

**UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID**

**FACULTAD DE GEOGRAFÍA E HISTORIA**



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

**TRABAJO FIN DE MÁSTER**

CURSO 2020-21

**CONECTIVIDAD DE SEDIMENTOS DE LA CUENCA DEL RÍO  
LEITZARAN**

**SEDIMENT CONNECTIVITY FOR LEITZARAN RIVER BASIN**

**JOSU ORTIZ MARTINEZ DE LAHIDALGA**

CONVOCATORIA: SEPTIEMBRE

TUTORES:

ASKOA IBISATE GONZÁLEZ DE MATAUCO

Departamento de Geografía, Prehistoria y Arqueología, Facultad de Letras  
Universidad del País Vasco (EHU/UPV)

LUIS MIGUEL TANARRO GARCÍA

Departamento de Geografía, Facultad de Geografía e Historia  
Universidad Complutense de Madrid (UCM)

## **RESUMEN**

El río Leizaran es el principal afluente del río Oria, que desemboca en el mar Cantábrico. Dentro de los ríos de Gipuzkoa se trata de un valle singular y que ha logrado mantener un grado de naturalidad alto. Para poder hacer un planeamiento territorial óptimo, así como mejorar la calidad geomorfológica y ecológica del río, conocer la conectividad de sedimentos de los sistemas fluviales es un requisito indispensable. Por ello se ha sometido a estudio la cuenca del río Leizaran, donde se ha implementado el índice de conectividad de sedimentos desarrollado por Cavalli *et al.*, (2013), mediante diferentes técnicas SIG. Por una parte, se ha relacionado la conectividad de sedimentos con la propia rugosidad de la topografía; por otra parte, con los cambios de usos de suelo entre los años 1956 y 2018, que han producido cambios significativos en la conectividad de la cuenca. Además, se han identificado las fuentes de sedimentos de la cuenca, ya que el conocimiento de áreas específicas que aportan sedimentos a la red de drenaje es necesario para el estudio del transporte de sedimentos. Los resultados sugieren que la conectividad general de la cuenca ha mejorado a lo largo de los años y apuntan a que las fuertes pendientes de la cuenca condicionan completamente el índice de conectividad, dejando los usos de suelo en un segundo plano.

Palabras clave: Río Leizaran, Geomorfología, Sedimentología, Usos de suelo, Índice de Conectividad de Sedimentos

## **ABSTRACT**

The Leizaran River is the main tributary of the Oria River, which empties into the Cantabrian Sea. Within the rivers of Gipuzkoa it is a unique valley that has managed to maintain a high degree of naturalness. To be able to do an optimal territorial planning, as well as to improve the geomorphological and ecological quality of the river, knowing the sediment connectivity of the river systems is an indispensable requirement. For this reason, the Leizaran river basin has been studied, where the sediment connectivity index developed by Cavalli *et al.* (2013), through different GIS techniques, has been implemented. On the one hand, sediment connectivity has been related to the roughness of the topography itself; on the other hand, with the changes in land use between 1956 and 2018, which have produced significant changes in the connectivity of the basin. In addition, the sources of sediments in the basin have been identified, since the knowledge of specific areas that contribute sediments to the drainage network is necessary for the study of sediment transport. The results suggest that the general connectivity of the basin has improved over the years and suggest that the steep slopes of the basin completely condition the connectivity index, leaving land uses in the background.

Key Words: Leizaran River, Geomorphology, Sedimentology, Land use, Sediment Connectivity Index

## Contenido

<b>1. Introducción</b> .....	4
<b>2. Área de estudio</b> .....	6
<b>3. Metodología</b> .....	16
3.1. Índice de Conectividad .....	16
3.2. Preparación de los datos.....	18
<b>4. Resultados</b> .....	21
4.1. Índice de Conectividad utilizando la rugosidad del MDT.....	22
4.2. Evolución de los usos del suelo .....	24
4.3. Índice de Conectividad utilizando la rugosidad de los usos de suelo .....	26
4.3.1. Índice de Conectividad de los usos del suelo a 5 metros .....	27
4.3.2. Índice de Conectividad de los usos del suelo a 2 metros y comparación con el IC a 5 metros.....	31
4.4. Conectividad con las fuentes de sedimentos .....	36
<b>5. Discusión y conclusiones</b> .....	39
<b>6. Bibliografía</b> .....	42

## 1. Introducción

El concepto de conectividad, refiriéndose a sistemas fluviales, empezó a desarrollarse en la década de los noventa (Wohl, 2017) cuando, Amoros y Roux (1998) definieron la conectividad hidrológica como el intercambio de materia, energía y biota entre diferentes elementos del paisaje fluvial a través del flujo de agua. Además, para entender la idea de conectividad hay que asumir que a nivel de cuenca hidrográfica los flujos de materia y de energía siempre ocurren en diferentes escalas temporales y espaciales (Wohl, 2017).

Más adelante los geomorfólogos adoptaron el término y comenzaron a aplicarlo para describir los flujos de agua y sedimentos, así Brierley *et al.* (2006) desarrollaron un marco conceptual para la conectividad de los sedimentos, considerando diferentes tipos de vínculos del paisaje en varias escalas espaciales en una cuenca, es decir, los accidentes geográficos individuales están relacionados con la conectividad entre los compartimentos o partes del paisaje, enfatizando cómo esas partes se encajan entre sí, además de estudiar como los cambios o perturbaciones se transmiten a través de la cuenca; o Hooke (2003) que se centró en la propia red de drenaje, proponiendo varios de tipos y grados de conectividad.

En este punto, la conectividad se refiere al grado en que la materia (agua, solutos, sedimentos y materia orgánica) y los organismos pueden moverse entre parches -en este contexto son áreas definidas arbitrariamente que varían según las escalas de tiempo y espacio consideradas- en un paisaje o ecosistema.

Así, la conectividad de sedimentos se define como el grado de vinculación que controla los flujos de sedimentos a lo largo de los paisajes y, en particular, entre las fuentes de sedimentos y las áreas río abajo, siendo un elemento clave en el estudio del transporte de sedimentos de ríos de montaña. Esta caracterización permite definir una parte de la cuenca como fuente de sedimentos, así como establecer las rutas de transferencia de los sedimentos (Cavalli *et al.*, 2013).

La conectividad de sedimentos se ve influenciada por la conexión (*coupling*) y desconexión (*decoupling*) de ladera-cauce, así como a través de la transferencia de sedimentos a lo largo de los cauces (Fryirs *et al.*, 2007). Asimismo, Croke *et al.* (2005) identifica dos tipos de conectividad: conectividad directa a través de cauces o cárcavas, y conectividad difusa cuando el sedimento llega a la red fluvial a través de la escorrentía superficial de las laderas. Estos mecanismos dependen de las características estructurales de la superficie (topografía y rugosidad), de los procesos impulsados por la propia dinámica fluvial (sedimentación y erosión) y de la capacidad de adaptación y tipo de respuesta ante cualquier factor de cambio (Hooke, 2003; Borselli *et al.*, 2008). Por lo tanto, la conectividad de sedimentos no es constante, y varía en el tiempo y en el espacio debido a factores externos (precipitación), la propia estructura del paisaje y la magnitud de los flujos de agua y sedimentos (Llena *et al.*, 2019).

Los aspectos espaciales se refieren a la fisiografía de la cuenca. Hooke (2003) ha demostrado que la producción, el transporte y la entrega de sedimentos a los cauces de los ríos aguas abajo no solo dependen de la fisiografía general de la cuenca, sino también de la organización espacial y la conectividad interna de varias unidades fisiográficas. Por ejemplo, el impacto

que tiene un determinado tipo de barrera u obstáculo en el flujo de agua y sedimentos (el propio sustrato rocoso, un abanico aluvial o pantanos) depende de su tamaño y posición en la cuenca (Brierley *et al.*, 2006; Fryirs *et al.*, 2007). Además, con el aumento del tamaño de la cuenca, las llanuras aluviales sustituyen a las pendientes como fuente directa de sedimento al cauce, que afecta directamente en la conectividad de la cuenca (De Vente y Poesen, 2005)

Los aspectos temporales están relacionados con las características de magnitud y frecuencia (Wolman y Miller, 1960) de los procesos de transferencia de sedimentos y la evolución temporal del uso y manejo del suelo. Solo unos pocos eventos pueden generar vías de flujo que conectan gran parte de las pendientes con los arroyos de orden superior o los sumideros locales (Croke *et al.*, 2005). Las magnitudes de los eventos y una mezcla de umbrales controlados física y biológicamente deben superarse para conectar las áreas generadoras de escorrentía con las áreas de cauces inferiores (Puigdefabregas *et al.*, 1999; Cammeraat, 2002; Croke *et al.*, 2005).

La vegetación juega un papel importante ya que influye en la rugosidad de la superficie y la capacidad local para almacenar sedimentos y agua y limitar la erosión (Puigdefabregas *et al.*, 1999); aumentando también la infiltración (Bochet *et al.*, 1999; Cammeraat, 2004). Por lo tanto, la vegetación contribuye a desconectar las áreas de los ríos aguas arriba y aguas abajo.

La capacidad de la vegetación para influir en la conectividad del flujo también muestra una fuerte dinámica temporal y espacial, que varía según la estación, los extremos climáticos (por ejemplo, sequías), los cambios climáticos, el uso del suelo y las prácticas de gestión, así como otras formas de presión antrópica y natural (Borselli *et al.*, 2008); especialmente en cuanto a la estructura del paisaje (explotación forestal, usos agrícolas), siendo particularmente relevante en los ambientes montañosos porque se caracterizan por una morfología compleja y accidentada y son muy sensibles a las perturbaciones provocadas por las actividades humanas (Cavalli *et al.*, 2013).

El conocimiento de la distribución espacial y la evolución temporal de la conectividad en el paisaje es importante ya que puede usarse como una herramienta para estimar la probabilidad de que una parte determinada del paisaje transfiera su contribución a otra parte de la cuenca (Borselli *et al.*, 2008).

El área de estudio de este trabajo (cuenca del río Leitzarar) se ve especialmente afectada por estos cambios antrópicos del paisaje. La presencia de amplias zonas de plantaciones de *Pinus radiata*, *Pinus nigra*, *Pinus sylvestris*, *Eucalyptus* y *Picea sp.* y su explotación forestal ha afectado a esta estructura, con las consecuentes talas (matarrasa) y repoblaciones, cambiando la rugosidad del terreno y afectando directamente a la conectividad de la red de drenaje.

Aunque la conectividad no se puede medir explícitamente (Turnbull *et al.*, 2018), un enfoque más integral para evaluar la conectividad debería involucrar la medición de la conectividad estructural, es decir, el potencial de un paisaje para ser conectado a través de vías de flujo; la medición de los flujos de sedimentos y los cambios asociados en la estructura del paisaje durante una escala de tiempo determinada, y el rastreo físico de los sedimentos que permite

conectar las fuentes a los sumideros y, por lo tanto, permite estudiar mejor la conectividad funcional (el transporte de agua y de sedimentos) (Brazier *et al.*, 2015).

Así, los estudios sedimentológicos en ríos son de gran importancia; por una parte, los estudios de conectividad de sedimentos son útiles para identificar los factores y procesos que afectan a la retención y almacenamiento de los propios sedimentos, que, por otra parte, permiten identificar los factores que facilitan o limitan la conectividad, siendo fundamental para una gestión óptima de los ríos (Wohl, 2017).

Por lo tanto, el objetivo principal de este trabajo es analizar los efectos de los cambios de uso del suelo en la conectividad de los sedimentos utilizando el índice de conectividad (IC a partir de ahora) desarrollado por Cavalli *et al.* (2013), basado en el estudio de Borselli *et al.*, (2008) aplicado a la cuenca del río Leitzaran en Gipuzkoa. Para ello, se ha tenido en cuenta la rugosidad del paisaje, según los usos de suelo, y por otra, la rugosidad de la propia topografía. Para esta evolución, se han utilizado tres fechas: 1956, 1990 y 2018. Paralelamente, también se analizarán los cambios que ha habido en los usos de suelo.

El IC evalúa, a escala de píxel, la conectividad potencial entre las laderas y elementos que actúan como áreas de almacenamiento (Llena *et al.*, 2019). Además, está relacionado con la resolución del píxel. Al evaluar esta conectividad, se consideran dos aspectos. Por una parte, la aportación de sedimentos a través de la red de drenaje; y, por otro lado, la conexión y la desconexión de sedimentos entre las laderas y los cauces principales.

Asimismo, se identificarán las áreas de fuente de sedimentos de la cuenca, para los años previamente seleccionados, ya que el conocimiento de áreas específicas que aportan sedimentos a la red de drenaje es un requisito necesario para el estudio del transporte de sedimentos, y así poder desarrollar con éxito su gestión (Roehl, 1962; Dietrich y Dunne, 1978; Khanbilvardi y Rogowski, 1984). Además, con el propio IC se podrá analizar cómo de conectadas están esas áreas.

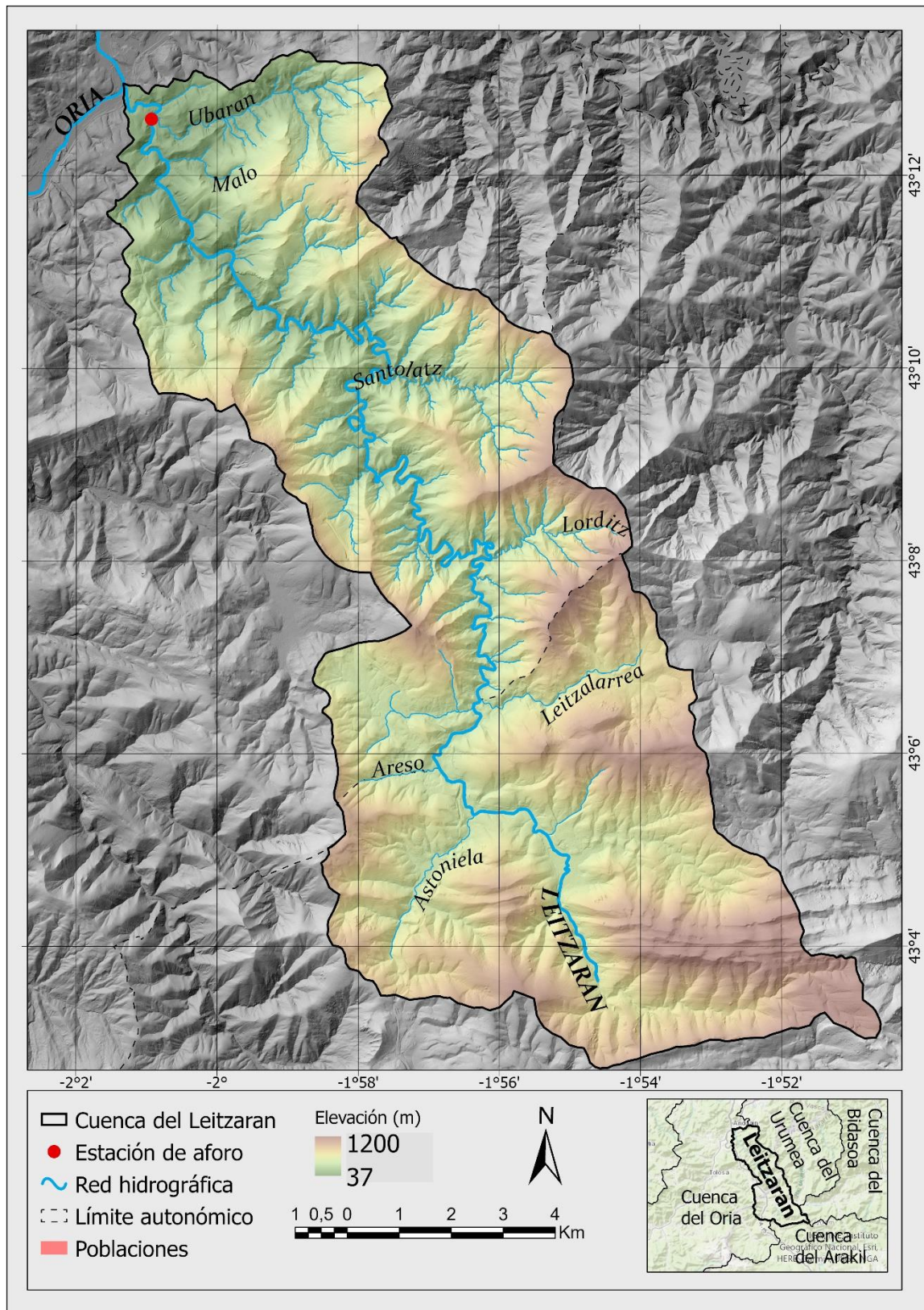
Así, la evaluación de estos dos aspectos surge de la necesidad de abordar dos cuestiones: ¿Cuál es la probabilidad de que el sedimento de una determinada fuente de sedimento llegue a la salida de la cuenca? ¿Cuál es la probabilidad de que los sedimentos erosionados de las laderas lleguen a la red de drenaje? (Cavalli *et al.*, 2013).

## **2. Área de estudio**

La cuenca del río Leitzaran (*Figura 1*) se sitúa al norte de la Península Ibérica, dentro de la cuenca del río Oria, que vierte sus aguas en el mar Cantábrico. Se trata de un río meandriforme, que discurre encajado por un escarpado y estrecho valle, con fuertes pendientes y de uso predominantemente forestal. La cuenca limita al este con la cuenca del río Urumea, y al oeste con la sub-cuenca del río Elduain. Sus principales afluentes son el río Astoniela y Areso, por la margen izquierda, y por la margen derecha los ríos Lorditz, Leizalarrea, Santolaz y Ubaran. Tiene una longitud de 42 km y la cuenca una extensión de casi 123 km<sup>2</sup>. Nace en el término municipal de Leitza, y a aproximadamente la mitad de su recorrido se adentra en Gipuzkoa hasta desembocar en el río Oria a la altura de Andoain.

Asimismo, está declarado Biotopo Protegido desde 1994 y está integrado en la Red Natura 2000, al ser designado como Lugar de Interés Comunitario (LIC) en 2002.

La densidad de población de la propia cuenca es muy baja, teniendo solo tres núcleos de población dentro de la misma, Leitza, Areso y Gorriztarran, y diversos caseríos diseminados por la cuenca, superando levemente los 3.000 habitantes en su totalidad (INE, 2021).



**Figura 1.** Cuenca el río Leizaran

Desde el punto de vista geológico (**Figura 2**) se trata de una región bastante compleja, por la variedad de litologías que afloran y la tectonicidad de la misma. La cuenca se sitúa en el extremo oriental del conocido como “Macizo de Cinco Villas”, de materiales Paleozoicos,

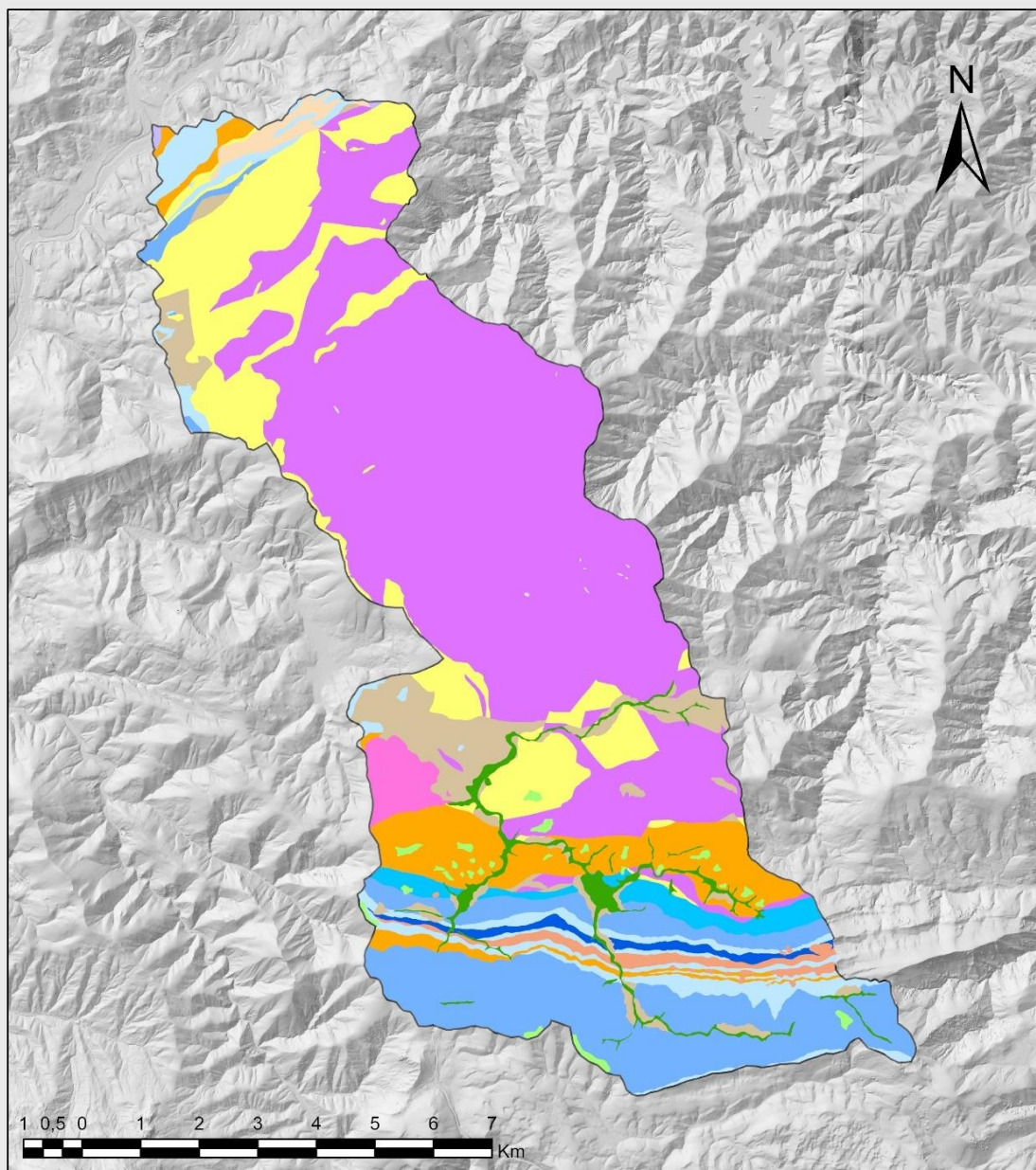
que, a su vez, supone el último afloramiento de rocas hercínicas y cristalinas propias del Pirineo Axial. Además, se encuentra rodeada por materiales Mesozoicos (Castro, 1989).

Los materiales predominantes de la zona están comprendidos entre el Carbonífero y el Cretácico superior, con un ligero metamorfismo. El Carbonífero se ve representado en el propio Macizo de Cinco Villas por pizarras grises y negras principalmente, que es la mayor ocupación litológica de la cuenca con más del 50% de ocupación, así como areniscas. Bordeando este segmento de pizarras, se encuentran areniscas del Triásico (Castro, 1989; Faci, 2002).

Al sur de la cuenca predominan los materiales calcáreos, como margas y calizas, formado unas bandas en dirección E-O, siguiendo las fracturas y frentes de cabalgamiento.

En cuanto a materiales del Cuaternario, tienen poca representación en la cuenca. Se pueden apreciar pequeños glaciares del propio río Leizaran y de sus afluentes en su extremo sur, siendo el enlace entre los fondos de valle y las laderas. Además, se pueden apreciar materiales aluviales en los fondos de los valles fluviales (Faci, 2002).

La complejidad estructural de la zona se explica por la superposición de dos etapas orogénicas y el diferente comportamiento mecánico ante la orogenia alpina de un zócalo paleozoico y una cobertura mesozoica. Asimismo, la falla de Leiza es el accidente tectónico más importante. Además, todas las estructuras presentan una vergencia hacia el norte, debido al empuje desde el sur de la cobertura mesozoica contra el macizo más rígido de Cinco Villas (Castro, 1989).



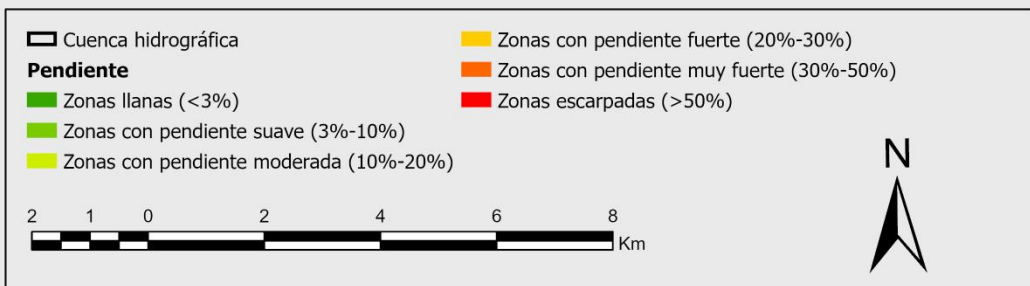
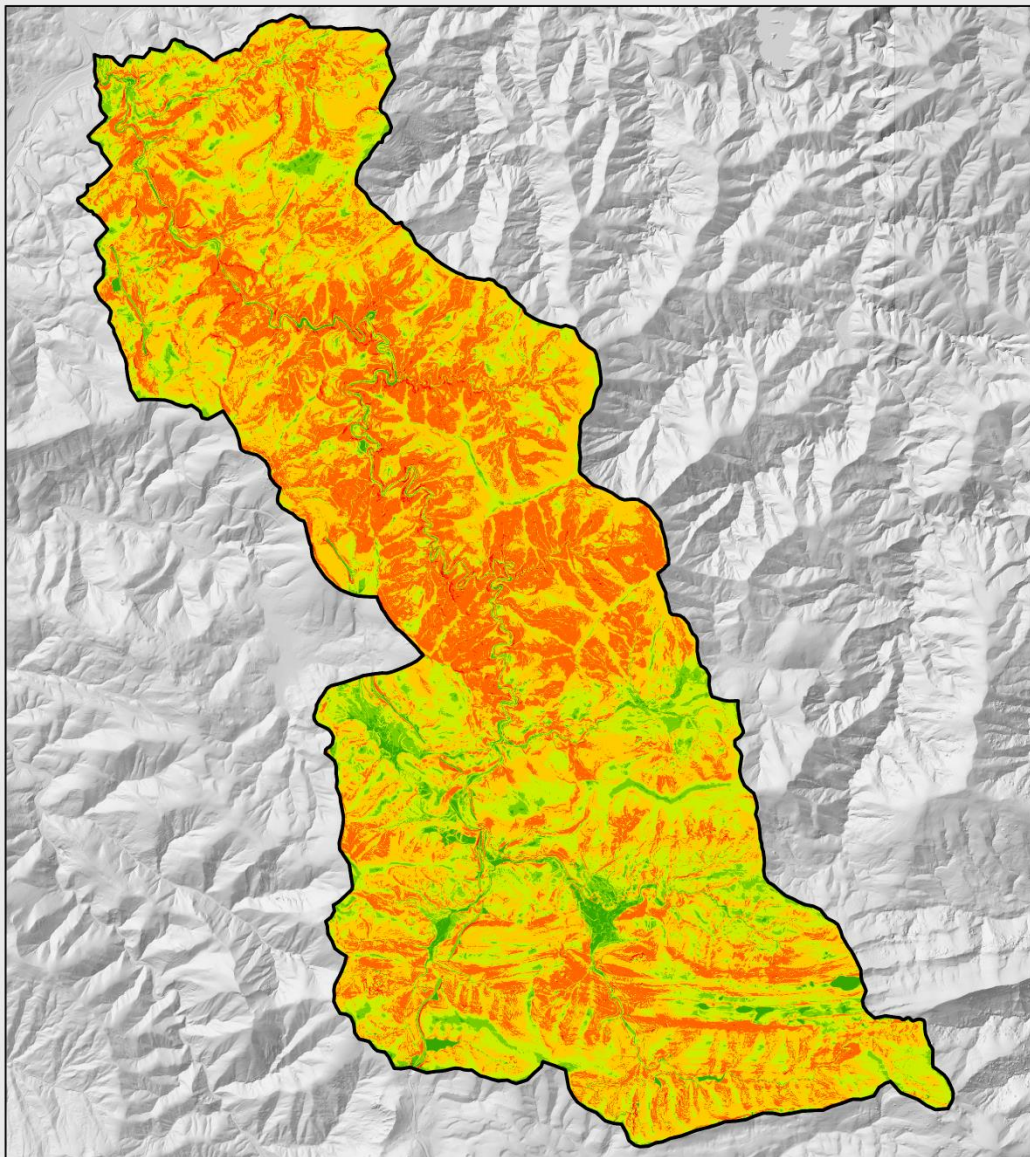
<b>Litología</b>		
<span style="color: #E67E22;">■</span> Arcillas y margas	<span style="color: #00AEEF;">■</span> Calizas, dolomias y brechas	<span style="color: #E91E63;">■</span> Lutitas
<span style="color: #A08060;">■</span> Arcillas, arenas, gravas y bloques	<span style="color: #0070C0;">■</span> Calizas, margas y areniscas	<span style="color: #FFC107;">■</span> Margas
<span style="color: #FFEB3B;">■</span> Areniscas	<span style="color: #9FA8DA;">■</span> Depósitos superficiales	<span style="color: #E91E63;">■</span> Pizarras
<span style="color: #ADD8E6;">■</span> Calizas	<span style="color: #FFCC99;">■</span> Detríticos alternantes	
<span style="color: #4682B4;">■</span> Calizas y margas	<span style="color: #90EE90;">■</span> Glacis	
	<span style="color: #228B22;">■</span> Gravas, arenas y limos	

**Figura 2.** Mapa litológico de la cuenca del Leizaran. (Fuente: GeoEuskadi e IDENA)

En general, la cuenca del río Leitzaran está caracterizada por un relieve pronunciado con fuertes pendientes y valles encajados. Las cotas oscilan entre los 110 m y los 1073 m del monte Kornieta. Este relieve pronunciado está ligado a la disposición geológica de los materiales.

En el mapa de pendientes de la cuenca (*Figura 3*), se observa que las zonas llanas o con pendiente suave son escasas, y se reservan a los fondos del valle por donde circula la red de drenaje, los núcleos de población o los rasos de las cimas, sobre todo en la parte sur de la cuenca. Además, cabe destacar que al contrario que las cuencas típicas donde en su cabecera presentan profundos valles y a medida que descienden empiezan a ensancharse, en la cuenca del Leitzaran ocurre lo contrario: es en su parte alta donde el valle se ensancha (formando la llanura aluvial de Leitza), y posteriormente se va encajando en un profundo valle hasta su llegada a Andoain (Castro, 1989).

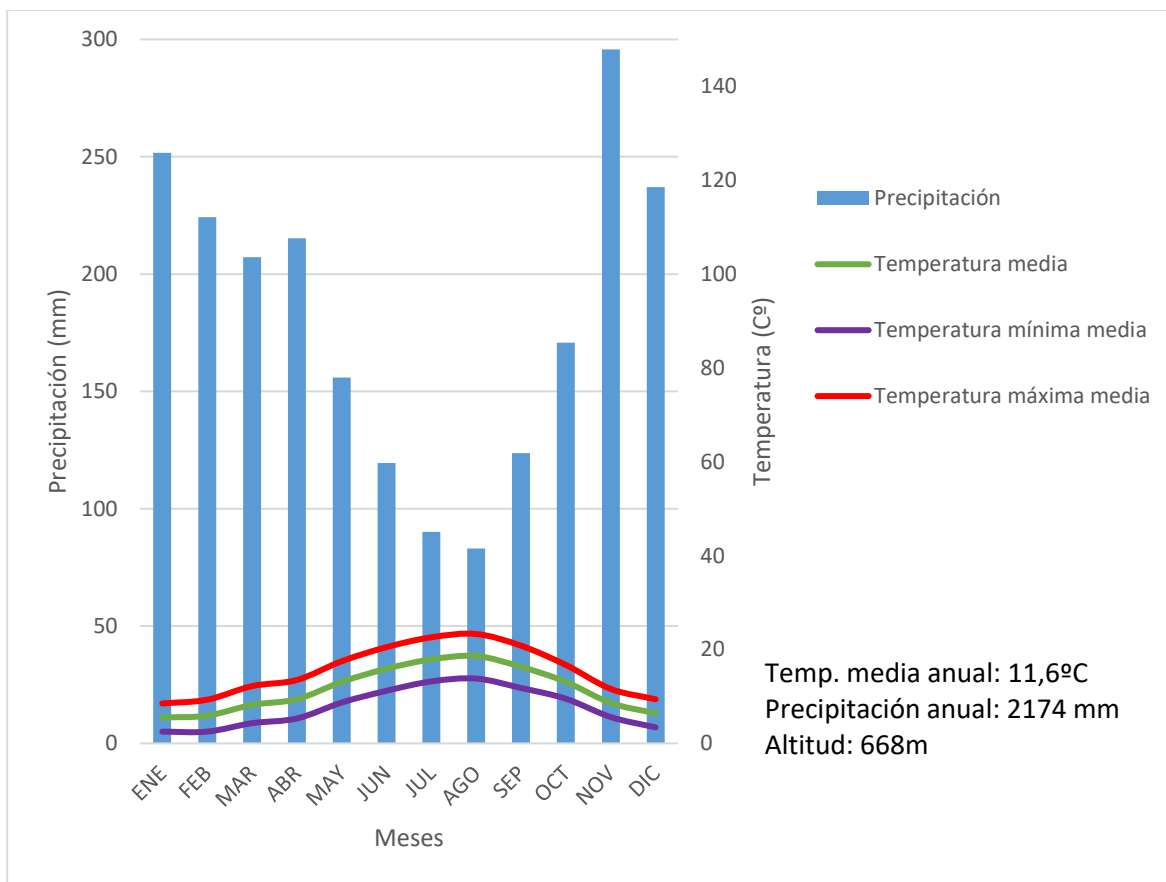
Asimismo, en el mapa es visible el propio río al encajarse en el profundo valle, a mitad de su recorrido. La mayor parte del terreno está ocupado por pendientes de entre 20% y 50% de desnivel, habiendo unas pequeñas zonas escarpadas dispersas en la cuenca.



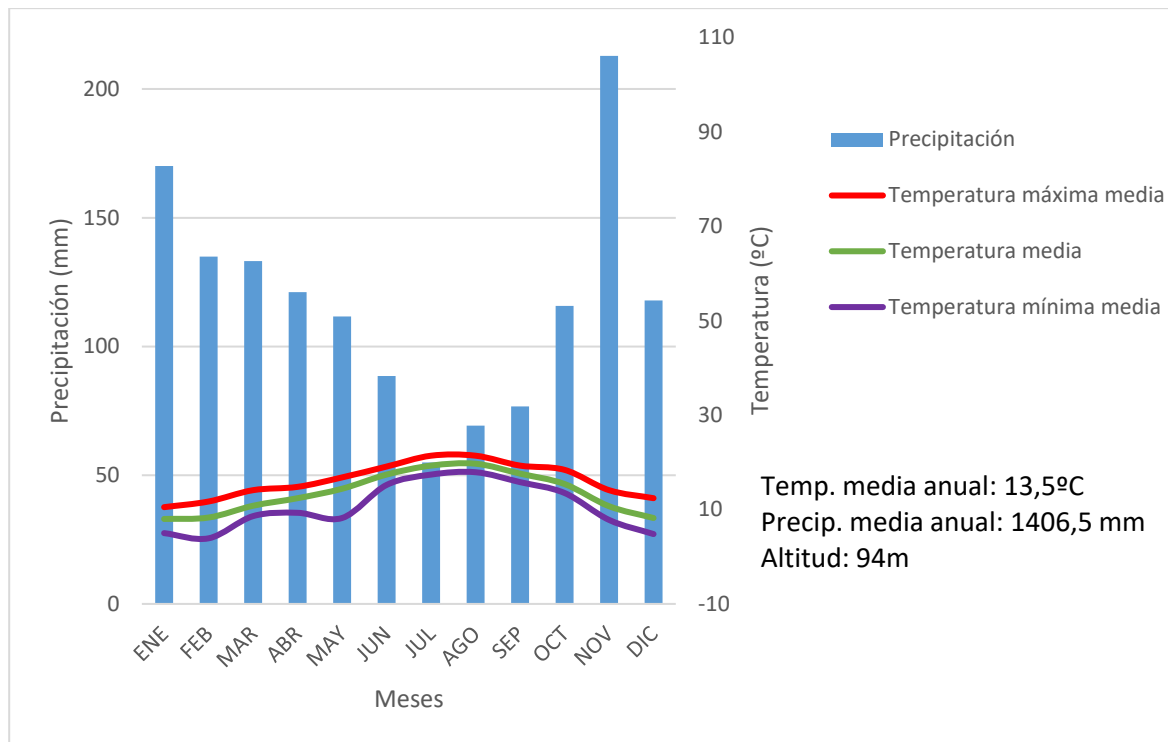
*Figura 3.* Mapa de pendientes de la cuenca del Leitzaran

En relación al clima, cabe destacar que se trata de una de las zonas más húmedas de la Península Ibérica, recogiendo valores de precipitación anuales superiores a los 2000 milímetros. Las borrascas atlánticas entran desde el mar a los valles cantábricos y la primera barrera orográfica que se encuentran es el macizo de Cinco Villas, donde descargan gran parte de la precipitación (Pejanaute, 2002).

Dentro de la cuenca nos encontramos con tres estaciones meteorológicas: dos muy próximas entre sí, en la cabecera de la cuenca (Areso y Leitza), y otra muy próxima a la desembocadura, en la propia estación de aforo del río (**Figura 1**):



**Figura 4.** Climograma de la estación meteorológica de Leitza (1986-2020). (Fuente: MeteoNavarra)

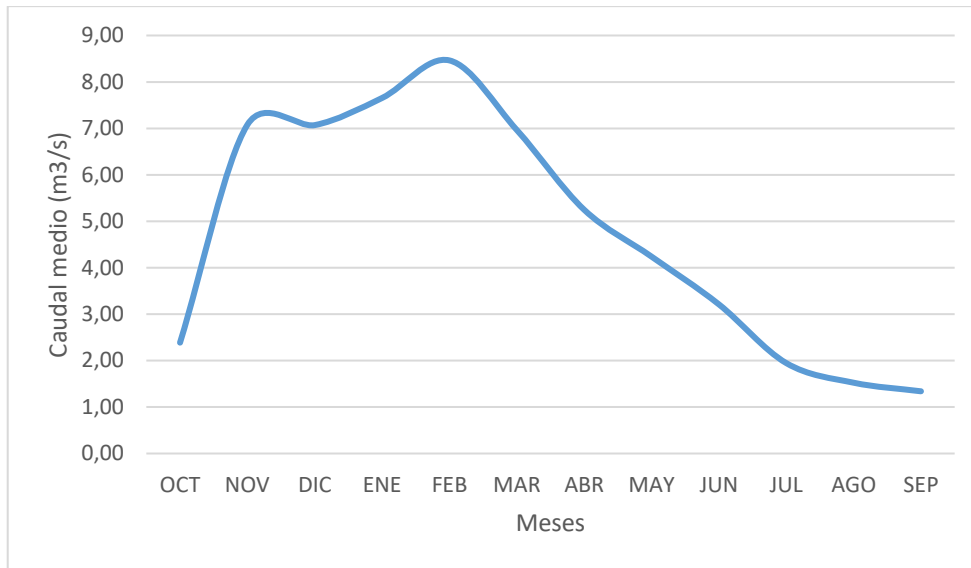


**Figura 5.** Climograma de la estación meteorológica de la estación de aforo del río Leitzarán (1995-2020). (Fuente: Obras Hidráulicas de Gipuzkoa)

Según la clasificación climática de Köppen el clima es de tipo Cfb, u oceánico templado. El máximo de precipitación se da en los meses de invierno, mientras que el mínimo se da en el verano, aunque en ningún caso se tratan de meses secos. En cuanto a las temperaturas medias la mínima se registra en enero, mientras que el pico llega en agosto. Aun así, la amplitud térmica es de poco más de 10°C, debido a su cercanía al mar.

Si se comparan las dos estaciones la principal diferencia que encontramos es una disminución considerable de las precipitaciones, principalmente debido a que se aleja de las cotas altas y de la barrera orográfica que suponen. A su vez, nos encontramos con temperaturas más suaves debido al gradiente térmico, causado por la diferencia altitudinal.

Estas precipitaciones producen un régimen hidrológico (**Figura 6**) puramente oceánico, con un máximo de 8,46 m<sup>3</sup>/s en febrero y otro mínimo de 1,39 m<sup>3</sup>/s en septiembre.



**Figura 6.** Régimen hidrológico del río Leizaran. (Fuente: Obras hidráulicas de Gipuzkoa)

Así, la cuenca presenta una densa red de drenaje donde abundan los arroyos y barrancos que discurren ladera abajo hasta el fondo del valle (**Figura 1**), con un trazado sinuoso, consecuencia de la acción erosiva de los mismos. La mayoría de ellos aparecen fuertemente encajados (Castro, 1989).

Finalmente, los usos de suelo de la cuenca (se verá mejor en el propio análisis) son predominante forestales. Por un lado, están las plantaciones anteriormente mencionadas, y por otra parte el bosque atlántico, donde predomina el hayedo acidófilo y el robledal atlántico. A su vez, en las riberas de la red de drenaje de la cuenca se encuentra un bosque de alisos (*Alnus glutinosa*). Los espacios agrícolas se reservan a las zonas habitadas, es decir, al valle aluvial de Leitza y algunas zonas de Andoain. Aun así, puntualmente, los caseríos repartidos por la cuenca cuentan con tierras de cultivo.

### 3. Metodología

#### 3.1. Índice de Conectividad

El estudio sobre el índice de conectividad de sedimentos propuesto por Borselli *et al.* (2008) dice lo siguiente:

$$IC = \log_{10} \left( \frac{D_{Up}}{D_{dn}} \right)$$

Donde  $D_{up}$  y  $D_{dn}$  son los componentes de pendiente ascendente y descendente de conectividad, respectivamente. El IC se desarrolló en un rango de  $[-\infty, +\infty]$ , representando los valores más altos del IC mayor conectividad.

El componente de pendiente ascendente  $D_{up}$  es el potencial de movimiento ladera abajo del sedimento producido ladera arriba, y se estima de la siguiente manera:

$$D_{up} = \bar{w}\bar{s}\sqrt{A}$$

Donde  $\bar{w}$  es el factor de ponderación promedio del área de contribución de la pendiente ascendente,  $\bar{s}$  es el gradiente de pendiente promedio del área de contribución de la pendiente ascendente (m/m) y  $A$  es el área de contribución pendiente arriba.

El componente de pendiente descendente  $D_{dn}$  tiene en cuenta la longitud de la trayectoria del flujo que tiene que viajar una partícula para llegar al objetivo o sumidero más cercano, expresándose así:

$$D_{dn} = \sum_i \frac{d_i}{w_i S_i}$$

donde  $d_i$  es la longitud de la trayectoria del flujo a lo largo de la celda de acuerdo con la dirección de pendiente descendente más empinada (m),  $w_i$  y  $S_i$  son el factor de ponderación y el gradiente de pendiente de la celda, respectivamente.

Para el desarrollo del IC, el principal elemento que se necesita es un Modelo Digital del Terreno (MDT), del cual deriva un factor ponderado de rugosidad ( $W$ ), que también puede calcularse a partir de los usos de suelo, usando la  $n$  de Manning, es decir, el parámetro o coeficiente de rugosidad o resistencia al flujo de agua.

En este trabajo se ha optado por calcularlo de las dos maneras mencionadas: usando la rugosidad de la propia topografía y usando la rugosidad calculada a partir de los usos de suelo ( $W$ ). En el caso de los usos de suelo, se ha decidido calcularlo para tres años, para poder hacer una comparativa de su evolución: 1956 (por ser la ortofoto más antigua), 1990 y 2018 (ya que actualmente existe el mapa de usos de suelo para esos años, del *Corine Land Cover*).

Los MDT empleados han sido dos, uno de 2 metros de resolución y otro de 5 metros, siendo el primero de 2017 y el segundo de 2012. No se han usado modelos más antiguos ya que la cuenca no ha tenido cambios estructurales importantes, tratándose de una cuenca bastante estable.

A partir de ahí, se han obtenido los resultados del IC utilizando la rugosidad del terreno para esas dos resoluciones. Asimismo, utilizando la  $n$  de Manning en los tres años propuestos, se ha calculado el IC con dichas resoluciones.

En cuanto a los usos de suelo, se han seleccionado 5 diferentes, por una parte, reclasificando los mapas del *Corine Land Cover* y digitalizando el vuelo americano con esos mismos usos. Así, se han tenido en cuenta los valores  $n$  de Manning según Janssen (2016), tal y como se muestra en la **Tabla 1**.

**Tabla 1.** Rugosidad para los usos de suelo

Usos de suelo	$n$ de Manning
Suelo urbano	0,013
Suelo desnudo	0,027
Pastizal	0,035
Cultivos	0,05
Bosques	0,1

Fuente: Janssen (2016)

Estas categorías, han sido agrupadas a partir de otras. La categoría bosque recoge matorral, matorral boscoso y bosque, sin tener en cuenta si se trata de coníferas plantadas o bosque atlántico, ya que en términos generales el comportamiento de la rugosidad es similar.

La categoría de cultivos recoge todos los tipos de cultivos que hay en la zona, sin hacer distinción. Aun así, la categoría recoge cultivos con amplias zonas de vegetación natural.

Igualmente, los pastizales tienen en cuenta tanto las praderas naturales como los propios pastizales, al tener la misma composición, es decir, abundante vegetación herbácea y algún arbusto o vegetación arbórea asilada.

En cuanto al suelo desnudo (coincidiendo con las fuentes de sedimentos), se han seleccionado todos aquellos espacios que no son urbanos y que no están apenas cubiertos por vegetación, es decir, zonas de roquedo o donde aflora la roca madre o zonas donde se ha producido una tala de vegetación mediante matarrasa. Así, Janssen (2016) lo define como áreas con vegetación escasa.

Por último, los suelos urbanos con todos aquellos artificiales y producidos por el ser humano.

### 3.2. Preparación de los datos

Antes de poder implementar el IC, hay que modificar y adecuar los datos para poder ejecutar el modelo de manera óptima. Los dos *inputs* que se necesitan (MDT y rugosidad) tienen que estar en formato GeoTIFF y tener la misma resolución espacial y extensión. Para ello, mediante el *software* ArcMap 10.7 se han preparado los datos, y se ha ejecutado el propio modelo. Además, paralelamente, se ha usado ArcGis Pro para producir la cartografía. También, hay que mencionar que se han usado las tecnologías de la información geográfica para elaborar diferentes mapas que acompañan la descripción del área de estudio del trabajo.

**Tabla 2.** Material utilizado

<b>NOMBRE</b>	<b>FORMATO</b>	<b>RESOLUCIÓN/ESCALA</b>	<b>FUENTE</b>
Modelo Digital del Terreno a 2 metros	ASCII	2 m	GeoEuskadi e IDENA
Modelo Digital del Terreno a 5 metros	ASCII	5 m	IGN
Vuelo Americano Serie B, 1956-1957	ECW	0,5 m	IGN
Ortofoto 2018	WMS	0,25 m	IDENA
Ortofoto 2018	WMS	0,25 m	GeoEuskadi
Ortofoto 1991	WMS	0,25 m	GeoEuskadi
Ortofoto 1990	WMS	0,25 m	IDENA
CLC1990	SHP	1:100.000	IGN
CLC2018	SHP	1:100.000	IGN
Cuenca del Leitzarain	SHP		Propia

El flujo de trabajo para obtener los IC se refleja en la **Figura 7**. Para empezar, mediante la herramienta “*Extract by mask*” se han recortado los dos MDT a la extensión de la cuenca, manteniendo la resolución original de cada uno. Después, para evitar futuros errores, se ha utilizado la herramienta “*Fill*”, la cual rellena sumideros para quitar pequeñas imperfecciones en los datos. Estas dos capas de salida ya estarían listas para implementarla en el IC.

Para el cálculo del factor ponderado, como se ha dicho, se ha usado la rugosidad del MDT y la rugosidad de los usos de suelo.

- a) Para la rugosidad del terreno usando el MDT se ha usado la herramienta “*Surface Roughness*,” que viene implementada en el modelo IC creado por Crema y Cavalli, (2018). Esas dos capas de salida hay que normalizarlas usando la calculadora ráster de la siguiente manera:  $W=1-(RI/RI\_Max)$ . Es decir, el factor ponderado es igual a la inversa de la división entre el propio índice de rugosidad y su valor máximo.

- b) En cuanto a los usos de suelo se han obtenido para los tres años ya señalados: 1956, 1990 y 2018. Para los años 1990 y 2018 se han usado las capas del *Corine Land Cover*. Con la herramienta *Clip* se han recortado las capas a la extensión de la cuenca, ya que el modelo necesita que los *inputs* tengan la misma extensión. Después, mirando la tabla de atributos y los correspondientes códigos del *Corine Land Cover* y sus usos de suelo, se le ha creado un nuevo campo con la *n* de Manning, tal y como se recoge en la **Tabla 1**. Además, a partir de las ortofotos de 1990 (zona navarra), 1991 (zona gipuzkoana) y 2018 se han digitalizado las zonas desnudas (y fuentes de sedimentos) y se han incluido en la capa, ya que el *Corine Land Cover* no muestra clasificadas esas categorías en el área de estudio. Una vez se han reclasificado las capas, mediante la herramienta “*Polygon to raster*” se han transformados las capas vectoriales a capas *raster* usando el campo previamente creado y creando dos capas: una con una resolución de 2 metros y otra con una resolución de 5 metros, obteniendo finalmente el factor ponderado (W).

Para el año 1956, se ha optado por digitalizar toda la cuenca usando la ortoimagen del vuelo americano, en las 5 categorías mencionadas (bosque, pastizal, suelo desnudo, suelo urbano y cultivos), para después seguir el mismo proceso que con las capas del *Corine Land Cover*.

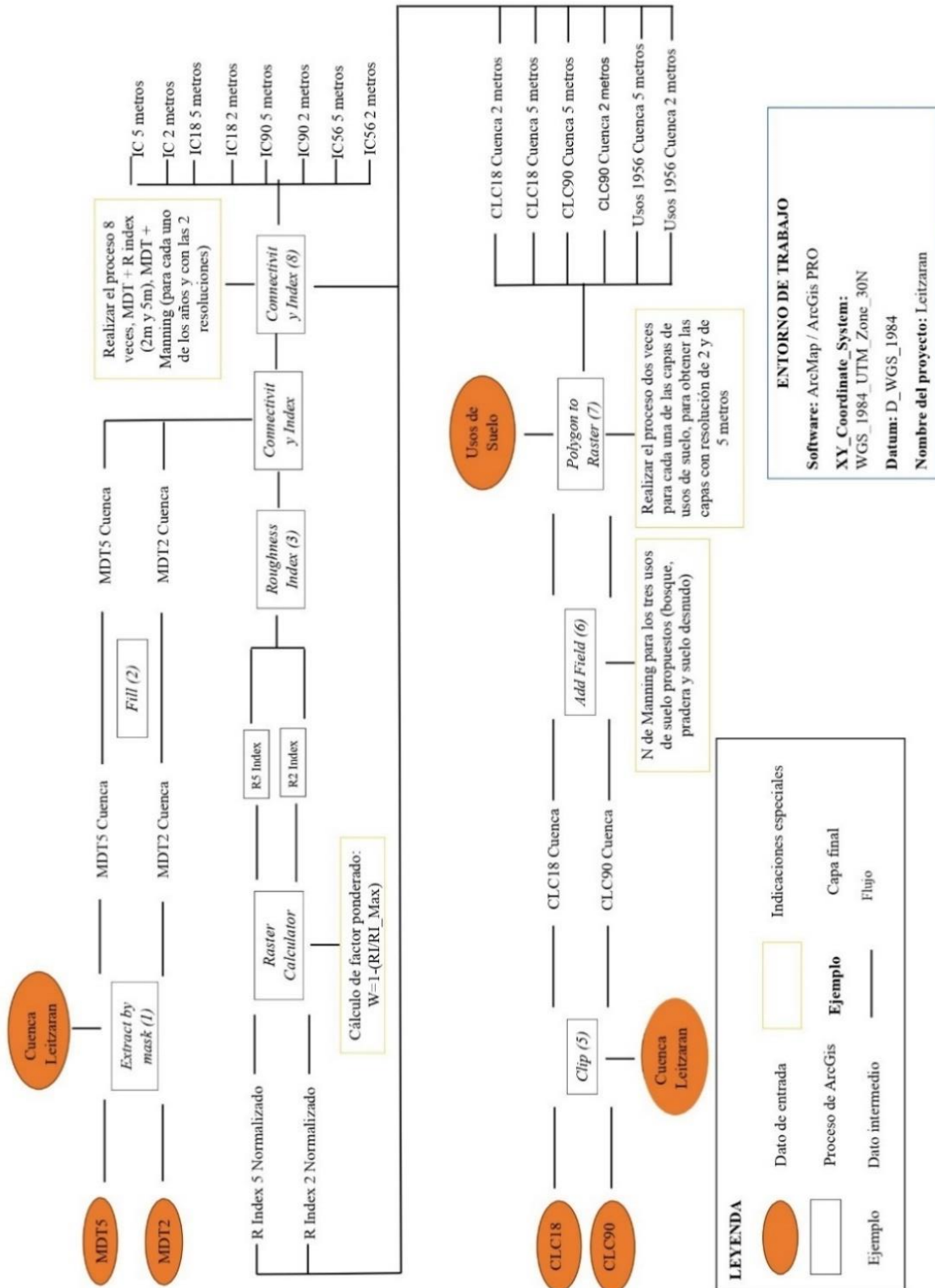


Figura 7. Flujo de trabajo para desarrollar el IC

Una vez calculados los IC para cada uno de los escenarios, los valores de conectividad se han reclasificado en cuatro clases (**Tabla 3**), tal y como propusieron Crema y Cavalli (2018) y Llena *et al.* (2019), para una mejor interpretación de los datos: Conectividad baja, media-baja, media-alta y alta. Para ello, el valor medio del IC se utilizó como límite entre las clases medio-bajo y medio-alto, mientras que el valor medio más dos veces el valor de la desviación estándar se usa como límite entre las clases medio-alto y alto. A su vez, el valor medio menos dos veces el valor de la desviación estándar es el umbral entre la clase baja y media-baja.

**Tabla 3.** Clasificación de los valores de conectividad

<b>Categoría</b>	<b>Límite</b>
Conectividad alta	$\bar{x} + 2\sigma_x$
Conectividad media-alta	
Conectividad media-alta	$\bar{x}$
Conectividad media-baja	
Conectividad media-baja	$\bar{x} - 2\sigma_x$
Conectividad baja	

Fuente: Crema y Cavalli (2018) y Llena *et al.* (2019)

#### 4. Resultados

Antes de analizar los resultados obtenidos hay que mencionar que la resolución o tamaño de píxel elegido para el estudio de conectividad tiene una repercusión directa en el resultado del mismo. Según un estudio de Cantreul *et al.* (2018) el uso de diferentes tamaños de píxeles en el cálculo del IC proporciona el mismo patrón global en los mapas de conectividad (ubicación de las principales rutas de flujo y comportamiento general de la cuenca), pero existen algunas diferencias significativas. Con resoluciones más pequeñas el resultado muestra más conectividad, debido a la simplificación de las rutas de flujo.

Con un tamaño de píxel de 5 m o superior, hay una gran pérdida de información en las rutas de flujo rectas y no hay visualización de características lineales, franjas de césped, límites de campo, por ejemplo. A una resolución de 1 m, es posible ver los caminos de flujo secundario, franjas de pasto muy desconectadas, así como áreas más desconectadas que las observaciones de campo mostraron como zonas de estancamiento de agua después de llover (Cantreul *et al.*, 2018).

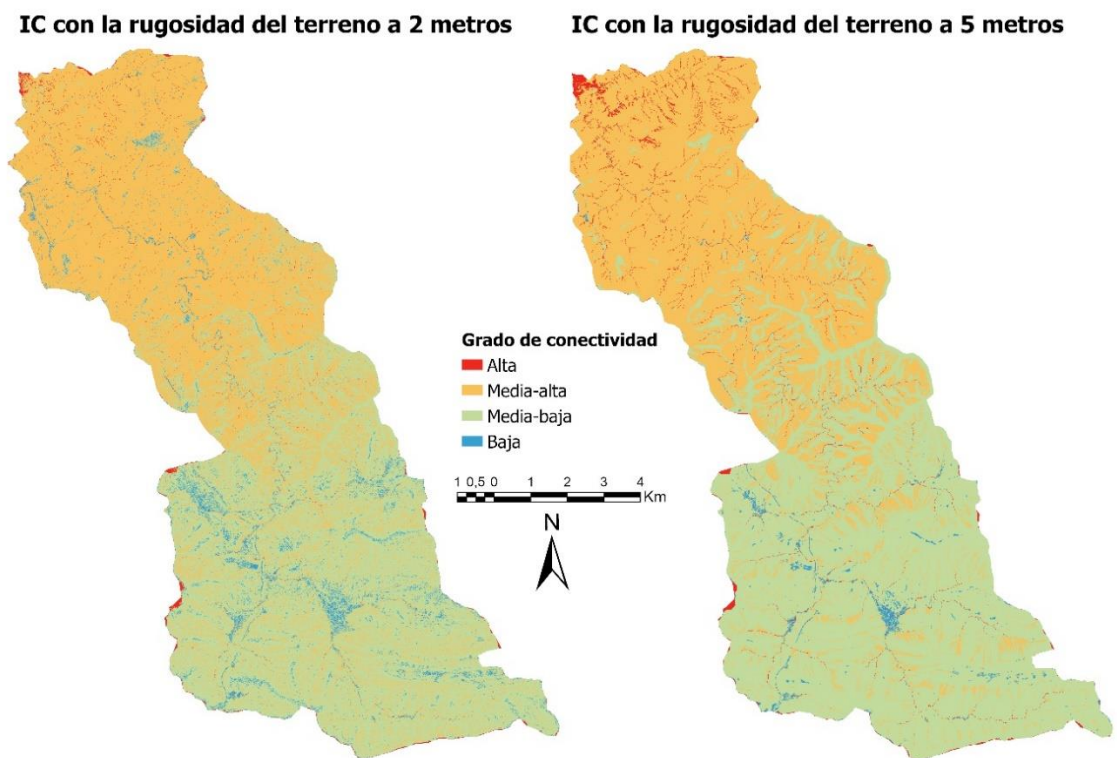
Además, cabe destacar que a lo largo de todos los resultados se van a encontrar fallos en el modelo en las esquinas y bordes del mismo, donde se aprecian unos valores que no se corresponden con la realidad. Es por ello que se ha recortado una pequeña zona del sureste de la cuenca, para evitar problemas en cuanto a la clasificación de datos se refiere.

#### 4.1. Índice de Conectividad utilizando la rugosidad del MDT

Como se observa en la **Figura 8**, ambos mapas dan unos resultados parecidos a grandes rasgos, con sus diferencias, como se comentaba en líneas anteriores. Principalmente, se observa una clara diferencia entre la parte norte de la cuenca, caracterizada por las fuertes pendientes y su parte sur o cabecera, donde el valle aluvial se amplía. Es obvio que aparezcan estos resultados, ya que cuanto más se acerque a la parte baja de la cuenca más conectado estará sedimentológicamente hablando.

Así, los valores más altos se dan al final del recorrido del Leitzarán, donde la conectividad de sedimentos es más fuerte. En su parte central-norte los valores también son bastante altos debido a las fuertes pendientes y a la propia red de drenaje. En este punto, se encuentran algunas diferencias entre las dos resoluciones:

En el caso del IC de 5 metros se observa que todos los tributarios del río Leitzarán tienen una conectividad alta, cuando en el de 2 metros se aprecia que no todos ellos tienen una conectividad alta. Además, en el de 2 metros las orillas del propio río aparecen poco conectadas, mientras que en el de 5 metros siguen teniendo una conectividad alta.

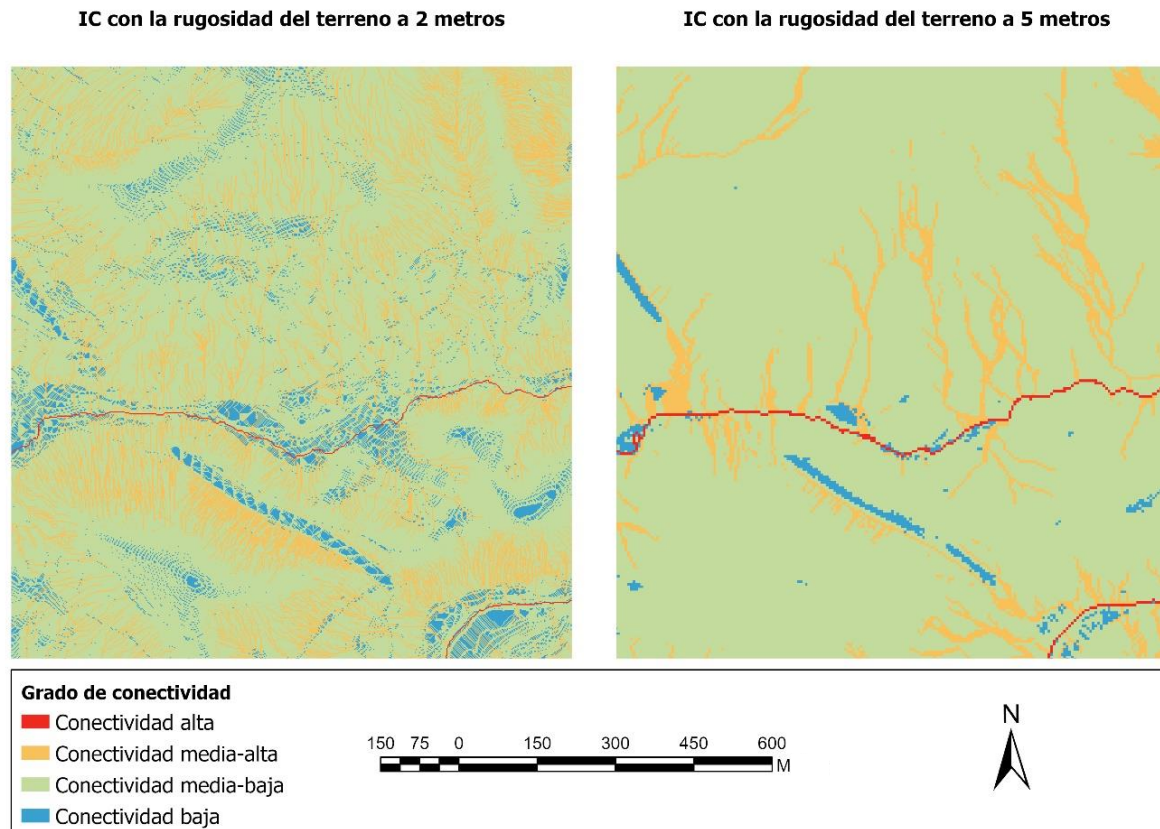


**Figura 8.** IC teniendo en cuenta la rugosidad del terreno

En detalle, como se puede ver en un ejemplo más concreto (**Figura 9**), la red de drenaje es mucho más extensa usando el modelo de 2 metros, donde es más abundante la conectividad media-alta. Igualmente, la generalización del resultado a 5 metros nos muestra la mayoría del área como conectividad media-baja, siendo pocas las áreas de baja conectividad, por lo

que se puede decir que a rasgos generales el IC a 5 metros nos da una conectividad mayor que el IC a 2 metros.

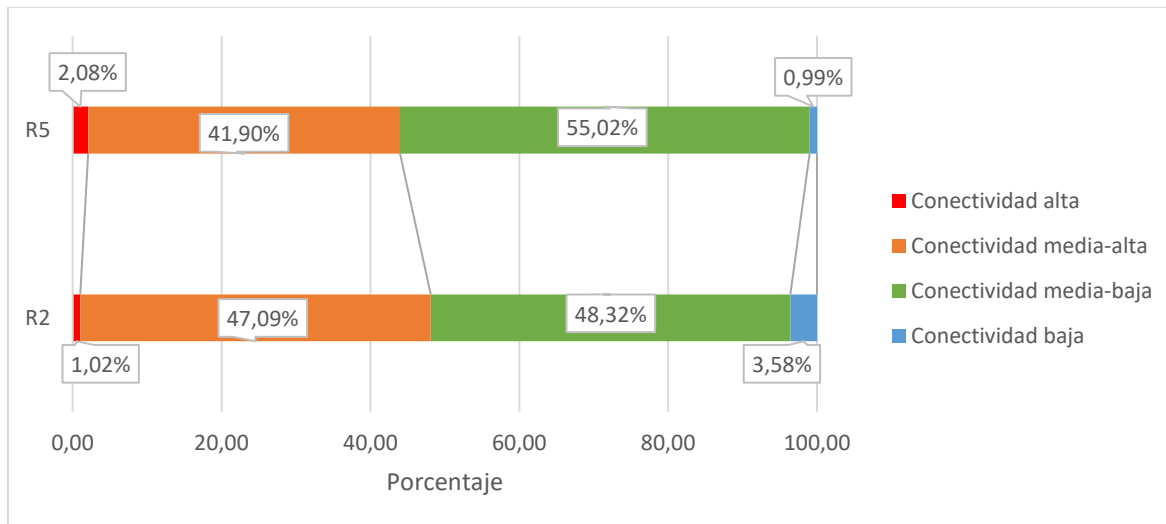
Aun así, se puede decir que la cuenca se encuentra bien conectada en cuanto a la conectividad de sedimentos de aguas arriba a aguas abajo (conectividad directa) del propio Leitzaran y sus afluentes. En cuanto a la conectividad difusa, ambos modelos muestran que cuanto más se profundiza el valle mayor es la conectividad, por el contrario, en el valle aluvial de Leitzara la conectividad es menor.



**Figura 9.** Ejemplos de diferencias entre resoluciones de 2 y 5 metros

Igualmente, esas diferencias se pueden corroborar analizando el gráfico de porcentajes (**Figura 10**), donde se comprueba que la generalización del modelo de 5 metros crea áreas más conectadas que el de 2 metros, y por el contrario elimina las áreas de baja conectividad, al igual que demuestra el estudio de Cantreul *et al.* (2018). En los valores medios la conectividad media-alta aumenta con el modelo de mayor resolución, mientras que la media-baja disminuye.

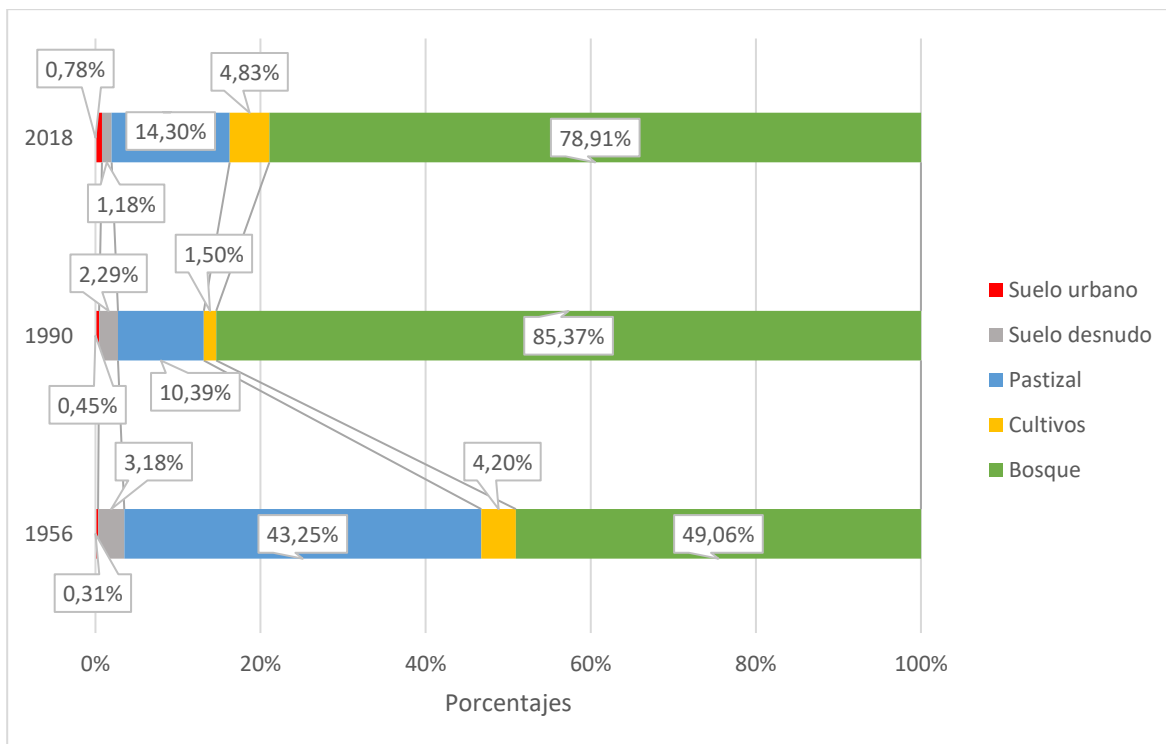
Teniendo en cuenta las categorías por pares (alta con media-alta y baja con media-baja) los resultados muestran que proporcionalmente el modelo de 2 metros tiene más áreas de alta conectividad, y el de 5 metros más con áreas de baja conectividad. Aun así, en ambos casos más de la mitad de la cuenca tiene valores de conectividad bajos.



**Figura 10.** Gráfico del porcentaje del grado de conectividad para los IC de rugosidad del MDT (5 y 2 metros)

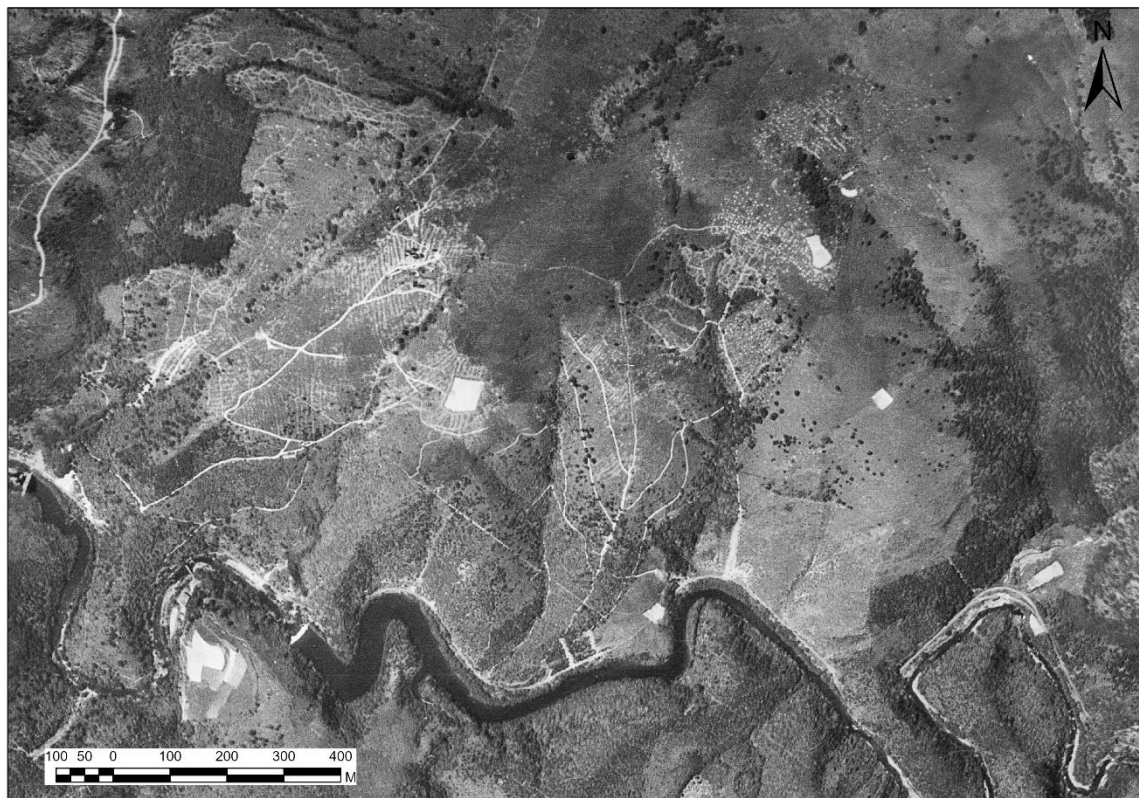
#### 4.2. Evolución de los usos del suelo

La evolución de los usos de suelo viene marcada por las capas utilizadas (**Figura 11**). Las capas usadas para el 2018 y el 1990 son las obtenidas por el *Corine Land Cover*, que trabaja a una escala menor. Es por ello que, en algunos casos, la digitalización propia de la cuenca del año 1956 muestra un mejor ajuste y precisión que las del *Corine Land Cover*. Aun así, en el caso del suelo desnudo, es verdad que será más preciso en 1990 y 2018, ya que la resolución de la ortofoto es mayor.



**Figura 11.** Gráfico del porcentaje de los usos de suelo para los diferentes años

Como es lógico, la cuenca ha ganado terreno urbano debido al aumento poblacional. Mientras que en 1956 se situaba en un 0,31% de la cuenca, en 2018 ascendió hasta el 0,78%, siendo, aun así, un porcentaje bajo. En cuanto al suelo desnudo, este ha disminuido considerablemente a lo largo de los años, principalmente debido al control de la explotación forestal de la zona, que, usando la técnica matarrasa (tala de árboles total), dejaba el terreno sin ningún tipo de vegetación (*Figura 12*).



*Figura 12.* Ejemplo de matarrasa en la ortofoto de 1956. (Fuente: IGN)

Las áreas cubiertas por pastizal han sufrido un considerable retroceso, cayendo casi un 33% de 1956 a 1990, lo que ha influido directamente en la conectividad de la cuenca, como se mencionaba en líneas anteriores. Aun así, de 1990 a 2018 han aumentado alrededor de un 4%.

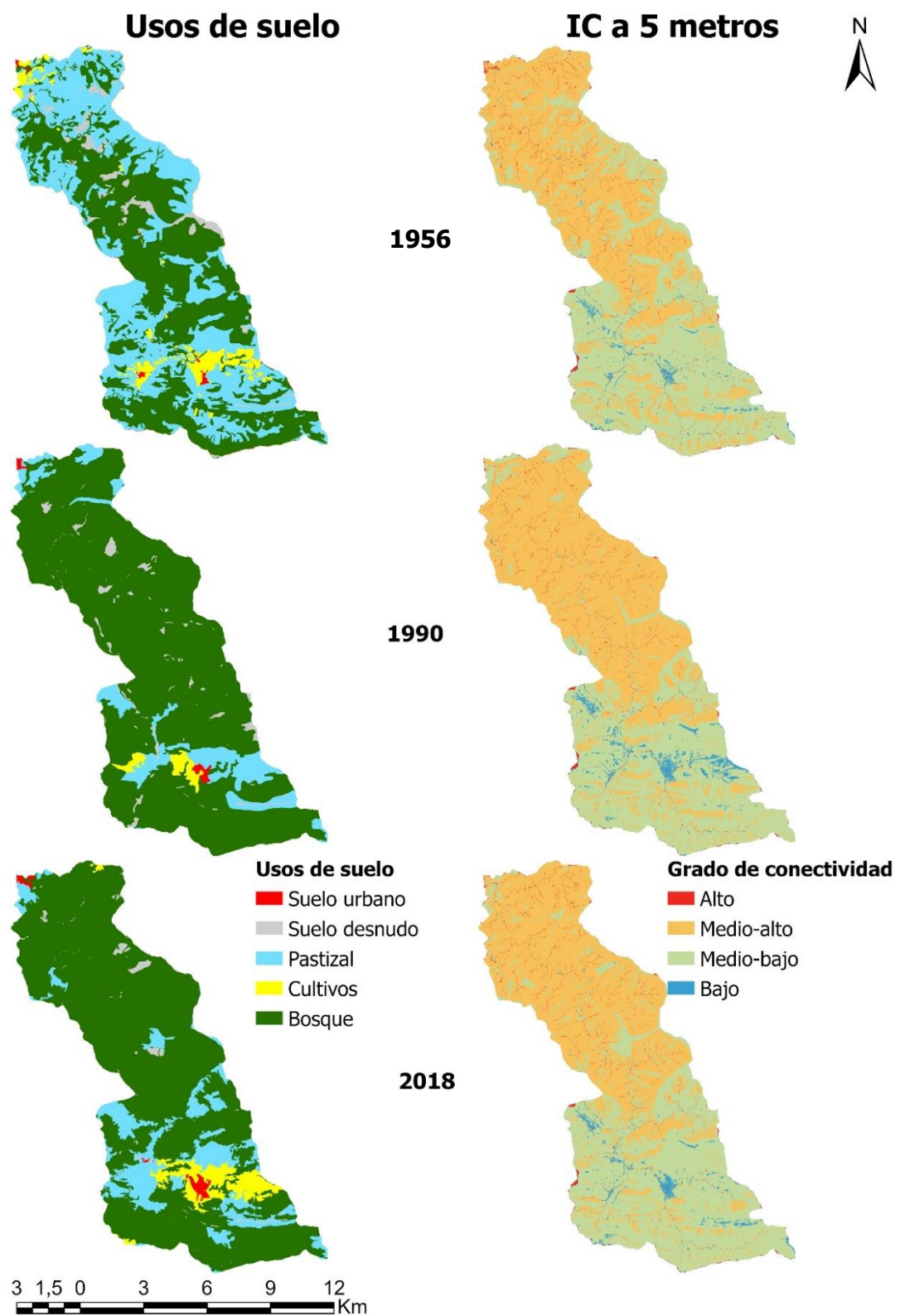
Las tierras de cultivo han sido escasas en la cuenca, principalmente debido a la orografía de esta: las fuertes pendientes impiden el cultivo. Sin embargo, de 1956 a 1990 hubo un retroceso de este tipo de uso del suelo, aunque para 2018 ha logrado casi la misma extensión que en 1956.

Como se ha repetido a lo largo del trabajo, la cuenca del Leitzaran es puramente forestal. Actualmente, el 78% de la cuenca está cubierta por bosque. Además, ha habido un incremento considerable desde 1956, debido a la explotación forestal, que actualmente, las medidas de gestión promueven la recuperación del bosque natural en la cuenca, aunque siga habiendo abundantes plantaciones hoy en día: solamente contando la parte Gipuzkoana (donde se concentra la mayoría de las plantaciones) de la cuenca alrededor de un 35% de la superficie está cubierta por plantaciones (Inventario Forestal de Euskadi).

#### 4.3. Índice de Conectividad utilizando la rugosidad de los usos de suelo

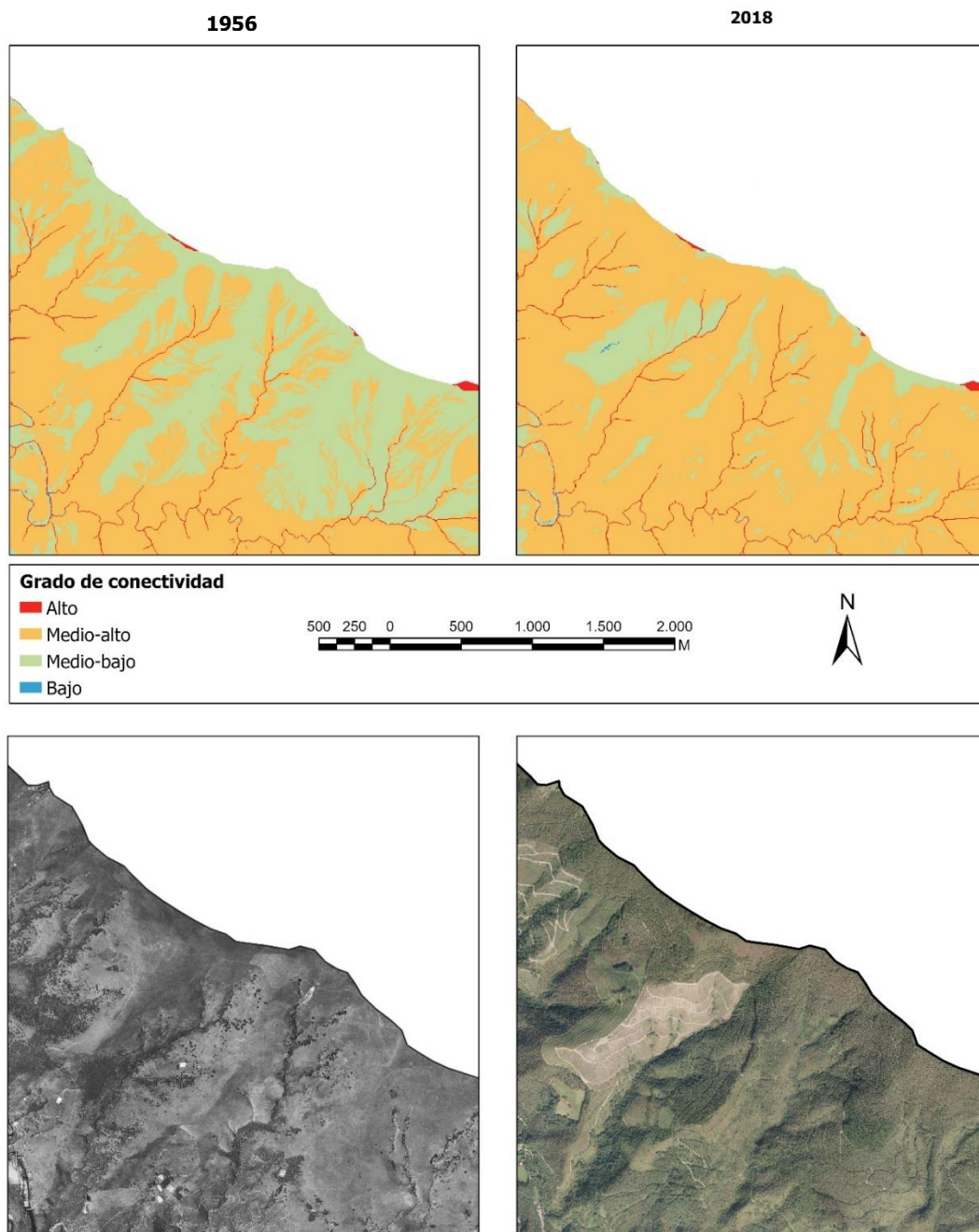
En términos generales, la disposición de la conectividad teniendo en cuenta los usos de suelo es la misma que en el caso de la rugosidad del MDT. Igualmente se diferencian dos zonas, la parte norte y la parte sur o cabecera de la cuenca, donde, como se ha comentado antes, los valores de conectividad son más bajos (*Figura 13*).

### 4.3.1. Índice de Conectividad de los usos del suelo a 5 metros



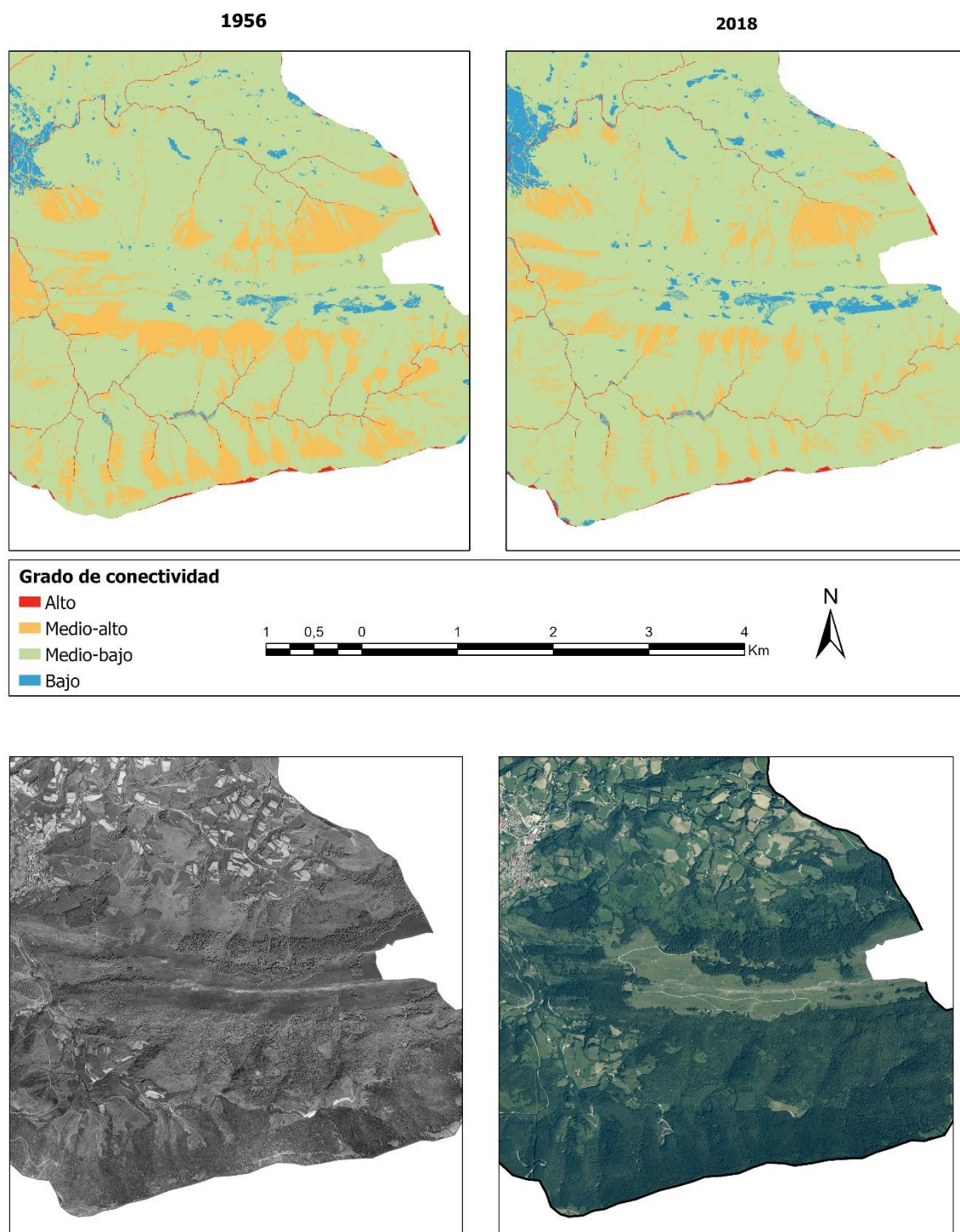
*Figura 13.* Mapa comparado de los usos de suelo y el IC a 5 metros de resolución basado en los usos de suelo

Comparando la evolución en los tres años, el IC se ve fuertemente condicionado por el área cubierta por pastizales en el año 1956, donde consigue su máxima amplitud, como se puede comprobar también en el gráfico de usos de suelo (*Figura 11*). Así, en el sector nororiental de la cuenca se aprecian diferencias entre los tres periodos, especialmente entre 1956 y el resto. En el año 1956 la conectividad media-baja se extiende desde los interfluvios de la red de drenaje hacia las laderas, mientras que en los otros dos años el grado medio-bajo se mantiene solo en la parte más alta de los interfluvios, como se puede apreciar en un ejemplo detallado en la *Figura 14*.



*Figura 14.* Ejemplo de diferencias del IC a 5 metros basado en los usos de suelo entre los años 1956 y 2018

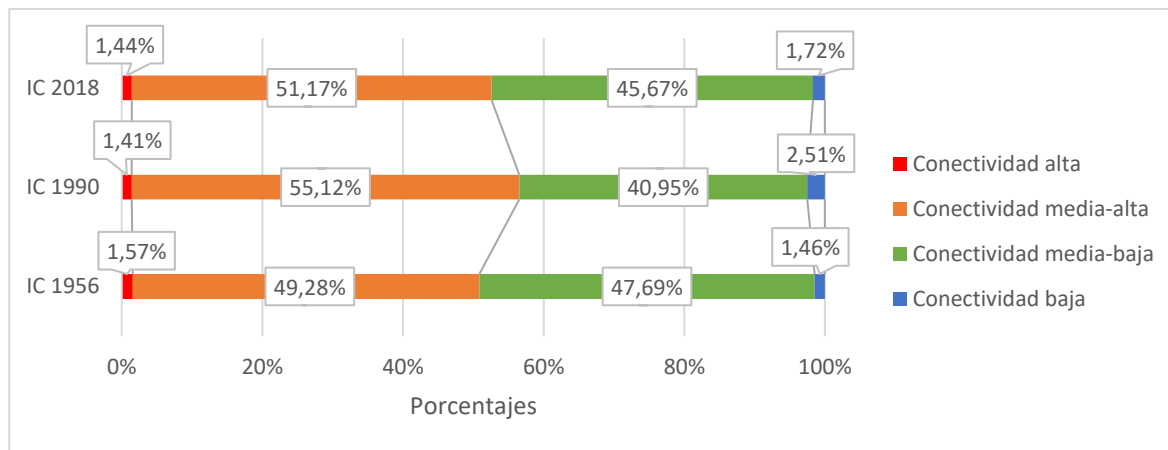
Por el contrario, en la parte meridional de la cuenca se ve que a lo largo de los años el grado de conectividad ha bajado en algunos lugares, como es el caso de los núcleos urbanos (debido a su crecimiento) o de la propia red de drenaje, como también se observa en la **Figura 15**.



**Figura 15.** Ejemplo de diferencias del IC a 5 metros teniendo en cuenta los usos de suelo entre los años 1956 y 2018

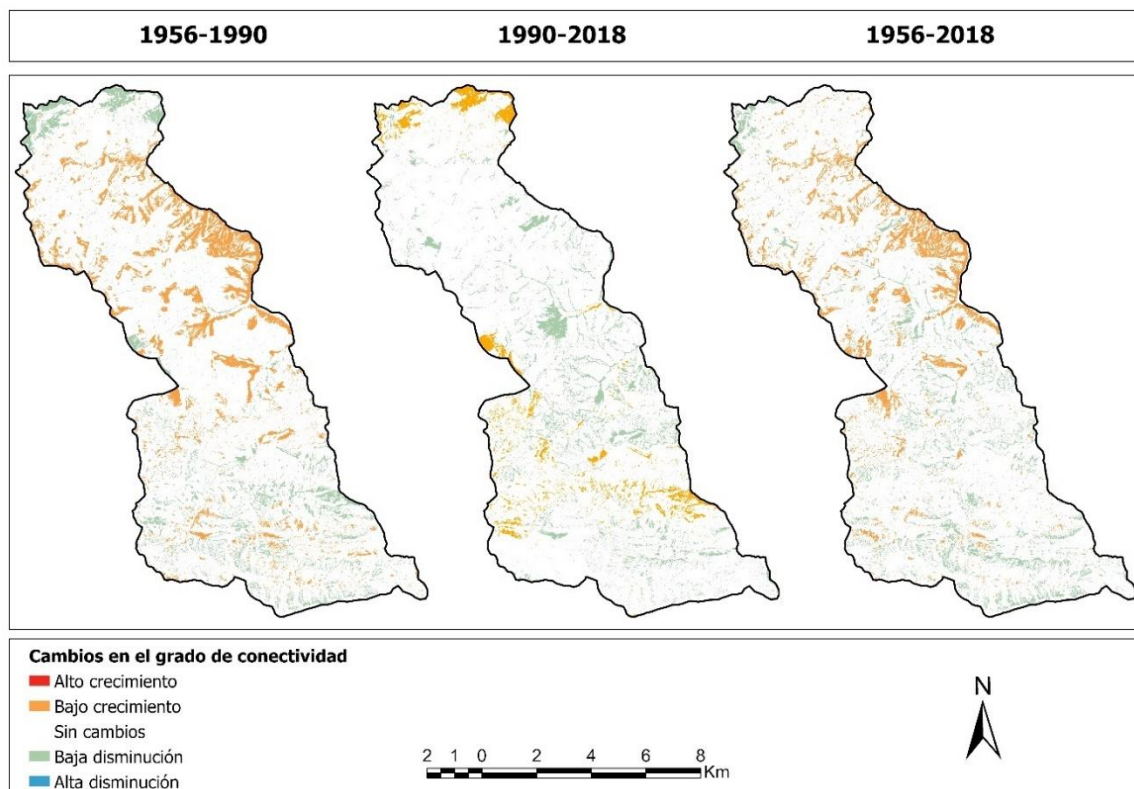
Por lo tanto, en términos generales y apoyándose en el gráfico de porcentajes del grado de conectividad (**Figura 16**), se puede decir que la conectividad ha subido a lo largo de los años. Es cierto que en 1956 el área con conectividad alta era ligeramente superior (0,13% superior respecto a 2018), pero en el cómputo global de conectividad alta y media-alta subió 5,68% entre los años 1956 y 1990, quedándose en valores similares a los de 1956 en el 2018 (50,85% y 52,61%, respectivamente). A su vez, las áreas de baja conectividad han subido ligeramente con el tiempo, sobre todo de 1956 a 1990, con un incremento de 1,05%.

La conectividad de la propia red de drenaje (conectividad directa) es muy buena en los tres periodos, aunque es verdad que, en 1956, la red de drenaje aparece ramificada en la zona sur (**Figura 15**), ya que en ese año la cobertura forestal era menor. Por el contrario, la conectividad difusa es bastante buena en las laderas adyacentes a los cauces en la mitad norte de la cuenca, al igual que en el modelo de rugosidad del terreno.



**Figura 16.** Gráfico del porcentaje del grado de conectividad para los IC de rugosidad de los usos de suelo a 5 metros

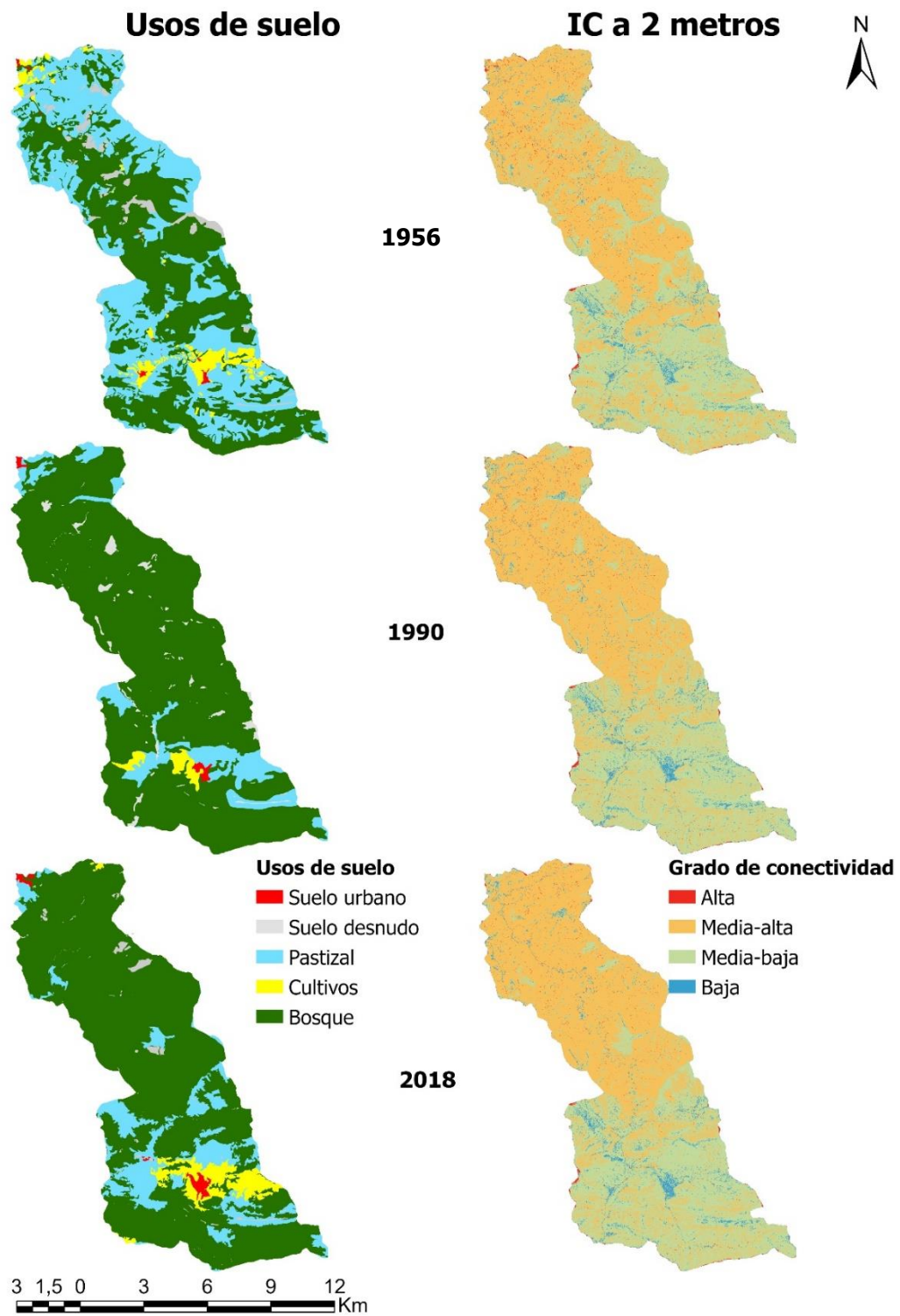
Asimismo, en el siguiente mapa (**Figura 17**), se pueden apreciar los cambios que ha habido respecto a la conectividad para cada uno de los periodos. Como se comentaba anteriormente, en términos generales, en el sector nororiental de la cuenta ha habido un crecimiento de la conectividad, mientras que al sur de la cuenca este grado ha disminuido.



**Figura 17.** Cambios en el grado de conectividad para los distintos periodos, a una resolución de 5 metros

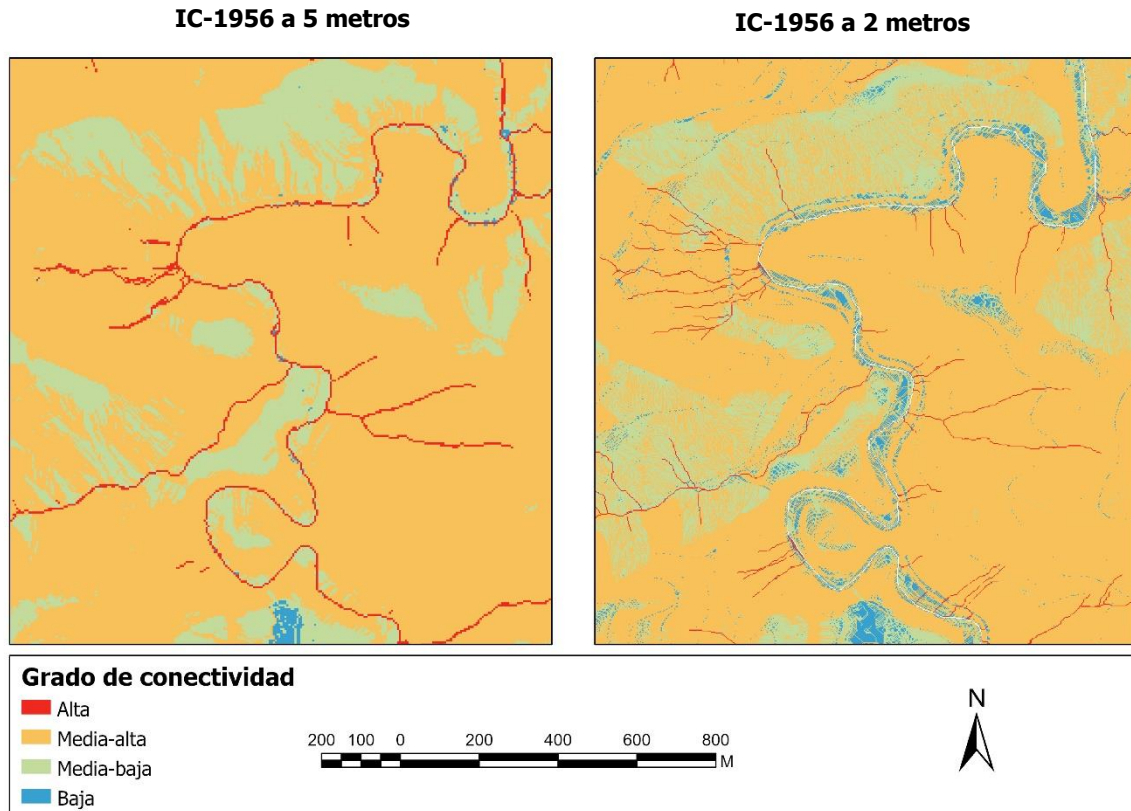
#### 4.3.2. Índice de Conectividad de los usos del suelo a 2 metros y comparación con el IC a 5 metros.

En cuanto a los resultados del IC a 2 metros (**Figura 18**), se aprecian algunos cambios respecto al modelo de 5 metros. En la mitad norte de la cuenca aparecen áreas con baja conectividad, cuando con el modelo de 5 metros no se apreciaban. Igualmente, en la mitad sur aparecen más áreas con baja conectividad, aunque en este caso en el modelo de 5 metros ya las había.



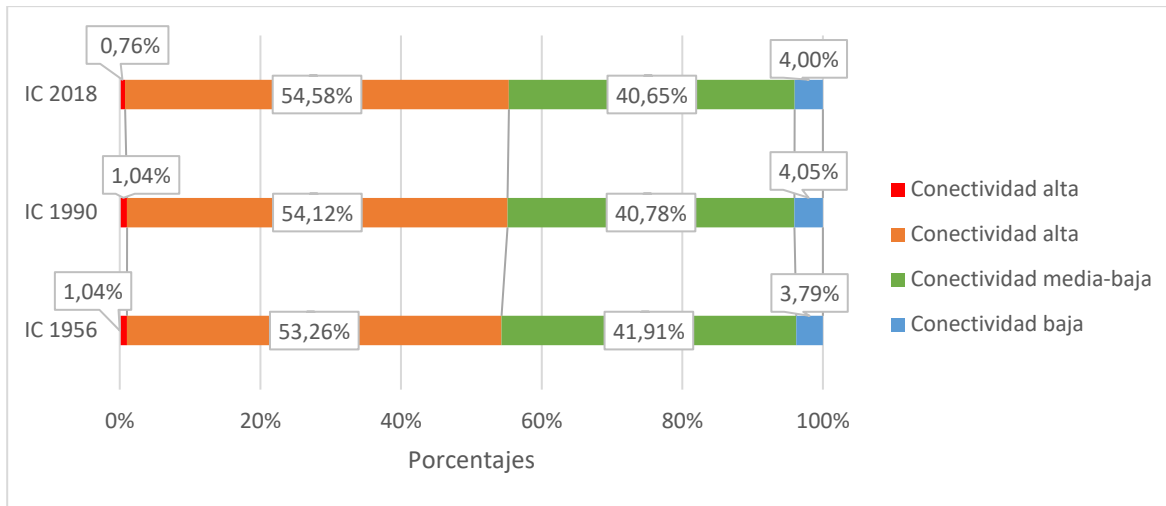
**Figura 18.** Mapa comparado de los usos de suelo y el IC a 2 metros teniendo en cuenta los usos de suelo

La red de drenaje con conectividad alta se vuelve más extensa, como se puede apreciar en el ejemplo comparativo. Además, en la mayoría de los casos las orillas del río Leitzaran aparecen con baja conectividad, y se aprecian estructuras lineales de baja conectividad que no eran observables con el modelo de mayor resolución (**Figura 19**), lo que supone un “corte” en la conectividad de laderas al colector principal, eje del río Leitzaran. Aun así, la mayoría de los tributarios sí que muestran buena conectividad difusa.



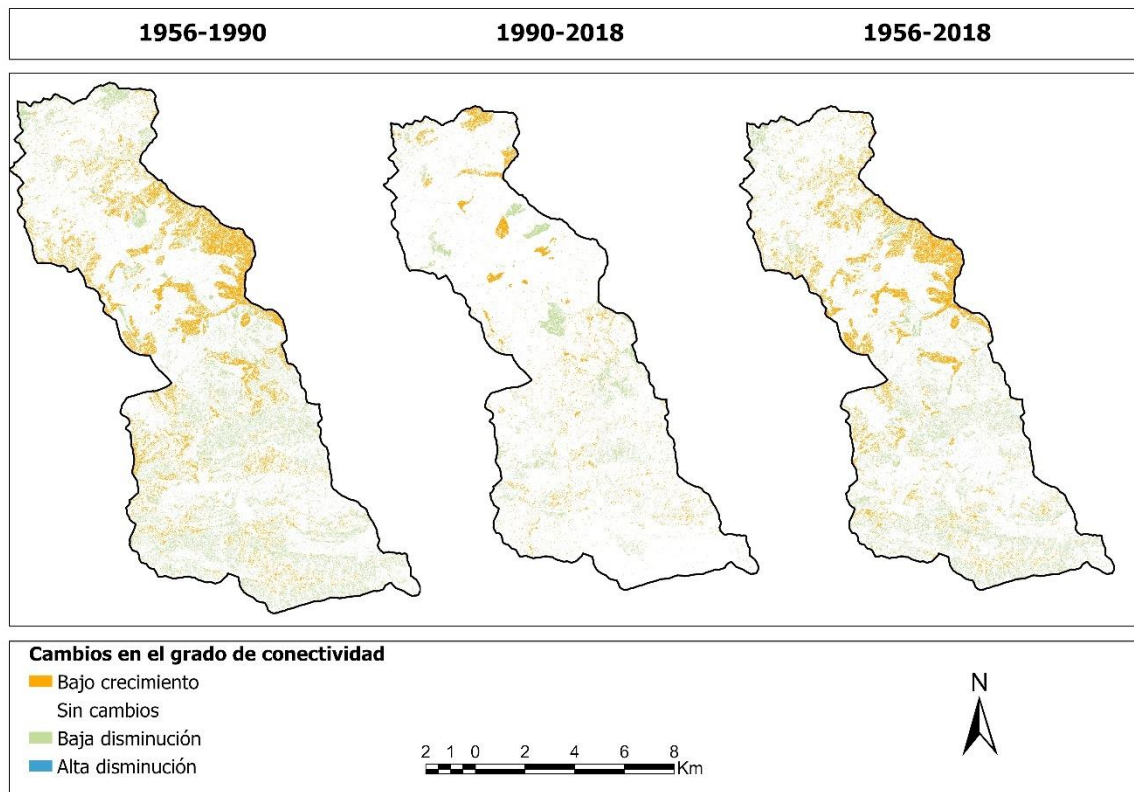
**Figura 19.** Comparación de resoluciones del IC teniendo en cuenta los usos de suelo

Asimismo, comparando los gráficos de porcentajes del IC de 5 metros (**Figura 16**) y el de 2 metros (**Figura 20**) se aprecia que siguen el mismo patrón. Por una parte, las áreas con conectividad alta disminuyen levemente a lo largo de los años (de 1,04% en 1956 a 0,76% en 2018), mientras que las áreas con baja conectividad aumentan 0,21% entre 1956 y 2018. Igualmente, la conectividad media-alta aumenta, sobre todo de 1956 a 1990 (casi un 1%). Aun así, hay que decir que en el modelo de 2 metros las áreas de conectividad baja son mayores que en el de 5 metros (alrededor de un 2%); por el contrario, se reconoce un aumento de conectividad alta en el modelo de 5 metros.



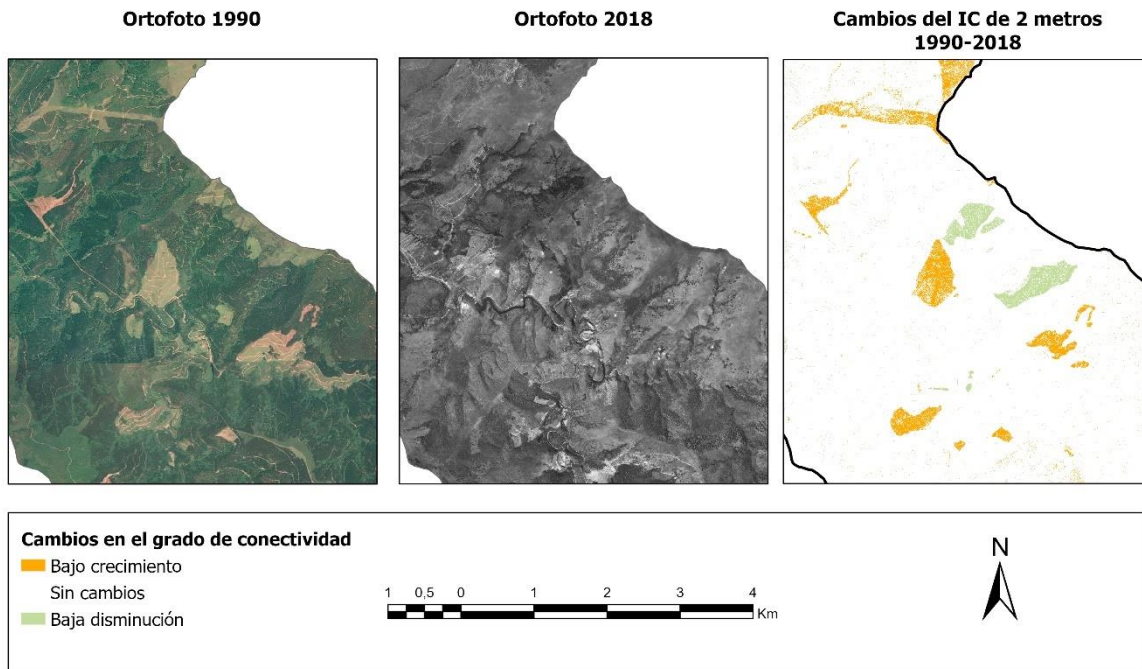
**Figura 20.** Gráfico del porcentaje del grado de conectividad para los IC de rugosidad de los usos de suelo a 2 metros

En el mapa comparado de la evolución que ha tenido el IC (**Figura 21**), llama la atención que en este modelo de 2 metros no ha habido ninguna zona donde haya habido un alto crecimiento del IC.



**Figura 21.** Cambios en el grado de conectividad para los distintos periodos, a una resolución de 2 metros

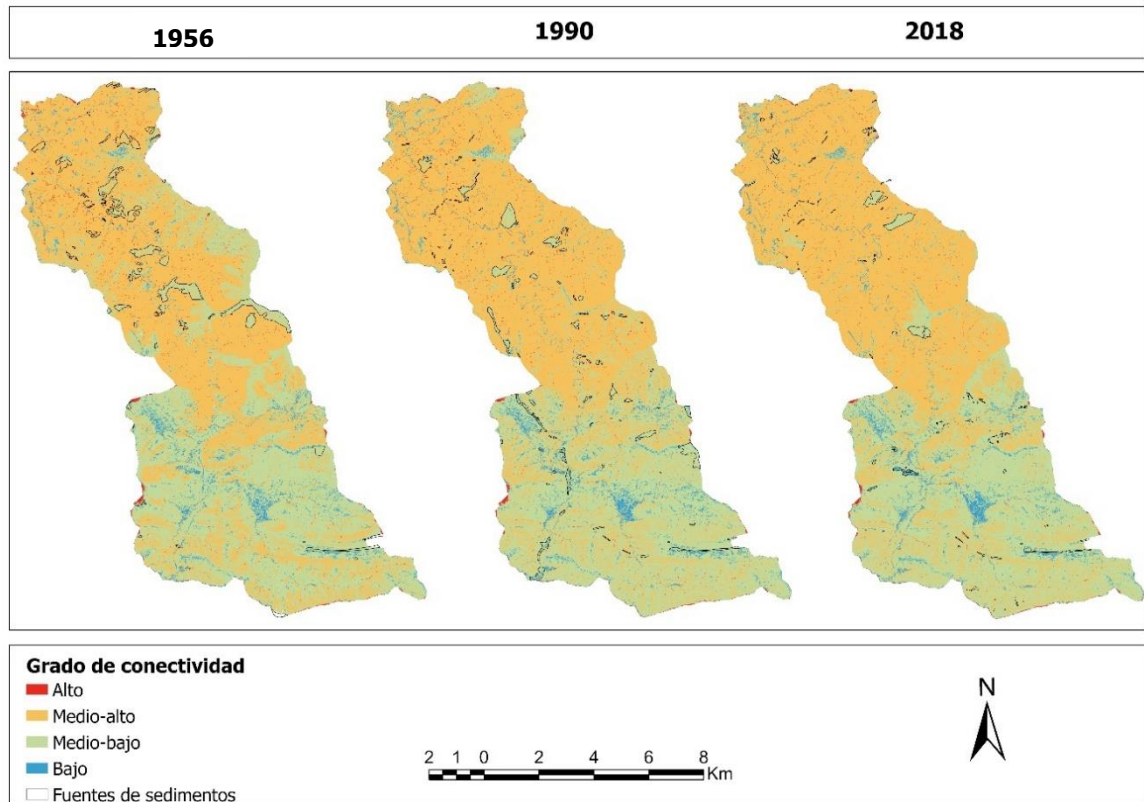
Además, en la **Figura 22** son apreciables las repercusiones que han tenido los cambios de usos de suelo en el IC. En la comparación de 1990 y 2018 las “manchas” más compactas corresponden a esos cambios: las que han tenido aumento corresponden a zonas que se han reforestado, mientras que las que han tenido una disminución se trata de zonas donde se ha aplicado la técnica forestal de matarrasa, tal y como se aprecia en el siguiente ejemplo (**Figura 22**).



**Figura 22.** Ejemplo de los cambios de uso de suelo y los cambios de IC. (Fuente: GeoEuskadi e Idena)

#### 4.4. Conectividad con las fuentes de sedimentos

Para la conectividad de las fuentes de sedimentos, solo se ha tenido en cuenta el modelo de 2 metros, ya que, como se ha ido viendo a lo largo del trabajo, resulta ser el más preciso.

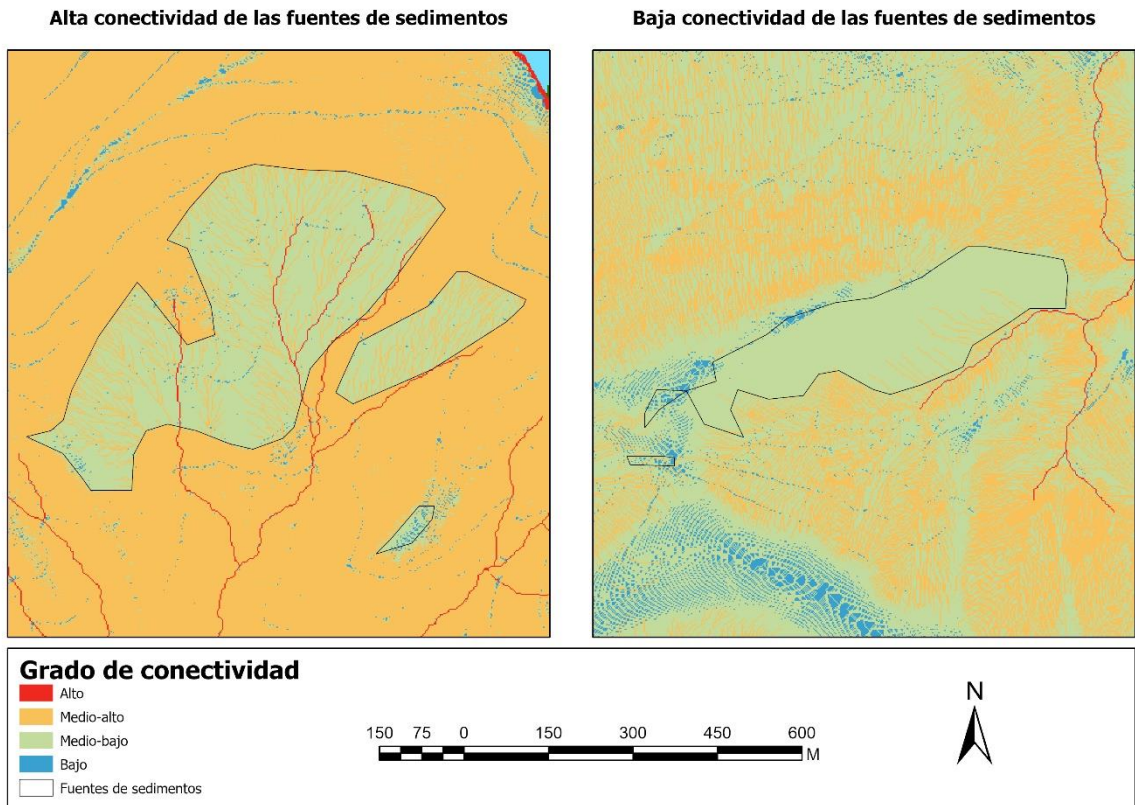


**Figura 23.** Conectividad de las fuentes de sedimentos basado en los usos de suelo

Como se puede comprobar en los mapas (**Figura 23**), algunas fuentes de sedimentos han ido cambiando a lo largo del tiempo, mientras que otras se han mantenido sin cambios, como los afloramientos rocosos.

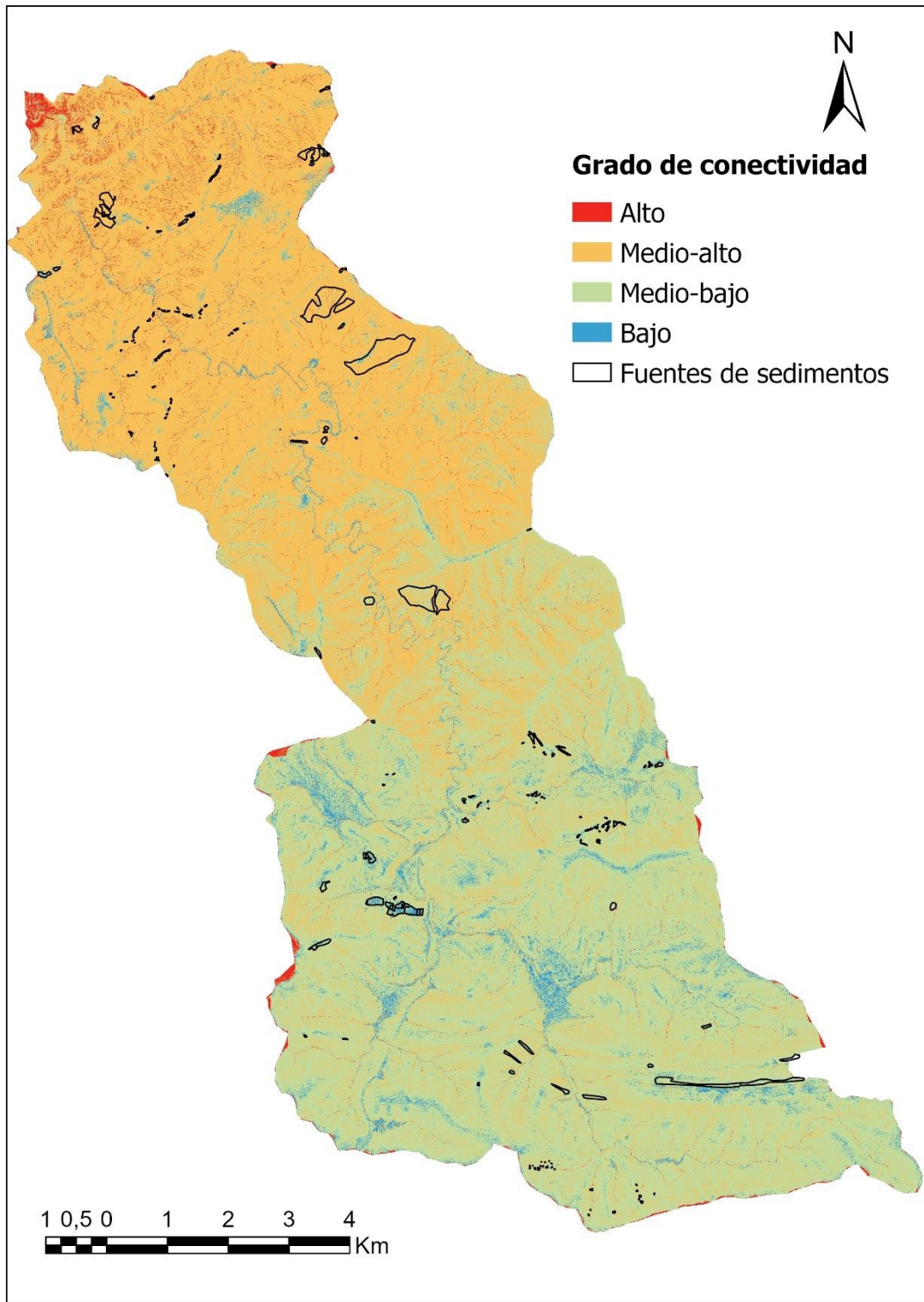
No obstante, teniendo en cuenta el IC de conectividad según los usos de suelo, mayoritariamente estas fuentes de sedimentos tienen baja conectividad. Aun así, algunas zonas mantienen una conectividad alta, e incluso están atravesadas por los propios flujos de agua.

En el siguiente ejemplo, se puede ver con más detalles diferentes zonas con baja y alta conectividad (**Figura 24**).



**Figura 24.** Ejemplos de fuentes de sedimentos con alta y baja conectividad

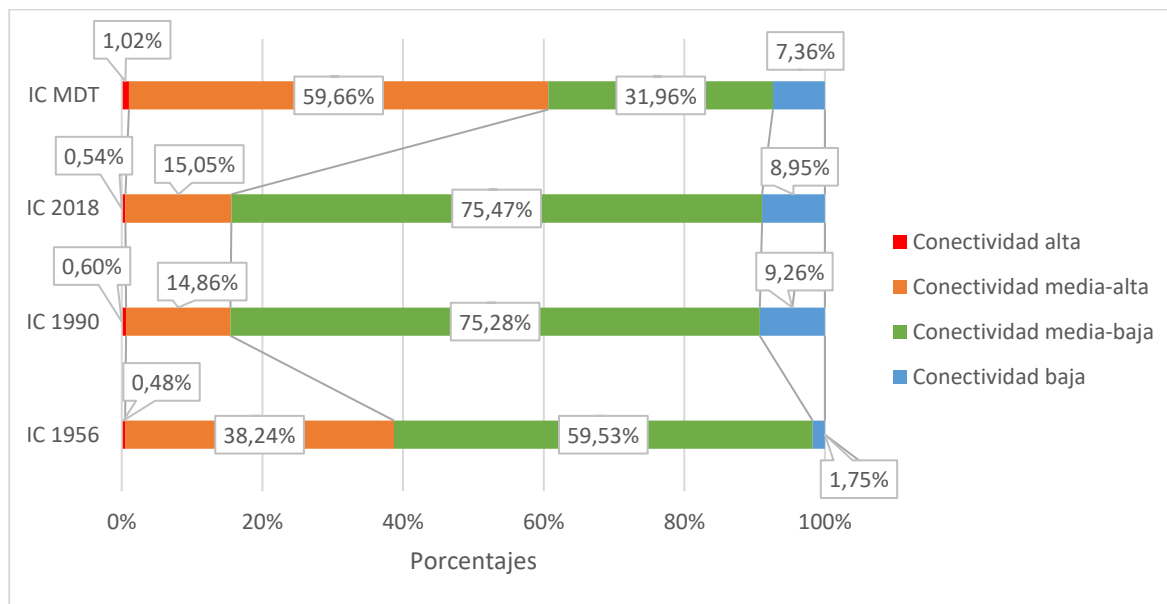
Por otra parte, teniendo en cuenta el modelo de rugosidad del terreno (**Figura 25**) se aprecian notables diferencias: muchas más fuentes de sedimentos se encuentran con una conectividad alta. Como se decía en líneas anteriores, al no tener en cuenta los usos de suelo, el modelo IC da resultados altos.



**Figura 25.** Mapa de las fuentes de sedimentos (2018) y el IC a 2 metros teniendo en cuenta la rugosidad del terreno

Asimismo, en la siguiente gráfica (**Figura 26**) se aprecian dichas diferencias. En el año 1956, alrededor del 38% de las fuentes de sedimentos se encontraban con una conectividad media-alta, ya que, por una parte, este es el año con más porcentaje de suelo desnudo, y por otra, por la ubicación de estas; se aprecia que las fuentes se encuentran alrededor del eje principal del Leitzaran, además de encontrarse en la zona de fuertes pendientes. Con el transcurso del tiempo, en 1990 y 2018, estas fuentes de sedimentos con conectividad media-alta disminuyen más de la mitad, además de aumentar las áreas de baja conectividad un 7,51%. En el periodo de 1990-2018, los porcentajes de conectividad se mantienen bastante estables.

Sin embargo, teniendo en cuenta el modelo de rugosidad del terreno, las fuentes de sedimentos con conectividad media-alta ascienden a más de la mitad del total. Asimismo, las áreas con conectividad alta son las más altas de los cuatro resultados.



**Figura 26.** Gráfico del grado de conectividad en porcentajes de las fuentes de sedimentos para los diferentes modelos

## 5. Discusión y conclusiones

En resumen, todos los resultados del IC muestran patrones similares, siguiendo la misma tendencia. En todos los modelos se muestran dos zonas bien diferenciadas, que se pueden definir como la cabecera de la cuenca (con pendientes menores y un valle más amplio) y la parte baja de la cuenca (con profundos valles y fuertes pendientes). Así, los valores de conectividad más altos se dan en el tramo inferior de la cuenca, derivados de las fuentes pendientes y por la propia acumulación de sedimentos al final de la cuenca. Por el contrario, los valores de conectividad baja se dan en la cabecera de la cuenca.

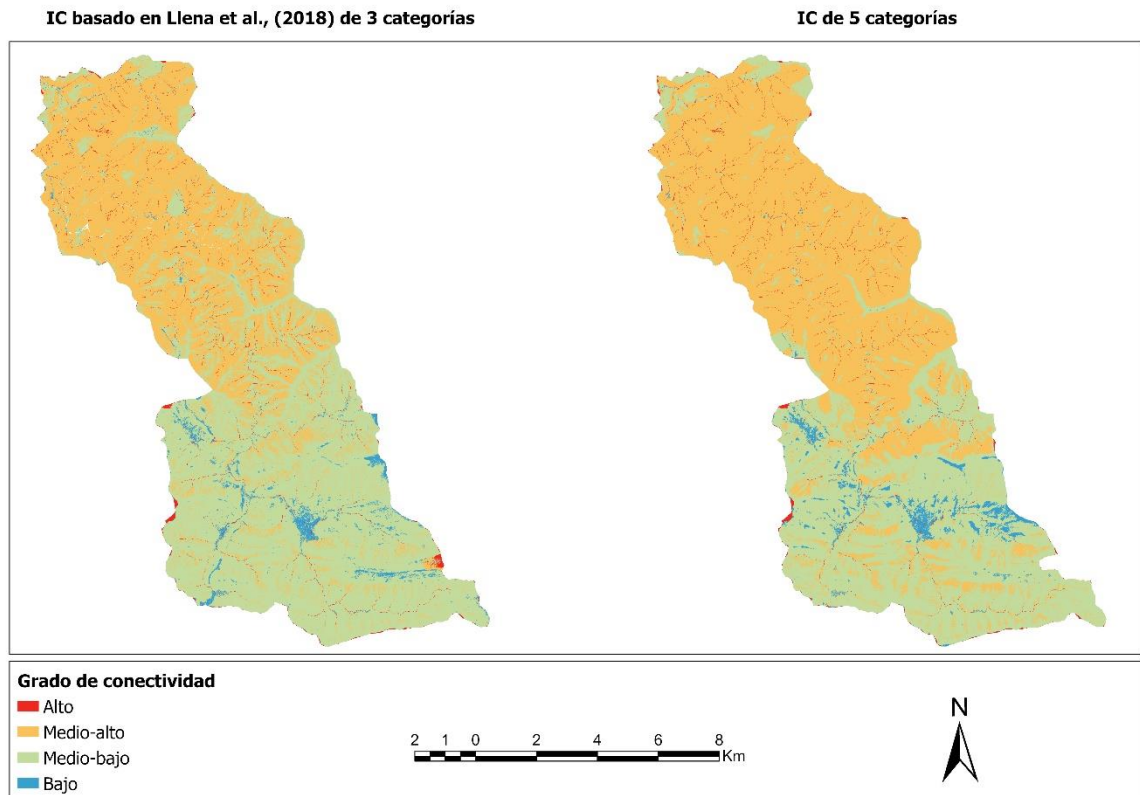
Asimismo, se asume que los modelos con una resolución de 2 metros ofrecen mejores resultados, ya que muestran mejor la red de drenaje secundaria y otros elementos lineales que pueden entorpecer la conectividad. Igualmente, la resolución de 2 metros da resultados de conectividad baja mayores.

Por lo tanto, se puede corroborar el estudio de Cantreul *et al.* (2018), que señala que a medida que se aumenta la resolución del IC, las áreas de baja conectividad aumentan, aunque en términos generales los modelos muestren los mismos resultados.

La conectividad en el contexto temporal muestra una tendencia ascendente, es decir, con la evolución de los usos de suelo la conectividad ha mejorado en términos generales, desde 1956 hasta 2018; aunque, las fuentes de sedimentos quedan más desconectadas hoy en día. Aun y todo, teniendo en cuenta exclusivamente la rugosidad del terreno se observa que las fuentes de sedimentos están muy conectadas en el año 2018.

No obstante, los resultados se muestran contradictorios en lo que la teoría de la conectividad de sedimentos supone. En este análisis se ha visto que a mayor superficie forestal la conectividad de sedimentos aumenta. Por ello, se ha realizado una comparación con los valores de Manning y las tres categorías usadas en el trabajo de Llena *et al.* (2018), bosque (0,5), pradera (0,4) y suelo desnudo (0,1) (**Figura 27**). Comparando estos resultados, no distan mucho unos de otros, por lo que se puede decir que las fuertes pendientes de la zona condicionan completamente la conectividad, quedando los usos de suelo en un segundo plano.

Por otra parte, hubo una reforestación en la cabecera de la cuenca del año 1956 al 2018 (**Figura 15**), dando como resultado un descenso de la conectividad, ya que en esa zona no hay pendientes tan fuertes como en la zona media de la cuenca y no resulta estar tan condicionado por estas.



**Figura 27.** Comparación del IC basado en Llena *et al.* (2018) y el IC (1990 y 5 metros) propuesto en este trabajo

Sin embargo, existen otros tipos de obstáculos antrópicos que impiden que el flujo de sedimentos se movilice río abajo, así azudes y presas presentan un importante obstáculo al flujo de sedimentos en el propio río Leizaran. Es así que, para mejorar la conectividad de los sedimentos, y de la fauna piscícola, del río Leizaran, se han derribado dos antiguas presas (Inturia –entre 2013 y 2016- y Olloki –entre 2018 y 2019-) y un azud en desuso (Truchas Erreka en 2015). Con el fin de realizar el seguimiento de la recuperación del transporte sólido se ha realizado un seguimiento geomorfológico realizando granulometrías evolutivas y seguimiento de la movilidad a través de trazadores RFID (Ibisate *et al.* 2016; García *et al.*, 2021).

Asimismo, el estudio y análisis de los procesos hidromorfológicos favorecen el conocimiento del funcionamiento de la cuenca y el desarrollo de medidas de gestión que mejoren los espacios fluviales.

## 6. Bibliografía

- Amoros, C. y Roux, A. L. (1988). Interaction between water bodies within the floodplains of large rivers: function and development of connectivity. *Münstersche Geographische Arbeiten*, 29(1), 125-130
- Bochet, E., Rubio, J. L. y Poesen, J. (1999). Modified topsoil islands within patchy Mediterranean vegetation in SE Spain. *Catena*, 38(1), 23-44.
- Borselli, L., Cassi, P., y Torri, D. (2008). Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: a GIS and field numerical assessment. *Catena*, 75(3), 268-277.
- Brazier, R., Vericat, D., Cerda, A., Brardinoni, F., Batalla, R., Masselink, R. y Keesstra, S. (2015). Can we measure connectivity?. *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 15814. <https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2015/EGU2015-15814.pdf>
- Brierley, G., Fryirs, K. y Jain, V. (2006). Landscape connectivity: the geographic basis of geomorphic applications. *Area*, 38(2), 165-174.
- Cammeraat, L. H. (2002). A review of two strongly contrasting geomorphological systems within the context of scale. *Earth Surface Processes and Landforms*, 27(11), 1201–1222
- Cammeraat, E. L. (2004). Scale dependent thresholds in hydrological and erosion response of a semi-arid catchment in southeast Spain. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 104(2), 317-332
- Cantreul, V., Bielders, C., Calsamiglia, A. y Degré, A. (2018). How pixel size affects a sediment connectivity index in central Belgium. *Earth Surface Processes and Landforms*, 43(4), 884-893.
- Castro, I. M. (1989). “Leizaran: Un valle singular”. En: *Ibaiak eta Haranak. El agua, el río y los espacios agrícola, industrial y urbano*. San Sebastián: Etor. vol. I, 145-158.
- Cavalli, M., Trevisani, S., Comiti, F. y Marchi, L. (2013). Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small Alpine catchments. *Geomorphology*, 188, 31-41.
- Crema, S. y Cavalli, M. (2018). SedInConnect: a stand-alone, free and open source tool for the assessment of sediment connectivity. *Computers & Geosciences*, 111, 39-45
- Croke, J., Mockler, S., Fogarty, P. y Takken, I. (2005). Sediment concentration changes in runoff pathways from a forest road network and the resultant spatial pattern of catchment connectivity. *Geomorphology*, 68(3-4), 257-268.
- De Vente, J. y Poesen, J. (2005). Predicting soil erosion and sediment yield at the basin scale: scale issues and semi-quantitative models. *Earth-science reviews*, 71(1-2), 95-125.
- Dietrich, W. E. y Dunne, T. (1978). Sediment budget for a small catchment in mountainous terrain. *Zeitschrift für Geomorphologie Supplement*, 29, 191-206.

- Faci, E. (dir.). (2002) Cartografía Geológica de Navarra a escala 1:25.000.89-II. Berástegui. Memoria. Tecnología de la Naturaleza, Gobierno de Navarra.
- Fryirs, K. A., Brierley, G. J., Preston, N. J. y Kasai, M. (2007). Buffers, barriers and blankets: the (dis) connectivity of catchment-scale sediment cascades. *Catena*, 70(1), 49-67.
- Horacio García, J., Ibisate, A., Sánchez-Pinto, I., Vázquez-Tarrío, D., Ollero, A., Herrero, X., Ortiz Martínez de Lahidalga, J. y Beltrán de Lubiano, J. (2021). Sediment displacement evolution after dam removal in a mountain river (Oioki dam, Leitzaran River). *EGU General Assembly Conference Abstracts*, doi 10.5194/egusphere-egu21-8444. (EGU21-8444).
- Ibisate, A., Ollero, A., Ballarín, D., Horacio, J., Mora, D., Mesanza, A., Ferrer-Boix, C., Acín, V., Granado, D., y MartínVide, J. P. (2016). Geomorphic monitoring and response to two dam removals: rivers Urumea and Leitzaran (Basque Country, Spain). *Earth Surface Processes and Landforms*, 41(15), 2239-2255.
- Hooke, J. (2003). Coarse sediment connectivity in river channel systems: a conceptual framework and methodology. *Geomorphology*, 56(1-2), 79-94.
- INE. (2021). *Cifras oficiales de población de los municipios españoles: Revisión del Padrón Municipal 2020*. Instituto Nacional de Estadística
- Janssen, C. (2016). Manning's *n* Values for various land covers to use for dam breach analyses by NRCS in Kansas. *Revised by PAC*
- Khanbilvardi, R. M. & Rogowski, A. S. (1984). Quantitative evaluation of sediment delivery ratios 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 20(6), 865-874.
- Llena, M., Vericat, D., Cavalli, M., Crema, S., y Smith, M. W. (2019). The effects of land use and topographic changes on sediment connectivity in mountain catchments. *Science of the Total Environment*, 660, 899-912.
- Pejenaute, J. (2002). *Navarra-Geografía*. Departamento de Educación y Cultura, Gobierno de Navarra, Pamplona, 43-80 pp.
- Puigdefábregas, J., Sole, A., Gutierrez, L., Del Barrio, G. y Boer, M. (1999). Scales and processes of water and sediment redistribution in drylands: results from the Rambla Honda field site in Southeast Spain. *Earth-Science Reviews*, 48(1-2), 39-70.
- Roehl J. W. (1962). Sediment source areas, delivery ratios and influencing morphological factors. *International Association of Scientific Hydrology Publication*, 59, 202-13
- Turnbull, L., Hütt, M. T., Ioannides, A. A., Kininmonth, S., Poepl, R., Tockner, K., Bracken, J.L., Keesstra, S., Liu, L., Masselink, R., y Parsons, A. J. (2018). Connectivity and complex systems: learning from a multi-disciplinary perspective. *Applied Network Science*, 3(1), 1-49.
- Wohl, E. (2017). Connectivity in rivers. *Progress in Physical Geography*, 41(3), 345-362

Wolman, M. G. & Miller, J. P. (1960). Magnitude and frequency of forces in geomorphic processes. *The Journal of Geology*, 68(1), 54-74.

*Recursos web:*

Centro Nacional de Información Geográfica. *Instituto Geográfico Nacional*. (s.f.). Ministerio de fomento. <https://www.cnig.es/home>

Euskalmet. *Agencia vasca de meteorología*. (s.f.). Gobierno Vasco. <https://www.euskalmet.euskadi.eus/inicio/>

Infraestructura de Datos Espaciales de Navarra (IDENA). (s.f.). Gobierno de Navarra. <https://idena.navarra.es/Portal/Inicio>

Inventario Forestal de Euskadi. Gobierno Vasco. <https://www.euskadi.eus/informacion/inventarios-forestales/web01-a3estbin/es/>

MeteoNavarra. *Meteorología y climatología de Navarra*. (s.f.). Gobierno de Navarra. <http://meteo.navarra.es/>

Obras Hidráulicas de Gipuzkoa. Diputación Foral de Gipuzkoa. <https://www.gipuzkoa.eus/es/web/obrahidraulikoak>