Identificación de refugios climáticos para la biodiversidad en los Pirineos mediante modelos topoclimáticos de alta resolución a partir de sensores térmicos

---

Informe de proyecto – Convocatoria 2019 de ayuda a proyectos de investigación liderados por jóvenes investigadores. Modalidad "Tomando la iniciativa".

Autor: Raúl Hoffrén Mansoa
Contratado predoctoral FPU. Dpto. de Geografía y Ordenación del Territorio, Universidad de Zaragoza.

RESUMEN

La pérdida de biodiversidad es una de las consecuencias más importantes de los cambios climáticos. Por ello, conocer las áreas que permitirían sobrevivir a determinados organismos en el actual escenario de calentamiento global constituye un primer paso en la conservación de la biodiversidad. En este proyecto se ha estudiado la potencialidad de los sensores térmicos acoplados en vehículos aéreos no-tripulados (UAVs) para la identificación de zonas térmicamente estables que darían lugar a potenciales micro-refugios climáticos: pequeños parches en el territorio que favorecen la habitabilidad de especies amenazadas. El estudio se ha llevado a cabo en 6 áreas topográficamente complejas del Pirineo Central aragonés durante el verano y el otoño de 2020. Se ha utilizado una unidad UAV *Anafi Thermal* con dos sensores capacitados para registrar información en el infrarrojo térmico y en el visible a resoluciones espaciales centimétricas. El primero ha posibilitado la estimación de las temperaturas de la superficie en dos momentos térmicamente contrastados del día, validadas con una red de mini-sensores de temperatura *iButton*®. El segundo sensor ha servido para generar modelos tridimensionales del terreno mediante fotogrametría *Structure From Motion* (SFM), con las que se ha derivado un conjunto de variables geoambientales predictoras del clima local. Además, se han adquirido datos térmicos del sensor MODIS de la NASA para compararlos con los registros del UAV. A partir de la diferencia ente la temperatura máxima y mínima diaria, se han identificado zonas térmicamente estables que han sido introducidas en modelos de regresión lineal junto con las predictoras geoambientales. Se ha demostrado que las zonas de mayor estabilidad térmica han correspondido a los espacios arbolados y los hábitats en roquedo, mientras que las variables más influyentes en la estabilidad térmica han sido la pendiente, la orientación y el dosel del bosque. Estos resultados permiten confirmar a los UAVs como herramientas prometedoras para la identificación de micro-refugios climáticos en áreas topográficamente complejas.

1. Introducción

El clima tiene una importancia fundamental en la distribución de las especies. Los cambios climáticos poseen efectos significativos en los ecosistemas, pudiendo alterar la composición de las comunidades de plantas y sus interacciones entre sí (Pugnaire *et al.*, 2019) y producir la extinción de determinados organismos. Muchos estudios alertan del cambio de distribuciones de especies como consecuencia del actual cambio climático (Chen *et al.*, 2011; Pauli *et al.*, 2012), pudiendo ser especialmente preocupante en las regiones montañosas. Estos espacios albergan una cuarta parte de la biodiversidad del planeta (Körner & Ohsawa, 2005) y abundantes especies raras y endémicas (Enquist *et al.*, 2019), por lo que constituyen un importante *hotspot* de biodiversidad global.

La diversidad florística de las montañas está producida por el efecto de la topografía, la orientación, la rugosidad de la superficie y el gradiente altitudinal. Dicha heterogeneidad ambiental hace que el clima regional varíe significativamente en distancias cortas y dé origen a un mosaico de microclimas locales. Estas variaciones climáticas a pequeña escala pueden ser importantes para la persistencia de determinados organismos en el actual escenario de calentamiento global (Graae *et al.*, 2018), ya que permitirían refugiar a poblaciones de plantas que no tienen la capacidad de adaptarse a estos cambios, bien por su baja plasticidad o por su baja capacidad de dispersión. En este sentido, los micro-refugios climáticos constituirían el último reducto para la supervivencia de numerosas especies amenazadas por los cambios climáticos.

Los micro-refugios climáticos son pequeños parches en el territorio con características ambientales favorables para determinados organismos que les permiten habitar fuera de sus distribuciones principales, donde las condiciones les son o se les han tornado desfavorables (Rull, 2009; Dobrowski, 2011). Se trata de áreas caracterizadas por condiciones climáticas estables (Dobrowski, 2011; Ashcroft *et al.*, 2012; Keppel *et al.*, 2015), brindando a muchas especies la oportunidad de persistir a largo plazo en épocas de cambio climático (Hylander *et al.*, 2015; Keppel *et al.*, 2015). Por sus características ambientales y su situación entre los climas tropicales y templados, la región mediterránea es particularmente vulnerable a los cambios climáticos (Giorgi & Lionello, 2008), por lo que la detección de zonas climáticamente estables es fundamental para la preservación de su biodiversidad. Si bien es necesario promover estrategias de conservación efectivas que protejan a las especies del riesgo de extinción (Dawson *et al.*, 2011; Suggit *et al.*, 2018), la identificación de micro-refugios supone un avance significativo para la conservación de la biodiversidad terrestre en épocas de cambios climáticos como el actual, dada la mayor estabilidad que ofrecen a las especies que allí habitan.

Gran parte de las escasas investigaciones realizadas durante la última década en la detección de micro-refugios ha estado enfocada en la obtención de modelos topoclimáticos a partir del estudio de las variables geográficas y ambientales que influyen en el clima a escala local, y de la caracterización climática mediante información procedente tanto de estaciones meteorológicas como de sensores de temperatura miniaturizados. Mientras que las estaciones han sido utilizadas para localizar refugios a una escala espacial más amplia (ver Meineri & Hylander, 2016; Niskanen *et al.*, 2017; Suggitt *et al.*, 2018), los mini-sensores se han usado para identificar micro-refugios en áreas topográficamente complejas (ver Ashcroft *et al.*, 2012; Ashcroft & Gollan, 2013; Maclean *et al.*, 2016; Keppel *et al.*, 2017; Gubler *et al.*, 2018; Fawcett *et al.*, 2019; García *et al.*, 2020). Las principales ventajas de los mini-sensores de temperatura son su reducido tamaño (~20 mm de diámetro), que posibilita su emplazamiento en casi cualquier parte del territorio, y su capacidad para recopilar datos climáticos de manera periódica a resoluciones temporales muy altas. Ello permite una mejor descripción de los microclimas y la generación de modelos topoclimáticos más precisos (Fawcett *et al.*, 2019). No obstante, su colocación, mantenimiento y descarga de datos en campo son tareas laboriosas y con un elevado coste de tiempo, lo que limita su distribución por una amplia extensión del territorio. Además, tanto estaciones como mini-sensores proporcionan datos puntuales, requiriendo posteriormente interpolación y la reducción de la escala de trabajo en el caso de los primeros, cuya información es de carácter macroclimático. La teledetección puede reducir estas limitaciones, ya que permite generar información detallada y espacialmente continua que puede ser utilizada para modelar las condiciones climáticas en un determinado territorio a una alta resolución espacial y temporal (Zellweger *et al.*, 2019).

El uso de la teledetección posibilita la generación de modelos topoclimáticos gracias a la combinación de datos climáticos, topográficos y estructurales. Los primeros se obtienen a partir de la radiación infrarroja térmica (TIR), que permite revelar información detallada sobre las temperaturas de la superficie (Zellweger *et al.*, 2019). El resto se obtiene de la nube de puntos resultante de datos LiDAR (*Light Detection and Ranging*) o de técnicas fotogramétricas sobre ortofotografías con un alto grado de solape, que permiten modelar dos importantes modificadores del clima a escala local: la topografía y la estructura de la vegetación (Zellweger *et al.*, 2019). En los últimos años, algunos estudios se han apoyado en la teledetección para identificar micro-refugios climáticos en áreas extensas usando series multitemporales de imágenes de satélite de MODIS (Mackey *et al.*, 2012) o Landsat (Andrew & Warrener, 2017), o a escala de paisaje a partir de datos de dron (Milling *et al.*, 2018) o cámara térmica (García *et al.*, 2020). El sensor MODIS incorpora entre sus productos datos diarios de la temperatura de la superficie a una resolución de 1 km^2, siendo ésta una información muy valiosa para cubrir grandes áreas. Por su parte, los datos LiDAR permiten generar modelos topográficos y estructurales, pudiendo llegar a resoluciones de hasta 1 m.

Sin embargo, en ambos casos se depende de la disponibilidad de los datos y, en el caso de MODIS, la resolución espacial puede constituir un impedimento para la caracterización de microclimas a una escala más local. Estas limitaciones pueden ser paliadas mediante el uso de vehículos aéreos no-tripulados o drones (UAVs: *Unmanned Aerial Vehicles*) que, dada su versatilidad, pueden usarse para obtener múltiples datos del territorio a resoluciones que pueden llegar a ser de escala centimétrica (Zellweger *et al.*, 2019). En particular, los UAVs pueden incorporar cámaras en TIR que permitan estimar la temperatura de la superficie, y cámaras RGB de alta resolución con las que obtener información topográfica y estructural. Esto último se consigue gracias al desarrollo de técnicas fotogramétricas *Structure From Motion* (SFM), basadas en la fotogrametría tradicional (Messinger *et al.*, 2016), que generan nubes de puntos en tres dimensiones a partir de muchos puntos de vista de un conjunto de imágenes superpuestas de muy alta resolución espacial (Puliti *et al.*, 2015; Domingo *et al.*, 2019), logrando convertir la información bidimensional en tridimensional. La posibilidad de obtener todo este conjunto de información en un único instrumento convierte a los UAVs en herramientas prometedoras para determinados estudios ecológicos detallados en áreas extensas o inaccesibles.

En este proyecto se ha investigado la idoneidad del uso de sensores térmicos para la identificación de micro-refugios climáticos para la biodiversidad en los Pirineos. Concretamente, se ha trabajado con una unidad UAV con capacidad de registro en las regiones espectrales del visible y del TIR (dron térmico) en diversas áreas con heterogénea complejidad topográfica. El objetivo principal ha sido analizar la potencialidad que ofrecen los sensores montados en UAVs para la identificación de micro-refugios. En este sentido, la novedad de este proyecto radica en cubrir el hueco existente en cuanto a la capacidad de los UAVs para generar modelos topoclimáticos de alta resolución que permitan identificar micro-refugios para la flora (hasta la fecha sólo utilizados para biodiversidad animal, ver Milling *et al.*, 2018). Para cumplir el objetivo propuesto se han planteado varias hipótesis de partida: (i) los sensores térmicos montados en UAVs son capaces de detectar temperaturas fiables de la superficie terrestre con una alta resolución espacial y temporal; (ii) la combinación de la anterior información con Modelos Digitales de Superficies (MDS) y de cobertura vegetal permite generar modelos topoclimáticos de alta resolución; y (iii) a partir de la identificación de zonas térmicamente estables y de modelos topoclimáticos se pueden detectar micro-refugios climáticos y las variables más influyentes en su configuración.

2. Área de estudio

El proyecto ha sido realizado en un área topográficamente compleja: los Pirineos. Su morfología actual proviene de la orogenia alpina, que provocó el levantamiento de los

materiales graníticos y metamórficos de origen paleozoico, muy resistentes a la erosión, y configuró los valles de mayor entidad. Destaca por su modelado glaciar y periglaciar, resultado de los periodos glaciares del Cuaternario, y por su modelado fluvial, producto de la actividad erosiva que los cursos fluviales han ejercido durante miles de años sobre los materiales kársticos pirenaicos. Además, la cordillera constituye el límite biogeográfico entre las regiones Eurosiberiana, al norte, y Mediterránea, al sur. Esta diversidad topográfica y ambiental permite a los Pirineos alojar unas 3.400 especies vasculares nativas de plantas de las que un 5% son endémicas (Gómez *et al.*, 2017), constituyendo uno de los principales *hotspots* de poblaciones marginales de plantas adaptadas al frío en Europa (Abeli *et al.*, 2018).

Concretamente, se ha trabajado en dos sectores del Pirineo Central aragonés situados dentro de los límites del Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido y su zona periférica de protección (PNOMP). Se trata de un área caracterizada por su alta rugosidad superficial que favorece la existencia de fuertes pendientes y distintas orientaciones que varían a pequeña escala. Cada uno de los dos sectores consta de tres áreas de trabajo que se seleccionaron por su diversidad geoambiental. En el terreno de estudio son frecuentes los pinares de pino negro (*Pinus uncinata* Mill.), pastizales subalpinos con distinta abundancia de rocas, gleras, afloramientos rocosos y paredones de gran dimensión.

El primer sector se ha ubicado en la parte alta de la Sierra de las Cutas, en el valle de Ordesa (Figura 2.1), a una elevación media de 2.100 msnm. Se caracteriza por la presencia de fuertes pendientes en su parte septentrional, donde la ladera desciende hacia el fondo del valle, y zonas muy erosionadas que favorecen la aparición de orientaciones diversas y escarpes de gran entidad dominadas por roquedos. Destacan también los pastizales subalpinos, que en algunas áreas se mezclan con pequeños afloramientos rocosos y pedregales. En las partes menos elevadas del sector se localizan áreas de pinares de pino negro, tanto en la ladera de solana como en la de umbría. Aunque poseen características similares, hay una relativa separación espacial entre las tres áreas del sector, lo que implica la existencia de ciertas particularidades. El área del *Mirador de la Herradura* (HERR) presenta una doble orientación N-S muy marcada, aunque también destaca una ladera de orientación E. El área de *Los Pingüinos* (PING) es principalmente de orientación S aunque en la parte septentrional se localiza la ladera N con fuertes escarpes y muy erosionada. Del mismo modo, el área del *Mirador de Greenwich* (GRNW) se orienta principalmente al S, aunque la parte central es llana y en la septentrional se localiza un imponente cortado muy escarpado donde afloran los materiales calizos y las gleras.

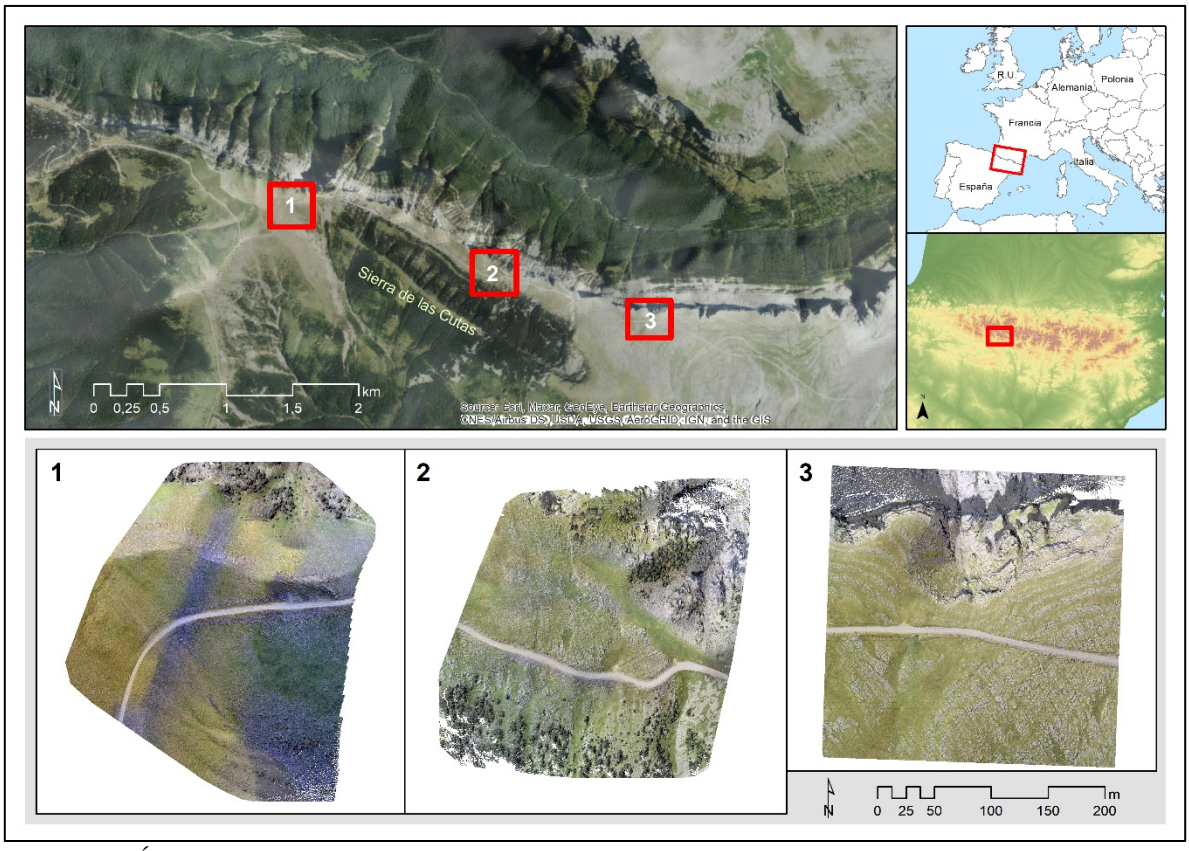


Figura 2.1. Áreas de estudio del sector de la Sierra de las Cutas (Ordesa): [1] Mirador de la Herradura (HERR); [2] Los Pingüinos (PING); [3] Mirador de Greenwich (GRNW).

El segundo sector se ha localizado en la pradera de Planafonda de la Sierra de Espierba, en el valle de Pineta (Figura 2.2). Se trata de un pequeño valle colgado cuyo fondo está ubicado a una elevación media de 2.100 msnm. La planicie está delimitada por sendas laderas que presentan una orientación N-S, siendo la septentrional de mayor entidad que la meridional. La parte más baja está dominada por pastizales subalpinos que continúan hacia la ladera norte donde, además, pueden encontrarse pequeñas áreas de pedregales, algo de suelo desnudo y, en la parte más oriental, afloramientos rocosos. En la parte sur de la cubeta se encuentra una pequeña ladera umbrosa muy escarpada donde predominan grandes roquedos calizos, pinares de pino negro y pequeños pastos, transformándose en su parte oriental en una gran glera de orientación W-NW con algunos afloramientos de roca caliza y parches dispersos de pinares de pino negro. Finalmente, fuera de la cubeta, en la parte más meridional del sector, destaca la ladera de solana orientada hacia el valle de Pineta, donde se mezclan zonas de gleras con pinares distribuidos de manera heterogénea.

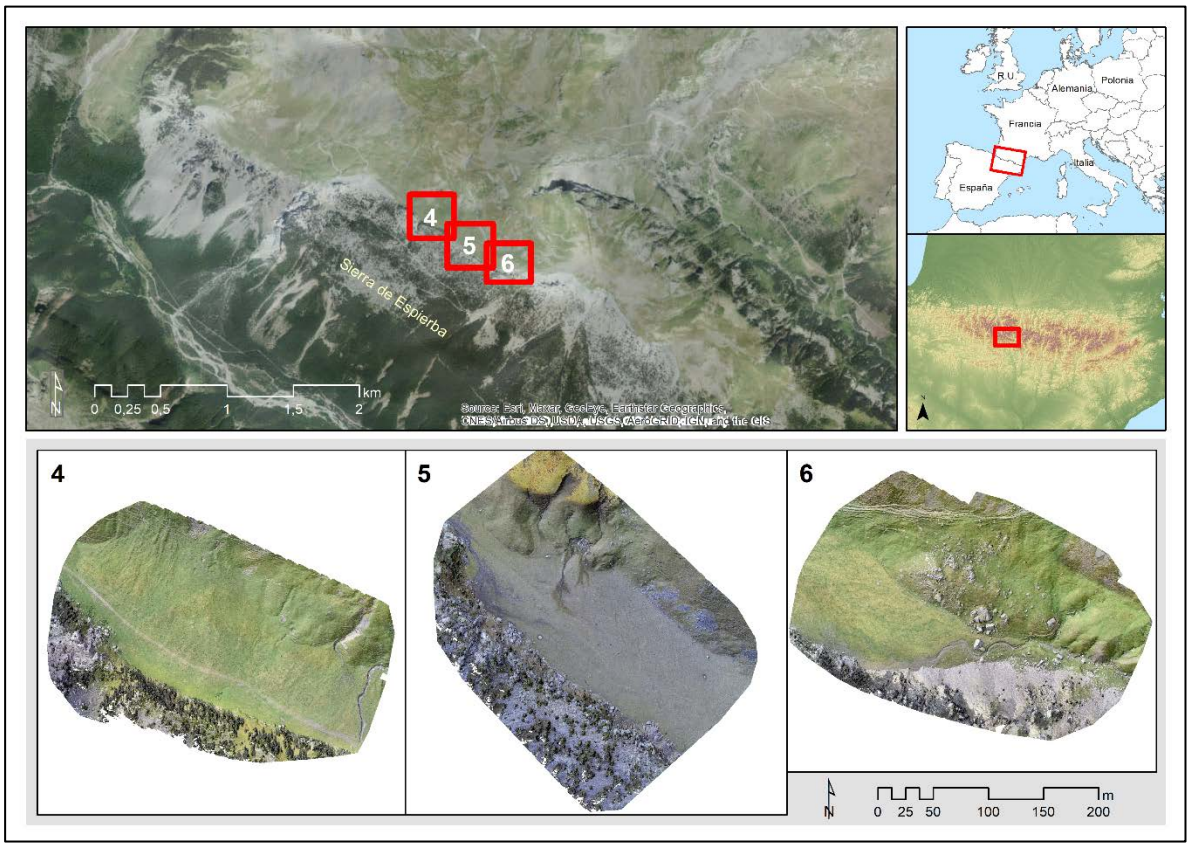


Figura 2.2. Áreas de estudio del sector de la Sierra de Espierba (Pineta): [4] Planafonda Oeste (PLFO); [5] Planafonda Centro (PLFC); [6] Planafonda Este (PLFE).

3. Materiales y métodos

3.1. Materiales

Se han utilizado tres herramientas principales: un dron térmico o UAV con capacidad de registro en el infrarrojo térmico (TIR) y en el visible; una red de sensores miniaturizados capaces de estimar la temperatura en distintos puntos; y datos de temperatura de la superficie (LST: *Land Surface Temperature*) del sensor MODIS de la NASA.

El UAV utilizado ha sido un *Anafi Thermal* de Parrot (Figura 3.1a), de tipo multirrotor. Dispone de una cámara SONY CMOS 1/2,4" de 21 MP de resolución que ha permitido obtener datos de imagen en el espectro visible a muy alta resolución y, mediante fotogrametría SFM, generar Modelos Digitales de Superficies (MDS) para derivar productos como la pendiente y la orientación. Además, posee un sensor radiométrico FLIR Lepton 3,5 de 160x120 px de resolución y calibrado de fábrica, con el que se ha obtenido información LST a partir de la región espectral del TIR, entre los 8 y los 14 μm.

Para validar los datos LST recogidos por el UAV, se han colocado un total de 21 sensores de temperatura miniaturizados *iButton*®, de Maxim Integrated (Figura 3.1b), en distintos ambientes de las áreas de estudio. Se trata de pequeños registradores con *data-loggers* que han sido utilizados en estudios previos de detección de micro-refugios. En este proyecto se han usado sensores del tipo *Termochron* DS1920 de tamaño reducido (16 mm de diámetro) que favorece su colocación en casi cualquier punto del territorio y la obtención de series temporales de temperatura, siendo por tanto capaces de registrar las temperaturas que experimentan realmente los organismos que allí se encuentran (Ashcroft *et al.*, 2009; Dobrowski, 2011; Gubler *et al.*, 2018; Greiser *et al.*, 2019).

Figura 3.1. Materiales utilizados: (**a**) Izda: UAV *Anafi Thermal* de Parrot; (**b**) Dcha: minisensor de temperatura *iButton*® de Maxim Integrated.

Además, se han obtenido datos LST del sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) para comparar las estimaciones dadas por éste con los datos UAV. Este sensor está acoplado a los satélites TERRA y AQUA de la NASA, en funcionamiento desde 1999 y 2002 respectivamente, de órbitas heliosincrónicas polares y con un periodo de revisita de 12 horas cada uno. Ambos satélites están separados 180º entre sí, lo que permite disponer de hasta 4 datos diarios, siempre y cuando no exista nubosidad densa. En nuestra latitud, MODIS-TERRA recoge información a las 10:30 y 22:30, mientras que MODIS-AQUA lo hace a la 1:30 y 13:30. El sensor está compuesto por 36 bandas espectrales; en este proyecto, se han usado los datos LST derivados de las bandas del TIR que se corresponden con los productos "MOD11A1 v6" (TERRA) y "MYD11A1 v6" (AQUA), con resolución espacial de 1 km^2.

3.2. Metodología

Los métodos utilizados se han dividido en tres fases principales (Figura 3.2): (i) obtención de la información de UAV, *iButtons* y MODIS; (ii) procesado de la información

UAV para generar los mapas de estabilidad térmica y las variables geoambientales explicativas; y (iii) análisis de la información para la validación de los datos de temperatura estimados por el UAV a partir de los registros de los *iButtons*, y para la estimación de la influencia de las variables geoambientales sobre la estabilidad.

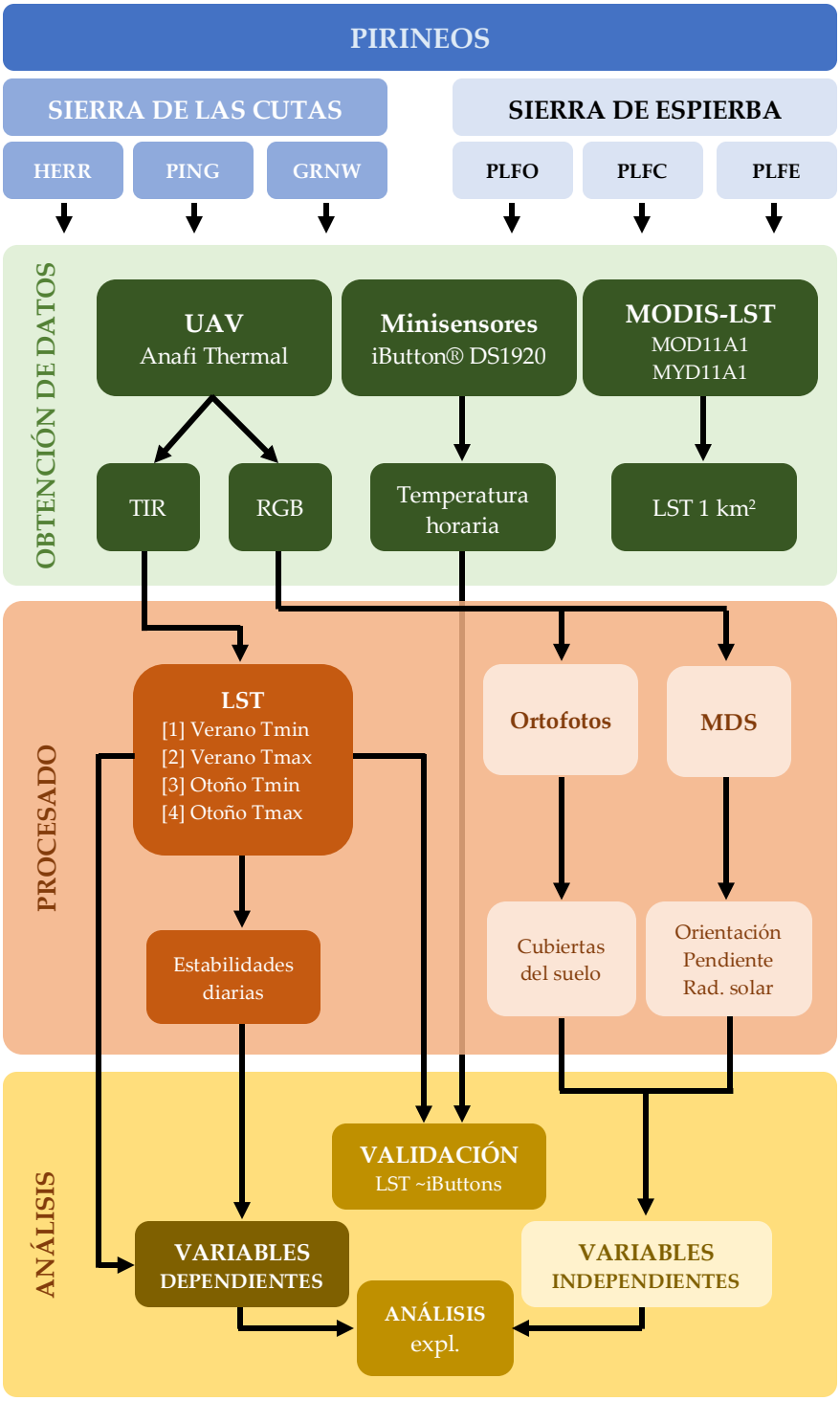


Figura 3.2. Metodología general del estudio.

3.2.1. Obtención de datos

Se han realizado un total de 24 vuelos con la unidad UAV (Tabla 3.1). El objetivo principal ha sido identificar la estabilidad térmica de cada área de estudio a partir de la estimación del rango térmico (diferencia entre las temperaturas máxima y mínima). Los vuelos se han llevado a cabo un día de verano y otro de otoño en cada una de las 6 áreas. Además, en un mismo día se han realizado dos vuelos, uno por la mañana entre las 7-9 h, y otro por la tarde entre las 14-16 h (hora local). Estas franjas horarias se han elegido por ser los momentos donde se alcanzan las temperaturas mínimas y máximas diarias, respectivamente. Todos los vuelos han sido automatizados y programados previamente con la aplicación "Pix4Dcapture". Los vuelos han sido realizados a 80 m de altura para obtener un tamaño del píxel del suelo promedio de 2,20 cm/px. Se ha establecido un ángulo de incidencia nadiral (90º), un solape entre fotografías del 80% en la trayectoria del vuelo y del 70% en la transversal, y una emisividad promedio de 0,95. La duración de cada vuelo ha sido de unos 20 min y el número de fotografías obtenidas ha sido de 233 en HERR, 182 en PING, 225 en GRNW, 205 en PLFO, 207 en PLFC y 209 en PLFE.

Tabla 3.1. Días y horas de vuelo UAV.

Área de estudio	Verano			Otoño		
	Día	Hora mañana (1)	Hora tarde (1)	Día	Hora mañana (2)	Hora tarde (2)
HERR	20-08-20	8:10	15:30	31-10-20	7:15	14:45
PING	31-07-20	8:15	14:45	31-10-20	8:15	15:30
GRNW	31-07-20	7:15	14:00	31-10-20	8:45	14:00
PLFO	01-08-20	7:30	14:30	30-10-20	8:45	14:15
PLFC	01-08-20	8:00	15:45	30-10-20	8:15	14:45
PLFE	01-08-20	8:45	15:15	30-10-20	7:30	15:30

* Huso horario local: (1) Horario de verano, GMT+2; (2) Horario de invierno, GMT+1.

Asimismo, se han adquirido datos LST del sensor MODIS para los mismos días de vuelo utilizando la plataforma "NASA EarthData" (https://search.earthdata.nasa.gov). Para algunos días no hubo información disponible por la presencia de nubes y por un fallo del satélite AQUA entre el 16 de agosto y el 14 de septiembre de 2020 (Tabla 3.2). Por su parte, los 21 minisensores *iButton*® se han colocado en diferentes ambientes de las 6 áreas de estudio (Figura 3.3) para validar los datos de temperatura del UAV. Han sido enterrados a ~5 cm bajo el suelo y protegidos con *parafilm* en el interior de un envase de plástico con el fin de evitar concentraciones de humedad que pudieran cortocircuitarlos. La resolución temporal establecida para el registro de la temperatura ha sido horaria en todos los casos.

Tabla 3.2. Disponibilidad de datos LST de MODIS (en verde, disponible; en rojo, no disponible).

Área de estudio	Verano					Otoño				
	Día	MOD-TERRA		MYD-AQUA		Día	MOD-TERRA		MYD-AQUA	
		10:30	22:30	1:30	13:30		10:30	22:30	1:30	13:30
HERR	20-08-20					31-10-20				
PING	31-07-20					31-10-20				
GRNW	31-07-20					31-10-20				
PLFO	01-08-20					30-10-20				
PLFC	01-08-20					30-10-20				
PLFE	01-08-20					30-10-20				

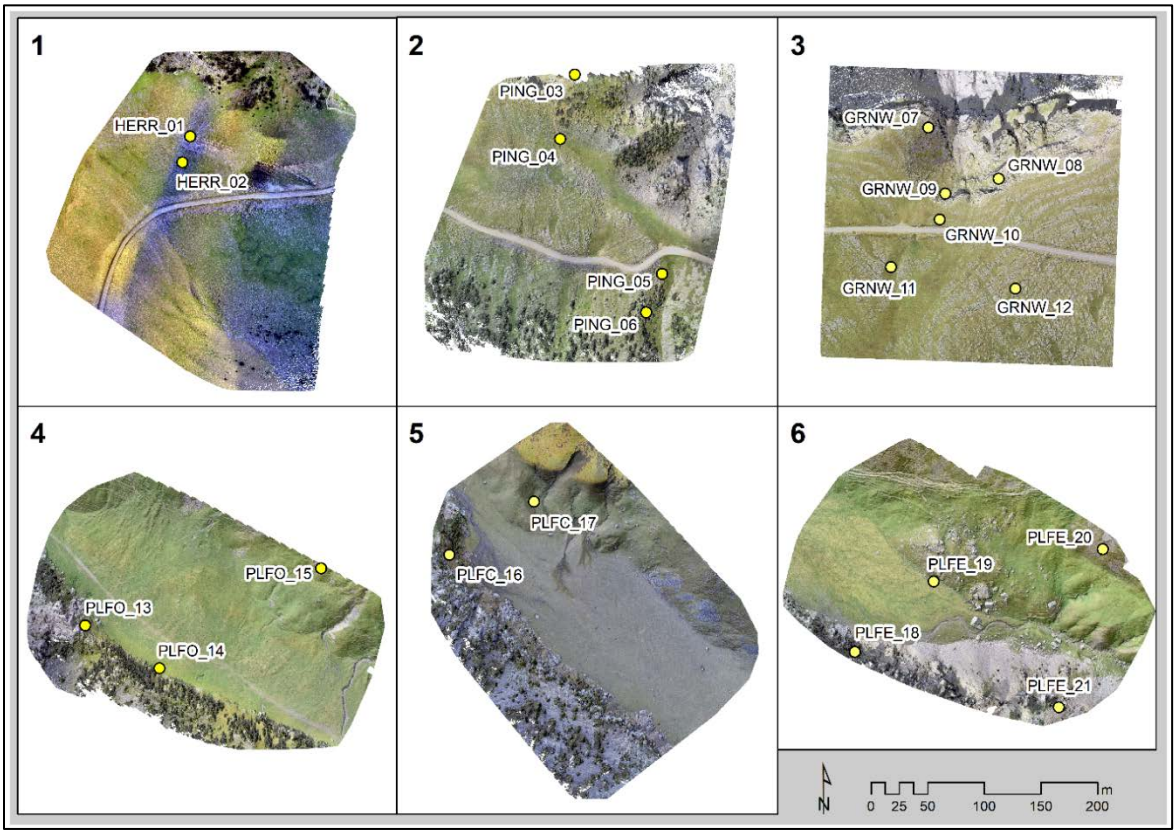


Figura 3.3. Ubicación de los *iButtons* en las áreas de estudio: [1] HERR; [2] PING; [3] GRNW; [4] PLFO; [5] PLFC; [6] PLFE.

3.2.2. Procesado de datos UAV

Las imágenes obtenidas por el UAV han sido procesadas con el programa "Pix4Dmapper" y georreferenciadas al sistema de coordenadas de referencia local de cada sector: ETRS89 / UTM 30N para las áreas de la Sierra de las Cutas y ETRS89 / UTM 31N para las áreas de la Sierra de Espierba. Se han extraído los datos LST a partir de las imágenes en TIR para generar los 24 mapas ráster de temperatura en grados centígrados con una resolución final que varió en cada una de las áreas (Tabla 3.3). A partir de ellos, se han generado un total 4 mapas de estabilidad térmica para cada una de las 6 áreas de estudio: estabilidad térmica de verano (ET_V), estabilidad térmica de otoño (ET_O), estabilidad térmica diaria (ET_D) y estabilidad térmica general (ET_G). La ET_V y ET_O han sido calculadas a partir de la diferencia entre la temperatura diaria máxima (tomada a la tarde) y la mínima (tomada a la mañana) de verano y otoño, respectivamente. Los valores de ambos mapas se han normalizado como z-valores y se han sumado para generar la ET_D. Los z-valores originales negativos constituían las zonas más estables, por lo que el histograma se ha invertido y positivizado para mejorar su comprensión; de este modo, las zonas más estables han sido los z-valores más altos. Finalmente, a partir de la intersección de las zonas más estables de verano y otoño, definidas como la parte del histograma de z-valores situada en el décimo quantil (Q10), se ha generado el cuarto mapa de ET_G, que son las zonas más estables tanto en verano como en otoño.

Tabla 3.3. Resolución espacial de los mapas ráster para cada área de estudio.

Área de estudio	HERR	PING	GRNW	PLFO	PLFC	PLFE
Tamaño del píxel (cm)	2,725	2,452	3,155	2,298	2,676	2,502

Paralelamente, se han extraído datos RGB para obtener ortofotografías de cada sitio y generar Modelos Digitales de Superficies (MDS) a partir de fotogrametría SFM a la misma resolución que las imágenes térmicas. Los MDS han facilitado la generación de tres variables geoambientales modificadoras del clima local: la pendiente, la orientación y la radiación solar incidente. Las dos primeras han sido generadas con el paquete "raster v3.4-5" para entorno R (Hijmans, 2020), si bien la orientación, dado su carácter circular, ha sido reconvertida en variable continua a partir del seno y el coseno de los valores de orientación en radianes, resultando la orientación respecto al E y al N, respectivamente. Por su parte, la radiación solar incidente ha sido creada con el paquete "insol v1.2.1" (Corripio, 2019) para los días y horas de vuelo de verano y otoño en cada área de estudio. Para generar esta variable se ha utilizado la pendiente y la orientación en grados, y una serie de parámetros como el día juliano, la humedad relativa promedio, la visibilidad horizontal, la latitud o la longitud. Por último, a partir de las ortofotografías obtenidas por el UAV se han digitalizado

manualmente las cubiertas del suelo de cada área, estableciéndose tres categorías principales: zonas arboladas, pastizales y roquedos/suelo desnudo.

Tabla 3.4. Variables geoambientales extraídas de los datos UAV.

Variable	Descripción	Origen
Orientación respecto al norte (*Northness*)	Coseno de la orientación en radianes	MDS
Orientación respecto al este (*Eastness*)	Seno de la orientación en radianes	MDS
Pendiente (*Slope*)	Pendiente en grados	MDS
Radiación solar verano (*Summer solar radiation)*	Radiación solar el día de los vuelos en verano	Pendiente, Orientación
Radiación solar otoño (*Autumn solar radiation*)	Radiación solar el día de los vuelos en otoño	Pendiente, Orientación
Cubierta del suelo (*Ground Cover*)	Categorías: [1] Zona arbolada; [2] Pastizal; [3] Roquedo/Suelo desnudo	Ortofotografía RGB

3.2.3. Análisis de la información

Tras los últimos vuelos de otoño se ha procedido a la descarga de los datos de los 21 *iButtons* para extraer la información de temperaturas y compararla con los datos LST registrados por el UAV. Los 4 vuelos realizados en cada una de las 6 áreas han permitido disponer de 84 valores de temperatura totales para comparar mediante correlación lineal. Además, la generación de las variables geoambientales ha posibilitado analizar su influencia en la estabilidad térmica. Para ello, se ha realizado un sampleo aleatorio de 2.000 puntos en cada una de las 6 áreas de estudio sobre los mapas ráster de ET_V, ET_O y ET_D, y de las variables geoambientales descritas en la Tabla 3.4. Posteriormente, se han generado modelos de regresión lineales (LM), siendo las variables dependientes las estabilidades y las variables independientes las predictoras geoambientales, para estimar la influencia que tienen estas últimas sobre las primeras. La exploración se ha iniciado con modelos que han incluido todas las predictoras, seleccionándose el modelo final mediante proceso *stepwise* o por pasos.

4. Resultados

4.1. Comparación de datos LST-UAV y LST-MODIS

La obtención de datos LST de MODIS los mismos días que los vuelos UAV ha permitido comparar ambas informaciones y el efecto que produce la reducción en la escala. Los vuelos UAV han posibilitado identificar la heterogeneidad térmica a escala de paisaje (en este estudio, de centímetros) que no puede ser percibida por sensores térmicos satelitales. La Tabla 4.1 muestra el valor de temperatura de las mallas MODIS de 1 km² que cubren las distintas áreas de estudio, y los valores medios de la temperatura registrada por el UAV de cada una de las áreas. Se ha observado una diferencia mayor entre ambas informaciones en las temperaturas de la mañana que en las de la tarde. Por su parte, las Figuras 4.1 y 4.2 permiten observar la variación de temperatura que existe en las áreas en dos momentos concretos y que no han podido ser captadas por MODIS dada su mayor resolución espacial.

Tabla 4.1. Valores en ºC de LST-MODIS y de LST-UAV promediados para cada área.

		HERR	PING	GRNW	PLFO	PLFC	PLFE
VERANO	UAV 7 – 9 h	8,4026	12,1928	9,0618	10,4644	10,1146	11,8386
	MOD 10:30 h	23,3178	24,0884	23,8187	30,3022	29,6556	29,6556
	UAV 14 – 16 h	24,9732	28,9796	30,3534	27,2444	27,7492	28,3992
	MYD 13:30 h	NA (1)	28,5218	31,4552	34,0762 (2)	32,9742 (2)	32,9742 (2)
OTOÑO	UAV 7 – 9 h	-4,1351	0,8215	1,7205	1,5145	-4,6791	-5,8757
	MOD 10:30 h	16,2532	16,5710	16,6353	17,7187	17,9618	17,9618
	UAV 14 – 16 h	14,6597	10,0161	14,4881	18,9712	15,8775	11,0398
	MYD 13:30 h	13,0937	18,0144	18,7478	20,6534	20,3316	20,3316

(1) Sin datos por fallo del satélite AQUA entre el 16-08-20 y el 14-09-20.

(2) Datos del día anterior por ausencia de datos el día de vuelo.

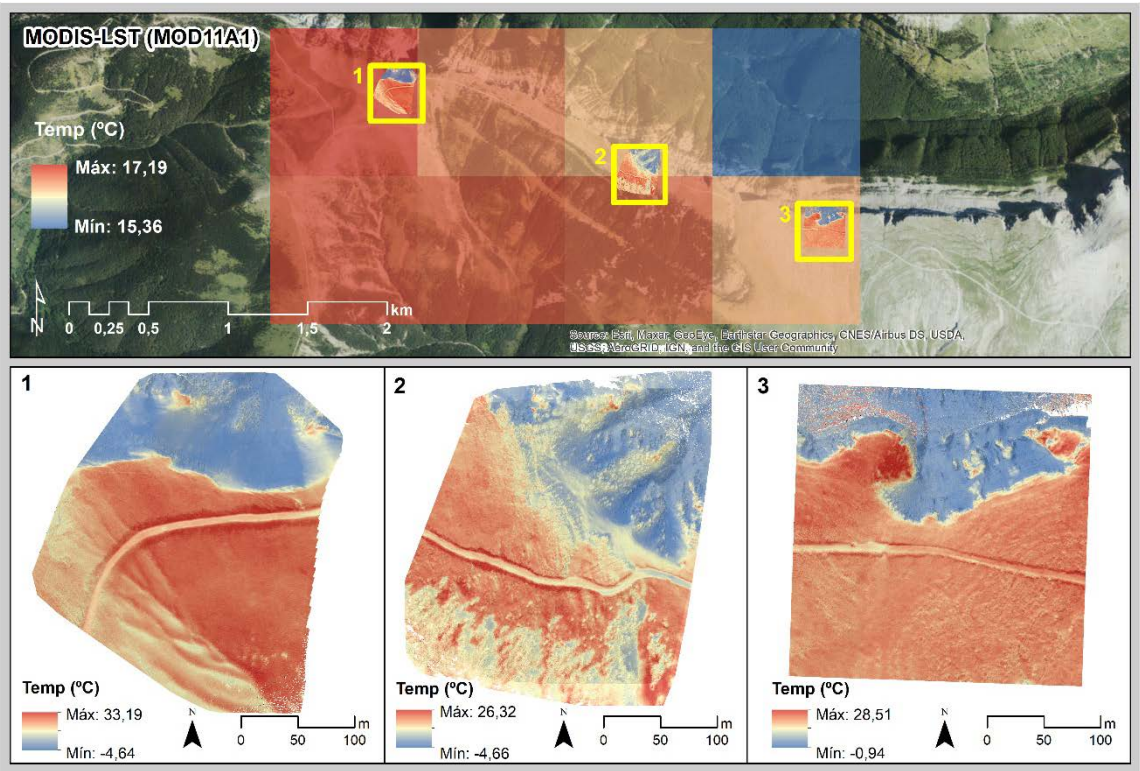


Figura 4.1. Datos LST de MODIS (arriba) y de UAV (abajo) el día 31-10-2020; hora MODIS: 10:30 h; hora UAV: 14:00-16:00 h. Áreas: [1] HERR; [2] PING; [3] GRNW.

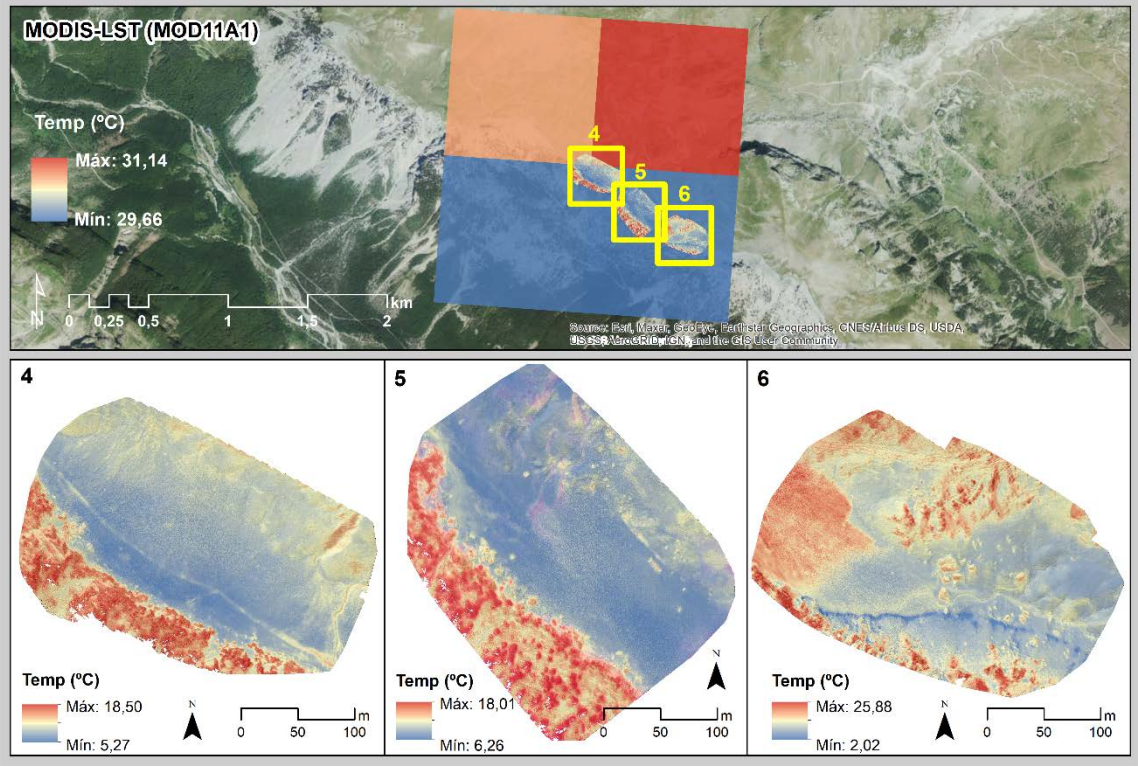


Figura 4.2. Datos LST de MODIS (arriba) y de UAV (abajo) el día 01-08-2020; hora MODIS: 10:30 h; hora UAV: 7:00-9:00 h. Áreas: [4] PLFO; [5] PLFC; [6] PLFE.

4.2. Validación de datos LST-UAV

El análisis de correlación lineal entre las 84 temperaturas estimadas por el UAV y las registradas por los *iButtons* en el mismo punto han mostrado una alta correlación, con un valor de R^2 de 0,7741 (Figura 4.3). Por áreas de estudio, los valores de correlación han sido igualmente altos (Figura 4.4), con valores de R^2 de 0,8441 en HERR; 0,8580 en PING; 0,7992 en GRNW; 0,7406 en PLFO; 0,8860 en PLFC; y 0,8435 en PLFE. No obstante, la muestra de registros de *iButtons* en áreas como HERR y PLFC es todavía muy reducida y, por tanto, los valores de correlación no pueden ser aún concluyentes.

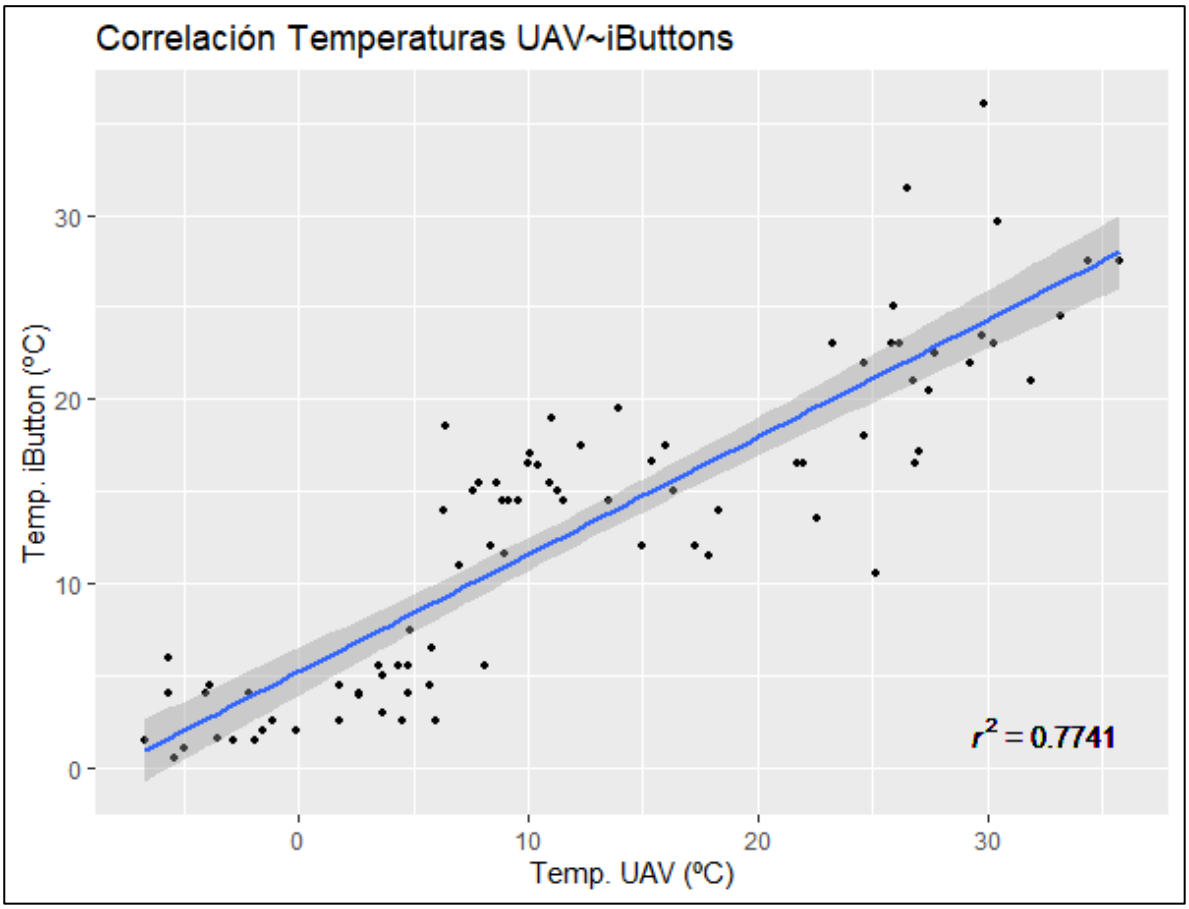


Figura 4.3. Correlación entre todas las temperaturas estimadas por el UAV y las registradas por los *iButtons* en el mismo punto (n=84).

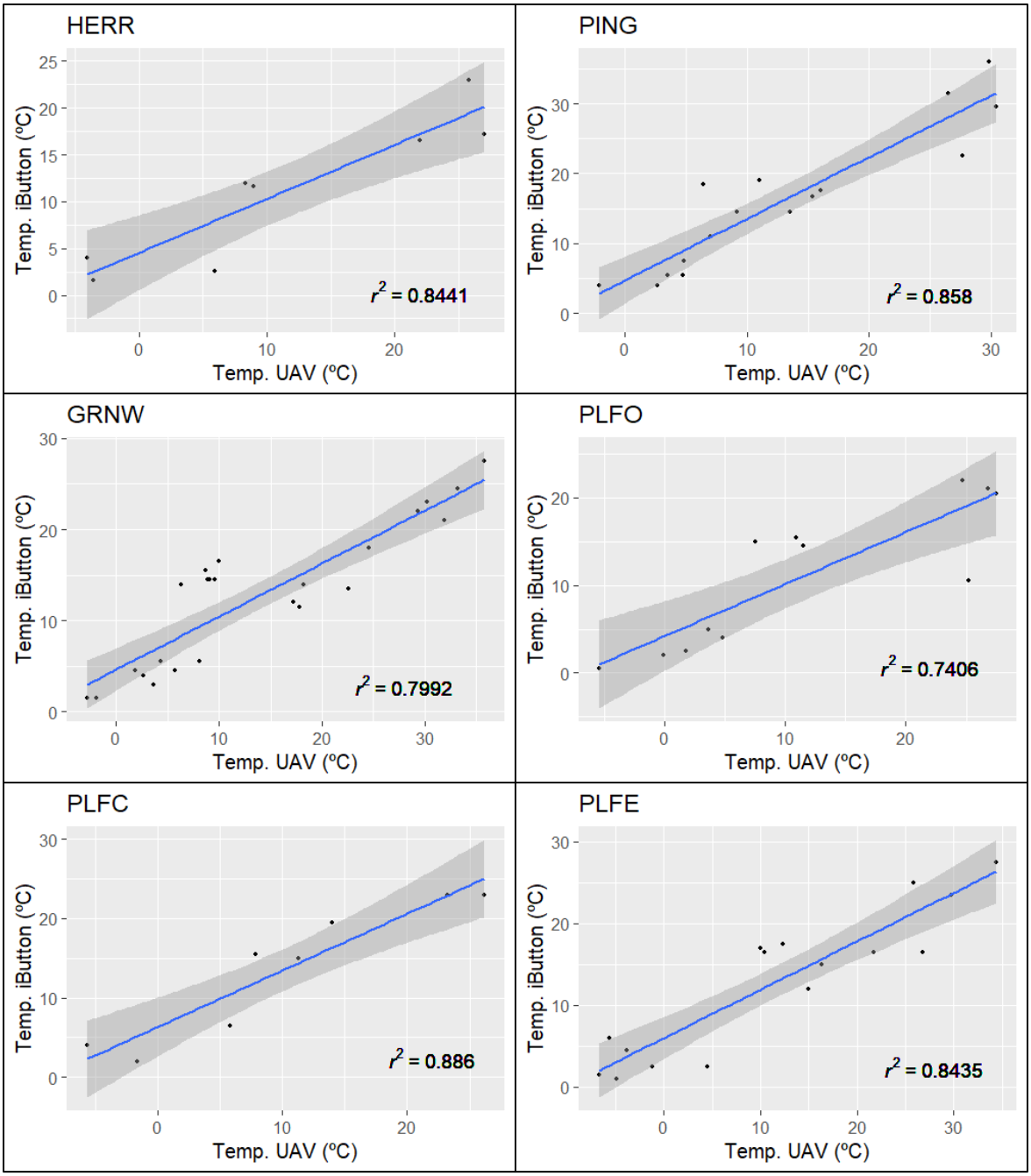


Figura 4.4. Correlación entre las temperaturas estimadas por el UAV y las registradas por los *iButtons* en el mismo punto en cada área (HERR: n=8; PING: n=16; GRNW: n=24; PLFO: n=12; PFLC: n=8; PLFE: n=16).

4.3. Análisis de la estabilidad térmica

La diferencia entre la temperatura máxima y mínima registradas en los vuelos ha permitido generar mapas de estabilidad térmica. En verano (Figura 4.5) la mayor estabilidad se ha concentrado en las zonas arboladas y en los pastizales de las laderas de umbría, siendo especialmente relevante en pequeñas zonas situadas bajo paredones o roquedos. Por el contrario, las zonas más inestables han correspondido a las gleras, los roquedos y los pastizales situados en el fondo de valle de Planafonda y en las laderas de solana de la Sierra de las Cutas. En particular, en HERR la estabilidad ha destacado en las zonas arboladas y en pequeños sectores bajo roquedos de la ladera umbrosa del valle de Ordesa; en PING en las zonas arboladas orientadas al N, S y E, y en zonas de pasto de baja pendiente; y en GRNW en los pastos de orientación N-NW bajo roquedo del gran cortado, así como gran parte de la ladera N muy escarpada del valle de Ordesa. Por su parte, en PLFO, PLFC y PLFE ha destacado el pequeño corredor cercano a la ladera N escarpada de la cubeta, la propia ladera de umbría con especial atención a sectores bajo roquedo, las zonas arboladas, partes de la ladera de solana de Planafonda y un pequeño sector del fondo de valle en PLFC que se sitúa cerca de una escorrentía superficial-subsuperficial.

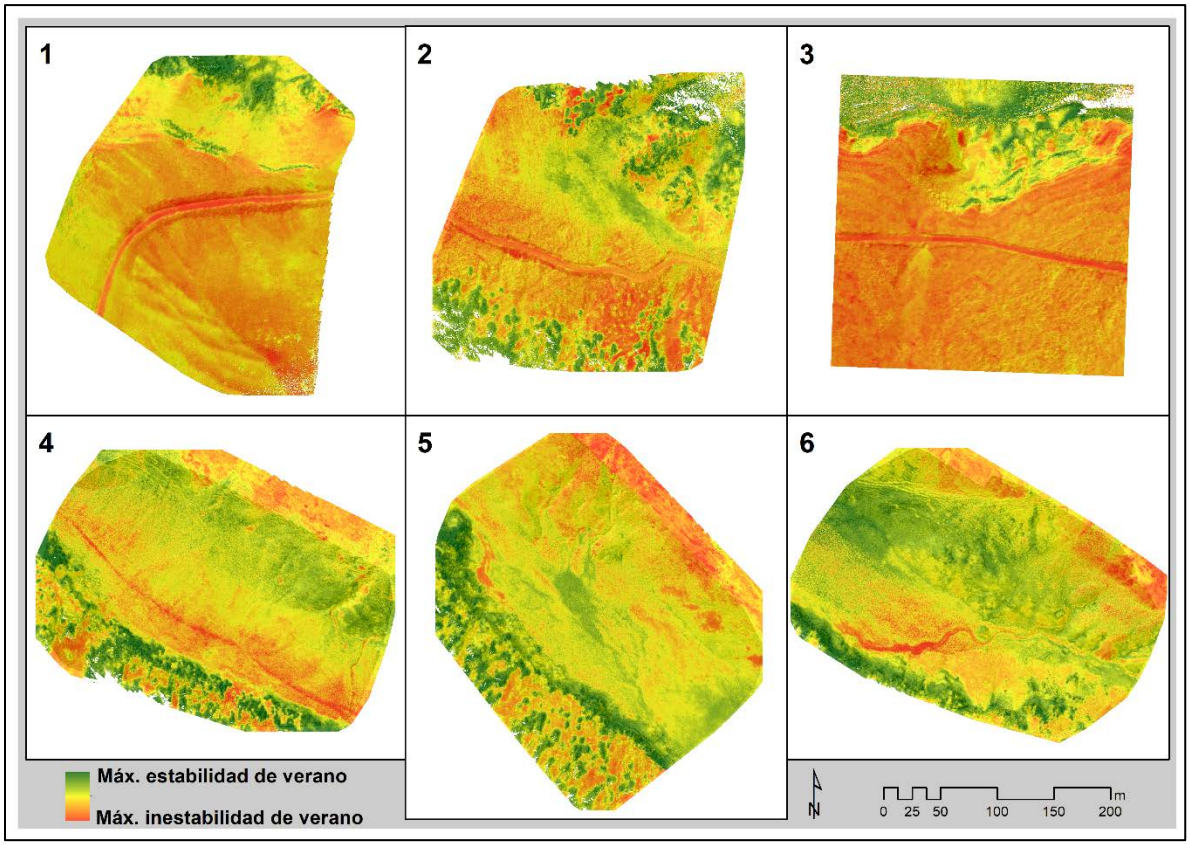


Figura 4.5. Estabilidad térmica de verano (ET_V) en: [1] HERR; [2] PING; [3] GRNW; [4] PLFO; [5] PLFC; y [6] PLFE.

En otoño (Figura 4.6) las áreas de umbría han destacado sobre las demás como zonas térmicamente estables, así como zonas arboladas en orientación S y E, y algunos sectores de pasto. En contraste, han resultado muy inestables los pastizales situados en laderas de solana y la superficie de los roquedos. Concretamente, en las áreas HERR, PING y GRNW se ha observado una gran diferencia de estabilidad entre la umbría y la solana. Asimismo, han destacado las zonas arboladas orientadas al S y al E en PING, y sectores de pasto situados en una pequeña cubeta de orientación S. En las áreas PLFO, PLFC y PLFE ha sido notorio el efecto de la ladera escarpada de umbría sobre el sector más meridional del fondo de valle que es mucho más estable que el resto, especialmente en el PLFE donde aumenta su extensión dada la mayor altitud que alcanza la ladera. También han destacado algunas zonas de pasto cercanas a escorrentías en PFLC, y junto a roquedos en solana en PLFE.

La combinación de las dos estabilidades anteriores (ET_V y ET_O) ha dado como resultado la estabilidad térmica diaria (ET_D), donde las zonas arboladas y las laderas de umbría, con especial énfasis en los pequeños sectores de pastizal bajo y junto a roquedo, han sido las zonas más estables, mientras que las laderas de solana, la superficie de los roquedos y ciertos sectores de glera han constituido las áreas de mayor inestabilidad (Figura 4.7).

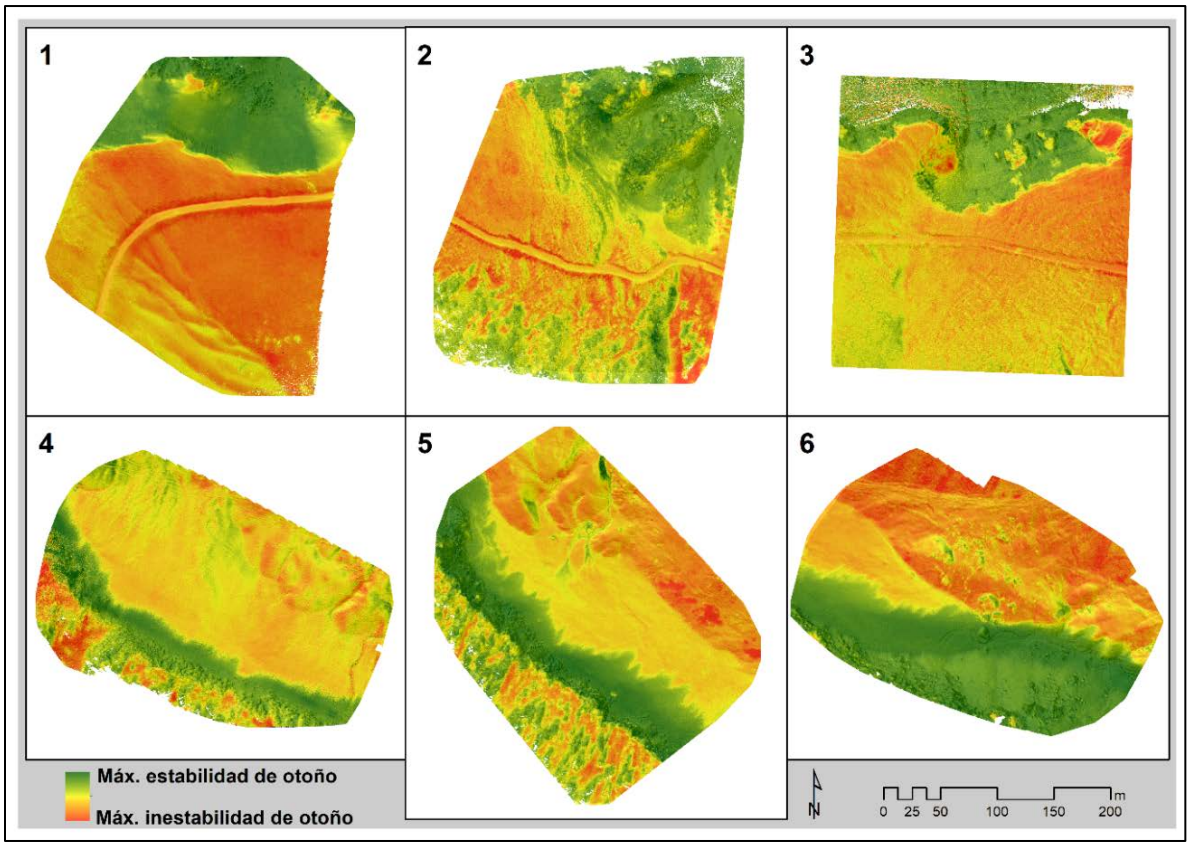


Figura 4.6. Estabilidad térmica de otoño (ET_O) en: [1] HERR; [2] PING; [3] GRNW; [4] PLFO; [5] PLFC; [6] PLFE.

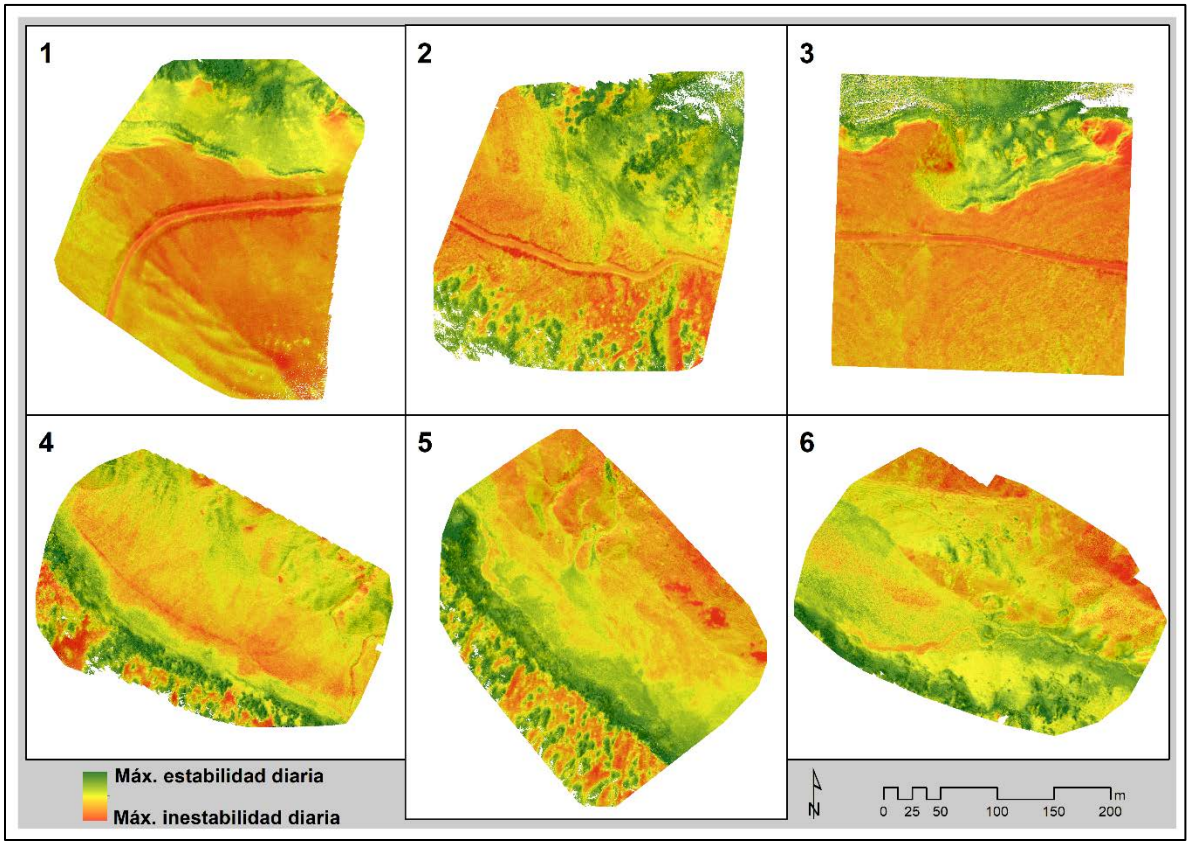


Figura 4.7. Estabilidad térmica diaria (ET_D) en: [1] HERR; [2] PING; [3] GRNW; [4] PLFO; [5] PLFC; [6] PLFE.

La intersección de las zonas con máxima estabilidad de verano y de otoño, establecida en el Q10 del histograma de z-valores, ha permitido generar la estabilidad térmica general (ET_G) de cada área de estudio, que son las zonas caracterizadas por haber sido muy estables tanto en verano como en otoño. Por sectores, en la Sierra de las Cutas la ET_G ha predominado en las zonas arboladas situadas en laderas N y E, y en pastizales protegidos por afloramientos rocosos. Concretamente, la ET_G en HERR se ha localizado en las áreas arboladas y en pastos bajo roquedo, ambos en la ladera de umbría hacia el valle de Ordesa (Figura 4.8); en PING en las zonas arboladas tanto en umbría como orientadas al E pero no en las de solana, y en pastos bajo roquedo (Figura 4.9); y en GRNW en los grandes escarpes hacia el valle de Ordesa y en pastos bajo roquedo (Figura 4.10). En el sector de la Sierra de Espierba la ET_G se ha localizado fundamentalmente en la parte más meridional de la cubeta, bajo la ladera escarpada de umbría que cierra el valle, destacando las zonas arboladas y los pastos protegidos por los paredones rocosos (Figuras 4.11, 4.12 y 4.13).

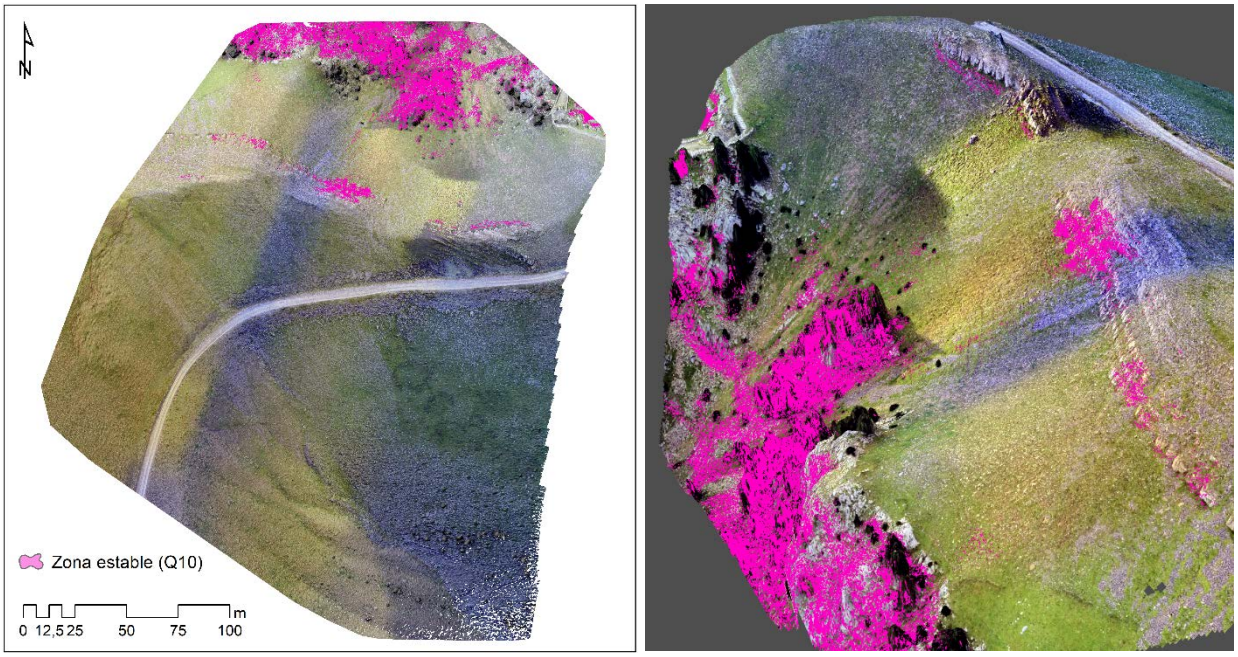


Figura 4.8. Estabilidad térmica general (ET_G) en HERR. (**a**) Izda: vista general; (**b**) Dcha: detalle de escena tridimensional a partir de MDS, vista desde el NW.

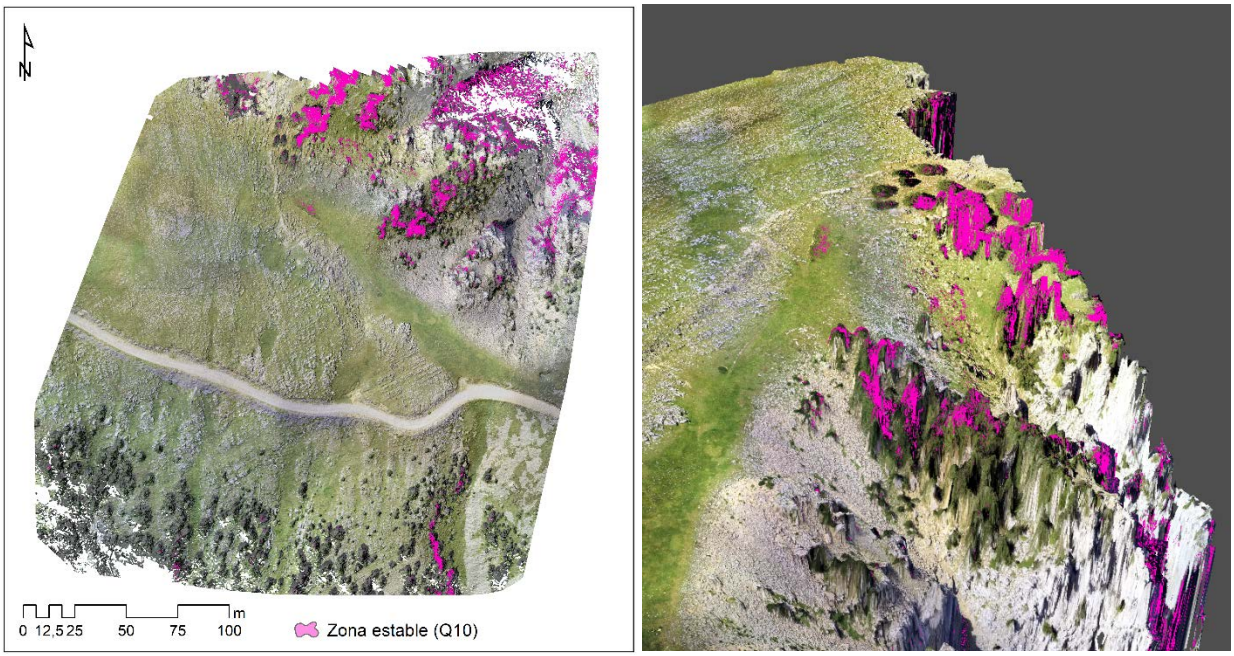


Figura 4.9. Estabilidad térmica general (ET_G) en PING. (**a**) Izda: vista general; (**b**) Dcha: detalle de escena tridimensional a partir de MDS, vista desde el E.

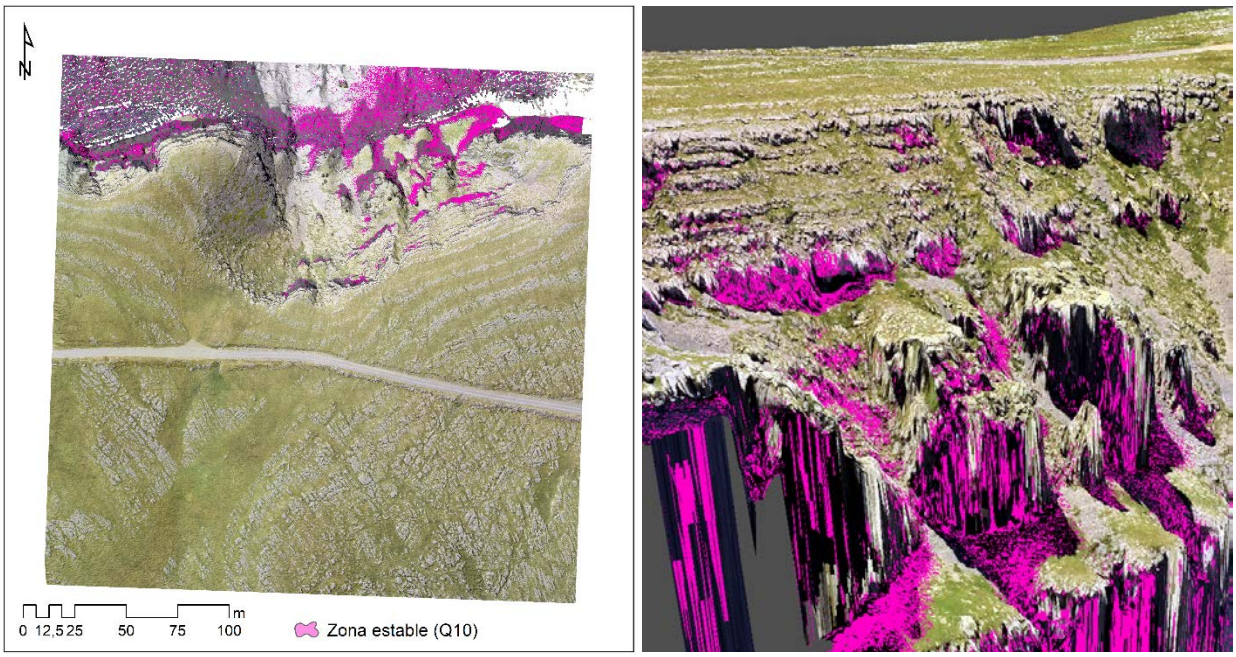


Figura 4.10. Estabilidad térmica general (ET_G) en GRNW. (**a**) Izda: vista general; (**b**) Dcha: detalle de escena tridimensional a partir de MDS, vista desde el N.

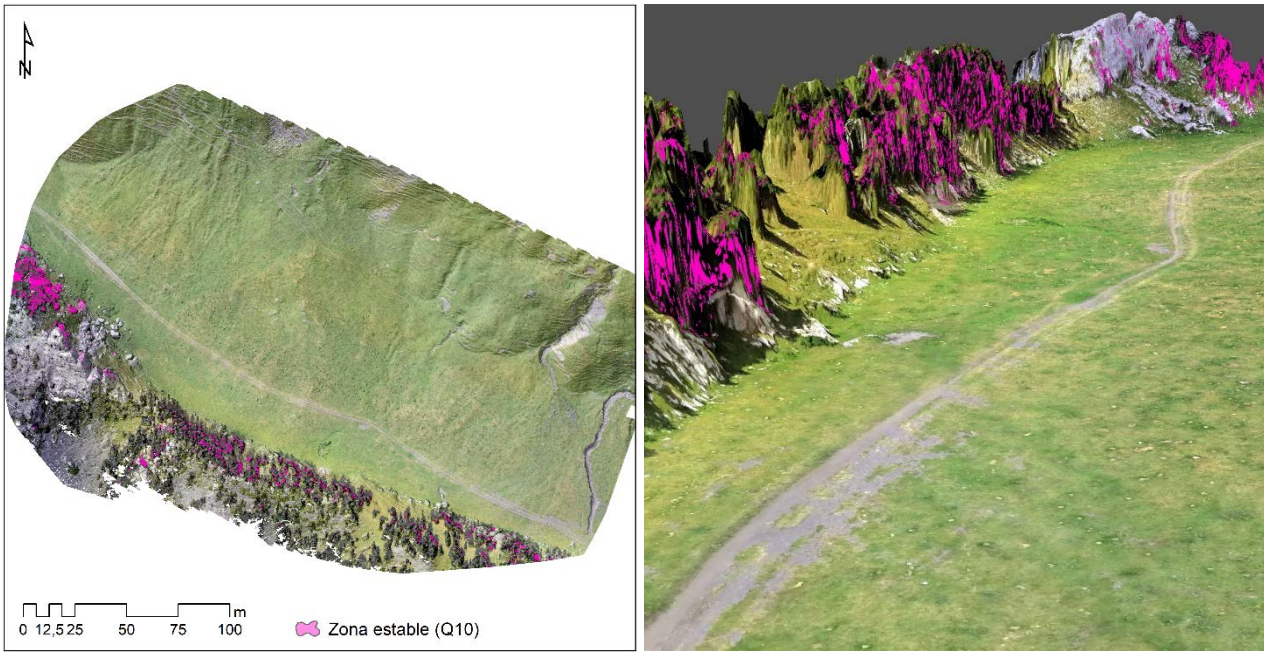


Figura 4.11. Estabilidad térmica general (ET_G) en PLFO: (**a**) Izda: vista general; (**b**) Dcha: detalle de escena tridimensional a partir de MDS, vista desde el NE.

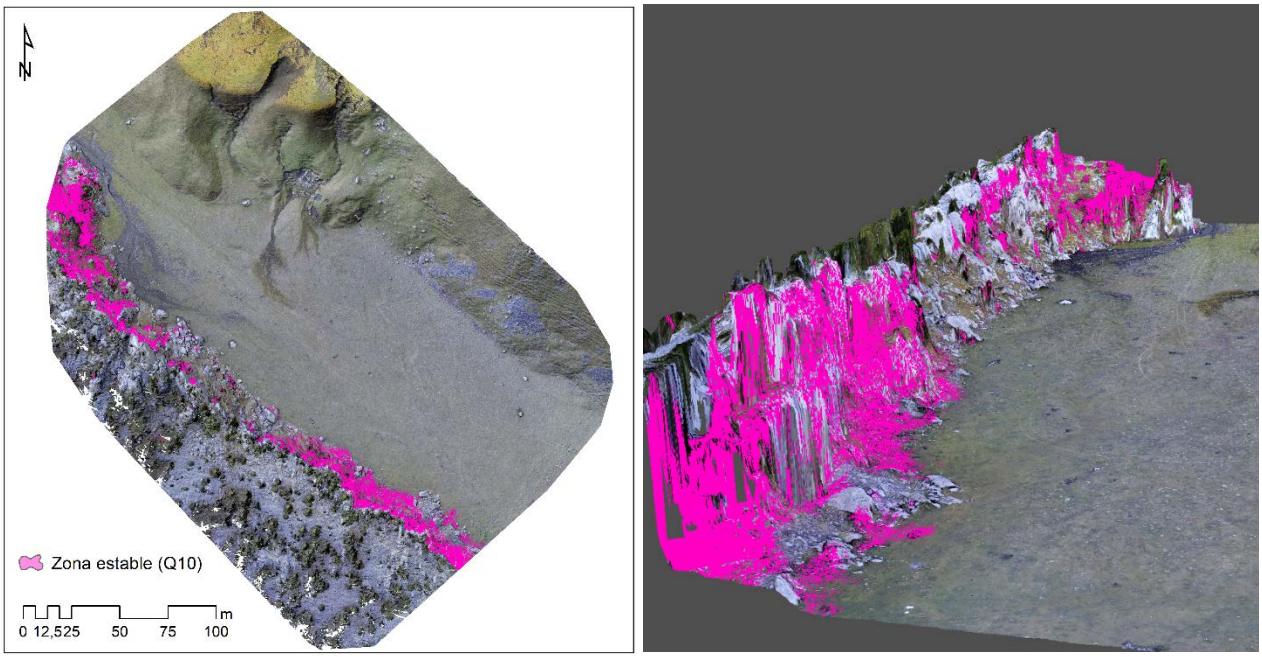


Figura 4.12. Estabilidad térmica general (ET_G) en PLFC: (**a**) Izda: vista general; (**b**) Dcha: detalle de escena tridimensional a partir de MDS, vista desde el E.

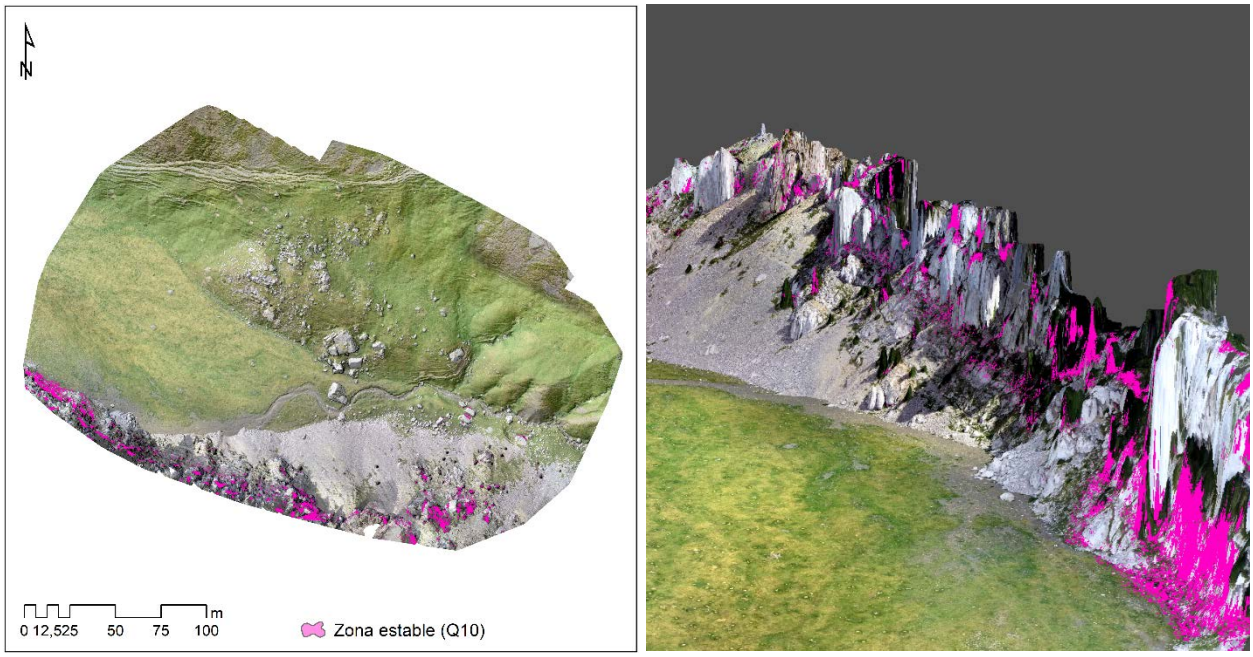


Figura 4.13. Estabilidad térmica general (ET_G) en PLFE: (**a**) Izda: vista general; (**b**) Dcha: detalle de escena tridimensional a partir de MDS, vista desde el NW.

4.4. Influencia de las variables geoambientales en la estabilidad térmica

El sampleo aleatorio de 2.000 puntos realizado sobre las 6 áreas ha permitido extraer los valores de estabilidad térmica y del conjunto de las variables geoambientales para generar modelos de regresión lineal (LM). Se ha encontrado una alta colinealidad entre las dos variables de radiación solar y la orientación respecto al N, por lo que las dos primeras se han descartado para los análisis de regresión. Todas las variables geoambientales han tenido una influencia significativa (p-value < 0,05) sobre la ET_V, la ET_O y la ET_D en todas las áreas de estudio, aunque su grado de relevancia ha variado en determinados casos. El ajuste de modelos ha sido menor en las áreas de la Sierra de Espierba, y más bajo en general en la ET_V. Los mejores ajustes se han conseguido en HERR y los peores en PLFE en la ET_V, y en PLFO en la ET_O y ET_D.

Tabla 4.1. Valores R^2 de ajuste de modelos de regresión lineal (LM).

ESTABILIDAD	HERR	PING	GRNW	PLFO	PLFC	PLFE
Verano (ET_V)	0,4809	0,4061	0,4659	0,2906	0,2928	0,0821
Otoño (ET_O)	0,8780	0,5114	0,4878	0,2700	0,4236	0,5775
Diaria (ET_D)	0,7419	0,5236	0,5538	0,3353	0,4737	0,3836

* Todos los ajustes han tenido un nivel de significación p-value < 0,001.

En cuanto a la influencia de las variables geoambientales sobre la estabilidad (ver Mat. Supl. 005), en la ET_V todas han sido significativas excepto en algunas áreas. Sólo la pendiente ha sido muy significativa en todas, con una relación siempre positiva, excepto en HERR donde la estabilidad se ha producido en zonas arboladas de poca pendiente y en pequeños pastos bajo roquedo. También la orientación respecto al E ha sido relevante en todas las áreas aunque en PING su significación ha sido baja. En el caso de la orientación respecto al N, no ha sido significativa en PLFE ya que gran parte de la misma está ocupada por una glera que se ha mostrado inestable térmicamente. La orientación al E sólo ha sido más importante que la orientación al N en PLFO y PLFE. Las zonas arboladas han tenido una mayor influencia que los pastizales y los roquedos, aunque en GRNW no han sido significativas dada la poca presencia de esta cubierta.

En la ET_O todas las variables han alcanzado un alto grado de significación en la totalidad de las áreas, excepto las cubiertas en GRNW donde las zonas arboladas no tienen apenas presencia. La pendiente ha tenido una relación negativa en HERR y en las áreas de Planafonda, dada la importante presencia de las laderas de solana inestables. La orientación respecto al N ha sido más importante que la respecto al E, excepto en PLFO donde hay una importante zona estable en esta orientación. Por último, las zonas arboladas, excepto en el

caso expuesto de GRNW, han sido más influyentes que los pastizales y los roquedos en la estabilidad.

En la ET_D la pendiente ha tenido una relación significativa excepto en PLFE. Asimismo, la relación ha sido positiva en todos los casos, excepto en PLFC que, además, ha presentado el nivel de significación más débil. El origen de esta baja o nula significación en las dos áreas de Planafonda puede ser la ladera de solana, que ha resultado ser una zona de muy poca estabilidad diaria. Por su parte, la orientación ha resultado ser significativamente positiva en todas las áreas. Además, la orientación respecto al N ha presentado valores de estimación más elevados que la orientación respecto al E, por lo que las laderas de umbría han sido más importantes para la ET_D. La única excepción ha sido en PLFO, donde la orientación al E ha cobrado mayor importancia, debido al paredón rocoso de orientación E que ha absorbido la mayor parte de las zonas de ET_D del área. Por último, en las cubiertas del suelo, las zonas arboladas han tenido mayor peso en la estabilidad que los pastizales y las áreas de roquedo/suelo desnudo, tal y como se ha observado en los mapas de estabilidades.

5. Discusión

En el contexto de calentamiento global en el que nos encontramos, muchas especies sólo podrán sobrevivir en micro-refugios climáticos gracias a la estabilidad térmica a largo plazo que ofrecen estos ambientes. Para conocer qué especies se verán beneficiadas al vivir en dichos lugares, o la proporción de biodiversidad a la que pueden afectar, es preciso determinar dónde se encuentran estos micro-refugios o a qué variables geoambientales están asociados. Con la ayuda de una unidad UAV con cámara térmica y RGB de alta resolución, este proyecto ha permitido realizar una novedosa aproximación metodológica al concepto de micro-refugios climáticos, identificando zonas térmicamente estables en dos sectores del Pirineo Central aragonés y estimando la importancia de varios factores geoambientales que favorecen su aparición.

5.1. Temperaturas estimadas por el UAV

La elevada resolución espacial con la que se ha trabajado en este proyecto ha permitido identificar zonas de temperaturas estables a escala centimétrica que no pueden ser captadas por sensores térmicos satelitales como MODIS. Este sensor posee una muy buena resolución temporal, con hasta cuatro registros diarios desde el año 2002, pero su resolución espacial homogeneiza la diversidad térmica que ofrecen los espacios topográficamente complejos como las montañas. Además, se ha comprobado que los valores medios de temperatura que

registra MODIS en el momento más cálido han sido más altos que los registrados por el UAV. Las imágenes térmicas obtenidas con el UAV han posibilitado la reducción de la escala de la información LST y descubrir zonas térmicamente estables con un grado de detalle muy alto donde MODIS sólo da un dato de temperatura. A esta ventaja se añade el hecho de que el uso de UAVs puede también permitir la obtención de datos a mayor resolución temporal. En este proyecto se han realizado dos conjuntos de vuelos, uno en verano y otro en otoño, en áreas de compleja accesibilidad. Sin embargo, vuelos mensuales durante el periodo de crecimiento vegetativo, o varios vuelos en distintos momentos del día ayudarían a identificar más en detalle las zonas térmicamente estables e inestables para las plantas. La disponibilidad de obtener mapas de información continua de temperatura a una muy alta resolución espacial y temporal a partir de un único instrumento supone un avance significativo en la detección de micro-refugios.

Los datos LST estimados con el UAV han podido ser validados a partir de los registros observados por los *iButtons*. Se ha obtenido una buena correlación que ha permitido confirmar la capacidad de los drones térmicos para detectar temperaturas fiables de la superficie terrestre. Estos minisensores han sido la herramienta principal de numerosos estudios previos de detección de micro-refugios climáticos por su buena precisión en la estimación de temperaturas (ver Hubbart *et al.*, 2005; Hoffrén, 2019) y la versatilidad que ofrecen para ser ubicados en cualquier punto del territorio. En este proyecto, los *iButtons* han sido colocados a unos 5 cm bajo suelo mientras que los valores LST del UAV han procedido de la superficie, lo que da valor a la buena correlación obtenida entre ambos. No obstante, esta relación es susceptible de ser mejorada incorporando a los valores LST la emisividad real de las distintas cubiertas del terreno (Zellweger *et al.*, 2019), que es la capacidad que tienen los objetos de emitir radiación infrarroja térmica. En los vuelos térmicos que se han realizado, se configuró una emisividad promedio de 0,95 para todas las cubiertas, si bien ésta varía según el tipo de objeto entre 0,93 y 0,99. Por tanto, la incorporación de esta variable a los registros LST puede ayudar a conseguir mejores correlaciones con los *iButtons*.

5.2. Distribución de la estabilidad térmica e influencia del terreno

La estabilidad de las temperaturas es una de las características fundamentales de los micro-refugios climáticos (Dobrowski, 2011; Ashcroft *et al.*, 2012; Keppel *et al.*, 2015), ya que les hace menos expuestos a valores extremos o a cambios generales de temperatura. En este trabajo, se han logrado identificar áreas estables a partir de los datos LST-UAV de muy alta resolución en dos épocas distintas del año. La cubierta con mayor presencia de zonas estables en las 6 áreas de estudio, tanto en verano como en otoño, ha sido el arbolado en

laderas de pendiente de umbría y de solana. En este sentido, los resultados han confirmado el efecto positivo de los bosques en la estabilidad térmica y su potencial como ecosistema propicio para los micro-refugios. Latimer & Zuckerberg (2016) ya observaron que los bosques fragmentados producen temperaturas diarias mínimas y medias más frías que las áreas forestales más compactas. Las copas de los árboles en bosques densos dificultan la entrada de la radiación solar y protegen del frío a los organismos que habitan en el suelo, produciendo en los estratos más bajos temperaturas menos extremas (de Frenne *et al.* 2019). Se trata, por tanto, de espacios de un elevado valor ecológico para la protección térmica de la cohorte de especies que los acompañan, puesto que favorecen la estabilidad de las temperaturas. Su adecuada gestión y conservación para evitar la degradación por causas naturales (e.g., incendios forestales) o humanas (e.g., cambios en los usos del suelo) son esenciales para la preservación de la biodiversidad. En este sentido, el aumento de la masa forestal en las áreas montañosas ayudaría a garantizar la supervivencia de especies raras o amenazadas al refugiarse en su interior durante periodos de cambio climático.

Los hábitats rocosos han constituido otra de las zonas térmicamente estables; concretamente, los sectores de umbría ubicados bajo y junto a roquedo en HERR, GRNW, PLFO y PLFC. Estos resultados concuerdan con investigaciones previas, en las que se considera que estos hábitats albergan abundantes especies endémicas y en límite de distribución (Schut *et al.*, 2014; Bátori *et al.*, 2017; Tejero *et al.*, 2017; Bátori *et al.*, 2020; García *et al.*, 2020). Al contrario que las áreas arboladas, en las que se pueden producir modificaciones a corto-medio plazo, los roquedos no cambian por evolución del paisaje, por lo que estas zonas poseen un gran valor ecosistémico a largo plazo. Se ha demostrado en estudios previos que los roquedos han sido clave para la persistencia de la biodiversidad durante el último periodo glaciar (Bennett *et al.*, 1991; Bennett & Provan, 2008; Dobrowski, 2011; Keppel *et al.*, 2011), lo que ha permitido a plantas de antiguos linajes a sobrevivir hasta nuestros días. García *et al.* (2020) demostró empíricamente, a partir de registros de *iButtons*, el efecto estabilizador de los hábitats rocosos sobre las temperaturas extremas para el caso de dos especies endémicas, una de ellas de gran antigüedad. En general, las laderas umbrosas reciben una menor cantidad de radiación solar, por lo que tienden a calentarse menos que otras áreas. Los afloramientos rocosos situados en estas laderas pueden acentuar esta protección contra la insolación en verano, o contra los vientos fríos y las heladas en invierno, haciendo que las temperaturas sean más estables bajo su cobijo. Asimismo, los roquedos suelen poseer múltiples y pequeñas grietas, que pueden contribuir a generar microhábitats. Estas diferencias a tan pequeña escala han podido ser detectadas por el UAV, por lo que constituyen un gran potencial para explorar estos hábitats.

Los análisis de regresión realizados han indicado que la gran mayoría de las variables geoambientales del modelo final (pendiente, orientación respecto al E y al N, y cubiertas del

suelo) han resultado significativas en la estabilidad térmica en las 6 áreas de estudio. A partir de Modelos Digitales de Superficies (MDS) es posible crear otras predictoras modificadoras del clima local que no han sido usadas en este estudio pero sí en otros que han considerado escalas espaciales mayores, como el Índice de Humedad Topográfica (Meineri & Hylander, 2017; Niskanen *et al.*, 2017), la elevación relativa (Ashcroft & Gollan, 2013; Meineri & Hylander, 2017), el Índice de Exposición Solar (Ashcroft *et al.*, 2012; Gubler *et al.*, 2018; Suggitt *et al.*, 2018) o la exposición al viento (Gerlitz *et al.*, 2015; Maclean *et al.*, 2016). Además, a partir de la densa nube de puntos derivada del proceso fotogramétrico SFM, semejante a las que se obtienen con LiDAR y de la que proceden los MDS generados, es posible modelar la estructura vertical de la vegetación a una muy alta resolución espacial y generar nuevas variables como la altura del dosel vegetal (CHM: *Canopy Height Model*) o el Índice de Área Foliar (LAI: *Leaf Area Index*), muy a tener en cuenta ya que este proyecto ha confirmado el efecto tan importante de las masas arbóreas en la estabilidad térmica. Por tanto, la incorporación de este conjunto de nuevas predictoras en futuros modelos puede ayudar a mejorar los ajustes y encontrar nuevos factores geoambientales relevantes en la aparición de microhábitats estables.

5.3. Capacidad del UAV para la identificación de micro-refugios climáticos

La unidad UAV ha permitido recopilar en un único instrumento todas las variables necesarias para la detección de micro-refugios climáticos y las variables geoambientales que contribuyen a su generación. Con la cámara térmica se han detectado fehacientemente las temperaturas de la superficie, mientras que con la cámara RGB de alta resolución se han generado modelos tridimensionales del terreno; en ambos casos, a resoluciones centimétricas. Uno de los puntos clave del UAV ha sido su capacidad para modelar la superficie terrestre a partir de fotogrametría SFM, que ha transformado la información bidimensional (ortofotografías con un alto grado de solape) en tridimensional (MDS). Ello ha facilitado el disponer de un conjunto de variables geoambientales a la misma resolución que los datos LST y poder realizar modelos de regresión para detectar estabilidad y sus variables más influyentes a una resolución muy alta. La repetición periódica de los vuelos en el futuro y la incorporación de un mayor conjunto de variables geoambientales puede contribuir a ayudar a mejorar los ajustes y extrapolar los modelos a otras áreas para identificar zonas térmicamente estables y, por tanto, potenciales micro-refugios climáticos.

6. Conclusiones

En este proyecto se ha demostrado la idoneidad del uso de UAVs térmicos para la identificación de micro-refugios climáticos para la biodiversidad en 6 áreas topográficamente complejas del Pirineo Central aragonés. La unidad UAV utilizada ha permitido estimar de manera precisa las temperaturas de la superficie en dos periodos contrastados del año y detectar las zonas más estables térmicamente con un alto grado de detalle. Además, se han podido generar modelos tridimensionales del terreno de muy alta resolución que ha posibilitado conocer la influencia de distintas variables geoambientales sobre la estabilidad térmica. Finalmente, la comparación de los datos de temperatura obtenidos con el UAV y los registros de MODIS para las mismas áreas ha permitido visibilizar la importancia de la reducción de escala para la localización de microclimas estables a escala de poblaciones de organismos.

En términos generales, según los resultados obtenidos en este proyecto y las hipótesis de partida planteadas, se puede concluir que:

- El sensor térmico acoplado en el UAV ha sido capaz de captar los microclimas al detectar temperaturas fiables de la superficie terrestre con un alto grado de detalle.
- Se ha obtenido una buena correlación entre las temperaturas estimadas por el UAV y las observadas por una red de minisensores *iButtons* en diferentes momentos del año y en las 6 áreas de estudio, lo que ha permitido confirmar que los UAVs son instrumentos fiables para la detección de temperaturas.
- Las imágenes RGB de alta resolución obtenidas con el UAV ha permitido generar Modelos Digitales de Superficies (MDS) a una muy alta resolución espacial que ha posibilitado generar variables geoambientales explicativas de la estabilidad térmica.
- A partir de la combinación de la información térmica y topográfico-ambiental, se han generado modelos topoclimáticos mediante modelos de regresión lineal, que han podido explicar la influencia de las variables geoambientales en la aparición de parches estables térmicamente respecto a su entorno y, por ende, zonas potenciales de micro-refugios climáticos.
- Las zonas arboladas y los sectores ubicados bajo afloramientos rocosos en laderas de umbría han tenido las temperaturas más estables en los dos momentos del año prospectados. Por el contrario, las gleras y las zonas de solana han representado los espacios más inestables térmicamente.
- La pendiente y la orientación han tenido una significativa influencia en la aparición de zonas térmicas estables. En particular, la orientación respecto al N ha obtenido mayores valores de significación que respecto al E en las áreas donde más homogéneamente coexisten ambas orientaciones.

- El UAV ha revelado una gran heterogeneidad climática existente bajo la homogénea temperatura ofrecida por el sensor MODIS en las áreas de estudio.
- El UAV utilizado ha demostrado ser una herramienta prometedora para la identificación de micro-refugios para la biodiversidad, ya que ha permitido obtener en un único instrumento datos continuos fiables de temperatura y modelos del terreno a una escala espacial de especie.

Referencias

Abeli, T.; Vamosi, J.C.; Orsenigo, S. (2018). *The importance of marginal population hotspots of cold-adapted species for research on climate change and conservation*. Journal of Biogeography 45 (5), 977-985, doi: 10.1111/jbi.13196.

Andrew, M.E.; Warrener, H. (2017). *Detecting microrefugia in semi-arid landscapes from remotely sensed vegetation dynamics*. Remote Sensing of Environment 200, 114-124, doi: 10.1016/j.rse.2017.08.005.

Ashcroft, M.B.; Chisholm, L.A.; French, K.O. (2009). *Climate change at the landscape scale: predicting fine-grained spatial heterogeneity in warming and potential refugia for vegetation*. Global Change Biology 15 (3), 656-667, doi: 10.1111/j.1365-2486.2008.01762.x.

Ashcroft, M.B.; Gollan, J.R.; Warton, D.I.; Ramp, D. (2012). *A novel approach to quantify and locate potential microrefugia using topoclimate, climate stability, and isolation from the matrix.* Global Change Biology 18, 1866-1879, doi: 10.1111/j.1365-2486.2012.02661.x.

Ashcroft, M.B.; Gollan, J.R. (2013). *Moisture, thermal inertial, and the spatial distributions of near-surface soil and air temperatures: Understanding factors that promote microrefugia*. Agricultural and Forest Meteorology 176, 77-89.

Bátori, Z.; Lörinczi, G.; Tölgyesi, C.; Módra, G.; Juhász, O.; Aguilón, D.J.; Vojtkó, A.; Valkó, O.; Deák, B.; Erdös, L.; Maák, I.E. (2020). *Karstic microrefugia host functionally specific ant assemblages.* Frontiers in Ecology and Evolution 23 (8), doi: 10.3389/fevo.2020.613738.

Bátori, Z.; Vojtkó, A.; Farkas, T.; Szabó, A.; Havadtöi, K.; Vojtkó, A.E.; Tölgyesi, C.; Cseh, V.; Erdös, L.; Maák, I.E.; Keppel, G. (2017). *Large- and small-scale environmental factors drive distributions of cool-adapted plants in karstic microrefugia.* Annals of Botany 119, 301-309, doi: 10.1093/aob/mcw233.

Bennett, K.D.; Provan, J. (2008). *What do we mean by 'refugia'?* Quaternary Science Reviews 27 (27-28), 2449-2455, doi: 10.1016/j.quascirev.2008.08.019.

Bennett, K.D.; Tzedakis, P.C.; Willis, K.J. (1991). *Quaternary refugia of North European trees.* Journal of Biogeography 18 (1), 103-115, doi: 10.2307/2845248.

Chen, I.C.; Hill, J.K.; Ohlemüller, R.; Roy, D.B.; Thomas, C.D. (2011). *Rapid range shifts of species associated with high levels of climate warning.* Science 333, 1024-1026.

Corripio, J.G. (2019). *insol v1.2.1: Solar Radiation*. https://cran.r-project.org/web/packages/insol/index.html.

Dawson T.P.; Jackson, S.T.; House, J.I.; Prentice, I.C.; Mace, G.M. (2011). *Beyond predictions: biodiversity conservation in a changing climate.* Science 332, 53-58.

de Frenne, P.; Zellweger, F.; Rodríguez-Sánchez, F.; Scheffers, B.R.; Hylander, K.; Luoto, M.; Vellend, M.; Verheyen, K.; Lenoir, J. (2019). *Global buffering of temperatures under forest canopies*. Nature Ecology & Evolution 3, 744-749, doi: 10.1038/s41559-019-0842-1.

Dobrowski, S.Z. (2011). *A climatic basis for microrefugia: the influence of terrain on climate*. Global Change Biology 17, 1022-1035, doi: 10.1111/j.1365-2486.2010.02263.x.

Domingo, D.; Orka, H.O.; Naesset, E.; Kachamba, D, Gobakken, T. (2019). *Effects of UAV image resolution, camera type, and image overlap on accuracy of biomass predictions in a tropical woodland*. Remote Sensing 11, 948, doi: 10.3390/rs11080948.

Enquist, B.J.; Feng, X.; Boyle, B.; Maitner, B.; Newman, E.A.; Jorgensen, P.M.; *et al.* (2019): *The commonness of rarity: Global and future distribution of rarity across land plants.* Science Advances 5 (11), eaaz0414, doi: 10.1126/sciadv.aaz0414.

Fawcett, S.; Sistla, S.; Dacosta-Calheiros, M.; Kahraman, A.; Reznicek, A.A.; Rosenberg, R.; von Wettberg, E.J.B. (2019). *Tracking microhabitat temperature variation with iButton data loggers*. Applications in Plant Sciences 7 (4), e01237, doi: 10.1002/aps3.1237.

García, M.B.; Domingo, D.; Pizarro, M.; Font, X.; Gómez, D.; Ehrlén, J. (2020). *Rocky habitats as microclimatic refuges for biodiversity. A close-up thermal approach.* Environmental and Experimental Botany 170, 103886, doi: 10.1016/j.envexpbot.2019.103886.

García, M.B.; Errea, P.; Gómez, D.; Pizarro, M. (2019). *Winners and losers of landscape changes over the last sixty years in one of the oldest and Southernmost National Parks of the European Alpine regions: Ordesa and Monte Perdido*. Geographical Research Letters 45, 123-141, doi: 10.18172/cig.3711.

Gerlitz, L.; Conrad, O.; Boehner, J. (2015). *Large scale atmospheric forcing factors and topographic modification of precipitation rates over High Asia: a neural network-based approach.* Earth System Dynamics 6, 1-21, doi: 10.5194/esd-6-1-2015.

Giorgi, F.; Lionello, P. (2008). *Climate change projections for the Mediterranean region*. Global and Planetary Change 63 (2-3), 90-104, doi: 10.1016/j.gloplacha.2007.09.005.

Gómez, D.; García, M.B.; Font, X.; Aizpuru, I. (2017). *Distribución especial y análisis ambiental de la flora vascular de los Pirineos.* Pirineos 172, 028, doi: 10.3989/pirineos.2017.172003.

Graae, B.J.; Vandvik, V.; Ambruster, W.S.; Eiserhardt, W.L.; Svenning, J.C.; Hylander, K.; Ehrlén, J.; Speed, J.D.M.; Klanderud, K.; Brathen, K.A.; Milbau, A.; Opedal, O.H.; Alsos, I.G.; Ejrnaes, R.; Bruun, H.H.; Birks, H.J.B.; Westergaard, K.B.; Birks, H.H.; Lenoir, J. (2018). *Stay or go – How topographic complexity influences alpine plant population and community responses to climate change.* Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics 30, 41-50, doi: 10.1016/j.ppees.2017.09.008.

Greiser, C.; Ehrlén, J.; Meineri, E.; Hylander, K. (2019). *Hiding from the climate: Characterizing microrefugia for boreal forest understory species*. Global Change Biology 26 (2), 471-483, doi: 10.1111/gcb.14874.

Gubler, M.; Henne, P.D.; Schwörer, C.; Boltshauser-Kaltenrieder, P.; Lotter, A.F.; Brönnimann, S.; Tinner, W. (2018). *Microclimatic gradients provide evidence for a glacial refugium for temperate trees in a sheltered hilly landscape of Northern Italy.* Journal of Biogeography 45, 2564-2575, doi: 10.1111/jbi.13426.

Hijmans, R.J.; *et al.* (2020). *raster v3.4-5: Geographic data analysis and modeling*. https://cran.r-project.org/web/packages/raster/index.html.

Hoffrén, R. (2019). *Identificación de micro-refugios mediante modelos topoclimáticos de alta resolución en el P.N. de Ordesa y Monte Perdido.* Trabajo Fin de Máster. Universidad de Zaragoza. https://zaguan.unizar.es/record/84780.

Hubbart, J.A.; Link, T.E.; Campbell, C.; Cobos, D. (2005). *Evaluation of a low-cost temperature measurement system for environmental applications*. Hydrological Processess 19 (7), 1517-1523, doi: 10.1002/hyp.5861.

Hylander, K.; Ehrlén, J.; Luoto, M.; Meineri, E. (2015). *Microrefugia: Not for everyone.* AMBIO 44, 60-68, doi: 10.1007/s13280-014-0599-3.

Keppel, G.; Mokany, K.; Wardell-Johnson, G.W.; Phillips, B.L.; Welbergen, J.A.; Reside, A.E. (2015). *The capacity of refugia for conservation planning under climate change.* Front Ecol. Environ. 13 (2), 106-112, doi: 10.1890/140055.

Keppel, G.; Robinson, T.P.; Wardell-Johnson, G.W.; Yates, C.J.; van Niel, K.P.; Byrne, M.; Schut, A.G.T. (2017). *A low-altitude mountain range as an important refugium for two narrow endemics in the Southwest Australian Floristic Region biodiversity hotspot.* Annals of Botanny 119 (2), 289-300, doi: 10.1093/aob/mcw182.

Keppel, G.; van Niel, K.O.; Wardell-Johnson, G.W.; Yates, C.J.; Byrne, M.; Mucina, L.; Schut, A.G.T.; Hopper, S.D.; Franklin, S.E. (2011). *Refugia: identifying and understanding safe havens for biodiversity under climate change*. Global Ecology and Biogeography 21 (4), 393-404, doi: 10.1111/j.1466-8238.2011.00686.x.

Körner, C.; Ohsawa, M. (2005). Mountain systems. In *Millenium ecosystem assessment, ecosystem and human well-being: A framework for assessment.* Washington D.C. Island Press.

Latimer, C.E.; Zuckerberg, B. (2016). *Forest fragmentation alters winter microclimates and microrefugia in human-modified landscapes*. Ecography 40 (1), 158-170, doi: 10.5061/dryad.rk398.

Mackey, B.; Berry, S.; High, S.; Ferrier, S.; Harwood, T.D.; Williams, K.J. (2012). *Ecosystem greenspots: Identifying potential drought, fire, and climate-changes micro-refuges.* Ecological Applications 22 (6), 1852-1864, doi: 10.1890/11-1479.1.

Maclean, I.M.D.; Suggitt, A.J.; Wilson, R.J.; Duffy, J.P.; Bennie, J.J. (2016). *Fine-scale climate change: Modelling spatial variation in biologically meaningful rates of warming*. Global Change Biology 23 (1), 256-268, doi: 10.1111/gcb.13343.

Meineri, E.; Hylander, K. (2016). *Fine-grain, large-domain climate models based on climate station and comprehensive topographic information improve microrefugia detection*. Ecography 40, 1003-1013, doi: 10.1111/ecog.02494.

Messinger, M.; Asner, G.; Silman, M. (2016). *Rapid assessments of Amazon forest structure and biomass using small unmanned aerial systems.* Remote Sensing 8, 615, doi: 10.3390/rs8080615.

Milling, C.R.; Rachlow, J.L.; Olsoy, P.J.; Chappell, M.A.; Johnson, T.R.; Forbey, J.S.; Shipley, L.A.; Thornton, D.H. (2018). *Habitat structure modifies microclimate: An approach for mapping fine-scale thermal refuge.* Methods in Ecology and Evolution 9 (6), 1648-1657, doi: 10.1111/2041-210X.13008.

Niskanen, A.; Luoto, M.; Väre, H.; Heikkinen, R.K. (2017). *Models of Arctic-alpine refugia highlight importance of climate and local topography*. Polar Biol. 40, 489-502, doi: 10.1007/s00300-016-1973-3.

Pauli, H.; Gottfried, M.; Dullinger, S.; Abdaladze, O.; Akhalkatsi, M.; Benito-Alonso, J.L.; Coldea, G.; Dick, J.; Erschbarner, B.; Fernández-Calzado, R.; *et al.* (2012). *Recent plant diversity changes on Europe's mountain summits.* Science 336, 353-355.

Pugnaire, F.I.; Morillo, J.A.; Peñuelas, J.; Reich, P.B.; Bardgett, R.D.; Gaxiola, A.; Wardle, D.A.; van der Putten, W.H. (2019). *Climate change effects on plant-soil feedbacks and consequences for biodiversity and functioning of terrestrial ecosystems.* Science Advances 5 (11), eaaz1834, doi: 10.1126/sciadv.aaz1834.

Puliti, S.; Olerka, H.; Gobakken, T.; Naesset, E. (2015). *Inventory of small forest areas using an unmanned aerial system.* Remote Sensing 7, 9632-9654, doi: 10.3390/rs70809632.

Rull, V. (2009). *Microrefugia*. Journal of Biogeography 36, 481-484.

Schut, A.G.T.; Wardell-Johnson, G.W.; Yates, C.J.; Keppel, G.; Baran, I.; Franklin, S.E.; Hopper, S.D.; Van Niel, K.P.; Mucina, L.; Byrne, M. (2014). *Rapid characterization of vegetation structure to predict refugia and climate change impacts across a global biodiversity hotspot*. PLoS One 9, e82778, doi: 10.1371/journal.pone.0082778.

Suggitt, A.J.; Wilson, J.R.; Isaac, N.J.B.; Beale, C.M.; Auffret, A.G.; August, T.; Bennie, J.J.; Crick, H.Q.P.; Duffield, S.; Fox, R.; Hopkins, J.J.; Macgregor, N.A.; Morecroft, M.D.; Walker, K.J.; Maclean, I.M.D. (2018). *Extinction risk from climate change is reduced by microclimatic buffering*. Nature Climate Change 8, 713-717, doi: 10.1038/s41558-018-0231-9.

Tejero, P.; García, M.B.; Gómez, D. (2017). *Spatial distribution, environmental description of the endemic flora of the Pyrenees.* Pirineos 172, doi: 10.3989/pirineos.2017.172006.

Zellweger, F.; de Frenne, P.; Lenoir, J.; Rocchini, D.; Coomes, D. (2019). *Advances in microclimate ecology arising from remote sensing.* Trends in Ecology & Evolution 34 (4), 327-341, doi: 10.1016/j.tree.2018.12.012.

Material suplementario

Mat. Supl. 001	Divulgación del proyecto en medios de comunicación
Mat. Supl. 002	Aspectos técnicos de la unidad UAV *Anafi Thermal*
Mat. Supl. 003	Proceso de automatización y patrones de vuelo UAV en las áreas de estudio
Mat. Supl. 004	Proceso de colocación de los minisensores de temperatura *iButton*®
Mat. Supl. 005	Cuadro de significación de las variables geoambientales sobre las estabilidades térmicas (ET_V, ET_O y ET_D).
Mat. Supl. 006	Cartografías de temperaturas UAV en verano y otoño.
Mat. Supl. 007	Cartografías de variables geoambientales
Mat. Supl. 008	Fotografías de las áreas de la Sierra de las Cutas
Mat. Supl. 009	Fotografías de las áreas de la Sierra de Espierba

Mat. Supl. 001

Divulgación del proyecto en medios de comunicación

14-07-20 **Blog AEET**: *Identificación de refugios climáticos para la biodiversidad en el Pirineo mediante sensores térmicos.* https://blogaeet.org/2020/07/14/identificacion-de-refugios-climaticos-para-la-biodiversidad-%e2%80%a8en-el-pirineo-mediante-sensores-termicos/

07-10-20 **Heraldo de Aragón**: *Un dron con "ojos" térmicos descubre micro-refugios para la biodiversidad en Ordesa*. Suplemento Tercer Milenio. https://www.heraldo.es/noticias/aragon/2020/10/07/un-dron-con-ojos-termicos-descubre-micro-refugios-biodiversidad-en-ordesa-ante-cambio-climatico-1398573.html

Mat. Supl. 002

Aspectos técnicos de la unidad UAV *Anafi Thermal*

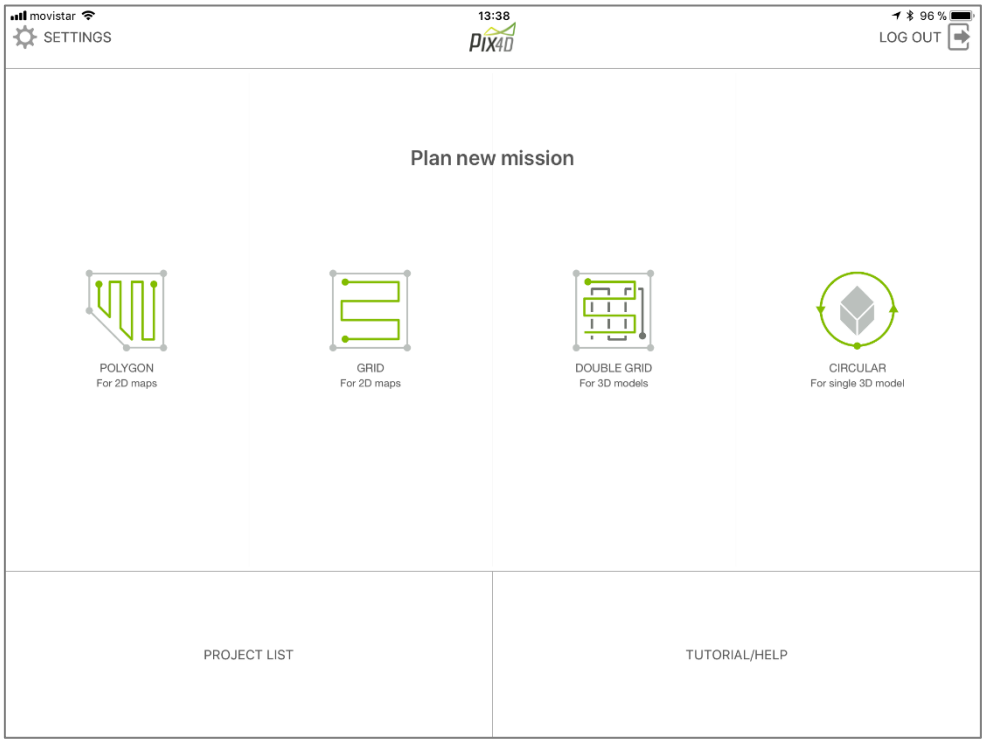
- **Modelo**: Anafi Thermal
- **Fabricante**: Parrot
- **Tipo**: Multirrotor de 4 rotores
- **Número de serie**: PF728120AC9J004030
- **Operador adscrito**: Juan de la Riva Fernández (Geoforest-IUCA)
- **Cámaras**:
  - RGB: SONY CMOS 1/2,4" de 21 MP
  - TIR: FLIR Lepton 3,5, 160x120p (rango 8-14 μm)
- **Autonomía de vuelo**: ~25 minutos por batería (incluye 3 baterías)
- **Sensores**: GNSS-GPS, IMU (giróscopo, acelerómetro, magnetómetro), barómetro.
- **Tipo de batería**: Polímero de Litio (LiPo)
- **Almacenamiento**: Memoria extraíble MicroSD

Mat. Supl. 003

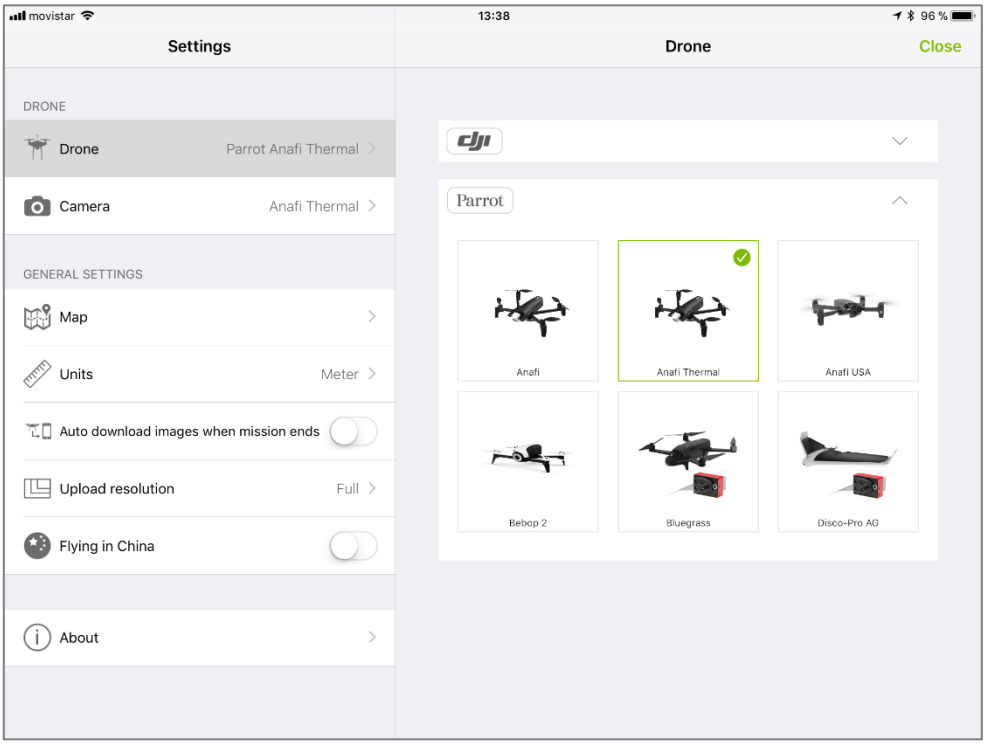
Proceso de automatización y patrones de vuelo UAV en las áreas de estudio

Todos los vuelos UAV han sido programados con la aplicación "Pix4Dcapture". A continuación, se muestra el proceso de configuración para la automatización de los vuelos.

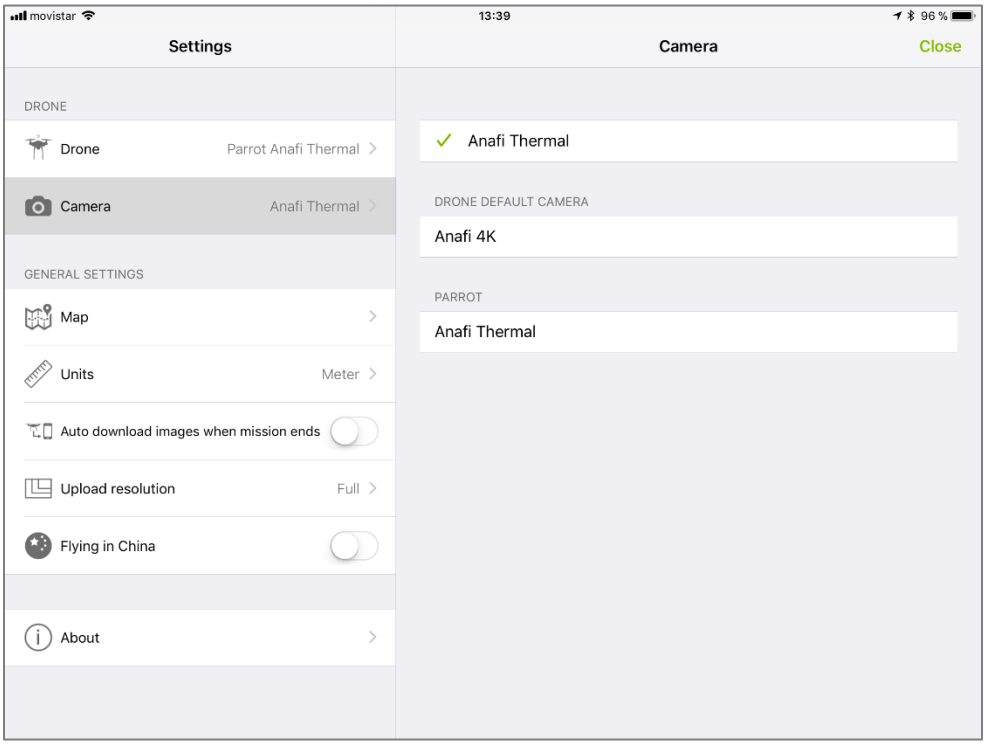
1. Menú principal



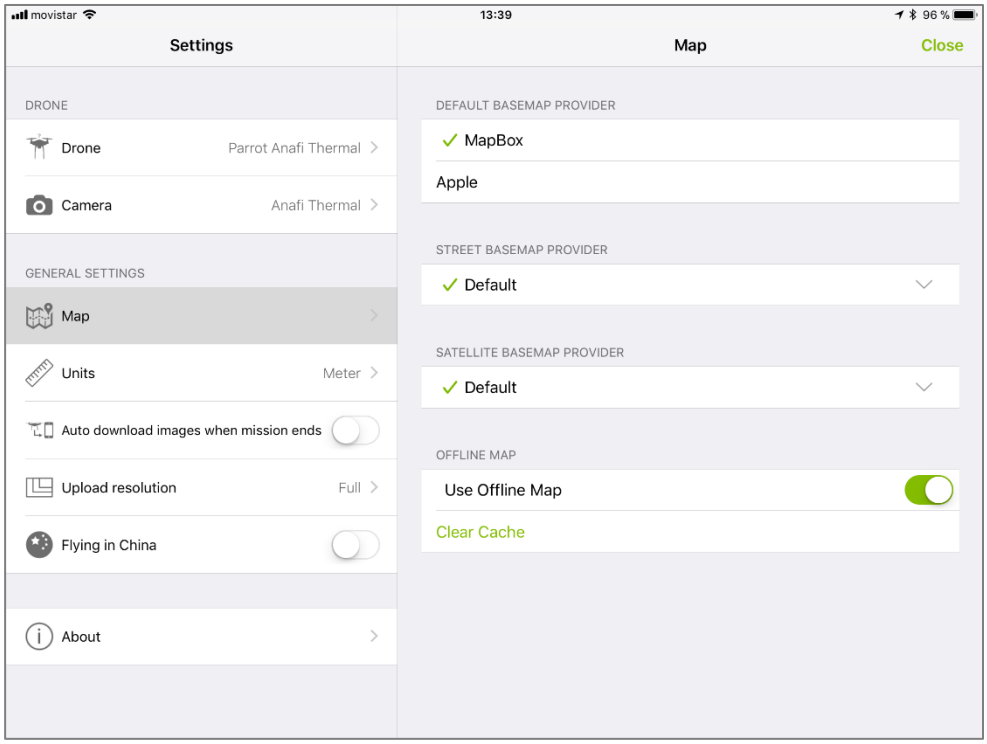
2. Selección de la aeronave



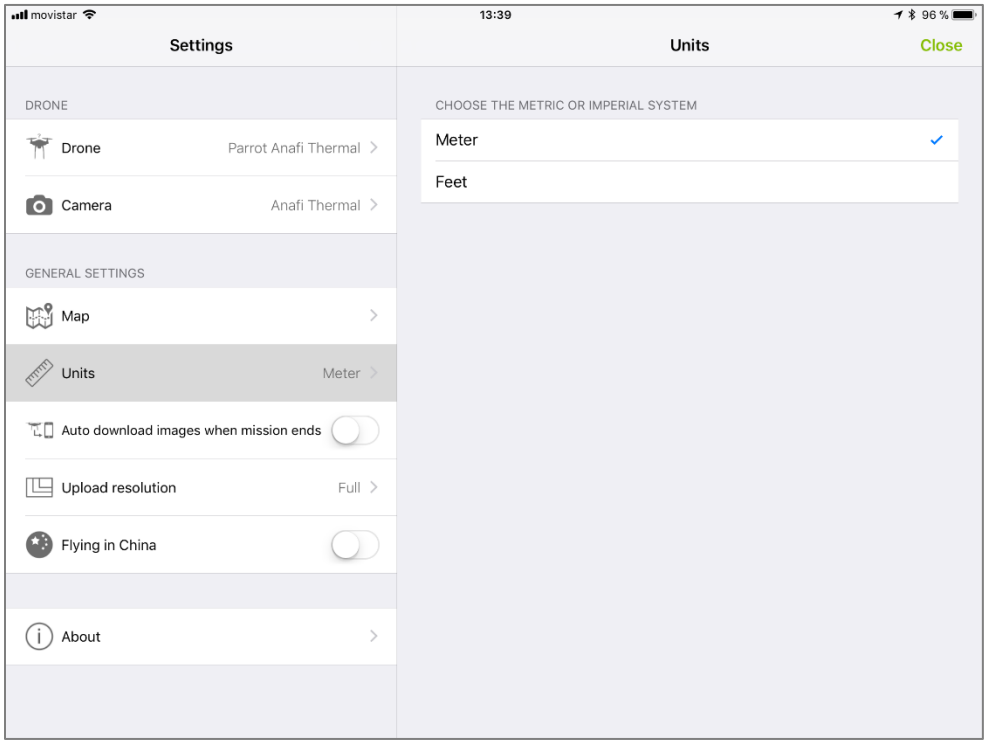
3. Selección de la cámara



4. Configuración del mapa base

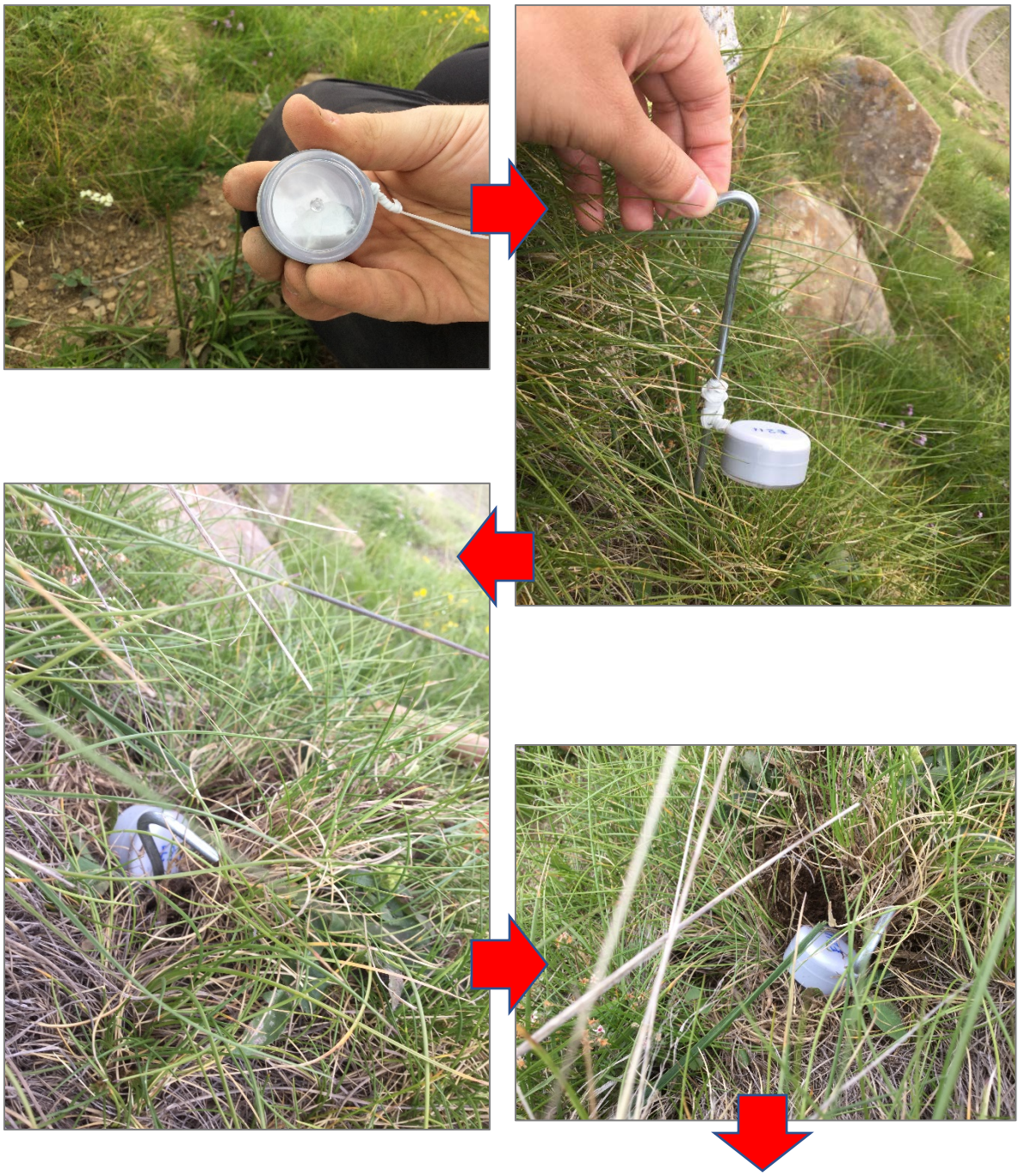


5. Unidad de medida



Mat. Supl. 004

Proceso de colocación de los minisensores de temperatura *iButton*®



Mat. Supl. 005

Cuadro de significación de las variables geoambientales sobre las estabilidades térmicas (ET_V, ET_O y ET_D) a partir de modelos de regresión lineal (LM).

A. Estabilidad térmica de verano (ET_V)

Mirador de la Herradura (HERR)					
	Estimate	**Std. Error**	**t value**	**Pr(>|t|)**	
(Intercepto)	4,27E+00	1,25E-01	34,24	<2e-16	***
Pendiente	2,40E-02	1,52E-03	15,77	<2e-16	***
Orientación al E	4,62E-01	3,46E-02	13,33	<2e-16	***
Orientación al N	6,19E-01	2,25E-02	27,57	<2e-16	***
Pastizales	-1,57E+00	1,09E-01	-14,32	<2e-16	***
Roquedos	-1,64E+00	1,10E-01	-14,8	<2e-16	***

Los Pingüinos (PING)					
	Estimate	**Std. Error**	**t value**	**Pr(>|t|)**	
(Intercepto)	5,8012934	0,055604	104,332	< 2e-16	***
Pendiente	0,0042945	0,000977	4,397	1,16E-05	***
Orientación al E	0,0706375	0,028406	2,487	1,30E-02	*
Orientación al N	0,5799581	0,027361	21,197	< 2e-16	***
Pastizales	-1,188075	0,054954	-21,619	< 2e-16	***
Roquedos	-1,282168	0,052338	-24,498	< 2e-16	***

Mirador de Greenwich (GRNW)					
	Estimate	**Std. Error**	**t value**	**Pr(>|t|)**	
(Intercepto)	2,882964	0,465368	6,195	7,06E-10	***
Pendiente	0,019974	0,001168	17,102	< 2e-16	***
Orientación al E	-0,069853	0,025571	-2,732	0,00636	**
Orientación al N	0,472487	0,025156	18,782	< 2e-16	***
Pastizales	-0,831773	0,464123	-1,792	0,07326	.
Roquedos	-0,693886	0,463172	-1,498	0,13426	

Planafonda Oeste (PLFO)					
	Estimate	**Std. Error**	**t value**	**Pr(>|t|)**	
(Intercepto)	4,933708	0,081164	60,787	< 2e-16	***
Pendiente	0,022804	0,001368	16,675	< 2e-16	***
Orientación al E	0,163622	0,032982	4,961	7,61E-07	***
Orientación al N	-0,024163	0,032356	-0,747	0,455	
Pastizales	-1,144572	0,077994	-14,675	< 2e-16	***
Roquedos	-1,517586	0,084919	-17,871	< 2e-16	***

Planafonda Centro (PLFC)					
	Estimate	**Std. Error**	**t value**	**Pr(>|t|)**	
(Intercepto)	10,744964	0,155741	68,993	< 2e-16	***
Pendiente	0,035445	0,002538	13,964	< 2e-16	***
Orientación al E	-0,356273	0,064048	-5,563	3,02E-08	***
Orientación al N	-0,540991	0,076022	-7,116	1,54E-12	***
Pastizales	-2,706329	0,15265	-17,729	< 2e-16	***
Roquedos	-3,57952	0,160918	-22,244	< 2e-16	***

Planafonda Este (PLFE)					
	Estimate	**Std. Error**	**t value**	**Pr(>|t|)**	
(Intercepto)	5,323935	0,154094	34,55	< 2e-16	***
Pendiente	0,006779	0,001469	4,614	4,20E-06	***
Orientación al E	0,26546	0,043139	6,154	9,13E-10	***
Orientación al N	0,013809	0,029411	0,47	0,639	
Pastizales	-1,173881	0,15397	-7,624	3,78E-14	***
Roquedos	-1,535473	0,152508	-10,068	< 2e-16	***

B. Estabilidad térmica de otoño (ET_O)

Mirador de la Herradura (HERR)					
	Estimate	**Std. Error**	**t value**	**Pr(>|t|)**	
(Intercepto)	2,62E+00	6,06E-02	43,2	< 2e-16	***
Pendiente	6,85E-03	7,39E-04	9,271	< 2e-16	***
Orientación al E	-5,14E-02	1,68E-02	-3,056	2,28E-03	**
Orientación al N	1,20E+00	1,09E-02	109,625	< 2e-16	***
Pastizales	-6,34E-01	5,32E-02	-11,919	< 2e-16	***
Roquedos	-6,45E-01	5,37E-02	-12,008	< 2e-16	***

Los Pingüinos (PING)					
	Estimate	**Std. Error**	**t value**	**Pr(>|t|)**	
(Intercepto)	3,545595	0,049986	70,93	<2e-16	***
Pendiente	0,010028	0,000878	11,42	<2e-16	***
Orientación al E	0,410104	0,025536	16,06	<2e-16	***
Orientación al N	0,712218	0,024596	28,96	<2e-16	***
Pastizales	-0,689872	0,049402	-13,96	<2e-16	***
Roquedos	-0,746218	0,04705	-15,86	<2e-16	***

Mirador de Greenwich (GRNW)					
	Estimate	**Std. Error**	**t value**	**Pr(>|t|)**	
(Intercepto)	3,672698	0,493711	7,439	1,50E-13	***
Pendiente	0,021439	0,001239	17,302	< 2e-16	***
Orientación al E	0,397616	0,027128	14,657	< 2e-16	***
Orientación al N	0,584778	0,026688	21,912	< 2e-16	***
Pastizales	-0,571309	0,49239	-1,16	2,46E-01	
Roquedos	-0,618707	0,491382	-1,259	0,208	

Planafonda Oeste (PLFO)					
	Estimate	**Std. Error**	**t value**	**Pr(>|t|)**	
(Intercepto)	6,004386	0,083838	71,619	< 2e-16	***
Pendiente	-0,003478	0,001413	-2,462	0,0139	*
Orientación al E	0,635763	0,034068	18,662	< 2e-16	***
Orientación al N	0,493726	0,033422	14,773	< 2e-16	***
Pastizales	-0,46495	0,080564	-5,771	9,11E-09	***
Roquedos	-0,652097	0,087717	-7,434	1,55E-13	***

Planafonda Centro (PLFC)					
	Estimate	**Std. Error**	**t value**	**Pr(>|t|)**	
(Intercepto)	4,115695	0,066166	62,202	< 2e-16	***
Pendiente	-0,004584	0,001078	-4,251	2,23E-05	***
Orientación al E	0,523246	0,027211	19,229	< 2e-16	***
Orientación al N	0,672866	0,032298	20,833	< 2e-16	***
Pastizales	-0,914838	0,064853	-14,106	< 2e-16	***
Roquedos	-0,44794	0,068366	-6,552	7,20E-11	***

Planafonda Este (PLFE)					
	Estimate	**Std. Error**	**t value**	**Pr(>|t|)**	
(Intercepto)	3,201229	0,109727	29,175	< 2e-16	***
Pendiente	-0,006545	0,001046	-6,256	4,83E-10	***
Orientación al E	0,322416	0,030718	10,496	< 2e-16	***
Orientación al N	0,79383	0,020943	37,905	< 2e-16	***
Pastizales	-0,802815	0,109639	-7,322	3,52E-13	***
Roquedos	-0,409068	0,108597	-3,767	0,00017	***

C. Estabilidad térmica diaria (ET_D)

Mirador de la Herradura (HERR)					
	Estimate	**Std. Error**	**t value**	**Pr(>|t|)**	
(Intercepto)	6,35E+00	1,59E-01	39,973	<2e-16	***
Pendiente	3,08E-02	1,94E-03	15,919	<2e-16	***
Orientación al E	4,10E-01	4,41E-02	9,294	<2e-16	***
Orientación al N	1,82E+00	2,86E-02	63,479	<2e-16	***
Pastizales	-2,20E+00	1,39E-01	-15,787	<2e-16	***
Roquedos	-2,28E+00	1,41E-01	-16,202	<2e-16	***

Los Pingüinos (PING)					
	Estimate	**Std. Error**	**t value**	**Pr(>|t|)**	
(Intercepto)	7,002129	0,090115	77,702	<2e-16	***
Pendiente	0,014322	0,001583	9,048	<2e-16	***
Orientación al E	0,480741	0,046036	10,443	<2e-16	***
Orientación al N	1,292176	0,044342	29,141	<2e-16	***
Pastizales	-1,877947	0,089061	-21,086	<2e-16	***
Roquedos	-2,028386	0,084821	-23,914	<2e-16	***

Mirador de Greenwich (GRNW)					
	Estimate	**Std. Error**	**t value**	**Pr(>|t|)**	
(Intercepto)	6,387402	0,813441	7,852	6,61E-15	***
Pendiente	0,041414	0,002042	20,286	< 2e-16	***
Orientación al E	0,327763	0,044696	7,333	3,25E-13	***
Orientación al N	1,057265	0,043971	24,045	< 2e-16	***
Pastizales	-1,403083	0,811264	-1,73	0,0839	.
Roquedos	-1,312594	0,809602	-1,621	0,1051	

Planafonda Oeste (PLFO)					
	Estimate	**Std. Error**	**t value**	**Pr(>|t|)**	
(Intercepto)	8,712504	0,123308	70,657	<2e-16	***
Pendiente	0,019326	0,002078	9,302	<2e-16	***
Orientación al E	0,799384	0,050107	15,954	<2e-16	***
Orientación al N	0,469564	0,049156	9,553	<2e-16	***
Pastizales	-1,609523	0,118491	-13,583	<2e-16	***
Roquedos	-2,169683	0,129012	-16,818	<2e-16	***

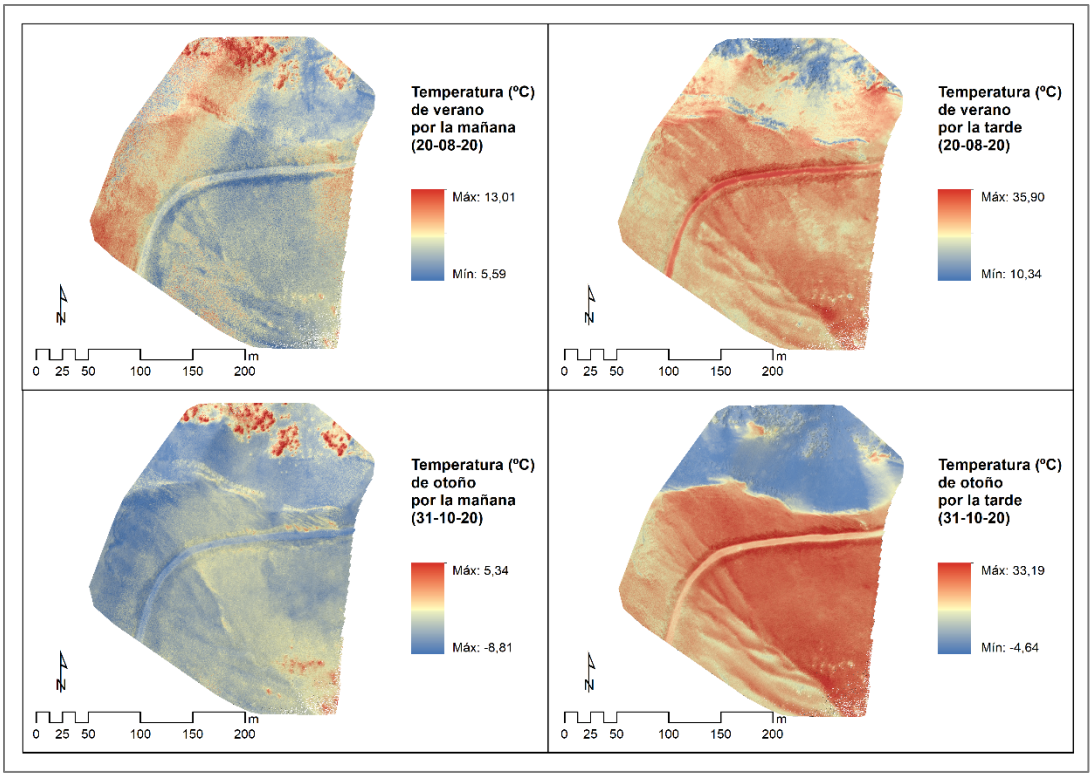
Planafonda Centro (PLFC)					
	Estimate	**Std. Error**	**t value**	**Pr(>|t|)**	
(Intercepto)	7,599819	0,105208	72,236	<2e-16	***
Pendiente	-0,003619	0,001715	-2,111	0,0349	*
Orientación al E	0,822662	0,043266	19,014	<2e-16	***
Orientación al N	1,156407	0,051355	22,518	<2e-16	***
Pastizales	-2,205326	0,10312	-21,386	<2e-16	***
Roquedos	-1,747165	0,108705	-16,073	<2e-16	***

Planafonda Este (PLFE)					
	Estimate	**Std. Error**	**t value**	**Pr(>|t|)**	
(Intercepto)	7,0991889	0,177652	39,961	<2e-16	***
Pendiente	0,0002346	0,001694	0,139	8,90E-01	
Orientación al E	0,5878762	0,049734	11,82	<2e-16	***
Orientación al N	0,8076392	0,033907	23,819	<2e-16	***
Pastizales	-1,976696	0,177509	-11,136	<2e-16	***
Roquedos	-1,944541	0,175823	-11,06	<2e-16	***

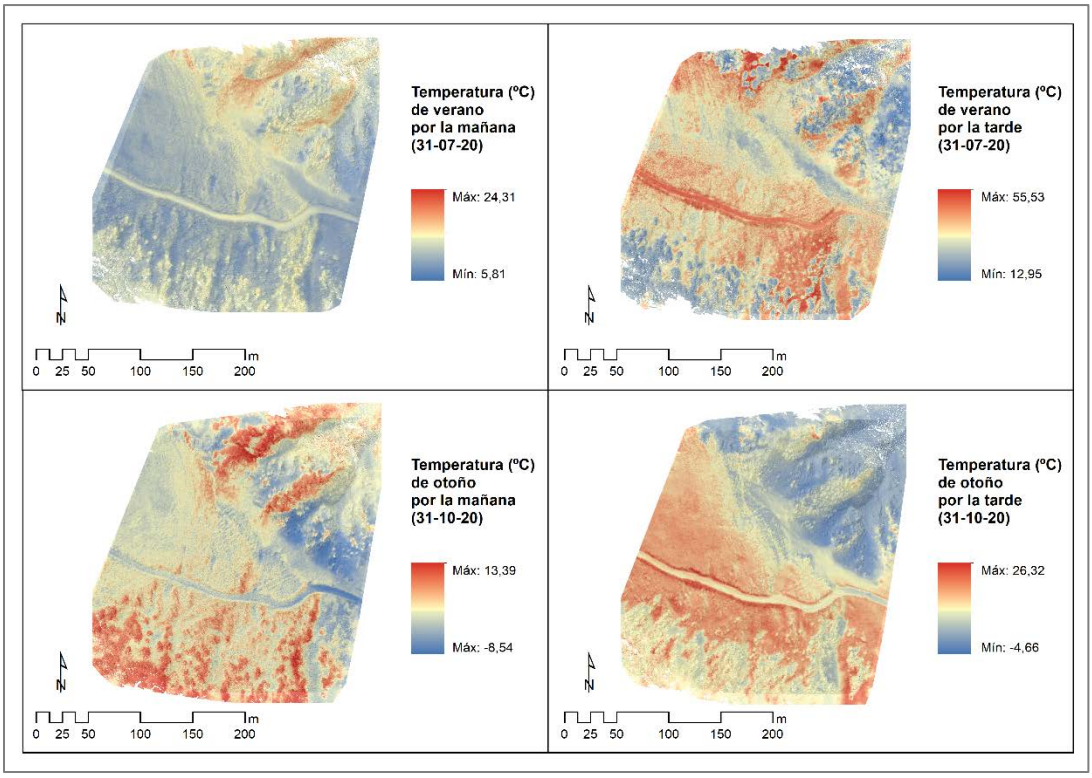
Mat. Supl. 006

Cartografías de temperaturas UAV en verano y otoño.

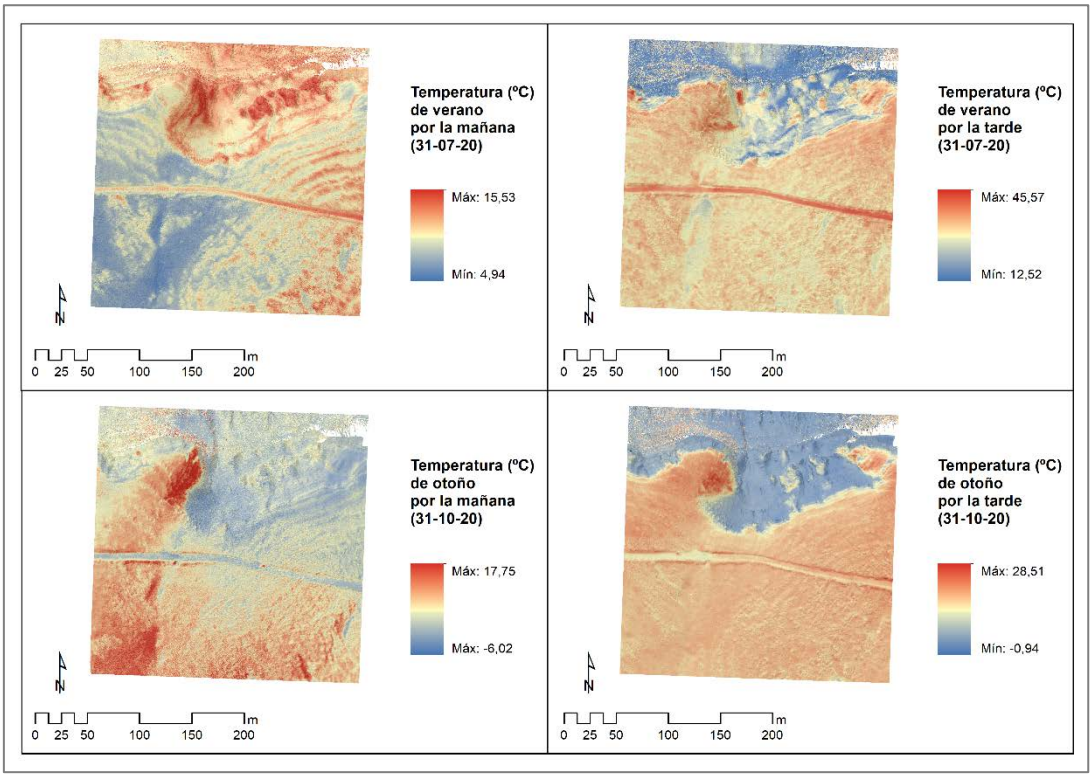
[1] Mirador de la Herradura (HERR)



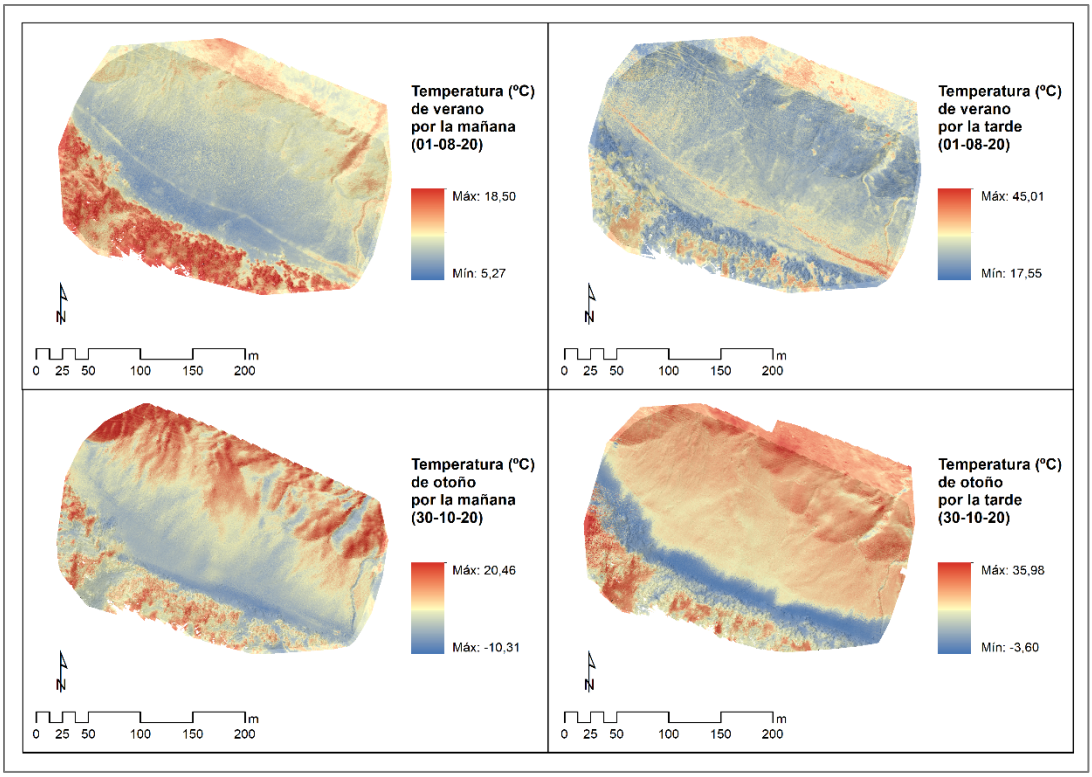
[2] Los Pingüinos (PING)



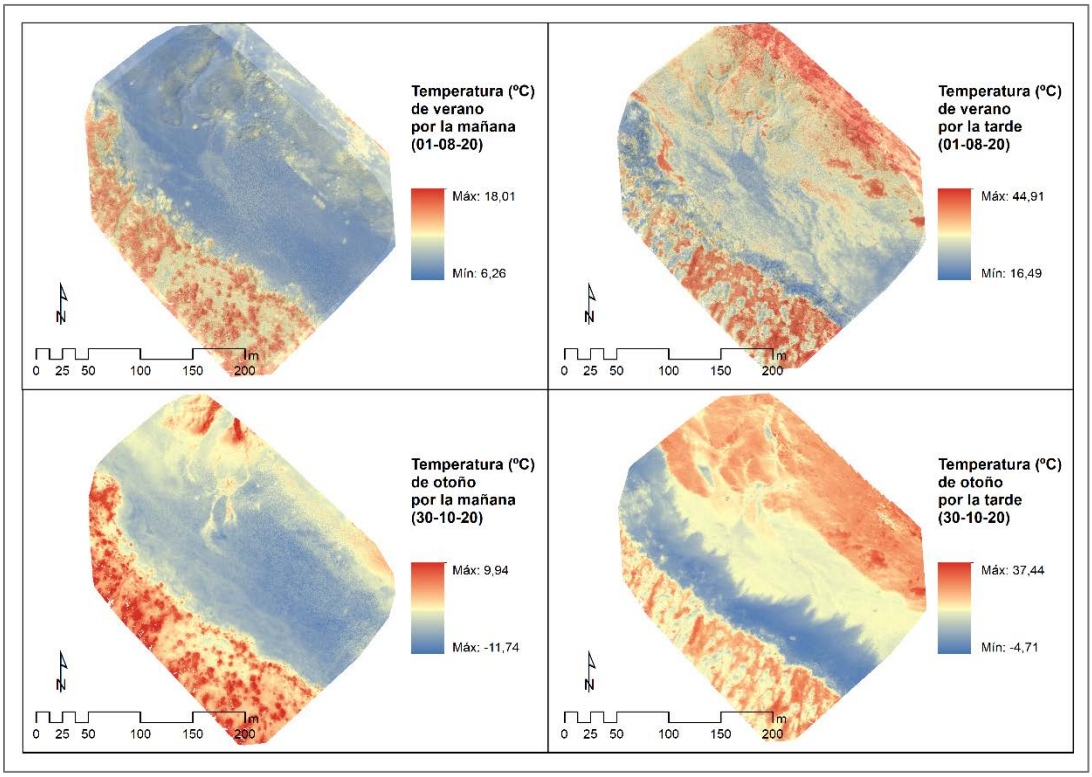
[3] Mirador de Greenwich (GRNW)



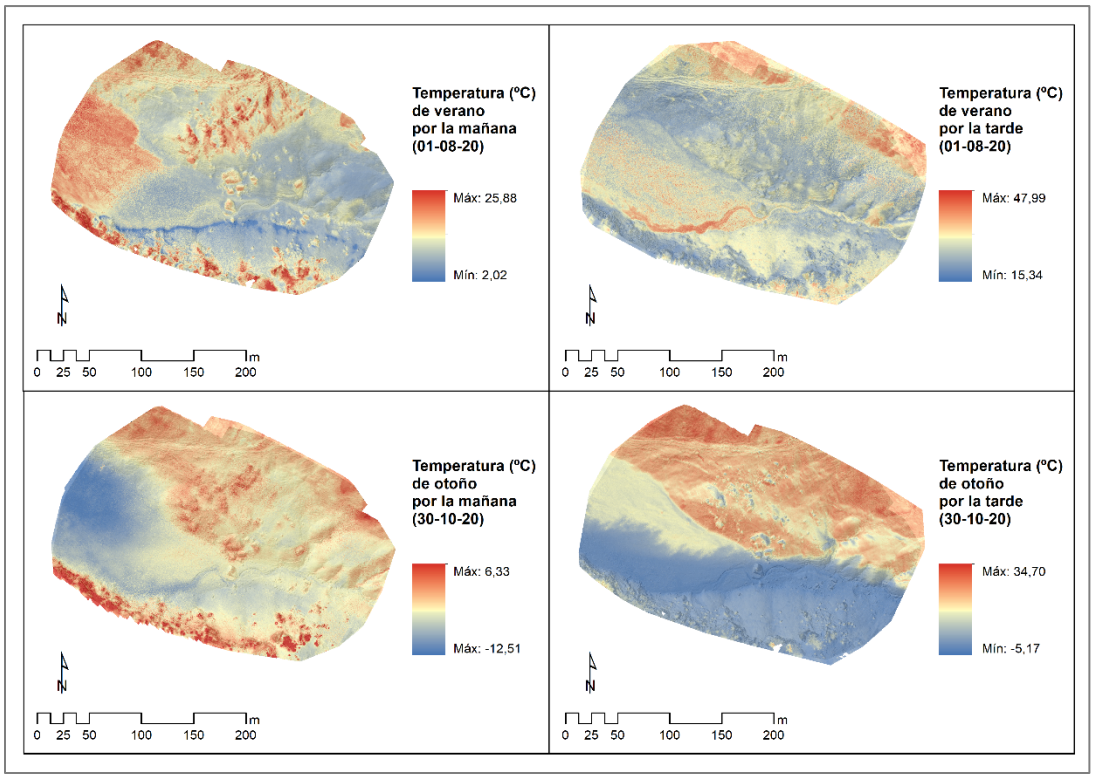
[4] Planafonda Oeste (PLFO)



[5] Planafonda Centro (PLFC)



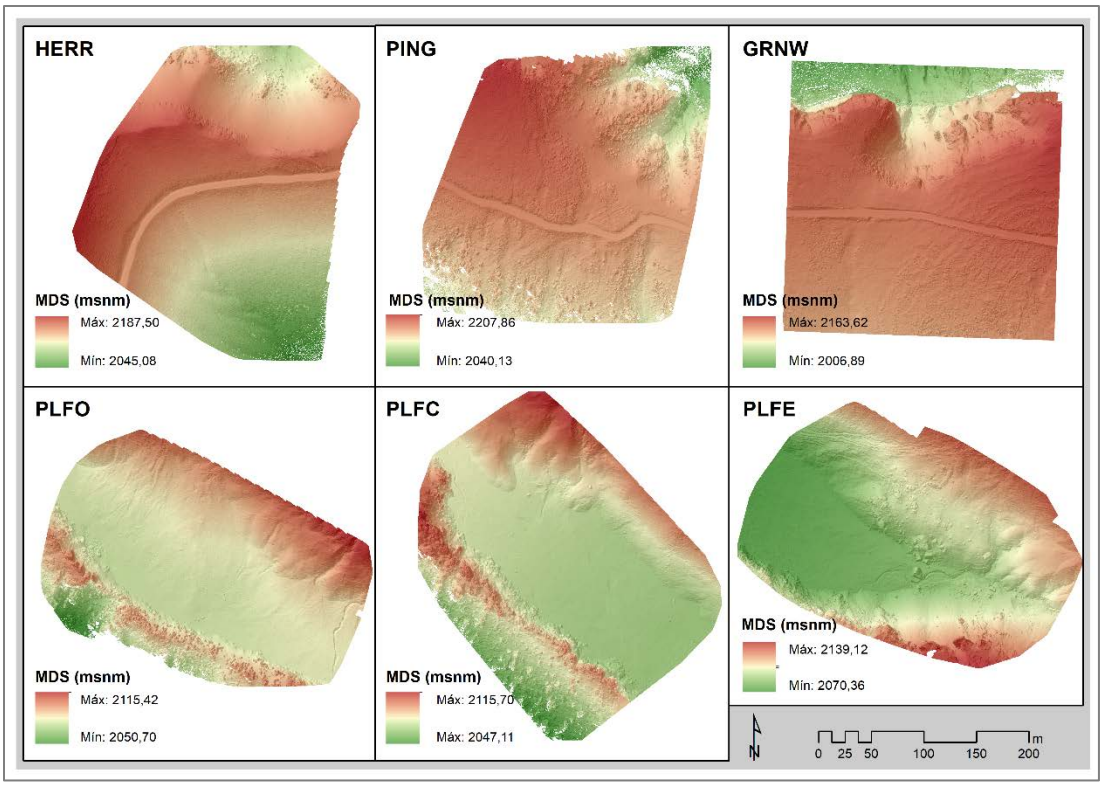
[6] Planafonda Este (PLFE)



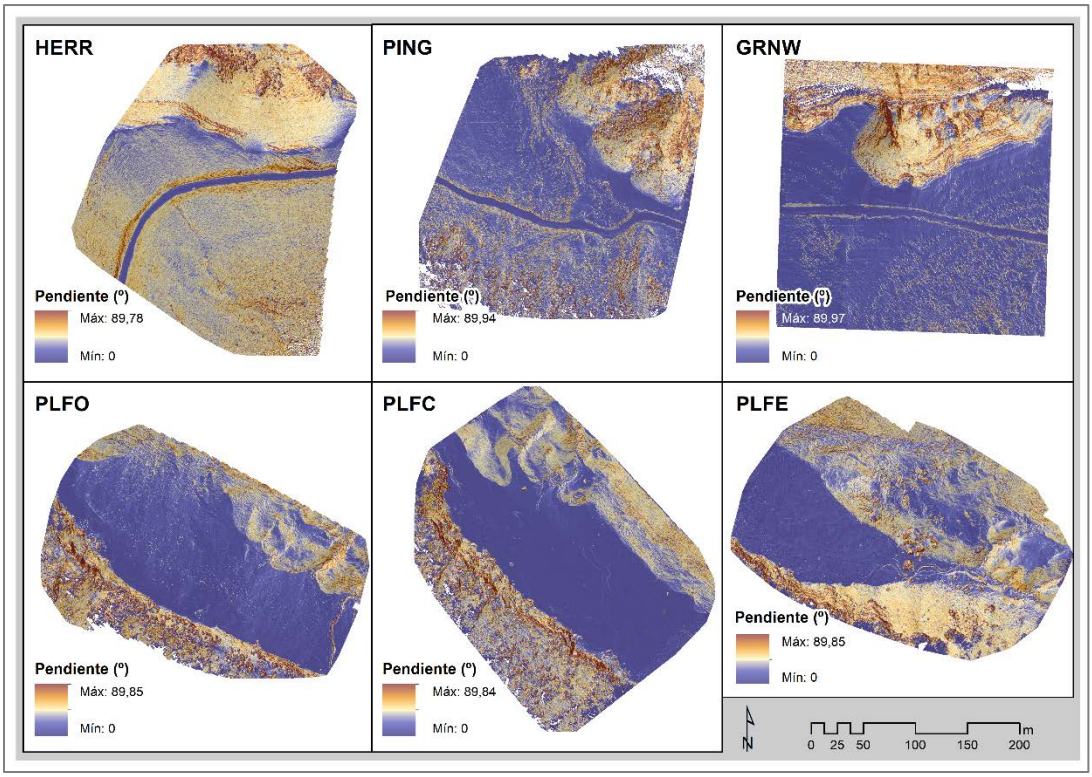
Mat. Supl. 007

Cartografías de variables geoambientales

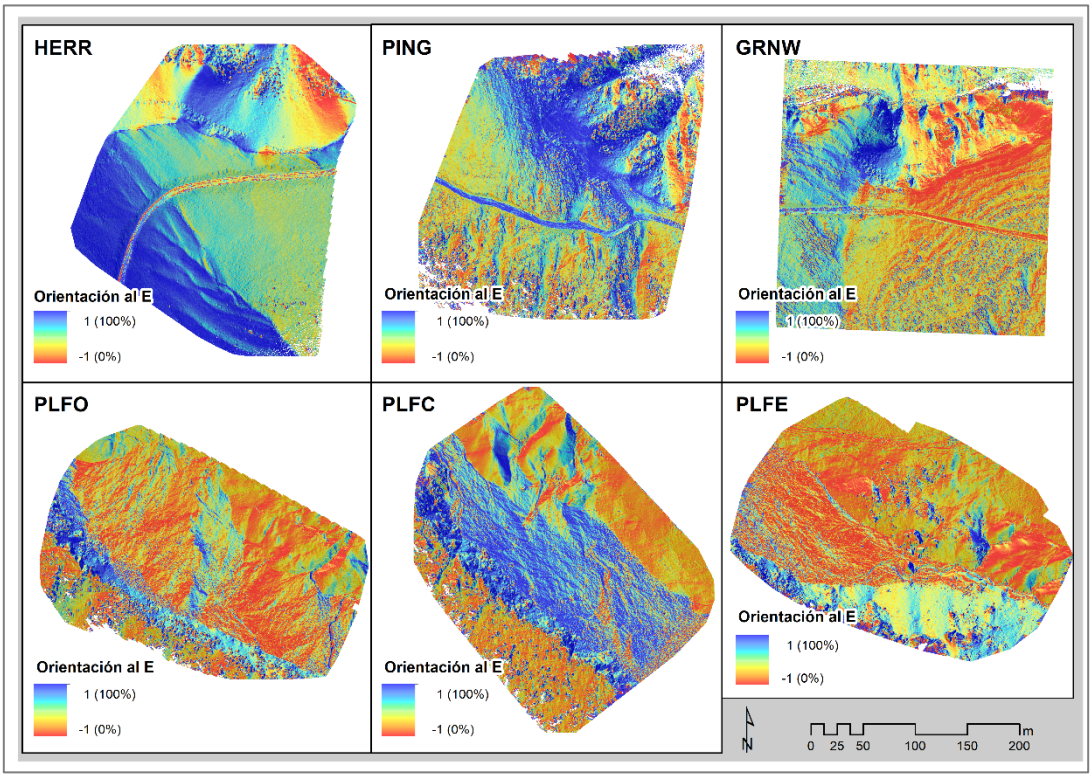
A. Modelo Digital de Superficies (MDS)



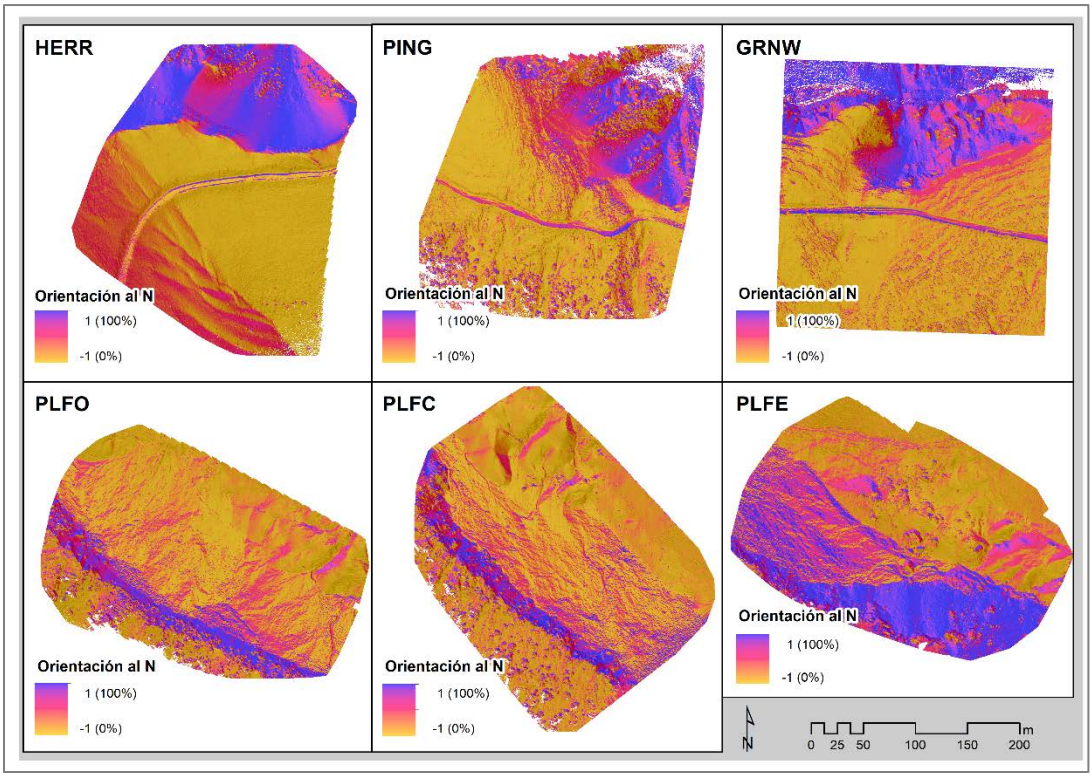
B. Pendiente



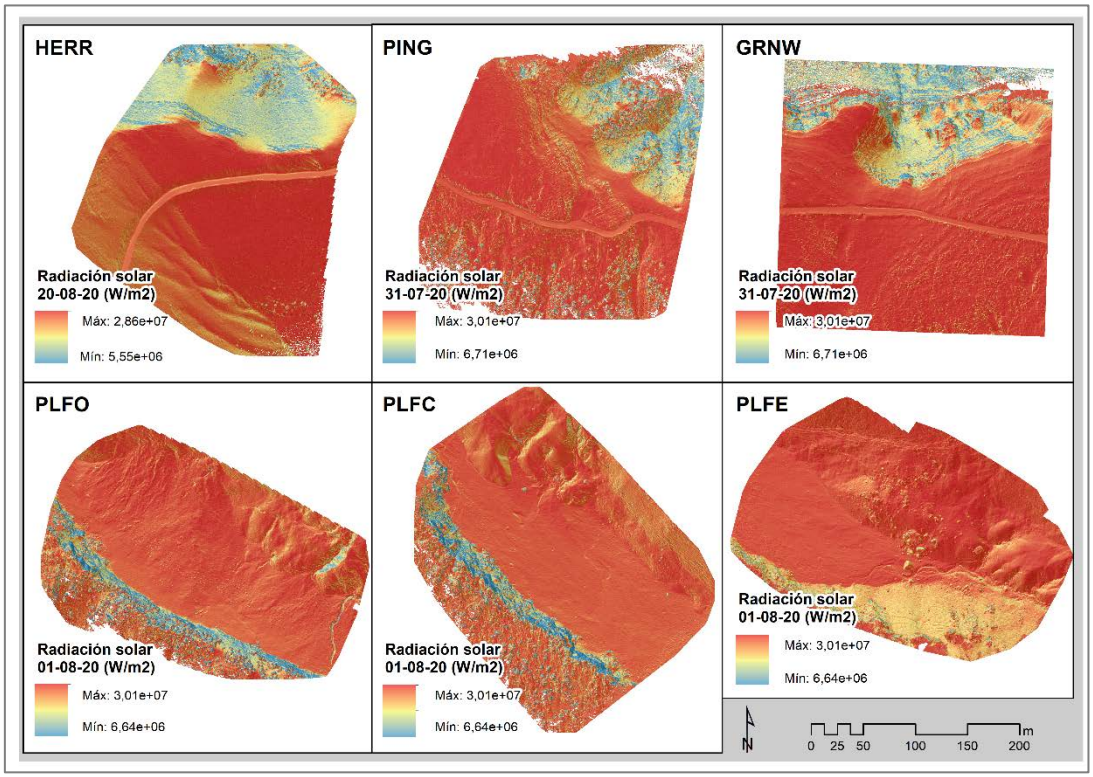
C. Orientación respecto al este



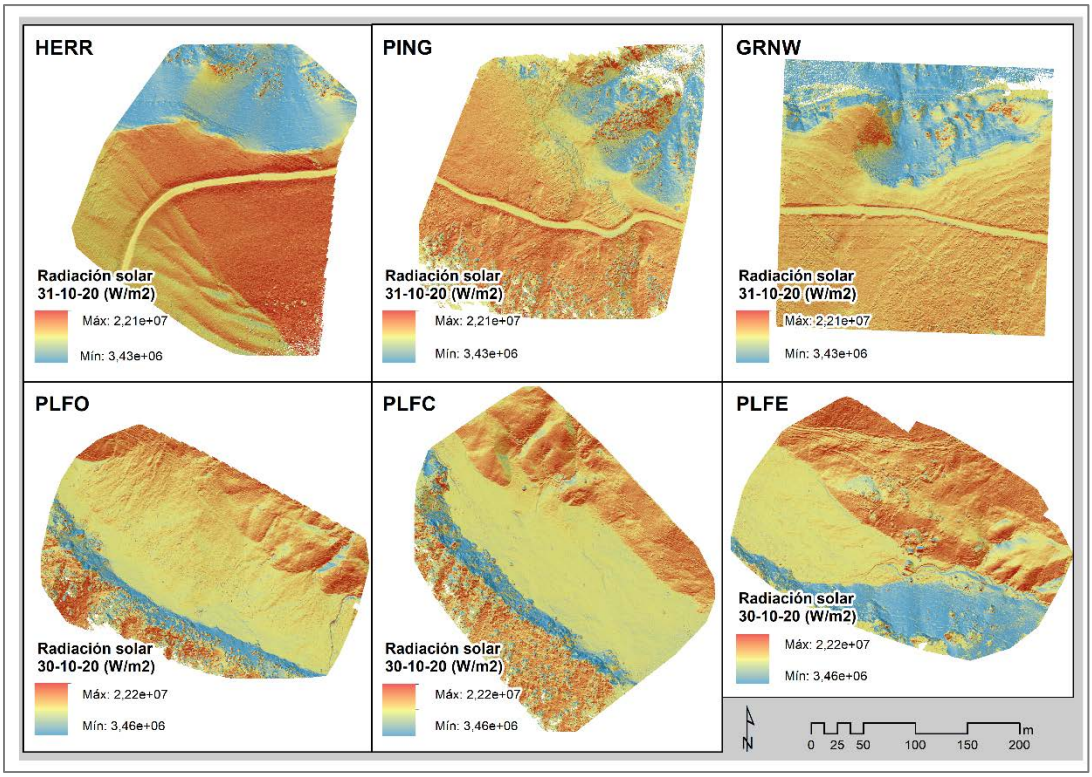
D. Orientación respecto al norte



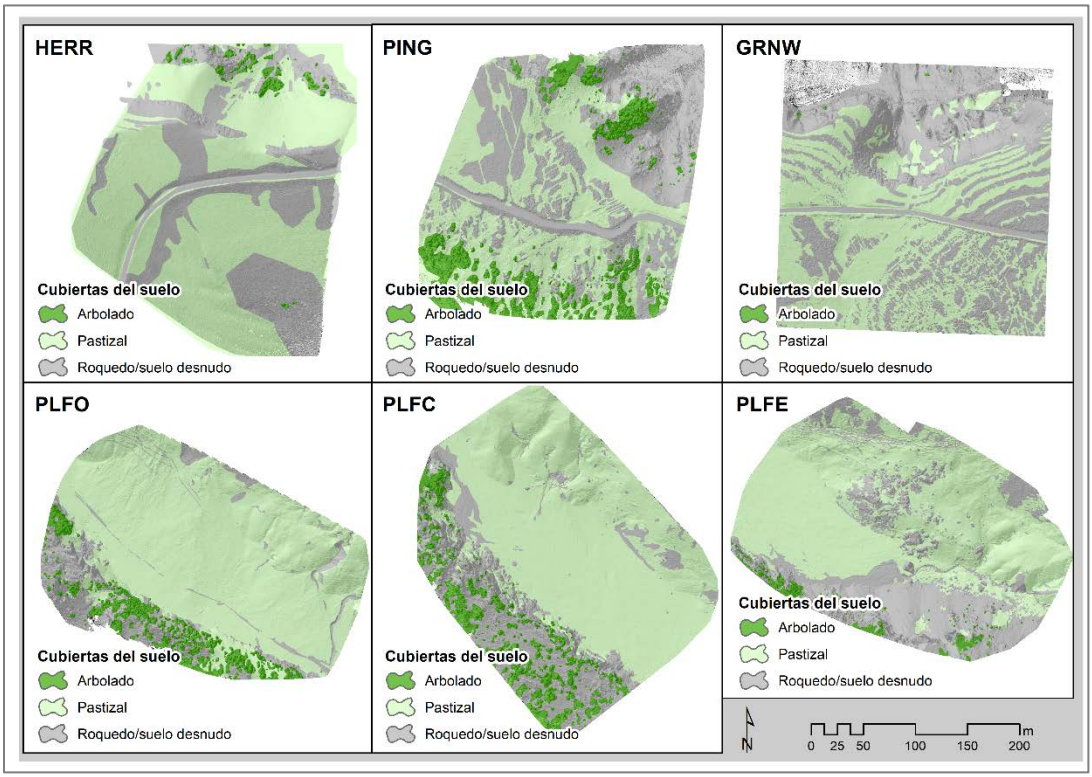
E. Radiación solar de verano (días de vuelo en cada área)



F. Radiación solar de otoño (días de vuelo en cada área)



G. Cubiertas del suelo



Mat. Supl. 008

Fotografías de las áreas de la Sierra de las Cutas

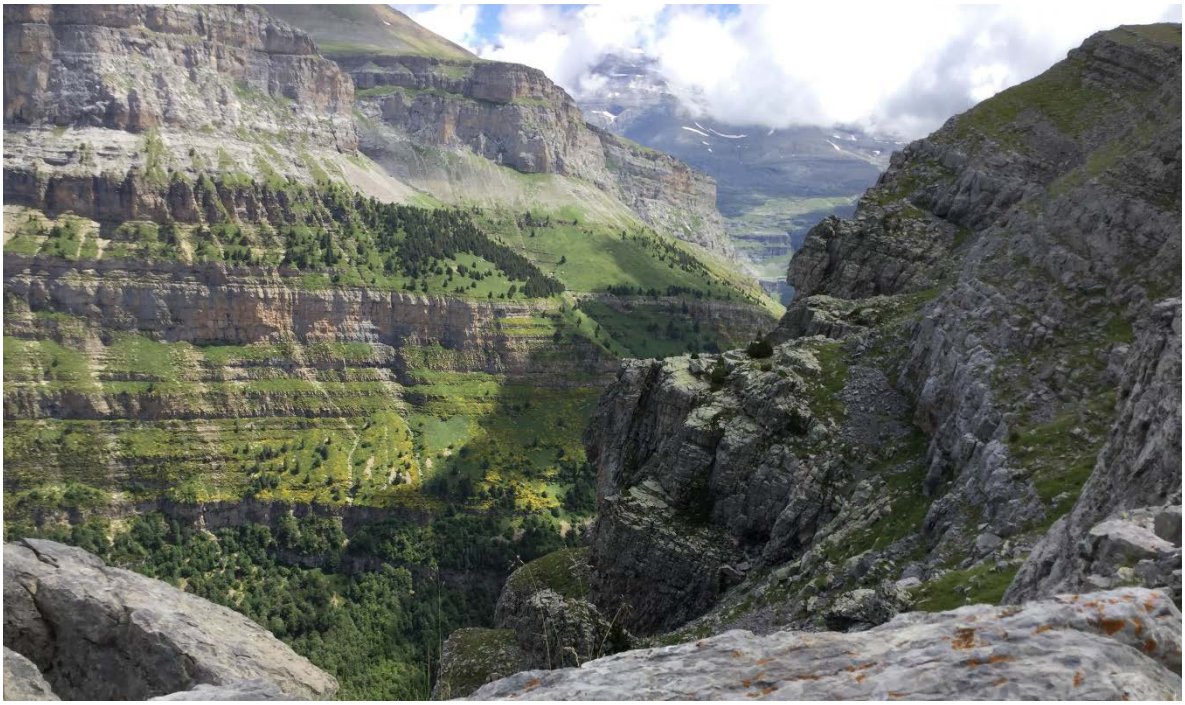
Ladera de orientación E en HERR.

Ladera de solana con pinares de pino negro, pastos y roquedos en PING.

Ladera de solana con pasto, roquedo y al fondo arbolado en PING.

Escarpe N rocoso en GRNW, vista N-NE. Al fondo, valle de Ordesa.

Escarpe N rocoso en GRNW, vista N. Al fondo, valle de Ordesa.



Llanura anterior al cortado rocoso de GRNW. Al fondo, Punta Tobacor (valle de Ordesa)

Ladera de solana en GRNW con alternancia de pastos y roquedos.

Mat. Supl. 009

Fotografías de las áreas de la Sierra de Espierba

Panorámica general de la Pradera de Planafonda desde la entrada por la pista. Vista de las tres áreas (PLFO, PLFC y PLFE). Al fondo, la glera que cierra el valle.

Pradera de Planafonda desde la base de la glera oriental, mañana del 30-10-20 antes del vuelo del UAV. Al fondo, Monte Perdido.

Vista del sector central y occidental de la pradera de Planafonda desde el área PLFE y el UAV antes de uno de los vuelos.

Pradera de Planafonda desde la ladera rocosa de umbría, en imagen las áreas PLFC y al fondo PLFE con la glera que cierra el valle.

Sector occidental de la pradera de Planafonda (PFLO) desde la ladera de solana. Al fondo, el macizo kárstico de Monte Perdido.

Sector central de la pradera de Planafonda desde la ladera de solana (PLFC). Al fondo, el collado de Añisclo.

Sector oriental de la pradera de Planafonda desde la ladera de solana (PLFE). Al fondo a la izquierda, la glera que cierra el valle.

Suelo desnudo en ladera de solana de Planafonda, al fondo la ladera de umbría en zona escarpada de roquedo y pinares de pino negro (PLFO).