

**UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID**

FACULTAD DE GEOGRAFÍA E HISTORIA



**MÁSTER UNIVERSITARIO EN  
TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN GEOGRÁFICA**

**TRABAJO FIN DE MÁSTER**

**CURSO 2022-2023**

**ANÁLISIS DE CAMBIOS EN LOS USOS DEL SUELO MEDIANTE  
TELEDETECCIÓN EN EL PARQUE NACIONAL DILIJAN, ARMENIA  
ANALYSIS OF CHANGES IN LAND USE WITH REMOTE SENSING IN  
DILIJAN NATIONAL PARK, ARMENIA**

**ARTUR CHAROYAN**

CONVOCATORIA DE JUNIO

TUTORA:

María del Pilar García Rodríguez  
Departamento de Geografía  
Facultad de Geografía e Historia

**RESUMEN:** las Tecnologías de la Información Geográfica (TIG) son fundamentales para estudios medioambientales. En Armenia, la deforestación y los cambios de usos del suelo han sido un problema presente desde su independencia de la Unión Soviética. Sin embargo, se han aplicado normas para frenar dichos problemas. Para analizar los cambios de usos de suelo en el Parque Nacional Dilijan de Armenia y sus alrededores se ha recurrido a la aplicación de teledetección óptica y radar, al igual que los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Se han seleccionado dos imágenes: una de junio de 1991 de Landsat 5, y otra de junio de 2021 de Sentinel 2, para estudiar la evolución de los usos del suelo. Para analizar estas imágenes separadas en 30 años, se han aplicado técnicas específicas como la combinación de bandas, mejoras espectrales, índices radiométricos (NDVI, SAVI, NDBI y *Mineral Composite*), análisis radar y cartografía temática. Los resultados muestran que ha habido forestación y aumento de densidad arbórea en la mayoría de la zona, aunque hay áreas en las que se ha producido una deforestación y degradación del suelo, mientras que en otras ha habido erosión. Esto indica que las leyes y la denominación de la Reserva Forestal de Dilijan como Parque Nacional sí funciona y produce efectos positivos para el medio natural. Por lo tanto, se recomienda aplicar más legislación protectora forestal en otras áreas naturales del país para poder lograr una mejora medioambiental en la República de Armenia.

**PALABRAS CLAVE:** Armenia, usos del suelo, deforestación, teledetección, Sistemas de Información Geográfica (SIG).

**ABSTRACT:** Geographical Information Technologies (TIG) are essential for environmental studies. In Armenia, deforestation and changes in land use have been a present problem since its independence from the Soviet Union. However, regulations have been applied to resolve such problems. To analyse the changes in land use in the Dilijan National Park of Armenia and its surroundings, the application of optical and radar remote sensing has been used, as well as Geographical Information Systems (GIS). Two images have been selected: one from June 1991 from Landsat 5, and another from June 2021 from Sentinel 2, to study the evolution of land use. To analyse these images separated by 30 years, specific techniques have been applied such as band combination, spectral enhancements, radiometric indexes (NDVI, SAVI, NDBI and Mineral Composite), radar analysis and thematic cartography. The results show that there has been afforestation and increase in tree density in most of the area, although there are locations where deforestation and soil degradation have occurred, while in others there has been erosion. This indicates that the laws and the designation of the Dilijan Forest Reserve as a National Park does work and produces positive effects for the natural environment. Therefore, it is recommended to apply more forest protection legislation in other natural areas of the country to achieve environmental improvement in the Republic of Armenia.

**KEY WORDS:** Armenia, land use, deforestation, remote sensing, Geographical Information System (GIS).

## AGRADECIMIENTOS

Antes de empezar, quiero remarcar mi experiencia positiva, y, en general, la del resto de mis compañeros en este Máster. Muchos de nosotros tenemos experiencias negativas de la universidad y nos hemos sentido muy bien en este máster. Además, como delegado de clase, he podido tener una experiencia nueva y enriquecedora que me ha dado sabiduría para lidiar en futuras situaciones en el mundo laboral y personal. Por ello, creo que es necesario dar mi agradecimiento a todas las personas que han hecho posible esto.

En primer lugar, agradecer a Pilar García, del departamento de Geografía por aceptar la tutoría del TFM pese a no formar parte del profesorado del Máster. Gracias por ayudarme en construir este trabajo, a no ponerme presión en el poco tiempo que tenía compaginando todo, por resolver las dudas, por facilitarme la creación del trabajo y por tu disposición conmigo. También especial agradecimiento por animarme a hacer el TFM sobre mi país de origen, algo que ha sido una experiencia muy gratificadora para mí, y creo que para todos los que lean este trabajo, ya que tendréis la oportunidad de conocer mejor al pequeño país del Cáucaso.

Por otra parte, mis agradecimientos infinitos también a Ana Condeço, mi tutora del TFG del curso pasado y coordinadora del Máster en TIG. No tengo palabras para expresar lo contento que estamos todos por la organización y la atención que has tenido con nosotros en el transcurso del curso ha sido excelente, y para muchos, muy contrastada positivamente con las experiencias anteriores que habíamos tenido en la universidad. No estaba acostumbrado a una sensación tan buena en el mundo académico. Gracias por preocuparte por todos y cada uno de nosotros.

También me gustaría agradecer personalmente a las amistades que he conseguido en este Máster. Podría decir el nombre de todos, pero desafortunadamente no tengo espacio para ello. Gracias en especial a Débora Vas, Álvaro Carrasco, Stefany Escobar, Celia Gil, Guillermo Sánchez, Beatriz Aleza, Noelia Hernández, Javier Menéndez y Oana Rus. Los momentos vividos, las experiencias ganadas y las risas han sido inolvidables e irrepetibles. De este Máster no sólo me llevo conocimientos y un título, si no muchas amistades.

Tampoco me podría olvidar del motor de mi vida actualmente, que es el Atlas Nacional del Instituto Geográfico Nacional. Muchas gracias por tratarme como el hijo de la familia y por ayudarme y apoyarme en todo lo que hago. Gracias en especial a Pilar Sánchez-Ortiz, Carmen Carmona, Jorge Sacristán, Noemí Herranz, Irene Sahagún, Marta García y Sergio García. También especial agradecimiento a Joaquín López, del departamento de Teledetección, por ayudarme en el desarrollo de algunas cuestiones del trabajo.

# ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN .....	4
1.1. PLANTEAMIENTO Y JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO .....	6
1.2. OBJETIVOS .....	7
2. MARCO TEÓRICO .....	8
2.1. LA TELEDETECCIÓN EN LOS CAMBIOS DE USOS DEL SUELO.....	8
2.2. DEFORESTACIÓN: EL MAYOR CAUSANTE DE CAMBIOS EN USOS DEL SUELO EN ARMENIA.....	9
3. ÁREA DE ESTUDIO Y SU CARACTERIZACIÓN .....	12
4. METODOLOGÍA Y MATERIALES .....	16
4.1. OBTENCIÓN DE IMÁGENES DE SATÉLITES.....	16
4.2. OBTENCIÓN DE CAPAS SIG.....	19
4.3. TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN GEOGRÁFICA APLICADAS.....	19
4.4. SOFTWARES USADOS.....	20
4.5. TRATAMIENTO DE IMÁGENES DE SATÉLITE.....	22
4.6. FLUJOS DE TRABAJO .....	24
5. RESULTADOS.....	26
5.1. COMBINACIÓN DE BANDAS .....	26
5.2. MEJORAS ESPECTRALES .....	30
5.3. ÍNDICES RADIOMÉTRICOS .....	36
5.4. ANÁLISIS RADAR.....	44
5.5. CLASIFICACIÓN SUPERVISADA .....	46
5.6. CARTOGRAFÍA FINAL DE RESULTADOS .....	49
6. CONCLUSIONES .....	50
7. BIBLIOGRAFÍA.....	54

# 1. INTRODUCCIÓN

Las Tecnologías de la Información Geográfica (TIG) son herramientas muy importantes para detectar cambios en el uso del suelo debido a su capacidad para recopilar, analizar y visualizar datos geográficos. Con las TIG es posible crear mapas digitales que muestran la distribución y los cambios en los usos del suelo a lo largo del tiempo. Estos mapas pueden ser creados utilizando datos satelitales, fotografías aéreas, sistemas de información geográfica y otras herramientas. La información generada por estas tecnologías puede ser utilizada para identificar patrones y tendencias en los usos del suelo, lo que permite a los planificadores y a los tomadores de decisiones tener una mejor comprensión de cómo está cambiando el paisaje en un área determinada. Además, las TIG también permiten la identificación de áreas que son críticas para la conservación, así como la detección de actividades ilegales como la tala indiscriminada y la minería no autorizada.

Es importante mencionar la relevancia que tienen los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y la teledetección dentro de las TIG. Ambas tecnologías son recursos de datos importantes para el análisis dinámico de las transformaciones del paisaje. La aplicación de estos datos ha permitido monitorear los cambios en los diferentes usos del suelo en menor tiempo, a bajo costo y con mayor precisión. La detección del cambio de usos del suelo se ha convertido en un tema importante de investigación debido al impacto de estos cambios en la atmósfera, el clima mundial, el sistema global de fluidos y el nivel del mar (Meyer y Turner, 1994).

Desde la década de 1990, los estudios globales, regionales y locales sobre los usos del suelo y los cambios en la cobertura terrestre se han desarrollado mucho, gracias a los avances en la observación de la tierra y los métodos de supervisión, incluidas las tecnologías de teledetección y Sistemas de Información Geográfica. La cuestión de los cambios en el uso del suelo se ha medido en muchas investigaciones internacionales e interdisciplinarias, como la geología, el medio ambiente y la biogeografía.

Recientemente, la teledetección se aplica ampliamente para monitorear cambios y dinámicas en el uso de la tierra, la observación de la cubierta terrestre y su impacto en el medio ambiente. Ofrece una variedad de beneficios y la oportunidad de evaluar áreas remotas como bosques tropicales, altas montañas o glaciares, actualizar información de terrenos y explorar usos del suelo históricos. Para ofrecer una mayor eficiencia en la identificación de cambios en la cobertura del suelo, la teledetección a menudo se combina con los Sistemas de Información Geográfica. La tecnología SIG se refiere al análisis y manejo de datos espaciales y temporales asociados con sus características. Ambas tecnologías brindan la capacidad de recopilar características y cambios en los usos del suelo mediante la integración de datos de sensores remotos existentes y entornos relevantes (como bosques tropicales, áreas urbanas y zonas costeras), y diferentes transformaciones de la tierra, como la deforestación, el desarrollo urbano y la desertificación.

Por otra parte, la teledetección posee unas ventajas para la supervisión de cambios de usos del suelo respecto a otras formas de observación de la Tierra (Chuvieco, 2010):

- ❖ **Enfoque global:** las imágenes aportan una visión global de la Tierra.
- ❖ **Observación de información en regiones no visibles del espectro:** gracias a los sensores de los satélites, que registran información tanto en el espectro visible como en el espectro no visible, lo que permite ampliar la capacidad de estudio.
- ❖ **Frecuencia y homogeneidad de adquisición:** en función de las características de las órbitas de los satélites, tienen capacidad para pasar por el mismo punto con una frecuencia temporal determinada. Gracias a ello, se puede llevar a cabo un seguimiento multitemporal de procesos dinámicos (incendios, clima, actividad fotosintética). Del mismo modo, al tratarse de imágenes homogéneas hace que sean comparables en todo momento.

Este trabajo se centra en el Parque Nacional Dilijan, situado en Armenia. La República de Armenia está ubicada en el cruce de las zonas biogeográficas del Cáucaso Menor y las zonas iraní y mediterránea y exhibe tanto un gran rango de variación altitudinal, desde 375 m hasta el pico de 4.090 m del monte Aragats, así como diversidad de zonas climáticas. Esta combinación ha resultado en una variedad de paisajes y comunidades ecológicas con una flora y fauna distintas, incluidas muchas especies endémicas regionales, relictas y especies raras. Por lo tanto, en el pequeño territorio del país de 2.974.300 ha, existen alrededor de 3.800 especies de plantas vasculares altas, 428 especies de algas de suelo y agua, 399 especies de musgos, 4.207 especies de hongos, 464 especies de líquenes, 549 especies de vertebrados y alrededor 17.200 especies de invertebrados.

El primer Código Forestal de Armenia Independiente, que fue aceptado en 1994, era bastante conservador y lógicamente conectado con el antiguo Código Forestal de la República Socialista Soviética de Armenia (SSR) establecido en 1978. De acuerdo con esa ley, se prohibió cualquier tala de producción en los bosques armenios y solo ciertos cortes denominados sanitarios, como la extracción de árboles muertos e infectados. En 2005 se aprobó el nuevo Código Forestal en el que se introdujeron la protección y categorías especiales para bosques de producción (junto con fronteras estatales, zonas verdes, etc.). A pesar de las claras indicaciones de un potencial limitado de tala regular de los bosques armenios, las talas ilegales y no reglamentadas, iniciadas en 1992 debido al bloqueo vial y energético del país, continúan hasta el día de hoy. Una red de Áreas Especialmente Protegidas (SPA) se estableció por primera vez en Armenia en 1958 para proteger ecosistemas y hábitats, así como especies raras, endémicas y amenazadas. Las primeras áreas naturales especialmente protegidas de Armenia fueron Dilijan, Khosrov Forest y Reservas de Shikahogh. El mismo año, también se fundaron seis reservas. Todas ellas tenían importancia para la protección de los bosques. Posteriormente se amplía la red de SPA: en 1981, la Reserva Erebuni se instauró en las cercanías de Ereván para proteger los cereales silvestres; en 1987, se estableció la Reserva Sev Lich (“Lago Negro” en armenio) para proteger la naturaleza compleja del lago volcánico relictos; y, en 1978, se estableció el Parque Nacional Sevan basado en la tarea

extremadamente importante de conservar los recursos de agua dulce del lago Sevan para todo el Cáucaso, así como sobre la importancia nacional de los recursos pesqueros. En 1999 había 27 Reservas Estatales y un Parque Nacional registrado con 311.000 hectáreas, el 10% de la superficie de Armenia. Alrededor del 60% de especies están representadas dentro de la red de áreas protegidas, sin embargo, hay un sesgo hacia hábitats forestales, y la necesidad de ampliar el sistema para incluir una mejor representación de otros ecosistemas. Actualmente, los SPA se implementan bajo cuatro designaciones nacionales diferentes:

- **Reservas:** Khosrov, Shikahogh y Erebuni.
- **Parques Nacionales:** Sevan, Dilijan, Lago Arpi y Arevik.
- **Reservas estatales:** un total de 27 reservas estatales.
- **Monumentos nacionales:** un total de 232 monumentos naturales.

La superficie total de áreas protegidas designadas a nivel nacional cubre el 12,90% del territorio terrestre y aguas interiores. Sin embargo, todavía se necesitan algunos esfuerzos para alcanzar la meta de biodiversidad de la ley Aichi propuesta en el país, que apunta a tener el 17% de territorio protegido. Por otra parte, varias decisiones han sido elaboradas y aprobadas por el Gobierno de Armenia para la mejora de la legislación relativa a los espacios naturales especialmente protegidos y a la protección de objetos de flora y fauna. En particular:

- ❖ El Gobierno adoptó Decreto N° 781-N “Por el cual se establece el procedimiento de aprovechamiento de elementos de la flora para su protección y reproducción en condiciones naturales” en 2014, que define medidas para proteger las especies recién detectadas registradas en el Libro Rojo de Armenia, incluidas la delimitación de las zonas de protección y la limitación de algunas de las actividades económicas allá.
- ❖ “El plan de gestión y las medidas prioritarias del Parque Nacional Dilijan para 2017-2026” fueron aprobadas según la Resolución Gubernamental N° 190-N en 2017. El Parque Nacional Dilijan fue establecido el 21/02/2002 por el decreto N° 165 del Gobierno de Armenia, sobre la base de la Reserva Estatal Dilijan. Es administrado por la provincia o *manz* de Dilijan, que es subordinado al Ministerio de Medio Ambiente de la República. Aunque se han realizado muchos estudios sobre el seguimiento de la cobertura terrestre o usos de la tierra y la degradación forestal a escala mundial, regional o nacional, aún no hay estudios disponibles sobre Armenia para el mapeo de áreas especialmente protegidas.

## 1.1. PLANTEAMIENTO Y JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO

La deforestación es un factor que provoca cambios significativos en el uso del suelo, tanto en términos de la cobertura forestal como en la calidad del suelo y la biodiversidad. Estos cambios tienen un impacto negativo en los ecosistemas naturales y en la sostenibilidad a largo plazo de la región. El uso de tecnologías de la información geográfica como los SIG y la teledetección es una herramienta eficaz para analizar y monitorear estos cambios. El objetivo de esta investigación es analizar los cambios en el uso del suelo debidos a la deforestación utilizando tecnologías de la información geográfica como SIG y teledetección.

Este estudio es **justificable** porque permitirá comprender mejor la magnitud de la deforestación en los usos del suelo y los efectos provocados en la biodiversidad del Parque Nacional Dilijan, además de que hay muy pocos estudios previos sobre un tema tan importante como este. Los resultados de esta investigación también pueden ser útiles para planificar estrategias de conservación y gestión sostenible del uso del suelo.

Es importante formular unas **preguntas de investigación** a las que daremos respuesta en el trabajo de investigación y en torno a las cuáles gira el proyecto:

1. ¿Cuál es la magnitud de los cambios en los usos del suelo en el Parque Nacional Dilijan?
2. ¿Ha sido la deforestación el mayor cambio de suelos en el Parque Nacional Dilijan?
3. ¿Ha habido otros cambios de usos del suelo aparte de la deforestación?
4. ¿Qué medidas se pueden proponer para conservar y gestionar de forma sostenible los suelos y la biodiversidad en la región?

Como todo trabajo de investigación, es importante tener una **hipótesis** ya que es una parte fundamental del TFM que ayuda a definir el alcance y los objetivos de la investigación, fomenta el pensamiento crítico y de análisis, y facilita la comunicación y difusión de los resultados obtenidos. En nuestro caso, la hipótesis es que se espera que la deforestación y el urbanismo hayan causado cambios significativos en el uso del suelo en la región. Además, se augura que estos cambios tengan un impacto negativo en la calidad del suelo y la biodiversidad. Finalmente, se intenta que se puedan proponer medidas efectivas para conservar y gestionar de forma sostenible el uso del suelo en la región utilizando tecnologías de la información geográfica como SIG y teledetección.

## 1.2. OBJETIVOS

El **objetivo principal** de este trabajo fin de Máster es detectar los cambios de usos del suelo entre 1991 y 2021 en el Parque Natural Dilijan y sus alrededores, en Armenia. Debido a que es un trabajo de investigación profundo, también contamos con **objetivos secundarios**, entre los que destacan:

- ❖ Aplicar todas las Tecnologías de la Información Geográfica (TIG) posibles para poder hacer uso de los conocimientos adquiridos en el Máster.
- ❖ Realizar un estudio sobre la capa vegetal del área de estudio con índices radiométricos.
- ❖ Usar varias técnicas de teledetección para demostrar mejor los resultados en cuanto a los cambios de usos del suelo.
- ❖ Realizar cartografía de usos del suelo con clasificación supervisada y SIG en el área de estudio.
- ❖ Usar teledetección radar para la extracción de información adicional de la deforestación y su evolución.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. LA TELEDETECCIÓN EN LOS CAMBIOS DE USOS DEL SUELO

Con las crecientes preocupaciones contemporáneas sobre el cambio climático, el cambio ambiental global y la sostenibilidad, la ciencia del cambio de la tierra se ha convertido en una dirección científica única para abordar estos temas desafiantes. Esta disciplina, definida como “el campo interdisciplinario que busca comprender la dinámica de la cobertura y el uso de la tierra como un sistema humano-ambiental acoplado para abordar la teoría, los conceptos, los modelos y las aplicaciones relevantes para los problemas ambientales y sociales, incluida la intersección de los dos” (Turner et al., 2007), tiene muchos componentes, en los cuales uno de los elementos más fundamentales y críticos es la observación, el monitoreo y la caracterización del cambio de la tierra.

Los usos del suelo han estado cambiando a un ritmo sin precedentes. Más de la mitad han sido modificados por los humanos, y casi todas las superficies terrestres han sido influenciadas por el cambio climático y varios tipos de perturbaciones terrestres (Dale, 1997). La teledetección es de gran importancia para estudiar el cambio global de la tierra. En las últimas décadas se han logrado grandes avances en el mapeo a gran escala del cambio de los usos del suelo basado en datos de sensores remotos, debido al rápido crecimiento de la cantidad de satélites de observación de la tierra, a la política libre de datos abiertos y el formato de datos listos para el análisis, que ofrece una gran cantidad de conjuntos de datos en línea y la capacidad mejorada de nuevos algoritmos para la detección de cambios terrestres (Zhu, 2017). Cabe señalar que, aunque los términos "cobertura del suelo" (las propiedades físicas de la superficie de la Tierra) y "uso del suelo" (la utilidad social, económica y cultural del suelo) son bastante distintos (Turner, 1997), a menudo se agrupan en estudios de teledetección, y la "cobertura del suelo" se suele utilizar como un término agrupador de ambas definiciones (Anderson et al., 1976).

La teledetección óptica y radar son herramientas importantes para el estudio de los cambios de uso del suelo y la deforestación por varias razones (Giri, 2012):

**1. Detección y monitoreo de cambios:** la teledetección óptica y radar permite detectar y monitorear cambios en el uso del suelo y la cobertura forestal a gran escala y de manera continua. Estas técnicas proporcionan imágenes de alta resolución espacial y temporal, lo que permite identificar y cuantificar los cambios en las áreas forestales y los diferentes tipos de uso del suelo a lo largo del tiempo.

**2. Mapeo y clasificación de cobertura terrestre:** la teledetección óptica y radar permite realizar clasificaciones automáticas y precisas de la cobertura terrestre. Estos métodos utilizan algoritmos y técnicas de procesamiento de imágenes para identificar y distinguir diferentes tipos de vegetación, como bosques, cultivos, pastizales y áreas urbanas. Esto es crucial para evaluar la extensión y la distribución espacial de la deforestación y los cambios en el uso del suelo.

**3. Evaluación de la deforestación:** la teledetección óptica y radar proporciona una visión global y actualizada de la deforestación. Permite estimar las tasas de pérdida de bosques, identificar áreas de deforestación ilegal o no autorizada, y evaluar el impacto de la deforestación en la biodiversidad y los servicios ecosistémicos. Además, estas técnicas también pueden detectar cambios sutiles en la estructura del bosque, como la degradación forestal.

**4. Análisis de patrones y tendencias:** las imágenes de teledetección óptica y radar se pueden utilizar para analizar patrones y tendencias de cambio en el uso del suelo y la deforestación a diferentes escalas espaciales y temporales. Esto proporciona información valiosa para comprender los factores impulsores de los cambios en el paisaje, identificar áreas de alto riesgo y apoyar la toma de decisiones en la gestión forestal y la planificación territorial.

Estas técnicas proporcionan información espacialmente explícita y actualizada, permitiendo una mejor comprensión de los procesos de cambio en el paisaje y facilitando la toma de decisiones informadas para la conservación y el manejo sostenible de los recursos naturales.

## 2.2. DEFORESTACIÓN: EL MAYOR CAUSANTE DE CAMBIOS EN USOS DEL SUELO EN ARMENIA

En todo el mundo, la degradación ambiental es inseparable de la pobreza económica. Los países en desarrollo experimentan algunas de las peores formas de daño ambiental. Esta relación plantea numerosas consecuencias para el futuro del entorno natural y los medios de vida humanos que dependen directamente de él. En la pequeña y montañosa nación de Armenia, ubicada en el sur de la antigua Unión Soviética, esta relación se observa de primera mano en la historia reciente de deforestación del país. La historia no contada de Armenia ilustra cómo los eventos económicos recientes, que resultaron en un empobrecimiento masivo, fueron los catalizadores de la deforestación a lo largo de la década de 1990 y son los impedimentos para la reforestación en la actualidad. Este vínculo de las crisis humanas con las ambientales sugiere que una solución a la deforestación sin un remedio para la pobreza no logrará resolver verdaderamente el problema. También es importante tener en cuenta que la deforestación se origina y persiste dentro de las condiciones socioeconómicas únicas de cada región.

Es evidente que los bosques de Armenia se han visto gravemente amenazados al examinar cómo los eventos postsoviéticos aumentaron las dificultades económicas del país, lo que se tradujo en presiones sobre el medio natural. La pobreza golpeó al país poco después de la desaparición de la estructura económica y política soviética, y los efectos de la guerra y el bloqueo energético agravaron las circunstancias. Además, estos problemas surgidos en el país se materializaron especialmente a nivel de aldea. A medida que los bosques retroceden y los costes de comprar leña y gas aumentan, más hogares rurales en Armenia no tienen otra opción que renunciar al combustible, mientras que los bosques restantes se cortan más rápido de lo que se regeneran. El aumento de la tierra desnuda o desertificada y la degradación del suelo multiplican los desafíos para la regeneración de los bosques. Tal y como está actualmente, solo el 8% del país tiene cubierta forestal (Karanian y Kurkjian, 2006). A pesar de la legislación de protección ambiental,

la ayuda internacional y el crecimiento económico anual, continúan las tendencias crecientes de pobreza y degradación de la tierra. Esto explica por qué Armenia, que tiene una tasa de pobreza actual superior al 50% (World Bank, 2023), y donde el 80% de la tierra está experimentando la desertificación, está cumpliendo una profecía similar a muchas de las naciones en desarrollo del mundo que enfrentan las dificultades de la supervivencia económica del siglo XXI.

Dentro de este país de piedras, como lo llaman los nativos, los bosques restantes están desigualmente distribuidos y son de baja calidad productiva. La distribución de los bosques es del 62% en el noreste, en los marzes de Lori y Tavush, y 36% en el sureste del marz de Syunik (Ghulijanyan, 2015). Solo el dos por ciento de los bosques se encuentran en el centro de Armenia (Ghulijanyan, 2012). La región alrededor del lago Sevan en el este, apoyado de una gran población de refugiados, posee solo el 1,2% de los bosques de la nación. La distribución es desigual debido a la variación natural del clima y las sequías periódicas y, en parte, a la mala gestión de los bosques en el pasado (CENN)<sup>1</sup>. Ambos factores siguen vulnerando la capacidad reproductiva de los bosques, que cada año se reducen. Actualmente, más del 70% de los bosques armenios están degradados, y se estima que, al ritmo actual de reforestación, que son menos de 500 ha por año, las áreas deforestadas no van a recuperarse por otros 60 años (Nalbandyan, 2018). El 97% de los bosques de Armenia son de hoja ancha, con predominio de robles, hayas y carpes. Es importante mencionar que los bosques en Armenia ocupan un territorio pequeño y escaso con 0,1 ha de área forestal per cápita (Nalbandyan, 2018), mientras que el promedio mundial es de 0,6 ha (FAO, 2003) y el promedio de la Comunidad de Estados Independientes (CEI)<sup>2</sup> es de 2,7 ha. Además del pequeño porcentaje de masa de tierra boscosa, solo el 0,9 % del área forestal del país es “muy” densa (Ghulijanyan, 2015). Esto equivale a apenas 300 ha. Los bosques de “alta” densidad ocupan el 14,4% de la superficie forestal, los de densidad “mediana” representan el 62,6%, y los de “baja” densidad ocupan el 22% (Ghulijanyan, 2015). Con una densidad tan baja, no hace falta mucha imaginación para ver cómo el principal efecto de la deforestación ha sido la incapacidad de los bosques para regenerarse.

Si pasa mucho tiempo antes de que los bosques cortados rejuvenezcan, pierden esa capacidad de regeneración, y esta es la tragedia de la deforestación. El adelgazamiento de la cubierta forestal invita a la luz solar no deseada, lo que eleva la temperatura del bosque y expone el suelo a un mayor calor. Esto interfiere con los ciclos naturales entre el suelo, las plantas y el régimen hidrológico que normalmente funcionan en condiciones frescas y húmedas. La tala de árboles también deposita maleza en el suelo del bosque. A medida que estas ramas y hojas se descomponen con las temperaturas más cálidas, generan nichos propicios para la proliferación de plagas y enfermedades. De hecho, estas se han convertido en un problema grave en muchos de los bosques restantes de Armenia (BOE de 2002 Armenia, 43).

---

<sup>1</sup> Caucasus Environmental NGO Network o Red de ONG ambiental del Cáucaso

<sup>2</sup> La Comunidad de Estados Independientes (CEI) se refiere a la alianza económica postsoviética entre 12 de las 15 exrepúblicas soviéticas, sin incluir a Estonia, Letonia y Lituania.

Otra consecuencia de la deforestación que afecta a los bosques de Armenia es la alteración en la composición de las especies de árboles. Primero se cortaron las especies de alto valor que están asociadas con beneficios económicos y biológicos. El Ministerio de Protección de la Naturaleza informa que los bosques de robles, hayas y fresnos ahora están siendo reemplazados por especies menos eficientes y resistentes que se adaptan mejor a los climas desérticos y semidesérticos en los que se encuentran ahora debido a la deforestación.

Los efectos de la deforestación no están separados de la pobreza económica de una nación o de la pobreza de los que allí viven. En 2003, el Ministerio de Protección de la Naturaleza de Armenia declaró que “los usos humanos de los bosques dieron lugar a profundos cambios estructurales en la capacidad reproductiva natural de los bosques, habían reducido la fertilidad, activado la erosión y violado el régimen hidrológico de los bosques.” (Gobierno de Armenia, 2003) Cuando se considera que las personas que habitan en estas regiones en los países en desarrollo tienden a ser grupos marginados de la sociedad con mínima seguridad, surge un cuadro de desesperación. Las regiones que sufrieron la mayor degradación en Armenia fueron las regiones de Lori, Tavush (en donde se sitúa el área de estudio de este trabajo de investigación), Syunik y Gegharkunik. Los impactos sobre los humanos en las ciudades y aldeas de estas regiones se están acelerando en forma de erosión severa y deslizamientos de tierra que están arrasando o dañando casas, otros edificios, tierras agrícolas y personas en algunos casos.

Por otra parte, hay unos impedimentos para la reforestación en Armenia. Estos provienen de los mismos problemas económicos, como la tala ilegal y la corrupción. Después del colapso de la Unión Soviética, la tala ilegal y legal comercial dio lugar a una nueva industria de exportación. Además, la mala gestión forestal es en parte culpable de la alta tasa de extracción ilegal de madera. Dejando de lado la tala, los esfuerzos de reforestación se ven obstaculizados por la falta de insumos necesarios para la rehabilitación a gran escala de los bosques. Los impedimentos para la reforestación están ligados a un problema más profundo dentro de este país en transición. La corrupción limita el desarrollo de la economía armenia y de la sociedad mediante la invalidación de la legitimidad de las instituciones legales y provocando desilusión y pesimismo con respecto al futuro. Este último efecto es crucial, ya que la ausencia de esperanza puede paralizar el desarrollo de agendas, hecho que ocurre en casi todos los países postsoviéticos, donde se han dificultado cada una de sus transiciones. En Armenia, la corrupción ha superado la eficacia, el atractivo y la legitimidad de la ley y el orden. Mientras tanto, el ciclo se ve exacerbado por el profundo pesimismo, el cinismo y la tolerancia a la corrupción que prevalecen en todos los niveles de gobierno, empresa y dinámica social. El desafío de regenerar las tierras deforestadas parece desalentador dada la insolvencia, la corrupción generalizada y la falta de legitimidad legal de los organismos encargados de cumplir la ley.

### 3. ÁREA DE ESTUDIO Y SU CARACTERIZACIÓN

El área de estudio de este trabajo de investigación se localiza en la República de Armenia, antiguo estado de la Unión Soviética situado en el Cáucaso, al este de Europa (figura 1).

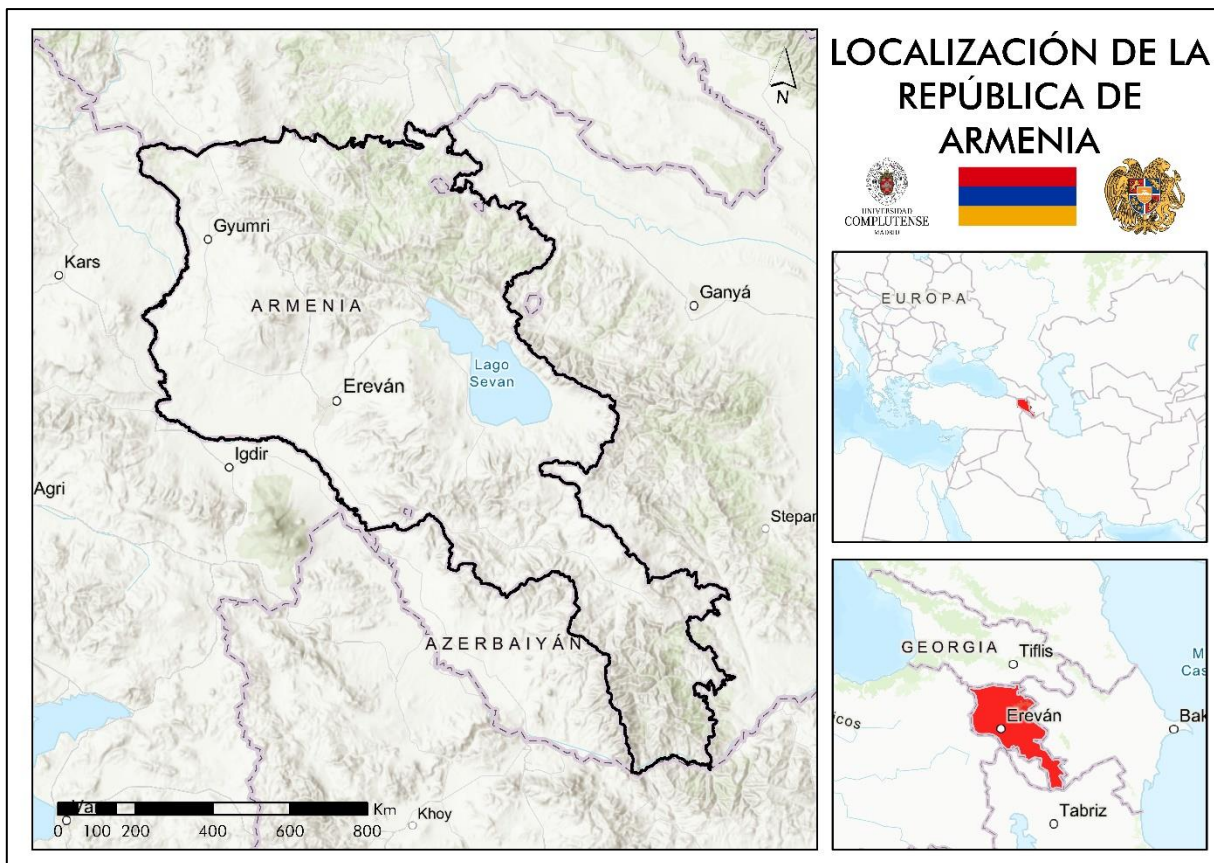


Figura 1: localización de la República de Armenia. Fuente de datos: ArcGis Hub Open Data. Elaboración propia

En concreto, esa área se centra en el Parque Nacional de Dilijan, el cual está ubicado en la parte noreste de Armenia, más precisamente en la provincia de Tavush. Dilijan es uno de los cuatro parques nacionales de Armenia. El parque se extiende a lo largo de cinco cadenas montañosas y comprende numerosos lagos y ríos. Cubre un territorio de 24.000 ha y ha sido reconocido por sus paisajes forestales, biodiversidad y manantiales de agua mineral, que se cree que tienen características curativas y saludables. Pese a que el parque se estableció oficialmente en 2002, anteriormente era clasificado como una reserva natural estatal, que fue fundada en 1958. En general, el territorio no se amplió ni se redujo; era solo una cuestión de cambio de estatus, de reserva a parque nacional. Este cambio tenía sus propias razones, que eran las amenazas del crecimiento de invasiones antrópicas en el territorio natural. Entre tales amenazas se encuentran el ferrocarril Ereván-Ijevan, que pasa por el parque, las actividades comerciales, la presencia de asentamientos y, sobre todo, la propia ciudad de Dilijan.

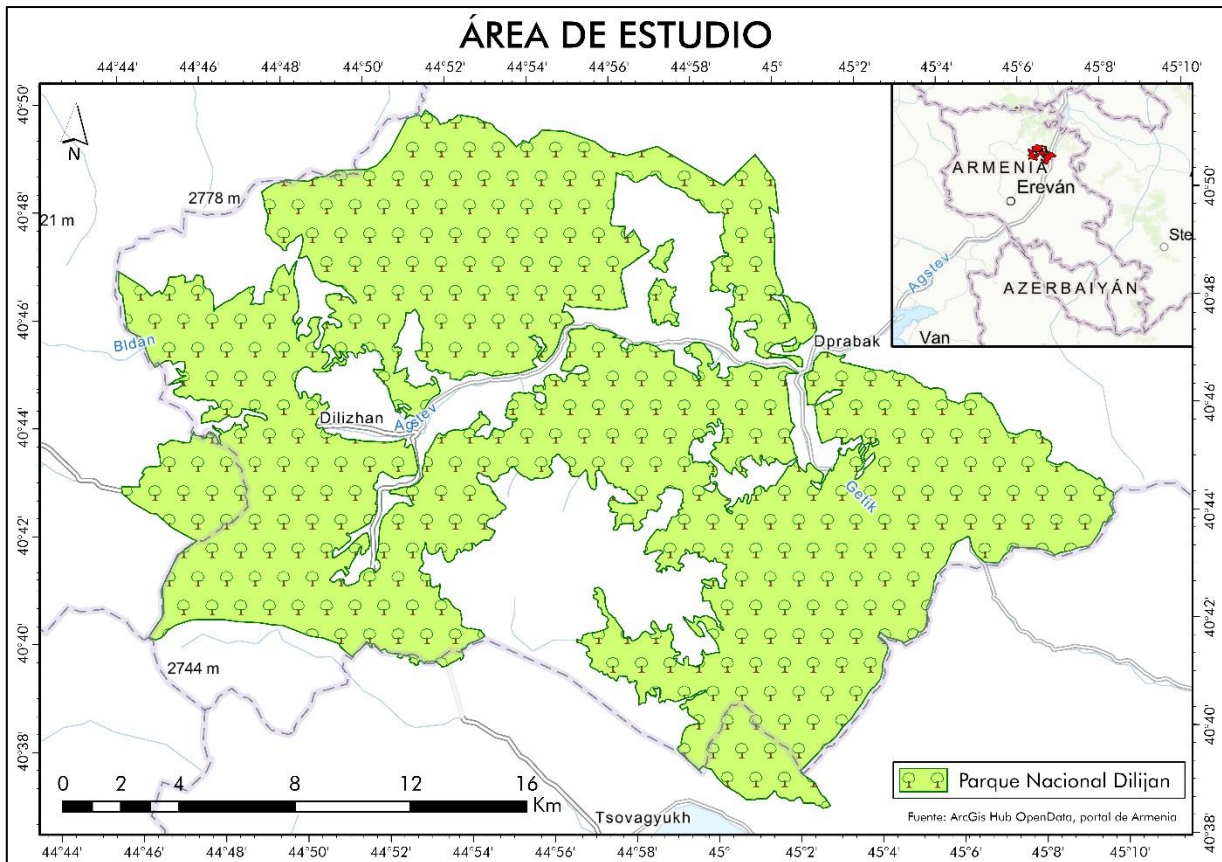


Figura 2: localización del Parque Nacional Dilijan. Elaboración propia mediante digitalización

El parque ofrece diversidad de flora y fauna. Es el hogar de unas 40 especies de plantas raras, incluidas 29 que figuran en el Libro Rojo de Datos de Armenia. La vegetación se podría generalizar en tres grupos principalmente: bosques, praderas y estepas (figura 3). Además, es típicamente caucásica e incluye bosques mixtos de robles, hayas y carpes, así como árboles frutales como nogales, perales y avellanos. Las laderas rocosas del oeste son ricas en especies únicas, como la hierba de San Juan armenia y la escabiosa pequeña, pero las verdaderas joyas de la flora del parque son los rodales terciarios de tejo relicto y el rododendro del Cáucaso que crece en las montañas de Pambak.

La fauna del parque también es rica e incluye alrededor de 800 especies de escarabajos, así como numerosos reptiles, anfibios y alrededor de 150 especies de aves con la becada del Caspio, el águila barbuda y el urogallo negro entre las especies especiales. Los mamíferos del parque incluyen el oso pardo, el linco, el lobo, el jabalí y el gato montés. Además, aparte de la flora y la fauna el parque también abarca algunos de los monasterios e iglesias armenios más hermosos y notables, entre los que se encuentran los monasterios de Haghartsin, Goshavank, Jukhtak y Matosavank y la Iglesia de Akhnabat.

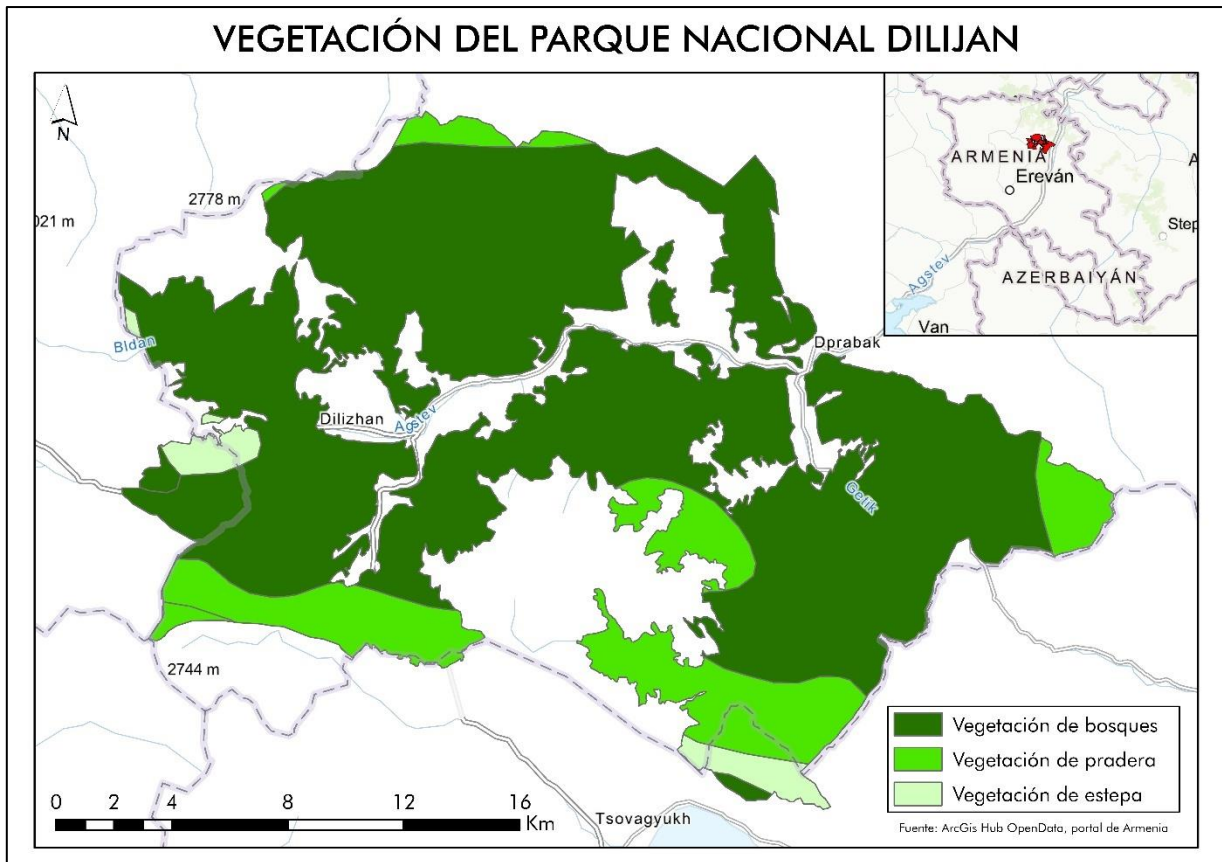


Figura 3: vegetación del Parque Nacional Dilijan. Elaboración propia

Por otra parte, también es interesante comentar la geología del área de estudio (figura 4). El parque presenta una combinación de formaciones rocosas, relieve montañoso y una historia geológica interesante. Se encuentra en la región montañosa de la cordillera de Dilijan, que es parte del Cinturón Plegado del Cáucaso Menor. Esta cadena montañosa se formó por la colisión de las placas tectónicas de Eurasia y Arabia, lo que dio lugar a una intensa actividad geológica y la formación de estructuras plegadas y falladas en la región.

La roca predominante en el parque es la toba volcánica, una roca ígnea de origen volcánico formada por la consolidación de cenizas y materiales piroclásticos expulsados durante erupciones volcánicas pasadas. Estas tobas son características de la región y se pueden encontrar en forma de acantilados, columnas y pilares rocosos, creando paisajes espectaculares. Además de las tobas, también se pueden encontrar otras formaciones rocosas, como lutitas, areniscas y calizas. Estas rocas sedimentarias se depositaron en antiguos mares y lagos durante diferentes períodos geológicos. Además, la región del Parque Nacional Dilijan ha experimentado una intensa actividad tectónica a lo largo de millones de años, lo que ha dado lugar a la formación de fallas y pliegues en las rocas. Estas estructuras tectónicas son evidentes en el paisaje, con crestas montañosas, valles y gargantas que muestran la acción de la tectónica de placas en la región.

# GEOLOGÍA DEL PARQUE NACIONAL DILIJAN

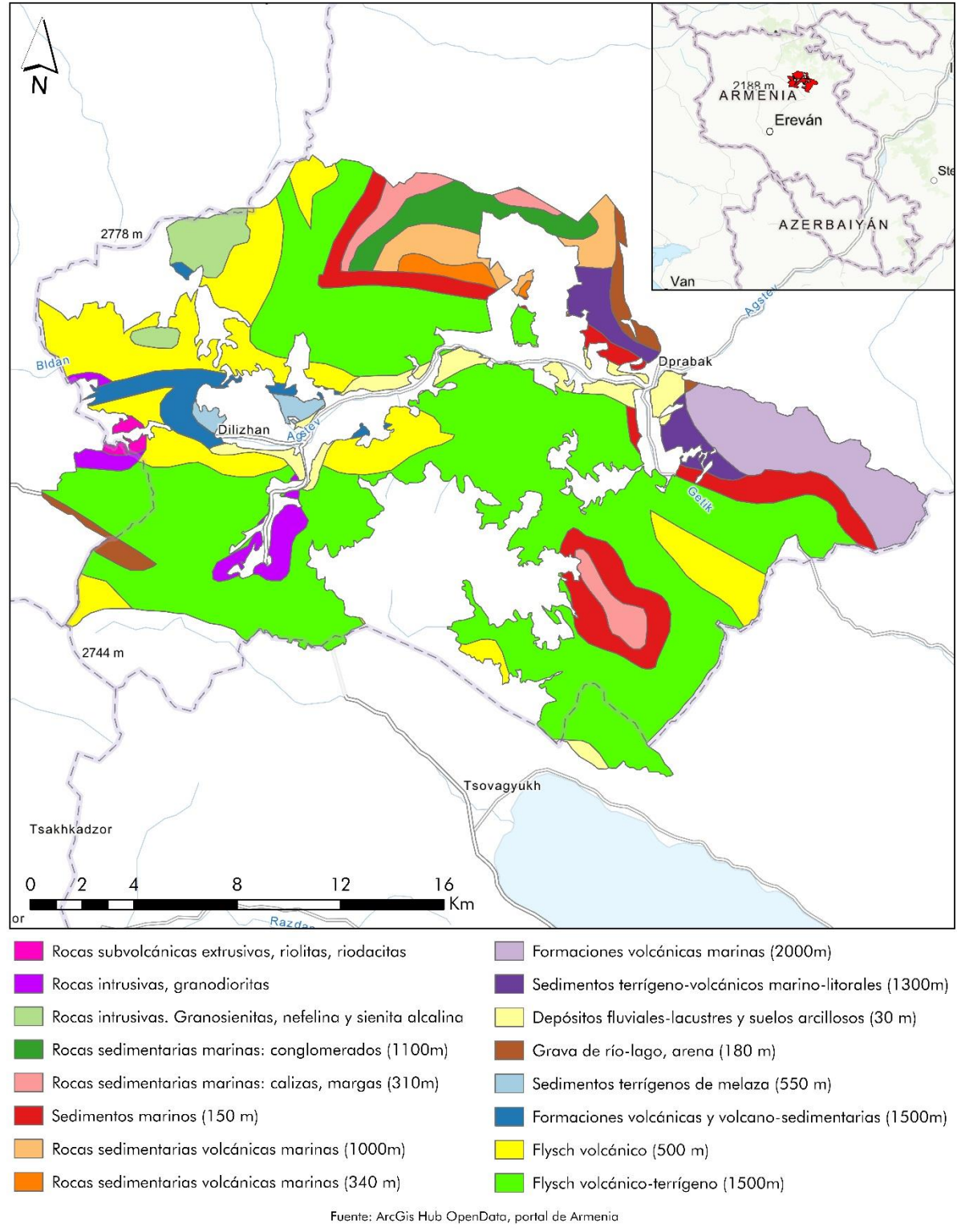


Figura 4: geología del Parque Nacional Dilijan. Elaboración propia

## 4. METODOLOGÍA Y MATERIALES

### 4.1. OBTENCIÓN DE IMÁGENES DE SATÉLITES

Para este trabajo fin de máster se han usado dos imágenes de satélite para comparar el cambio en los usos del suelo. La manera en la que se han obtenido ambas imágenes ha sido la misma: mediante la descarga desde la página de EO Browser. Debido a que las imágenes poseen un tamaño grande, se ha realizado un clip geométrico desde el visor EO de la zona de estudio y se han descargado las imágenes con el tamaño ya recortado, que en nuestro caso es de 23 kilómetros de alto y 39 kilómetros de ancho. Cabe destacar que se ha intentado obtener las imágenes con la menor incidencia de nubes (< 10%) para facilitar la teledetección, y, por eso, el mes escogido para el análisis es junio, además de que es el mes más equilibrado a la hora de evaluar la vegetación debido a que los inviernos son muy nevados y largos en Armenia. Se han seleccionado imágenes del mismo mes para que la comparación y los valores de los índices sean más coherentes: la primera es de 1991, para observar el estado del parque justo al final de la Unión Soviética; y, la segunda, es de 2021, para detectar los cambios producidos en la República de Armenia ya independiente.

La primera imagen es de junio de 1991 y corresponde al satélite Landsat 5. Desarrollado por la NASA, Landsat 5 fue lanzado desde la Base de la Fuerza Aérea de Vandenberg en California el 1 de marzo de 1984 y, al igual que Landsat 4, contenía los instrumentos Multispectral Scanner (MSS) y Thematic Mapper (TM). Landsat 5 entregó datos de imágenes de la Tierra durante casi 29 años, estableciendo un récord mundial Guinness para el "satélite de observación de la Tierra en funcionamiento más largo", antes de ser dado de baja el 5 de junio de 2013. Claramente, este satélite sobrevivió a su diseño de tres años. Este satélite incluía 7 bandas (tabla 1).

BANDA	LONGITUD DE ONDA ( $\mu\text{m}$ )	RESOLUCIÓN (m)
B1: Azul	0,45 – 0,52	30
B2: Verde	0,52 – 0,60	30
B3: Rojo	0,63 – 0,69	30
B4: IRc (NIR)	0,76 – 0,90	30
B5: SWIR	1,55 – 1,75	30
B6: Thermal IR	10,40 – 12,50	120
B7: SWIR 2	2,08 – 2,35	30

Tabla 1: características de bandas de Landsat 5. Fuente: Servicio Geológico de Estados Unidos

La segunda imagen es de junio de 2021, y corresponde al satélite Sentinel 2. La flota de satélites Sentinel está diseñada para entregar datos de teledetección terrestre que son fundamentales para el programa Copernicus de la Comisión Europea. La misión Sentinel 2 es el resultado de una estrecha colaboración entre la Agencia Espacial Europea (ESA), la Comisión Europea, la industria, los proveedores de servicios y los usuarios de datos. La misión ha sido diseñada y construida por un consorcio de unas 60 empresas liderado por Airbus Defence and Space y apoyado por la agencia espacial francesa CNES, para optimizar la calidad de imagen, y por el Centro Aeroespacial Alemán DLR, para mejorar la recuperación de datos mediante comunicaciones ópticas. El proyecto de Sentinel 2 consta de dos satélites desarrollados para respaldar la vegetación, la cobertura del suelo y el monitoreo ambiental. El satélite Sentinel 2A fue lanzado por la ESA el 23 de junio de 2015 y opera en una órbita heliosíncrona con un ciclo de repetición de 10 días. El 7 de marzo de 2017 se lanzó un segundo satélite idéntico, el Sentinel 2B. Juntos cubren todas las superficies terrestres de la Tierra, islas grandes y aguas interiores y costeras cada cinco días. El Sentinel 2 MultiSpectral Instrument (MSI) adquiere 13 bandas espectrales que van desde longitudes de onda visibles e infrarrojas cercanas (NIR) a infrarrojas de onda corta (SWIR) a lo largo de una franja orbital de 290 km. El MSI mide la radiación reflejada a través de la atmósfera dentro de 13 bandas espectrales. La resolución espacial depende de la banda espectral particular

BANDAS	LONGITUD DE ONDA ( $\mu\text{m}$ )	RESOLUCIÓN (m)
B1 – Aerosol	0,43 – 0,45	60
B2 – Azul	0,45 – 0,52	10
B3 – Verde	0,54 – 0,57	10
B4 – Rojo	0,65 – 0,68	10
B5 – Borde rojo 1	0,69 – 0,71	20
B6 – Borde rojo 2	0,73 – 0,74	20
B7 – Borde rojo 3	0,77 – 0,79	20
B8 - NIR 1	0,78 – 0,90	10
B8A – NIR 2	0,85 – 0,87	20
B9 – Vapor de agua	0,93 – 0,95	60
B10 – Cirrus	1,36 – 1,39	60
B11 – SWIR 1	1,56 – 1,65	20
B12 – SWIR 2	2,10 – 2,28	20

Tabla 2: características de bandas de Sentinel 2. Fuente: Agencia Espacial Europea

Finalmente, las imágenes radar se han descargado del Copernicus Access Hub. Ambas imágenes corresponden a Sentinel 1. La misión Sentinel 1 está equipada con satélites gemelos en órbita polar diseñados para proporcionar datos espaciales para garantizar el medio ambiente y la seguridad, así como el crecimiento económico y empresarial global. El primer satélite, Sentinel 1A, se lanzó el 3 de abril de 2014 y el Sentinel 1B se lanzó el 25 de abril de 2016.

Los satélites operan día y noche y realizan una apertura sintética con imágenes de radar. Las bandas Sentinel 1 permiten obtener imágenes en todas las condiciones climáticas. Funciona en un modo de operación libre de conflictos preprogramado que permite alcanzar una alta confiabilidad de servicio y crear archivos de datos consistentes a largo plazo para ser utilizados en la aplicación basados en series de tiempo largas. Sentinel 1 está equipado con el instrumento C-SAR. Este sensor y su software de soporte fueron desarrollados por EADS Astrium GMBH de Alemania. Fue diseñado para proporcionar imágenes de teledetección en todas las condiciones climáticas y períodos de tiempo. Es capaz de capturar datos de medición exactos en resoluciones altas y medias, aplicables para observaciones terrestres, costeras y de zonas de hielo. En el caso de este trabajo fin de Máster, las imágenes que se han obtenido son de junio de 2015 y de junio de 2022, intentando que haya la mayor separación temporal para analizar los cambios más relevantes. Además, se han descargado las imágenes del sensor *Interferometric Wide Swath* (IW) ya que es el adecuado para análisis en tierra.

CARACTERÍSTICA	DESCRIPCIÓN
VIDA DE DISEÑO	7 años (consumibles en 12 años)
ÓRBITA	Polar helio síncrona 693 km Ciclo de repetición de 12 días 175 órbitas por ciclo
RESOLUCIÓN	5 m x 20 m
PERIODO ORBITAL	98,6 minutos
ÁNGULO DE INCIDENCIA	Visión lateral, 15-45° desviado del nadir
DURACIÓN MÁXIMA DEL ECLIPSE	19 minutos
PERFIL DE ACTITUD	Geocéntrico y geodésico
AUTONOMÍA OPERATIVA	96 horas
LANZACOHETES	Soyuz en Kourou, Guayana Francesa

Tabla 3: ficha informativa sobre Sentinel 1A. Fuente: copernicus.eu

## 4.2. OBTENCIÓN DE CAPAS SIG

Las capas o *shapefiles* se han obtenido de ArcGis Hub y su sección de *Open Data* o datos abiertos. De allí, se han obtenido todas las capas del portal de Armenia. Debido a que es un país pequeño y del que no hay mucha información, se ha tenido que digitalizar la capa del área del Parque Nacional Dilijan manualmente con ArcGis Pro, mediante la base de OpenStreet Map. Por otra parte, tampoco se ha encontrado capas sobre los usos del suelo, por lo que se ha creado una mediante la clasificación supervisada con imágenes de satélite.

En el campo de la geoinformación, la obtención de capas SIG (Sistemas de Información Geográfica) desempeña un papel fundamental en la gestión y análisis de datos geoespaciales. ArcGIS Hub, una plataforma líder en este ámbito, proporciona herramientas poderosas para adquirir y trabajar con capas SIG. En un mundo cada vez más digitalizado, la información geoespacial se ha vuelto imprescindible en la toma de decisiones basadas en la ubicación. Los SIG permiten visualizar, analizar y comprender mejor los datos espaciales, lo que resulta fundamental para diversas disciplinas, como la planificación urbana, la gestión del medio ambiente, el transporte y la salud pública, entre otras. ArcGIS Hub, desarrollado por Esri, es una plataforma integral que brinda a los usuarios la capacidad de acceder y utilizar capas SIG para llevar a cabo análisis avanzados y compartir información geoespacial con otros colaboradores.

## 4.3. TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN GEOGRÁFICA APLICADAS

Como bien nos indica el nombre del máster, las Tecnologías de la Información Geográfica (TIG) son fundamentales para los trabajos de investigación. En este caso, se han aplicado tres TIG diferentes: la teledetección óptica; la teledetección radar; y, los Sistemas de Información Geográfica (SIG).

El análisis de cambios de usos del suelo es fundamental para comprender y monitorear los procesos de transformación de las áreas terrestres y sus impactos en el medio ambiente. La alteración de los suelos, impulsada principalmente por la actividad humana, tiene un impacto significativo en los ecosistemas y en la calidad de vida de las personas. La teledetección óptica se refiere al uso de sensores remotos que capturan información visible y cercana al infrarrojo para analizar y monitorizar las características de la superficie terrestre. Estos datos proporcionan una visión integral y sistemática de los cambios en el uso del suelo a lo largo del tiempo y el espacio. Para analizar los cambios de uso del suelo, se utilizan técnicas de clasificación de imágenes, donde se asignan categorías específicas a las diferentes coberturas terrestres. Estas categorías pueden incluir bosques, áreas urbanas, cultivos agrícolas, cuerpos de agua, entre otros. Además, los índices de vegetación, como el NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada), son ampliamente utilizados para evaluar la salud y la densidad de la vegetación en una determinada área. Estos índices pueden ayudar a identificar cambios en la cobertura vegetal y detectar actividades de deforestación, degradación del suelo o expansión urbana. La

teledetección óptica, como una tecnología remota no intrusiva, se ha convertido en una herramienta clave para el análisis de estos cambios a gran escala.

Por otra parte, la teledetección radar, como una tecnología remota especializada, se ha vuelto una herramienta poderosa para el análisis de estos cambios a gran escala. La deforestación y los cambios en el uso del suelo tienen implicaciones significativas para la biodiversidad, el clima y la calidad de vida de las comunidades locales. La teledetección radar utiliza ondas electromagnéticas para obtener información sobre la superficie terrestre, incluso en condiciones atmosféricas adversas y en áreas cubiertas por nubes. Esta tecnología ofrece una capacidad única para analizar cambios en el uso del suelo y detectar la deforestación de manera efectiva. La teledetección radar ofrece varias ventajas para el análisis de cambios de uso del suelo y la detección de deforestación. En primer lugar, las ondas radar penetran la vegetación y las nubes, lo que permite obtener datos continuos en diferentes condiciones atmosféricas. Además, la teledetección radar es sensible a la estructura vertical de la vegetación y puede proporcionar información detallada sobre la altura y la estructura de la cobertura vegetal. El análisis de datos de radar polarimétrico permite distinguir entre diferentes tipos de cobertura terrestre, como bosques, áreas urbanas y cuerpos de agua. Esta información se obtiene al analizar las propiedades de polarización de las ondas radar reflejadas por la superficie terrestre. La polarimetría radar también es útil para detectar cambios en la estructura de la vegetación, como la pérdida de biomasa forestal debido a la deforestación. La polarización juega un papel fundamental en la teledetección radar, ya que se refiere a la orientación de las ondas electromagnéticas emitidas por el radar y su interacción con los objetos y la superficie terrestre.

Por último, los Sistemas de Información Geográfica se han convertido en una herramienta clave para este propósito, permitiendo la integración de datos espaciales, análisis geoespacial y visualización de resultados. Los cambios de uso del suelo y la deforestación son fenómenos complejos que requieren un enfoque integral para su análisis y gestión. Los SIG ofrecen una plataforma robusta para integrar datos geoespaciales, como imágenes satelitales, mapas temáticos y datos socioeconómicos, y analizarlos en un entorno espacial. Esta integración permite una comprensión más completa de los procesos de cambio y sus consecuencias ambientales. Además, los SIG tienen una serie de ventajas para el análisis de cambios de uso del suelo y la detección de deforestación ya que permiten la integración y gestión eficiente de datos geoespaciales de diversas fuentes, como imágenes satelitales, datos de sensores remotos y datos socioeconómicos. Esta integración facilita el análisis de los cambios ocurridos en el tiempo y el espacio, así como la identificación de patrones y tendencias.

#### **4.4. SOFTWARES USADOS**

Uno de los objetivos de este trabajo es aplicar todos los conocimientos posibles adquiridos en el máster. Es por ello que se han usado una variedad de softwares del campo de los Sistemas de Información Geográfica y la teledetección. Estos programas tienen especial importancia en la investigación ya que gracias a ellos es posible el desarrollo de los resultados. Los softwares que han sido usados en este TFM son: ArcGis Pro, para la digitalización del área de estudio y la

creación de cartografía temática; ERDAS Imagine, para el tratamiento de imágenes de satélites ópticos; y, SNAP, para el tratamiento de imágenes radar.

ArcGIS Pro es un software de Sistemas de Información Geográfica (SIG) desarrollado por Esri. Es ampliamente utilizado en el campo de la detección de deforestación y cambios de uso del suelo debido a su capacidad para gestionar, analizar y visualizar datos geoespaciales. Algunas de las características clave de ArcGIS Pro incluyen:

- ❖ **Análisis espacial avanzado:** permite realizar análisis espaciales complejos para identificar patrones y tendencias relacionados con la deforestación y los cambios en el uso del suelo.
- ❖ **Integración de datos:** puede integrar diferentes fuentes de datos, como imágenes de satélite, datos LiDAR, información vectorial y datos de sensores remotos, lo que es crucial para el monitoreo y la detección de cambios en el paisaje.
- ❖ **Modelado y simulación:** es posible crear modelos y simulaciones para evaluar posibles escenarios de deforestación y cambios de uso del suelo, lo que ayuda en la toma de decisiones y la planificación.
- ❖ **Visualización y presentación:** proporciona herramientas para visualizar los resultados de manera efectiva, lo que facilita la comunicación de los hallazgos a las partes interesadas.

ERDAS Imagine es un software de procesamiento de imágenes y análisis geoespacial ampliamente utilizado en la detección de deforestación y cambios de uso del suelo. Algunas características relevantes son:

- ❖ **Procesamiento de imágenes:** posibilita la calibración, corrección atmosférica y procesamiento de imágenes de satélite y datos de sensores remotos para obtener información precisa sobre los cambios en el suelo y la vegetación.
- ❖ **Segmentación y clasificación:** segmenta y clasifica imágenes para identificar diferentes tipos de cobertura del suelo, lo que es útil para detectar áreas deforestadas y cambios en el uso del suelo.
- ❖ **Análisis temporal:** realiza análisis comparativos de imágenes tomadas en diferentes momentos para detectar cambios en la cobertura vegetal y la deforestación.
- ❖ **Generación de índices:** permite calcular índices espectrales (como el Índice de Vegetación Normalizado - NDVI) que son indicadores útiles de la salud de la vegetación y pueden utilizarse para monitorear cambios en la cobertura forestal.

SNAP (Sentinel Application Platform) es un software especializado para el procesamiento y análisis de datos de misiones satelitales como Sentinel, que proporcionan imágenes de alta resolución y frecuencia de revisita. Algunas características destacadas son:

- ❖ **Preprocesamiento de imágenes:** SNAP ofrece herramientas para el preprocesamiento de imágenes satelitales, como corrección radiométrica y corrección atmosférica, lo que garantiza una mejor calidad de los datos antes de realizar análisis.

- ❖ **Extracción de características:** extrae información valiosa de las imágenes, como la detección de cambios en la cobertura vegetal, identificación de áreas deforestadas y clasificación del uso del suelo.

#### 4.5. TRATAMIENTO DE IMÁGENES DE SATÉLITE

El tratamiento de imágenes de satélite es un paso fundamental para obtener información útil y procesable a partir de los datos capturados por los sensores remotos. Este proceso implica mejorar la calidad visual de las imágenes, combinar diferentes bandas espectrales y calcular índices específicos para resaltar características particulares de la superficie terrestre. En primer lugar, se ha llevado a cabo una serie de mejoras espectrales. Estas buscan resaltar características y mejorar la calidad visual de las imágenes de satélite. Las mejoras que se han usado son:

- ❖ **RGB a IHS:** esta herramienta transforma tres capas ráster de datos multiespectrales (canales rojo, verde y azul) en sus imágenes equivalentes de intensidad, tono y saturación (IHS; a veces HSI o HIS). La intensidad se refiere al brillo de un color, el tono está relacionado con la longitud de onda dominante de la luz y se percibe como color, y la saturación es la pureza del color (Koutsias et al. 2000). Existen numerosos algoritmos para realizar una transformación de rojo-verde-azul (RGB) a IHS.
- ❖ **Componentes principales:** es una técnica matemática que transforma los datos de la imagen original, generalmente altamente correlacionados, en un nuevo conjunto de variables no correlacionadas. Estos nuevos componentes son combinaciones lineales de las bandas de la imagen original y se derivan en orden decreciente de importancia de modo que, por ejemplo, el primer componente principal representa la mayor cantidad posible de variación en los datos originales. Los beneficios de la técnica son principalmente que la información que no es visible en las imágenes compuestas de colores falsos puede resaltarse en una de las imágenes componentes resultantes.
- ❖ **Tasseled cap:** define a priori tres funciones o ejes: “humedad”, “verdor” y “brillo”. Es particularmente útil para definir suelos (humedad) y vegetación (verdor) a partir de datos Landsat MSS o TM.

También se ha recurrido a la combinación de bandas para resaltar información relevante para este estudio. Las imágenes de satélite generalmente capturan información en varias bandas espectrales. Combinar diferentes bandas en una sola imagen puede proporcionar una visión más completa de la superficie terrestre y resaltar ciertas características. Algunas combinaciones comunes incluyen la combinación en falso color infrarrojo.

Por último, se han usado índices radiométricos para investigar más a fondo los cambios del suelo y llevar a cabo una comparación entre las dos fechas escogidas para conseguir los resultados. Los índices espectrales son cálculos matemáticos que combinan los valores de diferentes bandas espectrales para resaltar características específicas de la superficie terrestre. Para el trabajo se han escogido índices relacionados con la vegetación, con la composición de los suelos y con las construcciones artificiales. El motivo de dicha elección es para demostrar mediante una

tipología variada de técnicas los resultados, y, por ende, conseguir una conclusión más contrastada y empírica. A continuación, se explican todos los índices usados en el proyecto con sus fórmulas:

- **Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI):** este índice utiliza la reflectancia en el rojo y en el infrarrojo cercano para evaluar la salud y densidad de la vegetación. El NDVI varía de -1 a 1, donde los valores más altos indican una vegetación más saludable.

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{Red}) / (\text{NIR} + \text{Red})$$

- **Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI):** es un índice de vegetación que intenta minimizar las influencias del brillo del suelo utilizando un factor de corrección del brillo del suelo. Esto se usa a menudo en regiones áridas donde la cubierta vegetal es baja.

$$\text{SAVI} = (\text{NIR} - \text{Red}) * (1 + L) / (\text{NIR} + \text{Red} + L)$$

- **Índice de Diferencia Normalizada Edificada (NDBI):** se utiliza para extraer características construidas y tiene índices que van de -1 a 1. Estos procedimientos son similares a la creación de salida NDVI.

$$\text{NDBI} = (\text{SWIR} - \text{NIR}) / (\text{SWIR} + \text{NIR})$$

- **Mineral Composite:** es un índice geológico usado para detectar y caracterizar materiales minerales en la superficie terrestre. Se calcula utilizando la reflectancia de la radiación en diferentes rangos del espectro electromagnético, generalmente en el infrarrojo cercano y en el infrarrojo medio. Se utiliza para identificar y mapear áreas con presencia de minerales, como óxidos de hierro, arcillas, sulfatos, entre otros.

$$\text{MC} = \text{SWIR1} / \text{SWIR2}, \text{SWIR1} / \text{NIR}, \text{Red} / \text{Blue}$$

Estas técnicas de tratamiento de imágenes de satélite permiten resaltar y analizar características específicas de la superficie terrestre, lo que facilita el estudio de cambios en el uso del suelo, la detección de deforestación, la evaluación de la salud vegetal y otros análisis relacionados con el medio ambiente y la gestión del territorio.

Las imágenes de radar han tenido un procesamiento en el programa de SNAP para que puedan ser usadas, ya que se descargan invertidas y con bastantes interferencias. El procesamiento de una imagen en SNAP implica aplicar diferentes técnicas y herramientas para corregir, mejorar y analizar los datos de la imagen. En general, el tratamiento de las imágenes ha implicado:

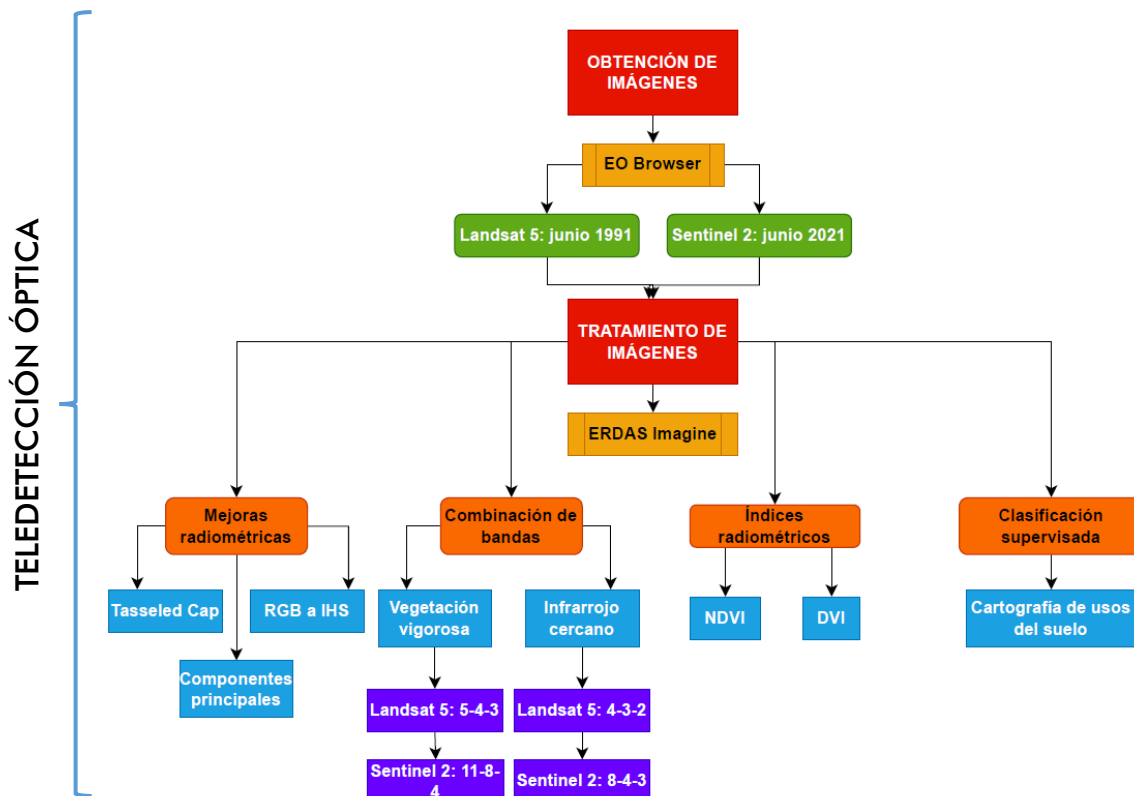
- ❖ **Correcciones radiométricas:** para corregir las variaciones en la intensidad de la señal de radar causadas por factores como la geometría de adquisición y las condiciones atmosféricas.

- ❖ **Correcciones topográficas:** con herramientas como el Range Doppler Terrain Correction se consigue una corrección geométrica de la imagen y la eliminación de distorsiones geométricas de la topografía y la sombra.
- ❖ **Calibración de la imagen:** para convertir los datos de la imagen de Sentinel-1 a valores de retrodispersión en unidades decibelios (dB). El valor de retrodispersión está relacionado con el ángulo de incidencia, la longitud de onda, la polarización y las propiedades reflectivas de las cubiertas observadas.
- ❖ **Speckle filtering:** El *speckle* es un tipo de ruido característico en las imágenes de radar. SNAP proporciona varias técnicas de filtrado de *speckle*, como la herramienta de *Speckle filtering*.

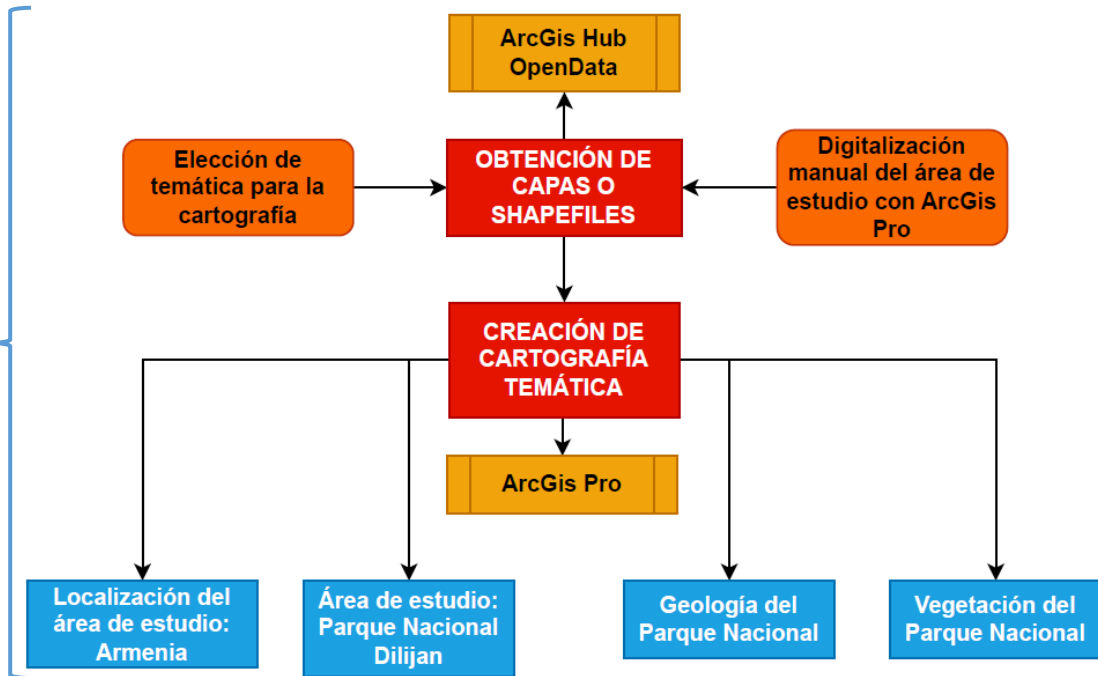
#### 4.6. FLUJOS DE TRABAJO

Este trabajo ha seguido unos procesos determinados para poder llegar a obtener los resultados de la investigación. Estos los podemos simplificar en flujos de trabajo para una mejor comprensión de la metodología y el desarrollo del proyecto.

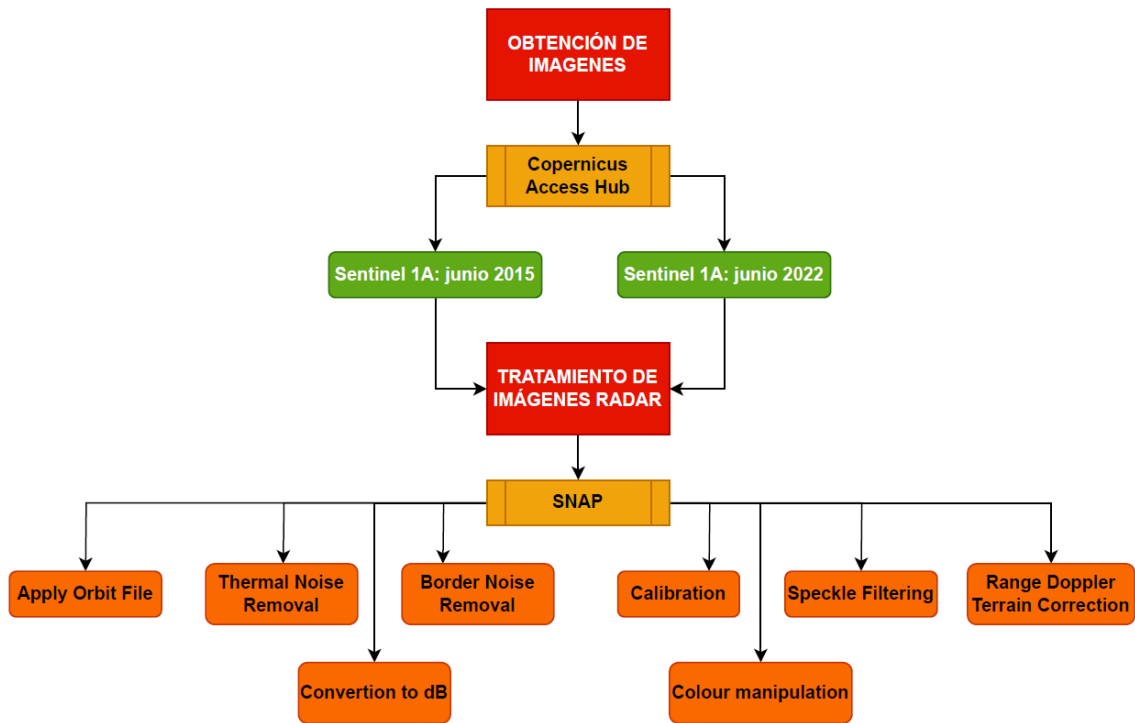
#### LEYENDA DE LOS FLUJOS DE TRABAJO:



CARTOGRAFÍA TEMÁTICA



TELEDETECCIÓN RADAR



## 5. RESULTADOS

### 5.1. COMBINACIÓN DE BANDAS

En primer lugar, es importante presentar las imágenes usadas en su combinación de color natural o *true color*. En la imagen de junio de 1991 de Landsat 5, la combinación RGB es 3-2-1.

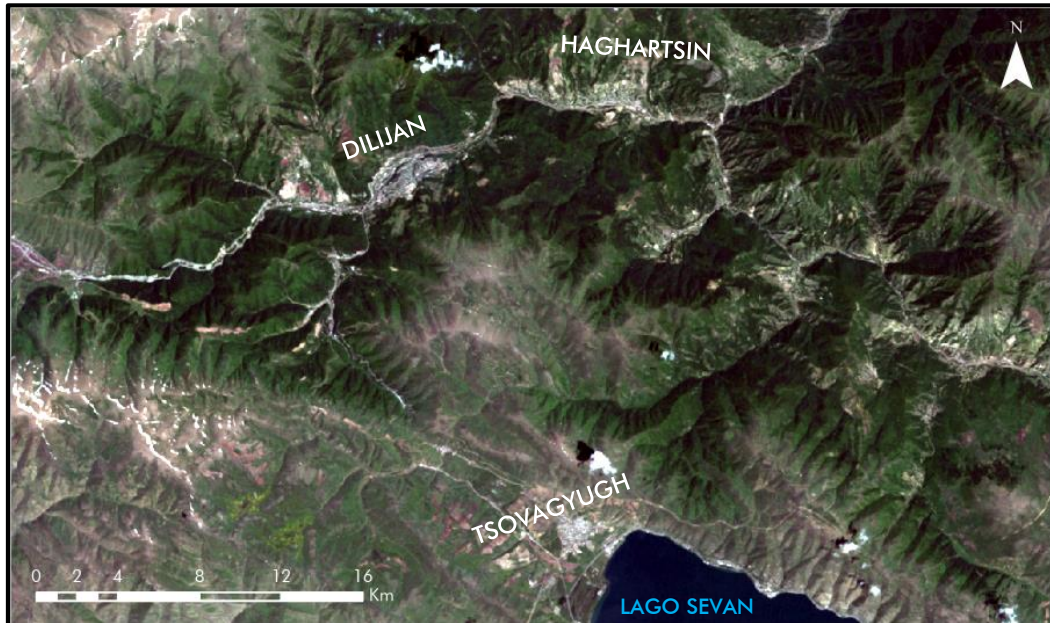


Figura 5: imagen de junio de 1991 Landsat 5 del área de estudio. RGB 3-2-1

En segundo lugar, contamos con la imagen de junio de 2021, que corresponde al satélite de Sentinel 2. La combinación de color natural es 4-3-2.

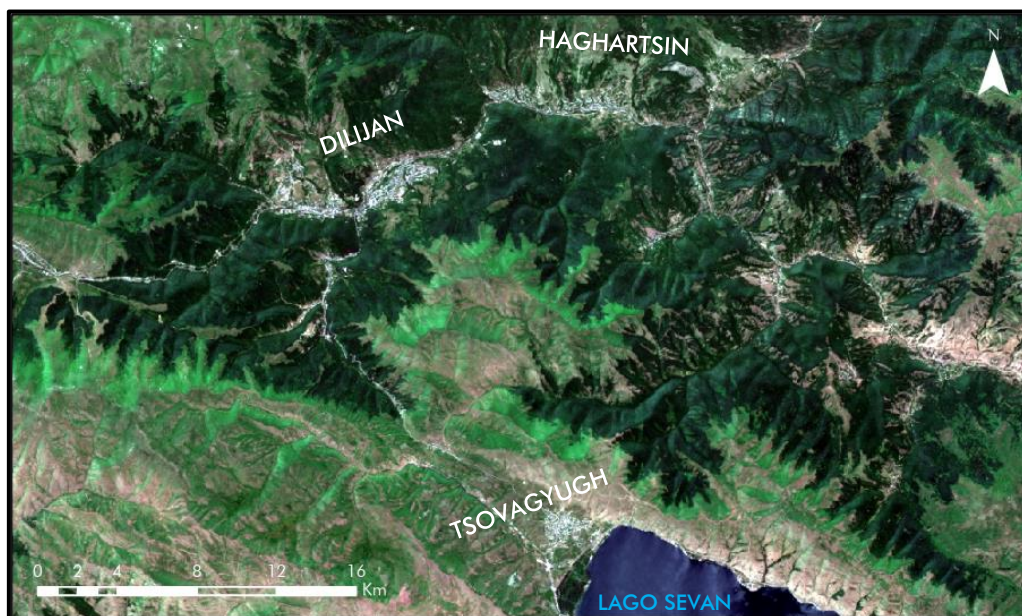
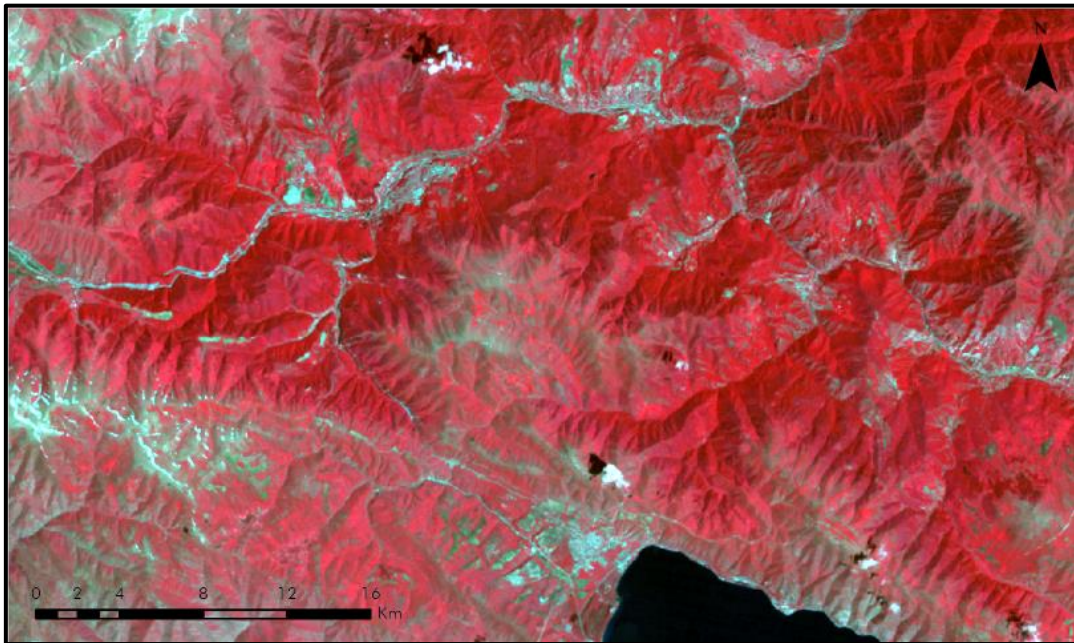


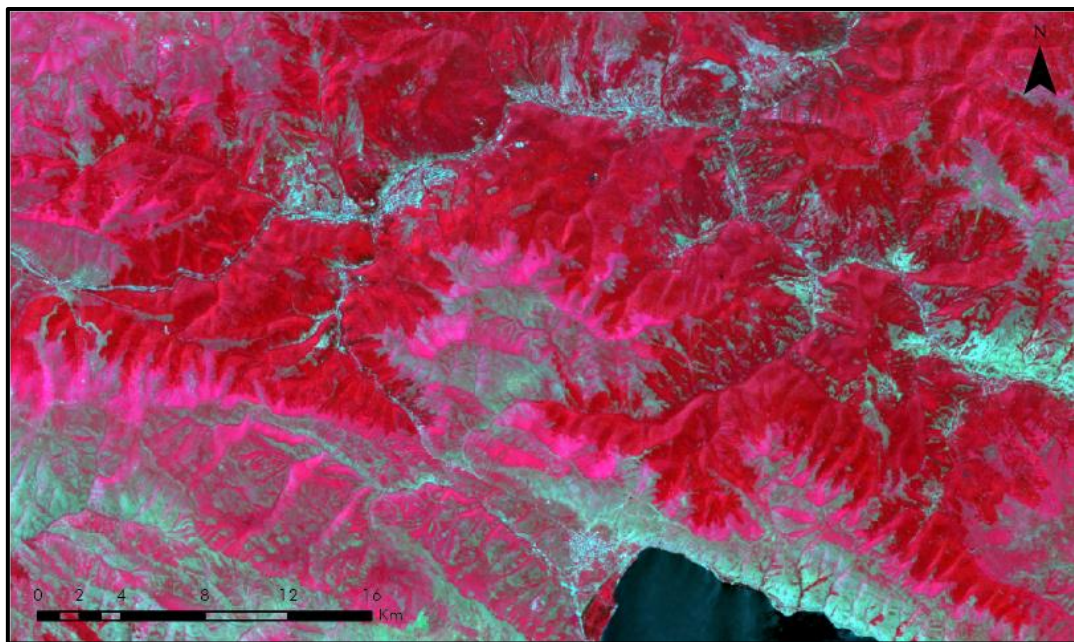
Figura 6: imagen de junio de 2021 Sentinel 2 del área de estudio. RGB 4-3-2

Como se ha mencionado, la combinación de bandas ayuda a resaltar información relevante para este estudio. La usada en primer lugar es la del falso color infrarrojo (RGB 4-3-2 en la imagen de Landsat 5).



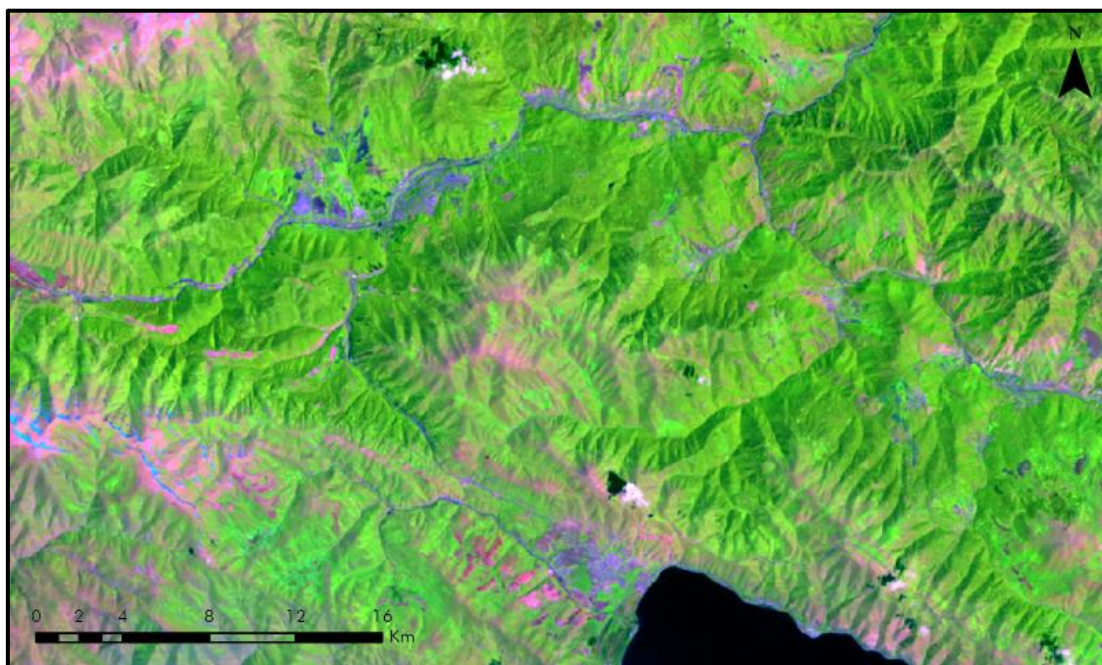
*Figura 7: combinación de falso color infrarrojo de la imagen de Landsat 5. RGB 4-3-2*

Para la imagen de 2021, se utiliza la combinación RGB 8-4-3 para el falso color infrarrojo.



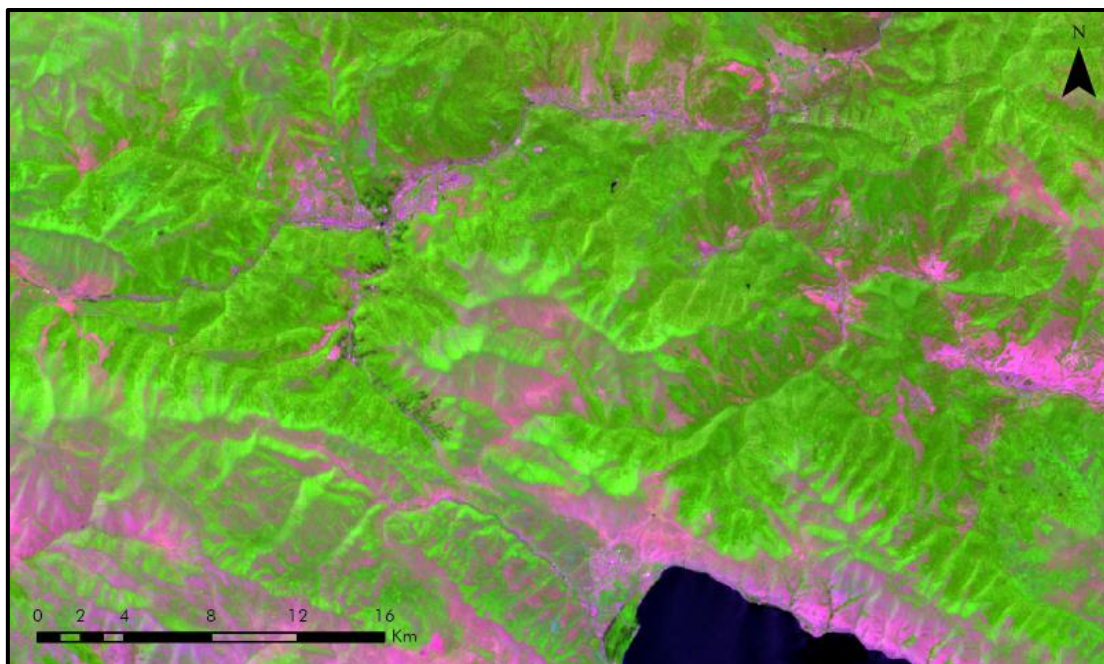
*Figura 8: combinación de falso color infrarrojo de la imagen de Sentinel 2. RGB 8-4-3*

Sin embargo, también resulta interesante combinar otras bandas para resaltar la vegetación, que es el elemento principal de los usos del suelo que ha variado entre las dos fechas de las imágenes. Por ello, para la imagen de Landsat 5 se combinan las bandas RGB 5-4-3.



*Figura 9: combinación de vegetación vigorosa en la imagen de Landsat 5. RGB 5-4-3*

La combinación equivalente a la anterior para la imagen de Sentinel 2 de 2021 es la 11-8-4.



*Figura 10: combinación de vegetación vigorosa en la imagen de Sentinel 2. RGB 11-8-4*

La combinación de bandas en nuestras imágenes de satélite nos ha ayudado a resaltar la deforestación y forestación debido a las diferentes respuestas espectrales de los distintos tipos de vegetación y cobertura del suelo. Cada banda del espectro electromagnético capturada por los sensores remotos tiene una sensibilidad diferente a las características del terreno. Al combinar diferentes bandas, es posible identificar y distinguir características específicas en las imágenes. En nuestro caso, es difícil saber exactamente en qué año hay más deforestación, ya que los resultados son muy variados: en algunas áreas los bosques han aumentado mientras que en otras han disminuido.

En resumen, para hallar los resultados de esta técnica se ha usado la combinación natural *true color* y otras dos combinaciones de bandas ópticas: visible e infrarrojo cercano. La primera, permite destacar la realidad geográfica del área: los tonos verdes oscuros corresponden a los bosques, mientras que los verdes más claros son las praderas herbáceas. Las zonas marrones son generalmente las deforestadas o erosionadas. Estas combinaciones permiten diferenciar la vegetación saludable de las áreas deforestadas. Por ejemplo, la combinación infrarrojo cercano ha resaltado la vegetación vigorosa en tonos rojos intensos, mientras que las áreas deforestadas o erosionadas aparecen en turquesas. Cabe destacar que en la imagen de 2021 aparecen áreas con tonos rosados, las cuales se identifican como las zonas con vegetación herbácea alpina, muy común en el Parque Nacional debido a la degradación del bosque, entre otras causas. Gracias a esta combinación podemos concluir que la vegetación de pradera herbácea de tipo alpina ha aumentado y se ha intensificado, especialmente en las zonas sur y oeste del área de estudio.

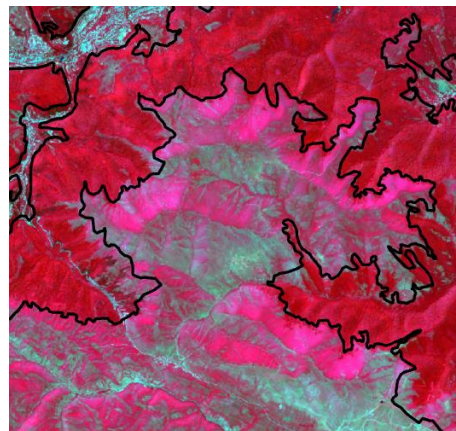


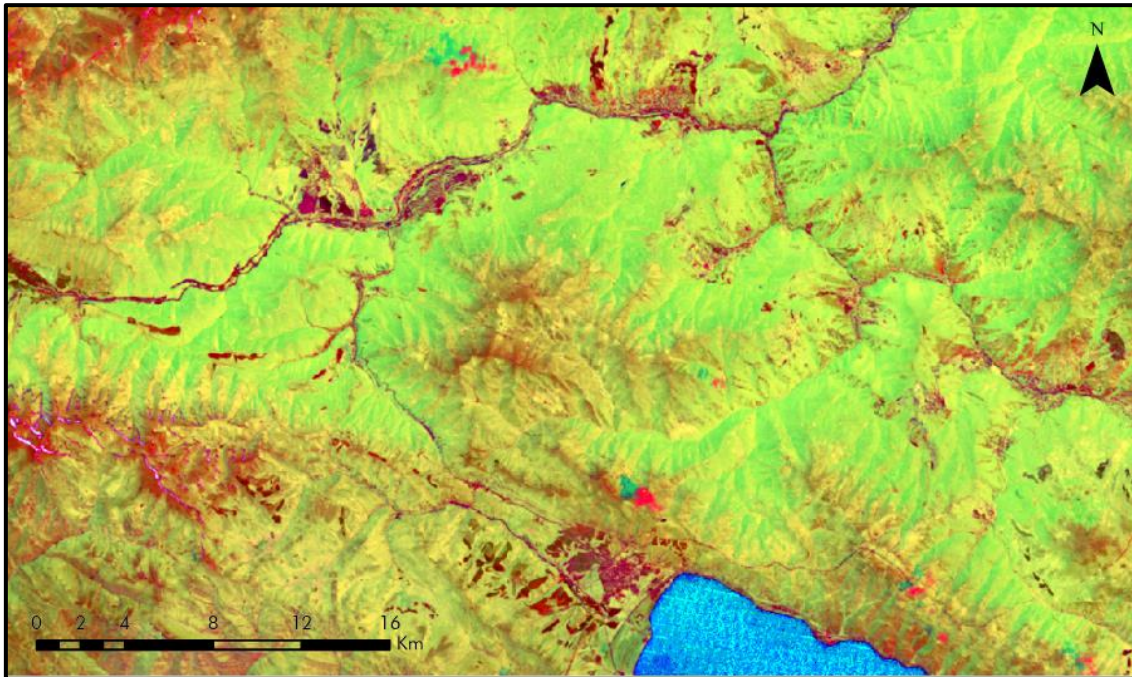
Figura 11: aumento de las praderas hasta la frontera del Parque Nacional

También se aprecia que este cambio de uso del suelo se produce hasta las fronteras del Parque Nacional, lo que nos hace deducir que las medidas de protección en el recinto sí funcionan (figura 11). La combinación realizada con las bandas 5-4-3 en Landsat 5 y 11-8-4 en Sentinel 2 nos han permitido conocer con más detalle y precisión las zonas naturales frente a las urbanizadas, desnudas o erosionadas. Aunque la combinación de infrarrojo proporciona más información sobre el estado de la capa forestal, también distingue de manera general las zonas vegetales y urbanas, lo cual nos ayuda para la clasificación de usos del suelo y el análisis de sus cambios en estos últimos 30 años.

Estas combinaciones de bandas, junto con técnicas de procesamiento de imágenes y análisis espacial, brindan información valiosa para la detección y monitoreo de la deforestación en imágenes de satélite. Al resaltar los cambios en la cobertura del suelo, podemos comprender la extensión, la ubicación y la dinámica de la deforestación en el Parque Nacional Dilijan, lo que resulta fundamental para la conservación forestal y la toma de decisiones en la gestión del territorio armenio en el futuro.

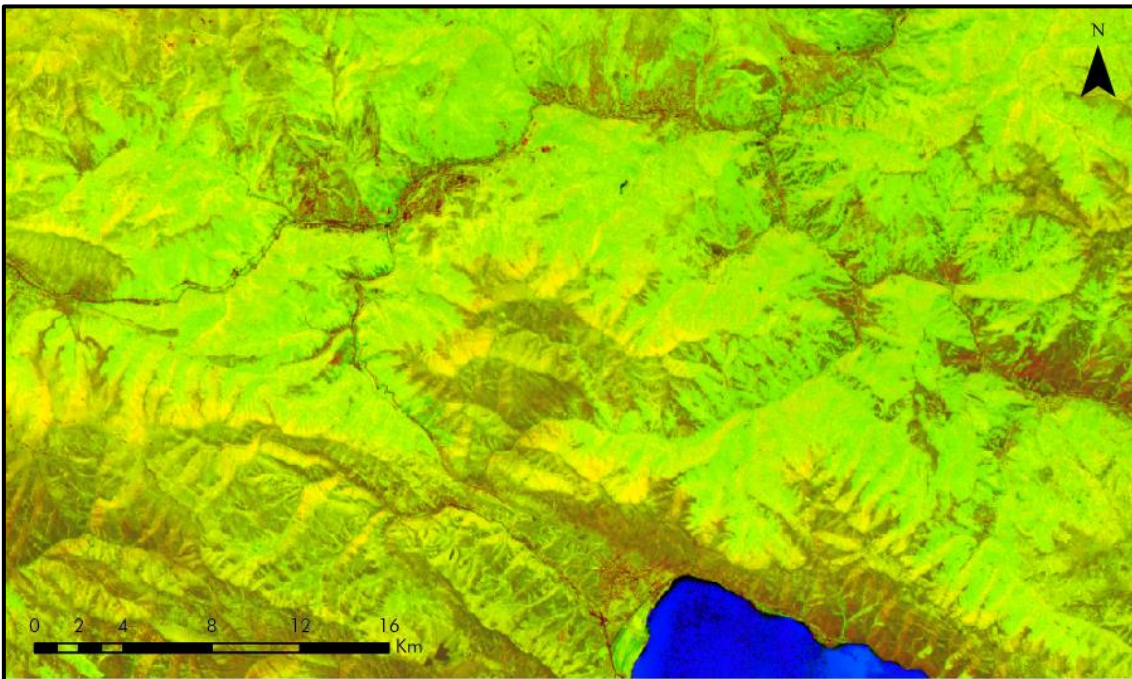
## 5.2. MEJORAS ESPECTRALES

La primera mejora espectral que se ha aplicado es la conversión de RGB a IHS (Intensidad, Matiz y Saturación) en la imagen de Landsat 5 de junio de 1991.



*Figura 12: mejora espectral de RGB a IHS aplicada a la imagen de Landsat 5*

Asimismo, aplicamos dicha mejora en la imagen capturada de Sentinel 2 de junio 2021.



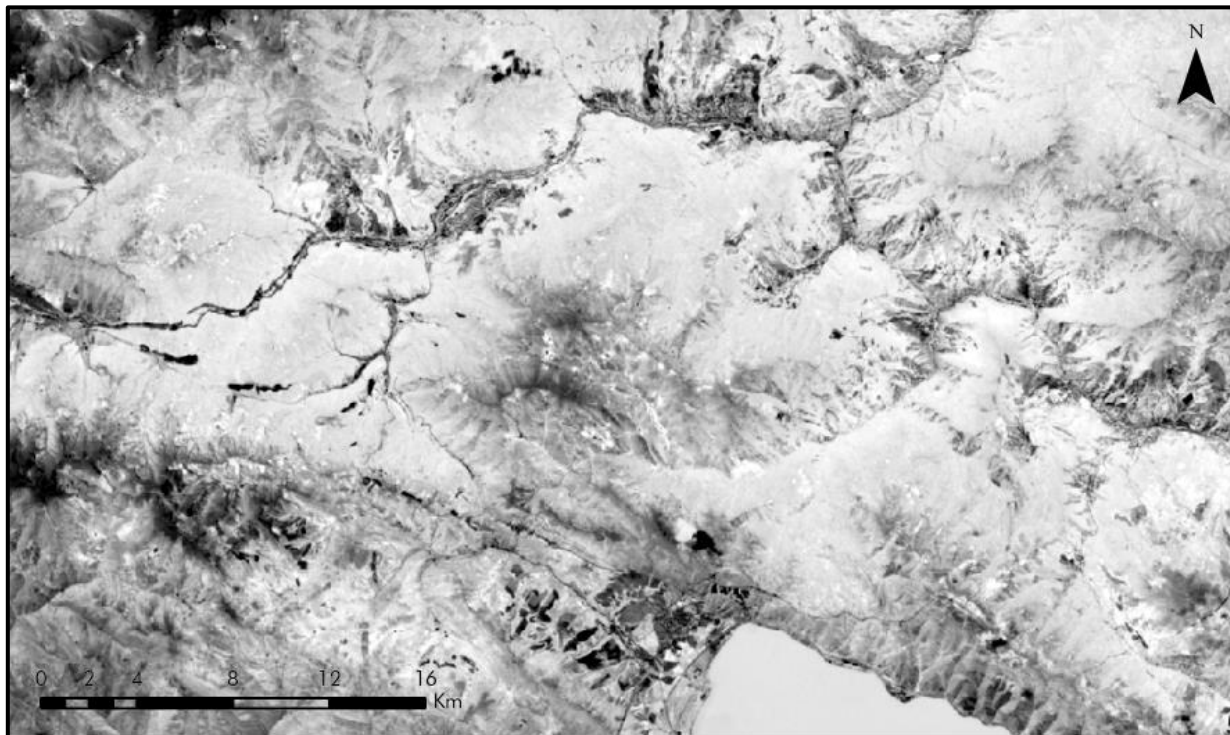
*Figura 13: mejora espectral de RGB a IHS aplicada a la imagen de Sentinel 2*

Esta herramienta espectral ha producido unas imágenes mejoradas en cuanto a calidad e información visible. Los cambios más importantes son:

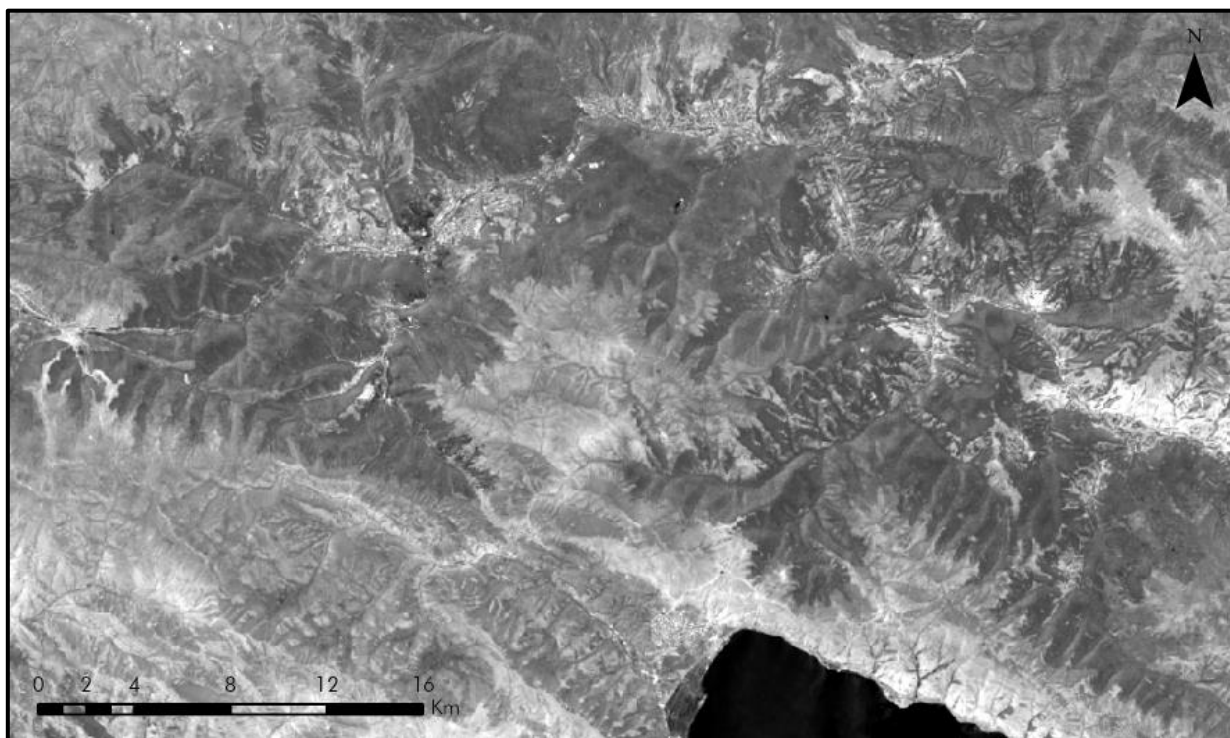
- **Detalles mejorados:** se han resaltado los detalles en ambas imágenes, lo que ha permitido ver objetos más pequeños o características sutiles que pueden no ser tan evidentes en las imágenes originales. Por ejemplo, en la de 1991 hay un cambio bastante importante porque se observan muchos más detalles con la mejora, debido a que Landsat 5 tiene una resolución menor. Esto se ve reflejado en el entramado urbano y las infraestructuras de la zona, las cuales se detectan mejor con esta mejora. Sin embargo, en la imagen de 2021 se aprecian cambios sutiles, ya que Sentinel 2 tiene una calidad mayor, y, por ende, más información visible. Los detalles más resaltados con esta mejora en la imagen de 2021 es la diferencia entre los tipos de vegetación: bosque alpino y pradera.
- **Contraste mejorado:** al separar la información de intensidad de la información de color, se ha conseguido que el contraste de las imágenes sea más efectivo. Esto ha revelado detalles ocultos y mejorado la visualización general. Por ejemplo, en la imagen de Landsat 5 el contraste se observa en los tonos rojos que se corresponden a las construcciones humanas y las áreas más erosionadas y deforestadas. En cambio, en la imagen de Sentinel 2 el contraste se ve reflejado en los tipos de vegetación otra vez: los verdes más fosforitos indican vegetación de bosque alpino, mientras que los tonos marrones son para la vegetación herbácea y zonas deforestadas.
- **Análisis de vegetación:** esta mejora espectral también ha ayudado a resaltar la vegetación en nuestras imágenes de satélite, como se ha explicado en los párrafos anteriores. Al separar la información de intensidad, se ha podido identificar y distinguir con mayor precisión las áreas verdes, lo que puede ser útil para el monitoreo de cultivos, estudios de cobertura vegetal o análisis forestales. Pese a que en la imagen de Landsat 5 se refleja mejor, también funciona en la otra.
- **Identificación de cambios:** comparando las imágenes de satélite antes y después de la mejora espectral, se han podido detectar cambios en el paisaje con mayor claridad. Esto es especialmente relevante para tareas de monitoreo ambiental o detección de cambios en el uso del suelo, tema principal de este trabajo de investigación. Los cambios más llamativos vistos con esta mejora son las áreas situadas al noroeste que tienen una mayor forestación en 2021 que en 1991, lo que implica una mejora en el medio natural del parque.
- **Características del terreno:** también han sido resaltadas algunas características del terreno, como la topografía, la erosión y los cambios en la textura. Esto puede ser útil para la planificación urbana, la gestión del agua o la evaluación de áreas geológicas. El mayor cambio detectado ha sido la gran erosión producida del área localizada en el sureste, a las orillas del lago Sevan. En la imagen de 1991 no hay esas cárcavas visualizadas en 2021.

Viendo estos resultados, se puede concluir que esta mejora ha sido más efectiva en la imagen de 1991 ya que cuenta con una peor resolución, por lo que los cambios han sido más visibles que en la imagen de Sentinel 2, que parte con una mayor calidad de detalle.

La siguiente mejora aplicada es la de los componentes principales. Se ha seleccionado el segundo componente ya que es el que mejores resultados produce.



*Figura 14: mejora espectral de componentes principales aplicada a la imagen de Landsat 5*



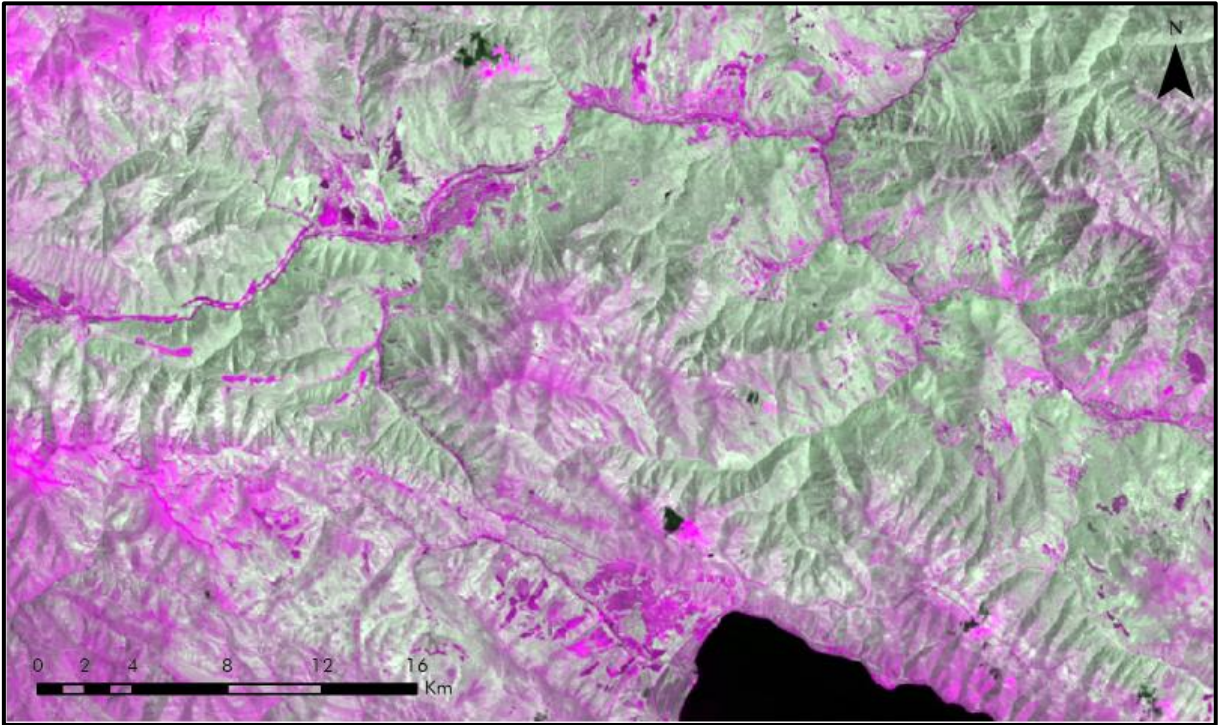
*Figura 15: mejora espectral de componentes principales aplicada a la imagen de Sentinel 2*

Los componentes principales son otra mejora espectral que se ha aplicado a las imágenes de satélite. Cabe destacar que en ambas imágenes el componente 2 (combinación 2-2-2) es el que ha tenido los resultados más relevantes y útiles para el trabajo. Destacan los siguientes aspectos:

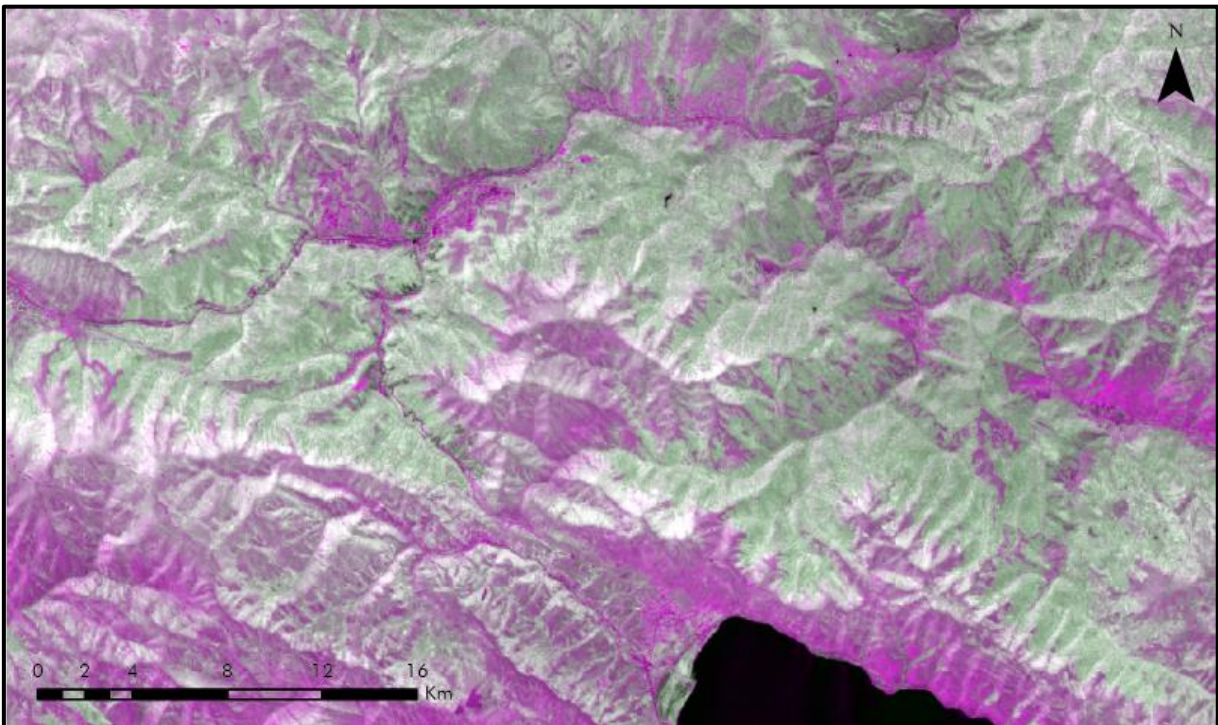
- **Mejor contraste:** al igual que la mejora anterior, esta herramienta ha aumentado el contraste en las imágenes, lo que permite distinguir con mayor claridad los diferentes objetos y características presentes en la escena. Sin embargo, a diferencia del resto de mejoras esta produce mejores resultados con combinaciones pancromáticas en blanco y negro. Con la imagen de Landsat 5 de 1991 (figura 14) se aprecia que cuanto más negro es el color menos vegetación hay, lo que se identifica como las zonas urbanizadas, deforestadas o erosionadas. Estas corresponden correctamente a los núcleos urbanos de Dilijan, Haghartsin y Tsovaghyugh. Las zonas blancas son las de vegetación más sana y abundante, es decir, la extensión del Parque Nacional principalmente, con toda su vegetación vigorosa de bosque alpino. En la imagen de 2021 los tonos más oscuros corresponden a las zonas con vegetación más densa, mientras que los tonos blancos son para zonas deforestadas.
- **Resalte de características:** ha sido posible resaltar características específicas en las imágenes, como cuerpos de agua (lago Sevan), vegetación (bosque y pradera), núcleos rurales (Dilijan, Haghartsin y Tsovaghyugh) y carreteras. Esto facilita la identificación y análisis de evoluciones de dichos elementos.
- **Eliminación de ruido:** los componentes principales también han ayudado a reducir el ruido presente en las imágenes, especialmente en la de Landsat 5, lo que resulta en una imagen más limpia y clara. También se aprecian más detalles y una mayor calidad visual general.
- **Separación de información:** al aplicar esta técnica, es posible separar y visualizar diferentes bandas espectrales de la imagen de satélite de forma individual. Esto permite analizar cada banda por separado y resaltar características específicas presentes en cada una. En este caso la banda 2 es la que más información ha proporcionado, como ya se ha mencionado anteriormente.
- **Identificación de patrones:** esta mejora espectral puede revelar patrones ocultos en la imagen que no son fácilmente visibles en la imagen original, lo que puede ser especialmente útil en la detección de cambios en el terreno, análisis de vegetación, estudios geológicos, entre otros. Esto se ve reflejado en la diferenciación de la vegetación con las zonas rurales e infraestructuras.

En general, la mejora espectral de componentes principales proporciona una forma de resaltar características y mejorar la calidad visual de las imágenes de satélite, lo que facilita su interpretación y análisis. Sin embargo, es importante tener en cuenta que los resultados pueden variar dependiendo de la imagen original y de los parámetros utilizados en el proceso de mejora. Los cambios de usos del suelo más importantes que se han podido destacar con esta técnica es el aumento de la vegetación herbácea en la zona central de la imagen, la forestación del área noroeste en 2021 y la erosión producida en las orillas del lago Sevan.

La última mejora aplicada es la de Tasseled Cap. En ambas imágenes se han combinado las bandas RGB 1-2-1 para obtener los resultados.



*Figura 16: mejora espectral de Tasseled Cap aplicada a la imagen de Landsat 5. RGB 1-2-1*



*Figura 17: mejora espectral de Tasseled Cap aplicada a la imagen de Sentinel 2. RGB 1-2-1*

Al aplicar la mejora espectral de Tasseled Cap a una imagen de satélite, se obtienen varias bandas o componentes que resaltan características específicas del terreno. Estas bandas son generalmente conocidas como "brillo" (*brightness*), "verde" (*greenness*) y "humedad" (*wetness*). Los resultados obtenidos explican lo siguiente:

- **Brillo:** esta banda resalta la variación en la reflectancia del terreno en el rango visible y del infrarrojo cercano. El brillo suele estar relacionado con la cantidad de luz reflejada por las superficies y puede revelar características como la presencia de agua, la urbanización, las áreas desérticas y las áreas quemadas. En la imagen de 1991 se corresponde con los núcleos rurales, las infraestructuras, las áreas deforestadas y erosionadas, y el suelo desnudo. En la imagen de 2021 se ve reflejada en los mismos elementos, pero con menor intensidad, lo que puede indicar un retroceso de deforestación y una recuperación de la capa vegetal.
- **Verde:** se enfoca en la reflectancia del espectro verde del terreno y resalta la presencia y densidad de la vegetación. Es útil para detectar áreas forestales, cultivos, praderas y cualquier otra forma de vegetación. Como observamos en las imágenes, tanto en la de Landsat 5 como en la de Sentinel 2, esta banda resalta las zonas con vegetación más vigorosa y densa, situada en los límites del Parque Nacional Dilijan. También se aprecia una ligera mejora en 2021, debido a que se resaltan zonas más verdes.
- **Humedad:** se centra en la reflectancia del infrarrojo medio y lejano y está relacionada con la humedad o la cantidad de agua en el terreno. Puede resaltar cuerpos de agua, suelos húmedos, áreas pantanosas y zonas con vegetación densa. En las imágenes de este trabajo corresponden a la porción del lago Sevan situado al sureste. Se destacan también otros cuerpos hidrográficos más pequeños situados en el Parque Nacional. No aporta información relevante en cuanto a los usos del suelo o deforestación, ya que no ha habido cambios en la hidrografía del área.

Es importante tener en cuenta que la interpretación precisa de las imágenes mejoradas con Tasseled Cap depende de varios factores, como la resolución espacial y espectral de la imagen, las condiciones atmosféricas, la estación del año y el área geográfica de interés. Además, estos componentes también se pueden combinar y utilizar en conjunto para extraer información más detallada y realizar análisis de cambios en el terreno a lo largo del tiempo.

### 5.3. ÍNDICES RADIOMÉTRICOS

El primer índice que vamos a usar es el NDVI, o Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada.

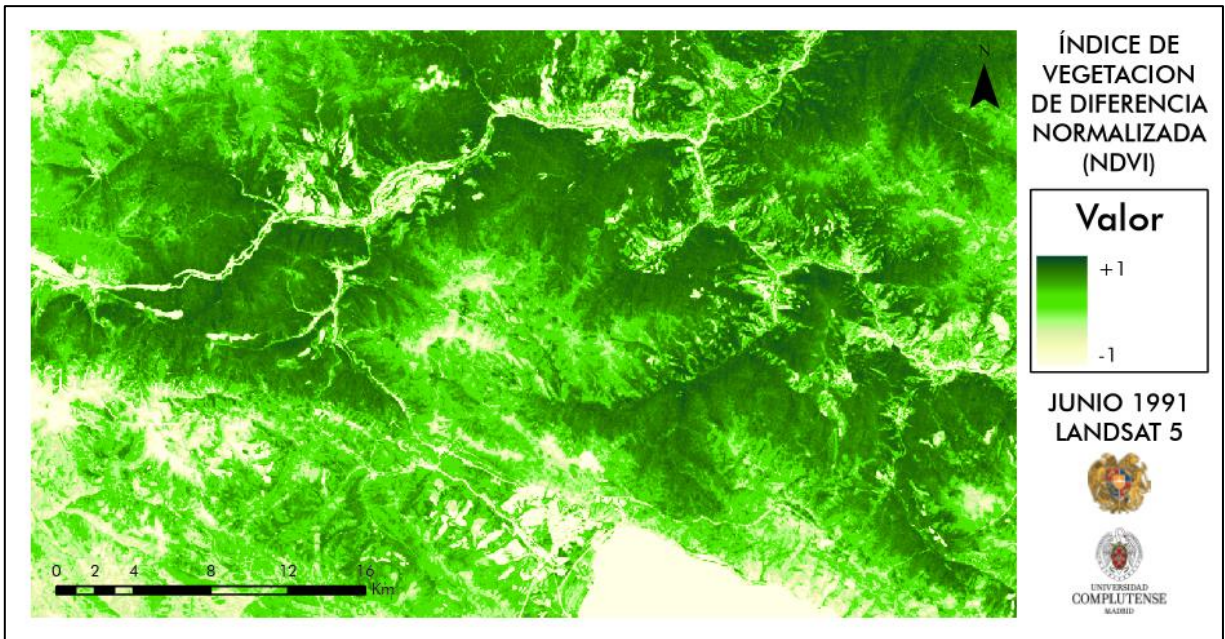


Figura 18: índice NDVI en la imagen de Landsat 5. Elaboración propia

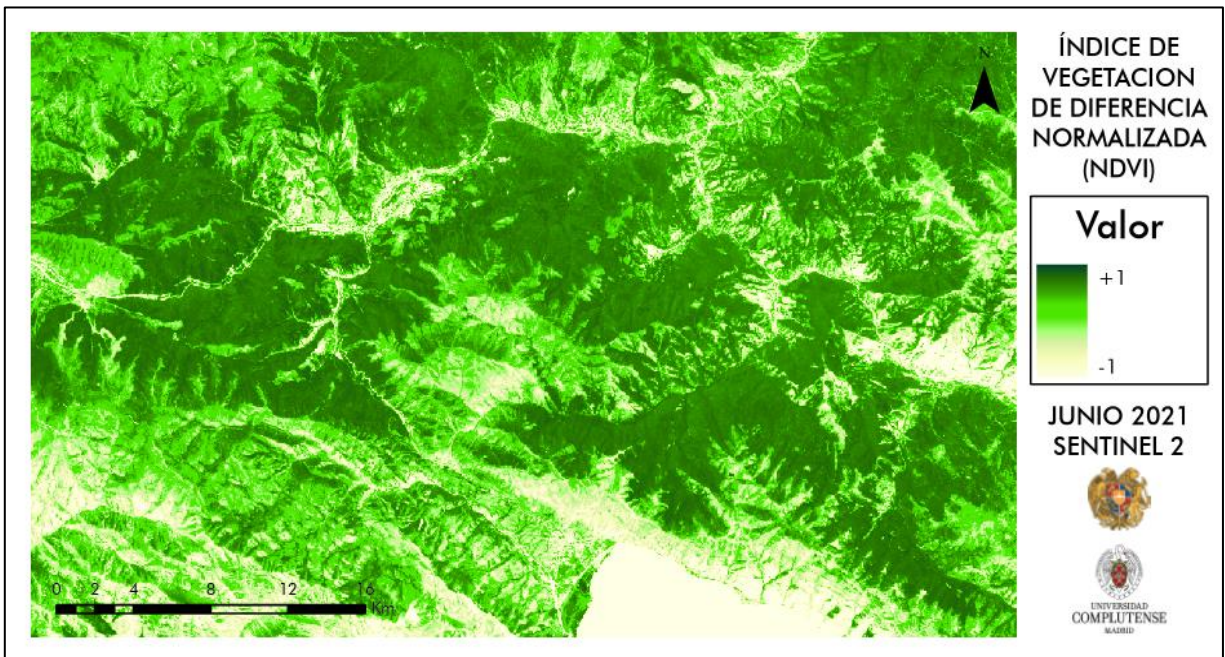
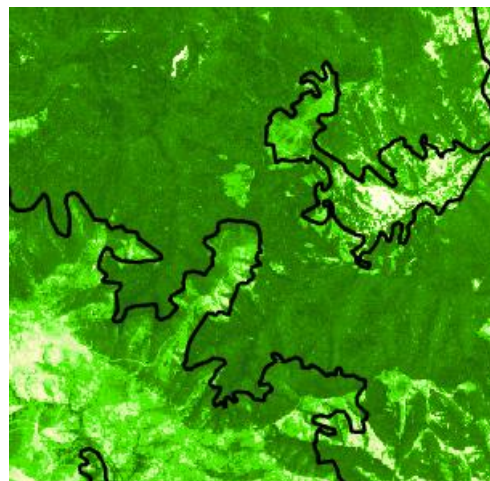


Figura 19: índice NDVI en la imagen de Sentinel 2. Elaboración propia

El NDVI es una herramienta ampliamente utilizada para evaluar la salud y la densidad de la vegetación en una determinada área. Aquí se exponen los resultados obtenidos más relevantes para la investigación:

- **Detección de vegetación:** El NDVI permite identificar áreas con presencia de vegetación y diferenciarlas de otras superficies, como cuerpos de agua o áreas urbanas. El índice utiliza la capacidad de las plantas para reflejar la luz en el espectro visible y absorberla en el infrarrojo cercano, lo que facilita la distinción entre la vegetación y otros elementos del paisaje. Por ello, en ambas imágenes se observa claramente qué zonas tienen vegetación y qué zonas no. Cuanto más intenso sea el verde el valor es más cercano a +1, lo que indica una capa vegetal más sana y abundante. En ambas fechas coincide con la delimitación del Parque Nacional (figura 20). Esto indica que se ha logrado conservar el medio natural del parque, lo que puede llegar a resultar en una forestación positiva para la zona.



*Figura 20: delimitación del parque con la vegetación*

- **Evaluación del vigor vegetal:** este índice es una medida cuantitativa del vigor vegetal. Los valores de NDVI más altos indican una mayor densidad y salud de la vegetación, mientras que los valores más bajos sugieren una vegetación escasa o estresada. Al comparar diferentes áreas dentro de una imagen, se puede obtener una idea de las variaciones en el vigor vegetal y realizar análisis comparativos. Por ejemplo, en 1991 hay zonas más deforestadas en el noroeste y el suroeste, mientras que en 2021 parecen ser que se ha recuperado ligeramente la densidad arbórea. Además, los bosques actuales en la zona son más densos e intensivos que en la era soviética, lo que indica un cambio en el cuidado y desarrollo del medio natural de Armenia.
- **Evaluación del impacto ambiental:** El NDVI también se utiliza para evaluar el impacto ambiental en diversas áreas, como la deforestación, la degradación del suelo o la desertificación. Al comparar las dos imágenes de satélite, se puede detectar y cuantificar cambios en la cobertura vegetal y evaluar el impacto de las actividades humanas en el medio ambiente. En este caso, el resultado general es que ha habido forestación en el Parque Nacional ya que hay áreas más verdes en 2021. Sin embargo, no todo es homogéneo, porque pese a que ha habido reforestación en áreas previamente degradadas en otras áreas (en el este del parque) sí que se detecta deforestación probablemente ligada a la tala ilegal.

En resumen, el NDVI proporciona información valiosa sobre la distribución espacial de la vegetación, el vigor de las plantas, el mapeo de cultivos, el monitoreo agrícola, la evaluación del impacto ambiental y el seguimiento de incendios forestales. Estos resultados son de gran utilidad en disciplinas como la gestión del medio ambiente y la planificación del uso del suelo.

El segundo índice que se ha aplicado es el Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI). Al igual que el resto de las técnicas, se aplica tanto para la imagen de Landsat 5 del año 1991 como a la de Sentinel 2 de 2021.

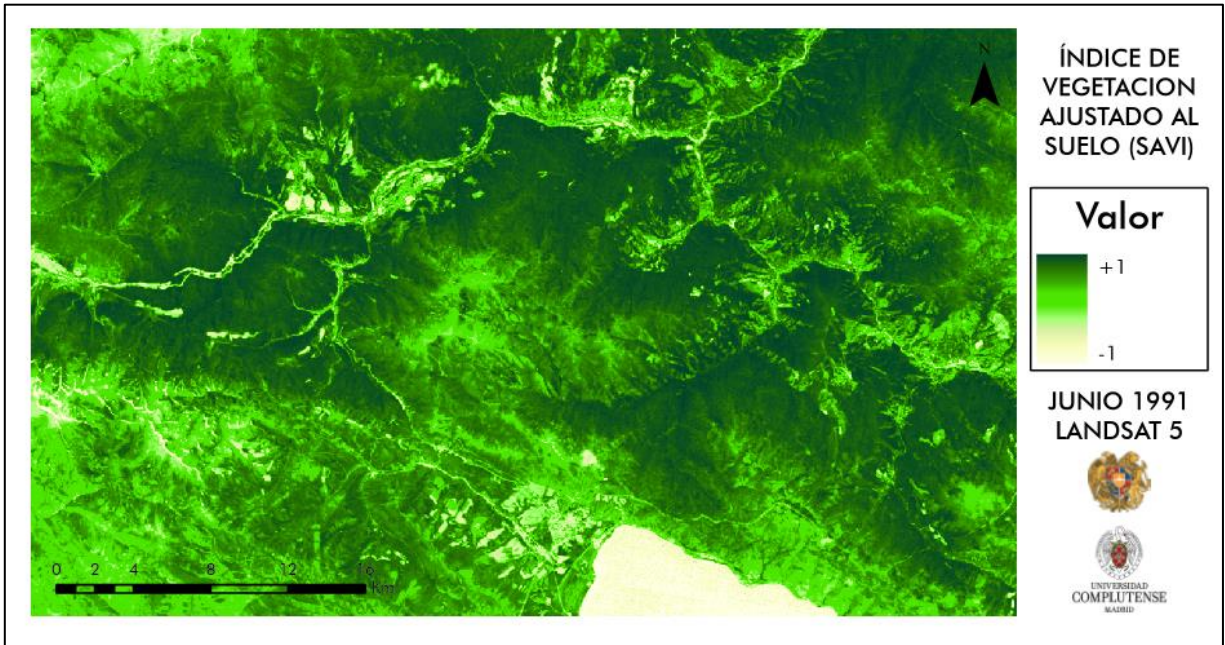


Figura 21: índice SAVI en la imagen de Landsat 5. Elaboración propia

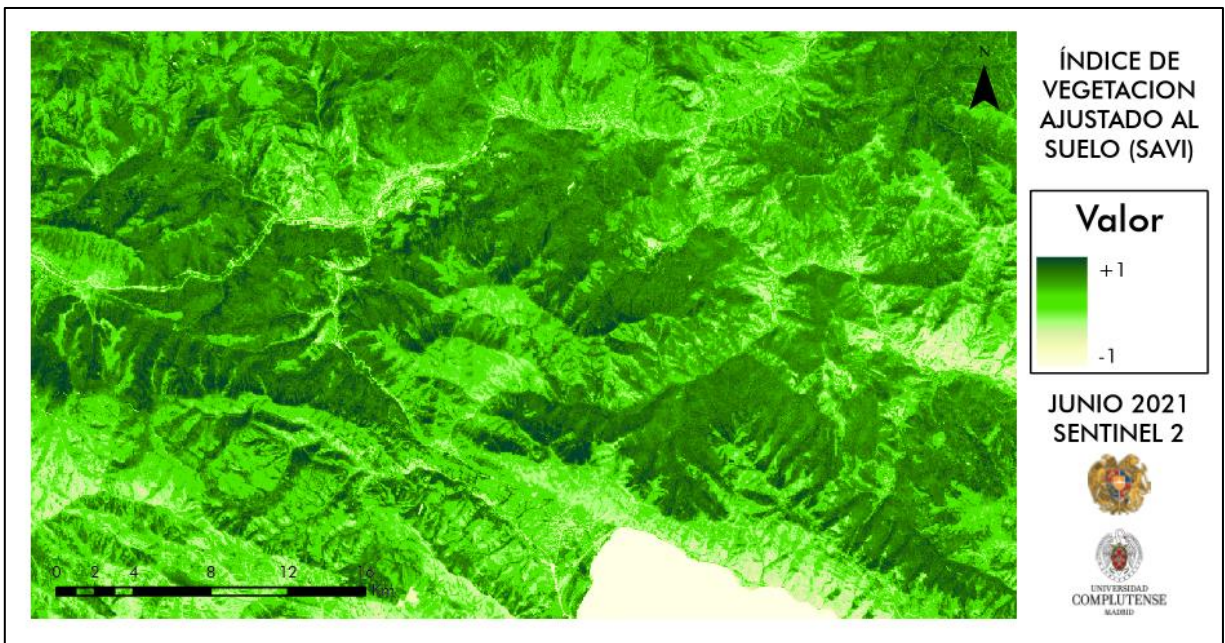


Figura 22: índice SAVI en la imagen de Sentinel 2. Elaboración propia

El índice SAVI es una herramienta útil para evaluar la salud y densidad de la vegetación en imágenes de satélite. A diferencia de otros índices de vegetación, el SAVI tiene en cuenta la influencia del suelo en la reflectancia de la vegetación, lo que lo hace especialmente adecuado para áreas con suelos expuestos o desnudos. El índice SAVI se utiliza para compensar la influencia del suelo en la estimación de la vegetación y proporciona resultados más precisos en tales situaciones. Los resultados obtenidos a partir del índice SAVI son de gran utilidad en diversos campos. En el caso de las imágenes de este trabajo, los resultados son:

- **Monitoreo de la salud de los cultivos:** el índice SAVI permite evaluar la salud de los cultivos y detectar posibles problemas, como estrés hídrico, deficiencia de nutrientes o presencia de plagas. Los valores más bajos de SAVI pueden indicar zonas de cultivos en dificultades y ayudar a los agricultores a tomar decisiones informadas sobre la gestión de sus parcelas. En el sur del área de estudio, en el núcleo rural a las orillas del lago (Tsovayugh) hay una pequeña parte dedicada al cultivo familiar. Si observamos, en 1991 se detectan más huertas que en 2021 donde parece ser que han desaparecido. Esto se explica por el cambio de modo de vida soviética por la actual, que depende menos de la subsistencia y de la autocracia.
- **Evaluación de la calidad del suelo:** el SAVI tiene en cuenta la influencia del suelo en la reflectancia de la vegetación, lo que permite estimar la calidad del suelo y detectar áreas con suelos desnudos o poco productivos. Esto es especialmente relevante en estudios de degradación del suelo, restauración de áreas degradadas y planificación de prácticas de conservación del suelo, como es el caso de este proyecto. Pese a que sí que se ha notado una mejora en la forestación con las otras técnicas aplicadas, en este caso sí que se detectan más suelos desnudos en 2021 que en 1991, especialmente en el este del parque y en las orillas del lago Sevan, donde se observan cárcavas más erosionadas en la actualidad.
- **Monitoreo de cambios en el uso de la tierra:** también puede utilizarse para comparar imágenes de diferentes momentos en el tiempo y detectar cambios en la cobertura vegetal. Esto es valioso para el monitoreo de la deforestación, la expansión urbana, los cambios en el uso de tierras agrícolas y otros procesos de cambio en el paisaje. Es principalmente la razón por la que se ha escogido este índice para el trabajo. Los cambios de usos del suelo más relevantes observados con el SAVI es el aumento de la superficie de la vegetación de pradera herbácea frente al bosque de dehesa situado en el centro y el suroeste de la zona de estudio. Esto indica un cambio en el aprovechamiento humano y una degradación del bosque a causa de actividades antrópicas, como el ganado o la tala ilegal, muy comunes en la zona.
- **Estudios de vegetación y ecología:** este índice proporciona una medida cuantitativa de la densidad y salud de la vegetación, lo que permite realizar análisis comparativos entre diferentes áreas y estudiar patrones de distribución de la vegetación. El resultado obtenido es que en 2021 hay menos densidad de árboles que en 1991, lo cuál es contradictorio con el resto de las técnicas que se han usado para la investigación. La causa puede ser la calidad de la imagen superior en la de Sentinel 2 que en Landsat 5, y, consecuentemente, mayor realidad en los resultados.

El siguiente índice usado es el NDBI o Índice de Diferencia Normalizada Edificada. Se ha aplicado una gama de color adecuada de manera que resalte mejor los resultados obtenidos.

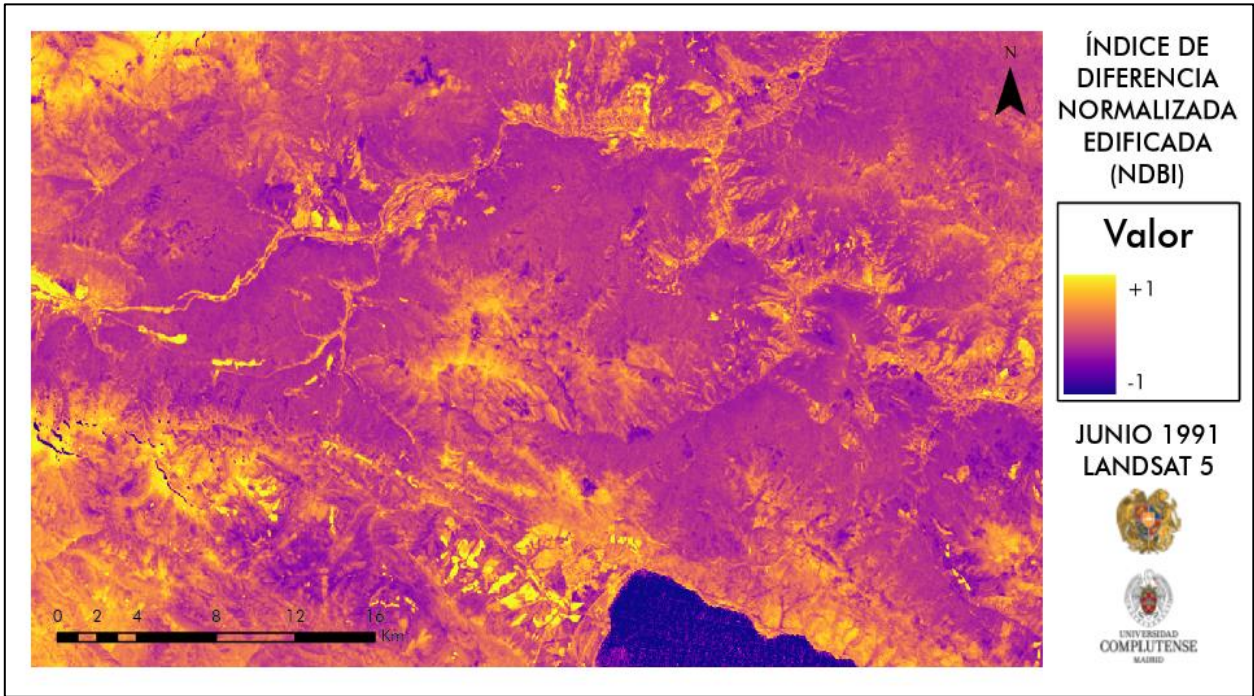


Figura 23: índice NDBI en la imagen de Landsat 5

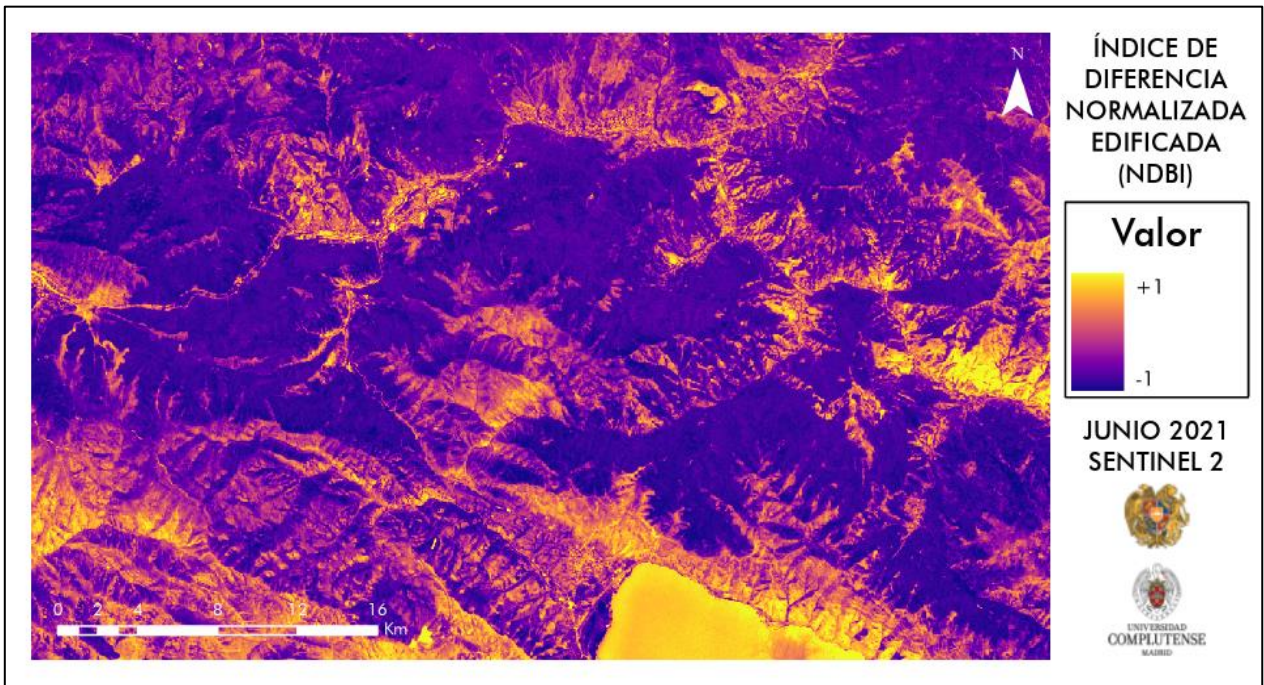


Figura 24: índice NDBI en la imagen de Sentinel 2

El NDBI es una herramienta utilizada en el análisis de datos de teledetección para evaluar el crecimiento y la expansión de áreas urbanas. Proporciona información sobre la presencia y densidad de construcciones y áreas urbanizadas en una imagen de satélite. Gracias a esto, se han obtenido los siguientes resultados:

- **Identificación de áreas urbanas:** el NDBI permite distinguir las áreas urbanizadas de las áreas rurales en una imagen. Las zonas urbanas suelen tener valores positivos altos debido a la presencia de construcciones y superficies pavimentadas, mientras que las áreas no urbanizadas tienden a tener valores negativos o cercanos a cero. Esto se ve reflejado en ambas imágenes, donde las infraestructuras y los núcleos rurales tienen valores altos con tonos amarillos, mientras que las zonas naturales con vegetación obtienen valores negativos con tonos morados. En la imagen de 2021 esos tonos morados están más intensificados, lo que se puede explicar con dos causas: la primera, es que los bosques en el Parque Nacional Dilijan han tenido un cambio de desarrollo centrado en la intensificación de densidad de la masa arbórea; y, la segunda, es que la imagen de Sentinel 2 tiene mayor resolución y calidad, por lo que las características van a resaltar más.
- **Estimación de densidad de construcción:** el índice también proporciona una medida indirecta de la densidad de construcción en áreas urbanas. Valores más altos de NDBI indican áreas con mayor concentración de edificios y estructuras urbanas, lo que puede indicar una mayor densidad de población. En el caso del área de estudio, la densidad es bastante baja y se localiza concentrada en los núcleos rurales de Dilijan, Haghartsin y Tsovaghyugh. Por lo demás, se observa poblamiento disperso en los valles de las montañas del parque. Gracias a este índice también se observa con mayor precisión en qué zonas se sitúan estos poblamientos, que se centran mayoritariamente en los valles y en las praderas llanas, sobre todo cerca de las orillas del lago Sevan. Estas son las zonas más accesibles y con mejores condiciones para vivir dentro de lo que es el área analizada.
- **Monitoreo del crecimiento urbano:** al comparar imágenes de satélite adquiridas en 1991 y 2021, se pueden detectar cambios en las áreas urbanas a lo largo esos 30 años. Esto permite evaluar el crecimiento urbano y la expansión de áreas construidas. Los resultados indican que no ha habido expansión en los núcleos rurales ya que todas siguen con el mismo entramado y tamaño. La mayor causa es que en esta zona ha habido un despoblamiento después de la independencia de Armenia de la Unión Soviética a causa de la guerra del Alto Karabaj contra Azerbaiyán, en donde muchos azerís abandonaron estos lugares y se escaparon a su país de origen. Esto provocó un descenso importante en la demografía de estos lugares, llegando a pasar de 30.433 habitantes en 1989 a 17.712 en 2011<sup>3</sup>.
- **Delimitación del área del parque:** también podemos observar con este índice que los núcleos rurales e infraestructuras nunca cruzan el área del Parque Nacional Dilijan, lo que indica un cumplimiento de las normas vigentes del parque de no alterar el medio natural.

---

<sup>3</sup> Datos obtenidos de: Հայաստանի Հանրապետության բնակավայրերի բառարան, Diccionario de asentamientos de la República de Armenia. Ereván: Comité del Catastro de la República de Armenia 2008.

El último índice seleccionado para aportar resultados es el Mineral Composite. En la imagen de 1991 se han combinado las bandas 2-1-2, mientras que en la de 2021 se ha usado la 2-1-3.

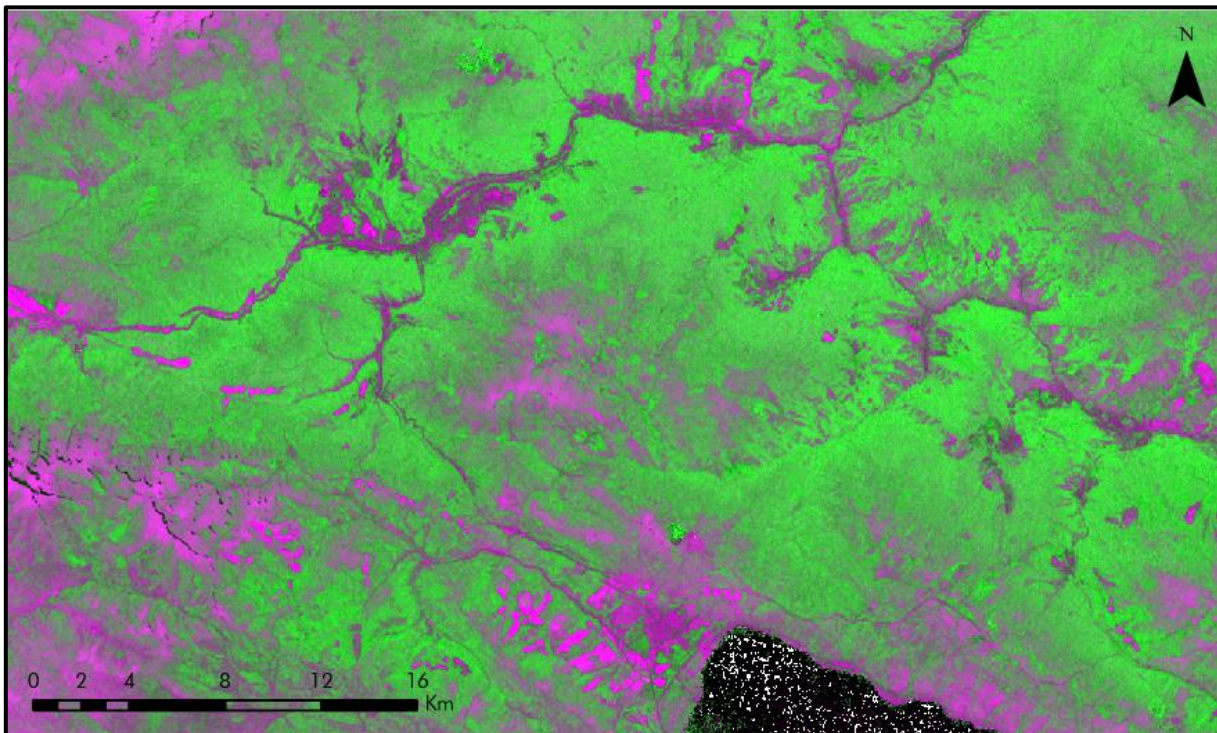


Figura 25: índice de Mineral Composite en la imagen de Landsat 5. RGB 2-1-2. Elaboración propia

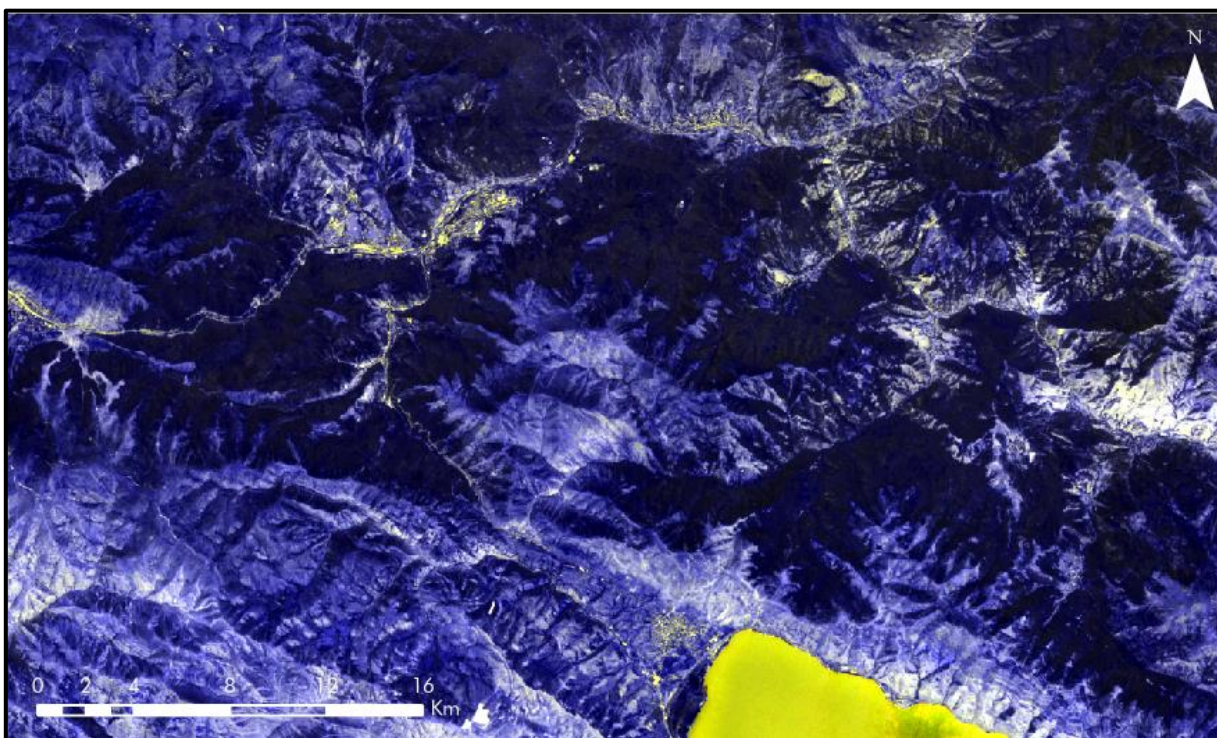


Figura 26: índice de Mineral Composite en la imagen de Sentinel 2. RGB 2-1-3. Elaboración propia

El índice Mineral Composite combina múltiples bandas espectrales de la imagen de satélite para resaltar las características espectrales únicas de diversos minerales presentes en la superficie terrestre. Este índice se basa en la forma en que los minerales interactúan con la luz en diferentes longitudes de onda del espectro electromagnético. Los resultados obtenidos son los siguientes:

- **Detección y mapeo de minerales:** principalmente permite identificar y mapear la distribución espacial de minerales específicos. Cada mineral tiene una firma espectral única que puede ser detectada mediante este índice, lo que facilita la identificación de áreas ricas en minerales específicos, como arcillas, óxidos de hierro, cuarzo, carbonatos, entre otros. En el área de estudio abunda la litología compuesta por flysch que están compuestas por una alternancia entre calizas, pizarras o areniscas con margas o lutitas. Las zonas verdes en la imagen de 1991 y las azules oscuro de la imagen de 2021 corresponden con dicha tipología geológica.
- **Caracterización geológica:** al identificar y mapear los minerales presentes en el Parque Nacional Dilijan, el Mineral Composite proporciona información valiosa para la caracterización geológica del área. Puede ayudar a identificar la presencia de rocas sedimentarias, ígneas o metamórficas, así como indicar la posible presencia de recursos minerales valiosos. Esto es muy importante ya que hay escasez en la información geológica del área, lo que se podría resolver con la aplicación de esta técnica, entre otras
- **Monitoreo ambiental:** este índice también puede ser utilizado en el monitoreo ambiental, especialmente en la detección de cambios en la cobertura del suelo y la identificación de áreas afectadas por la minería u otras actividades relacionadas. Esto puede ayudar en la planificación y gestión del uso del suelo, así como en la evaluación de los impactos ambientales de las actividades humanas en Armenia. Se aprecia un descenso de los suelos desnudos en la zona sur y noroeste en 2021, lo que se debe a una ligera forestación, especialmente de vegetación de pradera.
- **Investigación científica:** el uso del índice Mineral Composite en imágenes de satélite también es de gran utilidad en la investigación científica. Permite el estudio de procesos geológicos, la comprensión de la dinámica de los ecosistemas y el análisis de la interacción entre la geología, el clima y la vegetación, entre otros aspectos. Todos estos temas son muy necesarios para la conservación de los ecosistemas del Parque Nacional Dilijan. Además, se podrían aplicar en otras zonas naturales de la República de Armenia, especialmente en áreas con mucha más degradación forestal y faunística.

A vista general, el índice Mineral Composite aplicado a imágenes de satélite es una herramienta poderosa para la detección y mapeo de minerales, la caracterización geológica, la prospección de recursos minerales, el monitoreo ambiental y la investigación científica. Proporciona información detallada sobre la composición mineral de la superficie terrestre, lo que puede ser de gran valor en un país como Armenia, donde las medidas de conservación natural aún están por detrás de muchos países de su mismo rango.

## 5.4. ANÁLISIS RADAR

Otro método usado para analizar la evolución de los usos del suelo en el área de Dilijan es la teledetección radar o SAR. Cabe destacar que debido a que el radar es una tecnología relativamente nueva, la imagen más antigua que se ha podido conseguir del área es de 2015, por lo que el análisis no obtendrá unos cambios tan grandes como con las imágenes ópticas de Landsat 5 y Sentinel 2. Sin embargo, se ha escogido un intervalo de 7 años para observar los máximos cambios posibles.

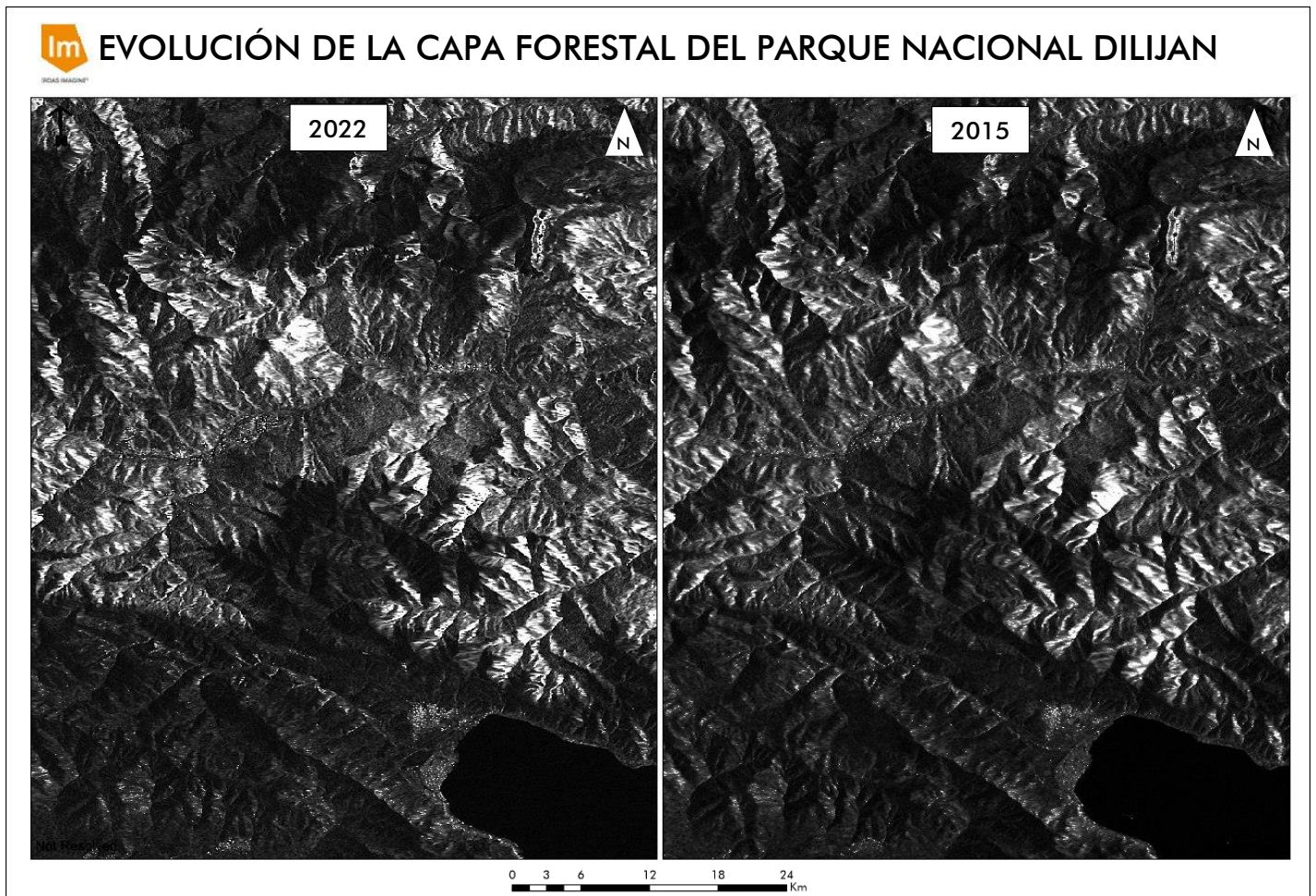


Figura 27: composición de imágenes radar del área de estudio. Elaboración propia

La teledetección radar es una herramienta poderosa para monitorear y evaluar la deforestación y los cambios en la cobertura forestal. A continuación, se presentan algunos de los resultados que se han obtenido en el área de estudio de este trabajo:

- **Detección y mapeo de áreas deforestadas:** las imágenes de radar pueden identificar áreas donde se ha producido la deforestación mediante la comparación de las dos fechas. El radar penetra la vegetación y puede detectar cambios en la cobertura forestal, lo que permite identificar áreas donde los bosques han sido talados o degradados. Estos cambios se reflejan

en diferencias en la retrodispersión de las ondas de radar, lo que permite la detección y el mapeo de áreas deforestadas. Por ello, se observa que la masa forestal en 2022 es ligeramente superior en 2015, ya que abundan más los tonos blancos, que son los que corresponden a la vegetación.

- **Evaluación de la degradación forestal:** además de la detección de la deforestación total, la teledetección radar también puede ayudar a evaluar la degradación forestal. Las imágenes de radar pueden capturar cambios sutiles en la estructura del bosque, como la reducción de la densidad o la altura de la vegetación. Al comparar las dos imágenes vemos cómo en 2022 la densidad arbórea es mayor que en 2015. Este cambio se ve reflejado también en las técnicas utilizadas anteriormente en el trabajo, del mismo modo que se corresponden a la nueva normativa de Armenia de densificar los bosques. Por ello, se puede concluir que no ha habido degradación forestal en el área de manera general.
- **Identificación de actividades ilegales:** con esta tecnología se puede proporcionar información valiosa para identificar actividades ilegales relacionadas con la deforestación, como la tala ilegal o la minería no autorizada. Al detectar cambios en la cobertura forestal que pueden estar asociados con estas actividades, se pueden identificar áreas de interés para la aplicación de medidas de control y vigilancia. Debido a que la tala ilegal es un problema muy común y recurrente en toda la República de Armenia, esta técnica es muy importante. Observamos que hay una zona justo al norte de Dilijan en la que en 2015 contaba con suelo desnudo, mientras que en 2022 se ha regenerado. Coincide con un bosque, lo que indica perfectamente que en aquella área hubo tala de árboles ilegal, debido a que se sitúa dentro del Parque Nacional Dilijan y que se ha frenado.
- **Evaluación de impactos ambientales:** La teledetección radar también puede ayudar a evaluar los impactos ambientales de la deforestación. Al analizar imágenes de radar antes y después de la deforestación, es posible estudiar los cambios en los patrones hidrológicos, la erosión del suelo y la fragmentación del hábitat. Estos resultados son cruciales para comprender los efectos a largo plazo de la deforestación en el ecosistema y apoyar la toma de decisiones en términos de restauración y conservación. Probablemente las cárcavas de las orillas del lago Sevan se han erosionado con más intensidad durante estos últimos años, por ello, en 2022 se aprecia el cambio más claramente.

En resumen, la teledetección radar ofrece una serie de resultados valiosos en relación con la deforestación. Desde la detección y el mapeo de áreas deforestadas, hasta la evaluación de tasas de deforestación, la identificación de actividades ilegales y la evaluación de los impactos ambientales, esta técnica brinda información clave para comprender y abordar el problema de la deforestación de manera eficiente. En este caso, ha ayudado a contrastar más aún los resultados obtenidos con las tecnologías aplicadas anteriormente, que son que ha habido una forestación generalmente en toda la zona y los usos del suelo no han variado mucho. Sin embargo, sí que se han notado zonas en las que ha habido deforestación y erosión.

## 5.5. CLASIFICACIÓN SUPERVISADA

Es importante realizar una clasificación supervisada de los usos del suelo en el área de estudio, para comprobar racionalmente cual ha sido la magnitud de dichos cambios.

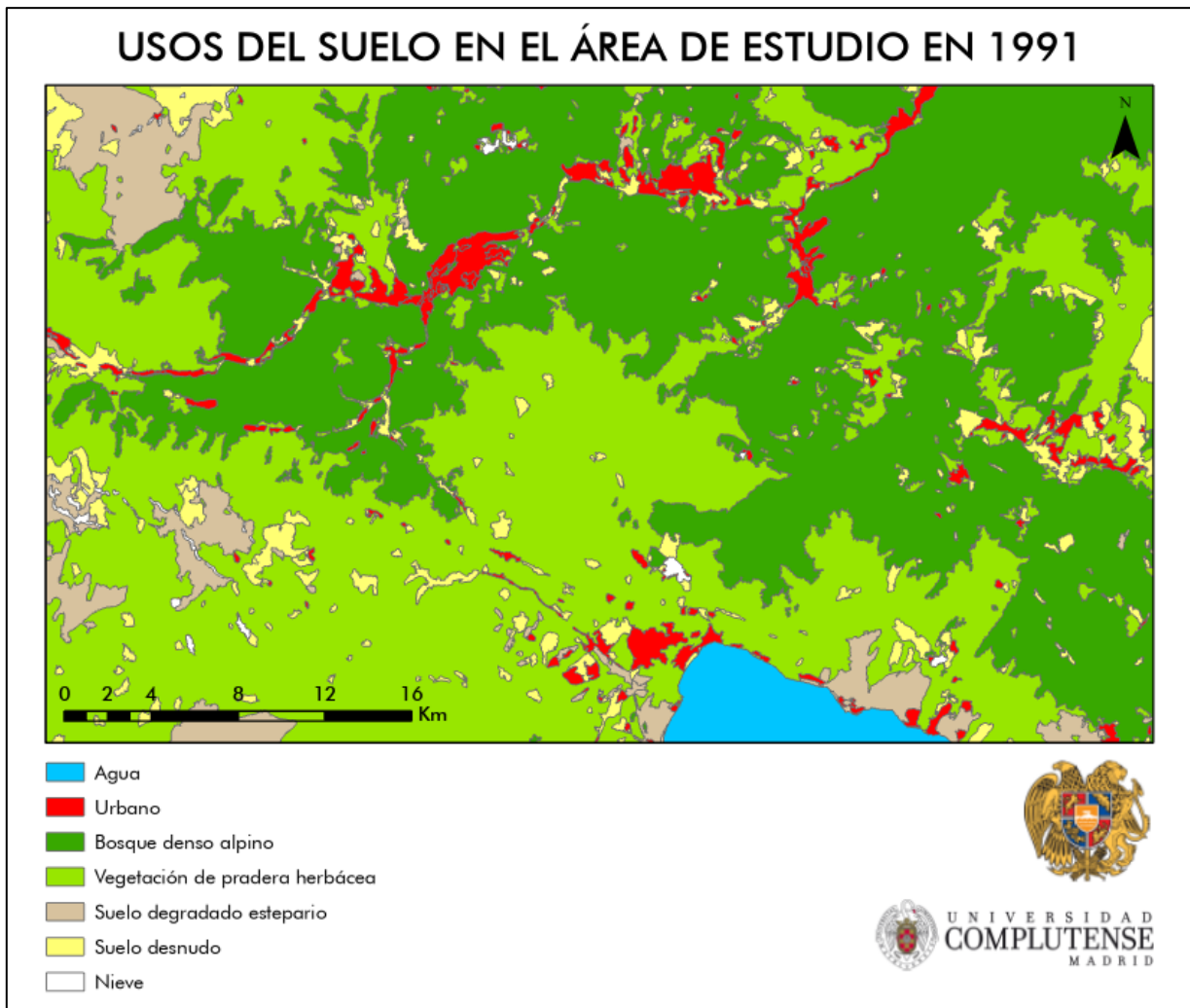
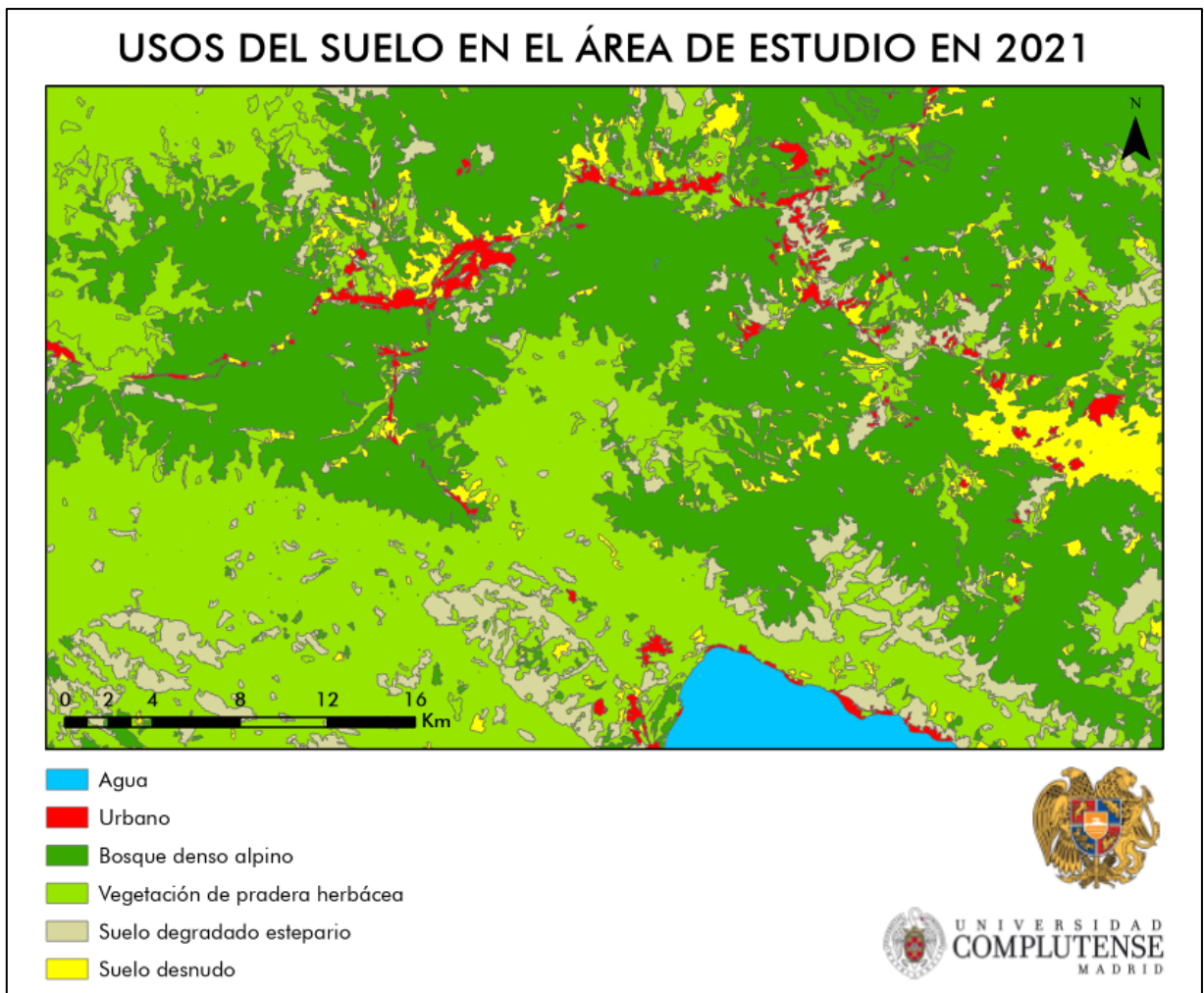


Figura 28: usos del suelo en el área de estudio en 1991. Elaboración propia

La clasificación supervisada de 1991 indica que hay varias zonas en los alrededores del Parque Nacional Dilijan que cuentan con un suelo degradado estepario, que se corresponden con las zonas donde hubo talas y deforestación en la era soviética. Por lo demás, destacan los suelos desnudos que se localizan siempre alrededor de núcleos rurales, lo que indica actividades como la agricultura, tala de árboles u ocupación del suelo por otros motivos. La masa arbórea del Parque Nacional parece ser extensa, aunque hay zonas en el interior que cuentan con vegetación esteparia. En cuanto a las praderas herbáceas, son las que dominan el paisaje mayoritariamente. En general, si comparamos esta clasificación con la imagen de Landsat 5, podemos concluir que la clasificación es bastante acertada y es coherente a la realidad. Los errores más comunes son la confusión del suelo desnudo con el suelo degradado y urbano.



*Figura 29: usos del suelo en el área de estudio en 2021. Elaboración propia*

En la clasificación supervisada de 2021 observamos varios cambios relevantes. El primero de ellos es el aumento del suelo degradado estepario, lo que se debe a dos razones principalmente: una, que es cierto que en algunas zonas como el este o alrededor del lago Sevan la erosión y la deforestación ha aumentado; y, la segunda, que la imagen de Sentinel 2 tiene mayor resolución lo que capta mejor la información terrestre. Por ello, la imagen de Landsat 5 contaba con menos degradación, no necesariamente porque hubiera menos, sino porque es de menor resolución. Otro cambio de los usos del suelo importante es el aumento del suelo desnudo, producido especialmente en el este del área de estudio. La principal causa es la tala de árboles en dicha zona y la erosión causada por ello. Por otra parte, podemos destacar que los usos del suelo urbano no han tenido un cambio importante, solamente en las infraestructuras, las cuales han tenido un aumento debido a la mejora de conexiones entre los núcleos rurales de la zona. Podemos apreciar que la masa forestal del parque ha aumentado y la parte degradada situada al noroeste se ha recuperado en vegetación de pradera herbácea, al igual que en la zona suroeste. El suelo desnudo también ha tenido un aumento alrededor de los núcleos rurales de Dilijan y Haghartsin.

En los siguientes gráficos se aplican los resultados de la clasificación supervisada para observar cómo ha evolucionado la superficie ocupada en km<sup>2</sup> cada uso del suelo (gráficos 1 y 2).

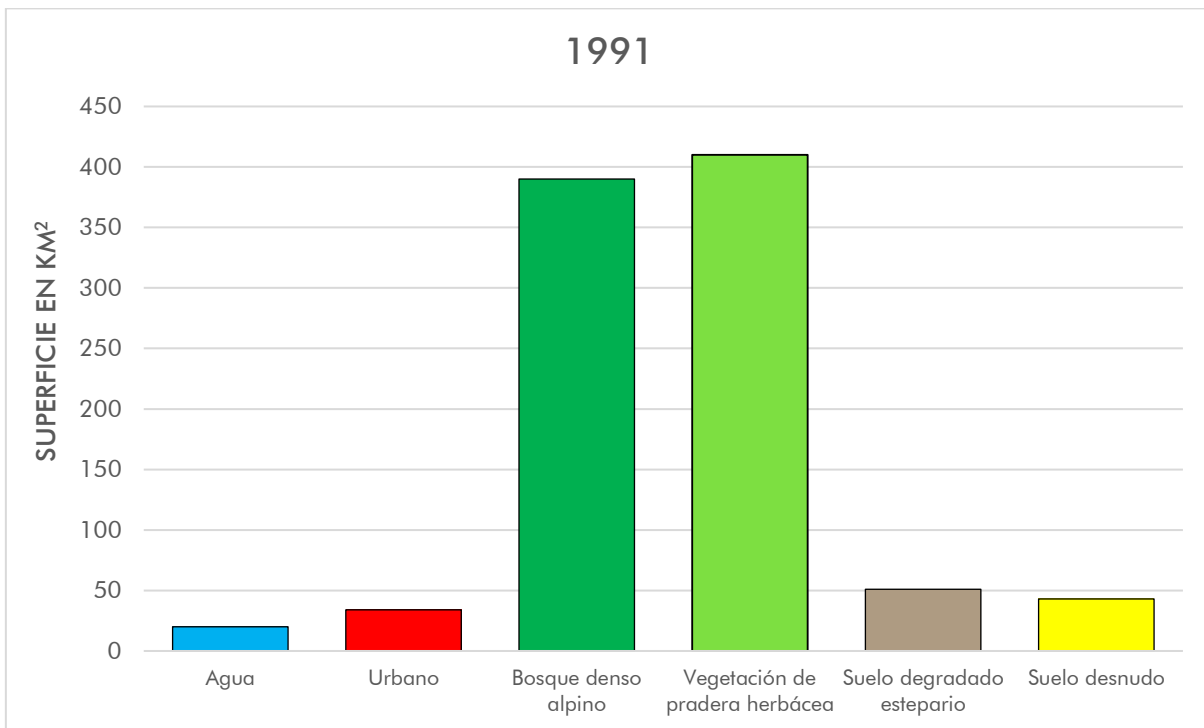


Gráfico 1: superficie ocupada por cada uso en km<sup>2</sup> en 1991. Elaboración propia

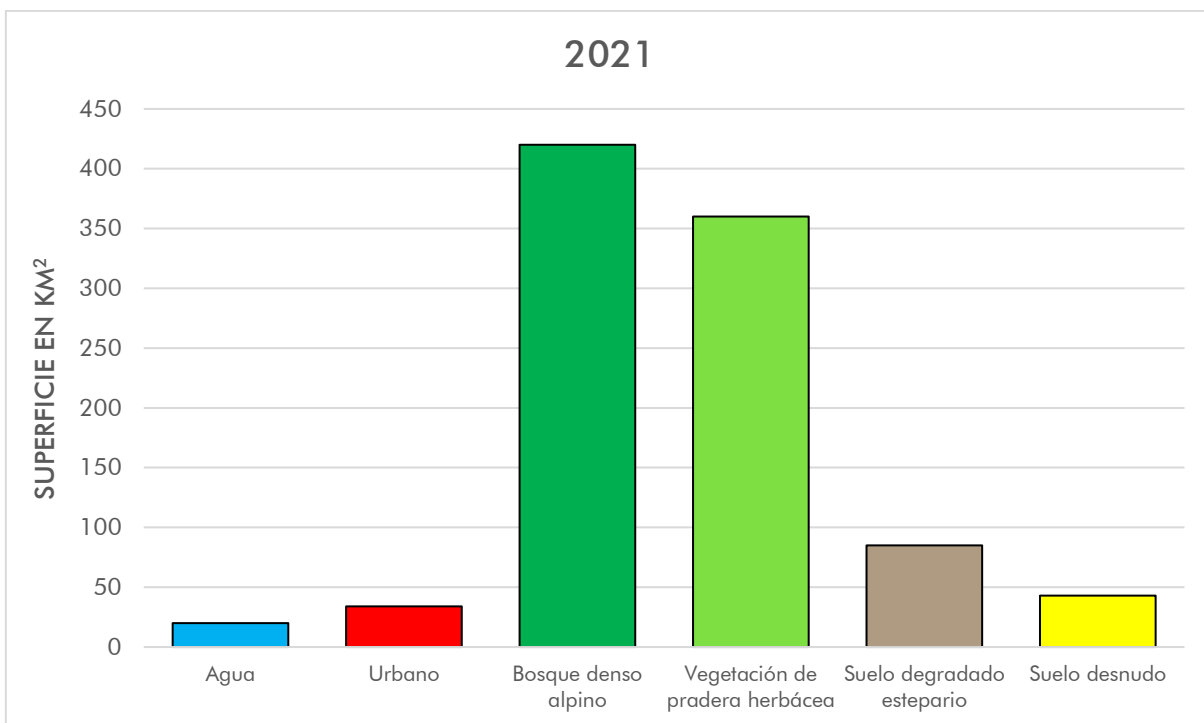


Gráfico 2: superficie ocupada por cada uso del suelo en km<sup>2</sup> en 2021. Elaboración propia

## 5.6. CARTOGRAFÍA FINAL DE RESULTADOS

Finalmente, se ha creado una cartografía final (figura 30) para englobar todas las técnicas usadas en el trabajo y producir un resultado definitivo acerca de si ha habido cambios de usos del suelo. Para ello, se han tenido en cuenta todos los resultados obtenidos anteriormente tanto en teledetección óptica como radar.



Figura 30: cartografía final de resultados. Elaboración propia

Podemos concluir que ha habido más forestación que deforestación, sobre todo en los alrededores del Parque Nacional. Sin embargo, hay zonas degradadas que pese a tener vegetación, se encuentra intercalada con suelo desnudo o deforestado ligeramente. Por otra parte, la parte erosionada corresponde con las orillas del lago Sevan, la cual se ha degradado más debido a que no cuenta con vegetación y está más expuesto al riesgo. Finalmente, las áreas rojas son las que han sufrido deforestación, a causa de la desertificación y la tala ilegal de árboles.

## 6. CONCLUSIONES

En conclusión, basado en los resultados de esta investigación sobre el cambio de usos del suelo y la deforestación en el Parque Nacional Dilijan y sus alrededores, utilizando Tecnologías de la Información Geográfica, se ha observado un panorama mixto en términos de cambios en la cobertura vegetal.

En general, los hallazgos revelan un patrón positivo de reforestación en el área de estudio durante el período analizado. Esto puede atribuirse a una mayor conciencia sobre la importancia de los bosques y los esfuerzos de conservación implementados en la región. La utilización de mejoras espectrales, combinación de bandas e índices como el NDVI y el SAVI ha permitido identificar y cuantificar estos cambios con precisión. La denominación de Dilijan como Parque Nacional ha sido un cambio trascendental que ha protegido su medio natural de manera excepcional. Esto es un gran contraste comparando con el resto de las zonas naturales de Armenia. Por ello, es importante que se comiencen a designar más Parques Nacionales o áreas en protección. Sin embargo, también se ha constatado que existen áreas donde la deforestación y la degradación del suelo han tenido lugar, aunque todas ellas fuera de la delimitación del Parque Nacional. Estas han debido de ser resultado de diversas presiones antropogénicas probablemente, como la explotación forestal no sostenible. Estos resultados señalan la necesidad de adoptar medidas de conservación adicionales y prácticas de gestión sostenible para abordar estos problemas.

Además, se ha llevado a cabo un análisis temporal que cubre principalmente cambios en cuanto a las políticas forestales de Armenia. Esta ha tenido efectos contradictorios desde la independencia de Armenia de la antigua Unión Soviética en 1991. La extensa legislación forestal conservadora que existió en la Armenia soviética desde la década de 1950 ha resultado en un gran porcentaje de masas forestales envejecidas con problemas de deforestación. Después de su independencia, la primera ley forestal conocida como Código Forestal de 1994 ignoraba los problemas de la época y trató de mantener la tradición soviética, lo que provocó que la tala industrial ilegal no reglamentada continuara. Esto se aprecia perfectamente en los resultados obtenidos de 1991, donde hay muchas zonas deforestadas. Posteriormente, en 2005 se aprobó el nuevo Código Forestal en el que se resolvía de cierta manera ligera aquellos problemas. Debido a la respuesta tardía y desequilibrada hacia estos problemas, la mayoría del país ha sufrido una deforestación y desertificación severa. Sin embargo, este no es el caso del Parque Nacional Dilijan, donde a través de la imagen de Sentinel 2 de 2021 se observa que la masa arbórea se ha densificado y se han reforestado algunas zonas. Por ello es importante la denominación de Parque Nacional. A su vez, este trabajo de investigación ha producido una cartografía de resultado de la que no se dispone en internet. En ella están incluidas los siguientes mapas temáticos:

- ❖ Usos del suelo de la zona de estudio mediante clasificación supervisada en 1991 y 2021.
- ❖ Mapa sobre el estado medioambiental del medio natural del área en 2021 frente a 1991.

Estos proporcionan información detallada sobre la naturaleza de los cambios en la cubierta forestal en el Parque Nacional y cuáles son las principales causas de la deforestación. Del análisis de los resultados se desprende que la superficie boscosa está cubierta principalmente por especies alpinas y se ha mantenido relativamente alta a lo largo del tiempo representando alrededor 50% de la superficie. Por otra parte, también se concluye que la vegetación de pradera herbácea se ha mantenido abundante hasta la actualidad, aunque haya tenido un ligero descenso. La mayor parte de la deforestación y degradación ocurrió antes del 2000, mientras que en la actualidad parece haberse estabilizado nuevamente. Además, también parece haber habido cierta regeneración forestal sustancial de vegetación previamente deforestada y degradada.

De los resultados producidos, parece que las principales causas de los cambios en los usos del suelo están vinculadas a:

- ❖ La conversión a otro tipo de vegetación, como la de suelo degradado a vegetación de pradera.
- ❖ El abandono de la escasa agricultura existente en la zona, a causa de las dificultades del sector en el país.
- ❖ El deterioro de algunas áreas forestales debido a la tala ilegal, que ha hecho que el suelo se desnude y no tenga uso.

Si analizamos más a fondo los datos estadísticos de los usos del suelo, observamos que el suelo urbano no ha cambiado, mientras que el suelo forestal de bosque alpino ha crecido en 2021 y la vegetación de pradera ha tenido un descenso debido al deterioro de algunos suelos y al aumento de los bosques. Consecuentemente, las tierras deterioradas también han aumentado. Sin embargo, todos estos cambios negativos han tenido lugar fuera de la delimitación del Parque Nacional.

El objetivo principal era detectar los cambios de usos del suelo entre 1991 y 2021 en el Parque Nacional Dilijan y sus alrededores, lo que se ha cumplido correctamente con los resultados producidos. Se aprecia que se han logrado la mayoría de objetivos secundarios, como la aplicación de las TIG para los estudios, más concretamente la teledetección óptica, la teledetección radar y los SIG. También se ha cumplido la realización de cartografía de usos del suelo con clasificación supervisada, que ha ayudado a resumir los resultados en dos mapas de cada fecha con los usos del suelo existentes en dichos momentos.

Por otra parte, no hay estudios previos sobre áreas especialmente protegidas en Armenia usando teledetección óptica y radar, de ahí la importancia de esta publicación. Este estudio debe proporcionar información útil a la dirección del Parque Dilijan y a las autoridades armenias para la efectividad e impacto de sus políticas forestales y puede servir como modelo para el resto de las áreas en peligro de deforestación localizadas por todo el país.

La combinación de teledetección óptica y radar, junto con el análisis SIG, ha demostrado ser una herramienta valiosa para monitorear y evaluar los cambios en el uso del suelo y la cobertura

vegetal en la región del Parque Nacional Dilijan. Esta metodología proporciona una visión completa y detallada de los procesos de cambio, lo que facilita la toma de decisiones informadas y la implementación de estrategias de manejo adecuadas. Además, al haber usado tantas técnicas el resultado tiene un valor más verídico y contrastado, lo que mejora su validez. La creación de cartografía también ha posibilitado la expresión de información y resultados de una forma más alcanzable al público no especializado, algo que es positivo para la concienciación de la población acerca de estos problemas tan graves.

Es importante mencionar que una de las conclusiones más técnicas de este trabajo es que la diferencia de resolución de las imágenes ha producido resultados muy distintos en algunas ocasiones. Debido a que la imagen más reciente es de Sentinel 2, la calidad de esta es mayor, por lo que se van a poder resaltar muchos más detalles, mientras que con la imagen de Landsat 5 se aprecian menos elementos. Pese a esto, la combinación de bandas y el uso de índices ha minorizado el problema.

Al haber finalizado la investigación, se pueden responder a las preguntas de la investigación realizadas al principio:

**1. ¿Cuál es la magnitud de los cambios en los usos del suelo en el Parque Nacional Dilijan?**

- La magnitud ha sido menor de la esperada, ya que por lo general ha habido más reforestación. Sin embargo, también han aumentado las zonas degradadas.

**2. ¿Ha sido la deforestación el mayor cambio de suelos en el Parque Nacional Dilijan?**

- Sí, al igual que la degradación de los suelos, aunque contrastadamente, también lo ha sido la reforestación.

**3. ¿Ha habido otros cambios de usos del suelo aparte de la deforestación?**

- La degradación de los suelos y los cambios en la vegetación de pradera herbácea.

**4. ¿Qué medidas se pueden proponer para conservar y gestionar de forma sostenible los suelos y la biodiversidad en la región?**

- Aplicar estatus de Parque Nacional en otras áreas naturales en peligro de deforestación y actualizar el Código Forestal de Armenia, para frenar más aún la desertificación y las actividades forestales ilegales.

Además, la hipótesis realizada al principio resultó ser parcialmente correcta, ya que realmente la deforestación ha sido el mayor cambio en los usos del suelo. Sin embargo, el urbanismo no lo ha sido, como hemos podido comprobar con los resultados, ya que el suelo urbano no ha tenido modificación ni aumento desde 1991.

También es importante mencionar las limitaciones al estudio, que se han visto reflejadas en la falta de información geográfica en la zona, como capas SIG. Sin embargo, gracias a algunas páginas web este ha sido un problema menor. Otra limitación ha sido la escasez de estudios previos sobre los que basarse, debido a que es una zona muy específica en un país realmente desconocido para muchas personas. Además, la elección de unas fechas tan alejadas ha provocado que no esté disponible el mismo satélite para obtener datos más objetivos, pero gracias a las mejoras y los índices esto se ha podido resolver.

Finalmente, se puede concluir el trabajo con recomendaciones para futuras líneas de investigación acerca de este tema:

- ❖ Es imprescindible realizar estudios forestales en el resto del medio natural de Armenia, porque no todas las zonas tienen reforestación como en Dilijan, de hecho, la mayoría sufre de grandes deforestaciones y desertificación.
- ❖ También es importante realizar investigaciones sobre la aplicación de la legislación medioambiental correcta en el país, porque se ha visto que produce efectos positivos a largo plazo.
- ❖ Es recomendable estudiar más a fondo sobre la delimitación de nuevas áreas como Parques Nacionales o crear otra figura de protección natural para salvaguardar la vegetación de las zonas con más riesgo de degradación.

En resumen, los resultados de la investigación indican que, si bien ha habido una tendencia general de reforestación en el Parque Nacional Dilijan y sus alrededores durante el período estudiado, también se han identificado áreas con deforestación y suelos degradados. Estos hallazgos destacan la importancia de fortalecer los esfuerzos de conservación, promover la gestión sostenible de los recursos naturales y abordar las causas subyacentes de la deforestación en las zonas identificadas como problemáticas. Estos resultados pueden servir como base para futuras investigaciones y contribuir a la formulación de políticas ambientales más efectivas en la región.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- ❖ Alonso, F., Gomariz, F. M., & Cánovas, F. (2012). Análisis temporal de los cambios de usos del suelo en la Cuenca del Segura mediante teledetección. Implicaciones sobre la degradación. Cuaternario y geomorfología: Revista de la Sociedad Española de Geomorfología y Asociación Española para el Estudio del Cuaternario, 24(3), 73-88. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3368533>
- ❖ Anderson, J.R., et al. (1976) A Land Use and Land Cover Classification System for Use with Remote Sensor Data. Geological Survey Professional Paper No. 964, U.S. Government Printing Office, Washington DC, 28.
- ❖ Applied Remote Sensing Training Program | NASA Applied Sciences. (s. f.). <https://appliedsciences.nasa.gov/what-we-do/capacity-building/arset>
- ❖ Bhatta, B. (2010). Analysis of Urban Growth and Sprawl from Remote Sensing Data. Springer Science & Business Media.
- ❖ Burrough, P. A., & McDonnell, R. A. (2015). Principles of geographical information systems. Oxford University Press.
- ❖ Chen, J., & Chen, J. (2013). Rapid urbanization in China: A real challenge to soil protection and food security. CATENA, 104, 1-2.
- ❖ Chuvieco, E. (2008). Fundamentos de teledetección espacial: Un enfoque medioambiental. CRC Press.
- ❖ Chuvieco, E. (2019). Teledetección de incendios forestales: Desde escalas locales hasta globales. Cambridge University Press.
- ❖ Chuvieco, E., & Huete, A. (2010). Fundamentos de teledetección de la vegetación. CRC Press.
- ❖ Chuvieco, E., & Justice, C. (Eds.). (2019). Observación de la Tierra y cambio global: El papel de la teledetección por satélite en el monitoreo del medio ambiente global. Springer.
- ❖ Chuvieco, E., & Kasischke, E. (Eds.). (2017). Teledetección de incendios activos. Springer.
- ❖ Chuvieco, E., & Salas, J. (2015). Teledetección de incendios forestales: Una revisión. Journal of Applied Remote Sensing, 9(1), 1-24.
- ❖ Chuvieco, E., & Settele, J. (Eds.). (2018). Observación de la Tierra para la biodiversidad y los servicios de los ecosistemas: Ciencia y tecnología para la agenda de desarrollo posterior a 2015 de la ONU. Springer.
- ❖ Chuvieco, E., & Viegas, D. X. (Eds.). (2018). Incendios forestales y contaminación del aire. Elsevier.
- ❖ Chuvieco, E., Aguado, I., & Yebra, M. (2012). Teledetección de incendios: Evaluación del rendimiento de diferentes índices de vegetación para la detección de áreas quemadas. International Journal of Remote Sensing, 33(14), 4418-4437.
- ❖ Chuvieco, E., Giglio, L., Justice, C. O., & Pereira, J. M. (2008). Caracterización global de la actividad de incendios: Hacia la definición de regímenes de fuego a partir de datos de observación terrestre. Global Change Biology, 14(7), 1488-1502.

- ❖ Clarke, K. C. (Ed.). (2017). *Geocomputation: A practical primer*. SAGE Publications.
- ❖ Cloude, S. R., & Pottier, E. (1996). A review of target decomposition theorems in radar polarimetry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34(2), 498-518.
- ❖ Cloude, S. R., & Pottier, E. (1996). A review of target decomposition theorems in radar polarimetry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34(2), 498-518.
- ❖ Congalton, R. G., & Green, K. (2009). *Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices*. CRC Press.
- ❖ Craglia, M., Haining, R., & Wiles, P. (Eds.). (2000). *Spatial data infrastructures at the crossroads: Challenges for the next decade*. Taylor & Francis.
- ❖ Dale, V.H. (1997) The Relationship between Land-Use Change and Climate Change. *Ecological Applications*, 7, 753-769. [http://dx.doi.org/10.1890/1051-0761\(1997\)007\[0753:TRBLUC\]2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1890/1051-0761(1997)007[0753:TRBLUC]2.0.CO;2)
- ❖ DeFries, R. S., & Townshend, J. R. (1994). NDVI-derived land cover classifications at a global scale. *International Journal of Remote Sensing*, 15(17), 3567-3586.
- ❖ DeMers, M. N. (2013). *Fundamentals of geographic information systems*. John Wiley & Sons.
- ❖ Ferro-Famil, L., & Garestier, F. (2003). *Advanced radar polarimetry: Target decomposition and scattering polarization mechanisms*. ISTE Ltd.
- ❖ Ferro-Famil, L., & Garestier, F. (2003). *Advanced radar polarimetry: Target decomposition and scattering polarization mechanisms*. ISTE Ltd.
- ❖ Foody, G. M., & Mathur, A. (2004). A relative evaluation of multiclass image classification by support vector machines. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42(6), 1335-1343.
- ❖ Freeman, A., & Durden, S. L. (1998). A three-component scattering model for polarimetric SAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(3), 963-973.
- ❖ Freeman, A., & Durden, S. L. (1998). A three-component scattering model for polarimetric SAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(3), 963-973.
- ❖ Ghulijanyan, A., Ecolur. (2015). 18.600 Ha Community Forests Mapped in Cadastre As Other Land Forms. <https://www.ecolur.org/en/news/forest/andranik-ghulijanyan-18600-ha-community-forests-mapped-in-cadastre-as-other-land-forms/7530/>
- ❖ Giri, C.P. (2012) *Remote Sensing of Land Use and Land Cover: Principles and Applications*. CRC Press, Boca Raton.
- ❖ *Global Economic Prospects*, World Bank (2023). <https://www.worldbank.org/en/publication/global-economic-prospects>
- ❖ Goodchild, M. F., & Janelle, D. G. (Eds.). (2004). *Spatially integrated social science*. Oxford University Press.
- ❖ Hajnsek, I., & Schmullius, C. (Eds.). (2019). *Synthetic aperture radar polarimetry*. Cambridge University Press.
- ❖ Hajnsek, I., & Schmullius, C. (Eds.). (2019). *Synthetic aperture radar polarimetry*. Cambridge University Press.

- ❖ Heywood, I., Cornelius, S., & Carver, S. (Eds.). (2011). An introduction to geographical information systems. Prentice Hall.
- ❖ Kang-tsung, C. (2019). Geographic information systems in transportation research. CRC Press.
- ❖ Karanian, M., & Kurkjian, R. (2006). The Stone Garden Guide: Armenia & Karabagh.
- ❖ Krieger, G., Moreira, A., & Fiedler, H. (2007). Spotlight SAR data processing using the chirp z-transform. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(11), 3545-3551.
- ❖ Krieger, G., Moreira, A., & Fiedler, H. (2007). Spotlight SAR data processing using the chirp z-transform. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(11), 3545-3551.
- ❖ Lee, J. S., & Pottier, E. (2009). Polarimetric radar imaging: From basics to applications. CRC Press.
- ❖ Lee, J. S., & Pottier, E. (2009). Polarimetric radar imaging: From basics to applications. CRC Press.
- ❖ Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. (2015). Geographic Information Systems and Science. John Wiley & Sons.
- ❖ Lu, D., & Weng, Q. (2007). A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance. *International Journal of Remote Sensing*, 28(5), 823-870.
- ❖ Maguire, D. J., Batty, M., & Goodchild, M. F. (Eds.). (2005). GIS, spatial analysis, and modeling. ESRI Press.
- ❖ Marchionni, D. (2014). La teledetección por radar como fuente de información litológica y estructural: Análisis espacial de imágenes SAR de. Dialnet. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5726660>
- ❖ Mertens, B., Lambin, E. F., & Vanacker, V. (2013). Remote sensing data improve spatial allocation of land use and land cover change in a tropical agricultural landscape. *Remote Sensing of Environment*, 131, 126-137.
- ❖ Morin, N., Masse, A., Sannier, C., Siklar, M., Kiesslich, N., Sayadyan, H., Faucqueur, L., & Seewald, M. (2021). Development and Application of Earth Observation Based Machine Learning Methods for Characterizing Forest and Land Cover Change in Dilijan National Park of Armenia between 1991 and 2019. *Remote Sensing*, 13(15), 2942. <https://doi.org/10.3390/rs13152942>
- ❖ Pérez, M. E., & García Rodríguez, M. P. (2013). Aplicaciones de la teledetección en degradación de suelos. *Boletín De La Asociación De Geógrafos Españoles*, 61. <https://doi.org/10.21138/bage.1545>
- ❖ Peterson, M. P. (2013). GIS cartography: A guide to effective map design. CRC Press.
- ❖ Rignot, E. (1996). Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface. *Reviews of Geophysics*, 36(4), 441-500.
- ❖ Rignot, E. (1996). Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface. *Reviews of Geophysics*, 36(4), 441-500.

- ❖ Sayadyan, H., Schmieder, K., & Agyemang, T. (2016). High-resolution satellite remote sensing of littoral vegetation of Lake Sevan (Armenia) as a basis for monitoring and assessment. [armagrar-uni.   
https://www.academia.edu/3995662/High\\_resolution\\_satellite\\_remote\\_sensing\\_of\\_littoral\\_vegetation\\_of\\_Lake\\_Sevan\\_Armenia\\_as\\_a\\_basis\\_for\\_monitoring\\_and\\_assessment](https://www.academia.edu/3995662/High_resolution_satellite_remote_sensing_of_littoral_vegetation_of_Lake_Sevan_Armenia_as_a_basis_for_monitoring_and_assessment)
- ❖ Seto, K. C., & Kaufmann, R. K. (2003). Modeling the drivers of urban land use change in the Pearl River Delta, China: integrating remote sensing with socioeconomic data. *Land Economics*, 79(1), 106-121.
- ❖ Singh, A. (1989). Digital change detection techniques using remotely-sensed data. *International Journal of Remote Sensing*, 10(6), 989-1003.
- ❖ Souyris, J. C. (2005). *Principles of synthetic aperture radar imaging: A system simulation approach*. ISTE Ltd.
- ❖ Souyris, J. C. (2005). *Principles of synthetic aperture radar imaging: A system simulation approach*. ISTE Ltd.
- ❖ Tewabe, D., & Fentahun, T. (2020). Assessing land use and land cover change detection using remote sensing in the Lake Tana Basin, Northwest Ethiopia. *Cogent environmental science*, 6(1), 1778998. <https://doi.org/10.1080/23311843.2020.1778998>
- ❖ Tomlin, C. D. (Ed.). (2016). *Geographic Information Systems and Cartographic Modeling*. ESRI Press.
- ❖ Touzi, R. (2014). Advances in polarimetric synthetic aperture radar (PolSAR) decomposition. In *Polarimetric Radar Imaging: From Basics to Applications* (pp. 169-216). CRC Press.
- ❖ Touzi, R. (2014). Advances in polarimetric synthetic aperture radar (PolSAR) decomposition. In *Polarimetric Radar Imaging: From Basics to Applications* (pp. 169-216). CRC Press.
- ❖ Turner, B. L. (1997). The Sustainability Principle in Global Agendas: Implications for Understanding Land-Use/Cover Change. *The Geographical Journal*, 163(2), 133–140. <https://doi.org/10.2307/3060176>
- ❖ Turner, B. L., Lambin, E. F., & Reenberg, A. (2007). The emergence of land change science for global environmental change and sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104(52), 20666-20671. <https://doi.org/10.1073/pnas.0704119104>
- ❖ Verburg, P. H., Neumann, K., & Nol, L. (2011). Challenges in using land use and land cover data for global change studies. *Global Change Biology*, 17(2), 974-989.
- ❖ Vila-García, D., Gil-Docampo, M., & Iniesto-Alba, M. J. (2015). Detección de cambios en los usos de suelo a partir de clasificaciones no supervisadas para la actualización del SIOSE. Implementación en el territorio gallego. *Revista de Teledetección*, 43, 63. <https://doi.org/10.4995/raet.2015.3409>
- ❖ Werner, C. L., & Wegmüller, U. (Eds.). (2009). *Radar interferometry: Persistent scatterer technique*. Springer.

- ❖ Werner, C. L., & Wegmüller, U. (Eds.). (2009). Radar interferometry: Persistent scatterer technique. Springer.
- ❖ Woodhouse, I. H., & McDonald, A. J. (2011). Radar polarimetry for geoscience applications. Artech House.
- ❖ Woodhouse, I. H., & McDonald, A. J. (2011). Radar polarimetry for geoscience applications. Artech House.
- ❖ Yuan, F., Sawaya, K. E., Loeffelholz, B. C., & Bauer, M. E. (2005). Land cover classification and change analysis of the Twin Cities (Minnesota) metropolitan area by multitemporal Landsat remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 98(2-3), 317-328.
- ❖ Zebker, H. A., & Villasenor, J. (1992). Decorrelation in interferometric radar echoes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30(5), 950-959.
- ❖ Zebker, H. A., & Villasenor, J. (1992). Decorrelation in interferometric radar echoes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30(5), 950-959.
- ❖ Zeiler, M. (2016). *Modeling our world: The ESRI guide to geodatabase design*. ESRI Press.
- ❖ Zhang, M., & Friedl, M. A. (2002). Modelling spectral and spatial patterns of tropical deforestation. *International Journal of Remote Sensing*, 23(14), 2785-2802.
- ❖ Zhu, X. (2017) Deep Learning in Remote Sensing: A Comprehensive Review and List of Resources. *IEEE Journals & Magazine | IEEE Xplore*. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8113128>
- ❖ Zhu, Z., Qiu, S., & Ye, S. (2022). Remote sensing of land change: A multifaceted perspective. *Remote Sensing of Environment*, 282, 113266. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113266>