) (Dijkstra, 1959) sobre una capa de cotas en el GIS definida a partir de un Modelo Digital del Terreno (MDT) de alta precisión generado a partir de datos LiDAR del MDT05, disponible en el Instituto Geográfico Nacional (IGN).

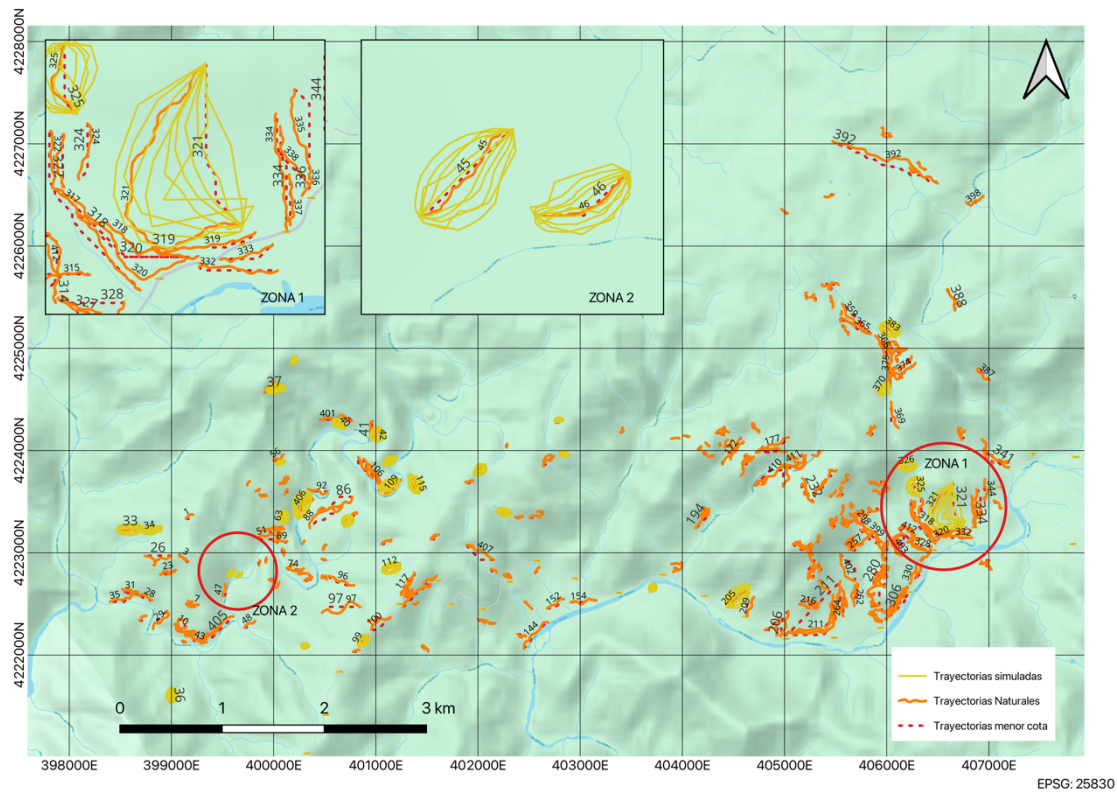


Fig. 34. Mapa general con las trayectorias digitalizadas en la zona y detalle en dos zonas de las rutas simuladas, las naturales y las de menor cota.

Una vez generados los distintos tipos de trayectorias con los que íbamos a trabajar (Natural, Simulada y Menor Cota) (Fig. 34), había que inferirles los atributos topográficos necesarios para los análisis posteriores. Por un lado, hay que calcular para cada trayectoria el desnivel total ascendido (Climb) y el desnivel total descendido (Descent) de cada trayectoria (Fig. 35), para ello se utilizó el algoritmo “Ascender a lo largo de una línea” de QGIS, que calcula, entre otros, el ascenso y descenso total a lo largo de una trayectoria. Previamente había que dotar a esas trayectorias de datos altimétricos en todos sus vértices, para lo cual se usó el algoritmo “Drape” de QGIS. Para que la definición altimétrica de las trayectorias fuese precisa, y dado que el dato se asigna a cada uno de sus vértices, se densificaron utilizando VoGIS-ProfilTool. En el caso de la distancia total recorrida se utilizó la calculadora de campos de QGIS y se generaron dos nuevos atributos en cada trayectoria “Long2D” y “Long3D”, este último pudo ser obtenido una vez que las trayectorias habían sido definidas tridimensionalmente en los procesos anteriores.

Se calcularon también para cada trayectoria la información de máxima y mínima elevación alcanzada. En la Fig. 35 se explica gráficamente el significado de cada uno de los parámetros descritos.

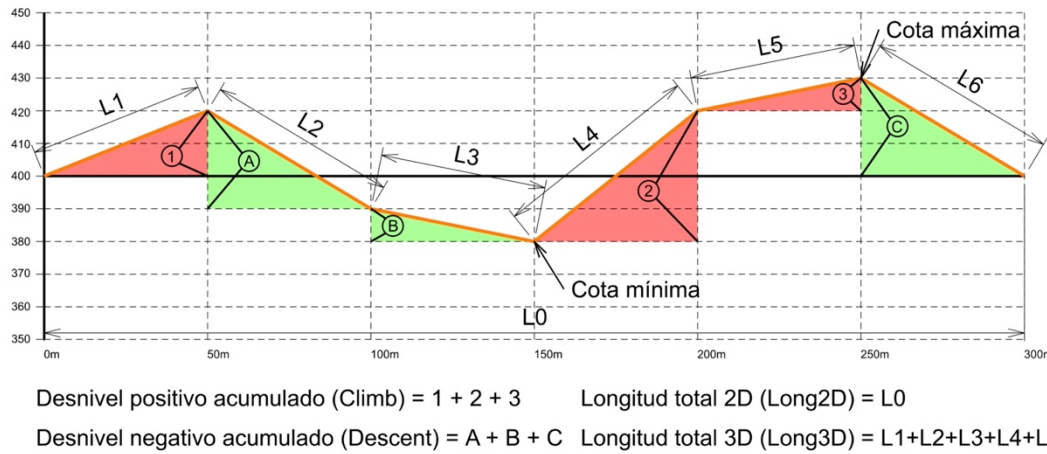


Fig. 35. Perfil altimétrico longitudinal de un ejemplo de trayectoria donde se representa el significado gráfico de cada uno de los parámetros atribuidos a las trayectorias.

4.4.3 Resultados

Se han obtenido 31 trayectorias naturales de animales, a partir de las cuales se han simulado aleatoriamente 6 rutas más la ruta de menor coste altimétrico calculada para cada una de las naturales. En total se ha trabajado con 248 rutas. Se han calculado los distintos parámetros topográficos necesarios para el cálculo de consumo energético de todas las rutas:

- Climb: Desnivel positivo acumulado (metros).
- Descent: Desnivel negativo acumulado (metros).
- Maxelev: Cota máxima que alcanza la ruta (metros).
- Minelev: Cota mínima que alcanza la ruta (metros).
- Incremento-cota: Diferencia entre la cota máxima y mínima alcanzadas por la ruta (metros).
- Long2D: Longitud total de la ruta sobre el plano (metros).
- Long3D: Longitud geométrica tridimensional total de la ruta (metros).
- Cost2D: Consumo energético usando la longitud 2D (J/kb BW)
- Cost3D: Consumo energético usando la longitud 3D (J/kb BW)

A partir de aquí se han analizado los datos del esfuerzo para comparar las rutas naturales y simuladas, realizando un resumen estadístico de las variables consideradas (Tabla 11) para los tres tipos de rutas (natural/real, simuladas y mínima cota). Esto se ha hecho, por un lado, con todas las rutas, y también eliminando la ruta 321 en la que el movimiento animal se veía condicionado por cercados artificiales.

En este primer análisis, eliminando de los cálculos la ruta 321 se aprecian diferencias claras entre los senderos naturales y simulados (ver Fig. 36).

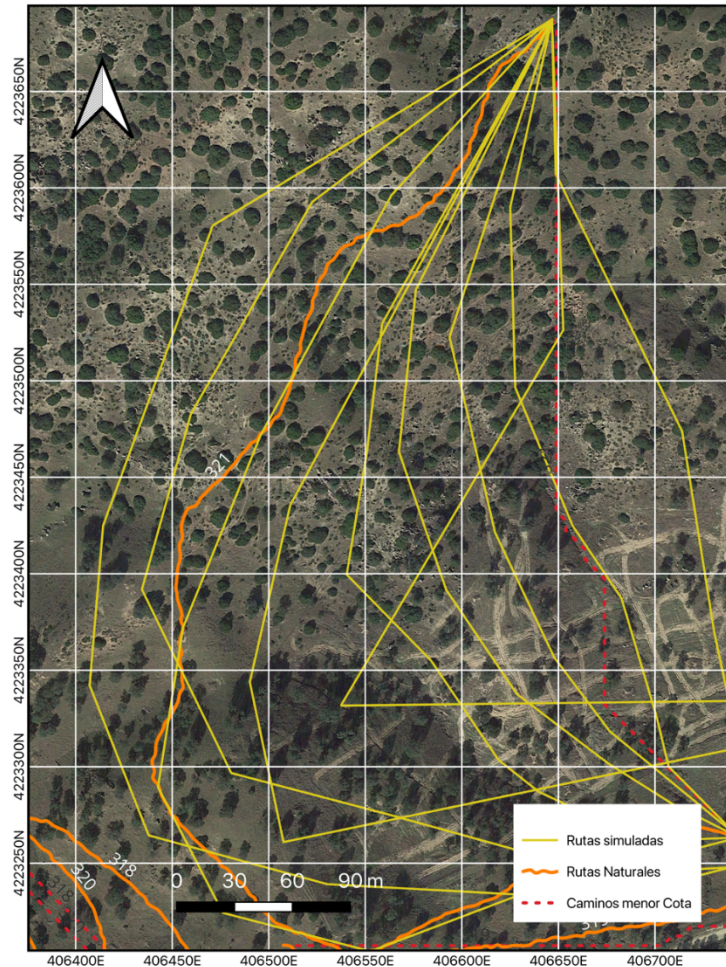


Fig. 36. Ruta 321 condicionada por cercados artificiales.

Se pueden responder a las cuestiones planteadas en la introducción con los resultados obtenidos en este primer análisis: podemos ver que el coste energético promedio es significativamente inferior para las de algoritmo-mínima-cota en comparación con el resto de trayectorias simuladas. No se detectan diferencias significativas en esfuerzo entre las de algoritmo-mínima-cota y las seleccionadas por los animales. Las rutas generadas aleatoriamente son las que requieren mayor esfuerzo, no apreciando una variación sensible de esfuerzo entre ellas. Finalmente, atendiendo al incremento-cota de

la Tabla 11 no se detectan diferencias significativas entre seleccionadas por animales y simulada algoritmo-mínima-cota, pero sí hay diferencias significativas entre las seleccionadas por animales y el resto de senderos simulados.

Tabla 11. Comparativa de resultados estadísticos los tres tipos de trayectorias (métodos de comparación no paramétricos: esfuerzo menor cota = esfuerzo naturales < esfuerzo simuladas).

	<i>RUTAS NATURAL/REAL</i>		<i>RUTAS SIMULADAS</i>		<i>RUTAS MENOR COTA</i>	
	<i>climb</i>	<i>descent</i>	<i>cost2D</i>	<i>cost3D</i>	<i>cost2D</i>	<i>cost3D</i>
Recuento	31	31	186	186	31	31
Promedio	7983,82	8041,39	8057,24	8124,12	7827,76	7923,68
Desviación Estándar	1168,62	1189,86	1176,67	1192,89	1136,52	1152,43
Coefficiente de Variación	14,6374%	14,7967%	14,6039%	14,6834%	14,5191%	14,5441%
Mínimo	6958,71	6966,36	6930,26	6935,38	6873,17	6911,13
Máximo	12729,1	12775,3	13238,7	13304,7	12657,6	12713,3

CAPÍTULO 5. DISCUSIÓN GENERAL

Durante el desarrollo de la presente tesis doctoral se ha tenido como objetivo fundamental la consideración de aspectos geomáticos aplicados a la mejora del entendimiento de como los factores topográficos inciden en distintos aspectos ecológicos y biológicos, especialmente en los cérvidos en la zona de Sierra Morena Oriental. No perdiendo de vista la posible aplicación en un contexto más amplio. La aplicación de las técnicas geomáticas y topográficas, e incluso de la tecnología gráfica usada en estas disciplinas ha resultado reveladora para algunos de los aspectos reseñados. Así los sistemas de información geográfica (GIS) con su potente capacidad de análisis y de aglutinar distintas fuentes de información de distinta índole en un mismo marco geográfico permite nuevas perspectivas de conocimiento y gestión de aspectos como la distribución de hábitats y el monitoreo de la distribución de la biodiversidad (Salem, 2003; Lorini et al., 2011). Los entornos gráficos digitales CAD (diseño asistido por ordenador) (Valderrama et al., 2022), e incluso una combinación de ambas (Zhao, 2020). También aplicaciones específicas como la aportadas por Gu et al., (2024) que aportan herramientas esenciales para desarrollar las cuestiones que en esta tesis se han planteado.

Por tanto, se ha defendido en esta tesis doctoral la importancia de considerar tridimensional el espacio y su diferencia métrica con la estimación plana bidimensional (Wu et al., 2012), la influencia de la escala o tamaño de la zona de estudio, así como la influencia de la especie en trayectorias que estos animales realizan en un mismo hábitat. El desarrollo de una metodología para la identificación y digitalización de trayectorias de animales, la caracterización morfológica de las trayectorias de animales con el desarrollo de un método de estimación de corredores biológicos, y, por último, un mejor conocimiento de las opciones tecnológicas de posicionamiento GPS a aplicar en este ámbito.

En el primer artículo presentado, en el que se considera la tridimensionalidad del terreno hay una conclusión clara y determinante, y es que los estudios ecológicos que ignoran las componentes tridimensionales (3D) ponen en riesgo la correcta interpretación de los resultados obtenidos con el enfoque bidimensional (2D) ((Dorner et al., 2002; Wu et al., 2012; Monterroso et al., 2013), en el que claramente se produce una subestimación de la distancia recorrida y del área del paisaje. Como se ha mencionado con anterioridad, en el ámbito de la ecología animal son escasos los estudios que consideran la componente

espacial 3D, en la estimación de aspectos de la vida animal. Se establece la idea de que esas diferencias sustanciales puedan depender también de la distancia recorrida y las distancias verticales (positivas y negativas) acumuladas en función de variabilidad altimétrica de la zona, pudiendo por tanto afectar éstas de forma desigual a las distintas especies de animales en función de su rango de hábitat (Heit et al., 2021).

Se observa que a nivel del paisaje nuestra área de estudio aumenta una media de un 5,61% su medida, esto coincide conceptualmente con los resultados de Wu et al., (2012) a este nivel, cuando se considera su tridimensionalidad espacial, encontrándose valores de entre un 1,5% y un alrededor del 11% de diferencia en función del tamaño de la zona muestreada y de su morfología, estando estos valores estrechamente relacionados con la variación de altitud y la pendiente, ya que existe una correlación positiva entre el aumento de área o longitud y la altitud y la pendiente. Esto nos permitió estimar el índice SI (índice de incremento de superficie) en función del rango de altitud, sirviéndonos un modo básico para estimar errores potenciales producidos por un simple análisis 2D.

En el caso de las rutas de distintas especies animales, una vez estudiado el supuesto, simulando 15 rutas replicadas en cuatro especies animales distintas, y asumiendo 24 correcciones por ruta, se revela que las aproximaciones 2D producen mediciones subestimadas. Se estima el 5% como umbral en valores de diferencia en áreas 3D frente a 2D para deben ser tenidas en cuenta en cálculos incluidos en factores ecológicos

Estas apreciaciones pueden ser muy importantes en función de distintas consideraciones, así por ejemplo pueden tener implicaciones económicas en la evaluación de los subsidios productivos en espacios agrarios y forestales estrechamente ligados con la superficie (Gaspar et al., 2007). Queda patente que un índice sencillo como el área proyectada bidimensional de una determinada finca o zona no es un parámetro justo a la hora de calcular determinados índices, o de calcular impuestos, tasas o subvenciones. los datos topográficos asociados a los movimientos de los animales, como por ejemplo las pendientes máximas que superan, que nos establecen el rango de valores en los que los animales se manejan, fuera de los cuales no nos los vamos a encontrar, o datos de alturas máximas y mínimas de sus hábitats, podrían establecer la superficie útil de uso de una determinada finca según la especie que la habita o uso al que se destina. Es más real ese nuevo índice, que tenga en cuenta las

características espaciales de la zona para extraer la superficie real utilizable sobre la cual establecer taras, impuestos u otorgar ayudas.

El concepto de rango de hábitat (“homerange” en terminología anglosajona) toma una nueva perspectiva. Su concepción deja de ser plana, y pasa a ser un espacio tridimensional, en el que también existen límites en cuanto a su altitud (tanto máxima como mínima), y no solo en cuanto a sus coordenadas planas. Deja de ser un espacio continuo sobre el plano y pasa a ser un conjunto de manchas con zonas que, por ejemplo, por rugosidad, escarpe, pendiente o cota no están disponibles para una especie en concreto, se convierte por tanto en algo más complejo y difícil de determinar, aunque estas nuevas tecnología y datos cartográficos precisos permiten abordar esta nueva perspectiva.

Aunque en un entorno muy diferente, como ya señalaba Torres-Pulliza en 2020, los hábitats estructuralmente complejos tienden a contener más especies. La estimación de las densidades de ungulados es especialmente importante en el caso de estas fincas cerradas de Sierra Morena, con densidades existentes de hasta 55-60 individuos por km². La complejidad estructural del hábitat se ha estudiado ampliamente en relación con la organización espacial, la función ecológica y la resiliencia en múltiples ecosistemas (Menge y Sutherland, 1976; Thrush et al., 2008; Richardson et al., 2017). En general, una mayor complejidad de hábitat tiende a proporcionar una gama más amplia de nichos potenciales a múltiples escalas espaciales (Gámez y Harris, 2022) Podemos considerar la parametrización 3D del paisaje como un indicador de su complejidad, y por lo tanto, el éxito a largo plazo de la conservación basada en áreas requiere un área confiable apoyada en enfoques 3D para asegurar un financiamiento adecuado, planificar para el cambio climático y hacer que la conservación de la biodiversidad sea una parte mucho más importante de las políticas de gestión y tierras.

Nuestro análisis también muestra que, al igual que en el análisis de superficies descrito anteriormente, el aumento en las mediciones de longitud utilizando 3D es mayor en un intervalo de altitud más amplio. El rango de altitud tiene un efecto positivo en el aumento de las longitudes de distancia medidas para todas las especies, por lo que cuanto mayor sea, mayor será la diferencia con el aumento de la distancia recorrida. La diferencia de altitud, y por lo tanto la pendiente también se muestran como factores determinantes en el aumento porcentual de la diferencia en distancias. Esto se relaciona

directamente con las características ecológicas de la especie de estudio, especies con un rango de hábitat mayor recorren más distancia y por lo tanto se ven más afectadas por la consideración tridimensional del espacio que habitan, siempre que no se tenga en cuenta los principios de caminos de menor coste energético. El rango de altitud tiene un efecto positivo en el aumento de las longitudes de distancia medidas para todas las especies.

Curiosamente los análisis demuestran que en las áreas pequeñas con una acusada heterogeneidad de la superficie topográfica los conejos con un rango de hábitat menor destacan por encima del resto de especies en sus índices de diferencia, mientras que por ejemplo el lobo, que recorre distancias mayores y tiene rango de hábitat mayor presenta diferencias menores porque de alguna manera se atenúa el efecto de los cambios de altitud.

En el segundo artículo llevado a cabo en esta tesis, donde consideramos la influencia de los factores topográficos a escala cercana en el movimiento de los animales, se desarrolló con éxito una metodología clara, sencilla y de gran precisión para la digitalización de trayectorias de animales, suponiendo la digitalización de más de 400 trayectorias de cérvidos con más de 50 km en acumulados. Esto nos permitió analizar en detalle esas trayectorias y conocer los detalles morfológicos de las mismas. Se aprecia claramente que, en ausencia de otros factores, son los factores topográficos los que determina la trayectoria más eficaz en el desplazamiento de los cérvidos en estas zonas, estando esta eficacia relacionada con cuestiones de menor esfuerzo, ya que en la naturaleza es vital esta consideración. Son la distancia vertical ascendida o descendida y la longitud tridimensional los factores más influyentes. Las pruebas analíticas de las trayectorias han demostrado que el comportamiento de movimiento de los cérvidos es predecible. Los resultados demuestran la utilidad de la metodología presentada que, al proporcionar y relatar información topográfica valiosa sobre las áreas de movimiento y tránsito, puede orientar las prácticas de manejo sostenible de las poblaciones de cérvidos y sus hábitats. Pero además los estudios ecológicos demuestran ampliamente que la topografía puede ejercer una influencia significativa en los procesos que conforman los patrones de vegetación a gran escala, aspecto que también influye en el movimiento animal. Los estudios que ignoran esta influencia corren el riesgo de malinterpretar las observaciones y hacer recomendaciones inadecuadas a los responsables de la gestión (Dorner et Al., 2002).

A partir de estos trabajos se pudo parametrizar un modelo experimental, basado en estas variables topográficas de las distintas trayectorias, que permita aproximar la ruta óptima a seguir en el terreno entre dos ubicaciones precisas. Entendemos este modelo como algo muy interesante a la hora de optimizar tareas de gestión medioambiental, tareas de conservación de fauna, así como de planificación estratégica.

En lo concerniente a aspectos relacionados con el uso de tecnologías GNSS, en aspectos de localización de fauna silvestre, y concretamente en el estudio realizado en el tercer artículo para estimar la tecnología más idónea a utilizar, podemos concluir que los dispositivos MFC (Multiespectrales y multiconstelación) se comportan mejor frente a los dispositivos SFC (Monoespectrales), tanto en las pruebas realizadas en estático como en las realizadas en modo cinemático el MFC se muestra como una opción más segura y consistente incluso en entornos desfavorables, y con mejor rendimiento. Este trabajo supone un paso adelante con respecto a las pruebas previas de rendimiento de los collares GPS realizadas en las últimas décadas (Cargnelutti et al., 2007, Yamazaki et al., 2009, Forin-Wiart et al., 2015, Schwartz et al., 2017).

Por último, en los estudios que se están llevando a cabo sobre la consideración del coste energético en la elección de rutas por parte de los animales, los resultados arrojan datos interesantes. En cuanto a la consideración tridimensional desarrollada de la trayectoria al incluirla en la expresión del gasto energético se aprecia un coste significativamente mayor. Es destacable reseñar que el coste energético de las trayectorias realizadas aleatoriamente difiere positivamente, tanto de la de menor cota, como de la natural, esto revela la capacidad que muestra el animal para moverse con un coste mínimo. También se ve claramente que cuando por alguna razón o impedimento artificial el animal se ve obligado a apartarse de la ruta óptima energética, el coste aumenta significativamente, esto sería algo a tener en muy en cuenta en la planificación de zonas cercadas.

Es precisamente esta idea de que el animal en sus desplazamientos trata de optimizar su ruta en términos energéticos la que podría explicar los resultados de las pruebas realizadas en el primer artículo sobre movimientos aleatorios de cuatro especies. En ellos se apreciaba que al contrario de lo que podría parecer, el lobo con un rango de recorrido mayor (Andersen et al., 2015) presentaba menores diferencias entre su trayectoria 2D y 3D. Esto cobra sentido si entendemos que las trayectorias de menor

coste energético son también muy similares a las de menor cota y por lo tanto, al haber menor variación altimétrica la diferencia es menor entre ellas.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

Según los resultados obtenidos se detallan a continuación las conclusiones finales:

I – La tecnología gráfica actual ha permitido cuantificar la diferencia dimensional entre la consideración plana y tridimensional en áreas y trayectorias lineales.

II – Se ha demostrado en estos estudios, que tanto la escala de trabajo, la morfología de la zona y la especie animal sujeta a estudio, son factores significativamente influyentes en la consideración del uso de la componente espacial 3D en el cálculo de factores ecológicos y biológicos.

III – Se ha desarrollado una metodología que, haciendo uso de tecnologías gráficas y topográficas, ha permitido conocer, a escala cercana, trayectorias parciales y totales de animales sobre el terreno, con detalle suficiente como para inferir en ellas atributos topográficos detallados.

IV – Tanto en las pruebas estáticas como cinemáticas, el collar MFC se caracteriza por un rendimiento estable y mejor que la SFC en términos de precisión, exactitud y capacidad de seguimiento de satélites GNSS.

V – Se ha comprobado que los animales, en ausencia de factores de fuerza mayor, se desplazan usando rutas de menor coste energético. La consideración tridimensional de las trayectorias en el cálculo del coste energético ha remarcado las diferencias entre los tipos de rutas.

VI - Los animales con mayor rango de desplazamiento tienden a presentar menor diferencia entre su recorrido lineal tridimensional o plano, precisamente porque se desplazan por rutas de bajo coste energético que son similares a las de menor cota.

BIBLIOGRAFÍA

- Abbas, S., Saleem, A., Sharif, Z., Mirza, S., 2012. Estimation of bio- mass and carrying capacity of scrub rangelands in Ucchali Wetland Complex, Soon Valley. *Biología* 57 (1–2), 93–100.
- Abrahms, B., Aikens, E.O., Armstrong, J.B., Deacy, W.W., Kauffman, M.J., Merkle, J.A., 2021. Emerging perspectives on resource tracking and animal movement ecology. In *Trends Ecol. Evol.* 36 (4), 308–320. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2020.10.018>.
- Acevedo, P., Quirós-Fernández, F., Casal, J., Vicente, J., 2014. Spatial distribution of wild boar population abundance: basic information for spatial epidemiology and wildlife management. *Ecol. Indic.* 36, 594–600. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.09.019>
- Adachi, T., Costa, D.P., Robinson, P.W., Peterson, S.H., Yamamichi, M., Naito, Y., Takahashi, A., 2017. Searching for prey in a three-dimensional environment: hierarchical movements enhance foraging success in northern elephant seals. *Funct. Ecol.* 31 (2), 361–369. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12686>.
- Alaminos Tererno, F. J. (2001). El medio ambiente en Andalucía en el umbral del siglo XXI. Junta de Andalucía. Consejería de Medio Ambiente.
- Alonso, M. T., J. Sanz, J. M. Juan, A. Rovira, and G. G. Casado. 2020. Galileo broadcast ephemeris and clock errors analysis: 1 January 2017 to 31 July 2020. *Sensors* 20:6832.
- Álvarez G. y Ramos J., 1991. Estrategias alimentarias del ciervo (*Cervus elaphus* L.) en Montes de Toledo. *Doñana Acta Vertebrata*. 18(1): 63-99.
- Andersen, L.W., Harms, V., Caniglia, R., Czarnomska, S.D., Fabbri, E., Jędrzejewska, B., Kluth, G., Madsen, A.B., Nowak, C., Pertoldi, C., Randi, E., Reinhardt, I., Stronen, A. V., 2015. Long-distance dispersal of a wolf, *Canis lupus*, in northwestern Europe. *Mammal. Res.* 60 (2), 163–168. <https://doi.org/10.1007/s13364-015-0220-6>.
- Anjitha Krishna, P.R., Lalitha, R., Shanmugasundaram, K., Nagarajan, M., 2019. Assessment of topographical factor (LS-factor) estimation procedures in a gently sloping terrain. *J. Indian Soc. Remote Sens.* 47, 1031–1039. <https://doi.org/10.1007/s12524-019-00953-3>.
- Araque Jiménez, E. y Crespo Guerrero, J., 2011. Caza, conservación de la naturaleza y desarrollo económico en un espacio andaluz protegido: El Parque Natural de la Sierra de Andújar (España). *Historia y Sociedades Rurales*, 36, 137-161. <https://doi.org/10.3917/hsr.036.0137>.
- Awange, J. 2018. GNSS environmental sensing: revolutionizing environmental monitoring. Springer, Cham, Switzerland.
- Azorit, C., 2005. La importancia de la gestión de los ciervos en Sierra Morena Oriental. *Anales de la Real Academia de Ciencias Veterinarias de Andalucía Oriental*, (18), 15-22.

- Azorit, C., 2006. El ciervo ibérico. *Cervus elaphus hispanicus* en Sierra Morena. *Investig. Cienc.* 361, 32–35.
- Azorit, C., Muñoz-Cobo, J., 1997. Distribución y abundancia del corzo (*Capreolus capreolus* L. 1758) en la provincia de Jaén, Doñana. *Acta Vertebrata* 24 (1–2), 181–190.
- Azorit, C., Analla, M., Carrasco, R., Carrasco, A., y Muñoz-Cobo, J., 2002. Astas, esqueleto y edad del ciervo (*Cervus elaphus hispanicus*) de Sierra Morena oriental: Estudio de correlación. In *Anales de biología* (No. 24, pp. 195–200). Servicio de Publicaciones de la Universidad de Murcia.
- Azorit, C., Moro, J., 2010. Jabalí (*Sus scrofa*, Linnaeus, 1758). In: *Monografías INIA: Serie medioambiental No 2–2010, Ungulados silvestres de España: Biología y tecnologías reproductivas para su conservación y aprovechamiento cinegético*, pp. 215–240.
- Azorit, C., Oya, A., Tellado, S., Carrasco, R., Moro, J., 2012a. Mandibular osteomyelitis in red deer (*Cervus elaphus hispanicus*) and fallow deer (*Dama dama*): occurrence and associated factors in free-living populations in Southern Spain. *J. Wildl. Dis.* 48 (1), 77–86. <https://doi.org/10.7589/0090-3558-48.1.77>.
- Azorit, C., Tellado, S., Oya, A., Moro, J., 2012b. Seasonal and specific diet variations in sympatric red and fallow deer of southern Spain: a preliminary approach to feeding behaviour. *Anim. Prod. Sci.* 52 (8), 720–727. <https://doi.org/10.1071/AN12016>.
- Azorit, C., Tenorio, M.J., Casinos, A., Montoya, A.J.L., López-Fuster, M.J., Barbosa, O.R., 2020. Searching for indicators of age, sex and population in 178imalaya mouflon mandibles. *Hystrix* 31 (1), 1–10. <https://doi.org/10.4404/hystrix-00197-2019>.
- Bailey, D.W., Gross, J.E., Laca, E.A., Rittenhouse, L.R., Coughenour, M.B., Swift D.M., and Sims, P.L., 1996. Mechanisms that result in large herbivore grazing distribution patterns. *J Range Manage.* 49:386–400.
- Bailleul, F., Lesage, V., Hammill, M.O., 2010. Spherical first passage time: a tool to investigate area-restricted search in three-dimensional movements. *Ecol. Model.* 221 (13–14), 1665–1673. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2010.04.001>.
- Belant, J.L., Millspaugh, J.J., Martin, J.A., Gitzen, R.A., 2012. Multi-dimensional space use: the final frontier. *Front. Ecol. Environ.* 10 (1), 11–12. <https://doi.org/10.1890/12.WB.003>.
- Bentley Descartes CONNECT edition (Nº de version 10.16.00.15), 2021. Windows, Bentley Systems.
- Beyer, H.L., 2004. Hawth's Analysis Tools for ArcGIS.

- Blaschke, T., Tiede, D., Heurich, M., 2004. 3D landscape metrics to modelling forest structure and diversity. *Int. Arch. Photogramm. Remote. Sens. Spat. Inf. Sci.* 36, 129–132.
- Barzaghi, R., N. E. Cazzaniga, C. L. De Gaetani, L. Pinto, and V. Tornatore. 2018. Estimating and comparing dam deformation using classical and GNSS techniques. *Sensors* 18:756–766.
- Bengsen, A. J., J. O. Hampton, S. Comte, S. Freney, and D. M. Forsyth. 2021. Evaluation of helicopter net-gunning to capture wild fallow deer (*Dama dama*). *Wildlife Research* 48:722–729.
- Bond, B.T., Leopold, B.D., Burger, L.W., Godwin, K.D., 2001. Movements and home range dynamics of cottontail rabbits in Mississippi. *J. Wildl. Manag.* 65 (4), 1004–1013. <https://doi.org/10.2307/3803049>.
- Börger, L., Dalziel, B.D., Fryxell, J.M., 2008. Are there general mechanisms of animal home range behaviour? A review and prospects for future research. *Ecol. Lett.* 11 (6), 637–650. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2008.01182.x>.
- Bosque Maurel, J., 1973. Latifundio y minifundio en Andalucía oriental. *Estudios Geográficos*, 34(132), 457. Retrieved from <http://www.ujen.debiblio.com/login?url=https://www.proquest.com/scholarly-journals/latifundio-y-minifundio-en-andalucia-oriental/docview/1304219677/se-2>.
- Bowman, J. L., C. O. Kochanny, S. Demarais, and B. D. Leopold. 2000. Evaluation of a GPS collar for white-tailed deer. *Wildlife Society Bulletin* 28:141–145.
- Bretz, F., Hothorn, T., Westfall, P., 2010. Multiple Comparisons Using R. CRC Press. Doi, Boca Raton. ' <https://doi.org/10.1201/9781420010909-f>.
- Burrough, P. A., McDonnell, R. A., y Lloyd, C. D. (2015). Principles of geographical information systems. Oxford University Press, USA.
- Burthey A., 1991. Étude du regime alimentaire du cerf de Barbarie par analyse des feces. Diplome d'Études. École ratique des Hautes Études, rance.
- Calenge, C., Dray, S., y Royer-Carenzi, M., 2009. The concept of animals' trajectories from a data analysis perspective. *Ecological informatics*, 4(1), 34-41. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2008.10.002>.
- Cain, J. W., P. R. Krausman, B. D. Jansen, and J. R. Morgart. 2005. Influence of topography and GPS fix interval on GPS collar performance. *Wildlife Society Bulletin* 33:926–934.
- Campbell, T.A., Laseter, B.R., Ford, W.M., Miller, K.V., 2004. Topographic home ranges of white-tailed deer in the Central Appalachians. *Southeast. Nat.* 3, 645–652.

- Caporali, A., and J. Zurutuza., 2021. Broadcast ephemeris with centimetric accuracy: test results for GPS, Galileo, Beidou and Glonass. *Remote Sensing* 13:4185.
- Cargnelutti, B., A. Coulon, A. J. M. Hewison, M. Goulard, J. Angibault, and N. Morellet. 2007. Testing global positioning system performance for wildlife monitoring using mobile collars and known reference points. *Journal of Wildlife Management* 71:1380–1387.
- Castro A.G., Rodríguez Berrocal J., Collado J., Medina C.M. y Peinado L.E., 1978. The Mediterranean shrubby vegetation and its valoration. VII. Variation in chemical content of *Cistus ladanifer* L. *Archive Zootecnia*. 27(107):1-5.
- Cheng, D., Peili, S., Xianzhou, Z., Ning, Z., Xi, C., Shoubao, G., Wanrui, Z., 2017. The rangeland livestock carrying capacity and stocking rate in the kailash sacred landscape in China. *J. Resour. Ecol.* 8 (6), 551–558. <https://doi.org/10.5814/j.issn.1674-764x.2017.06.001>.
- Cumming, G.S. and Cornélis, D. (2012), Quantitative comparison and selection of home range metrics for telemetry data. *Diversity Distrib.*, 18: 1057- 8 1065. <https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2012.00908>.
- Dana Paige Seidel, Eric Dougherty, Colin Carlson y Wayne M. Getz, 2018. Ecological metrics and methods for GPS movement data, *International Journal of Geographical Information Science*, 32:11, 2272-2293, DOI: 10.1080/13658816.2018.1498097
- Dardanelli, G., A. Maltese, C. Pipitone, A. Pisciotta, and M. Lo Brutto. 2021. NRTK, PPP or static, that is the question. Testing different positioning solutions for GNSS survey. *Remote Sensing* 13:1406–1435.
- Davis, G. H., M. C. Crofoot, and D. R. Farine. 2018. Estimating the robustness and uncertainty of animal social networks using different observational methods. *Animal Behaviour* 141:29–44.
- De Smith, M. J., Goodchild, M. F., y Longley, P. (2007). *Geospatial analysis: a comprehensive guide to principles, techniques and software tools*. Troubador publishing ltd.
- Devillard, S., Aubineau, J., Berger, F., Léonard, Y., Roobrouck, A., Marchandean, S., 2008. Home range of the European rabbit (*Oryctolagus cuniculus*) in three contrasting French populations. *Mamm. Biol.* 73 (2), 128–137. <https://doi.org/10.1016/j.mambio.2007.01.003>.
- Dickinson, M.H., Farley, C.T., Full, R.J., Koehl, M.A.R., Kram, R., Lehman, S., 2000. How animals move: an integrative view. *Science* 288 (5463), 100–106. <https://doi.org/10.1126/science.288.5463.100>.
- E.W. Dijkstra, 1959. A note on two problems in connection with graphs. *Numer. Math.*, 1, pp. 269-271

- Dion, J. R., J. M. Haus, J. E. Rogerson, and J. L. Bowman. 2019. An initial performance review of vaginal implant transmitters paired with GPS collars. *Animal Biotelemetry* 7:22.
- Dorner, B., Lertzman, K., Fall, J., 2002. Landscape pattern in topographically complex landscapes: issues and techniques for analysis. *Landsc. Ecol.* 17 (8), 729–743. <https://doi.org/10.1023/A:1022944019665>.
- Dodge, S., Weibel, R., Ahearn, S., Buchin, M., Miller, J., 2016. Analysis of movement data. *International Journal of Geographical Information Science*, 30 (5), 825–834. Doi:10.1080/13658816.2015.1132424
- Edelhoff, H., Signer, J. y Balkenhol, N., 2016 Path segmentation for beginners: an overview of current methods for detecting changes in animal movement patterns. *Mov Ecol* 4, 21. <https://doi.org/10.1186/s40462-016-0086-5>
- Escobar-Flores, J.G., Álvarez-Cardenas, S., Valdez, R., Torres-Rodríguez, J., Díaz Castro, S., Castellanos-Vera, A., Martínez-Gallardo, R., 2015. Selección del terreno de escape y cobertura vegetal del borrego cimarrón (*Ovis canadensis cremnobates*) en Baja California, mediante Técnicas de Teledetección Satelital. *Therya* 6 (3), 519–534. <https://doi.org/10.12933/therya-15-284>.
- FAO, 1991. Guidelines: land evaluation for extensive grazing. Land and water division. FAO Soils Bull. 58.
- Farhadinia, M.S., Heit, D.R., Montgomery, R.A., Johnson, P.J., Hobeali, K., Hunter, L.T. B., Macdonald, D.W., 2020. Vertical relief facilitates spatial segregation of a high density large carnivore population. *Oikos* 129 (3), 346–355. <https://doi.org/10.1111/oik.06724>.
- Fedak, M.A., Seeherman, H.J., 1979. Reappraisal of energetics of locomotion shows identical cost in bipeds and quadrupeds including ostrich and horse. *Nature* 282 (5740), 713–716. <https://doi.org/10.1038/282713a0>.
- Fernández, P., Rodríguez, A., Obregón, R., de Haro, S., Jordano, D., Fernández-Haeger, J., 2016. Fine scale movements of the butterfly *plebejus argus* in a heterogeneous natural landscape as revealed by GPS tracking. *J. Insect Behav.* 29 (1), 80–98. <https://doi.org/10.1007/s10905-016-9543-7>.
- Fernández-Rodríguez, P., Carrasco, R., Moro, J., Garrido-Carretero, M. S., y Azorit, C. (2023). Working with GNSS collar data. The importance of pre-analysis when setting the sampling interval. *Ecological Informatics*, 77, 102219. <https://doi.org/10.1016/J.ECOINF.2023.102219>.
- Fischer, M., K. Parkins, K. Maizels, D. R. Sutherland, B. M. Allan, G. Coulson, and J. Di Stefano. 2018. Biotelemetry marches on: a cost-effective GPS device for monitoring terrestrial wildlife. *PloS ONE* 13:e0199617.
- Florinsky, I.V., 1998. Combined analysis of digital terrain models and remotely sensed data in landscape investigations. *Prog. Phys. Geogr. Earth Environ.* 22, 33–60. <https://doi.org/10.1177/030913339802200102>.

- Florinsky, I., Eilers, R., Manning, G., Fuller, L., 2002. Prediction of soil properties by digital terrain modelling. *Environ. Model. Softw.* 17, 295–311. [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(01\)00067-6](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(01)00067-6).
- Forin-Wiart, M-A., P. Hubert, P. Sirguez, and M. L. Poulle. 2015. Performance and accuracy of lightweight and low-cost GPS data loggers according to antenna positions, fix intervals, habitats and animal movements. *PloS ONE* 10:e0129271.
- Frair, J. L., J. Fieberg, M. Hebblewhite, F. Cagnacci, N. De Cesare, and L. Pedrotti. 2010. Resolving issues of imprecise and habitat-biased locations in ecological analyses using GPS telemetry data. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 365:2187–2200.
- Gámez, S., y Harris, N. C., 2022. Conceptualizing the 3D niche and vertical space use. *Trends in Ecology y Evolution*, 37(11), 953–962. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2022.06.012>.
- Ganskopp, D., Cruz, R., Johnson, D.E., 2000. Least-effort pathways?: A GIS analysis of livestock trails in rugged terrain. *Appl. Anim. Behav. Sci.*, 68(3), 179–190. [http://doi.org/10.1016/S0168-1591\(00\)00101-5](http://doi.org/10.1016/S0168-1591(00)00101-5).
- Gao, X., W. Dai, Z. Song, and C. Cai. 2017. Reference satellite selection method for GNSS high-precision relative positioning. *Geodesy and Geodynamics* 8:125–129.
- Gao, W., S. Pan, C. Gao, Q. Wang, and R. Shang. 2019. Tightly combined GPS and GLONASS for RTK positioning with consideration of differential inter-system phase bias. *Measurement Science and Technology* 30:054001.
- Gastón, A., Blázquez-Cabrera, S., Garrote, G., Mateo-Sánchez, M.C., Beier, P., Simón, M. A., Saura, S., 2016. Response to agriculture by a woodland species depends on cover type and behavioural state: insights from resident and dispersing Iberian lynx. *J. Appl. Ecol.* 53 (3), 814–824. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12629>.
- Gastón, A., S. Blázquez-Cabrera, C. Ciudad, M. C. Mateo-Sánchez, M. A. Simón, and S. Saura. 2019. The role of forest canopy cover in habitat selection: insights from the Iberian lynx. *European Journal of Wildlife Research* 65:30.
- Garrido, M. S., M. C. de Lacy, and A. M. Rojas. 2018. Impact of tropospheric modelling on GNSS vertical precision: an empirical analysis based on a local active network. *International Journal of Digital Earth* 11:880–896.
- Garrido, M. S., M. C. de Lacy, M. J. Borque, A. M. Ruiz, R. Moreno, and A. J. Gil. 2019. Low-cost GNSS receiver in RTK positioning under the standard ISO-17123-8: a feasible option in geomatics. *Measurement* 137:168–178.
- Garrido-Carretero, M. S., Azorit, C., de Lacy-Pérez de los Cobos, M. C., Valderrama-Zafra, J. M., Carrasco, R., and Gil-Cruz, A. J., 2023. Improving the precision and accuracy of wildlife monitoring with multi-constellation, multi-frequency

- GNSS collars. *Journal of Wildlife Management*, 87(4).
<https://doi.org/10.1002/jwmg.22378>.
- Gaspar, P., Escribano, M., Mesías, F. J., Pulido, E., y Martínez-Carrasco, E., 2007. La eficiencia en explotaciones ganaderas de dehesa: una aproximación DEA al papel de la sostenibilidad y de las subvenciones comunitarias. *Revista española de estudios agrosociales y pesqueros*, (215-216), 185-210.
- Gelb, A. 1974. *Applied optimal estimation*. The M. I. T. Press, Cambridge, Massachusetts, USA and London, England.
- Geng, J., and J. Guo. 2020. Beyond three frequencies: an extendable model for single-epoch decimeter-level point positioning by exploiting Galileo and BeiDou-3 signals. *Journal of Geodesy* 94:14.
- Ghilani, C. D., and P. R. Wolf. 2010. *Adjustment computations: spatial data analysis*. John Wiley y Sons, Hoboken, New Jersey, USA.
- Grala, N., and M. Brach. 2009. Analysis of GNSS receiver accuracy in the forest environment. *Annals of Geomatics* 7:41–47.
- Gray, S. M., J. M. Humphreys, R. A. Montgomery, D. R. Etter, K. C. VerCauteren, B. D. Kramer, and G. J. Roloff. 2022. Behavioral states in space and time: understanding landscape use by an invasive mammal. *Journal of Wildlife Management* 86:e22211.
- Granados, M. N., y Espejo, J. R. (2001). Suelos y reconstrucción ambiental de la Sierra de Andújar (Sierra Morena oriental, Jaén). *Cuaternario y geomorfología: Revista de la Sociedad Española de Geomorfología y Asociación Española para el Estudio del Cuaternario*, 15(1), 121-133.
- Greenwalt, C. R., and M. C. Shultz. 1962. *Principles of error theory and cartographic applications*. ACIC Technical Report No. 96. Aeronautical Chart and Information Center, St. Louis, Missouri, USA.
- Gökgöz, T., Baker, M., 2015. Large scale landform mapping using LiDAR DEM. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* 4 (3), 1336–1345.
<https://doi.org/10.3390/ijgi4031336>.
- Guzmán, J.N., García, F.J., Garrote, G., Pérez de Ayala, R., Iglesias, C., 2004. El lince ibérico (*Lynx Pardinus*) en España y Portugal. Dirección General para la Biodiversidad, Madrid.
- Guzmán, J.N., Moro, J., Carrasco, R., Fernández, P., Pérez de Ayala, R., García, F.J., Narváez, E., 2012. Recuperación de las poblaciones de conejo de monte y de territorios de lince ibérico en los montes Lugar Nuevo y Selladores-Contadero, Andújar (Jaén), Organismo. Ed. Naturaleza y parques nacionales, Serie especies amenazadas.

- Guo, Du, Ma, Huo, and Peng., 2019. A Model for Animal Home Range Estimation Based on the Active Learning Method. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(11), 490. <https://doi.org/10.3390/ijgi8110490>.
- Hampton, J. O., M. Amos, A. Pople, M. Brennan, and D. M. Forsyth. 2020. Minimising mortalities in capturing wildlife: refinement of helicopter darting of chital deer (*Axis axis*) in Australia. *Wildlife Research* 48:304–313.
- Hamza, V., B. Stopar, and O. Sterle. 2021. Testing the performance of multi-frequency low-cost GNSS receivers and antennas. *Sensors* 21:2029.
- Hanski, I., Kuussaari, M., Nieminen, M., 1994. Metapopulation structure and migration in the butterfly *Melitaea cinxia*. *Ecology* 75 (3), 747–762. <https://doi.org/10.2307/1941732>.
- Harrell, J. A., y Storemyr, P. (2009). Ancient Egyptian quarries—an illustrated overview. *Geological Survey of Norway Special Publication*, 12, 7-50.
- Harris, N. (1974). *The Victorian City: Images and Realities*.
- Heit, D.R., Ortiz-Calo, W., Montgomery, R.A., 2021. Landscape complexity persists as a critical source of bias in terrestrial animal home range estimation. *Ecology* 102 (8), e03427. <https://doi.org/10.1002/ecy.3427>.
- Hoechstetter, S., Walz, U., Dang, L.H., Thinh, N.X., 2008. Effects of topography and surface roughness in analyses of landscape structure – a proposal to modify the existing set of landscape metrics. *Landsc. Online* 3 (1), 1–14. <https://doi.org/10.3097/LO.200803>.
- Hofmann-Wellenhof, B., H. Lichtenegger, and E. Wasle. 2008. *GNSS—Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more*. Springer-Verlag, Wien, Austria.
- Horne, J.S., Garton, E.O., Krone, S.M. and Lewis, J.S. (2007), Analyzing animal movements using 184imalaya bridges. *Ecol.*, 88: 2354-2363. <https://doi.org/10.1890/06-0957.1>
- Hooven, N. D., K. E. Williams, J. T. Hast, J. R. McDermott, R. D. Crank, G. Jenkins, M. T. Springer, and J. J. Cox. 2022. Using low-fix rate GPS telemetry to expand estimates of ungulate reproductive success. *Animal Biotelemetry* 10:5.
- Horowitz, W. (1988). The Babylonian map of the world. *Iraq*, 50, 147-165.
- IECA. Institute of Cartography of Andalusia. Basic Color Orthophotography of Andalusia. <http://www.ideandalucia.es/wms/ortofoto2010>.
- International Organization for Standardization. 2012. *International vocabulary of metrology – basic and general concepts and associated terms (VIM)*. Third edition. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- Irvine, C. C., S. G. Cherry, and B. R. Patterson. 2022. Discriminating grey wolf kill sites using GPS clusters. *Journal of Wildlife Management* 86:e22163.

- Janos, D., and P. Kuras. 2021. Evaluation of low-cost GNSS receiver under demanding conditions in RTK network mode. *Sensors* 21:5552.
- Jenness, J.S., 2004. Calculating landscape surface area from digital elevation models. *Wildl. Soc. Bull.* 32 (3), 829–839. [https://doi.org/10.2193/0091-7648\(2004\)032\[0829:CLSAFD\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.2193/0091-7648(2004)032[0829:CLSAFD]2.0.CO;2).
- Kauffman, M.J., Aikens, E.O., Esmaili, S., Kaczensky, P., Middleton, A., Monteith, K.L., Morrison, T.A., Mueller, T., Sawyer, H., Goheen, J.R., 2021. Causes, consequences, and conservation of ungulate migration. In: *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, Vol. 52. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-012021-011516>.
- Kenward, R.E., Arraut, E.M., Robertson, P.A., Walls, S.S., Casey, N.M., Aebischer, N.J., 2018. Resource-area-dependence analysis: inferring animal resource needs from homerange and mapping data. *PloS One* 13 (10). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0206354>.
- Klasen, M., Steinhage, V., 2022. Wildlife 3D multi-object tracking. *Eco. Inform.* 71, 101790 <https://doi.org/10.1016/J.ECOINF.2022.101790>.
- Korpela, I., Koskinen, M., Vasander, H., Holopainen, M., Minkkinen, K., 2009. Airborne small-footprint discrete-return LiDAR data in the assessment of boreal mire surface patterns, vegetation, and habitats. *Forest Ecol. Manag.* 258 (7), 1549–1566. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.07.007>.
- Korzeniowska, K., Pfeifer, N., Landtwing, S., 2018. Mapping gullies, dunes, lava fields, and landslides via surface roughness. *Geomorphology* 301, 53–67. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.10.011>.
- Lachica, M., Prieto, C., Aguilera, J.F., 1997. The energy costs of walking on the level and on negative and positive slopes in the Granadina goat (*Capra hircus*). *Br. J. Nutr.* 77 (1), 73–81. <https://doi.org/10.1017/s0007114500002890>.
- Lachica, M., Aguilera, J.F., 2000. Estimation of the energy costs of locomotion in the Iberian pig (*Sus mediterraneus*). *Br. J. Nutr.* 83 (1), 35–41. <https://doi.org/10.1017/s0007114500000064>.
- Laffan, S.W., Skidmore, A.K., and Franklin, J., 2012. Geospatial analysis of species, biodiversity and landscapes: introduction to the second special issue on spatial ecology. *International Journal of Geographical Information Science*, 26 (11), 2003–2007. Doi:10.1080/13658816.2012.721557.
- Laffan, S.W., Skidmore, A.K., and Franklin, J., 2014. Species distribution and diversity, habitat selection and connectivity: introduction to the third special issue on spatial ecology.
- Laffan, S.W., Skidmore, A.K., and Franklin, J., 2016. Space, time, connectivity and conflict in biological landscapes: the fourth special issue on spatial ecology. *International Journal of Geographical Information Science*, 30 (1), 1–4. Doi:10.1080/13658816.2015.1090001.

- Laguna, E., A. J. Carpio, J. Vicente, J. A. Barasona, R. Triguero-Ocaña, S. Jiménez-Ruiz, A. Gómez-Manzanque, and P. Acevedo. 2021. The spatial ecology of red deer under different land use and management scenarios: Protected areas, mixed farms and fenced hunting estates. *Science of the Total Environment* 786:1–9.
- Lassueur, T., Joost, S., Randin, C.F., 2006. Very high resolution digital elevation models: do they improve models of plant species distribution? *Ecol. Model.* 198, 139–153. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2006.04.004>.
- Laube, P. and Purves, R.S., 2011. How fast is a cow? Cross-scale analysis of movement data. *Transactions in GIS*, 15 (3), 401–418. Doi :10.1111/j.1467-9671.2011.01256.x
- Lawson, J., 2015. *Design and Analysis of Experiments with R*. CRC Press. Doi, Boca Raton. <https://doi.org/10.1201/b17883>.
- Leica Geosystems. 2011. Leica GNSS network and reference stations - technical data. Leica Geosystems AG, Heerbrugg, Switzerland.
- Lele, S.R., Merrill, E.H., Keim, J. and Boyce, M.S., 2013. Selection, use, choice and occupancy: clarifying concepts in resource selection studies. *J Anim Ecol*, 82: 1183-1191. <https://doi.org/10.1111/1365-2656.12141>
- Lempidakis, E., Wilson, R.P., Luckman, A., Metcalfe, R.S., 2018. What can knowledge of the energy landscape tell us about animal movement trajectories and space use? A case study with humans. *J. Theor. Biol.* 457, 101–111. <https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2018.08.024>.
- Li, X., J. Huang, X. Li, H. Lyu, B. Wang, Y. Xiong, and W. Xie. 2021. Multi-constellation GNSS PPP instantaneous ambiguity resolution with precise atmospheric corrections augmentation. *GPS Solution* 25:1–13.
- Li, X., B. Wang, X. Li, J. Huang, H. Lyu, and X. Han. 2022. Principle and performance of multi-frequency and multi-GNSS PPP-RTK. *Satellite Navigation* 3:7.
- Liu, T., B. Zhang, Y. Yuan, and X. Zhang. 2020. On the application of the raw-observation-based PPP to global ionosphere VTEC Himalayan: an advantage demonstration in the multi-frequency and multi-GNSS context. *Journal of Geodesy* 94:1–20.
- Longley, P. (2005). *Geographic information systems and science*. John Wiley y Sons.
- López-Montoya, A.J., Moro, J., Azorit, C., 2017. Drivers of population growth variations for two Mediterranean sympatric deer. *Ecol. Res.* 32, 703–712. <https://doi.org/10.1007/s11284-017-1486-8>.
- Lorini, M. L., Paese, A., y Uezu, A. (2011). GIS and spatial analysis meet conservation: a promising synergy to address biodiversity issues. *Natureza y Conservação*, 9(2), 129-144.

- Lovari, S., Serrao, G., Mori, E., 2017. Woodland features determining home range size of roe deer. *Behav. Process.* 140, 115–120. <https://doi.org/10.1016/j.beproc.2017.04.012>.
- Marchand, P., M. Garel, N. Morellet, L. Benoit, Y. Chaval, C. Itty, E. Petit, B. Cargnelutti, A. J. M. Hewison, and A. Loison. 2021. A standardized biologging approach to infer parturition: an application in large herbivores across the hider- follower continuum. *Methods in Ecology and Evolution* 12:1017–1030.
- Manzaneda Martín, C., 2017. Los Oretanos. Una visión desde el territorio, la sociedad y la ideología.
- Martínez-Aguirre, A., Álvarez-Mozos, J., Giménez, R., 2016. Evaluation of surface roughness parameters in agricultural soils with different tillage conditions using a laser profile meter. *Soil Tillage Res.* 161 <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.02.013>.
- Marshall, J. D., Li, T., Wu, J. H., y Dunn, T. W., 2022. Leaving flatland: Advances in 3D behavioral measurement. *Current Opinion in Neurobiology*, 73, 102522. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2022.02.002>.
- Masello, J. F., Kato, A., Sommerfeld, J., Mattern, T., and Quillfeldt, P., 2017. How animals distribute themselves in space: Variable energy landscapes. *Frontiers in Zoology*, 14(1). <https://doi.org/10.1186/s12983-017-0219-8>.
- Matlab, 2021. Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc. Microsoft. « Jaén, Spain » (Satellite Map). Bing Maps. Microsoft.
- Maxwell, S.L., Cazalis, V., Dudley, N., Hoffmann, M., Rodrigues, A.S.L., Stolton, S., Visconti, P., Woodley, S., Kingston, N., Lewis, E., Maron, M., Strassburg, B.B.N., Wenger, A., Jonas, H.D., Venter, O., Watson, J.E.M., 2020. Area-based conservation in the twenty-first century. *Nature*. 582 (7828), 217–227. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2773-z>.
- McCullagh, P., Nelder, J.A., 1989. *Generalized Linear Models*, Second edition. CRC Press.
- Menge, B. A., y Sutherland, J. P., 1976. Species diversity gradients: Synthesis of the roles of predation, competition, and temporal heterogeneity. *The American Naturalist*, 110(973), 351–369.
- Meshesha, D.T., Moahammed, M., Yosuf, D., 2019. Estimating carrying capacity and stocking rates of rangelands in Harshin District, eastern Somali Region, Ethiopia. *Ecol. Evol.* 9 (23), 13309–13319. <https://doi.org/10.1002/ece3.5786>.
- Meyer, T. H. 2010. *Introduction to geometric and physical geodesy: foundations of geomatics*. ESRI Press, Redlands, California, USA.
- Minetti, A.E., Moia, C., Roi, G.S., Susta, D., Ferretti, G., 2002. Energy cost of walking and running at extreme uphill and downhill slopes. *J. Appl. Physiol.* 93 (3), 1039–1046. <https://doi.org/10.1152/japplphysiol.01177.2001>.

- Monmonier, M. (Ed.). (2019). *The History of Cartography, Volume 6: Cartography in the Twentieth Century*. University of Chicago Press.
- Monterroso, P., Sillero, N., Rosalino, L.M., Loureiro, F., Célio Alves, P., 2013. Estimating home-range size: when to include a third dimension? *Ecol Evol.* 3 (2285–2295), 2013. <https://doi.org/10.1002/ece3.590>.
- Morita, T., Toyoda, A., Aisu, S., Kaneko, A., Suda-Hashimoto, N., Matsuda, I., y Koda, H., 2020. Animals exhibit consistent individual differences in their movement: A case study on location trajectories of Japanese macaques. *Ecological Informatics*, 56, 101057. <https://doi.org/10.1016/J.ECOINF.2020.101057>
- Moriarty, K. M., and C. W. Epps. 2015. Retained satellite information influences performance of GPS devices in a forested ecosystem. *Wildlife Society Bulletin* 2:349–357.
- Morse, V. (2007). The role of maps in later medieval society: Twelfth to fourteenth century. *The history of cartography*, 6, 1987-2019.
- Möst, L., Hothorn, T., Müller, J., Heurich, M., 2015. Creating a landscape of management: unintended effects on the variation of browsing pressure in a national park. *Forest Ecol. Manag.* 338, 46–56. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.11.015>.
- Muhadi, N.A., Abdullah, A.F., Bejo, S.K., Mahadi, M.R., Mijic, A., 2020. The use of LiDAR-derived DEM in flood applications: a review. *Remote Sens.* 12 (14), 2038. <https://doi.org/10.3390/rs12142308>.
- Muñoz-Cobo, J., Azorit, C., 1996. Amenazas de los cercados para la fauna. *Ecosistemas* 16 (1–6), 22–25.
- Muñoz-Cobo, J., Azorit, C., Calvo, J.A., Carrasco, R., 2000. El lobo en Sierra Morena Estado actual, amenazas y medidas de conservación. *Serie Zool.* 26, 101–127.
- Nathan, R., Schurr, F.M., Spiegel, O., Steinitz, O., Trakhtenbrot, A., Tsoar, A., 2008. Mechanisms of long-distance seed dispersal. *Trends Ecol. Evol.* 23 (11), 638–647. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2008.08.003>.
- Notario, A., Javier, M. O. R. O., Fuentes, O., Castresana, L., Respaldiza, E., Ionescu, O., y Nahlik, A. (2010). Comparative bacteriological study of two wild boar populations in Sierra Morena (Jaén, Spain). *Notulae Scientia Biologicae*, 2(4), 18-23.
- Nugent, G., McShea, W.J., Parkes, J., Woodley, S., Waithaka, J., Moro, J., Gutierrez, R., Azorit, C., Mendez Guerrero, F., Flueck, W.T., Smith-Flueck, J.M., 2011. Policies and management of overabundant deer (native or exotic) in protected areas. *Anim. Prod. Sci.* 51 (4), 384–389. <https://doi.org/10.1071/AN10288>.
- Pan, L., X. Zhang, X. Li, C. Lu, J. Liu, and Q. Wang. 2019. Satellite availability and point positioning accuracy evaluation on a global scale for integration of GPS, GLONASS, BeiDou and Galileo. *Advances in Space Research* 63:2696–2710.

- Panzacchi, M., Van Moorter, B., Strand, O., Saerens, M., Kivimäki, I., St. Clair, C. C., Herfindal, I., and Boitani, L., 2016. Predicting the continuum between corridors and barriers to animal movements using Step Selection Functions and Randomized Shortest Paths. *Journal of Animal Ecology*, 85(1). <https://doi.org/10.1111/1365-2656.12386>.
- Paziewski, J., M. Fortunato, A. Mazzoni, and R. Odolinski. 2021. An analysis of multi-GNSS observations tracked by recent Android smartphones and smartphone-only relative positioning results. *Measurement* 175:1–16.
- Peterson, M. P. (Ed.). (2005). *Maps and the Internet*. Elsevier.
- Peterson, C. J., N. J. DeCesare, T. A. Hayes, C. Bishop, and M. S. Mitchell. 2022. Consequences of migratory strategy on habitat selection by mule deer. *Journal of Wildlife Management* 86:e22135.
- Picon, A., 2003. Nineteenth-century urban cartography and the scientific ideal: The case of Paris. *Osiris*, 18, 135-149.
- Pinter-Wollman, N., Hobson, E. A., Smith, J. E., Edelman, A. J., Shizuka, D., De Silva, S., ... y McDonald, D. B., 2014. The dynamics of animal social networks: analytical, conceptual, and theoretical advances. *Behavioral Ecology*, 25(2), 242-255.
- Pipitone, C., A. Maltese, G. Dardanelli, M. L. Brutto, and G. L. Loggia. 2018. Monitoring water surface and level of a reservoir using different remote sensing approaches and comparison with dam displacements evaluated via GNSS. *Remote Sensing* 10:71–95.
- PNOA. Web Map Service. <https://www.ign.es/wms-inspire/pnoa-ma>.
- Psychas, D., P. J. G. Teunissen, and S. Verhagen. 2021. A multi-frequency Galileo PPP-RTK convergence analysis with an emphasis on the role of frequency spacing. *Remote Sensing* 13:3077.
- Putz, F.E., Ruslandi, Ellis, P.W., Griscom, B.W., 2018. Topographic restrictions on landuse practices: consequences of different pixel sizes and data sources for natural forest management policies in the tropics. *For. Ecol. Manag.* 422, 108–113. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.04.001>.
- Pyke, G.H., 1978. Optimal foraging: movement patterns of bumblebees between inflorescences. *Theor. Popul. Biol.* 13 (1), 72–98. [https://doi.org/10.1016/0040-5809\(78\)90036-9](https://doi.org/10.1016/0040-5809(78)90036-9).
- QGIS Development Team, 2023. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project.
- Qiang, Y., Battenfield, B.P., Joseph, M.B., 2021. How to measure distance on a digital terrain surface and why it matters in geographical analysis. *Geogr. Anal.* 53 (3), 588–622. <https://doi.org/10.1111/gean.12255>.

- R Core Team, 2019. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Found. Stat. Comput. Raj, T., Hashim, F.H., Huddin, A.B., Ibrahim, M.F., Hussain, A., 2020. A survey on LiDAR scanning mechanisms. Electronics 9 (5), 741. <https://doi.org/10.3390/electronics9050741>.
- Razen, N., Brugnoli, A., Castagna, C., Groff, C., Kaczensky, P., Kljun, F., Knauer, F., Kos, I., Krofel, M., Lustrik, R., Maji'c, A., Rauer, G., Righetti, D., Potocnik, H., 2016. Long-distance dispersal connects Dinaric-Balkan and alpine grey wolf (*Canis lupus*) populations. Eur. J. Wildl. Res. 62 (1), 137–142. <https://doi.org/10.1007/s10344-015-0971-z>.
- Richardson, L. E., Graham, N. A. J., y Hoey, A. S., 2017. Cross-scale habitat structure driven by coral species composition on tropical reefs. Scientific Reports, 7(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-08109-4>
- Riotte-Lambert L, Matthiopoulos J. 2020. Environmental predictability as a cause and consequence of animal movement. Trends Ecol Evol.; 35(2): 163- 17. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2019.09.009>.
- Rodgers, A. R. 2001. Tracking animals with GPS: the first 10 years. Pages 1–10 in Proceedings of the Conference on Tracking Animals with GPS. The Macaulay Land Use Research Institute, 12–13 March 2001, Aberdeen, Scotland.
- Rodgers, A. R., R. S. Rempel, and K. F. Abraham. 1996. A GPS-based telemetry system. Wildlife Society Bulletin 24: 559-566.
- Rodríguez-Estévez V., García A., Perea J., Mata C. y Gómez A.G., 2007. Acorn production at the dehesa: influential factors. Archivos de Zootécnia. 56: 25-43.
- Rogers, D., Cooper, A., McKenzie, P., McCann, T., 2012. Assessing regional scale habitat area with a three dimensional measure. Ecol. Inform. 7 (1), 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2011.10.003>.
- Ruiz González, J. E., 1986. Estudio de la repoblación y colonización de Sierra Morena a través de los estadillos de diezmos y otros informes remitidos al Consejo de Castilla, 1767-1835. Cámara Oficial de Comercio e Industria de Jaén, Jaén.
- Salem, B. B., 2003, Application of GIS to biodiversity monitoring. Journal of Arid Environments. Volume 54, Issue 1, Pages 91-114. ISSN 0140-1963. <https://doi.org/10.1006/jare.2001.0887>.
- Sahani, N., and Ghosh, T., 2021. GIS-based spatial prediction of recreational trail susceptibility in protected area of Sikkim Himalaya using logistic regression, decision tree and random forest model. Ecological Informatics, 64, 101352. <https://doi.org/10.1016/J.ECOINF.2021.101352>
- Sánchez Martínez, J. D., 1998: La política forestal en la provincia de Jaén. Una interpretación de la actuación pública durante la etapa de Administración centralizada (1940-1984). Jaén. Diputación Provincial.

- Schlägel, U. E., and Lewis, M. A., 2014. Detecting effects of spatial memory and dynamic information on animal movement decisions. *Methods in Ecology and Evolution*, 5(11), 1236–1246. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12284>.
- Schwartz, C. C., S. Podruzny, S. L. Cain, and S. Cherry. 2017. Performance of spread spectrum global positioning system collars on grizzly and black bears. *Journal of Wildlife Management* 73:1174–1183.
- Seeber, G. 2003. *Satellite geodesy: foundations, methods and applications*. Walter de Gruyter GmbH y Co., Berlin, Germany.
- Seidel, Dana Paige, Dougherty, Eric, Carlson, Colin, Getz, Wayne M., 2018. Ecological metrics and methods for GPS movement data. *Int. J. Geogr. Inf. Sci.* 32 (11), 2272–2293. <https://doi.org/10.1080/13658816.2018.1498097>.
- Shepard, E.L.C., Wilson, R.P., Rees, W.G., Grundy, E., Lambertucci, S.A., Vosper, S.B., 2013. Energy landscapes shape animal movement ecology. *Am. Nat.* 182 (3), 298–312. <https://doi.org/10.1086/671257>.
- Sierra Morena Andaluza. (n.d.). 131–187.
- Singleton, P.H., Lehmkuhl, J.F., Gaines, W.L., Graham, S.A., 2010. Barred owl space use and habitat selection in the eastern cascades, Washington. *J. Wildl. Manage.* 74 (2) <https://doi.org/10.2193/2008-548>.
- Skidmore, A. K., Franklin, J., Dawson, T. P., y Pilesjö, P., 2011. Geospatial tools address emerging issues in spatial ecology: a review and commentary on the Special Issue. *International Journal of Geographical Information Science*, 25(3), 337–365. <https://doi.org/10.1080/13658816.2011.554296>
- Spencer, W. D., 2012. Home ranges and the value of spatial information. *Journal of Mammalogy*, 93(4). <https://doi.org/10.1644/12-MAMM-S-061.1>.
- Stupariu, M.S., Pătru-Stupariu, I., Cuculici, R., 2010. Geometric approaches to computing 3D-landscape metrics. *Landsc. Online* 24 (1), 1–12. <https://doi.org/10.3097/LO.201024>.
- Takasu, T. 2010. Real-time PPP with RTKLIB and IGS real-time satellite orbit and clock. IGS Workshop 2010, 28 June–2 July, 2010, Newcastle upon Tyne, England.
- Taylor, B. N., and C. E. Kuyatt. 1994. Guidelines for evaluating and expressing the uncertainty of NIST measurement results. NIST Technical Note 1297. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, USA.
- Teitelbaum, C.S., Mueller, T., 2019. Beyond migration: causes and consequences of nomadic animal movements. *Trends Ecol. Evol.* 34 (6), 569–581. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2019.02.005>.
- Teunissen, P. J. G. 2000. *Testing theory: an introduction*. VSSD, Delft, South Holland, Netherlands.

- Teunissen, P. J. G., and O. Montenbruck, 2017. Springer handbook of global navigation satellite systems. Springer International Publishing, Cham, Switzerland.
- Thrush, S. F., Halliday, J., Hewitt, J. E., y Lohrer, A. M., 2008. The effects of habitat loss, fragmentation, and community homogenization on resilience in estuaries. *Ecological Applications*, 18(1), 12–21. <https://doi.org/10.1890/07-0436.1>.
- Tornero Gómez J. 2005. Lugar Nuevo. Edita O.A. Parques Nacionales, España. Pp: 142-302.
- Torres-Pulliza, D., Dornelas, M.A., Pizarro, O., Bewley, M., Blowes, S.A., Boutros, N., Brambilla, V., Chase, T.J., Frank, G., Friedman, A., Hoogenboom, M.O., Williams, S., Zawada, K.J.A., Madin, J.S., 2020. A geometric basis for surface habitat complexity and biodiversity. *Nat. Ecol. Evol.* 4 (11), 1495–1501. <https://doi.org/10.1038/s41559-020-1281-8>.
- Tracey, J.A., Sheppard, J., Zhu, J., Wei, F., Swaisgood, R.R., Fisher, R.N., 2014. Movement-based estimation and visualization of space use in 3D for wildlife ecology and conservation. *PloS One* 9 (7), e101205. <https://doi.org/10.1371/journal.Pone.0101205>.
- Tucker, V.A., 1970. Energetic cost of locomotion in animals. *Comp. Biochem. Physiol.* 34 (4), 841–846. [https://doi.org/10.1016/0010-406X\(70\)91006-6](https://doi.org/10.1016/0010-406X(70)91006-6).
- Tunini, L., D. Zuliani, and A. Magrin. 2022. Applicability of cost-effective GNSS sensors for crustal deformation studies. *Sensors* 22:350.
- Urquijo, A., 1981. Umbría y Solana (recuerdos y diálogos de montería). El tornadizo, III, Ediciones Giner.
- U-blox AG. 2013. ITM530M Fastrax GPS/GNSS module. Document number FTX-HW-12001-3. <<https://www.u-blox.com>>. Accessed 21 Dec 2022.
- U-blox AG. 2020. ZED-F9P. U-blox F9 high precision GNSS module. Document number UBX-17051259-R08. <<https://www.u-blox.com>>. Accessed 21 Dec 2022.
- U-blox AG. 2021a. Product summary ZED-F9P module. Document number UBX-17005151-R10. <<https://www.u-blox.com>>. Accessed 21 Dec 2022.
- U-blox AG. 2021b. U-center GNSS evaluation software for windows. Document number UBX-13005250-R23. <<https://www.u-blox.com>>. Accessed 21 Dec 2022.
- Valderrama-Zafra, J. M., Fernández-Rodríguez, P., Oya, A., Carrasco, R., Rubio-Paramio, M. A., Garrido-Carretero, M. S., and Azorit, C., 2022. Assessing 3D vs. 2D habitat metrics in a Mediterranean ecosystem for a wiser wildlife management. *Ecological Informatics*, 101623. <https://doi.org/10.1016/J.ECOINF.2022.101623>.

- Valderrama-Zafra, J. M., Rubio-Paramio, M. A., García-Molina, D. F., Mercado-Colmenero, J. M., Oya, A., Carrasco, R., Azorit, C., 2024. Impact of topographic factors on animal field pathings: Analysis and prediction of deer movement patterns. *Ecological Informatics*, 80, 102487. ISSN 1574-9541. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2024.102487>.
- Van Langevelde, F. and Prins, H.H.T., 2008 Introduction to Resource Ecology. In *Resource Ecology*. Edited by Prins HHT, Van Langevelde F. Springer Netherlands; 1–6.
- Wang, X., Chen, H., Chen, Y., 2017. Large differences between glaciers 3D surface extents and 2D planar areas in Central Tianshan. *Water* 9, 282. <https://doi.org/10.3390/w9040282>.
- Wangdi, T., Tobgay, S., Dorjee, K., Dorji, K., Wangyel, S., 2019. The distribution, status and conservation of the 193imalayan musk deer *Moschus chrysogaster* in sakteng wildlife sanctuary. *Glob. Ecol. Conserv.* 17, e00466 <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2018.e00466>.
- Ward, J.N., Hinton, J.W., Johannsen, K.L., Karlin, M.L., Miller, K.V., Chamberlain, M.J., 2018. Home range size, vegetation density, and season influences prey use by coyotes (*Canis latrans*). *PloS One* 13 (10), e0203703. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0203703>.
- Weiss, P. 2021. Welcome to the Global Navigation Multi-Constellation. *Engineering* 7:421–423.
- Wielgocka, N., T. Hadas, A. Kaczmarek, and G. Marut. 2021. Feasibility of using low-cost dual-frequency GNSS receivers for land surveying. *Sensors* 21:1956.
- Wielgus, E., A. Caron, E. Bennitt, M. De Garine-Wichatitsky, B. Cain, H. Fritz, E. Eve Miguel, D. Cornélis, and S. Chamaille- Jammes. 2021. Inter-group social behavior, contact patterns and risk for pathogen transmission in cape buffalo populations. *Journal of Wildlife Management* 85:1574–1590.
- Wiens JA, Moss MR., 2005 Issues and perspectives in landscape ecology. Cambridge studies in landscape ecology University Press, Cambridge, p 390. <http://doi.org/10.1017/CBO9780511614415>.
- Wilson, R.P., Shepard, E.L.C., Liebsch, N., 2008. Prying into the intimate details of animal lives: use of a daily diary on animals. *Endanger. Species Res.* 4 (1–2), 123–137. <https://doi.org/10.3354/esr00064>.
- Wittemyer, G., M. Northrup, and G. Bastille-Rousseau. 2019. Behavioral valuation of landscapes using movement data. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 374:1520180046.
- Wu, Y., Li, X., Yin, R., Hasi-Eerdun, Liu, T., 2020. Surface roughness response of biocrustcovered soil to mimicked sheep trampling in the Mu Us sandy Land, northern China. *Geoderma* 363, 114–146. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114146>.

- Wu, Z., Wei, L., Lv, Z., 2012. Landscape pattern metrics: an empirical study from 2-D to 3-D. *Phys. Geogr.* 33, 383–402. <https://doi.org/10.2747/0272-3646.33.4.383>.
- Xia, S., Chen, D., Wang, R., Li, J., Zhang, X., 2020. Geometric primitives in LiDAR point clouds: a review. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.* 13, 685–707. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2020.2969119>.
- Xiao, R., H. Shi, X. He, Z. Li, D. Jia, and Z. Yang. 2019. Deformation monitoring of reservoir dams using GNSS: an application to South-to-North Water Diversion Project, China. *IEEE Access* 7:54981–54992.
- Xin, S., J. Geng, J. Guo, and X. Meng. 2020. On the choice of the third-frequency Galileo signals in accelerating PPP ambiguity resolution in case of receiver antenna phase center errors. *Remote Sensing* 12:1315.
- Xu, G. 2007. *GPS: theory, algorithms, and applications*. Springer-Verlag, Berlin, Germany.
- Yamazaki, K., S. Kasai, S. Koike, Y. Goto, C. Kozakai, and K. Furubayashi. 2009. Evaluation of GPS collar performance by stationary tests and fitting on free-ranging Japanese black bears. *Mammal Study* 33:131–142.
- Zaniewski AE, Lehmann A, Overton JM., 2002. Predicting species spatial distributions using presence-only data: a case study of native New Zealand ferns. *Ecol Model* 157:261–280. [https://dx.doi.org/10.1016/S0304-3800\(02\)00199-0](https://dx.doi.org/10.1016/S0304-3800(02)00199-0).
- Zhao, X. (2020). Application of 3D CAD in landscape architecture design and optimization of hierarchical details. *Computer-Aided Design and Applications*, 18(S1), 120-132. Doi: 10.14733/CADAPS.2021.S1.120-132
- Zonneveld IS (1995) *Land ecology*. SPB Academic Publishing, Amsterdam, p 199.
- Zumberge, J. F., M. B. Heflin, D. C. Jefferson, M. M. Watkins, and F. H. Webb. 1997. Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *Journal of Geophysical Research* 102:5005–5017.
- Zuur, A.F., Ieno, E.N., Elphick, C.S., 2010. A protocol for data exploration to avoid common statistical problems. *Methods Ecol. Evol.* 1 (1), 3–14. <https://doi.org/10.1111/j.2041-210x.2009.00001.x>.