

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Evaluación de la radiación solar y la topografía local
como indicadores de potenciales micro-refugios
climáticos en áreas de montaña: Ejemplo de caso en el
Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido

*Evaluation of solar radiation and local topography as
potential climatic microrefugia indicators in mountain areas:
Study case in Ordesa and Monte Perdido National Park*

Autora: María Fernanda García Sánchez

Director: Raúl Hoffrén Mansoa
Supervisor: Juan de la Riva Fernández

Máster Universitario en
Tecnologías de la Información Geográfica para la Ordenación del
Territorio: Sistemas de Información Geográfica y Teledetección

Febrero 2024



Universidad
Zaragoza

**Departamento de Geografía
y Ordenación del Territorio**



Resumen

Este estudio se centra en la evaluación de la radiación solar y variables topográficas a escala local para conocer su relación con las temperaturas mínimas en días de máximo calor, con el fin último de identificar posibles micro-refugios climáticos, definidos como áreas dentro de una región generalmente desfavorable en términos climáticos que presentan condiciones más favorables y estables para determinados organismos. La adquisición de variables se llevó a cabo mediante el uso de Tecnologías de la Información Geográfica, focalizándose en 5 áreas específicas del Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido. Se trabajó con imágenes térmicas de muy alta resolución espacial (3 cm) obtenidas en momentos de máximo calor anual para comprobar su grado de relación con variables de radiación solar directa (en la hora de vuelo) y acumulada, y otras variables topográficas como la orientación, la pendiente, la curvatura y la rugosidad. Además, se realizó una clasificación de la cubierta del suelo a partir del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) para identificar los tipos con mejor correlación entre las temperaturas y las variables generadas. Se encontraron valores más bajos de temperatura en las laderas norte, en superficies de curvatura cóncava y con mayor rugosidad, respectivamente. La variable más relevante por su relación con la temperatura fue la radiación solar acumulada. Ambas variables tuvieron correlaciones directas medias en 2 de las 5 áreas de estudio. Las zonas forestales fueron el tipo de cubierta donde mejor correlación obtuvieron las dos variables en el conjunto de las áreas y, además, fue donde se concentraron los valores de temperatura más bajos. Estos resultados confirman que los bosques podrían ser una de las áreas más propicias para encontrar posibles micro-refugios climáticos en áreas de montaña, y permitiría utilizar la radiación solar acumulada para predecir las temperaturas más frías en épocas de máximo calor. No obstante, es necesario seguir investigando puesto que la presencia de un micro-refugio climático generalmente implica una combinación de varios factores ambientales.

Palabras Clave: Radiación solar, Topografía, Micro-refugios climáticos, Sistemas de Información Geográfica, Teledetección.

Abstract

This study focuses on the evaluation of solar radiation and topographic variables at a local scale to know their relationship with minimum temperatures on days of maximum heat, with the ultimate goal of identifying possible climatic microrefugia, defined as areas within a generally unfavorable region in climatic terms that present more favorable and stable conditions for certain organisms. The acquisition of variables was carried out through the use of Geographic Information Systems, focusing on 5 specific areas in Ordesa y Monte Perdido National Park. Thermal images of very-high spatial resolution (3 cm) were used, which were obtained at moments of maximum annual heat to check their degree of relationship with variables of direct solar radiation (at the time of flight) and accumulated solar radiation, and other topographic variables such as orientation, slope, curvature and roughness. In addition, land cover classification was performed based on the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to identify the types with the best correlation between temperatures and the variables generated. The most relevant variable due to its relationship with temperature was cumulative solar radiation. Both variables had direct medium correlations in 2 of the 5 study areas. Forested areas were the type of cover where the two variables were best correlated in all the areas and, in addition, where the lowest temperature values were concentrated. These results confirm that forests may be one of the most favorable areas for finding possible climatic microrefugia in mountain areas, and would allow the use of accumulated solar radiation to predict the coldest temperatures at times of maximum heat. However, further research is needed since the presence of a climatic microrefugia generally involves a combination of several environmental factors.

Keywords: Solar radiation, Topography, Climatic microrefugia, Geographic Information Systems, Remote sensing

Índice General

| | | |
|--------|---|----|
| 1. | Introducción..... | 1 |
| 2. | Objetivo general | 3 |
| 2.1. | Objetivos específicos | 3 |
| 3. | Área de estudio: Descripción del Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido y su importancia en términos de biodiversidad..... | 4 |
| 4. | Metodología..... | 7 |
| 4.1. | Fase I. Organización, recopilación y preparación de datos. | 9 |
| 4.2. | Fase II. Creación de variables independientes..... | 10 |
| 4.2.1. | Clasificación digital de imágenes espaciales. Variable: Cobertura vegetal | 10 |
| 4.2.2. | Estimación de radiación solar de áreas en imágenes espaciales. Variable: Radiación solar de áreas | 17 |
| 4.2.3. | Parámetros de superficie: Variables topográficas | 19 |
| 4.3. | Fase III. Variable dependiente: Temperatura | 22 |
| 4.4. | Fase IV. Análisis correlacional..... | 23 |
| 4.5. | Fase V. Análisis de regresión | 23 |
| 5. | Resultados y discusión | 23 |
| 5.1. | Cobertura vegetal (NDVI) | 23 |
| 5.2. | Radiación solar de áreas | 28 |
| 5.3. | Parámetros de superficies | 33 |
| 5.4. | Análisis correlacional general..... | 38 |
| 6. | Conclusiones..... | 42 |
| 7. | Agradecimientos..... | 45 |
| 8. | Bibliografía..... | 46 |
| 9. | Anexos..... | 50 |

Índice de Tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Cuadro sistematizado de la organización de datos. | 9 |
| Tabla 2. Estadísticas de los valores de NDVI de las áreas de estudio. | 15 |
| Tabla 3. Rangos de clasificación para las coberturas con relación al valor de NDVI. | 16 |
| Tabla 4. Día, hora y posición solar del día de vuelo. | 18 |
| Tabla 5. Valores mínimos, máximos y medios de la variable temperatura. | 22 |
| Tabla 6. Valores de correlación (R^2) entre la temperatura y las variables de radiación solar en la hora de vuelo y radiación solar acumulada, y valores máximos y promedios de radiación por área de estudio. | 29 |
| Tabla 7. Comportamiento térmico de cubiertas. Curran (1985). | 31 |
| Tabla 8. Valores máximos, mínimos y medios de la variable pendiente | 35 |
| Tabla 9. Valores mínimos, máximos y medios de curvatura en grados. | 36 |

Índice de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1. Fotografía del Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido. Elaboración propia. | 5 |
| Figura 2. Cartografía de elevación y ubicación de las áreas en el Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido. Elaboración propia. | 6 |
| Figura 3. Diagrama del proceso metodológico. Elaboración propia. | 8 |
| Figura 4. Creación de geodatabases en un nuevo proyecto de ArcGIS pro. Elaboración propia. | 9 |
| Figura 5. Diagrama de flujo de un proyecto de clasificación de imágenes. Elaboración propia editado de Chuvieco, 2019 | 10 |
| Figura 6. Fotografías in situ, trabajo de campo análisis visual. Elaboración propia. | 12 |
| Figura 7. Organización jerárquica de los criterios de interpretación visual. Elaboración propia editado de Chuvieco (2019). | 13 |
| Figura 8. Cartografía de la ubicación de las áreas de estudio PING, HERR y GRNW sobre una imagen en falso color infrarrojo (PNOA). Elaboración propia. | 14 |
| Figura 9. Cartografía de la ubicación de las áreas de estudio PLFO y PLFE sobre una imagen en falso color infrarrojo (PNOA). Elaboración propia. | 15 |
| Figura 10. Diagrama de flujo, de herramienta NDVI ArcGIS Pro. Elaboración propia. | 16 |
| Figura 11. Modelo de ejecución de la herramienta radiación solar. Elaboración propia. | 19 |
| Figura 12. Direcciones de Orientación (brújula). | 19 |
| Figura 13. Direcciones de orientación (leyenda). Elaboración propia a partir de ArcGIS Pro. | 20 |
| Figura 14. Direcciones de orientación (leyenda). Elaboración propia. | 21 |
| Figura 15. Modelo de ejecución para variable Rugosidad. Elaboración propia. | 22 |
| Figura 16. Modelo de creación de puntos y tablas. Elaboración propia. | 23 |
| Figura 17. Ajuste de histograma en simbología ArcGIS Pro. Elaboración propia. | 24 |
| Figura 18. Cartografía del índice de vegetación normalizada NDVI Áreas PING HERR y GRNW. Elaboración propia. | 24 |
| Figura 19. Cartografía del índice de vegetación normalizada NDVI Áreas PLFE y PLFO. Elaboración propia. | 25 |
| Figura 20. Cartografía en representación en 3D de temperaturas mínimas superpuestas en Ortofotos en Áreas GRNW, HERR y PING. Elaboración propia. | 26 |
| Figura 21. Cartografía de representación en 3D de temperaturas mínimas superpuestas en Ortofotos en Áreas PLFE Y PLFO. Elaboración propia. | 26 |
| Figura 22. Diagramas de dispersión de la relación entre NDVI y temperaturas, por tipo de cubierta. Elaboración propia. | 27 |
| Figura 23. Cartografía radiación solar de Áreas PING, HERR y GRNW. Elaboración propia. | 30 |
| Figura 24. Cartografía radiación solar de Áreas PLFE y PLFO. Elaboración propia. | 30 |
| Figura 25. Diagramas de dispersión de la relación entre radiación solar de áreas acumulado (WH/m^2) y temperaturas, por tipo de cubierta. Elaboración propia. | 32 |

| | |
|--|----|
| Figura 26. Diagramas de dispersión de la relación entre orientación de laderas y temperaturas, por tipo de cubierta. Elaboración propia..... | 34 |
| Figura 27. Diagramas de dispersión de correlación entre temperaturas y pendientes, por área. Elaboración propia..... | 35 |
| Figura 28. Diagramas de dispersión de la relación entre curvatura y temperaturas, por tipo de cubierta. Elaboración propia..... | 37 |
| Figura 29. Diagramas de dispersión de la relación entre radiación solar de áreas (acumulado) y rugosidad, por tipo de cubierta. Elaboración propia..... | 38 |
| Figura 30. Matrices de correlación de todas las variables por área. Elaboración propia. | 39 |
| Figura 31. Matriz de correlación total (todas las áreas) con R de Pearson. Elaboración propia..... | 40 |
| Figura 32. Diagramas de dispersión totales (todas las áreas) de radiación solar y temperaturas, por tipo de cubierta vegetal. Elaboración propia. | 40 |

1. INTRODUCCIÓN

La comprensión del entorno natural, las características distintivas del medio ambiente, la diversidad biológica y las complejas interacciones entre los componentes bióticos y abióticos, constituyen un pilar esencial para la identificación precisa y anticipada de cambios en los ecosistemas para prever los impactos directos en la biodiversidad. No obstante, el medio natural enfrenta desafíos significativos, principalmente derivados de la degradación de los recursos naturales y el cambio climático inducido por las actividades humanas diarias. Estas alteraciones provocan impactos notables en los patrones climáticos, con consecuencias directas en la distribución geográfica y la viabilidad de diversas especies.

En este contexto, la atención se ha centrado en un fenómeno crucial para la supervivencia de la biodiversidad frente al cambio climático: los micro-refugios climáticos. Estas áreas desempeñan un papel fundamental en su adaptación, ya que, por sus condiciones y características, permiten aminorar los efectos de los cambios ambientales aumentando la resistencia, promoviendo la resiliencia y permitiendo la adaptación de los ecosistemas.

Los micro-refugios climáticos se definen como áreas o lugares pequeños con condiciones climáticas específicas y distintas de las condiciones generales de la región circundante, áreas donde la velocidad de los parámetros climáticos es lenta, lo que resulta en tiempos de residencia climática más prolongados (Loarie et al., 2009). Hoy en día los micro-refugios climáticos se han convertido en herramientas fundamentales para la toma de decisiones, manejo y mejoras en las estrategias de conservación de la biodiversidad, y comúnmente están asociados con áreas protegidas extensas y terrenos topográficamente complejos (Ackerly et al., 2010). En este contexto, la búsqueda y delimitación de micro-refugios climáticos se ha vuelto esencial para comprender y abordar los impactos sobre la biodiversidad, permitiendo conocer la riqueza de especies y su papel en el equilibrio dinámico de los ecosistemas, sino que también se convierte en un mecanismo fundamental para garantizar su supervivencia.

En respuesta a la urgente necesidad de comprender y gestionar estos microclimas favorables, se ha impulsado el uso de tecnologías que permitan la búsqueda y delimitación de estos espacios incluyendo tecnologías de información geográfica, especialmente la teledetección pasiva (imágenes térmicas) y activa (LiDAR), así como vehículos aéreos no tripulados (UAVs), para la obtención de modelos topoclimáticos y de la caracterización climática mediante información procedente tanto de estaciones meteorológicas, como de sensores de temperatura miniaturizados (Hoffrén, 2019).

No obstante, la instalación de los sensores, 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 (Hoffrén & García, 2023). Asimismo, el uso de UAVs requiere de tiempo de traslado, altos costos operativos y su alcance es generalmente para áreas pequeñas. Por lo que el uso de los Sistemas de Información Geográfica y la teledetección puede ser una opción para facilitar la tarea de la búsqueda y delimitación de potenciales micro-refugios climáticos.

Este Trabajo Fin de Máster se sumerge en el análisis detallado de los micro-refugios climáticos, explorando su formación, su papel en la adaptación de las especies y su aplicación práctica en estrategias de conservación. A través de la aplicación de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y técnicas de teledetección, se busca identificar y delimitar potenciales micro-refugios climáticos mediante el análisis de diversas variables climáticas y topográficas que influyen en su formación. La implementación de los Sistemas de Información Geográfica y la teledetección proporcionan una comprensión más profunda sobre el comportamiento de variables en regiones extensas, lo que facilita la identificación de patrones y relaciones complejas en un contexto geográfico más amplio y a su vez, simplifica y optimiza la localización de micro-refugios climáticos.

Aunque se reconoce que la formación de micro-refugios climáticos está condicionada por múltiples factores, se asigna especial relevancia a la variable de radiación solar. La radiación solar incidente es la principal fuente de energía, y por tanto el factor más determinante de los procesos físicos y biológicos de nuestro planeta (Dubayah & Rich, 1995).

La radiación solar actúa como un factor determinante en la regulación térmica y energética de los ecosistemas, desempeñando un papel crucial en la configuración de las condiciones microclimáticas locales. Modelar la radiación solar permite obtener información efectiva para comprender los procesos de la tierra y tiene numerosas aplicaciones en la actualidad, como el diseño y planificación urbana y arquitectónica, determinación de la eficiencia y capacidad energética de instalaciones, toma de decisiones y pronósticos en la agricultura, manejo forestal, recursos hídricos, predicciones meteorológicas y estudios climáticos y de medio ambiente. A escalas regionales y locales, el relieve del terreno es el principal factor que modifica la distribución de la radiación. La variabilidad en la elevación, la inclinación de la superficie (pendiente) y la orientación (aspecto), así como las sombras proyectadas por las características del terreno, generan gradientes locales significativos. La heterogeneidad espacial y temporal de la energía solar incidente determina la dinámica de muchos procesos ambientales (Hofierka & Suri 2002). La estimación de la radiación solar puede ser útil al evaluar la existencia de micro-refugios climáticos, pero es crucial considerar otros factores ambientales para obtener una comprensión completa de las condiciones locales.

La inclusión de otras variables topográficas en el análisis permitirá una comprensión más holística de los micro-refugios climáticos. Al considerar la interacción entre estas variables, se aspira a desarrollar un modelo predictivo que identifique áreas dentro del parque nacional propensas a mantener condiciones climáticas estables y, por ende, son propicias para el establecimiento y conservación de microhábitats resilientes. Este enfoque integrado busca contribuir al conocimiento y la gestión efectiva de la biodiversidad en un contexto de cambio climático, a través de la identificación y caracterización de áreas que podrían fungir como refugios frente a las variaciones climáticas adversas. La topografía puede generar una variación ambiental sustancial a escalas espaciales finas. Configurada por la pendiente, la orientación, la posición en la ladera y la elevación, la heterogeneidad del topoclima puede aumentar la diversidad ecológica y actuar como un amortiguador espacial para la vegetación que responde al cambio climático. (Oldfather et al., 2016)

La hipótesis central de este trabajo es que hay una correlación positiva entre las temperaturas mínimas de los días de máximo calor y distintas variables topográficas facilitarán la identificación de áreas con temperaturas estables, permitiendo la delimitación de potenciales micro-refugios climáticos. Algunos autores sugieren que la persistencia de las temperaturas mínimas en verano en determinados lugares es importante para la biodiversidad ya que los micro-refugios son lugares donde el clima es más estable (o tiene menos calentamiento) que las áreas circundantes (Saxon et al., 2005; Ashcroft et al., 2009; Fridley, 2009; Rull, 2009). En algunos paisajes, localidades con bajas temperaturas máximas en verano han experimentado menos calentamiento que localidades más cálidas, y, por lo tanto, se espera que los micro-refugios ayuden a proteger a las especies más vulnerables en un clima en calentamiento (Ashcroft et al., 2009).

La disponibilidad de los Modelos digitales del Terreno ha facilitado la generación de seis variables geo ambientales modificadoras del clima local: La cobertura vegetal en valores de Índice de Vegetación Normalizada, la radiación solar incidente, la rugosidad, la curvatura, la pendiente y la orientación. La metodología adoptada para este estudio se divide en cinco fases estratégicas. En la Fase I, se enfocó en la organización, recopilación y preparación de datos, creando geodatabases y figuras en formato shape en un proyecto de ArcGIS Pro. La Fase II se centró en la creación de las variables, la Fase V consistió en un análisis de Regresión Lineal para modelar una ecuación predictiva de temperaturas mínimas en días de máximo calor en función de las variables independientes.

La metodología empleada en este estudio representa una innovación significativa en la búsqueda y delimitación de micro-refugios climáticos. Con la revisión de diversos estudios y la aplicación de modelos innovadores, se pretende contribuir significativamente a la comprensión de los micro-refugios climáticos como herramientas cruciales para la toma de decisiones en la gestión y conservación de la biodiversidad. A través de la identificación de áreas termalmente estables y su cartografía en detalle, este trabajo aspira a ofrecer una base sólida y abrir nuevas perspectivas para la planificación y ejecución de estrategias de conservación adaptativas en el contexto del cambio climático. La incorporación de herramientas de teledetección satelital en este estudio, junto con la creación y descripción de cartografía generada, destaca la necesidad de una aproximación integral y novedosa para comprender las superficies y el paisaje en su totalidad.

2. OBJETIVO GENERAL

El objetivo general de este Trabajo Fin de Máster es investigar de manera integral los micro-refugios climáticos, empleando técnicas avanzadas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y teledetección. El estudio se centra en la identificación y delimitación de áreas potenciales de micro-refugios climáticos, explorando las relaciones entre variables topográficas que contribuyen y configuran las condiciones óptimas para su formación, con especial énfasis en la Radiación Solar, con el propósito de contribuir significativamente a la comprensión y gestión de la biodiversidad en el contexto del cambio climático. La investigación se basará en la recopilación y análisis de datos provenientes de áreas específicas del Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido (PNOMP), donde se han realizado vuelos con un vehículo aéreo no tripulado equipado con un sensor térmico en el año 2020, los cuales captaron la información de temperaturas en días de máximo calor.

2.1. Objetivos específicos

- Simular la Radiación Solar Incidente utilizando el Modelo de *Solar Analyst* en ArcGIS Pro y explorar sus variaciones espaciotemporales en relación con la temperatura.
- Utilizar técnicas avanzadas de las Tecnologías de la Información Geográfica para obtener información de variables topográficas (pendientes, orientación, cobertura y rugosidad).
- Realizar una clasificación de la cobertura vegetal por medio del cálculo del índice de Vegetación Normalizada (NDVI) para identificar el diferente comportamiento de las áreas en relación a las temperaturas, la Radiación Solar y las variables topográficas.
- Revelar los efectos directos e indirectos de la radiación solar, la cubierta vegetal, y las variables topográficas calculadas en las variaciones de temperaturas.
- Analizar la correlación existente entre la Radiación Solar y las temperaturas mínimas en días de máximo calor.
- Realizar un análisis de correlación para tratar de prever las temperaturas mínimas en días de máximo calor, utilizando las variables identificadas en la metodología como predictoras de potenciales micro-refugios climáticos.

3. ÁREA DE ESTUDIO: DESCRIPCIÓN DEL PARQUE NACIONAL DE ORDESA Y MONTE PERDIDO Y SU IMPORTANCIA EN TÉRMINOS DE BIODIVERSIDAD

El Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido (en adelante, PNOMP) se encuentra en el Pirineo Central de España, en la provincia de Huesca de la Comunidad Autónoma de Aragón. Este Parque, declarado Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO en 1997, es uno de los destinos turísticos más emblemáticos y lugar de amplia diversidad y de gran valor paisajístico y ecológico. (Figura 1)

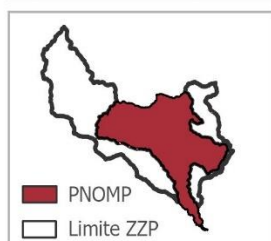
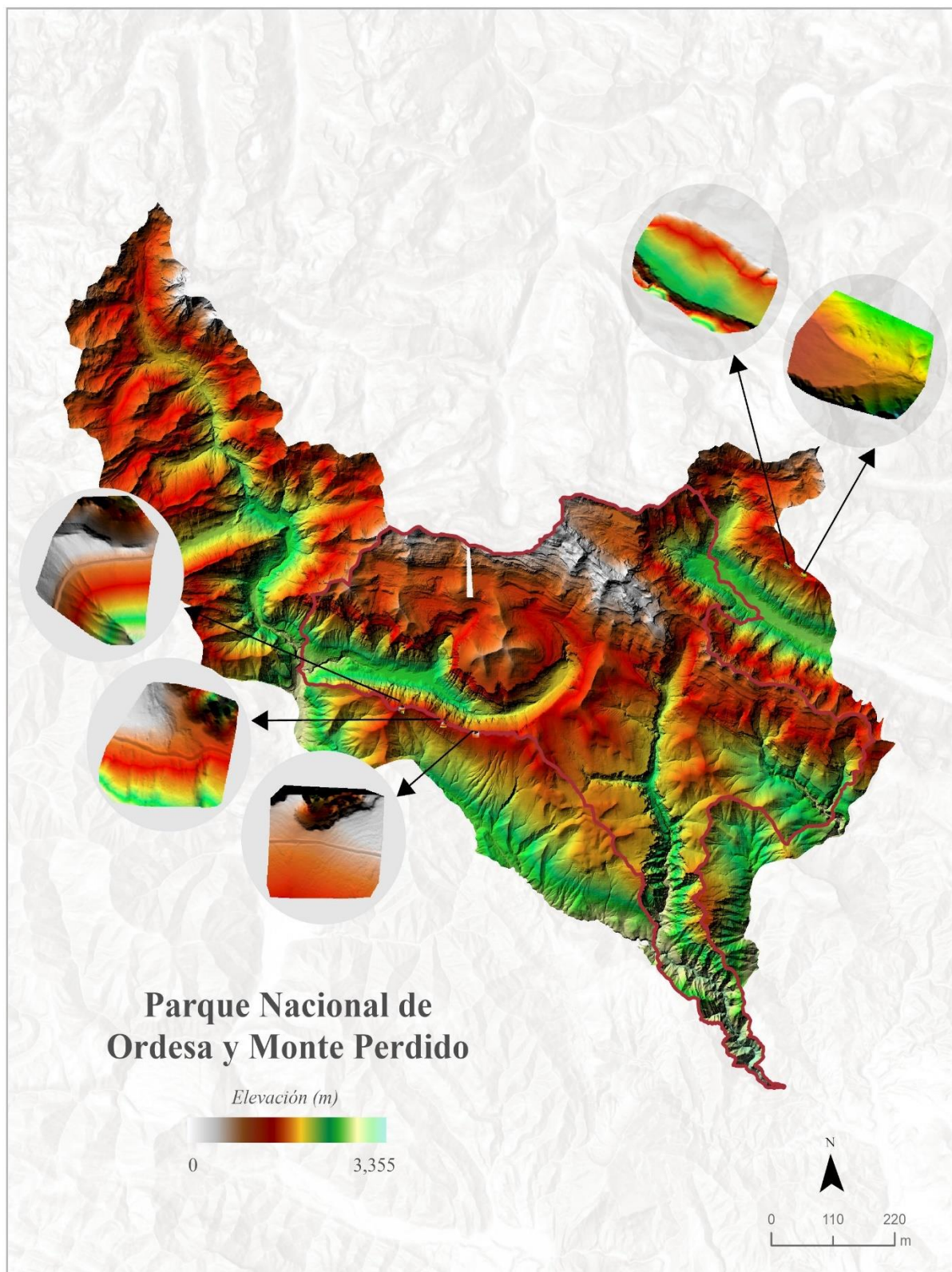
El PNOMP se extiende sobre una superficie de 15.696,20 hectáreas y es reconocido por sus estructuras y formaciones rocosas complejas en las que sobresalen altas cumbres, crestas, cañones y valles que se han modelado a través de los años por el hielo y deshielo de los fenómenos glaciares. Entre los sistemas montañosos más nombrados se encuentran Ordesa, Añisclo, Escuaín y Pineta debido a su gran elevación y entre los que fluyen los ríos Arazas, Bellós, Yaga y Cinca y la montaña más conocida es Monte Perdido con 3.355 metros de altura en su máxima cota, el cual posee uno de los últimos glaciares de la Península Ibérica. (IGN, s.f)

Esta singularidad topográfica y la heterogeneidad de los suelos son la base de la riqueza biológica del PNOMP, los singulares relieves de montañas y cordilleras albergan distintas comunidades vegetales y faunísticas entre las que destacan matorrales supraforestales, pastizales de alta montaña, estepas leñosas de altura y cascajares; pinares, sabinars y enebrales; abetales y pinsapares; robledales, hayedos y abedulares; encinares, carrascales, alcornocales y acebuchales; bosques mixtos atlánticos del piso colino o montano; quejigares y melojares; bosques de ribera; y humedales, total son 1.404 especies de plantas vasculares y 50 endemismos exclusivamente pirenaicos (García et al., 2019), encontrándose la mayor parte de las plantas endémicas en hábitats rocosos como canchales y acantilados, lo que convierte al parque, en una zona idónea para la identificación de micro-refugios. Uno de los aspectos más notables del parque es su diversidad climática. En la memoria del PNOMP del Gobierno de Aragón (2020), se expone que 2020 fue un año extremadamente cálido, con una temperatura media en la España peninsular de 14.7°C, valor que supera en 1°C al valor medio anual (periodo de referencia 1981-2010). Las temperaturas varían significativamente según la altitud y la estación del año. La temperatura media anual es de 4.9°C y la precipitación media de 1.650 mm/año. Los meses de julio y agosto son los más cálidos y los de enero y febrero los más fríos, siendo en estos últimos meses en los que se concentran las mayores heladas.

La biogeografía y diversidad del Parque es de alto interés científico. El Instituto Pirenaico de Ecología ha trabajado para la monitorización de cuevas y glaciares, monitorización de especies faunísticas y florísticas y desarrollado estrategias de conservación de bosques y pastos, además, en los últimos años se han instalado más de 200 termómetros para capturar la gran variedad de microclimas presentes en el Parque Nacional permitiendo detectar micro-refugios climáticos. En los proyectos “Identificación de refugios climáticos para la biodiversidad en los Pirineos mediante modelos topoclimáticos de alta resolución a partir de sensores térmicos”, se seleccionaron dos sectores del Pirineo Central aragonés situados dentro de los límites del PNOMP y su zona periférica de protección). Las áreas fueron seleccionadas debido a su heterogeneidad ambiental, en el primer sector en el que se realizó el vuelo fue en el valle de Ordesa. Las áreas que se sobrevolaron en ese primer sector se nombraron como Planafonda Este (PLFE) y Planafonda Oeste (PLFO), nombres que se mantuvieron en el presente trabajo, se caracterizan por la presencia de roquedos en las pronunciadas pendientes, dónde hay pastizales subalpinos, que en algunas áreas se mezclan con pequeños afloramientos rocosos y pedregales, además en las áreas más elevadas se localizan áreas de pinares de pino negro (Hoffrén & García, 2023). Las siguientes áreas se ubican en el Mirador de la Herradura (HERR), el área de Los Pingüinos (PING) y el área del Mirador de Greenwich (GRNW) donde afloran los materiales calizos y las gleras (Hoffrén & García, 2023). (Figura 2)



Figura 1. Fotografía del Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido. Elaboración propia.



Representación topográfica del Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido y ubicación de las áreas de vuelo.

Limite del Parque

Proyección: EPSG 25830
Autor: Ma. Fernanda García | Año 2023

Figura 2. Cartografía de elevación y ubicación de las áreas en el Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido. Elaboración propia.

4. METODOLOGÍA

La metodología se estructuró en 5 fases y se detallan a continuación (Figura 3):

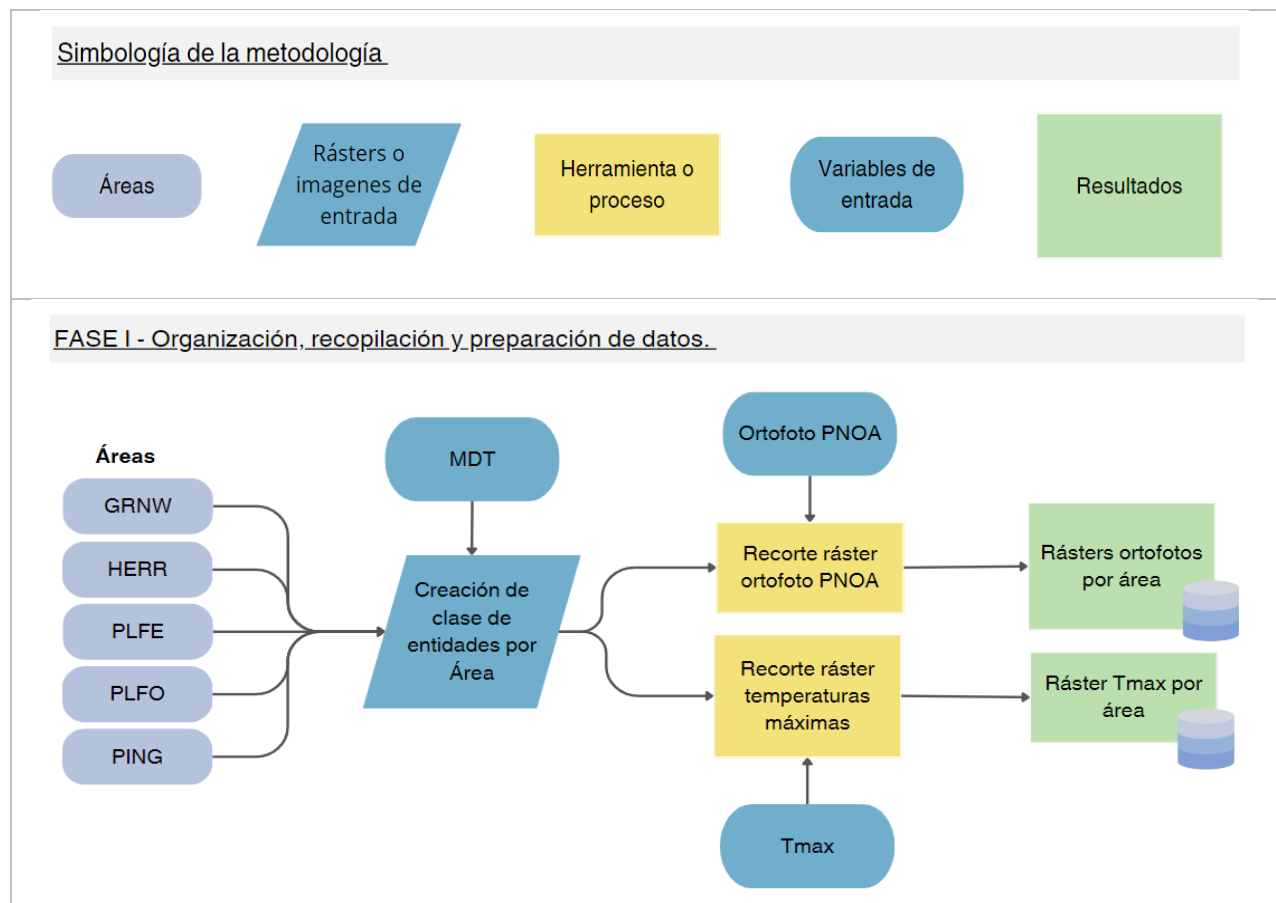
En la Fase I, se llevó a cabo la organización, recopilación y preparación de datos: Se crearon geodatabases en el marco de un proyecto de ArcGIS Pro destinadas para contener la información que sería utilizada en las fases subsiguientes. Se generaron figuras en formato shape para representar las áreas de interés y se exploraron las herramientas y los archivos pertinentes que serían utilizados para las siguientes fases.

En la Fase II se crearon y obtuvieron las variables independientes: Se identificaron 6 variables clave: Variable (1) - Cobertura Vegetal (NDVI), Variable (2) - Radiación Solar, Variables – Parámetros de Superficie. ((3) Orientación de laderas, (4) Pendientes, (5) Curvatura Media, y (6) Rugosidad), mismas que fueron obtenidas a partir de geoprocesos que se explican más adelante.

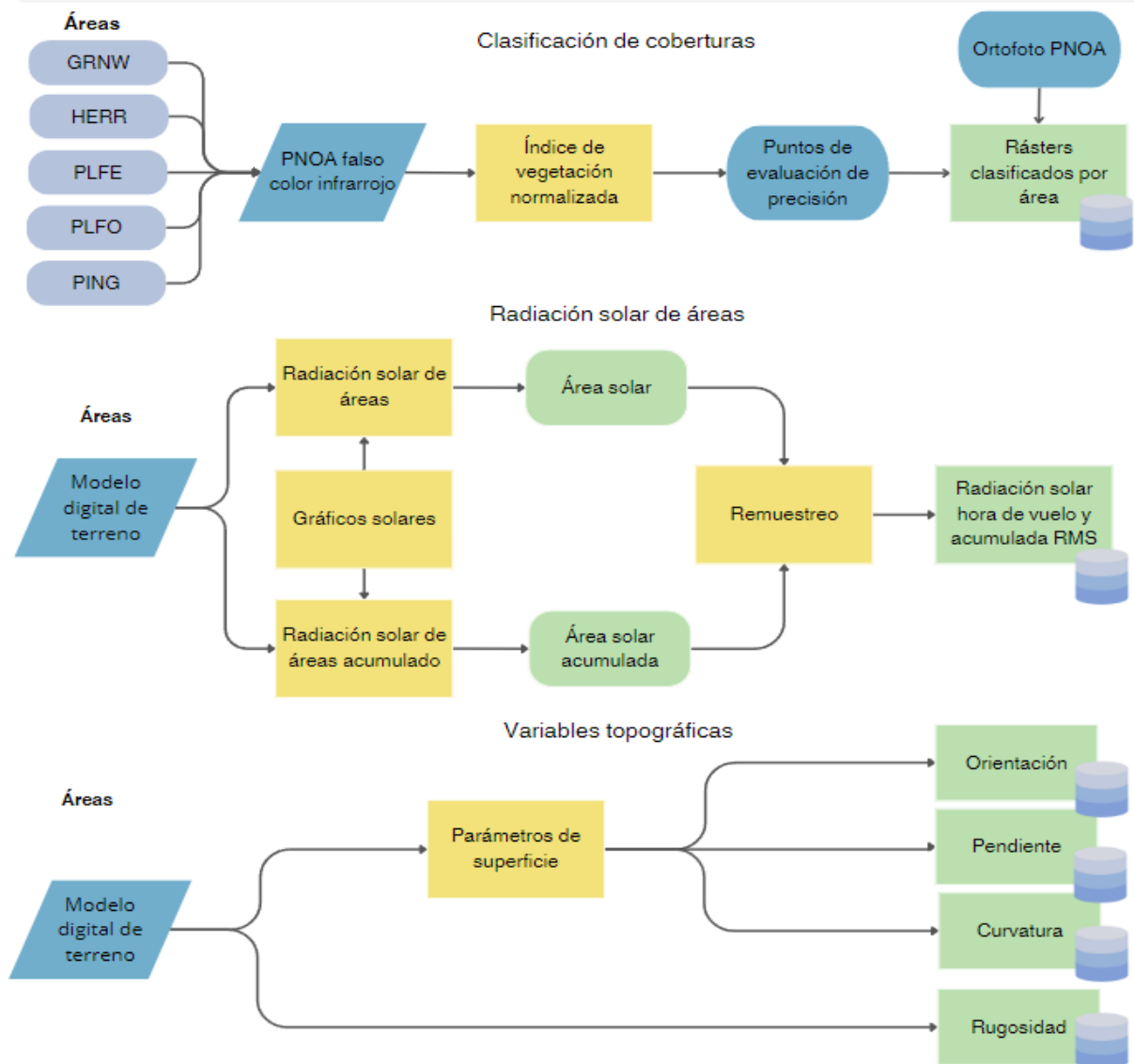
La Fase III consistió en examinar la variable dependiente, es decir, la Temperatura. Para ello los ráster de las áreas se transformaron a puntos con el fin de extraer la información de las temperaturas mínimas registradas.

En la Fase IV, se llevó a cabo un análisis correlacional para determinar la relación entre las seis variables dependientes y la variable independiente. Asimismo, se realizó un análisis de importancia de variables utilizando el software Rstudio, con el propósito de evaluar las variables seleccionadas en la fase anterior y determinar la variable con la correlación más significativa.

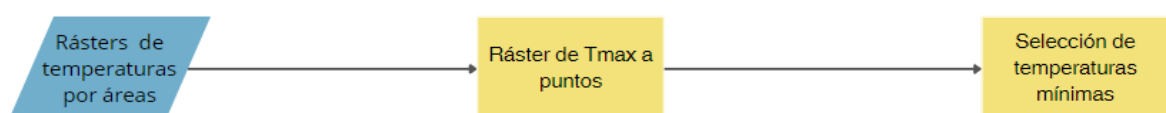
La Fase VI comprendió de un análisis de Regresión Lineal. Se modeló una ecuación que permita predecir valores de temperaturas mínimas en días de máximo calor en función de los valores de las variables independientes.



FASE II - Creación de variables independientes.



FASE III - Variable dependiente: temperatura.



FASES IV y V - Análisis de correlación y regresión lineal.

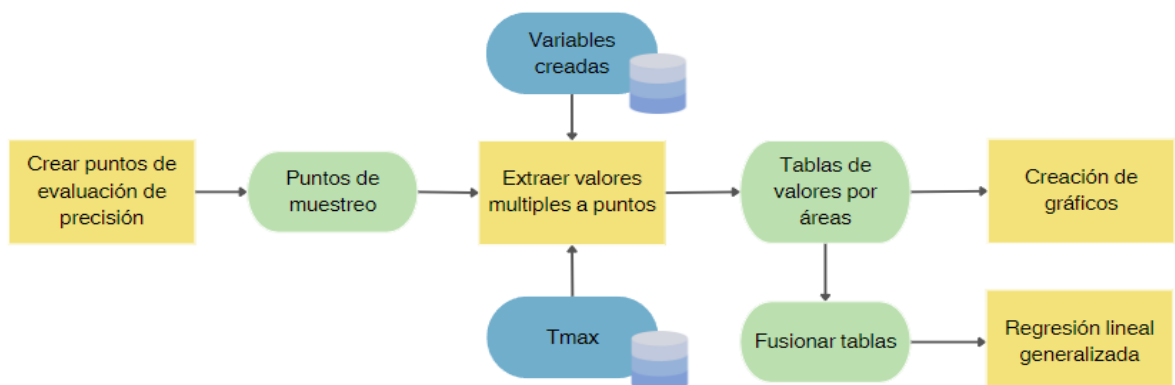


Figura 3. Diagrama del proceso metodológico. Elaboración propia.

4.1. Fase I. Organización, recopilación y preparación de datos.

En la primera etapa de la metodología, se requiere elaborar una organización detallada y establecer una serie de aspectos preliminares para orientar y definir el proceso. Esto implica el conocimiento exhaustivo de las variables que se abordarán en la investigación. Además, la consideración cuidadosa de los materiales, métodos y herramientas más apropiados se vuelve esencial en este contexto. Con el propósito de sistematizar esta evaluación, se ha elaborado la (Tabla 1), la cual establece una descripción general de las variables y procesos que se abordarán en las siguientes fases de la metodología. Cabe mencionar que se utilizó el software de sistemas de información geográfica (SIG) ArcGIS Pro-3.1.0 desarrollado por ESRI (Environmental Systems Research Instituto) para la ejecución de este proyecto.

Tabla 1. Cuadro sistematizado de la organización de datos.

| Variables independientes | Variable | Unidades | Fuente | Geoproceso y especificaciones |
|--------------------------|--|--------------------------------------|--|--|
| | Cobertura vegetal | Valor del píxel en NDVI | Imagen aeroportada en falso color PNOA máxima actualidad obtenido del centro de descargas CNIG | Índice NDVI |
| | Radiación solar | Valor del píxel en WH/R ² | Modelo digital de terreno | Radiación solar de áreas y gráficos de radiación solar |
| | Pendiente, orientación y curvatura media | Valor del píxel en metros | Modelo digital de terreno | Parámetros de superficie |
| | Rugosidad | Valor del píxel en valor del índice | Modelo digital de terreno | Método (Harper, 2020) |
| Variable dependiente | Temperatura | Valor del Píxel en T° | Imagen Tmax de UAV | Ráster a puntos |
| Otros procesos | Análisis de correlación | Tabla de las variables por área | Variables creadas | Extraer multi valores a puntos. Gráficos de ArcGIS Pro |

Una vez establecido lo anterior, se formaron las siguientes geodatabases contenedoras de información dentro del proyecto en extensión.gdb en las que se ingresó información espacial en formato Ráster (.tiff) en formato vectorial (.shp) y las tablas creadas (.dbf). (Figura 4)

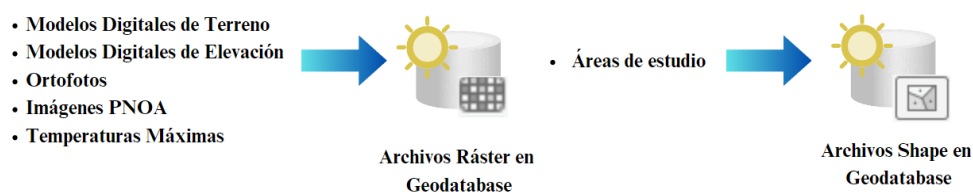


Figura 4. Creación de geodatabases en un nuevo proyecto de ArcGIS pro. Elaboración propia

4.2. Fase II. Creación de variables independientes

4.2.1. Clasificación digital de imágenes espaciales. Variable: Cobertura vegetal

Uno de los alcances de esta investigación radica en la optimización de los recursos implicados con la identificación de micro-refugios climáticos. En este contexto, los sistemas de información geográfica (SIG) y herramientas de teledetección tienen la capacidad de proporcionar datos temáticos y biofísicos detallados acerca del territorio, permitiendo operaciones complejas o que resulten costosas e inaccesibles en campo, facilitando su delimitación inicial mediante procesos digitales.

La categorización de las imágenes es fundamental en la fase inicial de este estudio. Esta elección metodológica se sustenta en un motivo principal: la clasificación de la imagen permite la diferenciación de las áreas con distintos tipos de cobertura vegetal, su distribución espacial y comportamiento. Esta distinción es esencial dado que la identificación de una determinada cobertura viene dada por medir su reflectividad en distintas bandas del espectro, junto a sus propiedades texturales y espaciales. (Chuvieco, 2019). Lo que explicará en gran medida la influencia de las condiciones térmicas locales en correlación con la temperatura. La vinculación de la cobertura vegetal, con las variables climáticas de microhábitats específicos, permiten una identificación más precisa de áreas que podrían albergar condiciones climáticas particulares y ser potenciales micro-refugios climáticos.

Existen diversos métodos para clasificar una imagen, en los que, en principio, cada píxel es asignado a una de las clases temáticas objetivo, etiquetándolo con un solo valor. (Chuvieco, 2019). Tanto los objetivos, el método seleccionado y la metodología para un proyecto de teledetección, resultan clave para facilitar la interpretación de la clasificación de una imagen de manera precisa. Esto implica tomar una serie de decisiones iniciales en función de los objetivos. De acuerdo con Chuvieco, en su libro *Teledetección Ambiental* (2019) y lo aprendido en el Máster de Sistemas de Información Geográfica y Teledetección de la Universidad de Zaragoza se propone el siguiente esquema ajustado del proceso. (Figura 5)

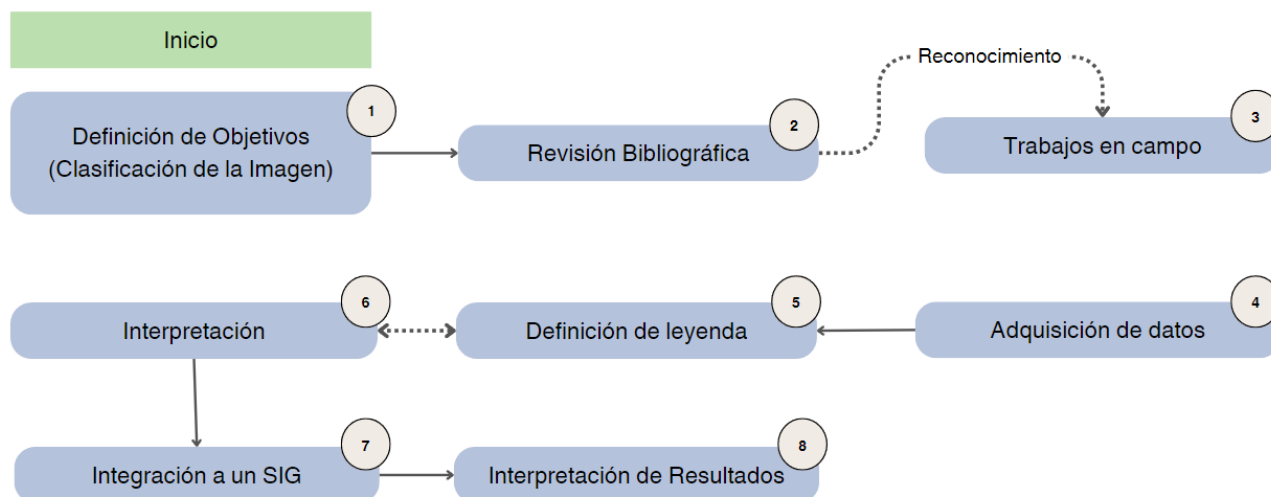


Figura 5. Diagrama de flujo de un proyecto de clasificación de imágenes. Elaboración propia editado de Chuvieco, 2019

1. Esta primera fase de la metodología tiene como objetivo específico: Realizar una clasificación de la cobertura vegetal de las 5 áreas de estudio.
2. Revisión bibliográfica y propuesta del método: En función de la literatura consultada, se optó por caracterizar cada clase en la imagen según la fenología dada por el patrón de variación del índice NDVI. Este índice es utilizado para mejorar la discriminación entre cubiertas que presentan un comportamiento reflectivo muy distinto en las bandas del rango visible, especialmente en la banda rojo (0.6 a 0.7 μm) y el infrarrojo cercano (0.7 a 1.1 μm), la vegetación en condiciones óptimas presentará un contraste significativo entre esas dos bandas resultado de la cantidad de la biomasa foliar verde (Chuvieco, 1996; Chávez y Kwarteng, 1989), ya que está directamente relacionado con la capacidad fotosintética y, por tanto, con la absorción de energía por la cobertura vegetal.

Este fenómeno se atribuye al hecho de que la mayor parte de la radiación solar recibida por la planta en el espectro visible es absorbida por los pigmentos presentes en las hojas. Sin embargo, estos pigmentos apenas afectan la radiación recibida en el infrarrojo cercano, dando lugar a una notoria disparidad entre la baja reflectividad en el espectro visible y la alta reflectividad en el infrarrojo cercano.

En consecuencia, este comportamiento posibilita la diferenciación relativamente sencilla entre la vegetación en buen estado de salud y otras coberturas (Chuvieco, 1996). El valor del NDVI puede variar en función del uso de suelo, estación fenológica, situación hídrica del territorio y ambiente climático de la zona (Chávez y Kwarteng, 1989). la técnica implica efectuar una división la banda del infrarrojo cercano y la de color rojo, como se muestra en la ecuación:

$$NDVI = (IRC - R)/(IRC + R)$$

Las reflexiones espectrales son en sí cocientes de la radiación reflejada sobre la radiación entrante en cada banda espectral individual; por tanto, el NDVI varía entre -1,0 y +1,0. Cuando un árbol es vigoroso, refleja mucha radiación solar en el infrarrojo cercano y poca en el rojo, en consecuencia, se obtiene un NDVI elevado, cercano a 1, en cambio, cuando un árbol está enfermo los valores son cercanos a 0, mientras que valores de NDVI menores a 0 corresponden con cubiertas artificiales, zonas de agua, nubes, rocas, es decir, a clases no vegetales. Utilizar este índice de vegetación para clasificar la imagen, permitirá mejorar la discriminación entre las cubiertas con comportamiento reflectivo distinto y reducir el efecto del relieve.

3. Trabajos en campo: Los trabajos en campo fueron con el objetivo de realizar un análisis visual in situ. Se visitaron las áreas en donde se llevaron a cabo los vuelos con drones en los años 2020 y 2021. Se procedió a la observación detallada de la vegetación existente, el relieve y las condiciones generales de cada área estudiada. La documentación visual de estas observaciones se presenta en las imágenes capturadas durante el año 2023 (Figura. 6)

Cabe destacar que estas visitas de campo fueron planificadas y supervisadas por expertos del Instituto Pirenaico de Ecología, en colaboración con docentes de la Universidad de Zaragoza. La relevancia de visitar el área de estudio radica en la necesidad de familiarizarse con el entorno y adquirir un conocimiento más profundo sobre la composición y dinámica de la vegetación presente.



Figura 6. Fotografías in situ, trabajo de campo análisis visual. Elaboración propia.

4. Adquisición de datos. Las imágenes utilizadas en este estudio corresponden a recortes de los mosaicos de las ortofotos más recientes disponibles en Falso Color Infrarrojo del Plan Nacional de Ortofotos Aérea (PNOA). Estas imágenes fueron adquiridas en formato COG (Cloud Optimized Geotif), para su posterior uso en un sistema SIG. Los datos geoespaciales presentan un sistema de coordenadas proyectadas en ETRS 1989 UTM Zona 30N y una resolución de 25 m. Según los metadatos asociados, la ortofoto fue capturada en agosto del año 2021. Estas imágenes se caracterizan por estar compuestas por la combinación de las bandas 4, 1 y 2 (Infrarrojo, Rojo y Verde) propias para calcular índices de vegetación, mismas que se utilizaron para el análisis del índice NDVI para la clasificación de coberturas, las imágenes obtenidas con referencia a las áreas de interés corresponden a dos mosaicos identificados con los siguientes nombres específicos:

- PNOA-MA-IRG-OF-ETRS89-HU30-H25-0178-1.TIF
- PNOA_MA_IRG_OF_ETRS89_HU30_h25_0146.TIF

Inicialmente, se ha elaborado una cartografía diseñada para la visualización conjunta de las ortofotos adquiridas y las áreas de estudio. Este mapeo constituye la base fundamental para llevar a cabo un análisis visual con propósito de profundizar en el comportamiento ecosistémico y determinar las áreas con estabilidad térmica conforme a la cobertura presente en dichas zonas. La integración del análisis visual y digital en un estudio permitirá una evaluación minuciosa de cada área y su cobertura. La herramienta de análisis visual contempla criterios complejos basados en la intensidad radiométrica de cada píxel en la interpretación de la imagen. Esta aproximación facilita la discriminación de categorías con comportamientos similares. (Chuvieco, 2019). Adicionalmente, este método posibilita la captura de detalles contextuales como el reconocimiento de patrones y una comprensión profunda de la topografía, asimismo, brinda la capacidad de validar la precisión de los resultados digitales identificando posibles errores o discrepancias en los resultados, proporcionando retroalimentación cualitativa.

Esta metodología facilita la identificación de características específicas, como cambios en el uso del suelo, fenómenos naturales o infraestructuras, que podrían resultar difíciles de detectar mediante un análisis digital. La implementación de este análisis en el presente estudio se ha llevado a cabo siguiendo la metodología propuesta por Chuvieco en 2019 haciendo uso de criterios jerárquicos para la interpretación visual. (Véase Figura 7)

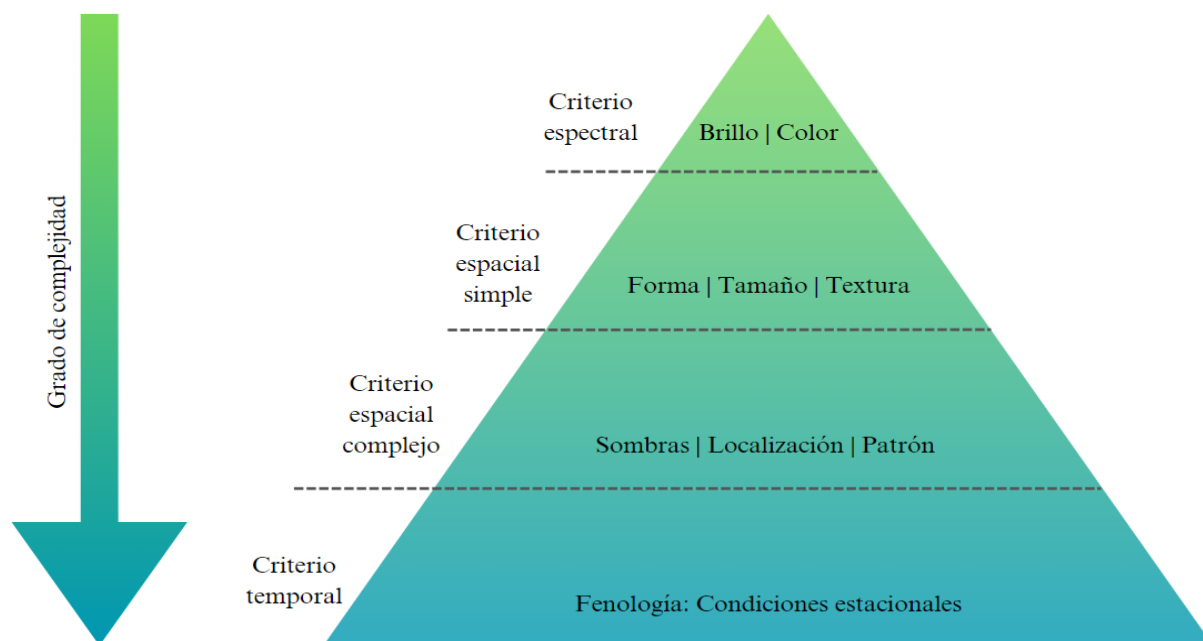


Figura 7. Organización jerárquica de los criterios de interpretación visual. Elaboración propia editado de Chuvieco (2019).

El brillo y el color en ambas imágenes varían en el contraste e intensidad ya que, en una imagen con una combinación de bandas en falso color infrarrojo, las superficies con mayor absorción se verán más brillantes. (CONAE, s.f) esto debido a que, una vegetación vigorosa presentará una baja radiancia en las bandas visibles del espectro, especialmente en azul y rojo, como consecuencia de la alta absorción de luz solar que realizan los pigmentos de la hoja. (Chuvieco, 2019), por lo que una vegetación vigorosa se verá más brillante. El color con esta combinación de bandas, suele presentarse en tonos rojizos, sin embargo variarán en la intensidad del color, el color rojo-magenta, denota vegetación vigorosa, como prados de montaña o bosques en imágenes de verano, recordando que la imagen obtenida del PNOA es del mes de agosto, en las Figuras 8 y 9 es posible apreciar los bosques en tonos rojos brillantes en la parte norte y colores rosados en la parte sur indicando vegetación menos densa, mientras que también es posible apreciar en ambas imágenes, colores blancos indicando áreas de escasa o nula vegetación, arenas, canteras y suelos desnudos. Se observa la ausencia de cuerpos de agua que aparecerían en colores azul oscuro. Las áreas en color negro corresponden a las sombras dadas por la topografía compleja del parque, mismas que serán atenuadas en la clasificación mediante NDVI.

Siguiendo el orden jerárquico del análisis, la textura en ambas imágenes corresponde a las características heterogéneas del parque, es posible apreciar fácilmente las cubiertas a simple vista, por lo que la superficie resulta rugosa o dicho también en una textura media, ya que cada objeto en la imagen comprende entre 0,04 y 2,24 mm² de acuerdo con Chuvieco en 2019. Debido a que las imágenes son de una alta resolución espacial, es sencillo reconocer la forma de los objetos que aparecen como caminos, ríos o las estructuras geológicas pronunciadas y profundas pendientes dadas por la topografía, mismas que aparecen de gran tamaño.

Incrementando la complejidad del análisis espacial, las sombras desempeñan un papel crucial que debe ser cuidadosamente considerado en la interpretación de las coberturas. La variación de las condiciones de iluminación sobre una superficie introduce una variación en la firma espectral, ocasionando que una cobertura exhiba valores de reflectividad significativamente contrastados dependiendo de su ubicación en una vertiente iluminada directamente o en una área sombreada, en ambas imágenes se puede observar una gran cantidad de sombras generadas por el relieve, este fenómeno será reducido mediante la aplicación del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI).

La ausencia de un patrón discernible en ambas imágenes se atribuye a la heterogeneidad del área. Se destacan formaciones del relieve complejo que caracteriza este entorno y que contribuye al gran atractivo del paisaje impulsado por una gran variedad de rocas, principalmente rocas sedimentarias identificables en ambas representaciones visuales en distintas capas y líneas horizontales en diferentes tonos y estratos que generan sombras.

Además, se observan diversos patrones de drenajes y vertientes, aunque carecen de un orden específico. La amalgama de estos elementos geográficos confiere una singularidad a la región, siendo de particular relevancia para el análisis detallado de la estructura y dinámica del paisaje. En virtud de lo expuesto, el presente estudio sugiere la existencia de una considerable cantidad de áreas con temperaturas estables, las cuales podrían considerarse como potenciales refugios climáticos. (Figuras 8 y 9)

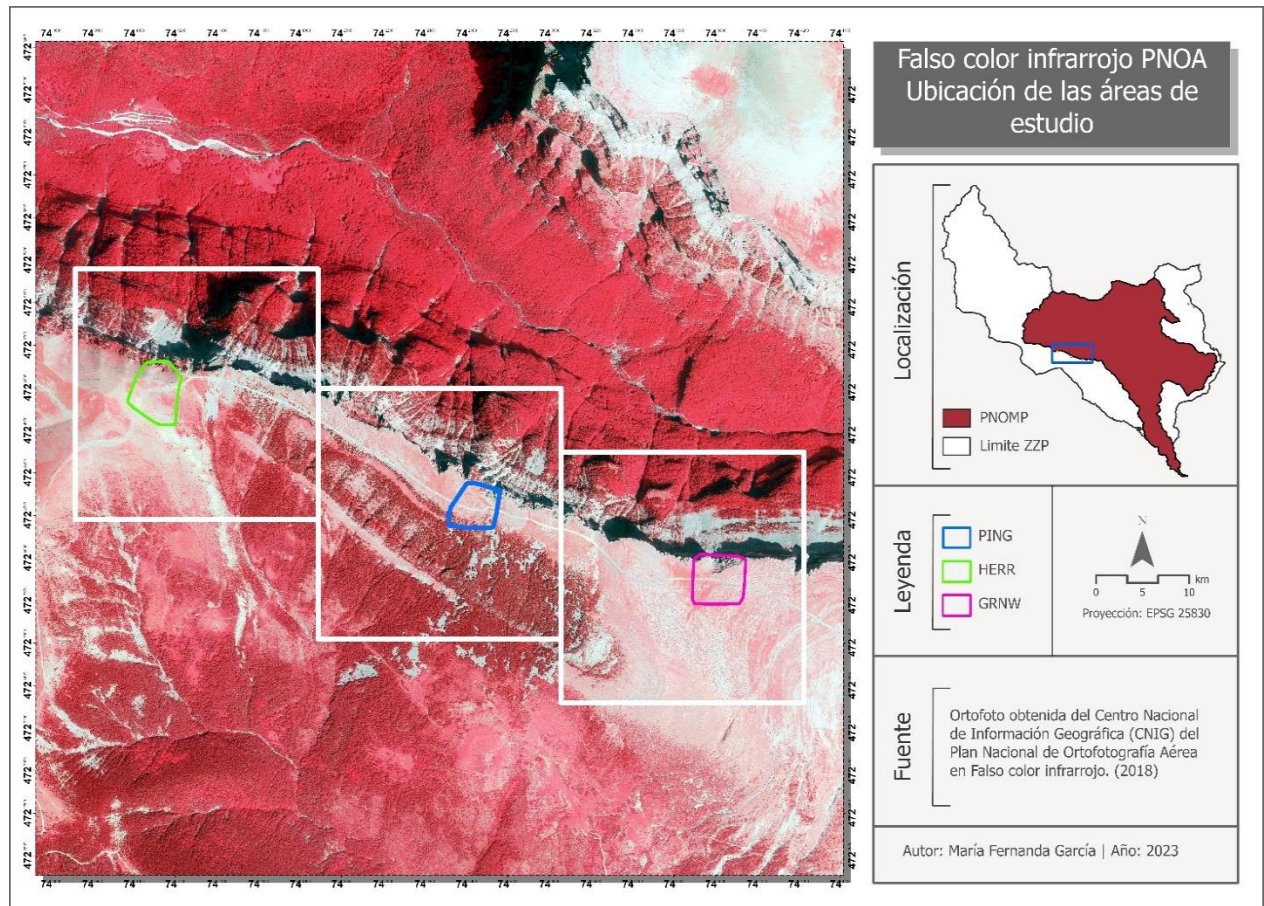


Figura 8. Cartografía de la ubicación de las áreas de estudio PING, HERR y GRNW sobre una imagen en falso color infrarrojo (PNOA). Elaboración propia.

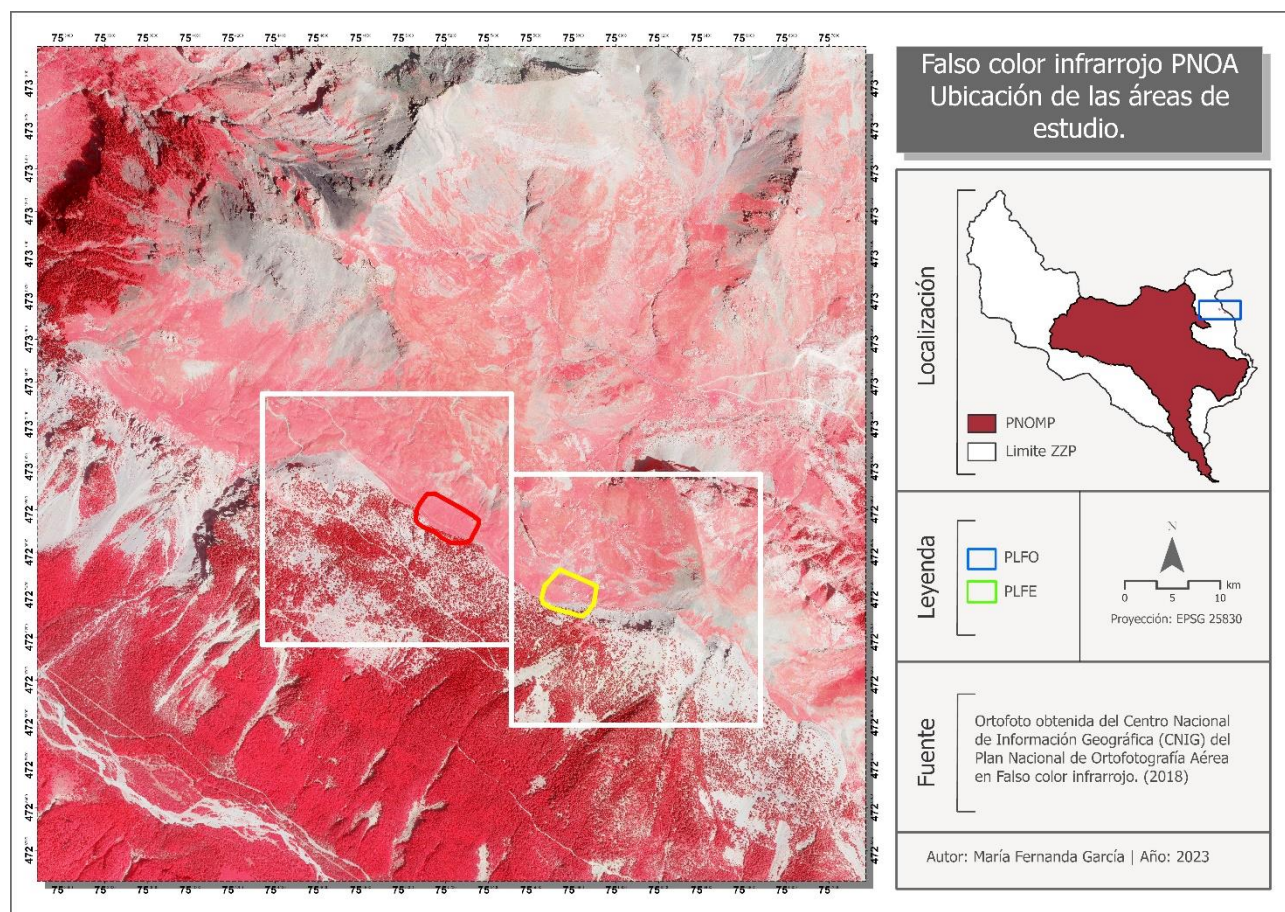


Figura 9. Cartografía de la ubicación de las áreas de estudio PLFO y PLFE sobre una imagen en falso color infrarrojo (PNOA). Elaboración propia.

- Definición de la leyenda. La definición de la leyenda se llevó a cabo mediante la clasificación de los valores en rangos, siguiendo la propuesta NDVI de Vargas (2017) (Figura 6). Este enfoque establece que valores inferiores a 0.1 representarán clases no vegetales, incluyendo ríos, quebradas, lagunas y nubes. Valores entre 0.1 y 0.15 se aginan a áreas tierra desnuda, abarcando tierras degradadas, asentamientos vías y suelos sin cobertura vegetal. Asimismo, los valores de 0.15 a 0.25 se consideran representativos de vegetación dispersa comprendiendo tierras cultivadas, herbazales arbustos y pastizales. Por otro lado, valores entre 0.24 y 0.40 indican vegetación más densa o bosques.





No obstante, debido a la variabilidad de los valores específicos en función de las condiciones locales, se realizaron ajustes en los valores de NDVI de acuerdo con las observaciones derivadas en el análisis visual y de estadísticas totales de las áreas de estudio (Tabla 2). Mismos que se explican a mayor detalle en el punto 6.

Tabla 2. Estadísticas de los valores de NDVI de las áreas de estudio.

| Áreas de estudio | Valor Mínimo | Valor Máximo | Valor Medio |
|------------------|--------------|--------------|-------------|
| PLFO | -0.01 | 0.81 | 0.30 |
| PLFE | -0.02 | 0.77 | 0.21 |
| GRNW | -0.01 | 0.74 | 0.15 |
| HERR | -0.01 | 0.92 | 0.13 |
| PING | -0.02 | 0.77 | 0.18 |
| Promedio | -0.01 | 0.80 | 0.19 |

La leyenda final se estructuró en cuatro (4) clases; estas son: (1) Suelo expuesto: Cobertura vegetal ausente y rocas. (NDVI 0 – 0.1). (2) Pastos secos: Cobertura vegetal baja; pastizales herbazales y vegetación escasa (NDVI 0.1 – 0.3). (3) Cobertura Vegetal media: Pastos húmedos, plantas en crecimiento y arbustos (NDVI 0.23 – 0.45). (5) Bosque: plantas densas en crecimiento, (NDVI 0.45 – 1.0). Los valores positivos más altos del NDVI asociados a la mayor densidad de cobertura vegetal, y los valores positivos más bajos fueron asociados a la menor densidad de cobertura vegetal y superficies expuestas. (Tabla 3.)

Tabla 3. Rangos de clasificación para las coberturas con relación al valor de NDVI.

| Categoría | Rango | Tipo | Descripción | Imagen |
|-----------|-------------|---------------------|---|---|
| 1 | 0 – 0.1 | Suelos y roca | Cobertura vegetal ausente: Piedras, gleras, tierras degradadas y suelos expuestos o con impacto antropogénico. |  |
| 2 | 0.1 - 0.23 | Pastos secos | Cobertura vegetal baja: Pastos, herbazales y vegetación escasa. |  |
| 3 | 0.23 - 0.45 | Vegetación Vigorosa | Cobertura vegetal media: Pastos húmedos, plantas en crecimiento y arbustos. |  |
| 4 | 0.45 - 1 | Bosques | Cobertura vegetal alta: Vegetación densa y bosques. |  |

6. Integración a un SIG: El Índice de Vegetación Normalizada NDVI se calculó para cada escena. Para realizar la clasificación se utilizó la herramienta NDVI de ArcGIS Pro, siguiendo el proceso explicado en el siguiente diagrama (Figura 10):

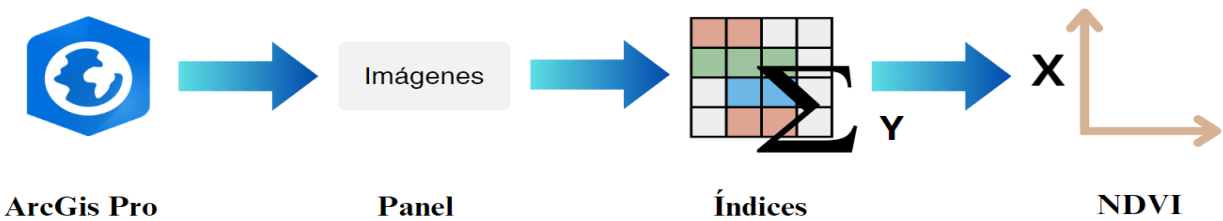


Figura 10. Diagrama de flujo, de herramienta NDVI ArcGIS Pro. Elaboración propia.

4.2.2. Estimación de radiación solar de áreas en imágenes espaciales. Variable: Radiación solar de áreas

Para la obtención de la variable Radiación Solar se utilizó la herramienta *Solar Analyst* (Radiación Solar de Áreas) de ArcGIS Pro desarrollada por Fu P. y Rich P.M (2000). Este geoproceto calcula la insolación integrada de un área en cualquier período de tiempo teniendo en cuenta la latitud, el día del año, la elevación, la pendiente, la orientación, las ocultaciones debidas a la topografía circundante, los cambios diarios y estacionales del ángulo del sol. Además, incorpora efectos de sombras proyectadas por la topografía circundante y la atenuación atmosférica basada en métodos de algoritmo de cuenca visual hemisférica, (Fu & Rich, 2000) utilizando la información de los niveles digitales de un Modelo Digital de Elevaciones (MDE).

El algoritmo contempla la trayectoria solar a lo largo del día, la distancia Tierra-Sol, la extinción atmosférica, los ángulos de incidencia en cada punto y los ocultamientos topográficos. La herramienta realiza la suma de todos los sectores del mapa solar y mapa del cielo, respectivamente, de la radiación directa (sin cambios de dirección) y la radiación difusa (proveniente de múltiples direcciones debido a la dispersión atmosférica). La ecuación para la radiación total es expresada como:

$$Global_{tot} = Dir_{tot} + Dif_{tot}$$

Dónde, la Radiación directa (Dir_{tot}) es la suma de la insolación directa de todos los sectores del mapa solar la Radiación Difusa (Dif_{tot}) es la suma de la radiación solar difusa de todos los sectores del mapa del cielo.

El cálculo de la radiación directa incluye factores la constante solar (1.367 W/m^2), la transmisividad atmosférica para la ruta más corta, la longitud de ruta óptica relativa, la duración de tiempo representada por el sector del cielo, la fracción de espacio para el sector del mapa solar, el ángulo de incidencia entre el centroide del sector del cielo y el eje normal para la superficie.

La Radiación difusa, por otro lado, se calcula considerando la radiación solar difusa normal, la proporción del flujo de radiación global normal difundido (aproximadamente de 0,2 para condiciones de cielo muy claro y de 0,7 para condiciones de cielo muy nublado), el intervalo de tiempo, la proporción de cielo visible, la proporción de radiación difusa que se origina en un determinado sector del cielo relacionada con todos los sectores y el ángulo de incidencia entre el centroide del sector del cielo y la superficie interceptora.

Lo anterior, se resume en cuatro pasos: El cálculo de una cuenca visual hemisférica que mira hacia arriba basada en la topografía circundante, la superposición de la cuenca visual en un mapa solar directo para calcular la radiación directa, la superposición de la cuenca visual en un mapa celeste difuso para calcular la radiación difusa y el cuarto implica en la repetición de este proceso por cada ubicación para obtener un mapa de insolación. La herramienta de Solar Analyst de ArcGIS Pro ejecuta este procedimiento para cada punto del Modelo Digital de Elevaciones (MDE) de manera automática, prescindiendo así de realizar esos pasos.

Se generaron dos rásteres de Radiación Global, expresada en vatios-hora por metro cuadrado (WH/m^2), para áreas específicas. El primero de estos rásteres evalúa la radiación por hora de vuelo, lo cual implica la especificación precisa de los momentos de inicio y finalización del vuelo. El segundo ráster, por su parte, calcula la radiación acumulada desde las 0 horas hasta el término de la hora de vuelo. La determinación del valor medio de la latitud se llevó a cabo de manera automática mediante el Modelo Digital del Terreno (MDE) de entrada, al igual que los cálculos relacionados con la pendiente y la orientación.

El tamaño del cielo, fundamentado en los gráficos celestes, consistió en 2000 celdas, una elección considerada ideal para intervalos de 0.25 días.

El factor z se mantuvo en 1, dado que las unidades de medida en las tres dimensiones son homogéneas gracias que el sistema de coordenadas proyectadas con unidades, son expresadas en metros. El número de divisiones del azimut fue establecido en 32, cantidad que, como se ha mencionado previamente, se considera la más apropiada para topografías complejas. La configuración de los parámetros de radiación se ajustó conforme a los gráficos solares, tomando en cuenta que las divisiones del cenit fueron fijadas en 8, mientras que aquellas del azimut se adecuaron a 16. Las condiciones atmosféricas fueron asumidas como estándar, caracterizadas por cielos despejados y ausencia de nubes.

Dada la limitada disponibilidad de estaciones meteorológicas que registran cuantitativamente la cobertura nubosa, se optó por presentar los resultados sin incorporar este factor, considerando además el bajo porcentaje de nubosidad que oscila alrededor del 20% en condiciones soleadas en el Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido. En consecuencia, el modelo implementado se basó en la variación del flujo de radiación difusa entrante en función del ángulo del cenit. Se realizaron ajustes específicos para los valores de proporción difusa (0.2) y transmisividad (0.6) en condiciones de cielo despejado.

Los parámetros fundamentales, como el día juliano y la hora de vuelo, fueron obtenidos de un estudio previo realizado en el año 2020 (Hoffrén & García, 2023). En la Tabla 4 se detallan el azimut y la elevación de la posición del sol, proporcionando una base sólida para la replicación y verificación de los resultados obtenidos.

Tabla 4. Día, hora y posición solar del día de vuelo.

| VERANO 2020 | | | | | | |
|-------------|------------|-----|-------|-------|--------|-------|
| ÁREAS | FECHA | DIA | HORA | GTM + | AZIMUT | ELEV. |
| PING | 31/07/2020 | 213 | 14:45 | 2 | 201.4 | 64.29 |
| GRNW | 31/07/2020 | 213 | 14:00 | 2 | 176.04 | 65.59 |
| HERR | 20/08/2020 | 232 | 15:30 | 2 | 218.15 | 54.46 |
| PLFE | 01/08/2020 | 214 | 15:15 | 2 | 218.39 | 54.35 |
| PLFO | 01/08/2020 | 214 | 14:30 | 2 | 192.94 | 59.18 |

Dada la considerable influencia que el Modelo Digital del Terreno (MDT) ejerce en la estimación de los valores de radiación, surge la imperante necesidad de analizar la resolución más apropiada para lograr una integración idónea entre los valores de radiación obtenidos y las mediciones de la variable temperatura. En virtud de ello, una vez generados los rásteres de Radiación, se procedió a llevar a cabo un proceso de remuestreo.

La dimensión de la celda de salida se determinó a partir de un conjunto de datos previamente elaborado, derivado de los rásteres de Temperaturas Máximas que ostentan una resolución de 0.03 metros. En este contexto, se optó por la implementación de la técnica de remuestreo bilineal, considerada la más idónea para la interpolación de datos continuos. Este enfoque responde a la necesidad de preservar la integridad de la información en el contexto de un estudio de alta precisión, donde la selección de la resolución y la técnica de remuestreo son críticas para garantizar la coherencia y fiabilidad de los resultados obtenidos.

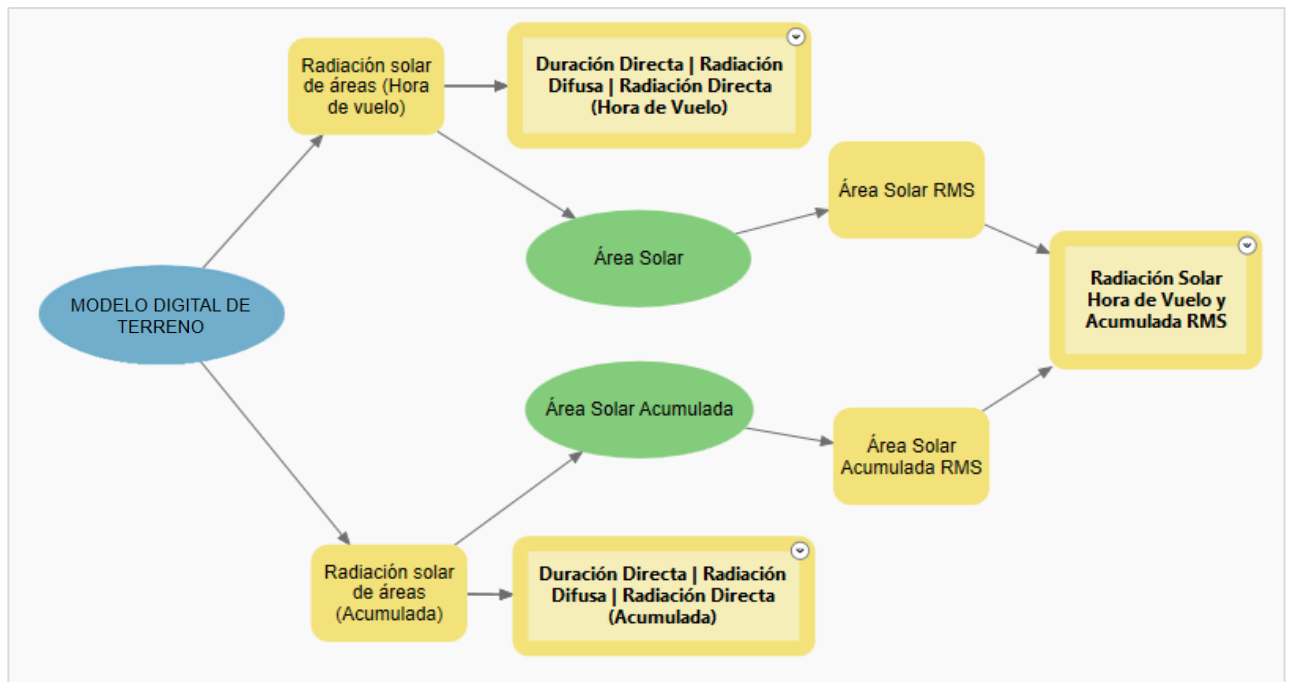


Figura 11. Modelo de ejecución de la herramienta radiación solar. Elaboración propia.

4.2.3. Parámetros de superficie: Variables topográficas

Los Modelos Digitales de Terreno (MDT) constituyen una herramienta invaluable para la obtención de información esencial acerca de la topografía. Las características topográficas, tales como la pendiente del terreno y la orientación de las laderas, representan factores determinantes cruciales para la configuración de microclimas. En esta sección metodológica, se investigó con detenimiento la aplicación de la herramienta de "Parámetros de Superficie" en el entorno de ArcGIS Pro, explorando su capacidad para analizar y cuantificar las características clave de la topografía. Asimismo, para abordar la variable de rugosidad, se implementó un método adicional, el cual será detalladamente explicado en secciones subsiguientes de este documento.

Orientación

Dada la influencia significativa que ejerce la orientación de la ladera en la modificación de las condiciones microclimáticas de los entornos, la disponibilidad de agua se ve determinada, entre otros factores, por el impacto de la orientación de laderas. (López-Gómez et al., 2012). En el hemisferio norte, se observa que las laderas orientadas al sur reciben una mayor radiación solar, casi seis veces más intensa que sus contrapartes orientadas al norte. (Auslander et al., 2003)

Esta disparidad en la radiación se traduce en laderas con exposición norte que son más propensas a mantener condiciones más húmedas en comparación con aquellas orientadas al sur (Nobel, 1982; González-Hidalgo et al., 1996; del Castillo, 2000; Valverde-Padilla, 2002; Auslander et al., 2003; Mazzola et al., 2008).

En entornos caracterizados por déficit hídrico, la orientación de la ladera emerge como un factor crucial que impacta las condiciones ambientales, desempeñando, por ende, un papel determinante en el desarrollo y la estructura de las comunidades vegetales (Carter & Klinka, 1990; del Castillo, 2000). La consideración de esta variable se presenta como imperativa en el contexto de este análisis.

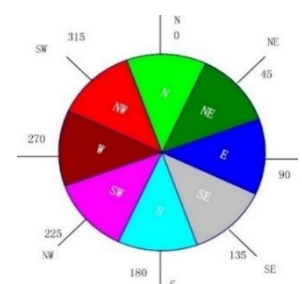


Figura 12. Direcciones de Orientación (brújula).

La Herramienta de Parámetros de Superficie en ArcGIS Pro alberga el parámetro denominado "Orientación", cuya finalidad reside en determinar la dirección de la pendiente descendente en una topografía dada. Los valores asignados a cada celda del ráster resultante indican la orientación cardinal de la superficie en esa ubicación específica, expresada en grados en sentido horario, desde 0 (apuntando al norte) hasta 360 (retornando al norte), completando así un círculo completo. Aquellas áreas que presentan una topografía plana y carecen de dirección de pendiente descendente se representan con un valor de -1 (Figura 12).

En términos sencillos, se calculó la dirección de la pendiente descendente como la tasa máxima de cambio en cada celda. Se optó por una función de superficie bicuadrática, idónea para modelar superficies altamente precisas, ya que ajusta los datos de las celdas vecinas de manera exacta.

La elección de una distancia de vecindad de 2 metros se basó en la resolución de 1 metro de los Modelos Digitales del Terreno, siendo tamaños de ventana más amplios útiles para datos de elevación de alta resolución al capturar procesos de superficie del suelo a una escala apropiada. En situaciones con datos de elevación de alta resolución, distancias mayores resultan más adecuadas. Se realizaron múltiples pruebas con diferentes distancias para la selección óptima.



Figura 13. Direcciones de orientación (leyenda).
Elaboración propia a partir de ArcGIS Pro.

El resultado es un ráster de salida por área con una leyenda extendida en unidades de grados (Figura 13), por lo que se procedió a modificar la simbología de acuerdo con los rangos para identificar y etiquetar las laderas de manera sencilla en la cartografía creada.

Pendientes

La pendiente por otro lado se refiere a la inclinación o declive de un terreno en una dirección específica. Es una medida de cuánto cambia la elevación en relación con la distancia horizontal. La pendiente se expresa comúnmente como un porcentaje o en grados, para efectos del presente estudio, se ha optado por obtener los valores en grados, esta información se utilizará más adelante para la variable de rugosidad. El parámetro pendiente en la herramienta Parámetros de Superficie identifica la inclinación en cada celda de una superficie de ráster. Mientras menor sea el valor de la pendiente, más plano será el terreno; mientras más alto sea el valor de la pendiente, más empinado será el terreno. Al igual que en orientación, se optó por seleccionar la misma configuración, en dónde el tipo de superficie se ajustó a la opción bicuadrática, 2 metros en distancia de vecindad para mejorar la visualización en la cartografía creada distancia desde el centro de la celda de destino.

Curvatura Media

La variable "curvatura media" desempeña un papel crítico en la configuración de micro-refugios climáticos debido a su impacto en las condiciones de drenaje, la modificación de microclimas, la formación de nichos ecológicos y la diversidad del paisaje. La información proporcionada por la curvatura media sobre la forma general de la superficie contribuye a la comprensión de cómo el agua se mueve en el terreno, afectando la retención y disponibilidad de agua local.

Además, la presencia de áreas cóncavas y convexas en la topografía genera una diversidad de condiciones ambientales en un área limitada, favoreciendo la formación de microhábitats. Se medirá la curvatura general de la superficie. Se calcula como la media de las curvaturas mínima y máxima. Esta curvatura describe las áreas de denudación y acumulación máximas, independientemente de la dirección o la influencia de la gravedad.

La curvatura es la tasa de cambio en la pendiente, depende de las derivadas de segundo grado de la altitud, es decir, de los cambios dependiente en el entorno del punto. La curvatura tiene especial interés como variable influyen en fenómenos como la escorrentía superficial, canalización de aludes, erosión y flujos en general.

Rugosidad

La variable de rugosidad refleja lo escarpado del relieve, proporcionando una caracterización de su complejidad. Terrenos con mayor ondulación o escarpados presentan valores más altos de rugosidad. Estos valores elevados indican una superficie irregular, mientras que valores bajos sugieren un relieve más suave.

La rugosidad, como variable geomorfológica, no está incluida entre las opciones de "Parámetros de Superficie". Según la revisión bibliográfica realizada, no existe un método único para calcular la rugosidad. Una aproximación diferente, propuesta por Hobson en 1972, consiste en calcular vectores unitarios perpendiculares a la superficie en un punto del terreno y en los puntos circundantes. En terrenos uniformes, la suma vectorial es elevada y la dispersión baja; sin embargo, en terrenos rugosos con cambios en orientaciones y pendientes, la suma vectorial es pequeña y la dispersión elevada (Cepeda et al., 2007).

Siguiendo este método, los ráster de pendiente local y orientación, generados en pasos anteriores, fueron convertidos de grados a radianes mediante la multiplicación del ráster de entrada por la constante 0.01745. Posteriormente, se obtuvieron los senos y cosenos respectivamente, calculando las coordenadas rectangulares del vector unitario normal. Este proceso fue realizado en el Model Builder de ArcGIS Pro (Figura 14)

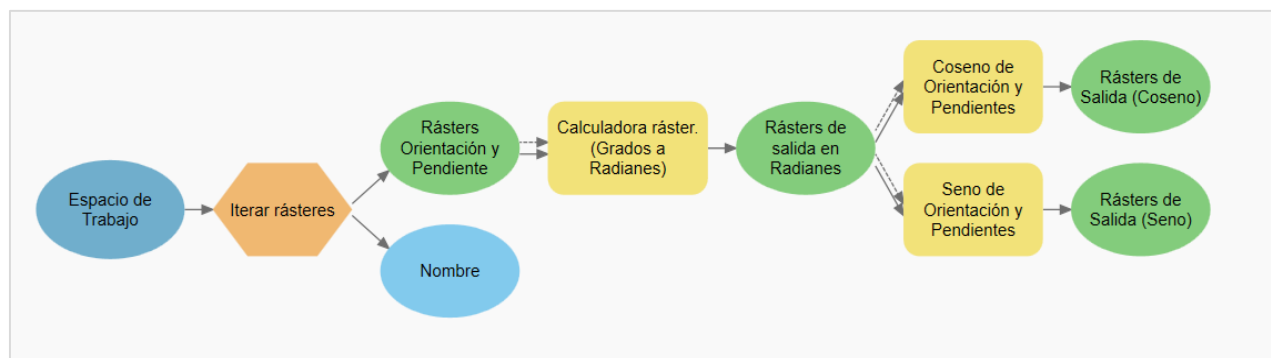


Figura 14. Direcciones de orientación (leyenda). Elaboración propia.

Una vez obtenidos los senos y cosenos de las variables pendiente y orientación por cada área, se calcularon las coordenadas rectangulares del vector unitario normal mediante las ecuaciones (Figura 15):

$$\begin{aligned}
 x &= \sin(\text{pendiente}) \times \cos(\text{Orientación}) \\
 y &= \sin(\text{pendiente}) \times \sin(\text{Orientación}) \\
 z &= \cos(\text{pendiente})
 \end{aligned}$$

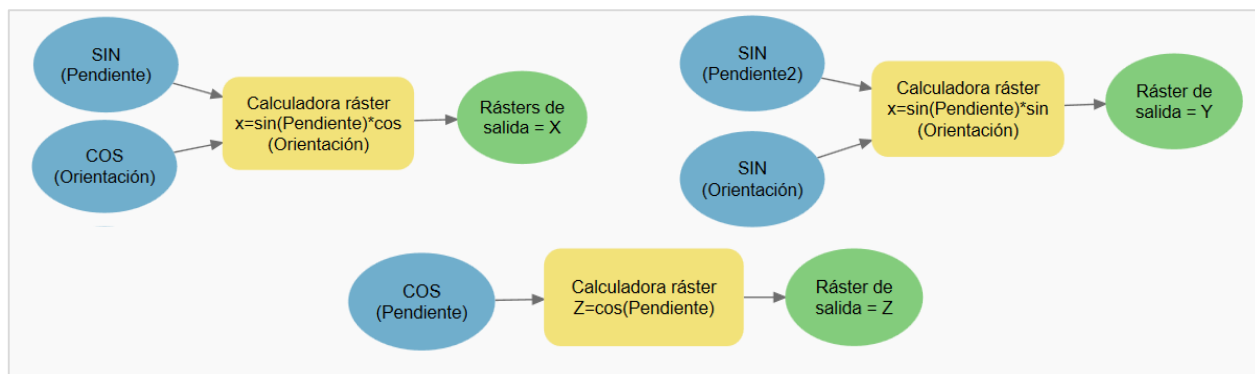


Figura 15. Modelo de ejecución para variable Rugosidad. Elaboración propia

Los raster resultantes, denominados X, Y y Z, fueron sometidos a un filtro de paso bajo de 3 por 3, suavizando el conjunto y reduciendo la importancia de las celdas anómalas. Estos raster filtrados se utilizaron para calcular el módulo del vector suma de los vectores unitarios, denominado rugosidad (R), mediante la ecuación:

$$R = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$$

Se utilizó la calculadora raster ingresando la siguiente expresión por cada una de las áreas:

$$\text{SquareRoot}((\text{"Filter_grnw_X"} * \text{"Filter_grnw_X"}) + (\text{"Filter_grnw_Y"} * \text{"Filter_grnw_Y"}) + (\text{"Filter_grnw_Z"} * \text{"Filter_grnw_Z"}))$$

Posteriormente, los mapas de rugosidad obtenidos fueron utilizados para la generación de cartografía, cálculos y análisis.

4.3. Fase III. Variable dependiente: Temperatura

La información relativa a la variable temperatura se obtuvo a partir de los vuelos llevados a cabo en el marco del estudio titulado "Identificación de refugios climáticos para la biodiversidad en los Pirineos mediante modelos topoclimáticos de alta resolución a partir de sensores térmicos", realizado en el año 2020. (Hoffrén & García, 2023) En este estudio, se utilizaron vuelos con un vehículo aéreo no tripulado (UAV) equipado con un sensor térmico para recopilar datos de temperaturas máximas en días de máximo calor, representados por los meses de julio y agosto (Tabla 5). Dichos datos fueron obtenidos a una resolución espacial de 0.03 m.

Tabla 5. Valores mínimos, máximos y medios de la variable temperatura.

| Áreas de estudio | Temperaturas (Tmax) | | |
|------------------|---------------------|--------------|-------------|
| | Valor Mínimo | Valor Máximo | Valor Medio |
| PLFO | 17.55 | 44.92 | 26.6 |
| PLFE | 15.30 | 46.92 | 27.54 |
| GRNW | 12.51 | 45.56 | 31.34 |
| HERR | 10.33 | 35.89 | 25.41 |
| PING | 14.20 | 46.88 | 29.34 |
| Promedio | 13.978 | 44.03 | 28.43 |

Las imágenes resultantes de dicho estudio fueron convertidas de formato raster a puntos. Posteriormente, se procedió a seleccionar las temperaturas más bajas registradas con un rango de 15 a 20 grados, las cuales fueron exportadas como nuevas tablas con el fin de representarlas cartográficamente en los resultados del presente trabajo y realizar el análisis correlacional con las variables creadas.

4.4. Fase IV. Análisis correlacional

El análisis correlacional se realizó en ArcGIS Pro con las herramientas de gráficos, los cuales tienen la opción de crear diagramas de dispersión para dos o más variables provenientes de las tablas creadas a partir de los ráster de todas las variables, para reducir la dimensión de los datos se crearon puntos aleatorios de los que se extrajo la información y se utilizó la herramienta “extraer valores múltiples a puntos” para crear las tablas con la información de todas las variables de cada área. (Figura 16)

El análisis de correlación consiste en un procedimiento estadístico para determinar si dos variables están relacionadas o no. El resultado del análisis es un coeficiente de correlación que puede tomar valores entre -1 y +1. El signo indica el tipo de correlación entre las dos variables. Un signo positivo indica que existe una relación positiva entre las dos variables; es decir, cuando la magnitud de una incrementa, la otra también. Un signo negativo indica que existe una relación negativa entre las dos variables. Mientras los valores de una incrementan, los de la segunda variable disminuyen. Si dos variables son independientes, el coeficiente de correlación es de magnitud cero. La fuerza de la relación lineal incrementa a medida que el coeficiente de correlación se aproxima a -1 o a +1.

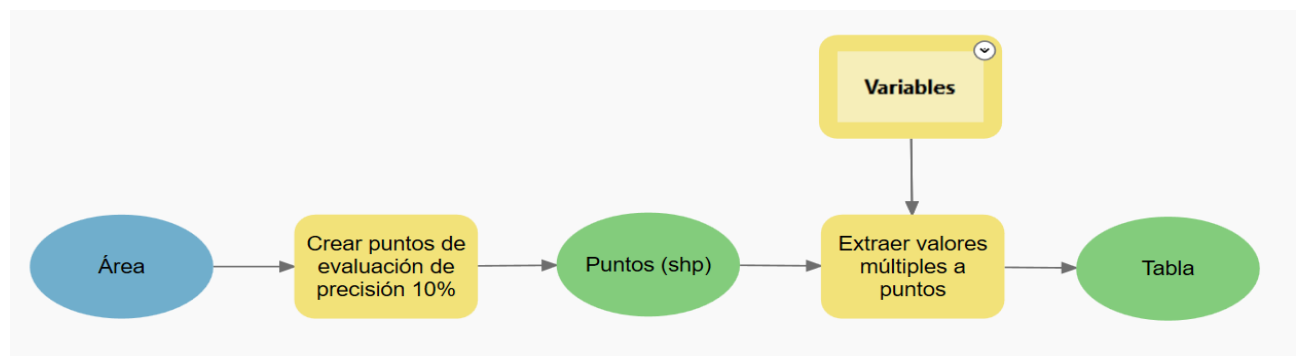


Figura 16. Modelo de creación de puntos y tablas. Elaboración propia.

4.5. Fase V. Análisis de regresión

La Fase V del presente estudio involucró una exhaustiva revisión bibliográfica con el propósito de seleccionar el método de regresión más adecuado para derivar una ecuación predictiva que permitiera estimar las temperaturas mínimas durante los días de mayor calor. Se utilizó una regresión lineal múltiple que permitiera la integración de distintas variables.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La presente sección aborda la presentación integral de los resultados obtenidos a través de la metodología de cinco fases descritas anteriormente. A diferencia de la presentación secuencial por fases, en esta sección se analizan y discuten de manera conjunta los hallazgos relacionados con la creación y análisis de variables, así como los resultados derivados de los análisis estadísticos y geoespaciales realizados. Esta aproximación integral permite una comprensión más completa de la relación entre las variables investigadas y facilita la discusión sobre su relevancia en el contexto del estudio.

5.1. Cobertura vegetal (NDVI)

El análisis visual previo de las imágenes en Falso Color Infrarrojo desempeñó un papel fundamental en el proceso de ajuste de los valores del histograma. La observación visual de la imagen brindó la oportunidad de discernir áreas de interés, como regiones con vegetación densa, puntos críticos de degradación, zonas de transición entre distintas coberturas y áreas sombreadas, por lo que con la herramienta de histograma en simbología de ArcGIS Pro se ajustó varias veces buscando los rangos adecuados. (Figura 17)

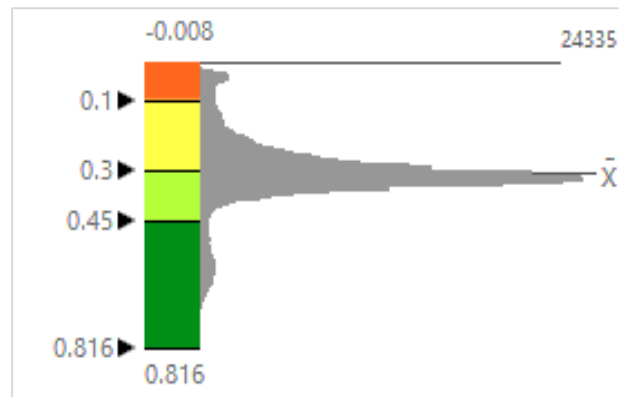


Figura 17. Ajuste de histograma en simbología ArcGIS Pro. Elaboración propia.

Las cartografías representadas en las Figuras 18 y 19, proporcionan una representación visual del Índice NDVI en cada área de estudio. Esta representación no solo enriquece la comprensión de los patrones de vegetación del Parque, sino que también contribuye a una evaluación más precisa de la distribución espacial de las diferentes clases de cobertura vegetal y permitirá más adelante realizar un análisis del comportamiento térmico con relación a la Radiación Solar.

Los valores de NDVI se encuentran en un rango entre 0 y 0.81, siendo en su mayoría valores alrededor de 0.2 indicando un nivel bajo de vigorosidad, esto es de esperar dado que corresponde a una zona abierta con pocos bosques y en su mayoría pastos secos que corresponden a las condiciones de verano. Para facilitar la observación y la diferencia entre las coberturas, la cartografía se acompaña de la ortofoto obtenida del PNOA Máxima actualidad obtenida del centro de descargas CNIG. Finalmente, se llevó a cabo un proceso de conversión mediante la técnica de geoprocresamiento denominada "Ráster a Punto". Este procedimiento resultó en la creación de una nueva capa de puntos que contiene una tabla con los valores de Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) asociados a cada píxel. Posteriormente, la tabla fue editada para incluir una nueva columna. A través de la herramienta "Selección por Atributos", se identificaron y seleccionaron los rangos predefinidos. Luego, utilizando la herramienta "Calcular Campo", se asignaron las categorías correspondientes según la leyenda establecida. La tabla resultante se utilizó para los análisis correlacionales por tipo de cobertura.

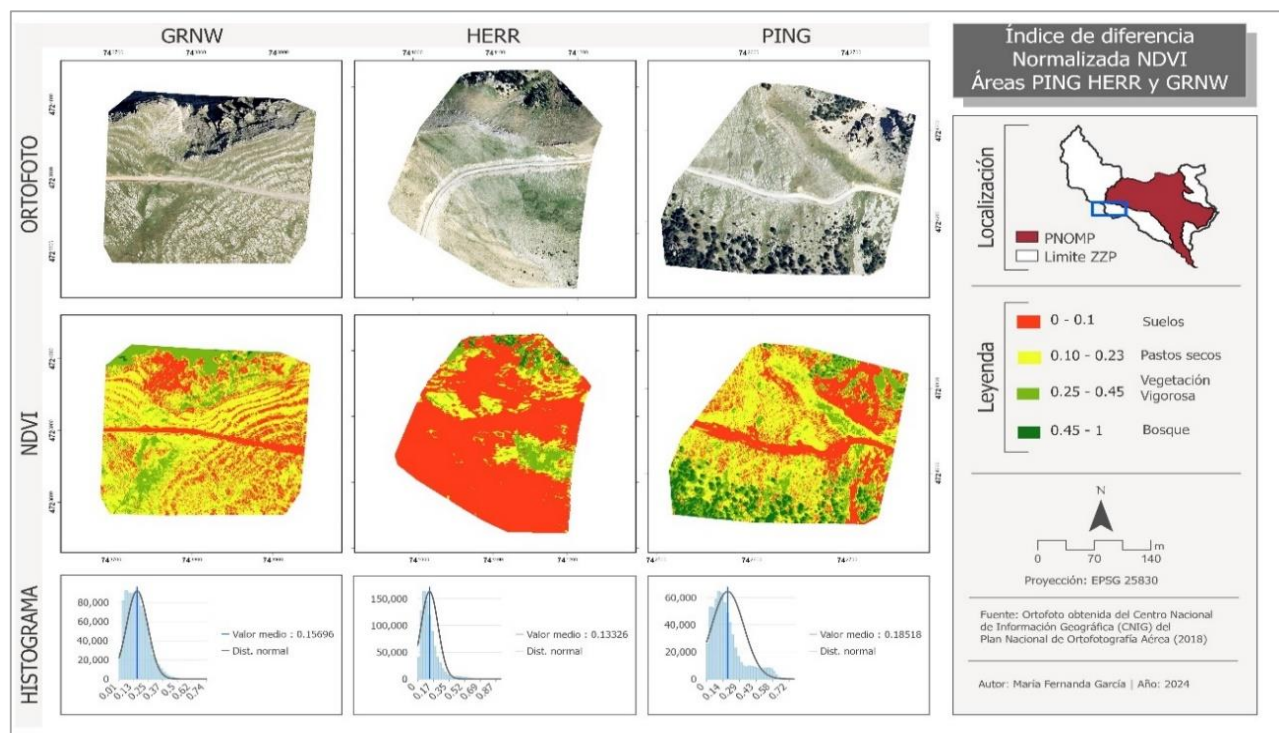


Figura 18. Cartografía del índice de vegetación normalizada NDVI Áreas PING HERR y GRNW. Elaboración propia.

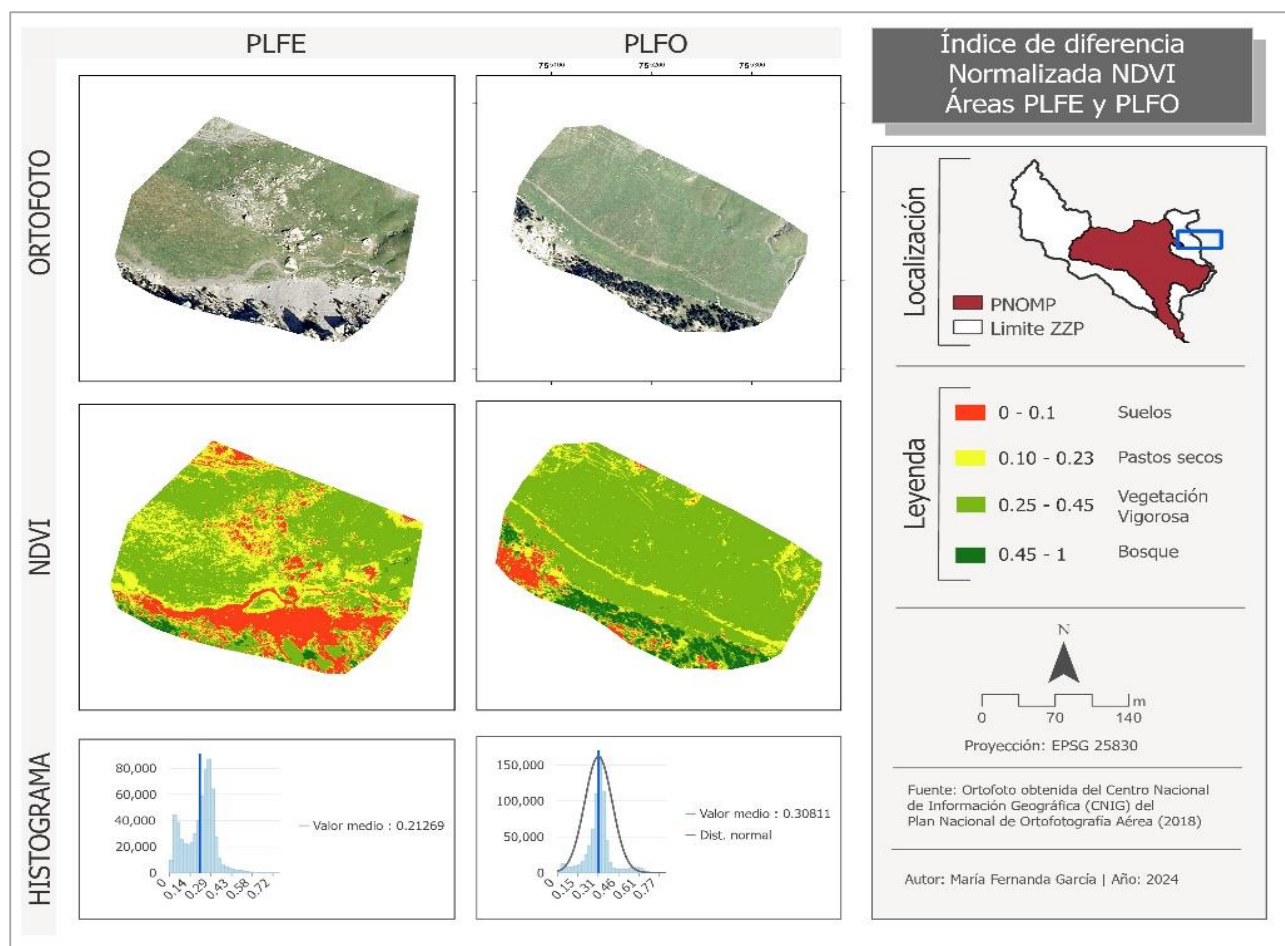


Figura 19. Cartografía del índice de vegetación normalizada NDVI Áreas PLFE y PLFO. Elaboración propia.

A través de la comparación entre los mapas clasificados y las ortofotos presentadas en la cartografía, se ha podido identificar con precisión las distintas coberturas encontradas en cada área. Los resultados revelan que las áreas con valores más altos de clasificación corresponden principalmente a bosques, con un rango de 0.45 a 1, mientras que las áreas con valores más bajos, entre 0 y 0.1, se asocian con suelos expuestos y rocas. Sin embargo, se han observado valores de "vegetación vigorosa" (en un rango de 0.25 a 0.45) en zonas específicas con topografía compleja. Estas áreas adquieren una relevancia particular en el contexto de este estudio, ya que se aproximan al objetivo de identificar micro-refugios climáticos que no estén necesariamente cubiertos por bosques. Por consiguiente, como estrategia para avanzar hacia la identificación de estos espacios, se ha realizado una selección rigurosa de los rangos más altos de NDVI, eliminando la clasificación de bosques en las tablas que contienen todas las variables.

Resulta crucial destacar la significativa influencia de la variable NDVI en el proceso de clasificación de imágenes y su correlación con la temperatura, dado que constituye un componente fundamental para la realización de un análisis de datos objetivo. Conforme lo planteado por Chuvieco (2019), el NDVI se encuentra directamente vinculado con una serie de parámetros biológicos y ecológicos, tales como el contenido de clorofila en las hojas, la humedad del suelo, el intercambio neto de CO₂, la radiación fotosintética, la productividad neta, el vigor y la transpiración de la vegetación. De este modo, la presencia de temperaturas mínimas en áreas de suelo y roca puede explicarse mediante la información relativa a la vegetación presente en dichas coberturas, la cual puede ser inferida a través del NDVI. Esta relación se evidencia en las representaciones 3D de las ortofotos de cada área, donde se han superpuesto las temperaturas mínimas registradas en días de máximo calor, situadas en un rango de 15 a 20 grados Celsius, con el propósito de efectuar una comparativa visual de las distintas coberturas. Dichas representaciones permiten observar las temperaturas mínimas generadas tanto por las condiciones boscosas y la vegetación vigorosa, así como también en áreas reducidas caracterizadas por una topografía compleja. (Figuras 20 y 21)

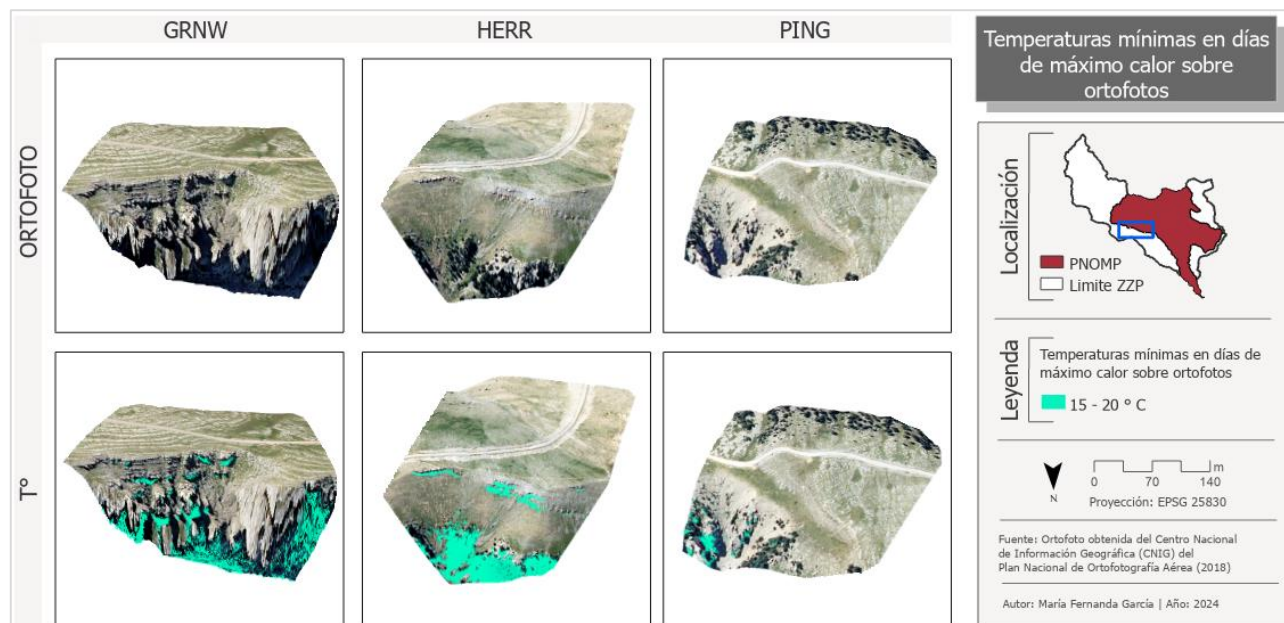


Figura 20. Cartografía en representación en 3D de temperaturas mínimas superpuestas en Ortofotos en Áreas GRNW, HERR y PING. Elaboración propia.

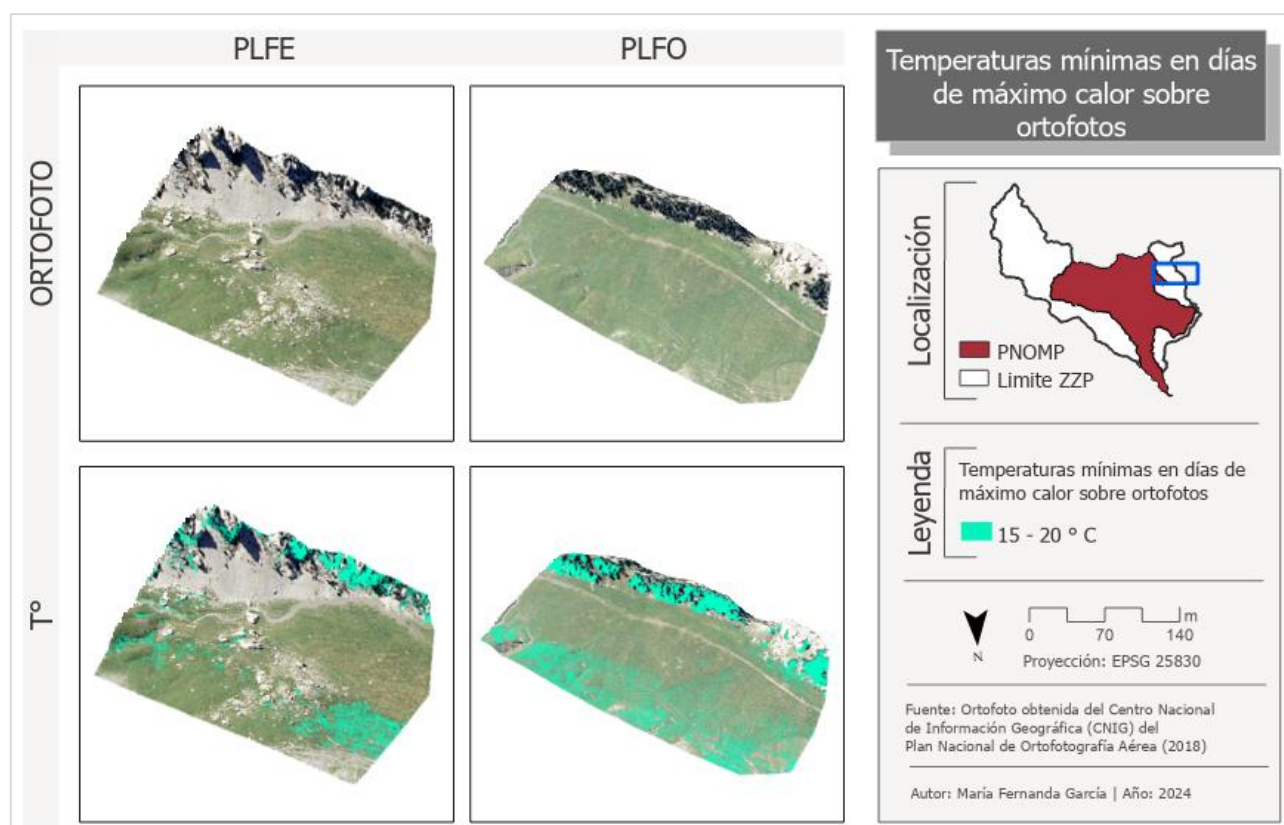


Figura 21. Cartografía de representación en 3D de temperaturas mínimas superpuestas en Ortofotos en Áreas PLFE Y PLFO. Elaboración propia.

En un enfoque cuantitativo, se procedió a la elaboración de diagramas de dispersión específicos para cada área de estudio, los cuales se presentan en la figura 22.

Las cinco áreas analizadas revelan una correlación negativa entre las temperaturas más bajas y los valores más altos de NDVI, subrayando así la importancia de la dinámica de las coberturas vegetales y sus interacciones con el clima local.

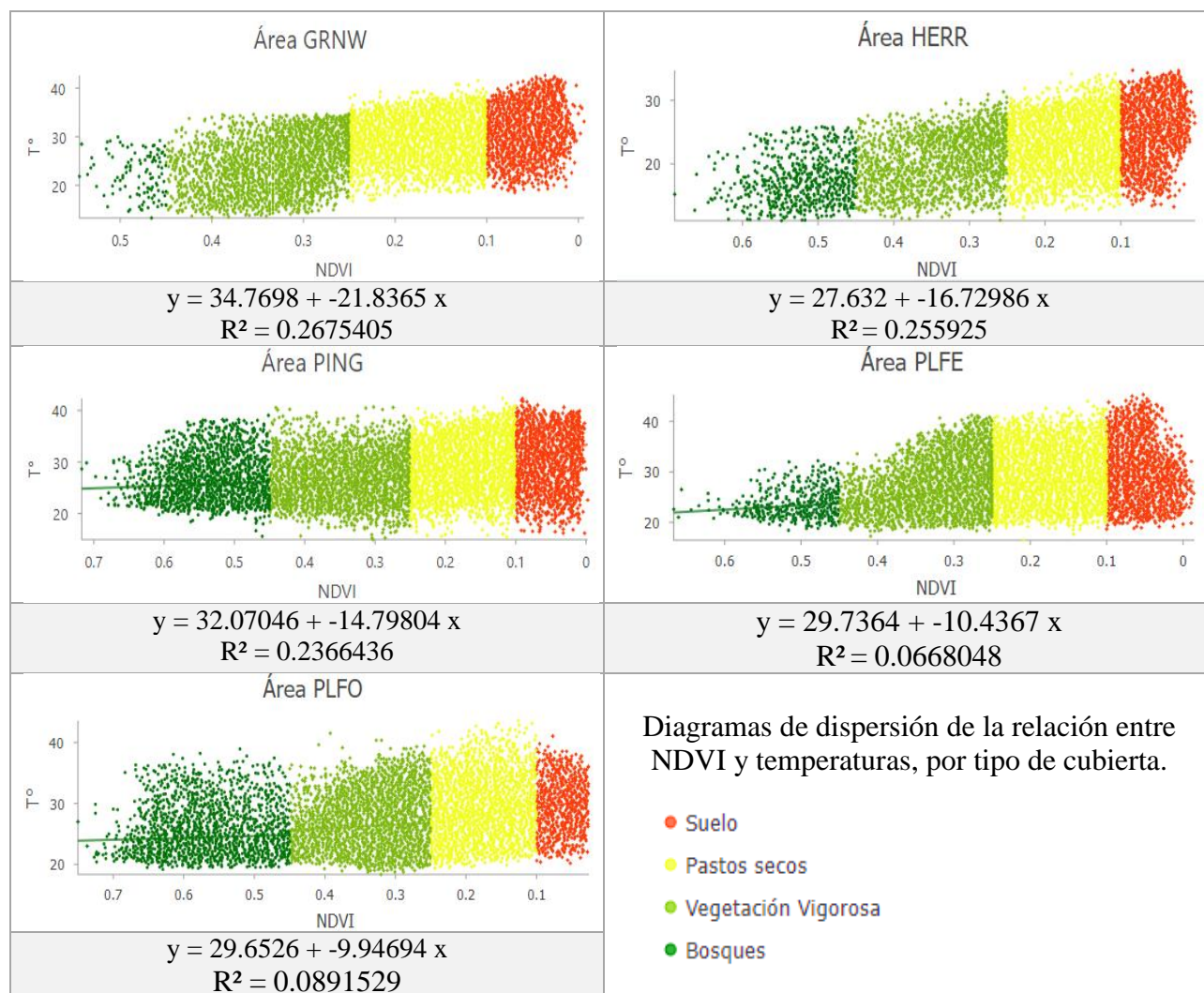


Figura 22. Diagramas de dispersión de la relación entre NDVI y temperaturas, por tipo de cubierta. Elaboración propia.

El coeficiente de determinación (R^2) y los coeficientes de la ecuación de regresión lineal proporcionan información sobre la fuerza y la dirección de la relación entre el NDVI y las temperaturas. La línea de tendencia crea un modelo de la relación lineal entre x y y , y el valor R^2 cuantifica en qué medida se ajustan los datos al modelo. Se observa que los valores de R^2 para todas las áreas son relativamente bajos, lo que sugiere que el modelo de regresión lineal no explica una gran parte de la variabilidad en los datos. Esto podría indicar que otros factores, además del NDVI y las temperaturas, pueden estar influyendo en la relación entre estas variables.

Además, los coeficientes de pendiente (" x ") son todos negativos, lo que indica una relación inversa entre el NDVI y las temperaturas. Esto significa que a medida que aumenta el NDVI, las temperaturas tienden a disminuir. Los tipos de vegetación con ecosistemas más complejos por ejemplo los bosques son consistentes con los valores más bajos de temperatura, un patrón que demuestra que la vegetación como reguladora del microclima, al proporcionar sombra y transpiración. Por otro lado, el área GRNW es la que indica una mayor correlación a pesar de la falta de árboles, donde las temperaturas más bajas se concentran en la ladera norte profunda y compleja. Lo que sugiere que la fuerza de la relación entre el NDVI y las temperaturas puede ser diferente dependiendo de las características específicas de cada área, como la altitud, la exposición solar y la humedad del suelo. El área PLFE y PLFO, muestran una correlación débil debido a la dispersión de los píxeles en la matriz. Todas las cubiertas vegetales representadas en esas dos áreas demuestran temperaturas bajas en días de máximo calor constatando que los factores climáticos y la complejidad topográfica ejercen una influencia determinante en el comportamiento térmico de las cubiertas. aludiendo a la manera en que diversas superficies interactúan con la energía térmica, incorporando procesos de absorción, reflexión y emisión.

En esta investigación se han tomado en cuenta otras variables que podrían revelarnos la manera en la que las temperaturas más bajas en días de máximo calor son distribuidas en las superficies y como es que interactúan en conjunto. Estudios adicionales como en Yin et al. (2023), respaldan la relación de un NDVI alto frecuentemente resulta en una alta eficiencia fotosintética de la vegetación durante la temporada de crecimiento, un mejor estado de crecimiento de la vegetación y una mayor capacidad de secuestro de carbono. Esto podría indicarnos algunos los valores de NDVI en los resultados constatan las condiciones propiciadas por el verano. La presencia de temperaturas más bajas durante la temporada de crecimiento, que se correlacionan con valores más bajos de NDVI, podría sugerir la existencia de micro-refugios climáticos en la región estudiada. Estos micro-refugios climáticos podrían ofrecer un ambiente relativamente fresco y estable durante el verano, lo que podría servir como refugio para especies vegetales y animales sensibles al calor o que prefieren condiciones climáticas más moderadas. Durante enero, la cantidad de energía solar que sustenta la fotosíntesis disminuye y las bajas temperaturas limitan el crecimiento de las plantas, lo que lleva a una vegetación escasa; en ciertos momentos, la cobertura de nieve también afecta al NDVI (Hu et al., 2019).

Un estudio adicional realizado por Goetz en 1997 revela la relación entre la temperatura superficial (T_s) y el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), la cual fue mayormente determinada por las variaciones estacionales en la cobertura vegetal y la humedad del suelo, con una menor influencia por la hora del día. Se observó una mayor sensibilidad de la temperatura superficial a los cambios en la radiación neta y la humedad del suelo disponible en comparación con el NDVI, lo que sugiere un retraso en la respuesta de la vegetación a las condiciones ambientales del sitio.

Investigaciones recientes, como las de Wu et al. (2015) y Gu et al. (2018), han señalado la presencia de un cierto desfase temporal en las respuestas del NDVI al cambio climático, indicando que el crecimiento de la vegetación podría estar influenciado principalmente por condiciones climáticas pasadas.

El entendimiento de estos efectos de retraso temporal del cambio climático en el NDVI resulta fundamental para explorar los mecanismos subyacentes de la interacción entre el clima y la vegetación. Además, se observó que los valores del NDVI mostraban una correlación más fuerte con los valores climáticos acumulativos de los meses actual y anterior a escala mensual (Zhe, 2021). Esto sugiere la necesidad de considerar el NDVI como una variable acumulativa con valores de varios meses en futuras investigaciones, con el fin de comprender mejor su comportamiento en un contexto más amplio de cambios en la vegetación. Aunque los valores de R^2 en los resultados del NDVI no fueron altos, el análisis visual en la cartografía nos proporciona una comparación de la concentración de píxeles en áreas con vegetación vigorosa. Estas áreas podrían representar pequeños humedales donde se pueden encontrar especies endémicas o vegetación importante, incluso entre las superficies rocosas que son difíciles de observar en una imagen digital.

5.2. Radiación solar de áreas

Integrando los hallazgos de la investigación previa, se ha establecido que, entre las múltiples variables estudiadas, la radiación solar emerge como una de las más relevantes debido a su considerable influencia en el entorno ambiental. A diferencia de los elevados costos asociados a la construcción y mantenimiento de estaciones de monitoreo de insolación, los modelos espaciales de radiación solar ofrecen un medio eficiente en términos de costos para caracterizar la variación espacial y temporal de la insolación. Estos modelos permiten simular la influencia de patrones de sombra en la insolación directa en intervalos discretos a lo largo del tiempo. (Fu & Rich, 2000).

Con la herramienta de Radiación Solar de ArcGIS Pro se obtuvieron los valores de radiación solar incidente recibida por cada píxel durante el periodo comprendido desde la salida del sol hasta la hora de vuelo del dron (Radiación Solar Acumulada) y la radiación recibida únicamente dada por la hora

de vuelo (Radiación Solar). Este enfoque permitió la generación de un conjunto de datos que representa la radiación solar acumulada durante dichos intervalos temporales.

Al comparar estos datos con los obtenidos a través de mediciones de temperatura capturadas por el UAV durante su vuelo, se observaron mejores correlaciones cuando se usó la variable de radiación solar acumulada que con la de radiación solar en la hora de vuelo (Tabla 6). Es importante destacar que, los valores de radiación solar acumulada superaron aquellos obtenidos a través de mediciones puntuales de radiación solar durante la hora de vuelo, dado que los píxeles habían experimentado una mayor exposición a la radiación solar a lo largo de dicho intervalo (ver Tabla 6). Esta variabilidad puede explicarse por la influencia de factores temporales y espaciales en la distribución y absorción de la radiación solar. La acumulación de radiación solar a lo largo del período desde la salida del sol hasta la hora de vuelo refleja una integración de la energía solar recibida durante ese lapso, teniendo en cuenta la variabilidad diurna y los efectos topográficos en la exposición al sol de cada píxel.

Tabla 6. Valores de correlación (R^2) entre la temperatura y las variables de radiación solar en la hora de vuelo y radiación solar acumulada, y valores máximos y promedios de radiación por área de estudio.

| Áreas de estudio | Radiación Solar de Áreas (WH/m ²) | | | Radiación Solar de Áreas (WH/m ²) | | |
|------------------|---|---------------|-------------|---|--------------|-------------|
| | R^2 | Hora de Vuelo | | R^2 | Acumulado | |
| | | Valor Máximo | Valor Medio | | Valor Máximo | Valor Medio |
| PLFO | 0.02 | 1390.2 | 1070.6 | 0.04 | 5837.8 | 5351.2 |
| PLFE | 0.01 | 1388.6 | 1053.2 | 0.03 | 5838.2 | 4892.5 |
| GRNW | 0.20 | 1396.9 | 1016.1 | 0.46 | 5883.5 | 4961.0 |
| HERR | 0.43 | 1284.8 | 719.9 | 0.48 | 5473.2 | 4619.6 |
| PING | 0.01 | 1397.68 | 977.6 | 0.12 | 5887.3 | 5344.5 |

Por otro lado, la medición puntual de radiación solar durante la hora de vuelo no captura completamente esta variabilidad temporal y espacial, lo que puede resultar en valores más bajos en comparación con la radiación solar acumulada. Asimismo, es posible que durante la hora de vuelo existan variaciones locales en la exposición al sol debido a la topografía del terreno o la presencia de obstáculos, lo que podría influir en la precisión de las mediciones de radiación solar en ese momento específico. En consecuencia, la utilización de la radiación solar acumulada proporciona una perspectiva más integral de la energía solar disponible para la superficie terrestre durante el período de interés, lo que puede mejorar la capacidad de análisis y predicción de los efectos del clima y el microclima en el área de estudio, resultando en una mayor correlación con las temperaturas mínimas en días de máximo calor.

Cómo se pueden observar en las Figuras 23 y 24, el área PLFO exhibe la más alta radiación solar acumulada media, atribuible a su mayor exposición como resultado de su topografía más abierta y plana. Por otro lado, el área PLFE registra la máxima radiación acumulada, a pesar de su proximidad geográfica con PLFO. Esta disparidad puede explicarse por la composición y características diferenciales del entorno. PLFO presenta una mayor cobertura de "vegetación vigorosa", mientras que PLFE está caracterizada por la presencia de "pastos secos" y rocas en su superficie, factores que contribuyen a una mayor reflexión de la radiación solar.

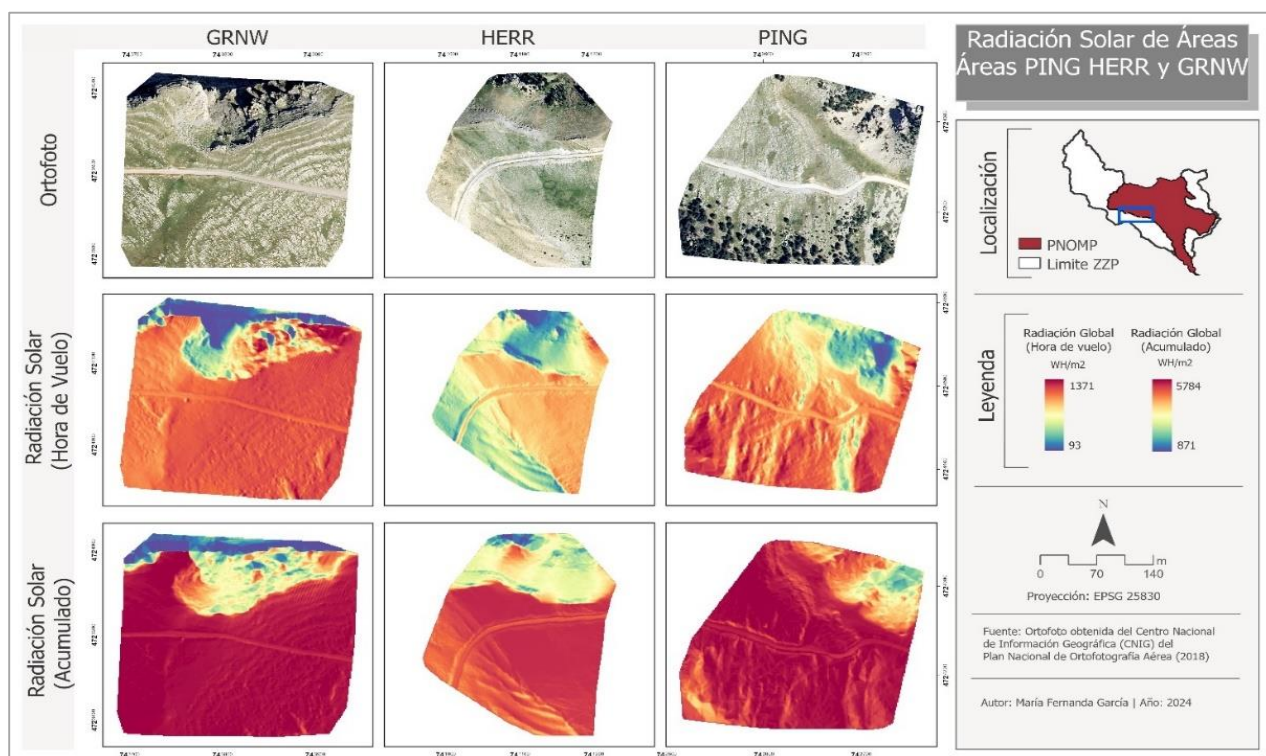


Figura 23. Cartografía radiación solar de Áreas PING, HERR y GRNW. Elaboración propia.

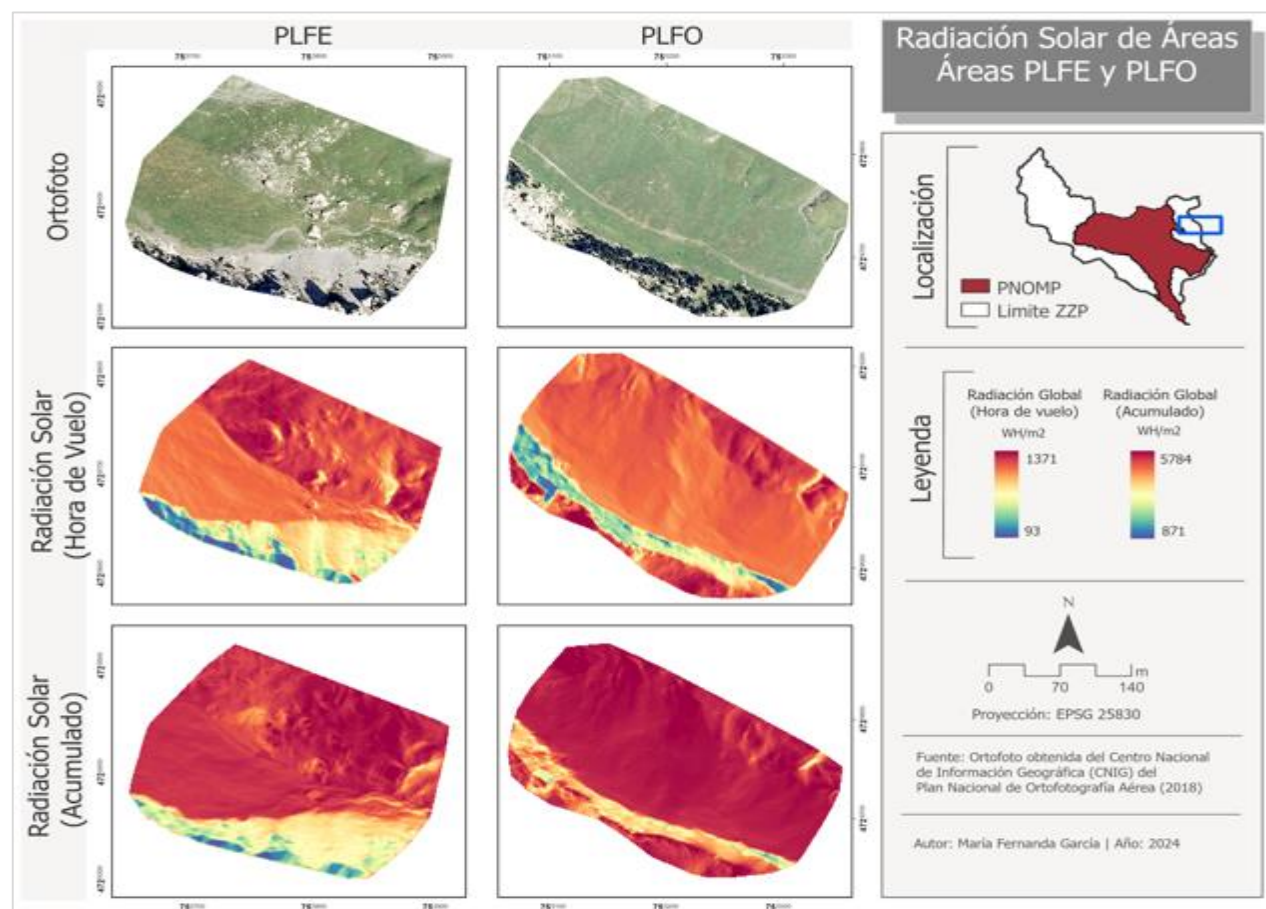


Figura 24. Cartografía radiación solar de Áreas PLFE y PLFO. Elaboración propia.

Este fenómeno encuentra respaldo en los principios expuestos por Curran en su obra "Principios de la teledetección" (1985), donde se establece que el comportamiento térmico de las cubiertas está vinculado con su capacidad para retener calor, su conductividad térmica, su difusividad y su inercia térmica, los cuales inciden en la respuesta de las superficies ante los cambios de temperatura. Esta tabla comparativa, se expone en la Tabla 7. La evaluación del comportamiento térmico a través de la radiación solar resulta fundamental, dado que la reflectividad y emisividad de las cubiertas guardan una relación directa con la temperatura, lo que permite comprender mejor los patrones de radiación solar y su influencia en el entorno estudiado.

Tabla 7. Comportamiento térmico de cubiertas. Curran (1985)

| Tipo de Cubierta | Capacidad Térmica | Conductividad Térmica | Difusividad Térmica | Inercia Térmica |
|------------------|-------------------|-----------------------|---------------------|-----------------|
| Vegetación | medio-alta | baja | alta | alta |
| Suelo seco | medio-baja | medio-baja | medio-baja | medio-baja |
| Suelo húmedo | medio-baja | medio-baja | medio-baja | alta |

En este contexto, el comportamiento térmico de la vegetación exhibe una variabilidad inherente debido a su composición heterogénea, la cual comprende una diversidad de materiales. Por ejemplo, las hojas, en función de su estado, pueden poseer una capacidad térmica medio-alta para el almacenamiento de calor, convirtiendo así a la vegetación en una cubierta eficaz como aislante térmico. En las representaciones de Radiación Solar (Figuras 23 y 24), Es evidente que las áreas adyacentes a bosques o vegetación vigorosa presentan valores reducidos de radiación. Este fenómeno se atribuye, en parte, a la baja conductividad térmica de la vegetación, lo que implica una retención de calor, y a su alta difusividad térmica, que facilita cambios rápidos en la temperatura del material. Asimismo, se observa una inercia térmica significativa en la vegetación, lo que se traduce en menores valores de radiación solar y temperaturas a lo largo del día. En contraste, el suelo seco muestra un comportamiento térmico distinto. Esta afirmación se sustenta en los resultados obtenidos a lo largo del estudio, por lo que se generaron gráficos de dispersión para cada área, clasificados por NDVI, revelando una correlación positiva entre la temperatura y la radiación solar en todas las muestras. A través de múltiples pruebas, se identificaron puntos con baja temperatura y radiación solar (excluyendo áreas boscosas), lo que reveló la presencia de áreas con temperaturas mínimas durante los días de mayor calor, situadas en zonas predominantemente sombreadas con poca exposición a la radiación solar.

Se examinó la relación entre la radiación solar de áreas acumulada y las temperaturas para varios tipos de cubierta, utilizando modelos de regresión lineal. Los resultados obtenidos revelan patrones significativos en la relación entre estas variables, los cuales son fundamentales para comprender los procesos eco fisiológicos y climáticos en los ecosistemas estudiados. (Figura 25)

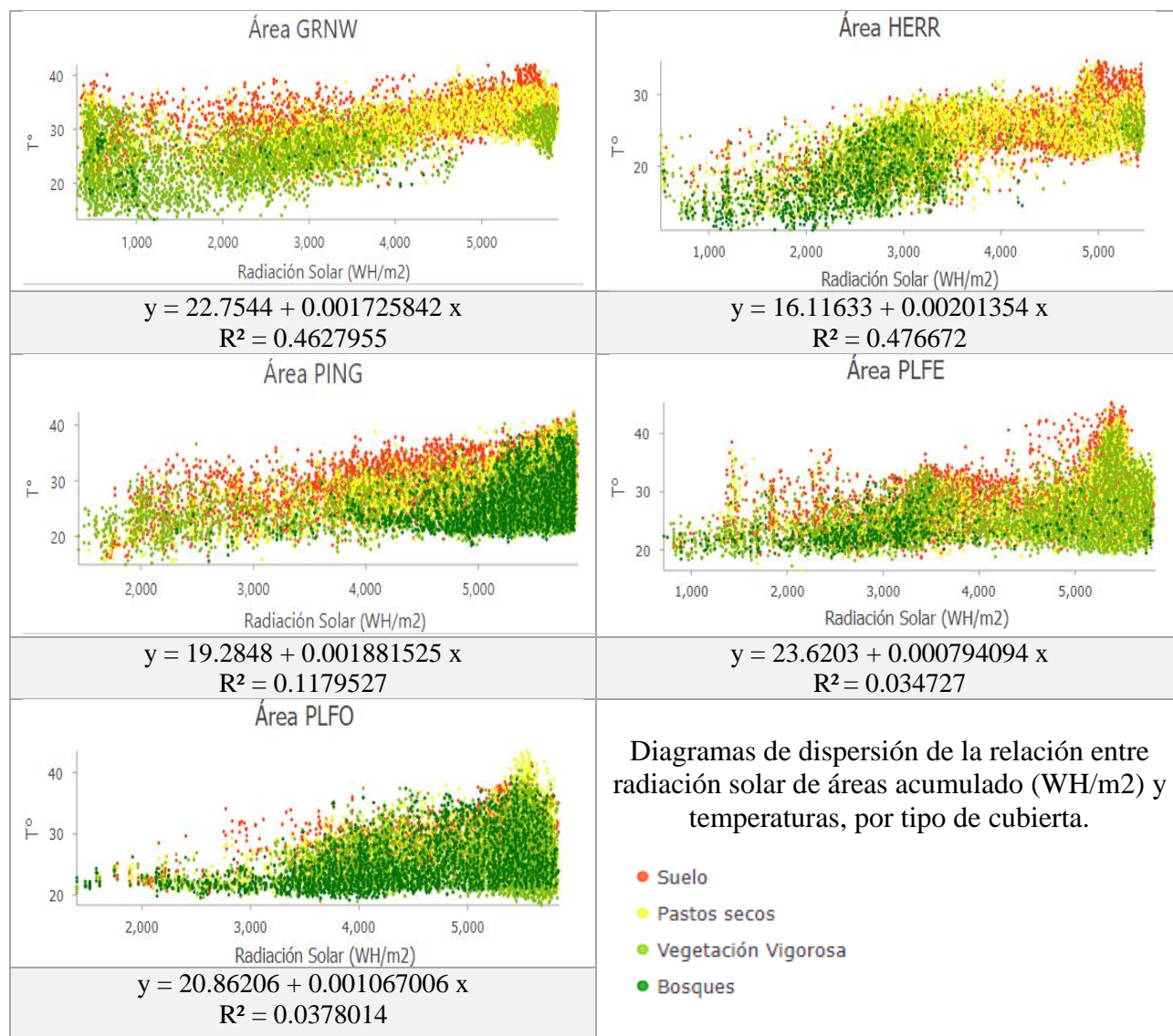


Figura 25. Diagramas de dispersión de la relación entre radiación solar de áreas acumulado (WH/m²) y temperaturas, por tipo de cubierta. Elaboración propia.

A partir de estos diagramas de dispersión de los coeficientes R^2 , se observa que los modelos de regresión lineal muestran una variabilidad en la fuerza de la relación entre la radiación solar de áreas acumulada y las temperaturas para diferentes tipos de cubierta. En particular, se encontraron coeficientes de determinación (R^2) que varían desde 3.47% hasta 47.67%. el área HERR y GRNW tienen una correlación positiva, entre temperaturas y radiación solar en donde se observa que las áreas con mayor exposición solar suelen albergar una vegetación distinta a las áreas más sombreadas. Esto es constatado en diversos estudios como es el caso de donde se comprueba que el relieve sombreado tiene la mayor contribución y está positivamente correlacionado con la temperatura superficial (LST, por sus siglas en inglés). La influencia del relieve sombreado en el entorno térmico de la superficie debería ser prestada más atención en el proceso de trabajo del entorno térmico de la superficie. La evaluación del grado de influencia del relieve sombreado y del entorno térmico de la superficie debería ser la premisa y la base para muchos otros estudios (Peng et al., 2020). Además, la radiación solar contribuye al calentamiento del aire en las montañas, generando corrientes ascendentes de aire caliente que pueden favorecer la formación de nubes y la condensación del vapor de agua, lo que afecta los patrones de precipitación. Los cambios en la radiación solar incidente pueden alterar el balance energético de las montañas y, por ende, tener repercusiones en el clima regional, como cambios en los patrones de reflexión de la radiación y, por consiguiente, en la temperatura y el clima local y regional. Menor radiación solar, mayor NDVI, menores temperaturas, lo que se traduce en temperaturas más estables. De acuerdo con Ashcroft et al. (2009), si el gradiente ambiental de interés fueran las temperaturas máximas promedio del verano, entonces las condiciones más frías podrían

encontrarse en ubicaciones topográficamente protegidas donde hubiera protección contra la radiación y los vientos cálidos y secos.

El factor principal que influye en la distribución espacial de la radiación solar potencial es el relieve geográfico, destacando especialmente la pendiente y la orientación. Por consiguiente, aunque el modelo de Radiación Solar ya contempla estas variables topográficas, este estudio se propone profundizar en el análisis de la formación precisa de los micro-refugios climáticos, a través del cálculo de las variables que componen este factor.

5.3. Parámetros de superficies

Orientación de Laderas

La orientación de las laderas también ejerce una influencia significativa sobre la radiación solar incidente. En el hemisferio norte, las laderas orientadas al sur, sureste y suroeste reciben una mayor radiación solar y presentan un contenido de humedad menor en comparación con aquellas orientadas al norte, noreste y noroeste, lo que se traduce en una mayor sensibilidad de los árboles a los años o períodos secos en las laderas con orientación sur (Thomas, 2004). Los resultados obtenidos revelan que las temperaturas mínimas durante los días de máximo calor se encuentran en las laderas norte, noreste y este. Sin embargo, en algunas áreas, como se observa en el mapa del área PLFO, las temperaturas más bajas en los días más calurosos se localizan en la cara suroeste y oeste del mapa, fenómeno que podría atribuirse a la presencia de cobertura vegetal. Las laderas de solana, expuestas directamente al sol, muestran una mayor amplitud térmica, mientras que los fondos de valle y las laderas umbrosas exhiben una menor amplitud térmica, siendo estas últimas menos expuestas a la radiación solar y, por ende, propensas a calentarse menos que otras áreas. La presencia de afloramientos rocosos en las laderas umbrosas puede intensificar esta protección contra la insolación, resultando en temperaturas más estables bajo su resguardo (Hoffrén & García, 2023).

Se ha generado un mapa de orientación por área con una simbología detallada en la metodología, que muestra un total de nueve clases u orientaciones, donde cada clase corresponde a una de las 8 direcciones cardinales o a una zona llana. Se han creado diagramas de dispersión para analizar la orientación de cada área, clasificando los diagramas con colores correspondientes a las temperaturas para facilitar la observación de los datos.

Los resultados obtenidos sobre la orientación indican que las temperaturas mínimas durante los días de máximo calor se encuentran en las laderas norte, noreste y este. En algunos mapas, como el del área PLFO, las temperaturas más bajas durante los días más calurosos se encuentran en la cara suroeste y oeste del mapa, lo cual podría explicarse por la presencia de cobertura boscosa.

De acuerdo con Hidalgo et al. (1993), quienes llevaron a cabo un estudio sobre el efecto de la exposición de la ladera y la pendiente en la evaluación de la demanda atmosférica potencial en una zona de Huesca, durante los meses de menor radiación solar (enero), las diferencias entre las temperaturas se acentúan positivamente en la ladera sur y negativamente en la ladera norte (Hidalgo et al., 1993). Esto implica que, durante el verano, la ladera norte es la que se mantiene más fresca, lo que confirma la validez de los datos obtenidos. Sin embargo, se observa una baja correlación entre las temperaturas y la orientación para todas las áreas. Además, se analizan las distribuciones de las orientaciones de todas las áreas, teniendo en cuenta que estas están divididas en grados circulares, lo que puede complicar la interpretación. Sin embargo, se puede constatar que, como se mencionó anteriormente, las temperaturas mínimas durante los días de máximo calor se encuentran en las laderas norte (entre 0–22.5° y 337.5–360°).

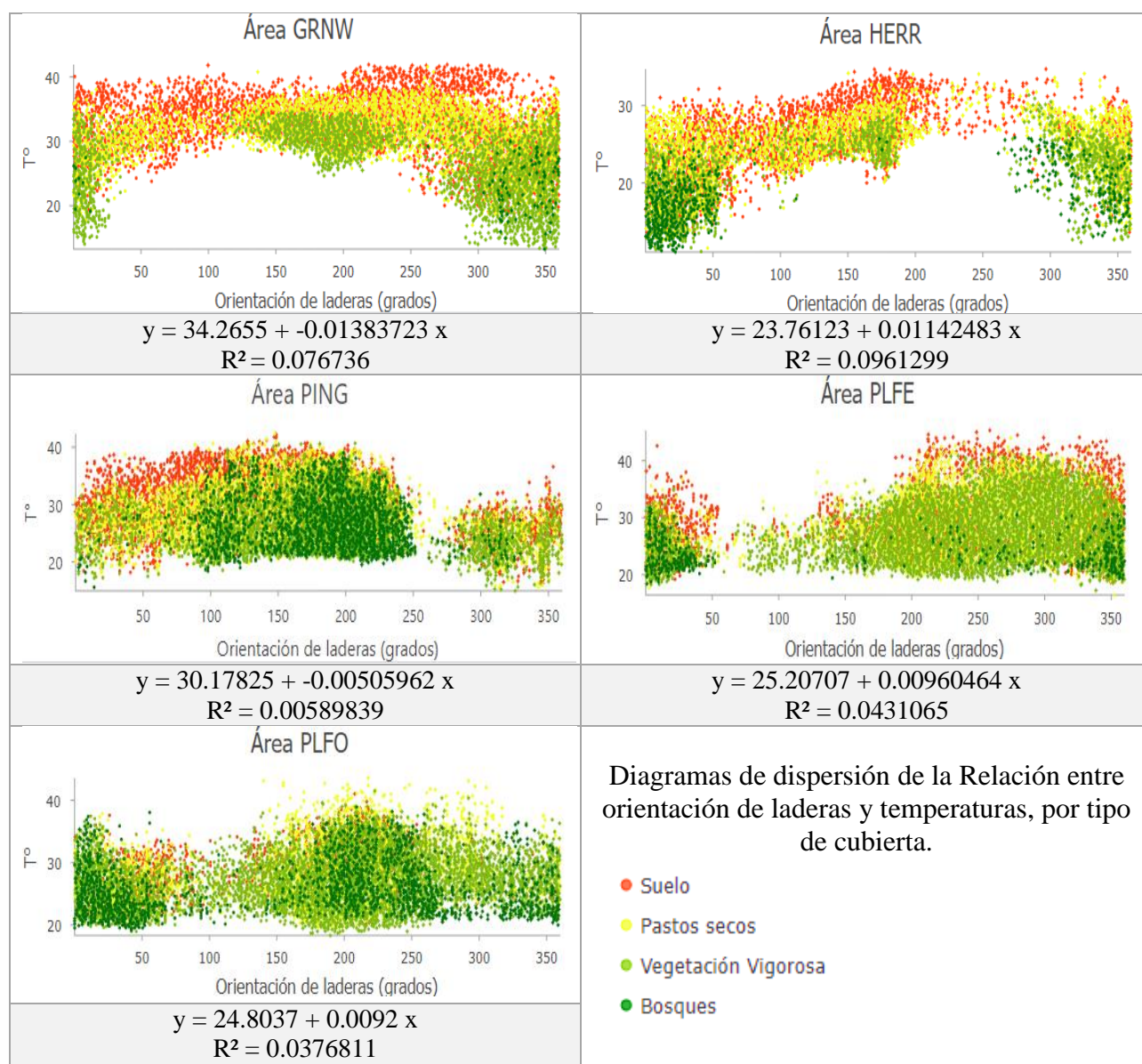


Figura 26. Diagramas de dispersión de la relación entre orientación de laderas y temperaturas, por tipo de cubierta. Elaboración propia.

A pesar de que los resultados de los coeficientes R^2 son bajos en la correlación entre la orientación de las laderas y las temperaturas, los diagramas de dispersión revelan una influencia significativa de las temperaturas más bajas en las laderas norte. Mientras que estudios sobre pendientes orientadas al este y al oeste han demostrado que la radiación solar está sesgada hacia el oeste en el pico de la tarde, por lo tanto, una pendiente orientada al oeste es considerablemente más cálida que una pendiente orientada al este en sombra (Singh, 2018). Todas las áreas, excepto por el área PLFE cumplen esta condición, hay coberturas de suelo seco en las pendientes orientadas el este en sombra.

Estos hallazgos concuerdan con investigaciones previas que han resaltado la influencia de la topografía en las condiciones térmicas locales, confirmando que la orientación de la ladera modifica las condiciones microclimáticas de los sitios. Se ha observado que los organismos que habitan en laderas con orientaciones contrastantes pueden presentar diferencias morfológicas y fisiológicas que les permiten adaptarse a las condiciones microclimáticas específicas de cada ladera (Nevo, 2001). Por ende, es plausible encontrar vegetación vigorosa en diversas laderas, como es el caso de PLFO, que presenta una orientación contrastante de norte y sur. Es probable que en estas áreas se encuentren diferentes tipos de vegetación, o especies con características morfológicas diversas, adaptadas a los microclimas particulares de cada orientación. Este fenómeno ha sido corroborado por investigaciones previas, como la realizada por Bale et al. (1998), que encontraron diferencias significativas en la riqueza y diversidad de especies, así como en la cobertura y altura del dosel vegetal, entre las laderas orientadas al noroeste y aquellas orientadas al sureste.

Pendientes

La pendiente es ampliamente conocida como un factor potencialmente significativo en la generación de diferencias en las características del ecosistema. Sus impactos son diversos, debido a su carácter compuesto, abarcando variables externas como la radiación solar (Holland & Steyn, 1975).

Tabla 8. Valores máximos, mínimos y medios de la variable pendiente

| Áreas de estudio | Pendiente (Grados) | | |
|------------------|--------------------|--------------|-------------|
| | Valor Mínimo | Valor Máximo | Valor Medio |
| PLFO | 0.03 | 71.20 | 14.92 |
| PLFE | 0.19 | 65.74 | 20.51 |
| GRNW | 0.14 | 84.24 | 20.71 |
| HERR | 0.08 | 72.61 | 30.3 |
| PING | 0.44 | 65.15 | 24.18 |
| Promedio | 0.176 | 71.788 | 22.124 |

Se observa que todas las áreas de estudio tienen un rango de pendiente significativo, con variaciones considerables entre los valores mínimo y máximo. El área HERR muestra el mayor valor medio de pendiente (30.3 grados), seguida por "PING" (24.18 grados), mientras que PLFO tiene el valor medio más bajo (14.92 grados). Aunque "PLFO" tiene el valor medio más bajo, aun así, tiene un rango amplio de pendiente (desde 0.03 hasta 71.20 grados), lo que indica una variabilidad considerable dentro de esta área de estudio, debido a que tiene una pronunciada ladera rocosa en la zona sureste.

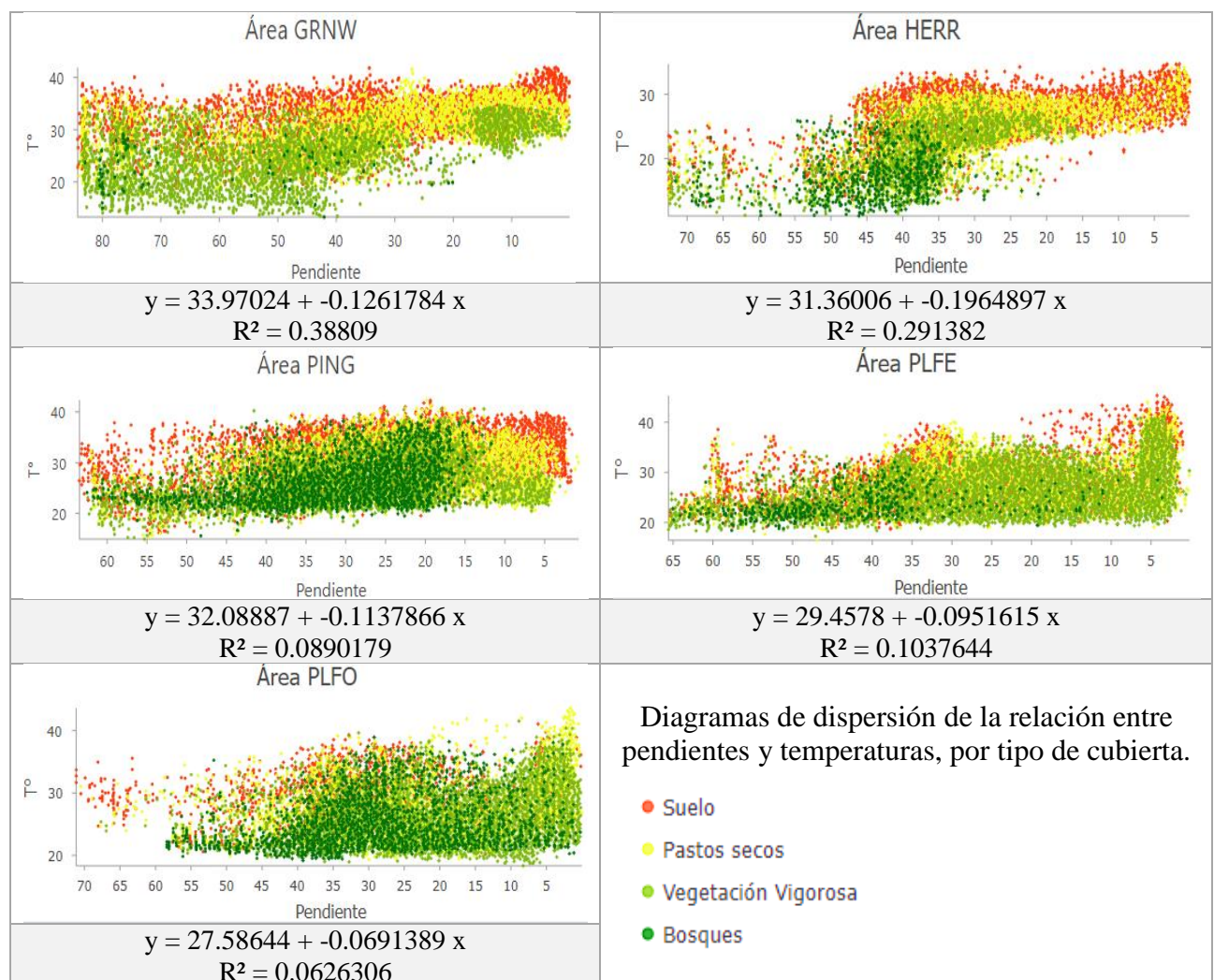


Figura 27. Diagramas de dispersión de correlación entre temperaturas y pendientes, por área. Elaboración propia.

Las áreas HERR y GRNW muestran una correlación negativa, aunque baja pero significativa, con respecto a las otras variables estudiadas. Esto indica que a medida que la pendiente aumenta, las temperaturas disminuyen, al igual que la cobertura vegetal vigorosa y los bosques. Por otro lado, las otras áreas no muestran una relación significativa, posiblemente debido a la influencia de otras variables dentro de esos sitios de estudio. (Figura 27)

La orientación y la pendiente están estrechamente relacionadas, ya que la orientación se refiere específicamente a la dirección hacia la cual se inclina una pendiente (Ferraz et al., 2009). Las variaciones microclimáticas debido a las diferencias en la orientación de la pendiente resultan en cambios en la radiación solar recibida, lo que a su vez afecta la temperatura del suelo, la humedad, la evaporación y la dinámica de la vegetación y las características del suelo (Eisenlohr et al., 2013). La orientación de la pendiente es un factor topográfico clave responsable de la redistribución del agua en el paisaje, y también influye en los patrones y tendencias de la vegetación en las regiones montañosas.

Curvatura

Los resultados de la Tabla 9 sugieren que la curvatura del terreno puede tener un efecto limitado en las condiciones térmicas locales, al menos en el rango de valores estudiado. Sin embargo, es importante destacar que la curvatura del terreno puede influir en la distribución espacial de otros factores ambientales, como la humedad del suelo y la exposición solar, lo que a su vez puede afectar las condiciones térmicas en los paisajes terrestres.

Tabla 9. Valores mínimos, máximos y medios de curvatura en grados.

| Áreas de estudio | Curvatura (Grados) | | |
|------------------|--------------------|--------------|-------------|
| | Valor Mínimo | Valor Máximo | Valor Medio |
| PLFO | -0.31 | 0.67 | -7.3 |
| PLFE | -0.31 | 0.33 | -0.003 |
| GRNW | -0.34 | 0.52 | 0.001 |
| HERR | -0.22 | 0.30 | 0 |
| PING | -0.29 | 0.22 | 0 |
| Promedio | -0.294 | 0.40 | 1.46 |

Si bien los resultados de diagramas de dispersión presentados en la Figura 28, no parecen indicar relación alguna entre la curvatura del terreno y las temperaturas para los tipos de cubierta analizados, se observa visualmente a través de la dispersión de los píxeles que la distribución de la cobertura de “suelo” presenta valores superiores a 0. En la cartografía que se presenta en el Anexo II, estas áreas corresponden a áreas de denudación máxima, áreas que podrían presentar curvaturas cóncavas y por lo tanto estar más expuestas a la radiación solar.

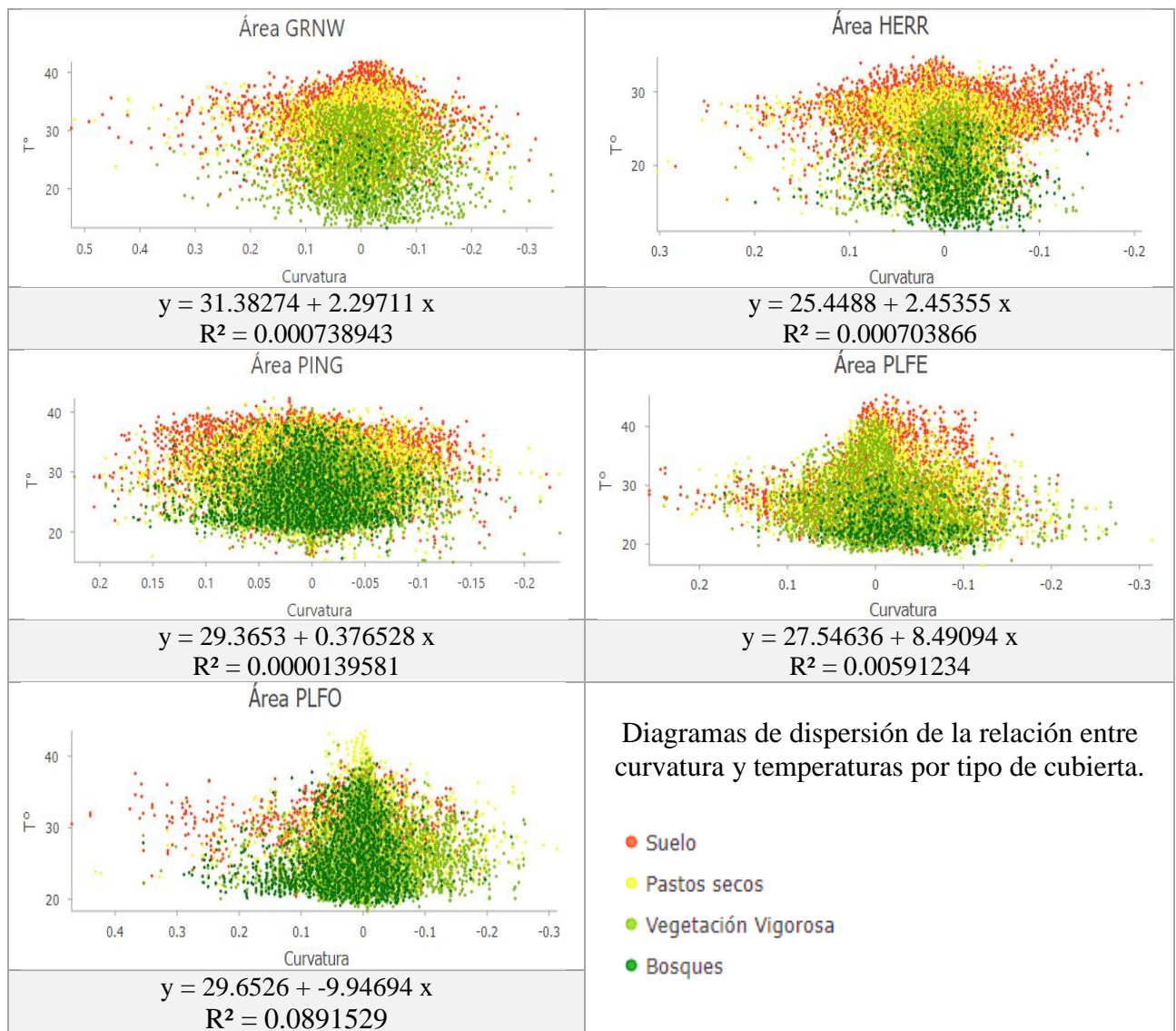


Figura 28. Diagramas de dispersión de la relación entre curvatura y temperaturas, por tipo de cubierta. Elaboración propia.

Rugosidad

Los modelos de regresión lineal revelaron una correlación débil entre la rugosidad del terreno y las temperaturas mínimas en las cinco áreas estudiadas. En particular, se observó que, en tres de las áreas, los coeficientes de la rugosidad fueron negativos, lo que sugiere una relación inversa entre la rugosidad y las temperaturas mínimas. Sin embargo, los valores de R^2 asociados con estas ecuaciones fueron relativamente bajos, oscilando entre 0.000089343 y 0.2675405, lo que indica una explicación limitada de la variabilidad climática basada únicamente en la rugosidad del terreno. Estos resultados sugieren que otros factores, como la altitud, la vegetación y la exposición solar, pueden estar desempeñando un papel más significativo en la determinación de las temperaturas mínimas en estas áreas.

En cuanto a la relación entre la rugosidad del terreno y la radiación solar acumulada, los diagramas de dispersión en la figura 29, revelaron resultados igualmente modestos. A pesar de que algunas ecuaciones de regresión lineal mostraron coeficientes positivos para la rugosidad, indicando una posible asociación positiva entre la rugosidad y la radiación solar, los valores de R^2 fueron extremadamente bajos, con un máximo de 0.0000253744. Estos hallazgos sugieren que la rugosidad del terreno tiene una influencia limitada en la distribución de la radiación solar acumulada en estas áreas y que otros factores, como la orientación del terreno y la cobertura vegetal, pueden ser más importantes para determinar los patrones de radiación solar.

Si bien se observaron algunas tendencias en la relación entre la rugosidad del terreno y las variables climáticas estudiadas, los resultados sugieren que la influencia de la rugosidad en las temperaturas mínimas y la radiación solar acumulada es limitada. Por lo tanto, se destaca la importancia de considerar múltiples variables y procesos complejos en el análisis y la predicción de los cambios climáticos en estas áreas, con el fin de comprender mejor los mecanismos subyacentes que impulsan las variaciones climáticas.

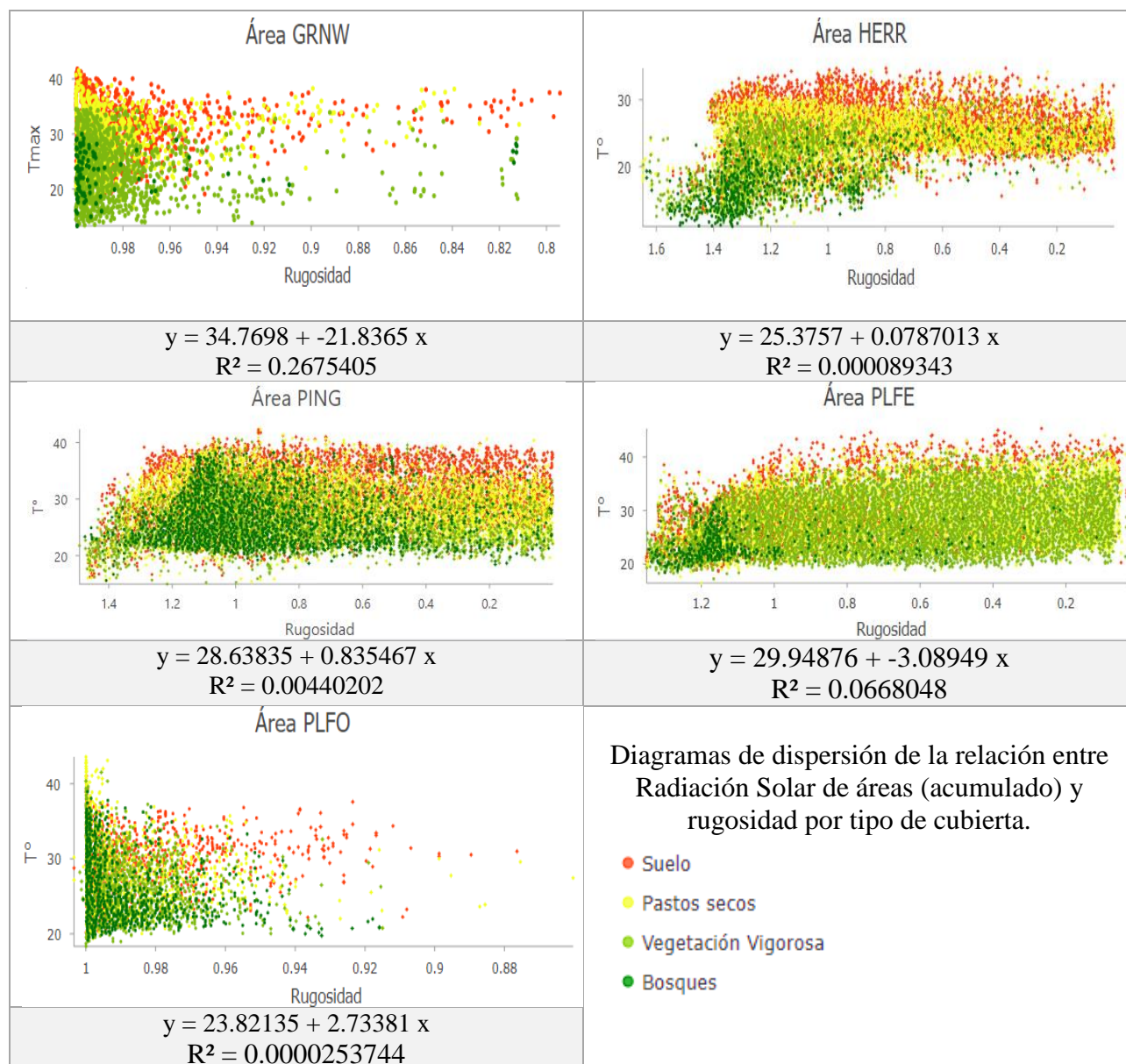


Figura 29. Diagramas de dispersión de la relación entre radiación solar de áreas (acumulado) y rugosidad, por tipo de cubierta. Elaboración propia.

5.4. Análisis correlacional general

Utilizando la herramienta de gráficos en ArcGIS Pro, se generaron matrices de diagramas de dispersión para cada una de las áreas de estudio, con el propósito de resumir las correlaciones totales entre las variables analizadas. (Figura 30) Estas matrices proporcionan una visión amplia de las relaciones entre las diversas variables, destacando aquellas de mayor relevancia en cada área. Se observa que la radiación solar acumulada emerge como la variable más significativa en las áreas HERR y GRNW, mientras que, en PING, el Índice de Vegetación Normalizado (NDVI) muestra la mayor influencia. En contraste, para las áreas PLFO y PLFE, el NDVI y la pendiente, respectivamente, muestran las correlaciones más elevadas.



Figura 30. Matrices de correlación de todas las variables por área. Elaboración propia.

No obstante, también se identifican multicolinealidades que podrían afectar el análisis de regresión. Por ejemplo, la alta correlación entre la radiación acumulada y la radiación por hora de vuelo, así como la relación entre la orientación y otras variables, sugieren la necesidad de evitar la inclusión redundante de datos en el modelo de regresión. La variable de rugosidad, aunque correlacionada con la radiación solar, no muestra significancia para Tmax y la variable curvatura no presenta correlaciones significativas con ninguna variable, lo que justifica la exclusión de ambas variables del análisis de regresión. A pesar de ello, estas variables siguen siendo relevantes para comprender visualmente el contexto ambiental. La pendiente muestra una alta significancia en relación con Tmax y también con la radiación. Para evitar la redundancia de datos y optimizar el análisis de regresión, se ha optado por incluir únicamente las variables de Radiación Solar Acumulada y NDVI. (Figura 31)

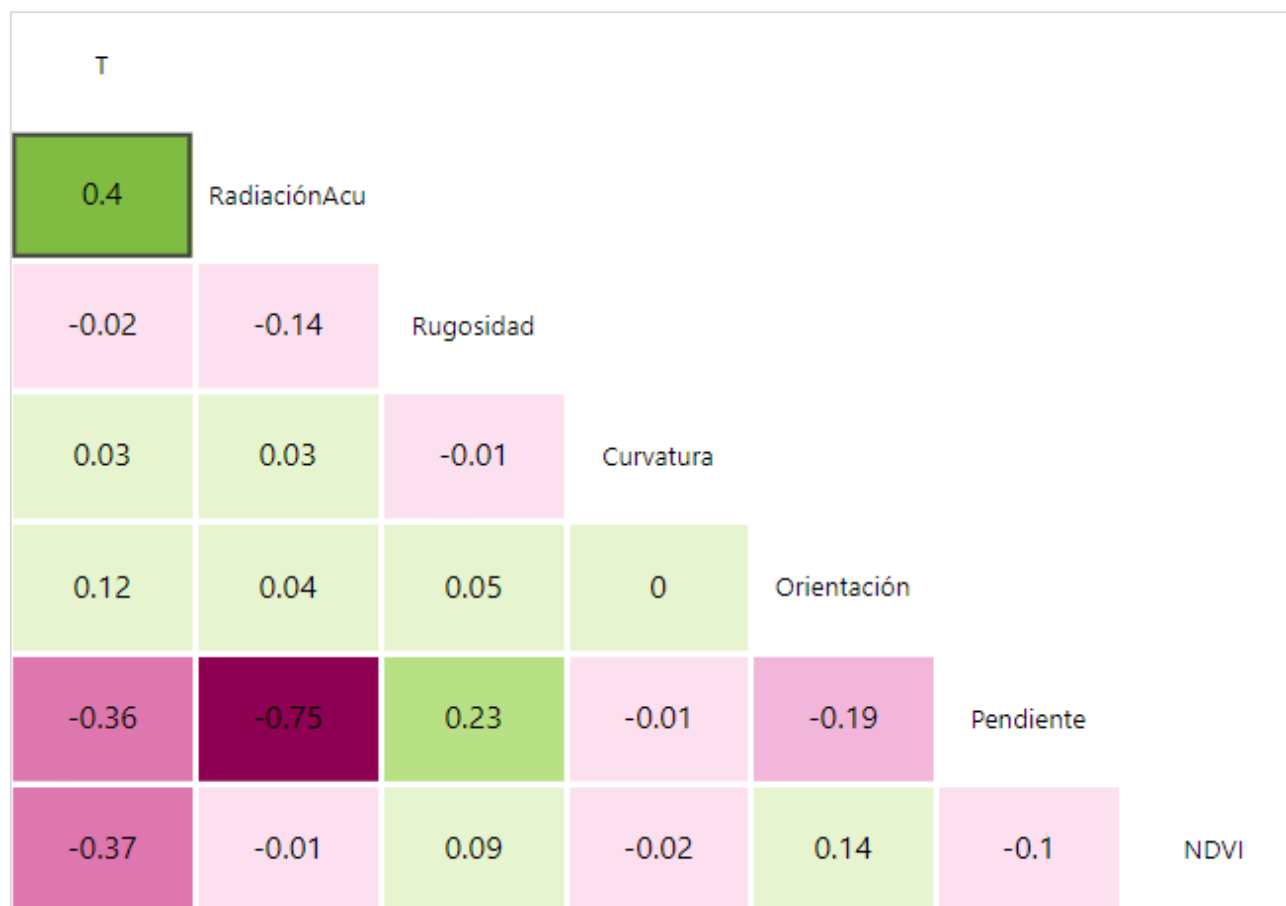


Figura 31. Matriz de correlación total (todas las áreas) con R de Pearson. Elaboración propia.

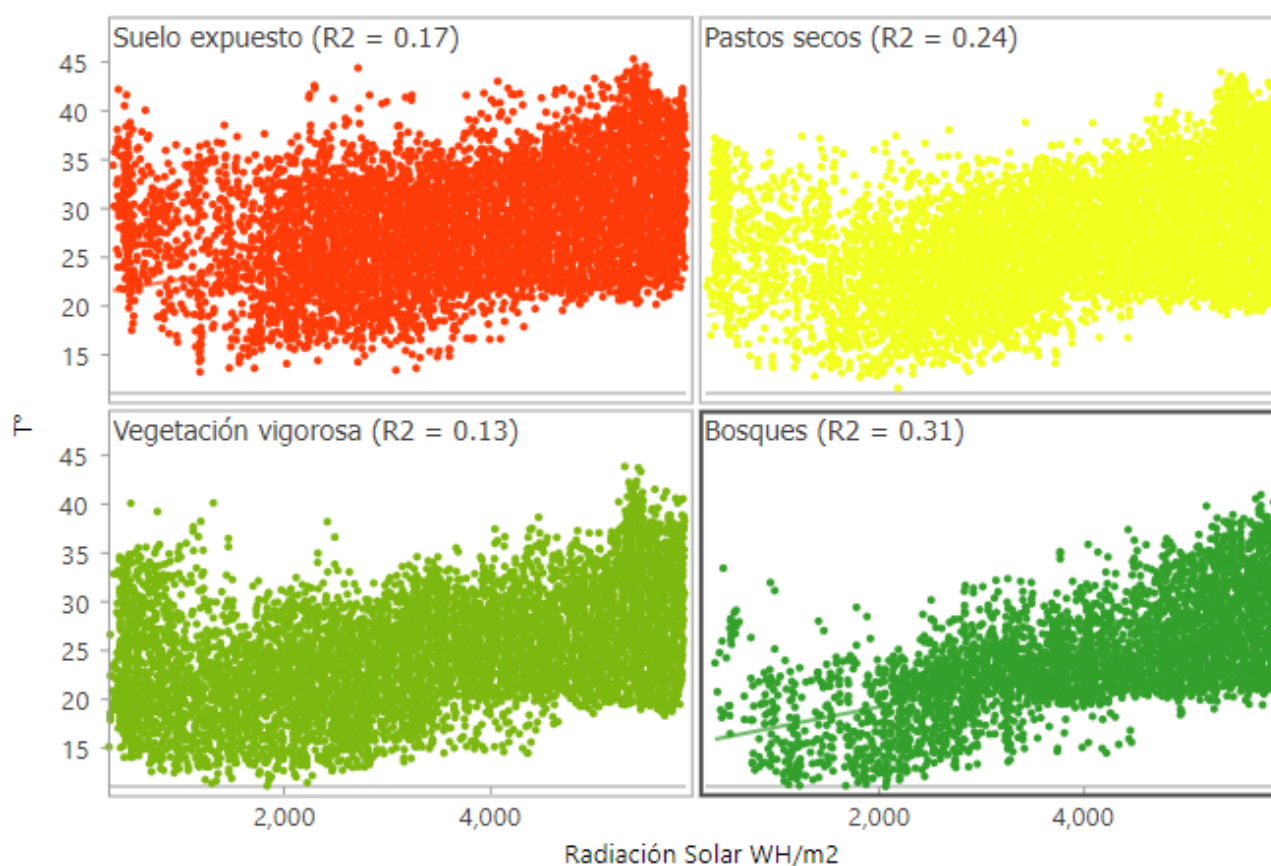


Figura 32. Diagramas de dispersión totales (todas las áreas) de radiación solar y temperaturas, por tipo de cubierta vegetal. Elaboración propia.

La ecuación de regresión lineal muestra una relación positiva entre la radiación solar y las temperaturas mínimas en las cuatro coberturas evaluadas (suelo, pastos secos, vegetación vigorosa y bosques). Los resultados de la Figura 32 muestran una mejor correlación en las cubiertas de bosque ($R^2 = 0.31$), seguido de los pastos secos ($R^2 = 0.24$), suelo expuesto ($R^2 = 0.17$) y vegetación vigorosa ($R^2 = 0.13$). El intercepto de 19.71346 indica el valor esperado de las temperaturas mínimas cuando la radiación solar es igual a cero, lo cual puede no tener una interpretación directa en este contexto específico. Por otro lado, el coeficiente de pendiente 0.00165036 indica el cambio esperado en las temperaturas mínimas por cada unidad de cambio en la radiación solar. Aunque este coeficiente es positivo, el valor es relativamente pequeño, lo que sugiere que el aumento en la radiación solar se asocia con un incremento marginal en las temperaturas mínimas.

$$y = 19.71346 + 0.00165036 x$$
$$R^2 = 0.161986$$

El coeficiente de determinación de 0.161986 indica que aproximadamente el 16.2% de la variabilidad en las temperaturas mínimas puede ser explicada por la variabilidad en la radiación solar en las cuatro coberturas consideradas. Aunque este valor sugiere una relación significativa entre la radiación solar y las temperaturas mínimas, aún queda una cantidad considerable de variabilidad sin explicar por el modelo de regresión lineal. Esto sugiere que otros factores, como la altitud, la humedad relativa, la topografía y la cobertura de nubes, también pueden influir en las temperaturas mínimas y deberían ser considerados en futuros análisis.

La ecuación de regresión lineal revela una relación positiva pero relativamente débil entre la radiación solar y las temperaturas mínimas en las cuatro coberturas evaluadas. Aunque la radiación solar parece ser un factor contribuyente, otros factores pueden estar desempeñando un papel igualmente importante en la determinación de las temperaturas mínimas en el área de estudio. Por lo tanto, se recomienda una investigación adicional para comprender mejor los diversos factores que influyen en las variaciones climáticas locales.

6. CONCLUSIONES

En este Trabajo Fin de Máster se evaluó la influencia directa de la Radiación Solar, variables topográficas y cubiertas vegetales, con temperaturas mínimas en días de máximo calor, con el motivo de encontrar potenciales micro-refugios climáticos, áreas pequeñas de un clima favorable dentro de una región generalmente desfavorable en términos climáticos (Provan & Bennet, 2008; Rull, 2009), dónde las condiciones climáticas son más lentas que en las áreas circundantes, por lo que se utilizó una capa topoclimática a una alta resolución proveniente de un vuelo con un UAV térmico realizado en el año 2020 en época de verano, para evaluar y analizar la ubicación de las temperaturas más bajas del año y estimar la relación con las variables topográficas y la radiación solar. Con el fin de contribuir a reducir el esfuerzo que conllevan las mediciones in situ, empleando para ello las Tecnologías de Información Geográfica.

De acuerdo con el primero y el segundo objetivo específico de la presente investigación, las variables de radiación solar y las variables topográficas fueron calculadas por medio de Modelos Digitales de Terreno de alta resolución (1 metro), utilizando los programas Solar Analyst (Fu & Rich, 2000) y los parámetros de superficie disponibles en el software ArcGIS Pro y por medio de técnicas avanzadas de sistemas de información geográfica y teledetección se lograron obtener distintas variables explicativas fundamentales para analizar el comportamiento de las temperaturas. Con ello se constata que los sistemas de información geográfica y teledetección son una herramienta facilitadora para encontrar potenciales micro-refugios climáticos.

De acuerdo con el tercer objetivo, se realizó una clasificación de coberturas por medio de un Índice de Vegetación Normalizada (NDVI) a través del ajuste y selección de valores que clasificara cada tipo de cubierta y para evaluar cada una de las variables con el tipo de cobertura. Y comprender de manera integral la contribución de todas las variables estudiadas con las temperaturas mínimas.

Las conclusiones fueron las siguientes:

- (1) Hay una relación positiva entre la radiación solar acumulada y las temperaturas, con niveles de significancia diferentes en función del área estudiada (las mayores correlaciones se encontraron en las áreas HERR y GRNW). En este sentido, las temperaturas mínimas en días de máximo calor se relacionan con una menor radiación solar acumulada.
- (2) Se aprecia una cierta correlación inversa de las cubiertas vegetales con las temperaturas. En general, menores valores de temperatura resultan en mayores valores de NDVI. En este sentido y atendiendo a la clasificación realizada de los tipos de cubierta, las zonas forestales serían las áreas con temperaturas más frías en días de máximo calor, constituyendo un potencial micro-refugio climático, mientras que las zonas de suelo desnudo serían las áreas de mayor calor.
- (3) La radiación solar acumulada se correlacionó mejor en cubiertas de bosque, lo que sugiere que, en estos espacios, esta variable permitiría identificar mejor las temperaturas que en otros tipos de cubierta.
- (4) No hay correlación significativa de la orientación de laderas con temperaturas; sin embargo, los diagramas de dispersión muestran que, en la mayoría de las áreas, las laderas orientadas al norte presentan menores temperaturas. Las laderas orientadas hacia el sur y las orientadas al sureste, muestran mayores temperaturas y cubiertas de suelos expuestos, es decir menores valores de NDVI.
- (5) Existe cierta correlación inversa de la pendiente con respecto a las temperaturas. Mayor ángulo de pendiente, menores valores de temperatura.

- (6) No se ha encontrado correlación entre la variable de curvatura media y temperaturas. No obstante, en los diagramas de dispersión se observa una distribución de mayores temperaturas en áreas de denudación y menores temperaturas en áreas de acumulación máxima.
- (7) La variable que mejor explicaría las temperaturas mínimas en días de máximo calor, entre las variables estudiadas, es la Radiación Solar Acumulada, aunque su significación no fue muy alta en general (las mejores correlaciones se encontraron en HERR y GRNW, $R^2 = 0.48$ y 0.46 , respectivamente).
- (8) Evaluar la radiación solar y las variables topográficas solo son una parte, cuando se trata de identificar potenciales micro-refugios climáticos. Si bien la radiación solar puede ser un factor importante que influye en la temperatura y otros parámetros climáticos en un área determinada, la presencia de un micro-refugio climático generalmente implica una combinación de varios factores ambientales.

Las relaciones entre las variables fueron realizadas mediante regresiones lineales y se creó un modelo descriptivo para describir la relación entre las variables seleccionadas (Radiación Solar).

Adicionalmente, se han identificado una serie de alcances y limitaciones que surgieron durante el desarrollo del estudio, los cuales se sugieren tener en cuenta para posteriores análisis y mejorar la precisión en la búsqueda de micro-refugios climáticos. A continuación, se detallan los siguientes puntos:

- Se recomienda para futuras investigaciones el empleo de un conjunto más amplio de imágenes con diferentes elevaciones y tipos de cobertura, con el fin de aumentar la variabilidad de las condiciones climáticas y, por ende, de los datos obtenidos.
- En consonancia con lo anterior, se sugiere la utilización de datos ráster con topografías más complejas, lo que enriquecería los valores de las variables considerablemente y permitiría visualizar de manera más detallada cómo la radiación y las variables topográficas influyen en el mantenimiento de temperaturas estables.
- Resulta esencial incorporar variables climáticas adicionales, como el viento y la precipitación, lo que contribuiría significativamente a mejorar la relevancia de la ecuación de regresión final y proporcionaría una visión más completa de los factores ambientales que influyen en la formación de micro-refugios climáticos.
- Para validar los hallazgos presentados en este estudio, se recomienda hacer uso de las predicciones generadas por la herramienta de Regresión Ponderada Geográficamente y técnicas de interpolación, lo que permitiría realizar pruebas adicionales en otras capas de datos y realizar verificaciones in situ en lugares predichos por los modelos.
- Los micro-refugios son áreas sumamente pequeñas, por lo que se sugiere el uso de información con altas resoluciones, como ha sido el caso de este estudio.
- Se sugiere que algunas de las variables se conviertan a unidades fáciles de comparar con las temperaturas, por ejemplo, la conversión de variables circulares a lineales como es el caso de la variable orientación.
- Para encontrar potenciales micro-refugios climáticos dónde hay una complejidad topográfica alta debido a las sombras generadas por el terreno, se sugiere realizar una depuración de los datos eliminando las coberturas que tienen una capacidad térmica alta como es el caso de la cobertura de árboles y pastos, de tal manera que sólo se obtenga la radiación generada por las

sombras y facilitar la tarea de búsqueda de micro-refugios potenciales que no sean sitios vegetativos predominantes (árboles), y la posibilidad de encontrar sitios con especies vegetativas indicadoras.

Estas recomendaciones buscan contribuir al avance en la comprensión y delimitación de los micro-refugios climáticos, proporcionando líneas de investigación potenciales para futuros estudios en este campo.

7. AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría agradecer a Raúl Hoffrén, por su tiempo, paciencia y acompañamiento durante todo el desarrollo de este trabajo. Y a Juan de la Riva por su supervisión y enseñanzas.

Agradezco enormemente al Instituto Pirenaico de Ecología, porque las prácticas han sido sobretodo muy enriquecedoras, tengo un especial agradecimiento a la Dra. Begoña García quien acompañó este proyecto de inicio a fin, por las muy buenas charlas, enseñarme biología y mostrarme los espectaculares paisajes del Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido.

Agradezco también a mis amigas Amaia y Valeria con quienes he creado un gran equipo durante el Máster y quienes lo hicieron sobre todo muy divertido.

Un especial agradecimiento a mi nueva familia, Pilar, Inés, Juan y Diego, quienes han sido parte de mis grandes alegrías durante mi estadía aquí en España, sobran palabras para agradecer.

Y toda la vida estaré agradecida de mis padres y mis hermanos, mi mayor fuente de inspiración y suma admiración por quienes son. Gracias por darme la oportunidad de vivir esta hermosa experiencia.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Ackerly, D. D., Loarie, S. R., Cornwell, W. K., Weiss, S. B., Hamilton, H., Branciforte, R., & Kraft, N. J. B. (2010). The geography of climate change: Implications for conservation biogeography. *Diversity and Distributions*, 16, 476–487.
- 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, 656–667.
- Auslander, M., Nevo, E., & Inbar, M. (2003). The effects of slope orientation on plant growth, developmental instability and susceptibility to herbivores. *Journal of Arid Environments*, 55(3),
- Bale, C. L., Williams, J. B., & Charley, J. L. (1998). The impact of aspect on forest structure and floristics in some Eastern Australian sites. *Forest Ecology and Management*, 110(1–3), 363–377.
- Carter R.E. y Klinka K. 1990. Relationships between growing-season soil water-deficit, mineralizable soil nitrogen and site index of coastal Douglas fir. *Forest Ecology and Management* 30:301–311.
- Cepeda Rendón, J. M., Restrepo Villamil, A. P., & Lozano Gómez, X. (2007). Relaciones entre la geomorfometría y las propiedades físicas de los suelos de la zona central del humedal la Florida. *Revista de Topografía AZIMUT*, 1, 86–107.
- Chuvieco, E. (2019) *Teledetección Ambiental, la observación de la Tierra desde el Espacio*, 3a edición actualizada, editorial Ariel Ciencia, Barcelona. Digital Reasons 978-84-120315-4-6
- Chuvieco, E. (1996). *Fundamentos de Teledetección Espacial*. Tercera Edición Revisada. Ediciones RIALP: España.
- Curran, P. J. (1985): *Principies of Remote Sensing*, Essex, Longman, 282 págs., 25 tablas, 175 ilustraciones.
- Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE) (2016), “Guía de Interpretación Visual de Imágenes Satelitales”. Programa Educativo 2Mp. Buenos Aires, CONAE, pp. 1-11.
- del Castillo R.F. 2000. Composición y estructura de una nopalera bajo situaciones contrastantes de exposición de ladera y herbivoría. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 65:5-22.
- Dubayah, R., & Rich, P. M. (1995). Topographic Solar Radiation Models for GIS. *International Journal of Geographic Information Systems*, 9, 405–413.
- Eisenlohr, P. V., Alves, L. F., Bernacci, L. C., Padgurschi, M. C., Torres, R. B., Prata, E. M., & Martins, F. R. (2013). Disturbances, elevation, topography and spatial proximity drive vegetation patterns along an altitudinal gradient of a top biodiversity hotspot. *Biodiversity and Conservation*, 22, 2767–2783.
- Ferraz, A., Bretar, F., Jacquemoud, S., & Gonçalves, G. (2009). *The Role of Lidar Systems in Fuel Mapping*. INESC: Coimbra, Portugal.
- Fridley, J. D. (2009). Downscaling climate over complex terrain: high fine-scale (<1000 m) spatial variation of near-ground temperatures in a montane forested landscape (Great Smoky Mountains). *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 48, 1033–1049.

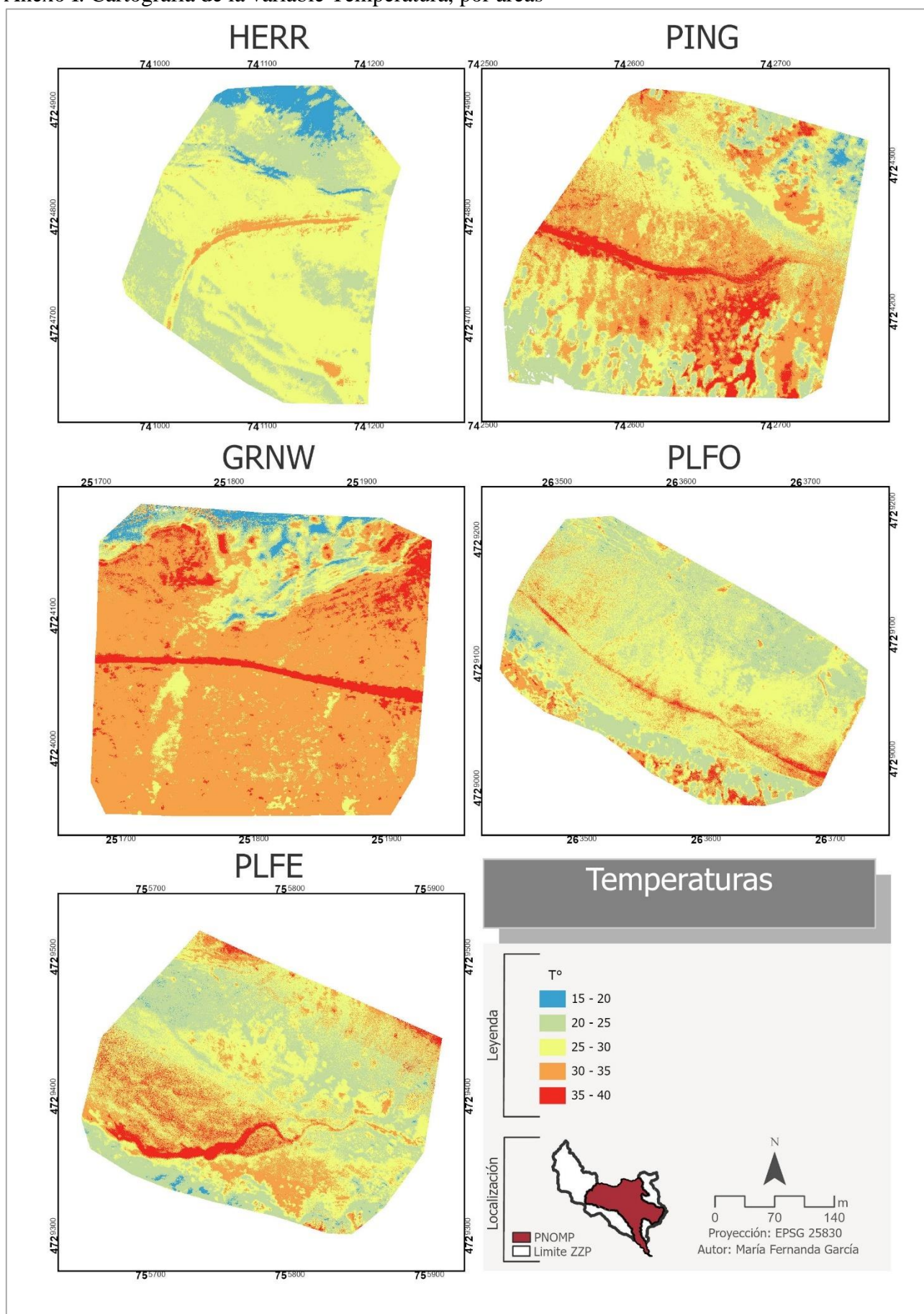
- Fu, P., & Rich, P. M. (2000). A geometric solar radiation model and its applications in agriculture and forestry. *Proceedings of the Second International Conference on Geospatial Information in Agriculture and Forestry*.
- García, M. B., Errea, P., Gómez, D., & Pizarro, M. (2019). Ganadores y perdedores de los cambios en el paisaje en los últimos sesenta años en uno de los parques nacionales más antiguos y meridionales de las regiones alpinas europeas: Ordesa y Monte Perdido. *Geographical Research Letters*, 45, 123-141.
- Gobierno de Aragón. (s.f.). Memoria 2020 Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido.
- González-Hidalgo J.C., Bonet A.y Echeverría M.T. 1996. Efecto de la orientación de la ladera sobre algunas comunidades arbustivas del semiárido central de la depresión del Ebro. *Mediterranea* 15:21-31.
- Goetz, Scott. (1997). Multi-sensor analysis of NDVI, surface temperature, and biophysical variables at a mixed grassland site. *International Journal of Remote Sensing*. 18. 71-94. 10.1080/014311697219286.
- Gu, Z., Duan, X., Shi, Y., Li, Y., & Pan, X. (2018). Spatiotemporal variation in vegetation coverage and its response to climatic factors in the Red River Basin. China. *Ecological Indicators*, 93, 54–64.
- Hobson R. D. 1972 “Surface Roughness in topography: Quantitive approach. En R.J. Chorley ed. *Spatial Analysis in Geomorphology*, capítulo 8 Nueva York: Harper & Row 221-245
- Hoffren, R., & García, M. B. (2023). Thermal unmanned aerial vehicles for the identification of microclimatic refugia in topographically complex areas. *Remote Sensing of Environment*, 286, 113427.
- 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.
- Hofierka, J., Šúri, M. (2002). The solar radiation model for Open source GIS: Implementation and applications. *Proceedings of the Open Source GIS-GRASS Users Conference*.
- Holland, P.G., & Steyn, D.G. (1975). Vegetational Responses to Latitudinal Variations in Slope Angle and Aspect. *Journal of Biogeography*, 2(3), 179–183.
- Hu, X., Tansey, K., Zheng, Y., Ghent, D., Liu, X., & Yan, L. (2019). Agricultural drought monitoring using European Space Agency Sentinel 3A land surface temperature and normalized difference vegetation index imageries. *Agricultural and Forest Meteorology*, 279.
- Loarie, S., Duffy, P., Hamilton, H., et al. (2009). The velocity of climate change. *Nature*, 462, 1052–1055.
- López-Gómez, V., Zedillo-Avelleyra, P., Anaya-Hong, S., González-Lozada, E., & Cano-Santana, Z. (2012). Efecto de la orientación de la ladera sobre la estructura poblacional y ecomorfología de *Neobuxbaumia tetetzo* (Cactaceae). *Botanical Sciences*, 90(4), 453-457.

- Mazzola M.B., Kin A.G., Morici E.F., Babinec F.J. y Tamborini G. 2008. Efecto del gradiente altitudinal sobre la vegetación de las sierras Lihue Calel (La Pama, Argentina). *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica* 43:103-119.
- Nevo E. 2001. Evolution of genome–phenome diversity under environmental stress. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 98:6233-6240.
- Nobel P.S. 1982. Orientation, PAR interception, and nocturnal acidity increases for terminal cladodes of a widely cultivated cactus, *Opuntia ficus-indica*. *American Journal of Botany* 69:1462-1469.
- Oldfather, M. F., Britton, M. N., Papper, P. D., Koontz, M. J., Halbur, M. M., Dodge, C., Flint, A. L., Flint, L. E., & Ackerly, D. D. (2016). Effects of topoclimatic complexity on the composition of woody plant communities. *AoB Plants*, 8, plw049.
- Peng, X., Wu, W., Zheng, Y., et al. (2020). Correlation analysis of land surface temperature and topographic elements in Hangzhou, China. *Scientific Reports*, 10(1), 10451.
- Provan, J. and Bennett, K. (2008) Phylogeographic Insights into Cryptic Glacial Refugia. *Trends in Ecology and Evolution*, 23, 564-571.
- Raventós, José & Gonzalez-Hidalgo, José. (2013). Efecto de la exposición de la ladera y pendiente en la evaluación de la demanda atmosférica potencial: Un ejemplo de cálculo en el semiárido aragonés (La Violada, Huesca). *Cuadernos de investigación geográfica*, ISSN 0211-6820, N° 18-19, 1992-1993, pags. 29-46.
- Ruiz Arias, J. A., Tovar Pescador, J., Pozo Vázquez, D., Molina Aguilar, A., & Batlles Garrido, F. J. (2006). Evaluación de los recursos solares utilizando entornos SIG: el problema de la resolución del Modelo Digital del Terreno. En *XXIX Jornadas Científicas de la Asociación Meteorológica Española*. Pamplona, España: Asociación Meteorológica.
- Rull, V. (2009). Microrefugia. *Journal of Biogeography*, 36, 481–484.
- Saxon, E., Baker, B., Hargrove, W., Hoffman, F., & Zganjar, C. (2005). Mapping environments at risk under different global climate change scenarios. *Ecology Letters*, 8, 53–60.
- Singh, S.H.I.P.R.A., (2018). Understanding the role of slope aspect in shaping the vegetation attributes and soil properties in Montane ecosystems. *Tropical Ecology*, 59(3), pp.417-430.
- Thomas, P.A. 2004. *Trees: Their Natural History*. Cambridge University Press. 298 p.
- Vargas, N. H. (2017). Implementación de biomodelos estimativos de la calidad ecosistémica en el nevado del cocuy al año 2030 producto del retroceso glaciar. Bogotá D.C.
- Valverde-Padilla P.L. 2002. Cambios en la abundancia, dominancia y diversidad de formas de vida vegetales entre laderas norte y sur en el Valle semiárido de Zapotitlán, Puebla. *ContactoS* 45:45-50.
- Wu, D., Zhao, X., Liang, S., Zhou, T., Huang, K., Tang, B., Zhao, W., 2015. Time-lag effects of global vegetation responses to climate change. *Glob. Change Biol.* 21, 3520–3531.
- Yin, C., Chen, X., Luo, M., Meng, F., Sa, C., Bao, S., Yuan, Z., Zhang, X., & Bao, Y. (2023). Cuantificación de la contribución de los factores impulsores en la distribución y cambio de la productividad primaria neta de la vegetación en la meseta mongola. *Remote Sensing*.

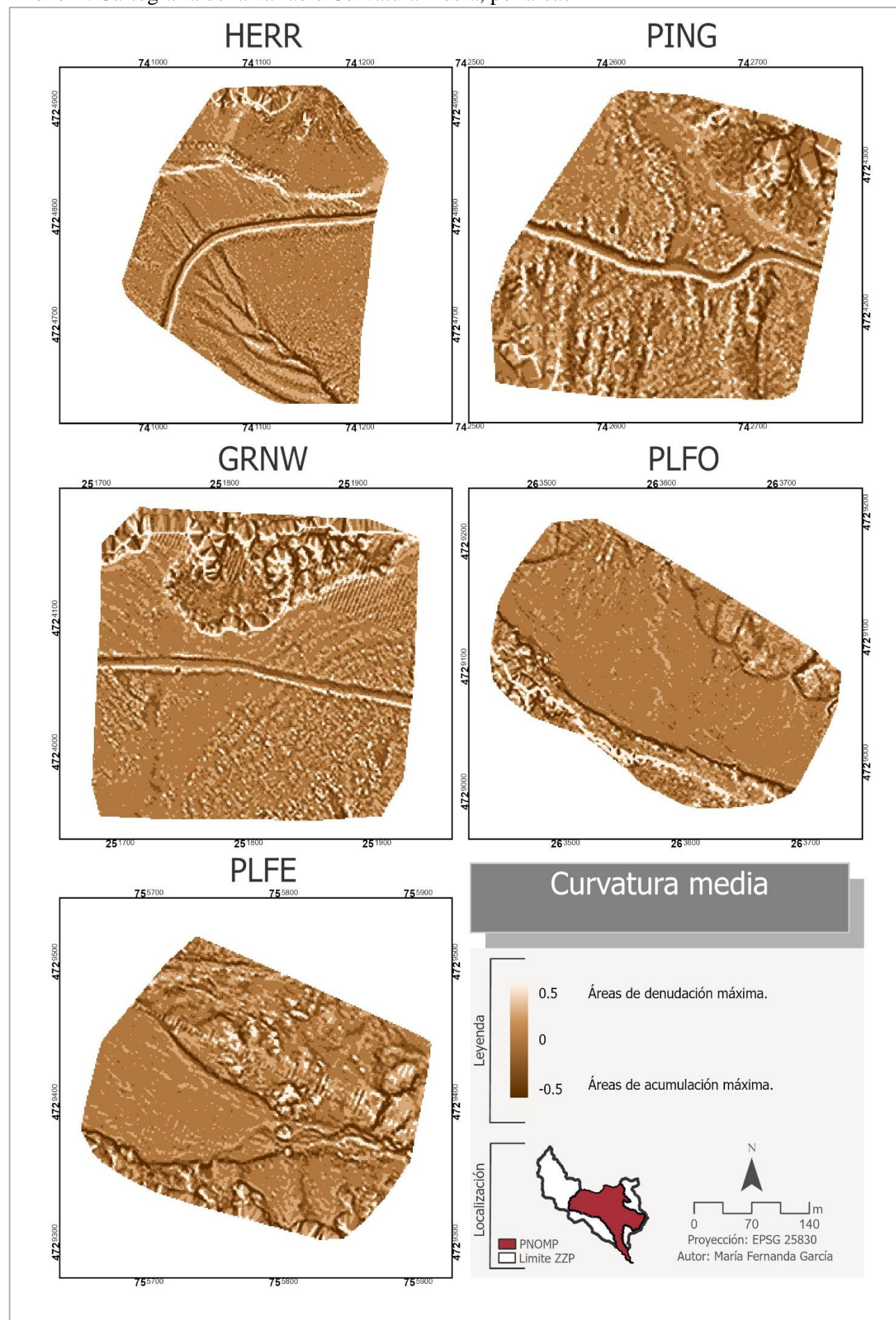
- Zhang, S., Li, X., & She, J. (2020). Error assessment of grid-based terrain shading algorithms for solar radiation modeling over complex terrain. *Transactions in GIS*, 24(1), 230-252.
- Zhe, M., & Zhang, X. (2021). Time-lag effects of NDVI responses to climate change in the Yamzhog Yumco Basin, South Tibet. *Ecological Indicators*, 124, 107431.

9. ANEXOS

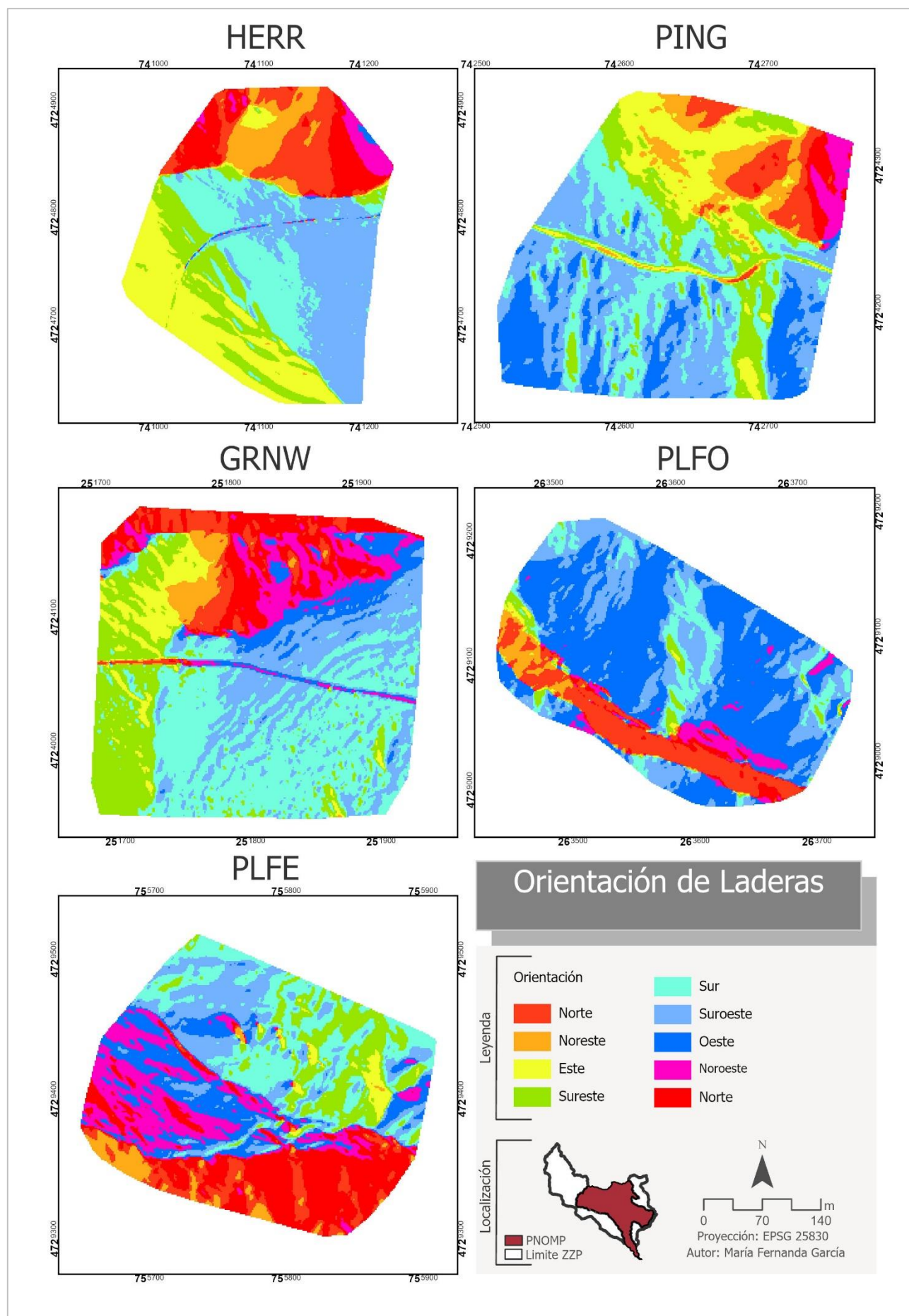
Anexo I. Cartografía de la variable Temperatura, por áreas



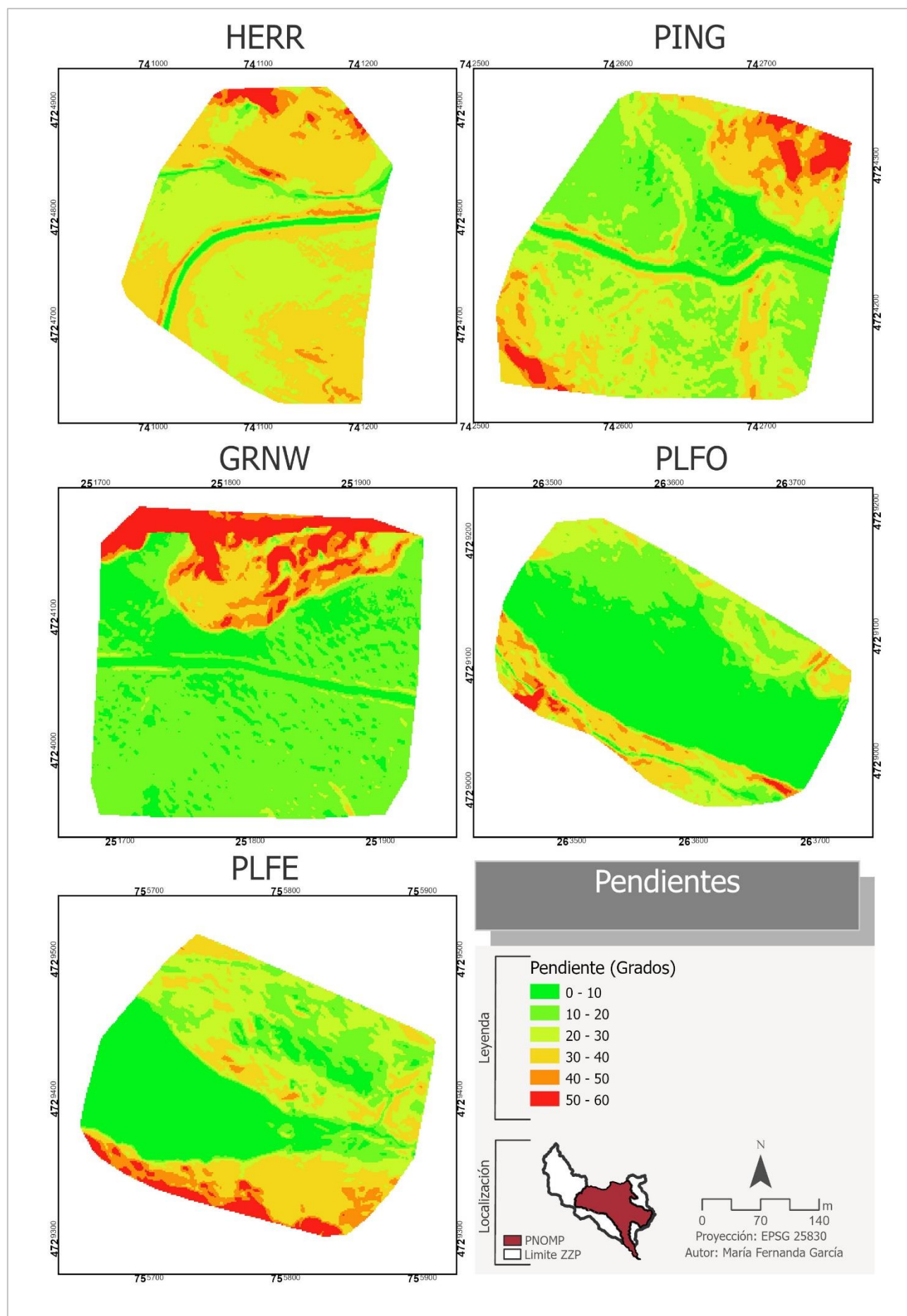
Anexo II. Cartografía de la variable Curvatura media, por áreas



Anexo III. Cartografía de la variable Orientación de laderas, por áreas



Anexo IV. Cartografía de la variable Pendientes, por áreas



Anexo V. Cartografía de la variable Rugosidad por área

