

TRABAJO FIN DE GRADO

Curso: 2024-2025

Tutor: Domingo Fernando Rasilla Álvarez

Codirector: Miguel Toribio Pérez

EL FENÓMENO DEL REVERDECIMIENTO DE LA VEGETACIÓN EN NAVARRA

THE PHENOMENON OF VEGETATION GREENING IN NAVARRA

SHEILA VIDARTE MARQUES

4 de julio de 2025

ÍNDICE

RESUMEN	2
1. ESTADO DE LA CUESTIÓN	3
1.1. Definición de reverdecimiento	3
1.2. Fundamentos biológicos del reverdecimiento: la clorofila y la actividad fotosintética	3
1.3. Herramientas para cuantificar el reverdecimiento: índice NDVI	5
1.4. Tendencias globales y regionales	5
1.5. Causas del reverdecimiento: cambio de usos de suelo vs. cambio climático	6
1.6. El reverdecimiento en la Península Ibérica	7
2. OBJETIVOS	8
3. FUENTES Y METODOLOGÍA	8
4. CARACTERIZACIÓN GEOGRÁFICA DE NAVARRA	13
4.1. Comarcalización geográfica	13
4.2. El relieve de Navarra	15
4.3. Clima y vegetación	16
4.4. Usos del suelo: aprovechamiento actual del territorio	20
5. RESULTADOS	23
5.1. Variabilidad espacial y estacional de NDVI	23
5.1.1. Relación con los usos del suelo	26
5.2. Tendencias entre 1981 y 2022	33
5.2.1. Tendencias NDVI	33
5.2.2. Tendencias climáticas	35
5.2.3. Cambios en los usos del suelo	38
5.2.4. Discusión de resultados	39
6. CONCLUSIONES	42
ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS	45
REFERENCIAS Y FUENTES	46

RESUMEN

Se analiza la evolución del índice de vegetación NDVI en la Comunidad Foral de Navarra durante el periodo 1981–2023 con el fin de identificar tendencias de reverdecimiento y sus posibles causas. A partir de datos satelitales, meteorológicos y de usos del suelo, se ha detectado reverdecimiento en todas las comarcas y estaciones del año. Este proceso responde tanto a factores climáticos -como el aumento de la temperatura y los cambios en la precipitación- como a transformaciones en el uso del territorio, tales como el abandono agrícola o procesos de roturación. Los resultados evidencian una dinámica espacial y temporal heterogénea que se aborda mediante una interpretación regional a escala comarcal.

Palabras clave: NDVI, reverdecimiento, Navarra

ABSTRACT

The evolution of the NDVI vegetation index in the Chartered Community of Navarra is analyzed for the period 1982–2023, with the aim of identifying greening trends and their potential causes. Using satellite, meteorological, and land-use data, greening has been detected across all counties and in every season of the year. This process is driven by climatic factors -such as rising temperatures and changes in precipitation- and territorial transformations, including agricultural abandonment and land-clearing practices. The results reveal a heterogeneous spatial and temporal dynamic, which is addressed through a regional interpretation at the county scale.

Key words: NDVI, greening, Navarra

1. ESTADO DE LA CUESTIÓN

1.1. Definición de reverdecimiento

La vegetación es uno de los componentes básicos de los ecosistemas terrestres, formando la base de la cadena trófica y garantizando la disponibilidad de energía y nutrientes para otros organismos. Tiene además un papel determinante en la conservación del agua y del suelo, en la biodiversidad, en la regulación del clima a escala regional y global e incluso en el bienestar humano. Desde la década de 1980, mediciones de satélite han mostrado una tendencia creciente en algunos índices espectrales relacionados con la vegetación, tendencia que a escala global se conoce como *greening* (Piao et al., 2020). El concepto de *greening* o “reverdecimiento” hace referencia tanto a un incremento de la superficie cubierta por la vegetación, como a un aumento de la actividad fotosintética de las plantas. La tendencia opuesta se conoce como *browning* o “pardeamiento”. Cuando la vegetación es más activa aumenta su verdor debido a la clorofila, un pigmento esencial durante la fotosíntesis. Las variaciones temporales y espaciales de esta actividad fotosintética pueden medirse a gran escala a través de imágenes satélite. La evaluación del reverdecimiento a escala global y regional es un tema de gran relevancia, pues a los beneficios antes citados se sumaría una posible mitigación del calentamiento global mediante el secuestro del CO₂ (Chen et al., 2019).

1.2. Fundamentos biológicos del reverdecimiento: la clorofila y la actividad fotosintética

Un pigmento es una molécula que absorbe luz y presenta un color. Las plantas tienen diversidad de pigmentos, tantos como colores vemos en ellas, pero tan solo los pigmentos fotosintéticos, gracias a sus enlaces moleculares dobles, son capaces de absorber luz solar y hacerla disponible para el aparato fotosintético. Las plantas terrestres pueden tener dos tipos de pigmentos fotosintéticos, las clorofilas y los carotenoides. Así mismo existen dos tipos de clorofila denominadas “Chl a” y “Chl b” que absorben longitudes de onda ligeramente diferentes dentro del espectro visible. La mayor parte de las plantas terrestres y algas verdes contienen ambas clorofilas. Las clorofilas, que son los principales pigmentos de las hojas, no absorben longitudes de onda entre los 500 y 600 nm, que son los fotones en la región verde en el espectro. Esta luz se refleja y es por esta razón por la que percibimos las hojas de color

verde. Por otro lado, los carotenoides reflejan longitudes de onda más largas y son percibidos como colores cálidos: amarillo, naranja y rojo.

Las plantas están compuestas por células eucariotas y la fotosíntesis tiene lugar en unos orgánulos denominados cloroplastos. Las clorofilas y los carotenoides se organizan en dos tipos de fotosistemas, protegidos por una membrana dentro de los cloroplastos. Uno de los fotosistemas se encarga de capturar la energía de la luz solar y energizar a los electrones de las moléculas de agua capturadas por la planta. Como resultado, la molécula de H_2O se divide en dos nuevas moléculas: oxígeno (O_2) e hidrógeno (H). El otro fotosistema también captura energía solar pero la utiliza para sintetizar $NADP^+$ (una molécula transportadora de electrones) en NADPH, que se usará en la fotosíntesis. De manera simultánea, los protones acumulados en el interior de la misma membrana son transportados al exterior proveyendo la energía necesaria para la síntesis de ATP. Finalmente, los cloroplastos utilizan la NADPH y el ATP para completar la fotosíntesis y producir carbohidratos.

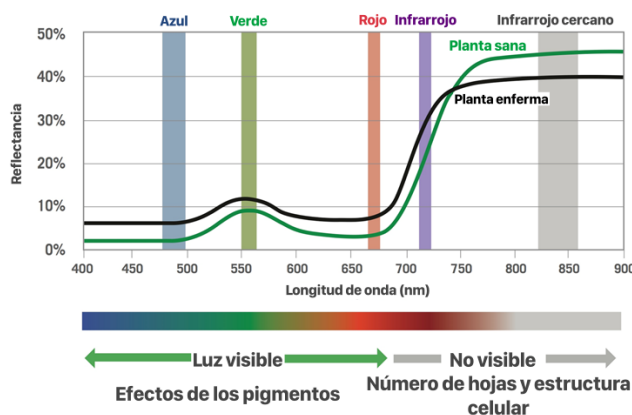


Figura 1.1. Curva de reflectancia estándar de la planta sana frente a la enferma

Fuente: AgEagle Aerial Systems Inc

crecimiento primavera y verano. De la misma manera, durante períodos de condiciones desfavorables como son los meses de invierno o las sequías, la producción de clorofila es menor y el verdor disminuye.

Cuando la disponibilidad de agua, luz solar y nutrientes es abundante, las plantas producen más clorofila para maximizar la fotosíntesis. En general, las plantas más activas y saludables tienen un metabolismo más eficiente, lo que se traduce en hojas bien hidratadas, con más clorofila y, por lo tanto, más verdes ya que cuanto más clorofila tiene una planta, más luz verde refleja (figura 1.1). El clima y la estacionalidad afecta al nivel de actividad, siendo los mayores periodos de

1.3. Herramientas para cuantificar el reverdecimiento: índice NDVI

Durante la fotosíntesis, la clorofila de las hojas absorbe la luz solar, la mayor parte de la cual se utiliza para alimentar las plantas, o se pierde en forma de calor. Sin embargo, una pequeña fracción de esa luz absorbida se reemite en forma de energía en las bandas del espectro “roja” e “infrarroja cercana” (NIR). Esta emisión de energía, invisible a simple vista, puede ser detectada y cuantificada por algunos satélites siempre que sus sensores sean sensibles a esas variaciones de energía en esas bandas del espectro. Combinando la información proporcionada por estas bandas se han diseñado una serie de índices espectrales, que son indicadores indirectos de la actividad fotosintética.

Uno de los más conocidos es el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés). Este índice se calcula según la fórmula $(\text{NIR}-\text{RED})/(\text{NIR}+\text{RED})$, donde la banda NIR corresponde a las ondas con longitudes entre los 400 y los 800 nanómetros y la banda RED a las ondas con longitudes entre 620 y 750 nanómetros. El resultado de la aplicación de la fórmula será un número que oscile entre -1 y 1. Su interpretación puede variar ligeramente en función de factores como la localización o la estación del año, pero en términos generales los valores más positivos serán indicadores de más densidad de la vegetación y/o vegetación más sana, es decir, es decir, un "*greening*". Una posible equivalencia es la utilizada por EOS Data Analytics (Sergieieva, 2025): agua, nieve y hielo para los valores negativos; rocas y suelo descubierto para los valores negativos cercanos a cero; áreas sin rocas, arena o nieve para valores positivos iguales o inferiores a 0,1; arbustos y praderas para valores entre 0,2 y 0,3; bosques templados y bosques tropicales para valores entre 0,6 y 0,8.

1.4. Tendencias globales y regionales

Desde que la tecnología satelital permitió monitorizar la vegetación a gran escala se ha constatado un aumento del valor medio global del índice NDVI. Pero este valor medio oculta contrastes espaciales evidentes. Un estudio basado en la calibración revisada del conjunto de datos satelitales MODIS (colección 6) demostró que la superficie cubierta por hojas había aumentado en 5,4 millones de km² entre 2000 y 2017, el equivalente a la selva amazónica. Se constató que estas tendencias eran más relevantes en áreas bajo explotación forestal o agrícola intensiva, así como en zonas poco antropizadas (Chen et al., 2019).

Las tendencias regionales indican que, en latitudes altas a partir de los 50°N, las regiones que han experimentado mayor reverdecimiento incluyen el N de Alaska y Canadá, las porciones del Ártico situadas en las latitudes más bajas del E de Canadá y Siberia y algunas zonas de Escandinavia. En contraposición, un 3% del territorio en estas latitudes experimentó tendencias opuestas (el fenómeno conocido como “pardeamiento”), siendo éste más intenso en los bosques boreales del N de América. Por otro lado, las latitudes templadas, entre los 25 y 50°N experimentaron a partir de los 2000 un reverdecimiento más intenso que las latitudes altas y contribuyeron con aproximadamente la mitad de la superficie foliar neta a nivel mundial entre 2000 y 2019. Los mayores contribuyentes fueron las áreas reforestadas en China y las superficies de explotación agrícola en la India, que supusieron en su conjunto un aumento del 30% al Índice de Área Foliar global (LAI de sus siglas en inglés). En tercer lugar, se estima que las regiones tropicales, entre los 25°S y los 25°N han contribuido con aproximadamente la cuarta parte de la superficie foliar mundial. Sin embargo, hay zonas con un “pardeamiento” significativo, tales como las regiones brasileñas de Cerrado y Caatinga y la superficie forestal de la República Democrática del Congo. Aún así, es difícil valorar las tendencias en estas regiones debido a la saturación de los índices de verdor en la vegetación densa y a la contaminación de las imágenes satélite por la nubosidad. En último lugar, las regiones extratropicales del Hemisferio Sur también han experimentado un *greening* aunque con una intensidad menor que en el resto de latitudes, siendo las regiones más significativas los cultivos intensivos del sur de Brasil y del sudeste de Australia (Piao et al., 2019).

1.5. Causas del reverdecimiento: cambio de usos de suelo vs. cambio climático

El aumento de los valores de los diferentes índices espectrales está vinculado no sólo a los cambios en temperatura y precipitación asociados al calentamiento global, sino también a los cambios en los usos del suelo.

El calentamiento global está incidiendo sobre todo en un aumento general de las temperaturas, que es más intenso en zonas de latitudes subpolares y polares (IPCC, 2021), ya que los patrones de cambio en las precipitaciones son mucho más variables a escala espacial. De hecho, la influencia que cada una de estas variables tiene en la vegetación depende de las características propias de cada región. Por ejemplo, en regiones húmedas y frías el aumento de

la temperatura es el factor que más influye en el incremento del NDVI, mientras que en las regiones áridas, lo es la precipitación (Lin et al., 2020).

Los usos del suelo constituyen otro de los factores determinantes en esa tendencia al reverdecimiento. Procesos como la deforestación, la urbanización, la expansión agrícola o, en sentido inverso, la colonización de antiguos campos de cultivo por matorral y bosque, a menudo como resultado del éxodo rural, modifican la estructura del paisaje y, por tanto, el grado de reverdecimiento, en función del tipo de vegetación dominante y su fenología. No obstante, estas transformaciones no responden a patrones homogéneos, sino que están condicionadas por el modelo de desarrollo socioeconómico, la planificación territorial y las políticas de gestión ambiental de cada región.

1.6. El reverdecimiento en la Península Ibérica

En la Península Ibérica también se ha detectado este reverdecimiento de la vegetación (Vicente-Serrano et al, 2020), si bien las variaciones en el verdor de la vegetación se han atribuido a diferentes procesos, desde los climáticos (en especial al aumento de las temperaturas y a la disminución de las precipitaciones) como a cambios en la cobertura del suelo. Desde el s.XX el abandono de la agricultura y de la ganadería de montaña, así como las políticas de reforestación en las montañas mediterráneas, han desencadenado una recuperación de la vegetación natural. Por el contrario, otras regiones de la península han experimentado cambios en sentido opuesto, en especial las áreas urbanas y turísticas en expansión (Hernandez, 2021).

Un estudio de las tendencias de las áreas forestales durante el periodo 2000-2009 indicó que las zonas con tendencias negativas predominan en el oeste de la península y en los Pirineos y se asocian a déficits de precipitación y a incendios forestales, como los registrados en Guadalajara y Huelva en 2004, que afectaron a 13000 y 28000 ha respectivamente. En contraste, las tendencias positivas se concentran en el este y el sureste ibérico, tras el aumento de la precipitación después de los periodos de sequía severa durante los años 90 (Giner et al., 2009). Sin embargo, es complicado analizar el reverdecimiento en la península desde una perspectiva que incluya todos sus agentes desencadenantes porque los estudios existentes abordan áreas geográficas parciales y no cubren todos los procesos que influyen en el *greening*.

2. OBJETIVOS

El objetivo general de este estudio es determinar si se está produciendo un proceso de reverdecimiento en la Comunidad Autónoma de Navarra a lo largo del periodo 1982–2023, a partir del análisis del índice de vegetación NDVI, y explorar qué procesos pueden explicarlo. Además, tomando en consideración anteriores afirmaciones acerca de los condicionamientos impuestos por el modelo de desarrollo socioeconómico y las políticas de gestión ambiental, el análisis de la relación entre el NDVI, el clima y los usos del suelo en Navarra se abordará desde una perspectiva comarcal, tomando en consideración la diversidad geográfica del territorio navarro. Para alcanzar ese objetivo general, se plantean varios objetivos específicos:

- En primer lugar, identificar si existen tendencias estadísticamente significativas en el comportamiento del NDVI durante el periodo de estudio.
- En segundo lugar, analizar si dichas tendencias presentan un patrón tanto espacial como temporal homogéneo.
- Finalmente, evaluar en qué medida estas variaciones pueden estar relacionadas con factores climáticos o con los cambios en los usos del suelo.

3. FUENTES Y METODOLOGÍA

La metodología empleada en este estudio de investigación se organizó en tres etapas fundamentales. En primer lugar, se realizó el planteamiento general del proyecto, definiendo los objetivos específicos, el área de estudio y la hipótesis central en torno a la evolución del índice NDVI en relación con variables territoriales y climáticas. Posteriormente, se llevó a cabo una verificación de la disponibilidad de información, identificando fuentes fiables y de acceso abierto. Esta etapa incluyó la evaluación de la calidad, cobertura temporal y resolución espacial de los datos. Finalmente, se diseñó la estructura del estudio en función de los objetivos y el tipo de análisis a realizar, estableciendo un orden lógico y coherente para los capítulos.

Para la redacción del marco teórico y la caracterización geográfica de Navarra se ha consultado fundamentalmente documentación bibliográfica. Complementariamente, para el análisis demográfico y de usos del suelo se han consultado y utilizado los datos del CORINE

Land Cover, del Observatorio Agrario de Navarra y del Instituto Nacional de Estadística. Por otro lado, el apartado de resultados se ha elaborado a partir del tratamiento estadístico de bases de datos de diferentes fuentes.

Por un lado, se ha contado con la base de datos *Índices de Vegetación para la Península Ibérica e Islas Baleares*, proporcionada por el LCSC. Esta base de datos incorpora las series temporales, entre 1981 y 2024, de varios índices de vegetación, con una resolución espacial de 1,1 km y una resolución temporal quincenal (Vicente-Serrano et al, 2023). El procedimiento seguido para la elaboración del material relativo al índice NDVI se detalla en el diagrama de flujo recogido en la figura 3.1.

Por un lado, los datos meteorológicos de las estaciones manuales representativas de cada comarca geográfica fueron extraídos de la base de datos de Meteo Navarra. Posteriormente se elaboraron los diagramas de Walter y Lieth en RStudio y se creó una composición cartográfica en un programa de edición de imágenes. Además, los datos meteorológicos correspondientes al conjunto del territorio de la Comunidad Foral de Navarra fueron extraídos de la base de datos Rejilla Observacional Con Interpolación Óptima (ROCIO), proporcionada por la Aemet. Esta base comprende valores diarios de temperatura (máxima y mínima) y precipitación acumulada en 24 horas para toda la España Peninsular e islas Baleares, con una resolución espacial de 5 x 5 km, elaborada a partir del conjunto de estaciones de la Agencia Estatal de Meteorología (Peral et al., 2017). El periodo disponible actualmente abarca desde 1951 hasta 2022. El procedimiento seguido para la elaboración del material relativo a la meteorología se detalla en el diagrama de flujo de la figura 3.2.

Para cuantificar la relación entre variables climáticas y el índice NDVI se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson, una medida estadística que evalúa la fuerza y dirección de una relación lineal entre dos variables cuantitativas. Se calcula mediante la fórmula:

$$r_{x,y} = \frac{cov(x,y)}{\sigma_x \sigma_y}$$

Es decir, se divide la covarianza entre el producto de las desviaciones típicas de x y de y. El valor de r oscila entre -1 y 1, siendo +1 una relación positiva perfecta, 0 la ausencia de relación lineal, y -1 una relación negativa perfecta.

Para determinar el signo de las tendencias temporales y su significación se utilizó la pendiente de la recta de regresión como indicador de tendencias temporales. Se calcula mediante la fórmula “ $y = ax + b$ ”, donde x es la variable independiente (el tiempo), y la variable dependiente (NDVI, clima...), a es la pendiente de la recta y b es la intersección con el eje y .

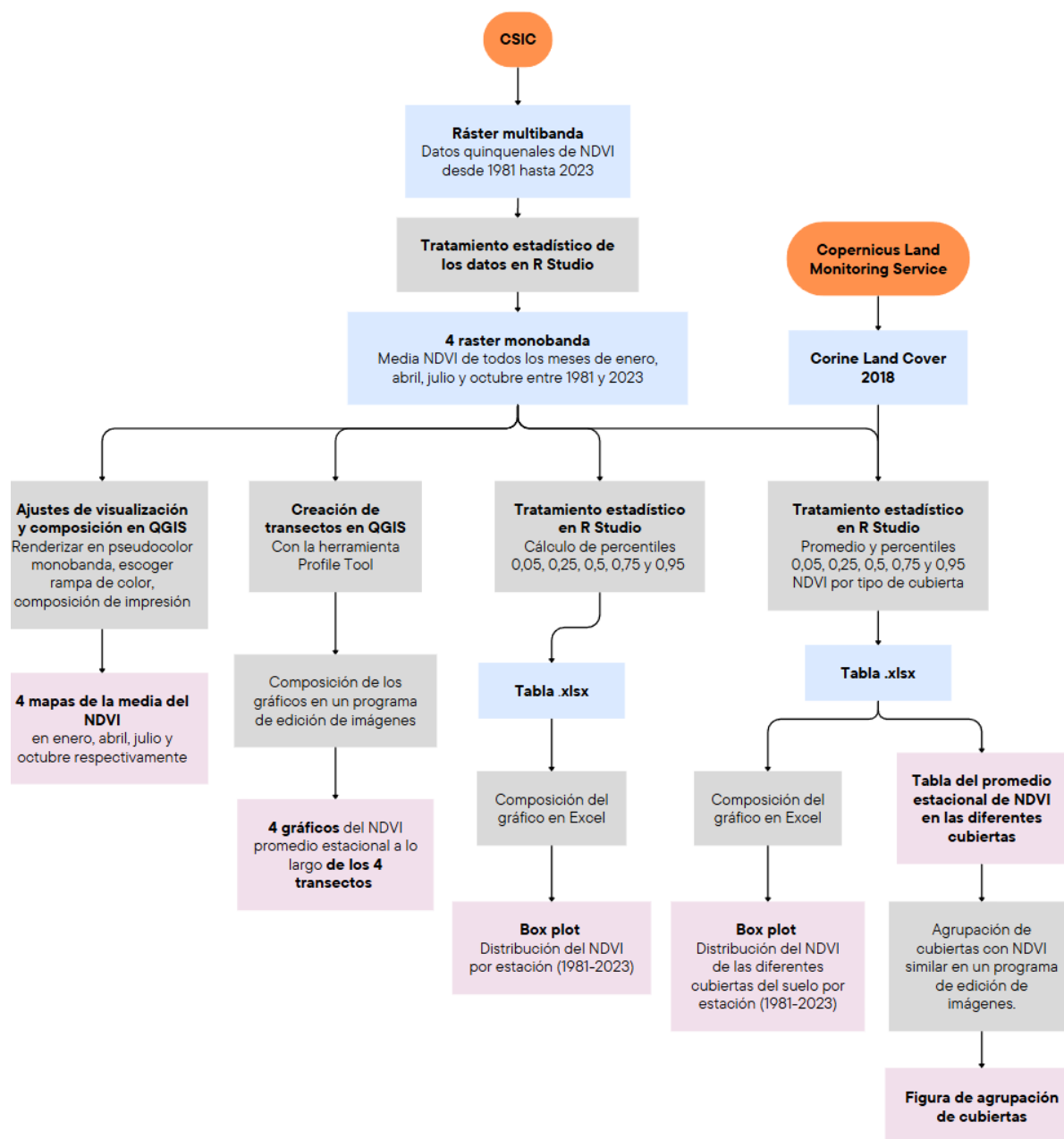


Figura 3.1. Diagrama de flujo

Fuente: elaboración propia

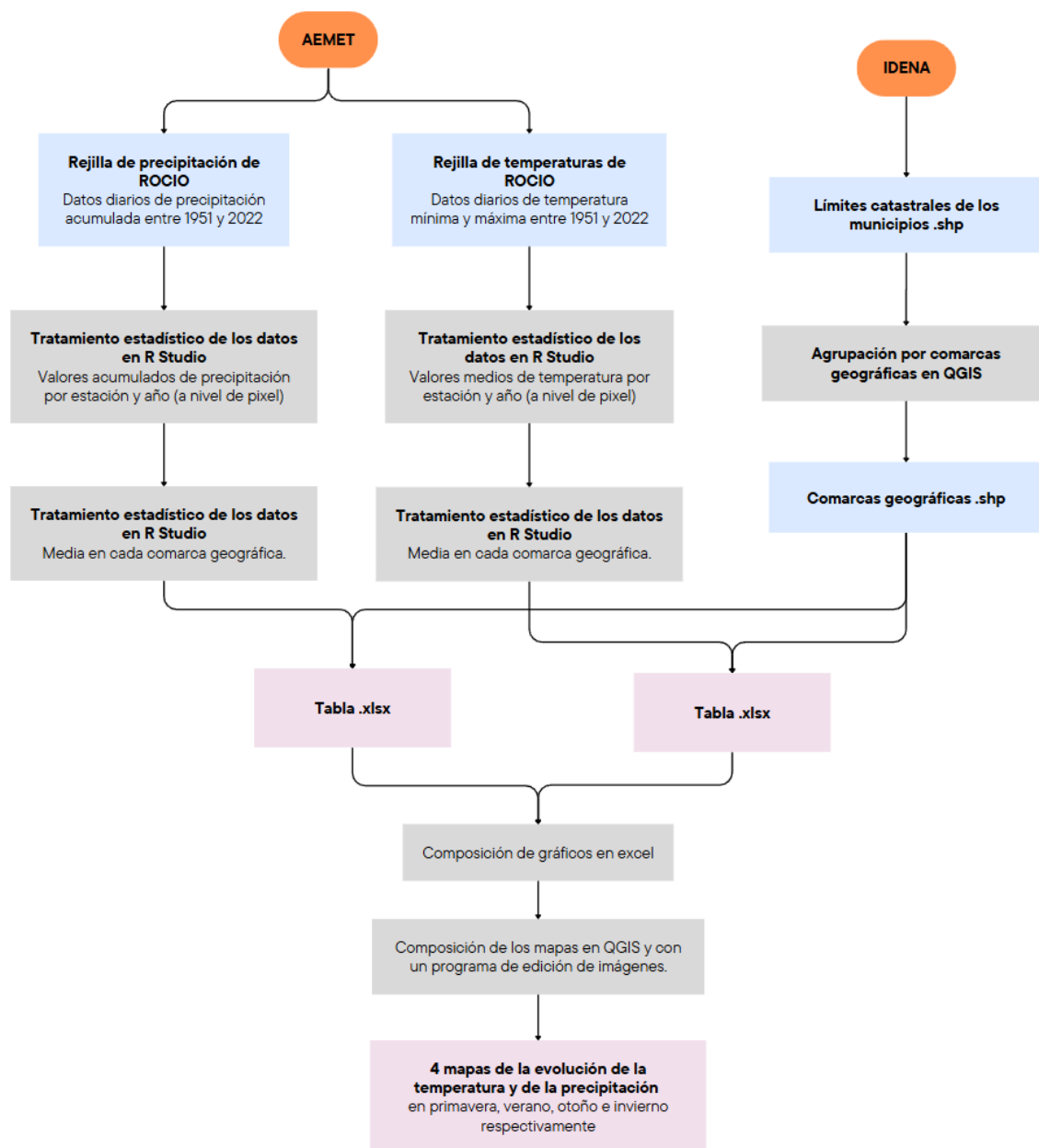


Figura 3.2. Diagrama de flujo

Fuente: elaboración propia

Para incorporar los usos del territorio al trabajo se analizó la base de datos CORINE Land Cover (CLC, *Coordination of Information on the Environment*). Esta base de datos, utilizada en numerosos trabajos de evaluación del territorio, fue elaborada en el marco de un proyecto de la Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA). Esta base de datos surge de la necesidad de disponer de información armonizada, a partir de una única metodología, sobre la ocupación y el uso del suelo en el continente europeo. En respuesta a esta necesidad, en 1990 se elaboró

el primer conjunto de datos CORINE Land Cover, que se actualiza cada seis años (la más reciente data de 2018; la correspondiente a 2024 está siendo elaborada en este momento), convirtiéndose por ello en un componente fundamental del Servicio de Vigilancia Terrestre Copernicus de la Agencia Europea de Medio Ambiente. En este trabajo se han empleado dos conjuntos, correspondientes a los años 1990 y 2018, en formato ráster, con una resolución de 100 m, descargados desde la página web del servicio Copernicus de la UE. La metodología empleada para el tratamiento de los datos de usos del suelo se expone a continuación.

Para obtener una representación cartográfica que muestre los cambios acontecidos en la cobertura y los usos del suelo se han empleado los archivos en formato *GeoPackage* del Corine Land Cover (CLC) correspondientes a los años 1990, el más antiguo disponible, y 2018, el más reciente. Así mismo, también se han utilizado las capas en formato *shapefile* de los límites administrativos de Navarra y de sus municipios. Una vez acopiados los archivos necesarios, el procedimiento en QGIS sería el siguiente.

En primer lugar, se crea un nuevo proyecto, se define el sistema de referencia de coordenadas, como EPSG:25830 - ETRS89 / UTM zone 30N y se cargan las capas. Como el CLC abarca toda la península, se ha de recortar al límite de la Comunidad Foral. Para ello, se emplea la herramienta “cortar” dentro de las “herramientas de geoprocso” y se define como capa de entrada el CLC de 1990 y como capa de salida el polígono de Navarra. Se repite la operación con el CLC de 2018.

En segundo lugar se realiza una reclasificación para facilitar la interpretación cartográfica posterior. Se simplifican las 44 clases de ambos CLC al primer nivel, utilizando como guía la leyenda que viene como fichero de descarga del GDB. Para ello, en la calculadora de campos se escribe la orden “left(to_string("CLC1990"), 1)”, que devolverá el primer dígito de cada número del campo original. Algunas superficies se han considerado no representativas para el estudio del *greening*, y se han descartado en la representación cartográfica: espacios abiertos con poca o sin vegetación (3.3); zonas húmedas (4), que incluye zonas húmedas continentales y zonas húmedas litorales; y superficies de agua (5), que incluye aguas continentales y aguas marinas. Como la categoría de espacios abiertos con poca o sin vegetación comparte primer nivel con otras categorías que sí son representativas para el estudio, se sustituyó el valor 3 de dichos polígonos por un número entero diferente de 1, 2 o 3, en este caso 0. A continuación, se

repite el proceso con el CLC de 2018. En este punto se dispone de cada CLC reclasificado en 6 categorías del 0 al 5, de las cuales son representativas las 1, 2 y 3.

En tercer lugar, para poder operar a nivel de píxel y calcular la diferencia entre las coberturas de los dos años, se lleva a cabo un proceso de rasterización y reasignación de los valores de píxel. Se rasterizan las capas y se guardan como archivo temporal. A continuación, se guardan los archivos temporales en el directorio de trabajo especificando como *no data* los píxeles con valores 0, 4 y 5. En este punto, ya se puede abrir la calculadora raster y escribir la operación “raster_1990” *10 - ”raster_2018”. El resultado final será un nuevo raster con 9 categorías (figura 5.9.), compuestas por todas las combinaciones posibles entre los niveles 1, 2 y 3, es decir: 11, 12, 13, 21, 22, 23, 31, 32, 33 (figura 3.3.).

	Artificial (1) Agrícola (2) Bosque (3)		
Artificial (1)	11	12	13
Agrícola (2)	21	22	23
Bosque (3)	31	32	33

Figura 3.3. Combinaciones de cambios de usos

Fuente: elaboración propia

4. CARACTERIZACIÓN GEOGRÁFICA DE NAVARRA

La Comunidad Foral de Navarra se localiza en la parte septentrional de la Península Ibérica y limita con País Vasco y Francia por el Norte, y con Aragón y la Rioja por el Sur. Tiene una extensión de 10.391 km² que suponen el 2,05% del total de la superficie de España. A pesar de su reducido tamaño es un territorio especialmente diverso, y es necesario una aproximación a esa diversidad para entender el fenómeno del reverdecimiento en Navarra.

4.1. Comarcalización geográfica

A la hora de establecer unidades territoriales que ayuden a comprender y explicar esta diversidad se suele recurrir a una clasificación elaborada por Floristán y Mensua (1986), que combina relieve, clima y vegetación. Esta clasificación distingue dos zonas contrastadas: al Norte, la Montaña, y al Sur, la Ribera, y entre ambas un área de transición denominada Navarra Media. Cada región está dividida a su vez en distintas comarcas.



Figura 4.1. Comarcas geográficas

Fuente: Atlas de Navarra, Caja de Ahorros de Navarra, 1977.

La Montaña se divide en tres subáreas. La primera de ellas se sitúa al noroeste y está compuesta por las comarcas de El Corredor de la Barranca al sur, entre las sierras de Aralar y Urbasa, los Valles Cantábricos y los Valles Meridionales, cuya separación está definida por la cadena divisoria Belate-Azpirotz. La segunda subárea está compuesta por las comarcas Valles Pirenaicos Centrales, influenciada por el mar Cantábrico, y por los Valles Pirenaicos Orientales. Finalmente, la tercera subárea, también conocida como Cuencas Prepirenaicas, está compuesta por las comarcas de Cuenca de Pamplona y Cuenca de Lumbier-Aoiz, cuyo límite son las sierras de Tajonar y Góngora. La Navarra Media está separada de la Montaña por las sierras de Urbasa, Andía, el Perdón, Alaiz, Izco y Leire. Las comarcas que la componen son la Navarra Media Occidental y la Navarra Media Oriental, separadas la una de la otra por el río Arga. Finalmente, la Ribera constituye la región más meridional, y está compuesta por las comarcas de la Ribera Occidental y la Ribera Tudelana (Pejenaute J.M., 2002).

4.2. El relieve de Navarra

La comarcalización antes citada se sustenta fundamentalmente, en el relieve. Su diversidad resulta, en primer lugar, de la pertenencia de Navarra a tres de las grandes morfoestructuras del territorio español: la Cordillera Cantábrica, al NW, el Pirineo, al NE, y la Depresión del Ebro, al S. Desde el punto de vista topográfico, esta diversidad diferencia tres grandes zonas: una franja montañosa al N, la Navarra más llana, al S, y una región de transición, en el centro, que separa las anteriores y tiene características intermedias incluyendo tanto llanuras como montañas (figura 4.3.)

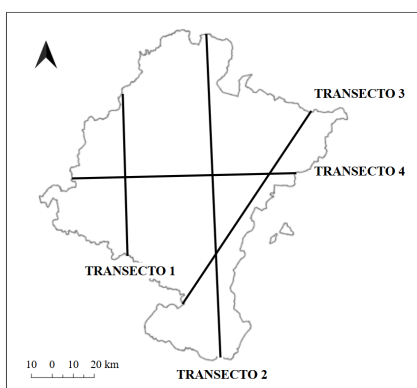


Figura 4.2. Transectos
Fuente: elaboración propia

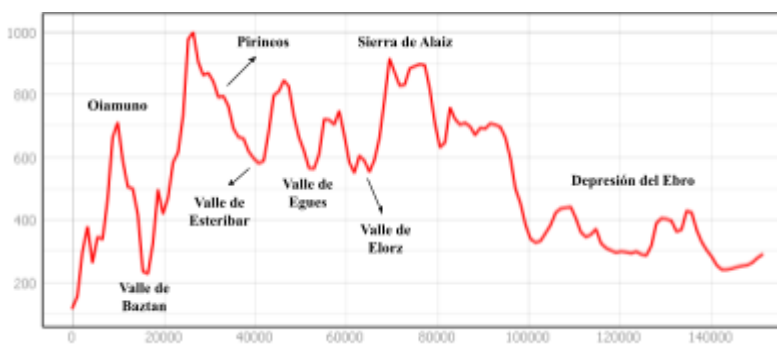


Figura 4.3. Perfil altitudinal del transecto 2
Fuente: elaboración propia a partir del MDE del IGN

La zona montañosa septentrional está caracterizada por el extremo oriental de los Montes Vascos y el occidental de los Pirineos. Aunque la mayor parte de su superficie se encuentra entre los 600 y los 1200 m, las mayores altitudes se sitúan en el extremo más oriental, la Mesa de los Tres Reyes (2446 m), mientras las menores ocurren en la cuenca del río Bidasoa (Valle del Baztán, 77 m). Aunque en líneas generales estos relieves son producto de la orogenia Alpina, también aparecen algunos macizos hercinianos, caracterizados por cumbres redondeadas, valles encajonados y ríos de gran pendiente y capacidad erosiva, como el macizo Cinco Villas, el de Quinto Real o de Alduides y el de Oroz-Betelu, también conocido como Arce.

La región central ocupa una franja extendida de Oeste a Este e incluye desde la Sierra de La población, en el extremo occidental, y la de Leyre, en el oriental. La mayor parte de la superficie de esta región se encuentra entre los 300 y los 600 m, pero las mayores altitudes se

sitúan en las Sierras de Urbasa y Andía, al NW, y la de Alaiz, al E. En este sector también aparecen una serie de corredores con relieve más llano, a unos 500 m sobre el nivel del mar, que responden al nombre de Cuencas Prepirenaicas.

En tercer lugar, la Navarra llana del S ocupa la Cuenca Sedimentaria del Ebro. La mayor parte de la superficie de esta región se sitúa entre los 200 y los 500 m, altitud que solo es superada por los montes de Cierzo (662 m) y La Bardena Negra (615 m). Este sector comprende algunas estructuras halocinéticas (pliegues anticlinales de yeso y diapiros con materiales del Keuper), por ejemplo en Estella o Salinas de Oro, si bien predomina un relieve aclinal, como Las Bardenas, donde encontramos paisajes tan característicos como los *badlands*, sobre el que se ubican morfologías de origen aluvial, en especial terrazas y glaciares en las proximidades de los cursos fluviales.

4.3. Clima y vegetación

Navarra también constituye uno de los territorios de la Península Ibérica con mayor diversidad climática en relación a su superficie (figuras 4.4. y 4.5.). A lo largo de la comunidad autónoma tiene lugar una transición Norte-Sur donde el clima oceánico evoluciona hacia el clima mediterráneo meridional. Esta diversidad resulta de la interacción entre una dinámica atmosférica propia del margen meridional de las latitudes medias, su situación geográfica en la Península Ibérica, y su propia complejidad orográfica.

Navarra se sitúa en la zona templada del hemisferio Norte, entre los 41 y 43°N, en la confluencia de masas de aire polares y tropicales, cuya frecuencia de aparición varía a lo largo de todo el año, siendo predominantes las primeras durante el semestre invernal y las segundas durante el semestre estival. Su desarrollo latitudinal y la disposición W-E de las principales alineaciones montañosas implica un marcado gradiente latitudinal en las temperaturas y en las precipitaciones y una progresiva degradación de las influencias moderadoras del mar, que acentúa la continentalidad en las comarcas meridionales de la región (Pejenaute J.M., 2002). Como consecuencia de ello, en Navarra confluyen dos de las principales regiones biogeográficas de Europa, la Eurosiberiana, al N, y la Mediterránea, al S.

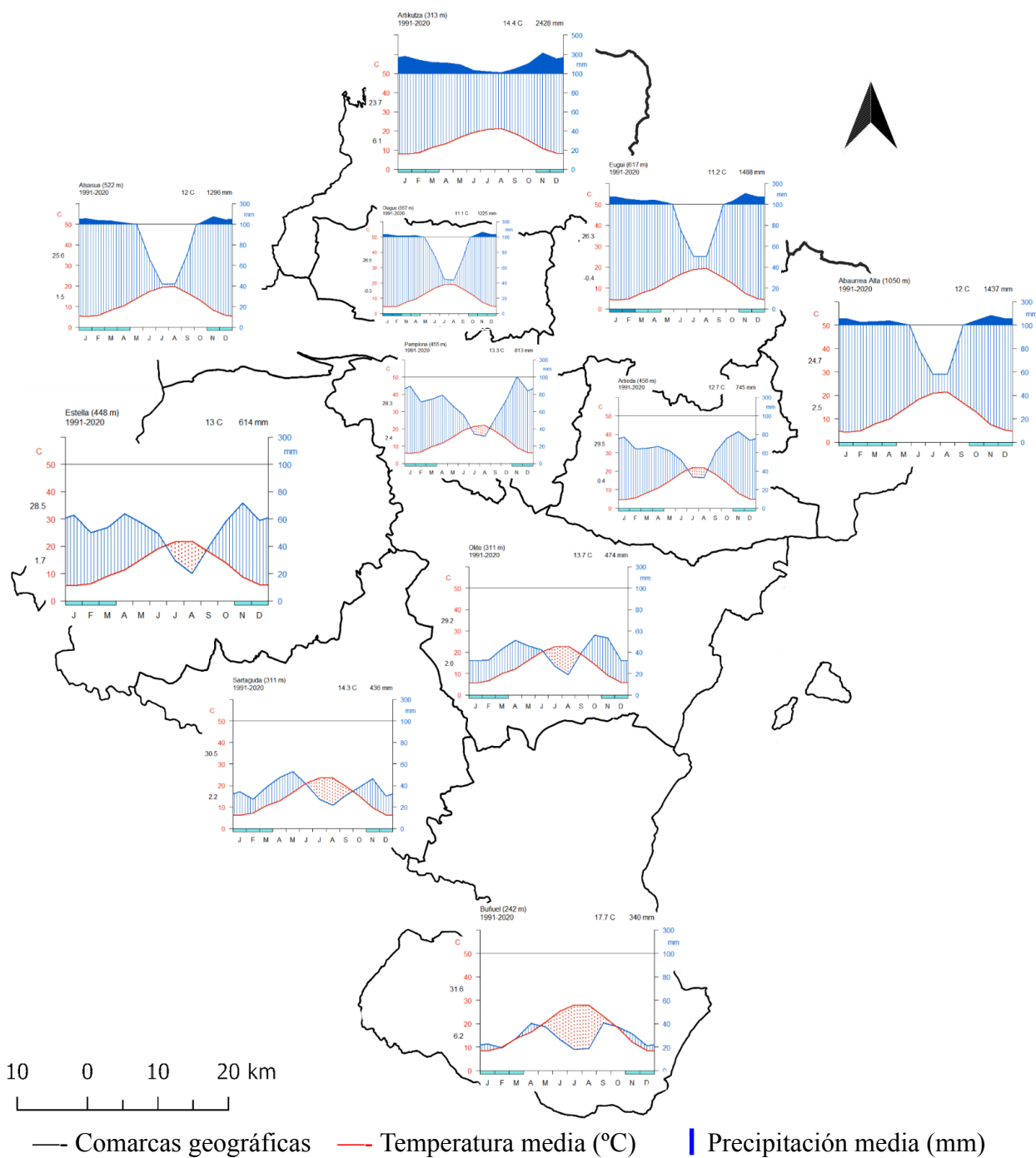


Figura 4.4. Diagramas de Walter y Lieth de estaciones manuales representativas de cada comarca geográfica (1991-2020).

Fuente: elaboración propia a partir de la base de datos de Meteo Navarra.

La distribución de las precipitaciones muestra un gradiente N-S relacionado con la lejanía a la principal fuente de humedad, que es el Mar Cantábrico. En las zonas más húmedas, ubicadas en los Valles Cantábricos y en el Pirineo Occidental, las precipitaciones superan los 2000 mm, mostrando una distribución anual con un mínimo relativo estival y un máximo a final del otoño y comienzo del invierno. A medida que nos desplazamos hacia el S, la precipitación anual disminuye, apareciendo uno o varios meses secos en verano y disminuyendo sobre todo la precipitación invernal. En las comarcas situadas en el Valle del Ebro las precipitaciones anuales oscilan entre los 300 y 500 mm, con un régimen pluviométrico equinoccial, con máximos en primavera y otoño y mínimos en verano e invierno.

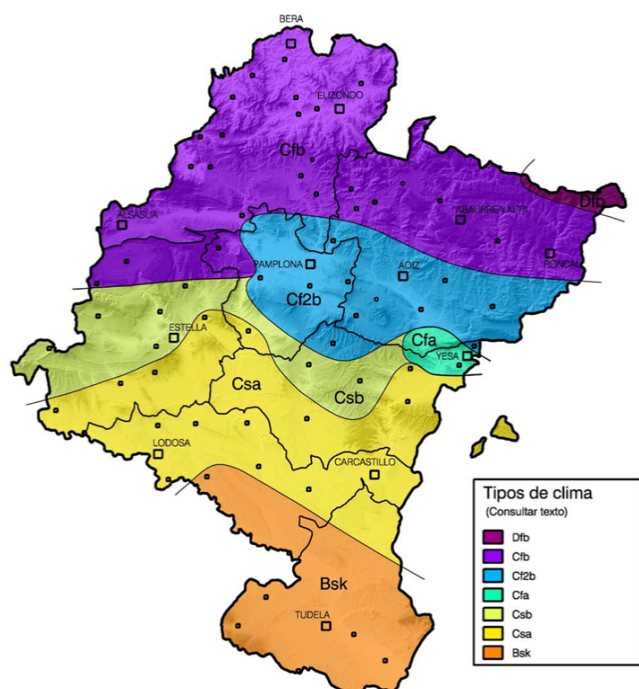


Figura 4.5. Clasificación climática de Köppen.

Fuente: Agencia Estatal de Meteorología

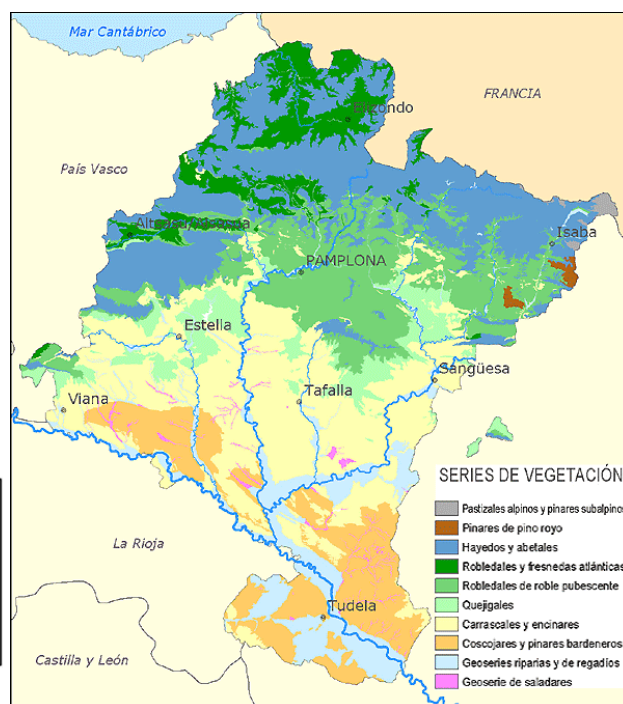


Figura 4.6. Series de vegetación

Fuente: Departamento de Agricultura, Ganadería y Alimentación del Gobierno de Navarra

En relación con el régimen térmico, dos factores explican la diversidad de temperaturas: la distancia al mar, que regula el nivel de continentalidad, y la altitud. A medida que nos alejamos del mar, la amplitud térmica anual y diaria aumenta; por ello, las comarcas más meridionales de Navarra experimentan inviernos fríos y veranos cálidos, mientras que las

zonas abiertas al Mar Cantábrico disfrutaban de un régimen térmico mucho más moderado. Por su parte, las comarcas del Pirineo son frías en invierno, pero relativamente templadas en verano.

Según la clasificación climática de Köppen aplicada a Navarra se distinguen 3 grupos fundamentales de climas: climas áridos cálidos (Bs), climas oceánicos (Cf) y climas mediterráneos (Cs). A su vez, cada uno de estos climas cuenta con diferentes variantes en función de criterios de precipitación y temperatura.

La vertiente cantábrica y algunos valles al sur de la divisoria de aguas Belate-Azpirotz (por ejemplo, valle del Arakil, Urbasa, el norte de la Cuenca de Pamplona y el Pirineo) disfrutaban de un clima templado oceánico Cfb. Su régimen térmico está caracterizado por tener al menos cuatro meses en los que la temperatura media supera los 10°C, y experimentar veranos frescos en los que el mes más cálido no supera los 22°C de media. Las precipitaciones son abundantes y constantes a lo largo del año, con mínimo relativo en verano. La vegetación natural propia de este clima en estas zonas de Navarra es la típica de la región biogeográfica Eurosiberiana: el bosque templado de roble albar (*Quercus robur* y *Quercus petraea*), haya (*Fagus sylvatica*) y abeto (*Abies alba*).

Al sur de las alineaciones montañosas que comienzan en la Sierra de Lapoblación y finaliza en la Sierra de Leyre, se desarrolla un clima mediterráneo. Al igual que en el norte, al menos cuatro meses tienen una media superior a 10°C, sin embargo, en este caso, los veranos son cálidos y secos, lo que significa que la media del mes más cálido supera los 22°C, que existen más de dos meses de sequía estival y que al menos uno de los meses del año tiene una precipitación inferior a los 30 mm. Esta zona pertenece a la región biogeográfica mediterránea, en la que la vegetación natural es el bosque mediterráneo de encinares (*Quercus rotundifolia*). Entre ambas se sitúa una zona de transición en la que hay una progresiva reducción de las precipitaciones y un aumento de la temperatura siguiendo un gradiente W-E, aunque matizado por la altitud y la orientación. Esta zona de transición corresponde a los tipos Cf2b, Csb y Cfa. Como corresponde a una zona de transición, la vegetación es una mezcla de especies eurosiberianas y mediterráneas, con predominio de los robledales de *Quercus pubescens*, los quejigales de *Quercus faginea* y los encinares de *Quercus rotundifolia*.

Los climas secos se caracterizan por tener unas precipitaciones anuales inferiores a la evapotranspiración potencial anual, es decir, un déficit hídrico. El extremo meridional de Navarra experimenta un clima estepario frío Bsk. El régimen de temperaturas se caracteriza por una media anual inferior a los 18°C, mientras que la precipitación anual es inferior a la evapotranspiración potencial anual. La vegetación natural característica son los pinares de *Pinus halepensis* y los matorrales de coscoja (*Quercus coccifera*), tomillo (*Thymus vulgaris*) y romero (*Rosmarinus officinalis*).

Además, en la parte nororiental, hay una pequeña región que por su elevada altitud presenta un clima de montaña (macizo de Larra y en la Mesa de los Tres Reyes), que aparece clasificado como Dfb. Tiene inviernos muy fríos y veranos frescos, de manera que la temperatura media del mes más frío es inferior a los -3°C, la temperatura media del mes más cálido supera los 10°C y hay menos de cuatro meses que superan los 10°C de media. Las precipitaciones son abundantes todo el año y en invierno tienen lugar en forma de nieve. La vegetación natural propia son los pastizales alpinos y los bosques de alta montaña de pino negro (*Pinus uncinata*).

4.4. Usos del suelo: aprovechamiento actual del territorio

Los usos del suelo actuales son el resultado de unos condicionantes naturales, derivados de la conjunción de factores físicos (relieve, clima, vegetación) y de una larga historia de aprovechamiento humano sobre el territorio. Sin embargo, como cabría esperar, la diversidad de espacios geográficos se traduce en un aprovechamiento desigual del territorio, de modo que las áreas con condiciones orográficas y climáticas más favorables concentran una superficie de cultivo significativamente mayor que las zonas montañosas y predominantemente boscosas (figura 4.7.). En la actualidad, según los datos del Observatorio Agrario del Gobierno de Navarra, la mayor parte del territorio de la comunidad foral está ocupada por arbolado (37%), cultivos de secano (21%) y matorral (15%). Los cultivos de regadío y los pastizales representan a su vez un 9 y un 8% de la superficie total, respectivamente.

En las comarcas de La Montaña, más del 60% de la superficie es arbolada. Los pastizales representan entre el 10 y el 23%, que suponen los datos más elevados de toda la comunidad autónoma. Las comarcas de la Navarra Media y la Cuenca de Pamplona tienen casi la mitad de

superficie arbolada, que el resto de comarcas de la Montaña. Esta superficie es igualada o superada por los cultivos de secano que en estas áreas ocupan en torno a la tercera parte del territorio. El resto de la superficie está ocupada por matorrales y espacios construídos o sin vegetación. Por último, la zona de la Ribera es la que tiene mayor superficie de cultivos y cultivos de regadío, y menor superficie arbolada. Los cultivos de secano son más frecuentes que en la Montaña pero menos que en la Navarra Media y la Cuenca de Pamplona. En resumen, el aprovechamiento del territorio navarro presenta un gradiente Norte a Sur, donde las actividades se adaptan a las características orográficas y climáticas de cada región. Conforme se desciende latitudinalmente, se va produciendo una disminución de las zonas arboladas y un aumento progresivo de las áreas de cultivo.

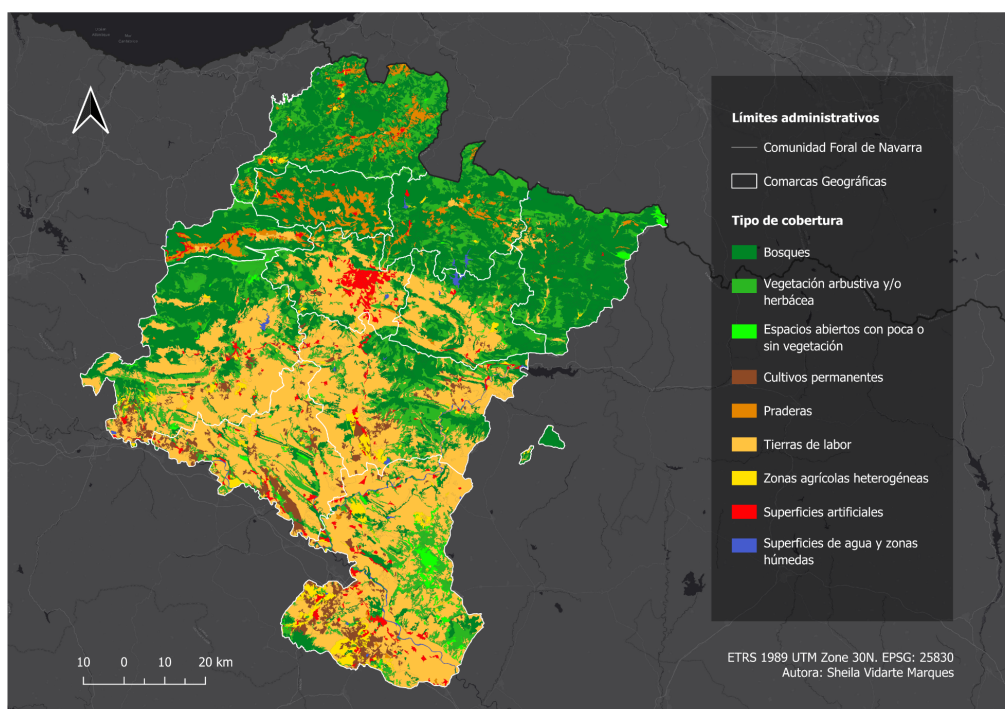


Figura 4.7. Usos del suelo según el Corine Land Cover de 2018

Fuente: elaboración propia a partir de los datos de *European Union's Copernicus Land Monitoring Service information*.

Según los datos del Gobierno de Navarra en 2023, el 63 % de la superficie cultivada en Navarra fue de secano y el 37% de regadío. Los cereales dominaron en el secano, ocupando el 73% de la superficie, especialmente en Ribera Alta, Tierra Estella y Navarra Media, que concentraron el 62,2% del total. En el regadío, destacan las hortalizas, que representaron el 21,6%. Los forrajes fueron el segundo cultivo herbáceo en importancia, con 33.874 hectáreas,

concentradas sobre todo en Ribera Alta y Ribera Baja. Navarra Media lideró la superficie de cultivos industriales como girasol y soja, con el 28,6%. El viñedo y los frutales se localizaron principalmente en las comarcas de Ribera Alta y Baja, donde encuentran mejores condiciones para su desarrollo (Departamento de Desarrollo Rural y Medio Ambiente, 2025).

Ya vistas las características físico-climáticas de Navarra, resulta conveniente realizar un breve análisis sobre los cambios que ha experimentado la población, que en muchos casos son causa de cambios en los usos del suelo, y el índice NDVI. Desde 1996, primer año disponible del Padrón Municipal Continuo publicado por el Instituto Nacional de Estadística, hasta 2024, Navarra ha pasado de tener poco más de 520000 habitantes, a tener más de 678000, es decir, su población ha crecido en 28 años un 30%. Sin embargo, este crecimiento no ha sido uniforme, pues mientras que unos municipios han ganado población, otros la han perdido (figura 4.8.).

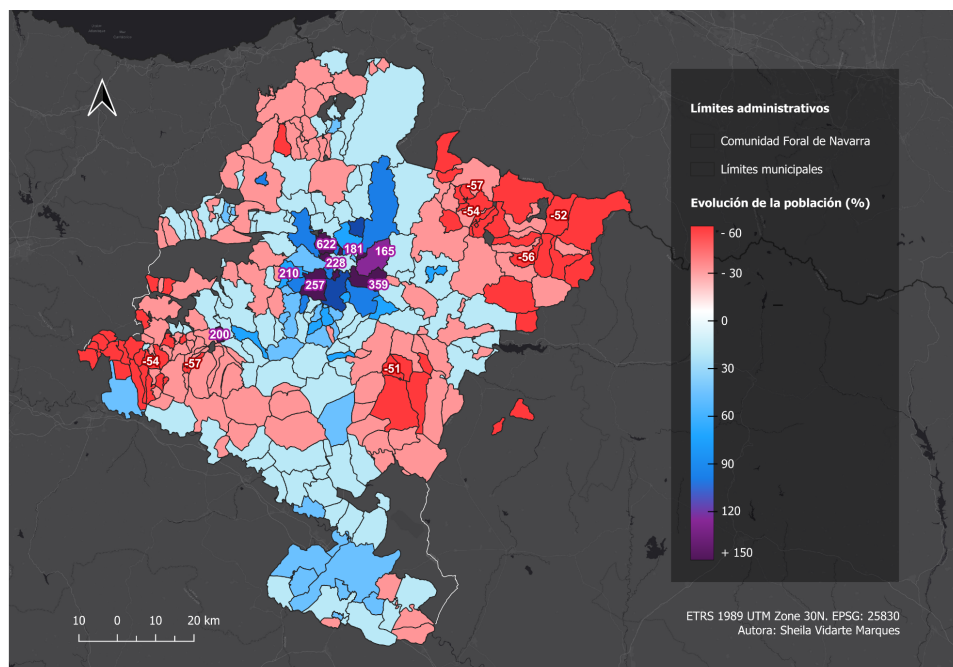


Figura 4.8. Evolución de la población (%) entre 1996 y 2024

Fuente: elaboración propia a partir de los datos del INE

A pesar de la limitada extensión de Navarra, esta cuenta con una red de ciudades y núcleos de población jerarquizados e interconectados: Pamplona y su área metropolitana, las cabeceras comarcales, siendo Tudela el mayor exponente, y otras pequeñas ciudades. La distribución general de pérdidas y ganancias indica que la población tiende hacia un crecimiento mayor en la ciudad de Pamplona y en su área metropolitana. Berrioplano, en la periferia de Pamplona, es con diferencia el municipio que más habitantes ha ganado, seguido de Zizur y Aranguren. Además, los municipios periurbanos así como los pertenecientes a las zonas más llanas de la cuenca del Ebro, mantienen un crecimiento activo pero menos intenso. Por el contrario, los municipios que han sufrido más despoblación parecen coincidir con aquellas regiones con una orografía más abrupta: Pirineo y Prepirineo, Montes Vascos, Montejurra y Sierra de Codes. Orbara, Gorza, Arike y Desajo son los municipios que más población han perdido.

5. RESULTADOS

5.1. Variabilidad espacial y estacional de NDVI

Como consecuencia de la diversidad geográfica de la Comunidad Foral de Navarra, los valores del índice NDVI muestran una notable variabilidad espacial y temporal. Para mostrar su variabilidad temporal se procedió al cálculo de los valores medios estacionales del índice NDVI en Navarra y de su dispersión, mostrando ambas características mediante un gráfico de caja y bigotes (“*box plot*”). Este gráfico muestra el promedio, la mediana y los percentiles 5, 25, 75 y 95 del índice NDVI durante los meses centrales de cada estación del año desde 1981 hasta 2023 (figura 5.1.).

Como es normal en las latitudes medias, los valores promedio del índice NDVI son más altos en primavera (0,37) y en verano (0,36), los meses con condiciones de luz y temperatura más favorables para la producción vegetal; los meses de otoño e invierno constituyen un periodo de descanso de la vegetación, por lo que sus valores promedios son inferiores (otoño 0,27 e invierno 0,24). Además, la dispersión de los valores alrededor del valor promedio es mayor en verano que en primavera, al igual que en otoño frente al invierno. Esta circunstancia se podría explicar por el efecto que determinados episodios de naturaleza climática (por

ejemplo sequías o veranos frescos) ejercen sobre la vegetación, prolongando o acortando la producción vegetal. Es también reseñable la asimetría positiva en todas las estaciones, ya que los percentiles 75 y 95 se alejan más de la mediana que los percentiles 05 y 25, es decir, existen más valores altos extremos que valores bajos extremos.

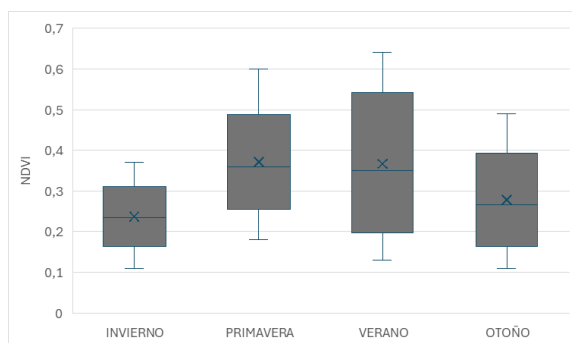


Figura 5.1. Distribución del NDVI por estación (1981-2023)

Fuente: elaboración propia a partir de la base de datos *Índices de Vegetación para la Península Ibérica e Islas Baleares*

Seguidamente se procedió a un análisis de la variabilidad espacial mediante la representación cartográfica de los valores promedio de NDVI a lo largo de los meses centrales de cada estación del año. En ella se observan evidentes contrastes espaciales así como diferencias en los valores máximos de NDVI entre estaciones.

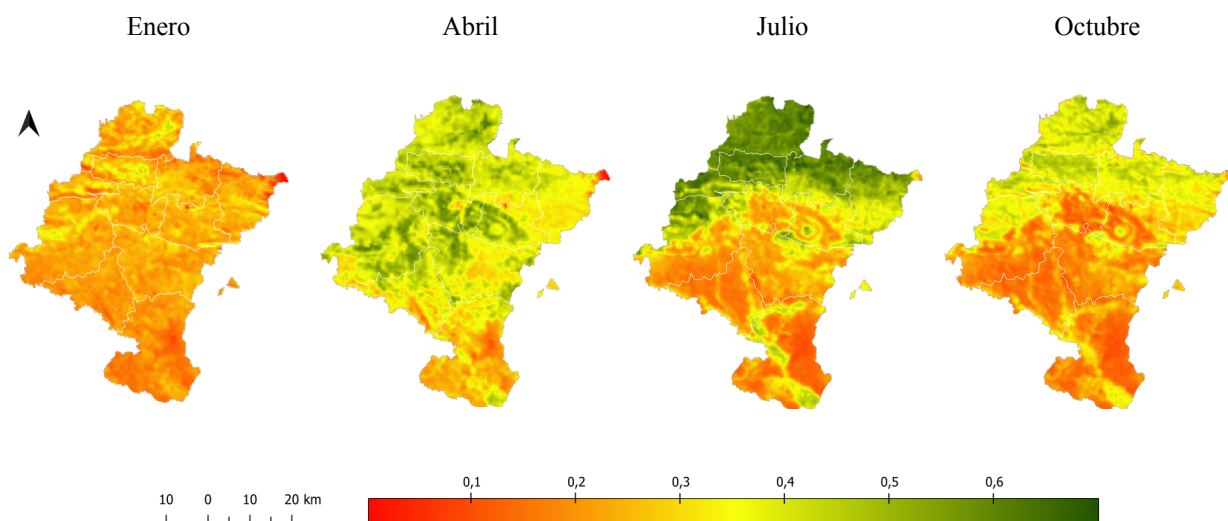


Figura 5.2. Media de los valores del índice NDVI por estación entre 1981 y 2023

Fuente: elaboración propia a partir de la base de datos *Índices de Vegetación para la Península Ibérica e Islas Baleares*.

Como se ha evidenciado en el gráfico de caja y bigotes, el índice NDVI muestra valores bajos en enero y una distribución relativamente homogénea; no hay ningún pixel que supere el valor de 0,50 en toda el área de estudio. Esto puede relacionarse con la disminución de la actividad fotosintética de las plantas en periodos de frío y escasez de luz solar, que afectaría por igual a todas las plantas. Como también se señaló previamente, es la época del año que ha registrado contrastes espaciales menos acusados. Los valores más altos tienen lugar en áreas aisladas concentradas sobre todo en la franja noroccidental de Navarra y son en su mayoría praderas en el valle del Baztán y en Arraitz. Por el contrario, los valores más bajos no se asocian a masas de vegetación, sino a las cumbres de los Pirineos, la sierra de Andía, los Montes Vascos, frecuentemente cubiertas de nieve, y puntualmente en masas de agua, como el embalse de Itoiz, todos ellos con valores entre -0,5 y 0.

En abril se observa un aumento generalizado de los valores NDVI en toda la región, siendo su valor máximo 0,63 aunque los valores más frecuentes se encuentran en el intervalo de 0,30 a 0,44. Otro rasgo significativo, ya detectado en el gráfico de caja y bigotes, es el aumento de los contrastes espaciales con respecto a enero. Entre las zonas con mayor índice NDVI destacan al N el prepirineo, desde Erro hasta el puerto de Larrau y el centro de Navarra, donde predominan los cultivos de cereal, y los regadíos del valle del Valle del Ebro.

Julio es la estación con valores más altos (máximo de 0,70), pero a diferencia de la primavera, en verano no hay un aumento generalizado y uniforme del índice NDVI, ya que en unas comarcas el verdor se intensifica pero en otras disminuye. De hecho, es el mes que presenta un contraste espacial más evidente, con una clara dicotomía entre los valles Cantábricos, cuyos índices más frecuentes oscilan entre 0,54 y 0,62, y la Ribera Navarra, con un NDVI por debajo de 0,28. Si trazamos una línea imaginaria que discurre de Oeste a Este por la Sierra de Codes, la Sierra de Andía, el límite septentrional de la Cuenca de Pamplona y el Prepirineo, encontramos los máximos al Norte y los mínimos al Sur.

En el mes de octubre el índice desciende de manera generalizada en toda el área de estudio, sin superar en ningún punto el valor de 0,56. Aunque se mantiene la dicotomía entre el norte y el sur, esta diferencia resulta ahora menos marcada que en la estación anterior. Los cambios más significativos tienen lugar en el norte. Por otro lado, al sur de la línea, las sierras de Alaiz, Izco y Leyre conservan los valores más elevados de la zona, mientras que en la

Navarra Media y en la Ribera se registra un descenso del índice. En contraste, la zona de las Bardenas Reales no presenta variaciones entre julio y octubre.

5.1.1. Relación con los usos del suelo

Tras examinar la evolución estacional del NDVI en el conjunto del territorio, el análisis se centra ahora en su relación con los distintos usos del suelo. Este enfoque permite identificar patrones de comportamiento del índice vinculados a la dinámica propia de cada tipo de cobertura, así como detectar diferencias en la estacionalidad de la productividad vegetal según el uso del terreno.

En la tabla 5.1. se presentan los valores promedio de NDVI para los usos del suelo más representativos a lo largo de las estaciones del año, lo que permite comparar su comportamiento y aportar una interpretación más precisa sobre los contrastes estacionales del NDVI.

Tabla 1. Promedio estacional de NDVI en los diferentes usos de suelo

	Invierno	Primavera	Verano	Otoño	Anual
Cultivos de secano	0,23	0,38	0,22	0,18	0,20
Cultivos de regadío	0,22	0,32	0,31	0,26	0,10
Bosques de frondosas	0,25	0,41	0,53	0,37	0,28
Bosques de coníferas	0,25	0,34	0,37	0,29	0,12
Pastizales naturales	0,24	0,40	0,52	0,36	0,28
Matorrales esclerófilos	0,22	0,31	0,24	0,21	0,10

Fuente: elaboración propia a partir del Corine Land Cover (1990 y 2018)

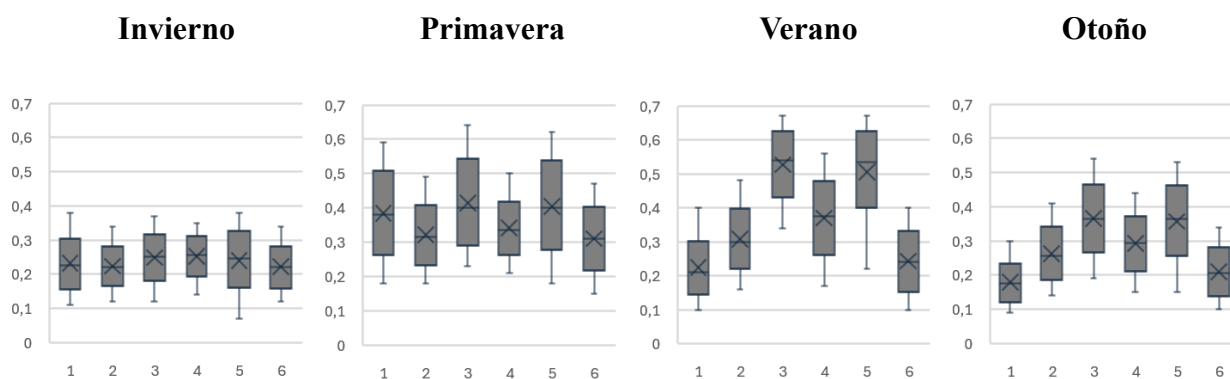
Los cultivos de secano presentan una producción similar durante el invierno y el verano, alcanzando su máximo en primavera y registrando el valor mínimo en otoño. Por su parte, los cultivos de regadío muestran un patrón menos contrastado entre estaciones, con niveles de productividad comparables en primavera y verano, y una menor oscilación a lo largo del año en comparación con los cultivos de secano. Los bosques de frondosas, constituidos mayoritariamente por especies caducifolias salvo los encinares, presentan valores mínimos en

invierno y máximos en verano; además, evidencian una marcada variabilidad estacional, de manera que el índice NDVI en verano supera en más del doble al NDVI en invierno. En el caso de los bosques de coníferas, se observa también un patrón estacional con máximos en verano y mínimos en invierno, aunque las diferencias son más sutiles, con una oscilación máxima de 0,12 puntos en el índice NDVI. Hay que recordar la ubicación de la mayoría de estos bosques en zonas de montaña, fundamentalmente en el Pirineo, donde la altitud determina temperaturas bajas, incluso en verano, un factor limitante de su productividad vegetal. Los pastizales naturales, por su parte, muestran una variabilidad estacional elevada. Registran su menor actividad durante el invierno y un incremento progresivo hasta alcanzar su máximo durante el verano. El contraste estacional máximo en esta cobertura asciende a 0,28. Los matorrales esclerófilos presentan su mayor actividad durante la primavera y la menor en otoño. Sin embargo, en comparación con el resto de coberturas analizadas, su variabilidad estacional es relativamente baja.

En la figura 5.3. se indican los valores medios, la mediana y los percentiles 0,05, 0,25, 0,75 y 0,95 de los principales usos de suelo en cada estación. Durante la primavera, el verano y el otoño se registra una mayor variabilidad interanual en la actividad de la vegetación, como lo demuestra la amplia separación entre los percentiles de NDVI. Esta amplitud indica la existencia de años con valores excepcionalmente altos y otros con niveles notablemente bajos en dichas estaciones. En contraste, la variabilidad interanual durante el invierno es considerablemente menor, con una menor dispersión de los valores registrados. Asimismo, es en verano cuando las diferencias en los valores de NDVI entre las principales coberturas del suelo alcanzan su máximo, reflejándose en una mayor diferenciación en el comportamiento productivo de cada tipología.

Si volvemos a la figura 5.2., en enero, los valores más altos son en su mayoría praderas en el valle del Baztán y en Arraitz mientras que los valores más bajos se asocian a las cumbres de los Pirineos, la sierra de Andía, los Montes Vascos, frecuentemente cubiertas de nieve, y puntualmente en masas de agua, como la bahía de Úgar y el embalse de Itoiz. En abril, los índices más elevados tienen lugar en tierras de labor en secano. En julio, al sur de la línea imaginaria que discurre de Oeste a Este por la Sierra de Codes y el prepirineo, los mínimos coinciden con las superficies ocupadas por cultivos de secano y los máximos con las superficies ocupadas por cultivos de regadío, en especial en el valle del Ebro, y en la ribera del

río Aragón. Además, los bosques de coníferas muestran valores intermedios entre ambos tipos de cultivo de entre 0,2 y 0,3. Al norte de la línea, los máximos coinciden con superficies clasificadas por el Corine Land Cover como bosques de frondosas. También mantienen valores altos los pastizales pero con menos intensidad que en primavera. Además, las superficies de la Navarra Media cubiertas por bosques de frondosas, como las sierras de Alaiz, Izco y Leyre, presentan valores superiores a los de su entorno, inclusive superiores a los cultivos de regadío del Valle del Ebro (0,60 frente a 0,50). En octubre, en el N de Navarra, las masas boscosas de frondosas, que durante el verano alcanzaban sus valores máximos de verdor, comienzan a perder intensidad vegetativa. Sin embargo, muchas praderas situadas en el valle del Baztán y en el prepirineo apenas experimentan variaciones en su actividad vegetativa. En la Navarra Media y en la Ribera, los cultivos de secano y las zonas de regadío del valle del Ebro ven reducido su índice de NDVI.



1: Cultivos de secano, 2: Cultivos de regadío, 3: Bosques de frondosas, 4: Bosques de coníferas, 5: Pastizales naturales, 6: Matorrales esclerófilos.

Figura 5.3. Variabilidad de los valores estacionales de NDVI correspondientes a las diferentes cubiertas del suelo.

Fuente: elaboración propia a partir de los datos del CSIC.

En invierno la media y el rango es similar para todas las coberturas analizadas. La mayor amplitud de rango en esta estación se da en los pastizales naturales, donde los valores extremos de NDVI tienen una mayor tendencia a estar por debajo del rango intercuartílico. La segunda cobertura con mayor rango en invierno corresponde con los cultivos de secano y, en este caso, los valores extremos tienden a estar por encima del rango intercuartílico. En

primavera se produce un aumento generalizado de la actividad vegetal especialmente en cultivos de secano, bosques de frondosas y pastizales naturales. Además, el rango intercuartílico aumenta más en estas coberturas, es decir, si bien la actividad fotosintética tiende a incrementarse, la intensidad de dicho aumento no es constante, sino que varía significativamente de un año a otro. En verano los valores NDVI experimentan un importante incremento en los bosques de frondosas y en los pastizales naturales seguido de un aumento menos acusado en los bosques de coníferas. Por el lado contrario, los cultivos de secano y los matorrales esclerófilos muestran un descenso de NDVI siendo éste más acusado en el primero.

Además, en esta estación, los valores extremos en los pastizales naturales son mucho más frecuentes por debajo del rango intercuartílico, tendencia también apreciable de manera más sutil en los bosques de frondosas. Cabe mencionar además, que en estas coberturas los valores medios se sitúan por debajo de la mediana. Lo contrario ocurre en los cultivos de secano y regadío, donde los valores extremos tienden a estar por encima de dicho rango y la media por encima de la mediana. En el resto de coberturas no hay una asimetría destacable en la distribución de los valores extremos. En otoño se produce un descenso generalizado en todas las coberturas pero manteniendo la misma jerarquía que en verano. La asimetría de los valores extremos se mantiene pero disminuye y prácticamente desaparece en los bosques de frondosas.

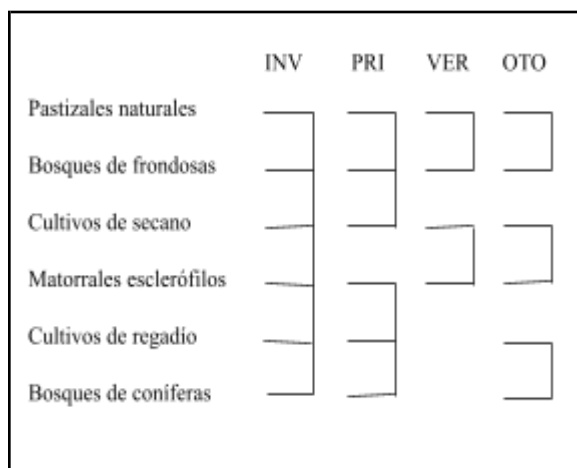


Figura 5.4. Agrupación de las cubiertas vegetales en función de sus promedios de NDVI estacionalmente.

Fuente: elaboración propia

En la figura 5.4. se han agrupado los usos de suelo que no presentan entre sí una diferencia superior a 0,3 en los valores medios de NDVI. En primer lugar, llama la atención la homogeneidad de los valores de todas las cubiertas en invierno, presentando todas ellas medias que oscilan entre 0,22 y 0,25. En segundo lugar, se observa que los pastos y los bosques de frondosas presentan un comportamiento similar a lo largo del año. Además, esta misma tendencia se aplica a los cultivos de regadío y a los bosques de coníferas.

Así como el índice NDVI depende de los usos del suelo, los usos del suelo dependen de factores geográficos como el clima, la topografía o la población. Para plasmar esta relación, se ha analizado la distribución espacial del NDVI a lo largo de los cuatro transectos (figura 5.5.). En el primero de ellos, con orientación N-S se aprecian marcados contrastes en la actividad vegetal, con máximos estacionales que no se localizan de forma homogénea a lo largo del perfil. En la región de la Montaña, los valores más elevados del NDVI se registran en verano, seguidos de un descenso progresivo en primavera, otoño e invierno, en orden decreciente de productividad. Por el contrario, en la Navarra Media y en la Ribera, el máximo estacional tiene lugar en primavera, con valores en abril significativamente superiores a los observados en el resto del año. Este comportamiento puede vincularse con los usos del suelo. Así, en el mes de julio se alcanzan los valores más altos en los bosques de frondosas de la sierra de Aralar (0,63) y en la sierra de Andía (0,57), en cotas próximas a los 1.000 m de altitud. En cambio, en abril, los valores máximos se localizan más al sur, en los cultivos de secano de la Navarra Media Occidental (0,57), situados entre los 400 y los 500 m. En abril cabe mencionar un descenso anómalo del NDVI en los cultivos de secano entre las localidades de Villatuerta y Aberín, que coincide con el único tramo que atraviesa una zona de clima mediterráneo de veranos frescos.



Figura 5.5. Valores promedio estacionales de NDVI a lo largo de los 4 transectos analizados

Fuente: elaboración propia a partir de la base de datos *Índices de Vegetación para la Península Ibérica e Islas Baleares*.

En el segundo transecto, con igual orientación Norte-Sur, se repite la misma tendencia general del transecto 1: en la región de la montaña la actividad vegetal experimenta sus máximos en julio, mientras que en la Navarra Media y en la Ribera tiene lugar en primavera. El tramo que atraviesa los Valles Cantábricos y los Valles Pirenaicos Centrales presenta características bastante homogéneas, con máximos muy marcados en verano, mínimos claros en invierno y valores intermedios en primavera y otoño. Más al sur, en la cuenca de Lumbier-Aoiz aparecen fluctuaciones vinculadas a los cultivos de secano. En estas zonas, los picos son claros en primavera, en la época de floración del trigo blando y la cebada. Continuando por la Navarra Media y la Ribera Tudelana septentrional, el transecto recorre bosques y cultivos de secano distribuidos de forma intermitente, lo que en el gráfico se materializa como cruces repetidos entre la serie de julio y la de abril. Nuevamente, las zonas boscosas presentan su máxima actividad en verano mientras que los cultivos de secano lo hacen en primavera. El último tramo discurre por los cultivos de regadío del Valle del Ebro (aproximadamente en los km 100 y 150) y atraviesa las Bárdenas Reales, que mantienen los índices más bajos del transecto en todas las estaciones del año con los valores más frecuentes entre 0,1 y 0,2.

El tercer transecto tiene orientación Suroeste-Noreste, es decir, e. Este transecto presenta aspectos comunes con los transectos 1 y 2, vinculados al tipo de aprovechamiento: los cultivos de regadío alcanzan su productividad máxima en julio, con un descenso progresivo en primavera, otoño e invierno; los cultivos de secano muestran su máximo en primavera, con valores notablemente inferiores en las demás estaciones; las zonas boscosas presentan una estacionalidad más marcada, con máximos productivos en verano, mínimos en invierno y valores intermedios en primavera y otoño. Sin embargo, a diferencia de los transectos 1 y 2, en este caso no se observa un descenso tan acusado de la productividad vegetal conforme se avanza hacia latitudes más bajas, lo que se puede relacionar parcialmente con el trazado oblicuo del perfil, en contraste con los anteriores, completamente verticales. Se ha escogido esta orientación porque pasa por seis zonas climáticas distintas, lo que permite analizar la influencia del clima sobre la evolución estacional del NDVI.

La mayor amplitud de valores del NDVI corresponde a la zona de montaña situada al NE (Mesa de los Tres Reyes): en enero, los índices descienden hasta valores próximos a 0, mientras que en julio alcanzan picos cercanos a 0,57. Este tramo está ocupado principalmente

por bosques de coníferas, cuya productividad muestra una diferencia estacional más marcada entre el otoño (0,4) y la primavera (0,3) que en otros tipos de formaciones forestales. El NDVI máximo tiene lugar en las cumbres descubiertas del Pirineo (0,57). Más al suroeste, en las zonas de clima oceánico (Cfb), se mantiene el patrón de máximos en verano y mínimos en primavera pero con una amplitud de rango algo inferior respecto al clima continental. En este caso, las diferencias entre la primavera y el otoño son casi imperceptibles. A medida que se avanza hacia zonas con clima marítimo de costa occidental con dos meses secos (Cf2b), la amplitud del NDVI se reduce considerablemente, con apenas 0,2 puntos de variación entre estaciones. Además, el índice muestra pocas variaciones a lo largo del tramo en primavera y exhibe un comportamiento análogo en las demás estaciones del año, lo que sugiere un comportamiento similar de la vegetación sometida a este tipo de clima. Más al sur, en el tramo que atraviesa zonas de clima subtropical húmedo (Cfa), el comportamiento es distinto: conforme se avanza hacia el suroeste, la vegetación experimenta un claro aumento de la actividad en primavera, seguido de un descenso muy acusado durante el verano, el otoño y el invierno, estaciones en las que los índices de NDVI son prácticamente idénticos. Por último, los espacios influenciados por climas mediterráneos (Csa) y seco estepario frío (Bsk) presentan una dinámica productiva muy condicionada por el tipo de uso, reproduciendo las características ya descritas para los cultivos de secano y regadío en los transectos anteriores.

El cuarto transecto es el único dispuesto de forma horizontal y que, por tanto, no se ve condicionado por el gradiente Norte-Sur que afecta al medio físico y al aprovechamiento del territorio en Navarra. A lo largo del recorrido, el comportamiento del NDVI en los cultivos de secano apenas presenta variaciones, sin embargo, los bosques presentan comportamientos diferentes en función de su localización. Por un lado, los extremos occidental y meridional del transecto coinciden con los bosques de las sierras de Lóquiz y Leyre y tienen un comportamiento estacional similar, presentando la sierra de Leyre una amplitud de rango 0,12 puntos mayor que la de Lóquiz. Por otro lado, los bosques de frondosas de la Navarra Media Oriental, entre Berasoáin y Pamplona son los que tienen la amplitud de rango más alta. Destacan especialmente los máximos en verano que están entre 0,1 y 0,2 puntos por encima de los demás bosques del mismo tipo que cruzan el transecto. Además, en invierno el NDVI toma valores similares a los de la Sierra de Leyre mientras que en primavera y otoño son similares a

los de la sierra de Lóquiz. En el tramo que pasa por el bosque de coníferas (km 32 a 37) el índice es más bajo que en los bosques de frondosas en todas las estaciones del año.

5.2. Tendencias entre 1981 y 2022

Para simplificar el texto y hacerlo más comprensible al lector el análisis de las tendencias se realiza a escala comarcal. El objetivo de esta fase es evaluar si existen relaciones entre el NDVI y las tendencias climáticas y de usos del suelo. Para ello, primero se analizan las tendencias del índice NDVI, después las tendencias climáticas (precipitación y temperatura), y finalmente, se evalúan los cambios en los usos del suelo, y finalmente se relacionan todas las variables con el NDVI a través de un método de ponderación.

5.2.1. Tendencias NDVI

El análisis de las tendencias del NDVI abarca el periodo 1982-2023. En este periodo el NDVI ha aumentado en todas las comarcas y en todas las estaciones del año (tabla 2), lo que confirma la hipótesis inicial del trabajo demostrando que, efectivamente, se está produciendo un reverdecimiento en Navarra.

Tabla 2. Tendencia del índice NDVI (unidades NDVI/año)

Comarcas geográficas	Inv.	Pri.	Ver.	Oto.
Valles Cantábricos	0,0012	0,0016	0,0013	0,0011
Valles Meridionales	0,0012	0,0012	0,0012	0,0012
Valles Pirenaicos Centrales	0,0016	0,0015	0,0013	0,0014
Valles Pirenaicos Orientales	0,0015	0,0017	0,0014	0,0014
Corr. Barranca	0,0014	0,0017	0,0018	0,0016
Cuenca de Pamplona	0,0025	0,0020	0,0009	0,0013
Cuenca de Lumbier-Aoiz	0,0022	0,0023	0,0011	0,0012
Navarra Media Occidental	0,0025	0,0020	0,0012	0,0017
Navarra Media Oriental	0,0023	0,0022	0,0016	0,0017
Ribera Estellesa	0,0019	0,0016	0,0019	0,0018
Ribera Tudelana	0,0017	0,0018	0,0012	0,0015

Fuente: elaboración propia a partir de la base de datos *Índices de Vegetación para la Península Ibérica e Islas Baleares*.

Los datos también indican que dicho reverdecimiento no ha sido constante ya que se ha producido una desaceleración (figura 5.6.). Esta ralentización no afecta de manera homogénea a todo el territorio, sino que es más intensa en las comarcas del norte de Navarra y disminuye conforme se avanza hacia el sur, alcanzando su menor intensidad en La Ribera Tudelana.

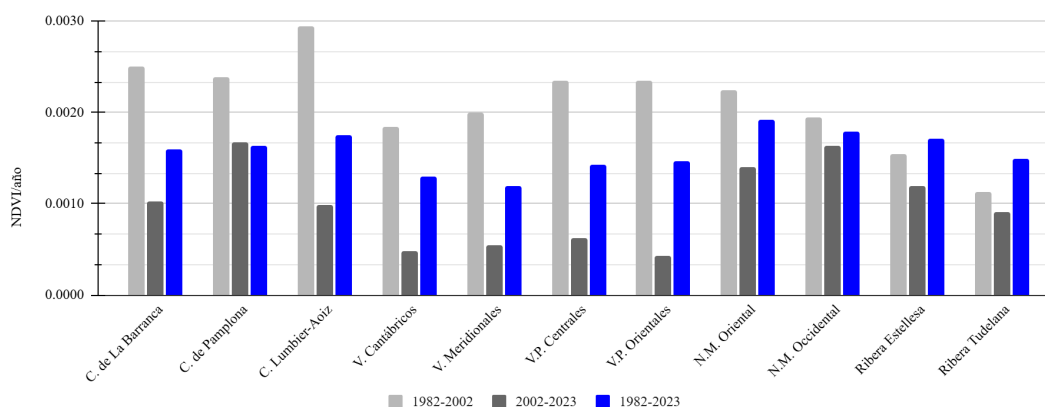


Figura 5.6. Tendencia del índice NDVI (NDVI/año) por comarcas entre 1982 y 2023

Fuente: elaboración propia a partir de la base de datos *Índices de Vegetación para la Península Ibérica e Islas Baleares*.

Los valores anuales del índice NDVI también muestran una notable variabilidad interanual, con diferencias significativas entre comarcas. Por ejemplo, las comarcas de La Ribera han experimentado años en los que el índice NDVI disminuyó con respecto a los años anteriores, por ejemplo entre 1998 y 2002. La misma dinámica tuvo lugar entre 1984 y 1986, y entre 1991 y 1992. Por su parte, las comarcas del norte, como los Valles Pirenaicos Centrales, Valles Pirenaicos Orientales, Valles Cantábricos y Cuenca de Pamplona, también muestran esa disminución del índice a finales de la década de los años 90 (acotada al período 1998-2000) y en los años 2011-2013.

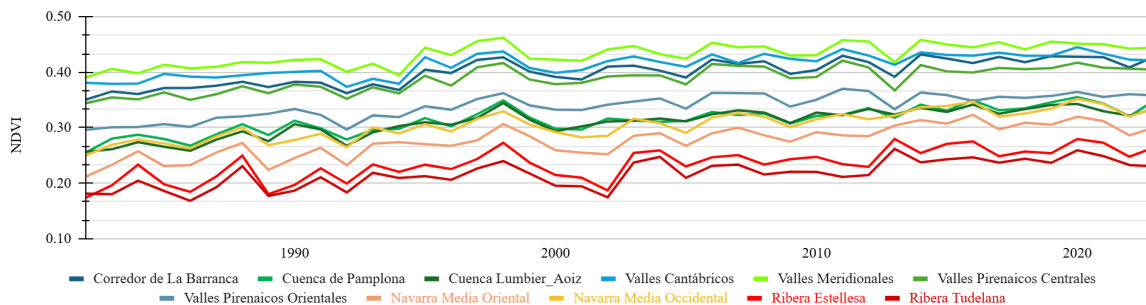


Figura 5.7. Evolución temporal de la media anual del índice NDVI entre 1982 y 2023

Fuente: elaboración propia a partir de la base de datos *Índices de Vegetación para la Península Ibérica e Islas Baleares*.

5.2.2. Tendencias climáticas

El análisis de la evolución temporal de la precipitación total acumulada entre 1951 y 2022 para las distintas comarcas ha permitido identificar varios patrones espaciales y temporales en la evolución climática de las diferentes comarcas a lo largo de las siete décadas de estudio, revelando importantes diferencias entre ellas. Estos patrones se han representado gráficamente en la figura 5.8.

Las series analizadas reflejan un incremento sostenido de la temperatura media anual en todas las regiones, especialmente acentuado a partir de la década de 1980, en coherencia con los patrones globales asociados al cambio climático. La tendencia general es de 0,02 °C por año en todas las regiones excepto en los Valles Pirenaicos que asciende a 0,03 °C al año. En resumen, la temperatura ha subido algo más de 1,5 grados en la mayoría de las regiones y 1,85 y 2,15 °C en los Valles Pirenaicos Centrales y Orientales respectivamente, lo que sugiere que las regiones de montaña son las más vulnerables al calentamiento.

El aumento de las temperaturas es mayor en verano que en el resto de las estaciones astronómicas, siendo ligeramente menor en primavera, otoño e invierno (tabla 3). Desde el punto de vista comarcal, es evidente un gradiente N-S en el que las comarcas más septentrionales han experimentado un aumento ligeramente mayor de la temperatura, mientras que en La Ribera Estellesa y en La Ribera Tudelana el aumento es menor, debido a una menor tendencia en el semestre frío del año. Esta zona del Valle del Ebro es muy propensa a periodos prolongados de frío, debido a fenómenos de estancamiento e inversión térmica durante situaciones anticiclónicas. Este hecho se ve respaldado por otro estudio de la Meseta Sur

española que reveló que las bolsas de aire frío ocurren con más frecuencia e intensidad en invierno (Rasilla, D., 2021). Los episodios de temperaturas frías extremas podrían afectar a la media estacional, disminuyendo la intensidad de la tendencia al alza causada por el calentamiento global.

Por último, esas tendencias encubren una variabilidad interanual notable, con años muy cálidos, sobre todo al final del periodo de estudio (2017) y durante la década de los años 90 (por ejemplo, 1990 y 1994), mientras que los años más fríos se situaron las décadas de los 60 y 70.

Tabla 3. Tendencias climáticas (1951-2022)

Comarcas geográficas	Tendencia precipitación (mm/año)				Tendencia temperatura (°C/año)			
	Inv.	Pri.	Ver.	Oto.	Inv.	Pri.	Ver.	Oto.
Valles Cantábricos	0,01	-0,69	-0,91	-0,39	0,02	0,02	0,03	0,02
Valles Meridionales	-0,03	-0,94	-1,00	-0,96	0,02	0,02	0,03	0,02
Valles Pirenaicos Centrales	0,02	-0,66	-0,63	-0,34	0,02	0,02	0,03	0,02
Valles Pirenaicos Orientales	0,21	0,28	-0,30	0,64	0,02	0,02	0,04	0,02
Corr. Barranca	0,38	0,16	-0,52	-0,47	0,02	0,02	0,03	0,02
Cuenca de Pamplona	-0,21	-0,47	-0,63	-1,04	0,02	0,02	0,03	0,01
Cuenca de Lumbier-Aoiz	-0,31	0,16	-0,38	-0,23	0,02	0,02	0,03	0,01
Navarra Media Occidental	0,08	0,00	-0,37	-0,73	0,02	0,02	0,03	0,02
Navarra Media Oriental	-0,22	0,19	-0,29	-0,31	0,01	0,02	0,03	0,02
Ribera Estellesa	-0,19	0,37	-0,17	-0,51	0,01	0,02	0,02	0,01
Ribera Tudelana	-0,21	0,28	-0,29	-0,28	0,01	0,01	0,02	0,01

Fuente: elaboración propia a partir de la base de datos ROCIO.

En cuanto a la precipitación, la diversidad de tendencias es el rasgo más definitorio, tanto desde el punto de vista espacial como temporal. Por ejemplo, los veranos y los otoños son cada vez más secos en casi toda la Comunidad Foral, mientras que las primaveras son cada vez más húmedas en las comarcas meridionales (Ribera Estellesa, Ribera Tudelana) pero más secos en las comarcas septentrionales (Valles Cantábricos, Valles Meridionales). El invierno no muestra tendencias definidas, salvo en el caso del Corredor de La Barranca. Al igual que en el caso de las temperaturas, la variabilidad interanual es notable, sobre todo en la mitad meridional, en consonancia con su carácter mediterráneo.

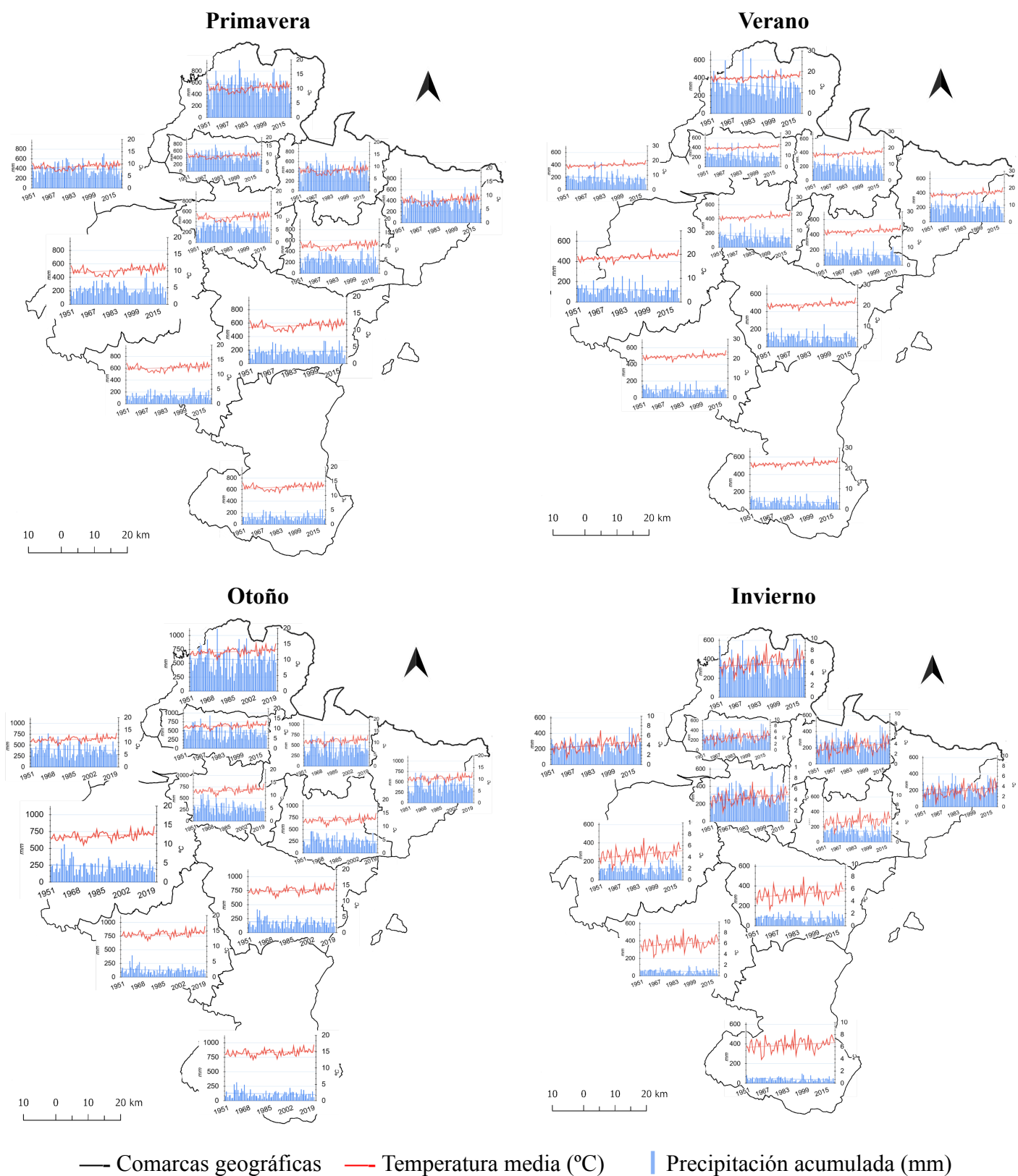


Figura 5.8. Evolución de la temperatura y de la precipitación (1951-2022) durante cada estación.
Fuente: Elaboración propia a partir de datos proporcionados por Aemet.

5.2.3. Cambios en los usos del suelo

Como se ha visto en apartados anteriores, los usos del suelo tienen una estrecha relación con el índice NDVI. Por ello para analizar la evolución de dicho índice es imprescindible analizar también la evolución de los usos del suelo. Para ello se ha realizado un mapa que muestra la diferencia de usos entre 1990 y 2018 (figura 5.9.), a partir de los datos del Corine Land Cover. Las categorías se han simplificado al primer nivel y además se han descartado aquellas que ocupaban una superficie inapreciable.

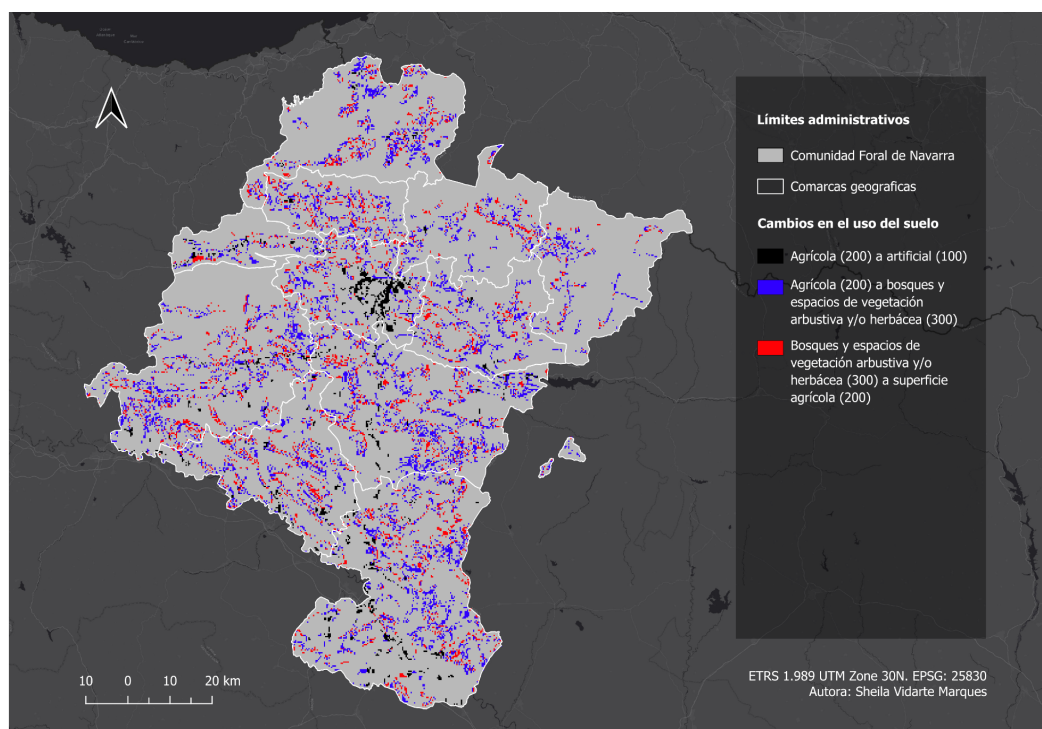


Figura 5.9. Diferencia en la cobertura y los usos del suelo entre 1990 y 2018

Fuente: elaboración propia a partir de los datos de *European Union's Copernicus Land Monitoring Service information*.

A priori la distribución de las áreas que han experimentado cambios parece aleatoria y homogénea a lo largo de toda Navarra, pues no se observan patrones espaciales más allá de la exclusión de las zonas de mayor altitud. La mayor parte de los cambios que han tenido lugar han sido superficies que han pasado de agrícola a bosque (tabla 4), destacando las comarcas de

la Navarra Media Oriental (11 %), los Valles Meridionales (9 %) y en Ribera Estellesa (8 %). También se registran transformaciones en sentido contrario especialmente en Ribera Estellesa (5 %) y Valles Meridionales (6 %). Por otro lado, el cambio de agrícola a artificial representa una proporción menor en la mayoría de las comarcas. Estas son zonas que se han urbanizado y se encuentran alrededor de los principales núcleos de población, sobre todo alrededor de la capital de provincia, Pamplona (7 %).

Tabla 4. Superficie de las áreas que han cambiado de uso entre 1990 y 2018

Comarca	Agrícola a artificial		Agrícola a forestal		Forestal a agrícola	
	Sup.(km ²)	Sup.(%)	Sup.(km ²)	Sup. (%)	Sup.(km ²)	Sup. (%)
Valles Cantabricos	4	0,38	80	7,64	41	3,88
Valles Meridionales	1	0,28	43	9,27	29	6,32
Valles Piren. Cen.	1	0,16	39	5,23	21	2,78
Valles Pirenaicos Or.	0	0,00	36	4,13	12	1,35
Corr. de la Barranca	8	2,30	19	5,81	9	2,83
Cuenca de Pamplona	44	7,10	50	8,11	27	4,35
Cuenca Lumbier-Aoiz	3	0,38	56	7,92	25	3,56
Navarra Media Occ.	12	0,79	120	7,64	65	4,14
Navarra Media Or.	14	1,07	144	1,57	63	4,65
Ribera Estellesa	15	1,63	73	8,07	46	5,16
Ribera Tudelana	36	2,02	155	8,70	76	4,28

Fuente: elaboración propia a partir de los datos del Corine Land Cover

5.2.4. Discusión de resultados

Tras la evaluación de las tendencias espaciales y temporales del índice de vegetación NDVI, así como de las principales variables climáticas y de usos del suelo, en dicho índice, se procedió a identificar los posibles procesos que expliquen que las tendencias de reverdecimiento sean mayores en unas comarcas que en otras, teniendo en cuenta las características propias de cada comarca. El punto de partida es una tendencia positiva del índice NDVI en todas las comarcas y en todos los meses del año en todas las estaciones (tabla 2), aunque con diferencias en la velocidad a la que se ha producido. Cabe señalar, además, que la velocidad del reverdecimiento se ha ralentizado ha disminuido en las últimas décadas.

En términos generales, las comarcas que han registrado los aumentos más acusados de temperatura y precipitación no son necesariamente aquellas que han experimentado un incremento más marcado y rápido del índice NDVI. De hecho, algunas regiones, como la Cuenca de Pamplona, que presentan una tendencia térmica comparable a la de otras comarcas, pero que han sufrido una disminución de las precipitaciones invernales, han experimentado tendencias de NDVI elevadas (0,025).

En los Valles Cantábricos la tendencia del NDVI es positiva, en consonancia con el aumento de las temperaturas y de la superficie forestal. Sin embargo, el reverdecimiento no es tan intenso (entre 0,0011 y 0,0016 unidades NDVI/año) como en otras comarcas. Esta tendencia positiva coincide con una reducción de las precipitaciones, particularmente en verano (-0,91 mm/año) que podría implicar cierto estrés hídrico sobre una cubierta vegetal de bosques caducifolios (robles, fresnos y hayedos) y praderas que demanda mucha agua. Este incipiente estrés hídrico podría relacionarse con la menor tendencia positiva del NDVI en verano respecto a la primavera.

En los Valles Meridionales también predomina un paisaje de bosques caducifolios y praderas. Pero aquí la disminución de la precipitación ha sido más acusada que en los Valles Cantábricos, sobre todo en primavera y en verano, que podría ponerse en relación con una menor tendencia positiva del índice NDVI en primavera y en verano.

En los Valles Pirenaicos Centrales una parte sustancial de la superficie está compuesta por bosques caducifolios, acompañados ahora de perennifolios como el abeto y marcescentes como el quejigo, cuya demanda de agua es inferior a los primeros, por lo que resisten mejor los veranos secos. No obstante, la disminución de la precipitación en esta comarca es menor (entre 0,34 y 0,66 mm/año), lo que podría explicar una tendencia positiva algo superior (de 0,0013 a 0,0016 unidades NDVI/año) del índice NDVI.

En los Valles Pirenaicos Orientales tanto superficie predominante como el tipo de especies características es muy similar a los Valles Pirenaicos Centrales, añadiendo pinares de pino royo (*Pinus sylvestris*) en las cumbres más elevadas. Sin embargo, las tendencias de la precipitación no son las mismas, pues en lugar de disminuir, han aumentado en todas las estaciones excepto en verano. Además, la superficie forestal también ha aumentado en un 2,8%. Este aumento en las precipitaciones y en la superficie forestal podría ser una de las

razones por las que la tendencia de NDVI es ligeramente superior en los valles orientales, oscilando entre 0,0014 y 0,0017 unidades de NDVI/año.

El Corredor de la Barranca guarda una gran similitud con los Valles Cantábricos en cuanto a clima y paisaje. Los bosques caducifolios muestran su máxima actividad fotosintética en verano, mientras que las praderas presentan su máxima en primavera. Es por ello que las tendencias más elevadas de NDVI se reflejan en ambas estaciones. Así pues, el máximo reverdecimiento en esta región tiene lugar en verano (0,0018 unidades NDVI/año) vinculado a la tendencia positiva de las temperaturas (0,03°C/año) en esta estación y a la ampliación de la superficie forestal. Le sigue la primavera (0,0016 unidades/año) vinculado al aumento de la precipitación y a la representativa superficie que ocupan las praderas, con máxima actividad en esta estación.

En la cuenca de Pamplona la mayor parte de la superficie está ocupada por cultivos de secano. Los aumentos más acusados de NDVI tienen lugar en invierno (0,0025 unidades/año) y en primavera (0,0020 unidades/año). Este aumento tan acusado en invierno podría estar relacionado con la anticipación del periodo vegetativo de los cultivos como consecuencia del aumento de las temperaturas. Por otro lado, en verano la tendencia del NDVI es más débil (0,0009 unidades/año), lo que podría deberse a la elevada tendencia negativa de la precipitación en (-0,63 mm/año), que intensifica el estrés hídrico y limita el crecimiento vegetal una vez completado el ciclo de los cultivos. pero también podría reflejar la transformación de usos de suelo que se ha producido alrededor de Pamplona y municipios limítrofes.

En la cuenca de Lumbier-Aoiz dominan los cultivos de secano seguidos de bosques y vegetación arbustiva. En esta comarca las mayores tendencias de NDVI ocurren en invierno (0,0022 unidades/año) y en primavera (0,0023 unidades/año), lo que nuevamente podría relacionarse con la anticipación del periodo vegetativo tanto en los cultivos de secano, mayoritarios en la zona, como en los bosques perennifolios, que también presentan su máxima actividad en primavera. Además, la primavera experimenta una ligera tendencia positiva en la precipitación (0,16 mm/año), lo que podría contribuir a un entorno aún más favorable para el crecimiento vegetal. En verano, la tendencia del NDVI es más débil (0,0011/año), posiblemente debido a la combinación de la disminución de la precipitación (-0,38 mm/año)

con el aumento térmico ($0,03\text{ }^{\circ}\text{C/año}$), que derivan en un aumento de la evaporación y de la evapotranspiración.

La anticipación del periodo vegetativo, consecuencia del cambio climático y que tiene efecto visible en algunas de las regiones de La Montaña, ha tenido un efecto mucho más notable en las comarcas de la Navarra Media y de la Ribera, que han experimentado una tendencia positiva de NDVI de entre 0,10 y 0,12 en marzo, de 0,9 a 0,11 en febrero y 0,9 a 0,10 NDVI/año en enero. El adelanto de las estaciones provoca que la vegetación en la Navarra Media experimente un crecimiento más rápido del NDVI, ya que las temperaturas suaves de la primavera llegan antes, coincidiendo aún con una buena disponibilidad hídrica tras el invierno. Este equilibrio entre calor y humedad favorece una respuesta vegetal temprana y activa que se refleja en una tendencia invernal positiva alta, de 0,0025 en la Navarra Media Occidental y de 0,0022 en la Navarra Media Oriental. En cambio, en la Ribera, aunque también se adelanta el inicio de la actividad vegetal, el clima más seco y cálido limita ligeramente ese crecimiento, ya que la menor disponibilidad de agua y la mayor dependencia del riego ralentizan la respuesta del NDVI frente al aumento térmico. Esto se refleja en una tendencia de NDVI media-alta respecto a las demás regiones de 0,0019 en la Ribera Estellesa y 0,0017 en la Ribera Tudelana.

6. CONCLUSIONES

La principal conclusión de este trabajo es que se ha detectado un aumento sostenido de la productividad vegetal desde 1981 hasta la actualidad en Navarra, reflejado en el incremento de los valores del índice NDVI. Este incremento se manifiesta a lo largo de todo el año, pero su intensidad no es espacialmente homogénea y está condicionada por las características climáticas y el tipo de aprovechamiento predominante en cada comarca.

Las tendencias detectadas parecen estar principalmente asociadas al incremento térmico generalizado en toda la región y a la disminución de las precipitaciones. La temperatura es uno de los principales factores condicionantes de la fotosíntesis, por lo que, en términos generales,

un aumento en las temperaturas se traduce en un aumento de la actividad fotosintética y en el índice NDVI. Sin embargo, se ha de tener en cuenta que cuando las temperaturas superan ciertos umbrales fisiológicos, pueden inducir un estrés térmico en la vegetación, lo que repercute negativamente en su actividad fotosintética y, en consecuencia, supondría una disminución del NDVI. Dada la diversidad biogeográfica de la región, el efecto de la temperatura depende en gran medida de esas características biogeográficas, por lo que sería necesaria una investigación más profunda de esta posible influencia. Se va a tomar como cierta la hipótesis de que un aumento de la temperatura supone un aumento en el NDVI.

Así pues, se concluye que la tendencia de las temperaturas en la mayoría de las comarcas de Navarra produce un escenario favorable para el reverdecimiento y se puede relacionar con la tendencia positiva del NDVI. Por su parte, una mayor disponibilidad de agua se traduce en un aumento de la actividad fotosintética de las plantas, y, por tanto, en la cantidad de clorofila que producen y en el índice NDVI. Por consiguiente, la tendencia pluviométrica en la mayoría de las comarcas de Navarra produce un escenario desfavorable para el reverdecimiento. Aunque no se puede relacionar directamente con la tendencia positiva del NDVI, quizá pueda relacionarse con la desaceleración del greening, pero al igual que se ha señalado para la temperatura un estudio en profundidad acerca de la disponibilidad y la demanda de agua en cada comarca permitiría evaluar el posible estrés hídrico, así como la respuesta de cada especie vegetal.

En esta línea, se ha de considerar que las variables climáticas se han obtenido a partir de bases de datos en rejilla, lo cual podría suavizar los fenómenos locales, especialmente en áreas de montaña, donde la variabilidad microclimática es más acusada. Tampoco se han tenido en cuenta los posibles efectos de los cambios en los sistemas de producción agraria, por ejemplo de cultivos o en los sistemas de riego, que podría haber tenido su influencia en la evolución del índice NDVI en algunas comarcas con un carácter agrícola.

En cuanto a los cambios de uso del suelo, las tendencias del NDVI no pueden explicarse exclusivamente por transformaciones recientes a gran escala pero sí están muy relacionadas con la forma en la que cada cobertura responde a las tendencias climáticas. En cualquier caso, los resultados son coherentes con los obtenidos en otras regiones del N y del E e de la

Península Ibérica, donde también se ha observado un aumento del NDVI desde principios de la década de 1980 (Alcaraz et al., 2010, Vicente-Serrano & Heredia-Laclaustra, 2004).

No obstante, los resultados de este trabajo están sometidos a ciertas limitaciones que podrían abordarse en futuras investigaciones. En primer lugar, la base de datos de NDVI combina el producto NDVI GIMMS (con resolución espacial de 8 km) con datos de MODIS (resolución de 1 km). Esto puede introducir ciertas incertidumbres, especialmente en áreas con alta heterogeneidad espacial. En segundo lugar, los datos de ocupación del suelo del proyecto CORINE también presentan limitaciones conocidas, como los cambios metodológicos entre sensores (Landsat, SPOT, SENTINEL, IKONOS), lo que afecta a la comparabilidad de los datos entre 1990 y 2018 y reduce su nivel de confianza (CITA).

En resumen, los resultados de este estudio confirman la hipótesis planteada inicialmente: Navarra ha experimentado un proceso generalizado de reverdecimiento entre 1981 y 2023, evidenciado por el aumento del índice NDVI en todas las comarcas y estaciones del año. Este reverdecimiento se ha producido de forma paralela a un incremento de las temperaturas medias, lo que refuerza la relación entre el cambio climático y la intensificación de la actividad fotosintética. Por tanto, puede afirmarse que el territorio navarro presenta una tendencia clara al reverdecimiento, estrechamente ligada al aumento térmico registrado en las últimas décadas. Además, este reverdecimiento tiene un comportamiento desigual en el espacio y en el tiempo. Dichas variaciones se relacionan con las variables analizadas: precipitación y usos del suelo.

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

Fig. 1.1.	Curva de reflectancia estándar de la planta sana frente a la enferma	4
Fig. 3.1.	Diagrama de flujo	10
Fig. 3.2.	Diagrama de flujo	11
Fig. 3.3.	Combinaciones de cambios de usos	13
Fig. 4.1.	Comarcas geográficas	14
Fig. 4.2.	Transectos	15
Fig. 4.3.	Perfil altitudinal del transecto 2	15
Fig. 4.4.	Diagramas de Walter y Lieth de estaciones manuales representativas de cada comarca geográfica (1991-2020).	17
Fig. 4.5.	Clasificación climática de Köppen	18
Fig. 4.6.	Series de vegetación	18
Fig. 4.7.	Usos del suelo según el Corine Land Cover de 2018	21
Fig. 4.8.	Evolución de la población (%) entre 1996 y 2024	22
Fig. 5.1.	Distribución del NDVI por estación (1981-2023)	24
Fig. 5.2.	Media de los valores del índice NDVI por estación entre 1981 y 2023	24
Fig. 5.3.	Variabilidad de los valores estacionales de NDVI correspondientes a las diferentes cubiertas del suelo.	28
Fig. 5.4.	Agrupación de las cubiertas vegetales en función de sus promedios de NDVI estacionalmente.	29
Fig. 5.5.	Valores promedio estacionales de NDVI a lo largo de los 4 transectos analizados	30
Fig. 5.6.	Tendencia del índice NDVI (NDVI/año) por comarcas entre 1982 y 2023	34
Fig. 5.7.	Evolución temporal de la media anual del índice NDVI entre 1982 y 2023	35
Fig. 5.8.	Evolución de la temperatura y de la precipitación (1951-2022) durante cada estación.	37
Fig. 5.9.	Diferencia en la cobertura y los usos del suelo entre 1990 y 2018	38

Tabla 1	Promedio estacional de NDVI en los diferentes usos de suelo	26
Tabla 2	Tendencia del índice NDVI (unidades NDVI/año)	33
Tabla 3	Tendencias climáticas (1951-2022)	36
Tabla 4	Superficie de las áreas que han cambiado de uso entre 1990 y 2018	39

REFERENCIAS Y FUENTES

- AeMet (2019). Rejilla Observacional Con Interpolación Óptima (ROCIO). Rejilla ROCIO_IBEB de precipitación. Versión v2 (2019). Período 1951-2022. En: Agencia Estatal de Meteorología: Servicios climáticos. Proyecciones climáticas para el siglo XXI. Datos diarios. Disponible, en julio de 2025, en: https://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/cambio_climat/datos_diarios?w=2.
- AeMet (2020). Fichas climáticas. En: Meteo Navarra: Datos. Estaciones automáticas. Disponible, en julio de 2025, en: <https://meteo.navarra.es/estaciones/mapadeestaciones.cfm>
- AeMet (2020). Rejilla Observacional Con Interpolación Óptima (ROCIO). Rejillas ROCIO_IBEB de temperaturas diarias extremas. Versión v1 (2020) - Temperatura máxima y Versión v1 (2020) - Temperatura mínima. Período 1951-2022. En: Agencia Estatal de Meteorología: Servicios climáticos. Proyecciones climáticas para el siglo XXI. Datos diarios. Disponible, en julio de 2025, en: https://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/cambio_climat/datos_diarios?w=2.
- AeMet (s.f.) Clasificación climática de Köppen <https://meteo.navarra.es/definiciones/koppen.cfm#B>
- Barreira, P.; Gonzále, V.; Bosque, J. (2012) Detección de errores temáticos en el CORINE Land Cover a través del estudio de cambios: Comunidad de Madrid (2000-2006). Estudios geográficos, LXXIII(272): 7-34. doi: 10.3989/estgeogr.201201
- Chen, C.; Park, T.; Wang, X.; Piao, S.; Xu, B.; Chaturvedi, R.K.; Fuchs, R.; Brovkin, V.; Ciais, P.; Fensholt, R.; Tømmervik, H.; Bala, G.; Zhu, Z.; Nemani, R.R.; Myneni, R.B. (2019) China and India lead in greening of the world through land- use management. doi: 10.1038/s41893-019-0220-7. Nat Sustain. (2): 122-129. doi: 10.1038/s41893-019-0220-7
- Chen, J.M.; Ju, W.; Ciais, P.; Viovy, N.; Liu, R.; Liu, Y.; Lu, X. (2019). Vegetation structural change since 1981 significantly enhanced the terrestrial carbon sink. Nature Communications, 10(4259). doi:<https://doi.org/10.1038/s41467-019-12257-8>
- Departamento de Desarrollo Rural y Medio Ambiente (2025) Principales cifras del sector agrario <https://www.navarra.es/documents/30155142/31265379/cifras+sector+agrario.pdf/56e1d120-380a-b28b-e867-1ef0d47c3db7?t=1728909228479>
- EEA (1990, 2018). CORINE Land Cover (CLC), 1990 y 2018. Copenhagen: European Environment Agency (EEA). Distribuido por el Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG). Disponible, en marzo de 2025, en: <https://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/corine-land-cover>

- EOS Data Analytics, Inc. (2021) NDVI: Índice De Vegetación De Diferencia Normalizada. En: EOS Data Analytics. Disponible, en marzo de 2025, en: <https://eos.com/es/make-an-analysis/ndvi/>
- Franquesa, M., Reig, F., Vicente Serrano, S.M. (2024) Vegetation Indices for the Iberian Peninsula and Balearic Islands (VIIB) Database. Available at: <https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/16201>.
- García M. (2012) Observaciones Territoriales de Navarra. Zonificación de Navarra. Pamplona: Observatorio Territorial de Navarra.
https://www.nasuvinsa.es/sites/default/files/assets/files/Observaciones_territoriales/08%20Zonificacion.pdf
- Geoportal de Navarra (2023) División Administrativa. Límites catastrales de los municipios. Pamplona: Gobierno de Navarra. Departamento de Cohesión Territorial. Dirección General de Administración Local y Despoblación; Departamento de Economía y Hacienda. Servicio de Riqueza Territorial y Tributos Patrimoniales. Disponible en mayo de 2025, en: <https://geoportal.navarra.es/es/idena/descargar>
- Geoportal de Navarra (2023) Visor geográfico de la Infraestructura de Datos Espaciales de Navarra (IDENA). Gobierno de Navarra. Disponible en mayo de 2025, en: <https://idena.navarra.es/navegar/#ZXh0fGJhc2V8bWFwYWJhc2V8bGF5ZXJzXl40NzU0NzMuMzQyfDQ1NjcwMjMuNDk0fDc1MTE4NS4zNDJ8NDg3MDM4My40OTReJDB8QDR8NXw2fDddfDF8MnwzfEBdXO==>
- Giner, C.; Martinez, B.; Gilbert, M.A.; Alcaraz-Segura, D. (2012) Tendencias en el verdor de la vegetación y en la producción primaria bruta de las áreas forestales en la España peninsular (2000-2009). Revista de Teledetección, 38: 51-64. ISSN: 1988-8740.
- Gobierno de Navarra (2017) Plan Director del Ciclo Integral del Agua de Uso Urbano de Navarra. I.a-Diagnóstico General. Disponible, en julio de 2025, en: <https://www.nilsa.com/fls/dwn/plan-director-ciclo-integral-de-agua/04-08052019-plan-direct-ciclo-urb-agua-navarra-anexo-ia-diagnostico-general-20240628-105007.pdf>
- INE (1996) Series históricas de población desde 1996. Cifras oficiales de la Revisión anual del Padrón municipal a 1 de enero de cada año. Madrid: Instituto Nacional de Estadística (INE), INEbase, Padrón: Series históricas de población desde 1996. Cifras oficiales de la Revisión anual del Padrón municipal a 1 de enero de cada año, Resultados municipales. Disponible en mayo de 2025, en: <https://www.ine.es/jaxiT3/Tabla.htm?t=29005&L=0>

- INE (2024) Censo anual de población 2021-2024. Madrid: Instituto Nacional de Estadística (INE), INEbase, Demografía y población: Censo anual de población 2021-2024, Población según municipio y sexo. Disponible en mayo de 2025, en: <https://www.ine.es/jaxiT3/Tabla.htm?t=68065>
- IPCC (2021). Climate Change 2021 The physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Intergovernmental Panel on Climate Change. Disponible, en mayo de 2025, en: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- Lafarga, A.; Irañeta, I.; Goñi, J.; Lezáun, J.A.; Armesto, A.P. (2009) Rotación de cultivos en secanos cerealistas de alto potencial productivo. Navarra Agraria, 2009(173) <https://www.navarraagraria.com/categories/item/831-rotacion-de-cultivos-en-secanos-cerealistas-de-alto-potencial-productivo#:~:text=En%20Navarra%20el%2090%20%25%20de, trigo%20blando%20con%20un%2032%20%25.>
- Lin, X.; Niu, J.; Berndtsson, R.; Yu, X.; Zhang, L.; Chen, X. (2020) NDVI Dynamics and Its Response to Climate Change and Reforestation in Northern China. Remote Sens. 12(24): 4138. doi: doi: 10.3390/rs12244138. <https://www.mdpi.com/2072-4292/12/24/4138?utm>
- Markwell, J., Namuth, D., Hernández-Rios, I. (2003) Los Pigmentos Vegetales y la Fotosíntesis. En: Plant and Soil Sciences eLibrary. Disponible, en julio de 2025, en: <https://passel2.unl.edu/view/lesson/ae42848963d4>
- Martín Hernandez, N. (2019) The use of long-term high.spatial resolution Normalized Difference vegetation Index (NDVI) to determine different environmental processes in Spain. Zaragoza: Universidad de Zaragoza, Dpto. de Geografía y Ordenación del Territorio. Tesis doctoral.
- Observatorio agrario de Navarra (2024) 2200132-usos del suelo. En: Tableau Public, 5 de enero de 2024, en: <https://public.tableau.com/app/profile/observatorio.agrario.gobierno.de.navarra/viz/2200132-usos-delsuelo/Historial>
- Pejenaute Goñi, J.M. (2002) Navarra-Geografía. Pamplona; Departamento de Cultura, Deporte y Juventud. https://www.culturanaavarra.es/uploads/files/geografia_navarra.pdf
- Peral, C., Navascués, B., Ramos, P. (2017). Serie de precipitación diaria en rejilla con fines climáticos. Nota técnica 24 de AEMET, 30 pp. Disponible, en junio de 2025. En: https://www.aemet.es/documentos/es/conocermas/recursos_en_linea/publicaciones_y_estudios/publicaciones/NT_24_AEMET/NT_24_AEMET.pdf

- Piao, S.; Wang, X.; Park, T.; Chen, C.; Bjerke, J.W.; Chen, A.; Ciais, P.; Tømmervik, H.; Nemani, R.R.; Myneni, R.B. (2019) Characteristics, drivers and feedbacks of global greening. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1: 14–27. doi: 10.1038/s43017-019-0001-x
- Rasilla, D.F., Martilli, A., Allende, F., Fernandez, F. (2022) Long-term evolution of cold air pools over the Madrid basin. *International Journal of Climatology*, 43: 38-56. doi:10.1002/joc.7700
- Sergieieva, K. (2025). NDVI: Cómo Funciona El Índice Y Uso En La Agricultura. En: EOS Data Analytics. Disponible, en mayo de 2025, en: <https://eos.com/es/blog/indice-de-vegetacion-de-diferencia-normalizada-o-ndvi/>
- Vicente, A.M.; Donézar, M.; Del Barrio, F.; San Roque, M. (2004) *Memoria del Mapa de Cultivos y Aprovechamientos de Navarra 1:200.000*. Departamento de Agricultura, Ganadería y Alimentación del Gobierno de Navarra.
- Vicente, S.M.; Lasanta, T.; Romo, A. (2003) Variabilidad espacial y diferencias estacionales en la producción vegetal de los usos del suelo en el Pirineo Central Español. *Eria*, 62(2003): 325-339. doi: <https://doi.org/10.17811/er.0.2003.325-339>
- Vicente-Serrano, S. M., Martín-Hernández, N., Reig, F., Azorin-Molina, C., Zabalza, J., Beguería, S., Domínguez-Castro F., El Kenawy A., Peña-Gallardo M., Noguera I., García M. (2020). Vegetation greening in Spain detected from long term data (1981–2015). *International Journal of Remote Sensing*, 41(5), 1709-1740. <https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1674460>
- Vicente-Serrano, S.M.; Reig, F.; Beguería, S. (2023) NDVISpainDatabase [Dataset]; CSIC, Instituto Pirenaico de Ecología (IPE); CSIC, Estación Experimental de Aula Dei (EEAD). Disponible en mayo de 2025, en: <https://digital.csic.es/handle/10261/331949>