

TRABAJO FIN DE MÁSTER

(Máster Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica)

“Aplicación de herramientas SIG al estudio de la cuenca del Río Nalón”

Autora: Nerea García González

Directora: María José Domínguez-Cuesta

Julio 2014

D^a. Nerea García González, autora del Trabajo Fin de Máster titulado “*Aplicación de herramientas SIG al estudio de la cuenca del Río Nalón*”, confirma que es un trabajo original y solicita su presentación como Trabajo Fin de Máster del Máster Universitario Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica de la Universidad de Oviedo.

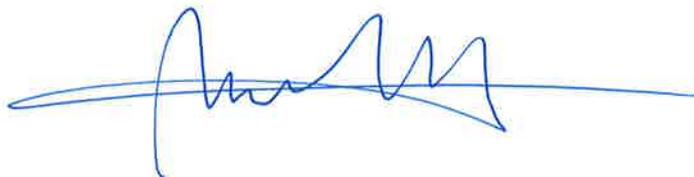
En Oviedo, a 15 de julio de 2014



Fdo.: Nerea García González

La Doctora María José Domínguez Cuesta del Departamento de Geología de la Universidad de Oviedo confirma que ha tutelado el trabajo titulado “*Aplicación de herramientas SIG al estudio de la cuenca del Río Nalón*”, realizado por D^a. Nerea García González, y autoriza su presentación y defensa como Trabajo Fin de Máster en el Máster Universitario en Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica de la Universidad de Oviedo.

En Oviedo, a 15 de julio de 2014



Fdo.: María José Domínguez Cuesta

Resumen

Este trabajo se centra en el estudio de la cuenca hidrográfica del Río Nalón, la más importante de toda la vertiente norte de la Península Ibérica, con una extensión de 4.899,4 km², lo que supone el 46% de todo el territorio asturiano.

El objetivo con el que se planteó este trabajo era determinar si era posible detectar indicios que apoyaran o descartaran la hipótesis de partida, según la cual el Río Nalón podría haber desembocado en la Ría de Avilés en tiempos geológicos recientes. Posteriormente, habría sido modificada su trayectoria en el curso medio/bajo debido a una hipotética captura fluvial del Río Caudal sobre él.

Para ello, se han realizado una serie de análisis, mediante herramientas del software ArcGIS (v. 9.3), a partir de los Modelos Digitales del Terreno LIDAR (IGN) y del MDT y la cartografía litológica de Asturias publicados, por el Principado de Asturias con tamaño de pixel 5 m y escala 1:25:000, respectivamente. Desde el punto de vista metodológico se ha puesto a punto la utilización de la extensión ArcHydro Tool para ArcGIS, siguiendo todos los pasos para obtener un modelo digital correcto hidrológicamente.

El desnivel determinado a partir del Modelo Digital de Elevaciones, MDE, es de 2.414 m. A partir del MDE se han derivado otros modelos digitales del terreno: Pendientes (medias en torno a 24°), Orientaciones (predominio de orientación norte), Sombreado, Índice de Relieve, Direcciones de Flujo y Flujo Acumulado. Se han construido perfiles fluviales longitudinales de los ríos principales de la cuenca: Nalón, Narcea, Caudal y Nora. Se han llevado a cabo 12 perfiles transversales sobre el cauce del Río Caudal y 24 sobre el cauce del Río Nalón (12 aguas arriba de la supuesta captura y otros 12, aguas abajo). Se ha obtenido un valor de 36 en el cálculo de la integral hipsométrica de la cuenca y se ha jerarquizado la red de drenaje mediante el método Horton-Strahler, obteniéndose un orden igual a 6, para el Río Nalón.

Los resultados obtenidos, si bien no permiten afirmar inequívocamente que dicha captura tuviera lugar, tampoco descartan esta posibilidad.

Abstract

This work focuses on the study of Nalón River basin, the most important one of the Iberian Peninsula north side. It represents the 46% of the whole territory of Asturias with an area of 4,899.4 km².

The aim with this work is to detect any evidence to support or discount the hypothesis, according to which the Nalón River could have flowed into the Aviles Estuary in recent geological times. Afterwards, its trajectory would have been modified in the middle/lower course due to a hypothetical fluvial capture of Caudal River at Nalón River.

For this, there have been realized several analyzes with the ArcGIS 9.3 software tools, using the LIDAR Digital Terrain Models (IGN) and the DTM and lithological cartography of Asturias published by the Principado de Asturias with pixel size of 5 m and scale 1:25000, respectively.

From methodological point of view, ArcHydro Tools for ArcGIS extension have been used, following all the steps to obtain a hidrologically correct digital model.

The altitude difference determined from Digital Elevation Model, DEM, is 2,414 m. Another DTMs have been derived from DEM: Slope (average around 24 °), Aspect (predominantly north facing), Shading, Relief Index, Flow Directions and Flow Accumulated. Fluvial longitudinal profiles of the major rivers of the basin have been built: Nalón, Narcea, Caudal and Nora. 12 cross sections on the bed of the Caudal River and 24 on the bed of the River Nalón (12 upstream and 12 capture downstream) have also been built. Hypsometric integral takes a value of 36. The Nalón River is order 6 following Horton-Strahler method.

The results, if doesn't permit to affirm that the capture took place neither dismiss that possibility.

Agradecimientos

Quiero agradecer en primer lugar a mis padres, ya que sin ellos, sin su ayuda y apoyo, jamás habría llegado hasta aquí.

A mi tutora, María José, quien además de guiarme en esta andadura puso un punto de cordura en esos momentos (que no fueron pocos) en los que "cundió el pánico" y nada parecía posible.

A mis amigos, que no simples compañeros, con los que compartí cada momento de estos dos bonitos años.

A Laura, Pablo, Belén y Daniel, por su ayuda y consejos, pero sobre todo por los buenos ratos que pasé con ellos.

Y a ti, que siempre tienes la palabra exacta, en el momento exacto.

Gracias.

Contenido

Resumen	i
Abstract	ii
Agradecimientos	iii
1. INTRODUCCIÓN	2
1.1 Zona de estudio	7
1.2 Clima	8
1.3 Geología.....	10
2. METODOLOGÍA	13
2.1 Recopilación de la información	13
2.2 Realización de modelos digitales del terreno.....	14
2.3 Pretratamiento de la información	20
2.4 Procesado de la información mediante <i>Archydro Tools</i>	21
2.5 Jerarquización de la red de drenaje	31
2.6 Elaboración de los perfiles fluviales.....	32
2.7 Hipsometría: Curva e Integral Hipsométrica	34
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	36
3.1 Litologías presentes en la cuenca	37
3.2 Recubrimientos superficiales presentes en la cuenca	39
3.3 Dinámica fluvial: jerarquización de la red y perfiles	44
3.4 Hipsometría.....	52
4. CONCLUSIONES	56
5. BIBLIOGRAFÍA	58

1. INTRODUCCIÓN

La Cordillera Cantábrica constituye una cadena montañosa de más de 400 km que se extiende a lo largo del borde norte de la Península Ibérica, cuyo levantamiento se produjo durante la Orogenia Alpina. Sobre este sistema alpino, se encaja la red hidrográfica que se presenta como un conjunto de cauces que drenan hacia el Mar Cantábrico en la vertiente norte y otro que drena hacia el sur, desembocando en el Océano Atlántico o en el Mar Mediterráneo.

Desde el momento en que se elevaron los relieves de la Cordillera Cantábrica, en el Oligoceno (Farias y Marquínez, 1995), éstos comenzaron a ser desmantelados mediante los distintos procesos erosivos, entre los que destaca por su eficacia la dinámica fluvial. Las aguas superficiales se dividieron, discurriendo unos hacia la Meseta castellana, al sur, mientras al norte se instalaron ríos que, actualmente siguen tallando sus valles en el bloque elevado de la cordillera. El trazado de los ríos asturianos tiene su origen en el rápido encajamiento de los valles fluviales que se produjo a finales del Terciario, en relación con las abundantes precipitaciones que caracterizaron el periodo (Flor, 1992).

En un orógeno, cabe esperar que los ríos fluyan a favor de la pendiente regional, es decir, transversales a la cadena montañosa (Hovius, 1996). Por el contrario, en las zonas externas del orógeno las estructuras compresivas, pliegues y cabalgamientos, pueden desviar los ríos y originarse tramos longitudinales (Van der Beek et al., 2002). Debido al engrosamiento de la corteza en los flancos de las cordilleras, se ve favorecida la formación de ríos transversales. Con el tiempo, los ríos ganarán energía potencial y capacidad erosiva. Esto favorece que sucedan las capturas fluviales de tramos longitudinales por ríos transversales (Babault et al., 2007). Dado que la capacidad erosiva de un río en cada punto depende de la erosionabilidad del material atravesado, del flujo del agua y de la pendiente, es esperable que los ríos transversales ganen poder erosivo según progresa la deformación. Los ríos asturianos tienden a circular desde la cordillera hacia el mar por el camino más corto, es decir, con una disposición norte-sur. Esto, en el occidente de Asturias, resulta más fácil debido a la idéntica orientación de los materiales del sustrato lo que ayuda a los ríos a seguir la trayectoria. Aunque existen excepciones en cuanto al trazado, la elevación de bloques con disposición variada en la deformación alpina (Farias y Marquínez, 1995) obligó a que ciertos ríos tuvieran que cambiar su trayectoria. Así, el Río Narcea desvía su trazado hacia el noroeste con el objeto de evitar la Sierra de Tineo. Por su lado, el trazado del Río Nalón con dirección

sureste-noroeste, se adapta al borde del bloque elevado de la Falla de Ventaniella (Farias y Marquínez, 1995).

La morfología de los ríos de Asturias varía a lo largo de su trayectoria dependiendo del tramo en el que nos encontremos y de las litologías que atraviesen (Fernández Rodríguez et al., 1997). Así, aparecen cauces rectos de grandes pendientes e irregulares en las zonas de cabecera mientras que, a medida que se van acercando a la zona de desembocadura, la disminución de la pendiente hace que sean frecuentes los depósitos de llanura aluvial en el fondo de los valles, apareciendo sobre ellos meandros (Peón y Flor, 1993).

En cuanto a su dinámica fluvial los ríos asturianos reciben un aporte de aguas de lluvia importante y regular con medias de 973 mm/año según la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) que, en el caso del Río Nalón, alcanza valores de pluviosidad máxima de 1800 mm/año (Jiménez Sánchez, 2001). A pesar de la reducida extensión de sus cuencas fluviales son ríos caudalosos lo que, junto con sus grandes pendientes, les confiere una gran capacidad erosiva.

En ocasiones se producen desviaciones en el drenaje de una corriente fluvial debido a la erosión remontante de otra, ocurriendo lo que se denomina una captura fluvial. Una captura fluvial, es el proceso por el cual un río obliga a otro a cambiar su curso y a convertirse en su tributario. Esto suele ocurrir cuando en un lado de la divisoria existe un gradiente de pendiente mayor que en el otro lado. La vertiente que cuenta con mayor gradiente tiene más energía por lo que es frecuente que sus valles se prolonguen cabecera arriba llegando a romper la divisoria y capturando la red de drenaje más lenta. A menudo, los procesos de captura fluvial generan cambios drásticos en la red de drenaje. El cauce resultante de un proceso de captura fluvial suele presentar una geometría típica de codo de captura. Un codo de captura no es más que un giro brusco o quiebro en la dirección seguida por el cauce. Suele ser el elemento más representativo a la hora de identificar una captura fluvial. Aunque esto no tiene por qué ocurrir, cuando ocurre no siempre se da en el momento exacto de la captura sino que puede producirse con anterioridad a la captura siguiendo luego, el cauce, un trazado más rectilíneo. Una captura explica también la existencia de gargantas estrechas y laderas empinadas que no son atravesadas por corrientes activas. Estos cursos de agua abandonados se forman cuando el curso de la corriente que corta el desfiladero cambia su curso por una captura.

Las capturas entre dos cuencas fluviales se producen por diferencias en el nivel base de ambas y por la disposición transversal de una. Las capturas por retroceso de las cabeceras se producen por “erosión regresiva” y son realizadas por el río conquistador en sentido contrario a la corriente. Podemos intuir una capturar si:

- a. Se observa un fuerte encajamiento en contraste con un relieve alrededor suave.

- b. El valle tiene una amplitud que difiera con un escaso caudal.
- c. Existen valles muertos o abandonados.

Al producirse la captura de un cauce, se pueden originar distintos fenómenos geomorfológicos:

1. Evolución diferencial en la configuración del paisaje en torno a la red de drenaje afectada (Teeuw, 1991)
2. Reorganización de la red de drenaje por decapitación y desviación de los cursos fluviales (Bishop, 1995).
3. Variaciones en la sinusoidad de los cauces (Deshaies y Weisrock, 1995).
4. Redirección en el aporte de sedimentos provocando cambios en el balance sedimentario (Dingley y Hendey, 1984; Clayton, 1994). Si un río pasa a ceder su caudal a otro, también pasaría al segundo la carga que éste transporta y proviene de la cabecera del primero. Y si el segundo tenía un predominio del transporte frente al depósito, ante el nuevo aporte de otro río pasa a predominar el depósito frente al transporte al llevar más carga y ser incapaz de soportarlo. El depósito se produce por medio de formas de transición de escaso relieve como son los “sheets” (láminas de sedimentos) que se depositan sobre las barras en las primeras fases de descenso de la crecida. Aunque no se aprecien grandes cambios, las barras crecen por acreción lateral y hacia la cabecera. La incisión de los canales evidencia el predominio de la erosión. Esto quiere decir, que si la barra es inactiva y si cambia el régimen sedimentario se producen pequeños depósitos sobre los laterales que pueden ser reconocibles.
5. Cambios en el área de drenaje de los cursos fluviales implicados. Según se ha demostrado experimentalmente, durante una captura aumenta el área de drenaje del canal que captura y disminuye el área del canal capturado, de modo que los procesos de captura naturales deben modificar las tasas de transferencia de sedimentos y la localización de los cuerpos clásticos proximales (Vilaplana, 2012).
6. Cambios en los niveles de base locales y regionales (Harvey et al., 1995).

La cuenca del Nalón es la cuenca hidrográfica más importante de Asturias en cuanto a extensión, con 4.899,4 km² de superficie, lo que supone un 46,20% del territorio asturiano. Además, el Nalón es el río asturiano de mayor longitud y el más caudaloso, con un recorrido total de 145 km y un caudal medio de 81 m³/seg medido tras unírsele el Narcea, que cuenta con una longitud de 123 km, constituyendo el segundo río en longitud de Asturias. La cuenca Nalón-Narcea ocupa toda la zona central de Asturias y constituye la red hidrográfica más desarrollada de la vertiente cantábrica de la Península Ibérica.

Desde el punto de vista geológico, comprende casi toda la Cuenca Carbonífera Central, el extremo meridional de la Región de Mantos y gran parte del Anticlinal del Narcea (Figura 1).



Figura 1: Cuenca hidrográfica del Río Nalón sobre la síntesis geológica de Asturias.

Los ríos de esta cuenca, discurren a través de una gran diversidad de materiales geológicos: lutitas, areniscas, cuarcitas, calizas, lutitas con carbón, dolomías y margas que condicionan en mayor o menor medida el perfil transversal del valle por donde transcurre el río. La estructura geológica de estos materiales, intensamente plegados y fracturados durante las orogénias Hercínica y Alpina, dibuja un arco cóncavo hacia el Este denominado "Rodilla asturiana", disponiéndose la mayoría de los ríos de la zona occidental de esta cuenca en paralelo a estas estructuras mientras que en la zona oriental lo hacen de forma transversal.

El Río Nalón, el más largo y caudaloso de Asturias, circula en la misma dirección Sureste-Noroeste, que la Falla de Ventaniella y su trayectoria se ha asociado tradicionalmente a dicha falla (Alonso et al., 2007). Sin embargo ambos trazados, el de la falla y el del cauce del río, únicamente son coincidentes en la cabecera del Río Nalón, alejándose éste de la fractura aguas abajo, hacia el Oeste (Figura 2).

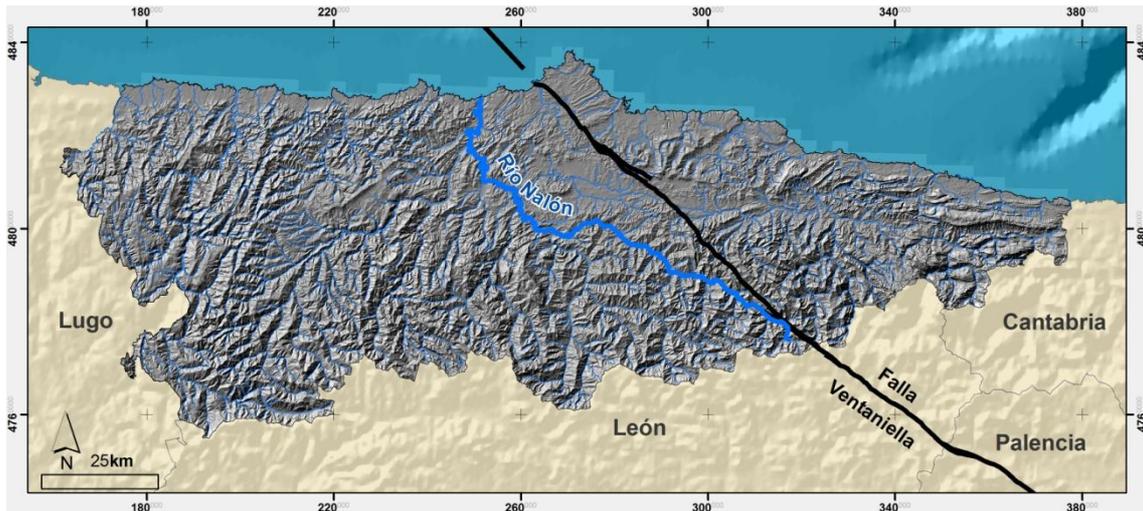


Figura 2: Situación del cauce del Río Nalón en relación a la Falla de Ventaniella según la posición definida por Fernández-Viejo et al., 2014.

En este trabajo se plantea la posibilidad de que el Río Nalón haya modificado su trayectoria en tiempos geológicos recientes desde la mitad de su recorrido hasta su desembocadura en el Mar Cantábrico. Así, según esta propuesta, en origen el desagüe del Río Nalón en el mar, no se ubicaría en su posición actual, sino en la Ría de Avilés, donde, actualmente, desemboca el Río Alvares, con una superficie vertiente de apenas 200 km². Posteriormente, el Río Caudal, actual afluente del Río Nalón, habría capturado al Nalón, dejando desconectada la desembocadura en Avilés de la zona alta. Más tarde, el río Nora también habría variado su recorrido, como ya han sugerido algunos autores (Llopis, 1954), siendo a su vez capturado por el "nuevo" Río Nalón e incorporándose a éste por la parte norte del Monte Naranco, en vez de por el sur de dicho Monte, en las inmediaciones de la ciudad de Oviedo. Esta hipótesis -totalmente rompedora- ayudaría a confirmar algunas de las teorías tradicionales, como la asociación entre el trazado del Río Nalón y la Falla de Ventaniella. Asimismo, se explicaría mejor tanto la posición como el gran desnivel del Cañón de Avilés (4.600 m en 12 km), que no estaría únicamente relacionado con un origen tectónico, sino también fluvial.

Además de la propia presencia y la envergadura del Cañón de Avilés, existen otros argumentos a favor de esta hipótesis, como: i) la gran acumulación de arena tanto en la propia Ría (o Estuario) de Avilés, como en la playa alledaña de Xagó; ii) la geometría del actual Río Nalón, con un posible codo de captura en su parte media; iii) los cambios en el trazado del Río Nalón y algunos afluentes en su parte media, con tramos rectilíneos y otros con meandros, todos ellos encajados; iv) la presencia de depósitos fluviales en cotas altas atribuibles a las antiguas trayectorias del Nalón y del Nora; v) la presencia de restos arqueológicos a lo largo de gran parte del recorrido del Río Nalón, incluyendo la zona de la antigua trayectoria; vi) la presencia de grandes masas

deslizadas en las vertientes del Río Caudal, que habría capturado al Río Nalón; entre otros.

Teniendo en cuenta todo lo anterior, se plantea este trabajo cuyo objetivo fundamental es estudiar la actual cuenca hidrográfica del Río Nalón mediante las herramientas de un Sistema de Información Geográfica. Con ello se pretende detectar indicios que apoyen o descarten la hipótesis de una captura reciente de dicho río.

1.1 Zona de estudio

El área de estudio constituye la cuenca del Río Nalón y ocupa toda la parte central del Principado de Asturias y cuya red hidrográfica es la mejor desarrollada de la vertiente cantábrica de la Península Ibérica (Figura 3). La cuenca del Nalón, incluyendo la subcuenca del Narcea, afluente principal por su margen izquierda, cuenta con una superficie de 4.899,4 km². El relieve de la zona es, en general, abrupto aunque debido a la variedad de ambientes existen muchos cambios en el relieve. En la cabecera las cotas superan los 1.600 metros con importantes pendientes a salvar en los primeros tramos del río, mientras que el relieve se va suavizando a medida que se acerca a la zona estuarina, donde el relieve es mucho más suave, sin apenas desnivel.

Los límites de la zona de estudio son por el Oeste las sierras de Degaña, Rañadoiro, Arganza Valledor, Los Lagos y del Palo, que la separan de la cuenca del Río Navia. Por el Este, el límite lo forman el Cordal de Ponga y las sierras de Pandemules. Por el Sur, la divisoria que va desde el Puerto de Tarna hasta la Sierra de Degaña separa la cuenca del Nalón de las cuencas del Duero y del Miño. Las sierras de Tineo y Fontenova, junto con los cordales que unen los picos Gorfolí y Peña Menéndez, forman el límite con las cuencas costero-litorales.

Si se divide la cuenca en dos subcuencas, del Nalón y del Narcea. La subcuenca del Nalón incluye terrenos de los concejos de Caso, Sobrescobio, Laviana, San Martín del Rey Aurelio, Langreo, Ribera de Arriba, Oviedo, Grado, Las Regueras, Candamo, Pravia, Soto del Barco y Muros del Nalón. La subcuenca del Río Narcea incluye parte de los concejos de Cangas del Narcea, Tineo, Belmonte de Miranda, Salas y Pravia.

La cota más elevada que se alcanza en la cuenca es la de 1600 m en Las Fuentes del Narcea, lugar donde se localiza el nacimiento del Río Narcea.

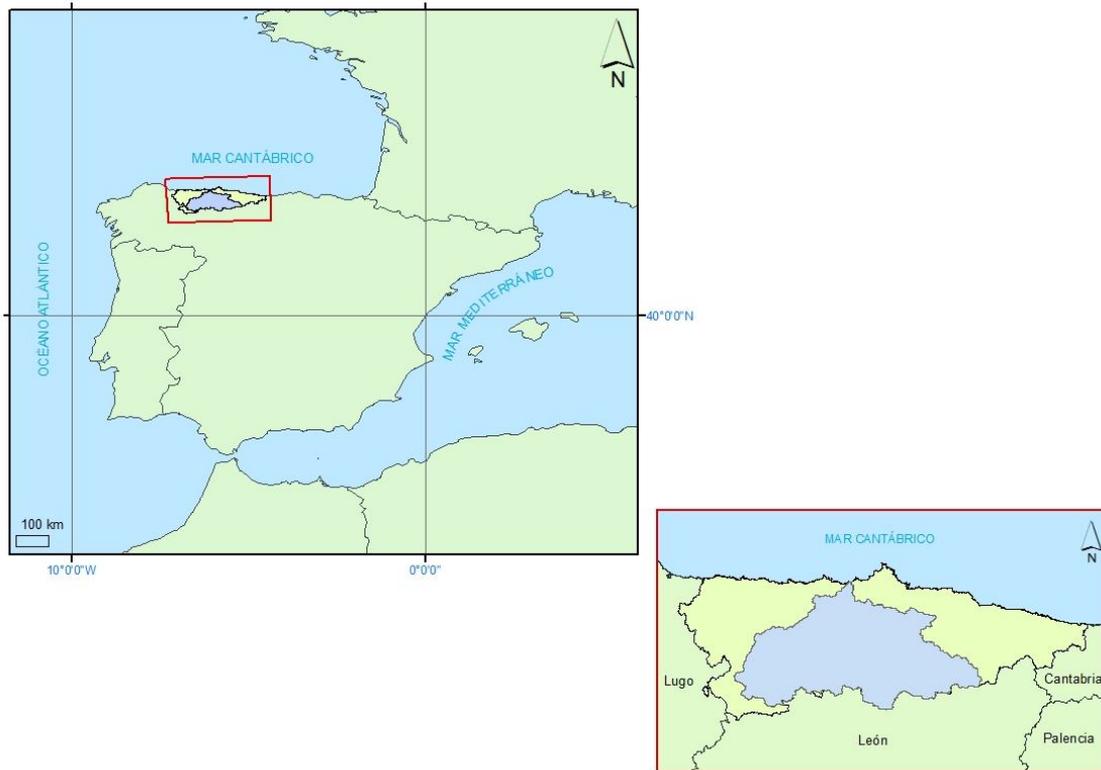


Figura 3: Situación del área de estudio.

1.2 Clima

En lo que respecta al clima, Asturias muestra características típicas de un clima sometido a una fuerte influencia atlántica, como son abundantes y regulares precipitaciones y temperaturas suaves a lo largo de todo el año. Por su posición entre el Mar y la Cordillera cantábrica y debido a su situación aproximadamente en el paralelo 43° N, Asturias se ve influenciada por los vientos húmedos de componente norte que proceden de altas latitudes y que son los que determinan las lluvias copiosas y regulares.

La cuenca del Río Nalón abarca los dominios climáticos del interior, centro y litoral asturiano. En la zona de la Cuenca Carbonífera Central la media de las temperaturas máximas anuales se sitúa entre los 10-16 °C y las mínimas entre los 2-7 °C (Felicísimo, 1990) (Figura 4). En zonas más cercanas al litoral, por la influencia del mar, las temperaturas se ven suavizadas siendo las máximas con medias de 18 °C y las mínimas situadas entre los 9 °C.

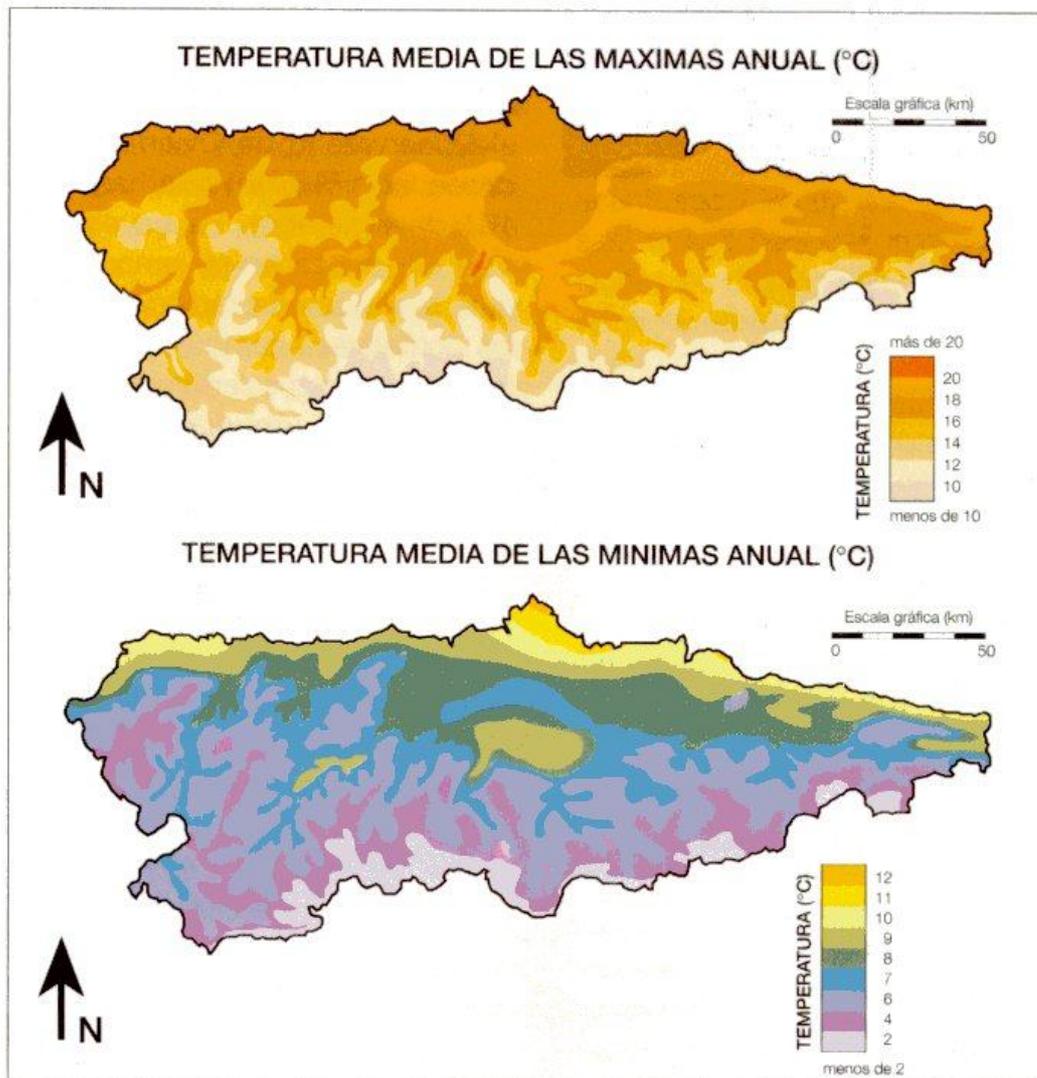


Figura 4: Distribución de temperaturas medias máximas y mínimas anuales de Asturias (Felicísimo, 1990).

En la Figura 5 se observa que las lluvias anuales en Asturias varían desde los 900 hasta más de 2000 I/m². La primera circunstancia que salta a la vista es que existe una estrecha relación entre la precipitación y la altitud, de forma que los mínimos se registran en la costa y los máximos en las zonas más elevadas de la montaña. Este es el rasgo más importante del reparto de las lluvias en Asturias, cuyo origen está en un fenómeno denominado *efecto de ladera* (Felicísimo, 1990). Dado que las tierras montañosas sirven de obstáculo a las nubes que avanzan desde el mar empujadas por vientos NW y N, determinan estancamiento y lluvias persistentes, por ello, salvo en altas cumbres es más lluviosa la costa que el interior. Los registros de precipitaciones medias son del orden de 1000-1500 mm/año en altitudes comprendidas entre el nivel del mar y los 600 m de altitud y subirían hasta alcanzar incluso los 2000 mm/año en áreas de alta montaña.

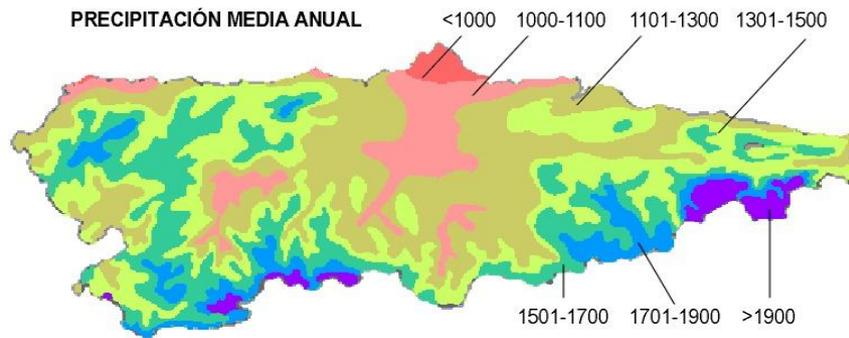


Figura 5: Distribución de precipitaciones medias anuales en Asturias (Felicísimo, 1990).

1.3 Geología

La capa litológica publicada por el Principado de Asturias (año 2002) a escala 1:25.000 dentro del Plan de Cartografía Temática Ambiental del Principado de Asturias, permite definir las formaciones geológicas presentes en el sustrato de la cuenca del Río Nalón (Figura 6). Agrupadas por edades, las más características según su extensión son:

- Precámbrico y Cambro-Ordovícico con una extensión aproximada del 31 % sobre el área total. Dentro de este grupo predominan litología detríticas como las Pizarras del Narcea o la Fm. Barrios, aunque también tiene importancia la Fm. Láncara de naturaleza calcárea.
- Silúrico, Devónico y Carbonífero Pre-orogénico con una extensión del 26% de la superficie total de la cuenca, donde las formaciones predominantes son el Grupo Rañeces, de naturaleza mixta y la Caliza de Montaña de naturaleza calcárea.
- Carbonífero Sin y Post-orogénico ocupando un 31% de la superficie total de la cuenca. Dentro de este grupo las más representativas son las formaciones Grupo Lena y Grupo Sama, ambas de naturaleza detrítica junto con el Paquete Levinco (primer tramo productivo, subhullera) también de naturaleza detrítica.

Centrándonos en las formaciones más características de la cuenca de estudio:

Grupo Lena y Grupo Sama conocidos como grupos en la actualidad (Aller, 1986) se trata de dos conjuntos litoestratigráficos sucesivos que en la Cuenca Carbonífera Central se superponen a la Caliza de Montaña. Se conoce como Grupo Lena aquel en el que predominan las bandas calcáreas intercaladas en una serie pizarrosa, mientras que en el Grupo Sama estas bandas están representadas por areniscas. Las capas de carbón son frecuentes en el Grupo Sama, aunque también se encuentran en la parte superior del Grupo Lena.

Fm. Láncara fue definida por Comte (1937) de naturaleza carbonatada, Zamarreño (1972) distingue dos miembros. Un miembro inferior dolomítico que gradualmente pasan a calizas por lo que en el miembro superior encontramos calizas grises (Julivert, 1967) que pasan hacia techo a otras calizas nodulosas de tonalidad rojiza denominadas “Griotte”.

Fm. Barrios definida Comte (1937) como “Cuarcita de Barrios”. Se diferencian tres miembros: un miembro inferior constituido por cuarzoarenitas que adoptan una secuencia granocreciente hacia techo, a este miembro se le conoce como la Matosa; el miembro intermedio, Ligüeria (Aramburu, 1984) que de muro a techo presenta: conglomerados, areniscas de grano grueso a fino y lutitas; y en el miembro superior conocido como miembro Tanes se presenta una litología semejante al tramo inferior.

Primer tramo productivo subhullera-Paquete Levinco: definido por García-Loygorri et al. (1971) se trata de una serie monótona con pizarras arcillosas y calcáreas, areniscas, pudingas, calizas, cuarcitas y carbón en ciclos repetidos en 2000 m de espesor.

Caliza de Montaña: se trata de una de las sucesiones más representativas de Asturias. Se diferencian dos formaciones Barcaliente y Valdeteja (Wagner et al. 1971).

- Valdeteja: entre 100 y 200 m de calizas gris claro, masivas con intercalaciones pizarrosas. En algunas zonas se le superpone un importante nivel de calizas (Caliza de Peña Redonda) que en la Cuenca Carbonífera Central se incluye en el Paquete Levinco.
- Barcaliente: localizada sobre la “Griotte”, consta de calizas micríticas gris negruzcas, fétidas y laminadas. En regiones orientales pueden llegar incluso a los 500 m de espesor y va desapareciendo al oeste.

Grupo Rañeces-La Vid: la primera referencia sobre esta unidad data de Comte (1959). Este conjunto recoge las formaciones Caliza de Nieva, Caliza de Ferroñes y Caliza de Arnao (Barrois, 1882). Más adelante se individualizan cuatro miembros dentro del grupo. En los afloramientos cercanos al Cabo de Peñas, se encuentra constituido de muro a techo por: Calizas de Nieva, Dolomía de Bañugues, Calizas y Pizarras de Ferroñes y Calizas y Margas de Aguión. Estas formaciones plantean problemas en su delimitación si nos alejamos de la costa. A pesar de ello, se mantiene la denominación Grupo Rañeces en toda la región asturiana. En la zona central de Asturias se subdividió en cinco unidades litoestratigráficas (Vera de la Puente, 1988) calcáreo-margosa inferior, dolomítico-areniscoso, calcáreo-lutítica, calcáreo-margoso superior y terrígena del Aramo. Las cuatro primeras se encuentran de muro a techo en la mayor parte de la

zona. La quinta representa un cambio lateral de facies, quedando relegada hacia el sur de Oviedo.

Pizarras del Narcea: fueron Lotze (1956) y Sitter (1961) los primeros en describir los materiales que constituyen el Precámbrico en la región del Antiforme del Narcea considerando que se trataba fundamentalmente de pizarras y areniscas. Pérez-Estaún (1973, 1975) establece una sucesión en la región S del antiforme diferenciando dos series: areniscas y pizarras alternantes. Aunque una correlación precisa a lo largo de todo el antiforme no puede ser establecida, se propone una sucesión estratigráfica compuesta por areniscas y pizarras.

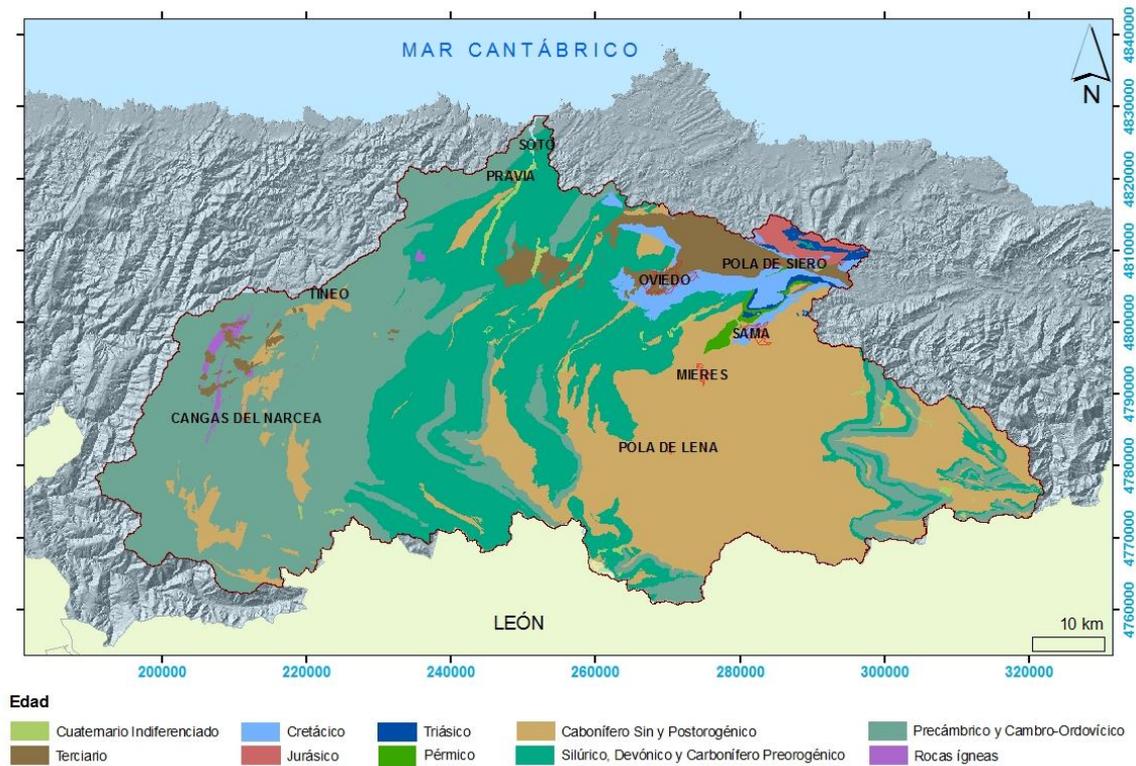


Figura 6: Distribución de litologías según su edad presentes en la cuenca del Río Nalón.

2. METODOLOGÍA

El apartado metodológico ha incluido la realización de las siguientes tareas: 1) recopilación de información; 2) realización de los modelos digitales del terreno; 3) pre tratamiento de la información; 4) procesado de la información mediante ArcHydro Tools; 5) elaboración de los perfiles fluviales; 6) jerarquización de la red de drenaje; 7) hipsometría.

2.1 Recopilación de la información

En primer lugar se ha llevado a cabo la recopilación de la información cartográfica más reciente disponible para el territorio objeto de estudio. La digitalización, almacenamiento y tratamiento de la información se ha llevado a cabo mediante el software de la casa comercial ESRI, ArcGIS, versión 9.3. Además, se ha utilizado la extensión ArcHydro Tools versión 1.4.

La información digital se almacena en capas tanto vectoriales como *raster* que se gestionan mediante dicho software. Las capas vectoriales corresponden a información almacenada en polígonos (capas de litología del sustrato, de formaciones superficiales y de embalses) o en líneas (capas de ríos y de posición de los perfiles transversales a los ríos).

La información topográfica utilizada en este trabajo procede de las siguientes fuentes de información: i) mapa topográfico digital a escala 1:5.000 y Modelo Digital del Elevaciones (MDE) de pixel 5 m, publicados por el Principado de Asturias en el año 2008; ii) modelo digital del terreno LIDAR descargado a través del Centro de Descargas del Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG) realizado a partir de vuelos fotogramétricos del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) con resolución de 25-50cm/píxel y iii) cartografía litológica y de recubrimientos superficiales obtenidos a partir de la Cartografía Temática Ambiental del Principado de Asturias a escala 1:25.000 publicada a través de la Consejería de Infraestructuras, Política Territorial y Vivienda en el año 2002.

La capa correspondiente a los ríos de Asturias se ha extraído del mapa topográfico digital publicado por el Principado de Asturias a escala 1:5.000. La red fluvial ha sido editada para poder ser utilizada posteriormente en el procesado de los modelos digitales del terreno con la herramienta ArcHydro. Para construir los modelos relacionados con la red de drenaje, hubo que editar y modificar este *shape* en algunos puntos. El primer

paso consistió en generar una nueva capa con los ríos principales de nuestra zona de estudio: Río Caudal, Río Nora, Río Narcea y Río Nalón; para ello, se seleccionaron estos ríos y se exportaron los datos a un nuevo *shape* (*Data/ExportData_Export Selected features*) (Figura 7).

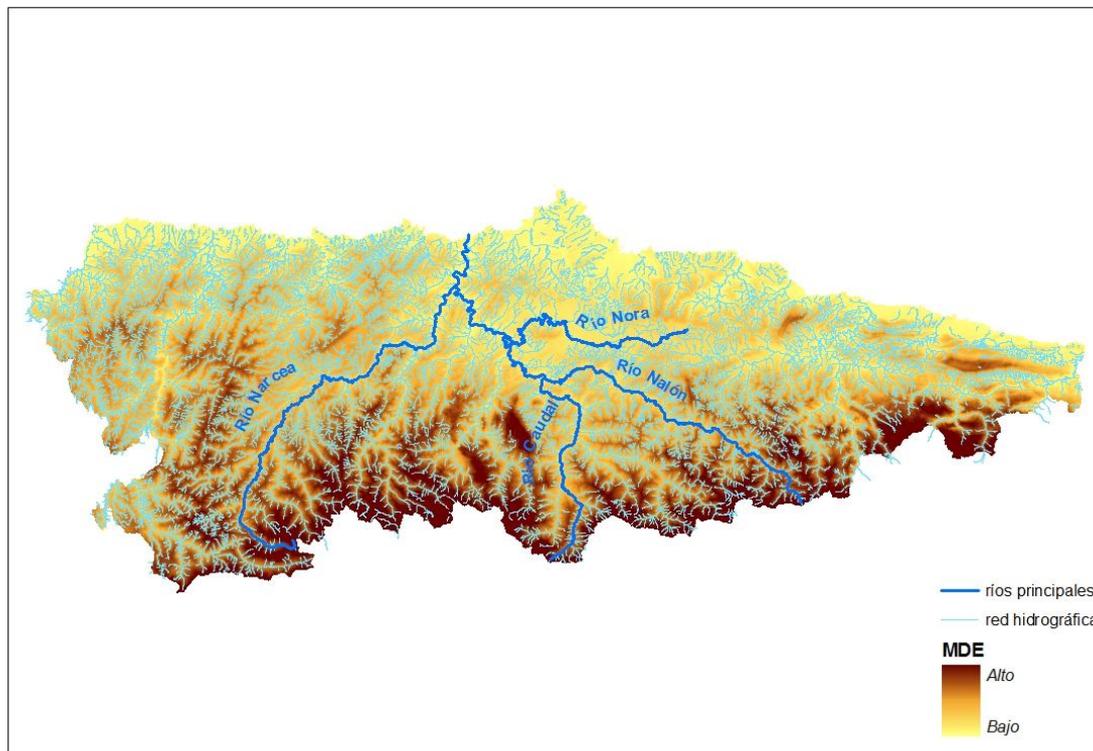


Figura 7: Ríos principales de la cuenca del Río Nalón.

2.2 Realización de modelos digitales del terreno

Un modelo digital del terreno es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua (Felicísimo, 1999). El Modelo Digital de Elevaciones (MDE) describe la altimetría de una zona mediante un conjunto de datos acotados que representan la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno (Felicísimo, 1994). En este caso se ha utilizado el MDE publicado por el Servicio de Cartografía del Principado de Asturias en el año, con un tamaño de celda de 5x5 m.

Partiendo de ese modelo, se han generado una serie de modelos derivados, como el Modelo Digital de Pendientes, el de Orientaciones el de Sombreado y el de Índice de Relieve.

El Modelo Digital de Pendientes (MDP), de tamaño de pixel 5x5 m, se ha derivado a partir del MDE mediante el comando *Spatial Analyst Tools/Surface/Slope*. Según Bosque Sendra (1997), la pendiente se define como la diferencia de altura entre dos

puntos del territorio en relación a la distancia que los separa. La pendiente en un punto del terreno también puede definirse como aquel ángulo que existe entre el vector normal a la superficie en ese punto y la vertical (Felicísimo, 1999). Su estimación a partir del MDE es sencilla ya que se basa en el cálculo de la pendiente de un plano de ajuste en cada celda del modelo. En este caso el MDP representa la variación de cota para cada celda con respecto a las celdas que la rodean (Figura 8).

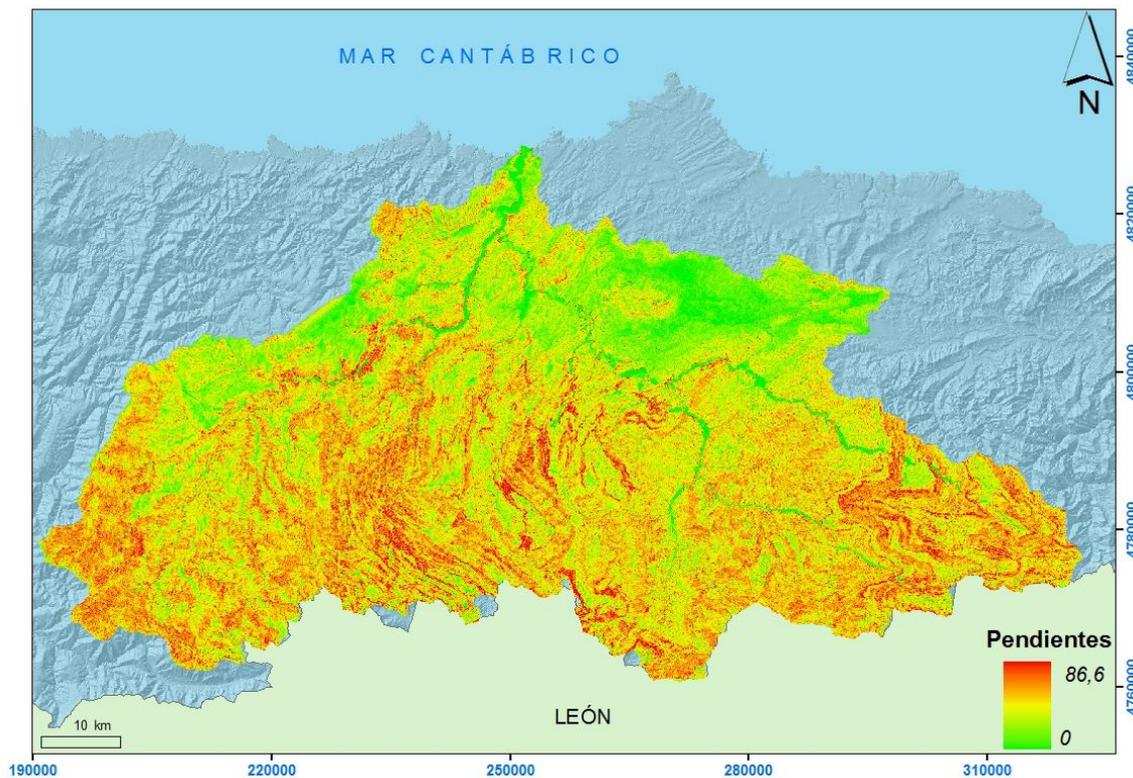


Figura 8: Modelo Digital de Pendientes de la cuenca del Río Nalón.

La orientación en un punto puede definirse como el ángulo existente entre el vector que señala el Norte y la proyección sobre el plano horizontal del vector normal a la superficie en ese punto (Felicísimo, 1999). Al igual que el MDP, el Modelo Digital de Orientaciones (MDO) se calcula a partir del MDE mediante el comando *Spatial Analyst Tools/Surface/Aspect*. Este modelo se basa en la exageración virtual del relieve mediante una iluminación artificial cuya posición del foco se puede elegir (Weibel y Heller, 1991). En este modelo digital, todas las áreas que cuentan con una orientación común toman la misma importancia independientemente de la expresión del relieve (Figura 9).

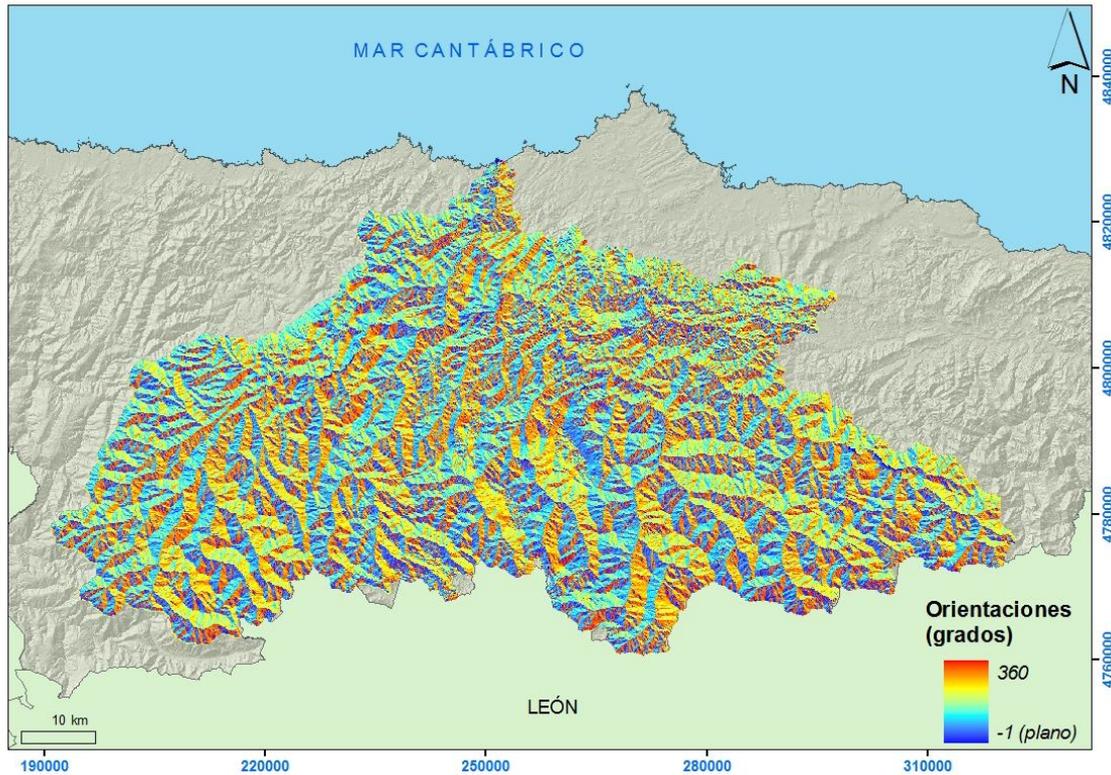


Figura 9: Modelo Digital de Orientaciones de la cuenca del Río Nalón.

El Modelo Digital de Sombreado (MDS) se ha construido mediante la herramienta *Spatial Analys Tools/Surface/Hillshade*. Este modelo permite representar una iluminación hipotética de una superficie apoyándose en los valores de elevación de cada celda. Su precisión está determinada por el MDE del que procede, que en este caso, al igual que los anteriores, es de 5x5 m (Figura 10).

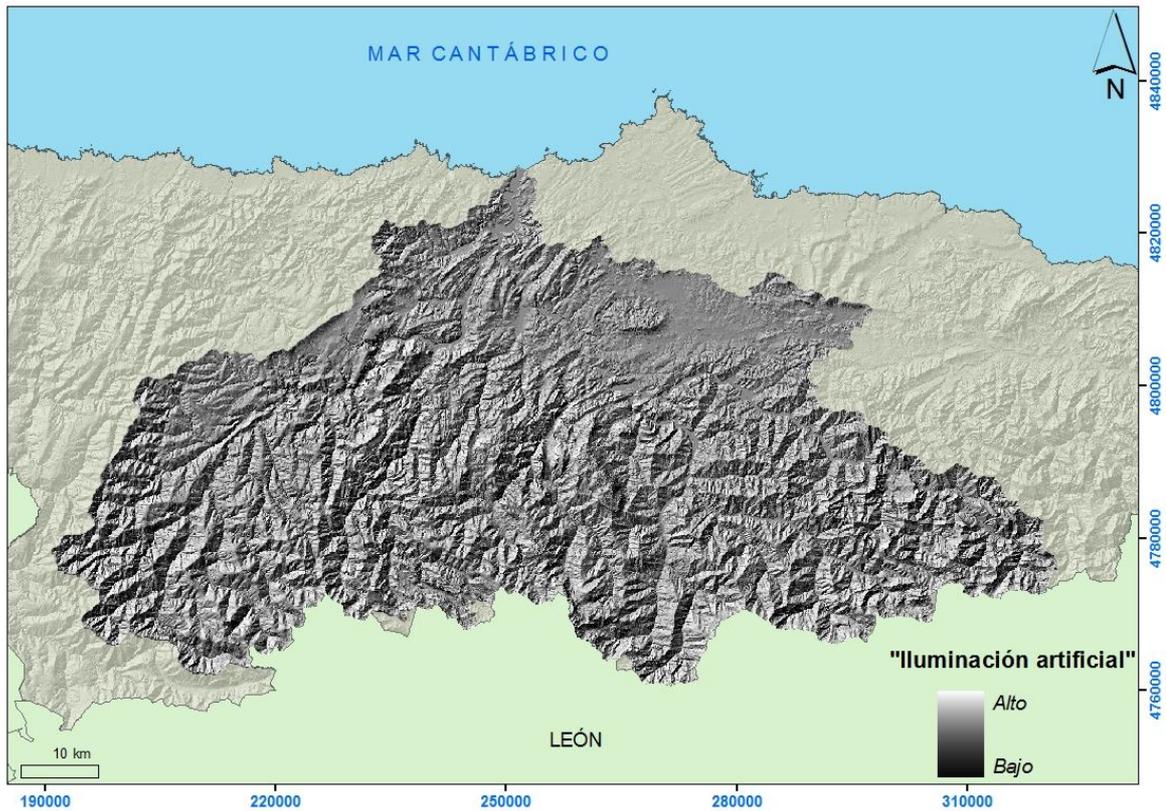


Figura 10: Modelo Digital de Sombreado (*Hillshade*) de la cuenca del Río Nalón.

El Modelo Digital de Índice de Relieve (MDIr) se ha construido con el comando *Spatial Analyst Tools/Neighborhood/Focal_Statistics/tipo_estadístico/Range*. Dicho comando permite asignar a cada celda un valor que representa la máxima diferencia de elevación entre una celda y las 8 adyacentes (Figura 11).

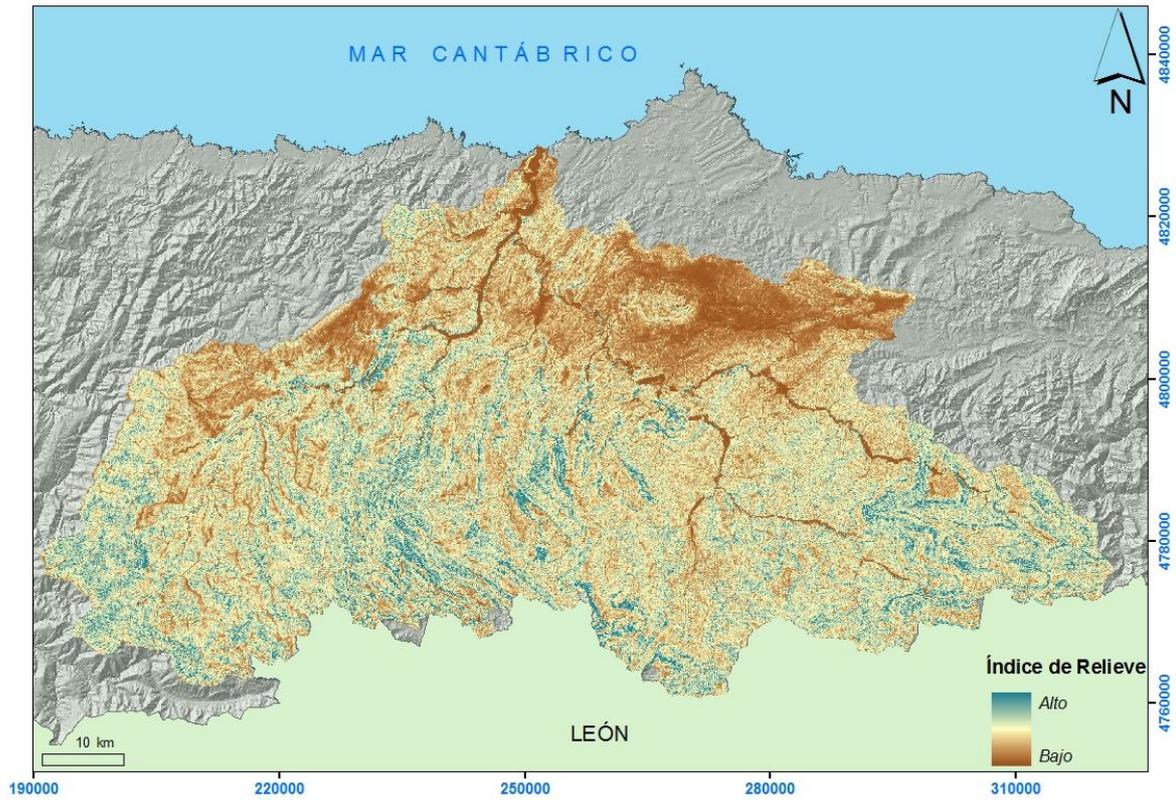


Figura 11: Modelo Digital de Índice de Relieve de la cuenca del Río Nalón.

A partir del MDE también es posible realizar el Modelo de Dirección de Flujo y el Modelo de Flujo Acumulado mediante la extensión ArcHydro para ArcGIS. En primer lugar, a partir del MDE corregido, que es correcto hidrológicamente, se realiza el Modelo de Dirección de Flujo, mediante la herramienta “Flow Direction” (Terrain Preprocessing/Flow Direction) (Figura 12). Lo que hace esta herramienta, es “obligar” al agua de un píxel a salir por una de sus ocho posibles salidas que son los ocho píxeles circundantes. Se sigue la dirección de máxima pendiente hacia el píxel de menor elevación.

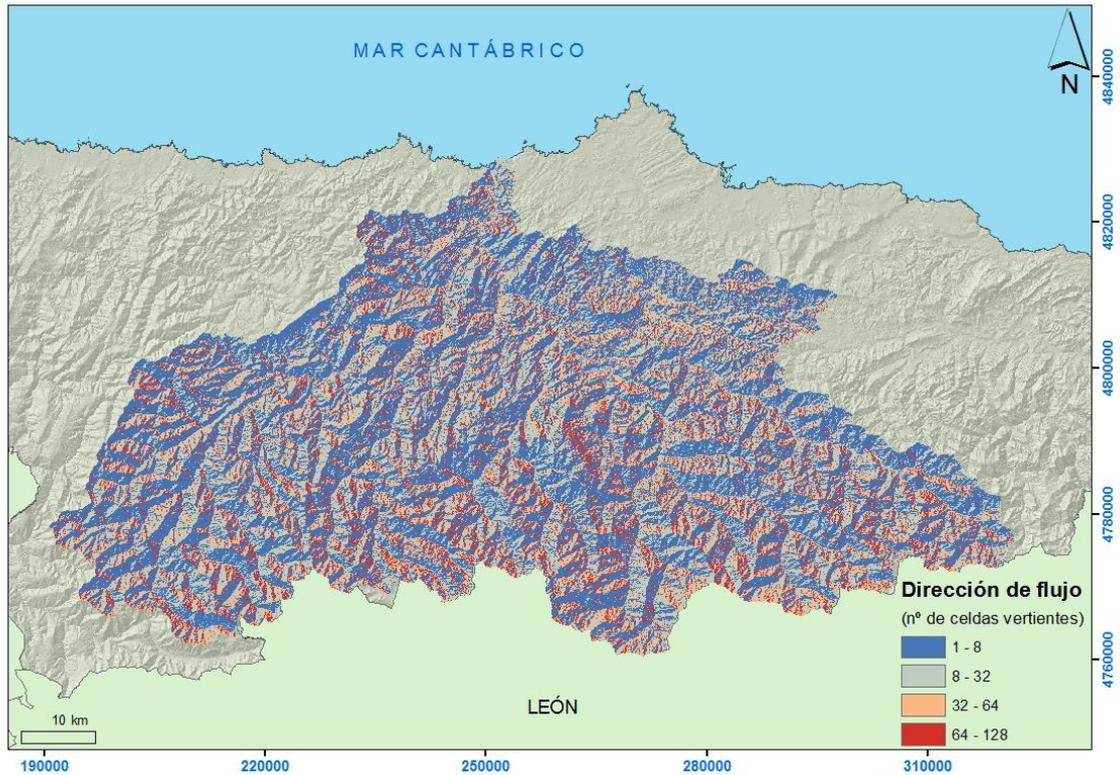


Figura 12: Modelo de Direcciones de Flujo (*Flow Direction*) de la cuenca del Río Nalón.

A partir de éste, se genera el Modelo de Flujo Acumulado con la herramienta *Terrain Preprocessing/Flow Accumulation*. Esta herramienta calcula para cada píxel el número de píxeles que vierten hacia él (Figura 13).

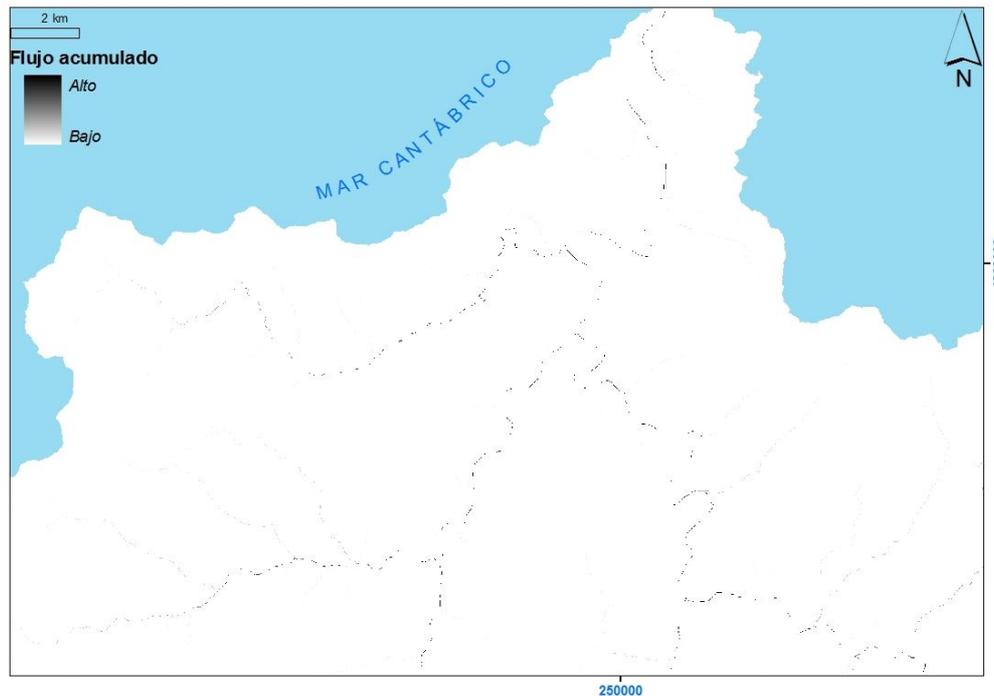


Figura 13: Detalle del Modelo de Flujo Acumulado (*Flow Accumulation*) de la cuenca del Río Nalón en su zona de desembocadura.

2.3 Pretratamiento de la información

Para configurar la capa de litología de la cuenca del Río Nalón se llevó a cabo la unión de las coberturas de ArcInfo para cada hoja 1:25.000 de la zona de estudio mediante el comando *Union* de ArcGIS. Este mismo procedimiento se utilizó para elaborar una capa continua de las formaciones superficiales presentes en la cuenca del Río Nalón a partir de la Cartografía Temática del Principado de Asturias.

Una vez creada la nueva capa de ríos con los cauces del Nalón, Narcea, Caudal y Nora se llevó a cabo un depurado de los mismos ya que las líneas que los conformaban contenían una serie de problemas que impedían utilizarlos en el tratamiento posterior mediante el SIG. Los problemas que se encontraron fue que en ciertos tramos el río estaba digitalizado en sentido contrario por lo que su drenaje teórico era hacia arriba (Figura 14). Para corregir este defecto, se utilizó la herramienta *Flip*. Con el modo edición abierto, se selecciona el tramo a modificar, se hace doble click sobre él y en el menú desplegable que aparece se selecciona la opción *Flip*, de manera automática el tramo cambia su dirección.

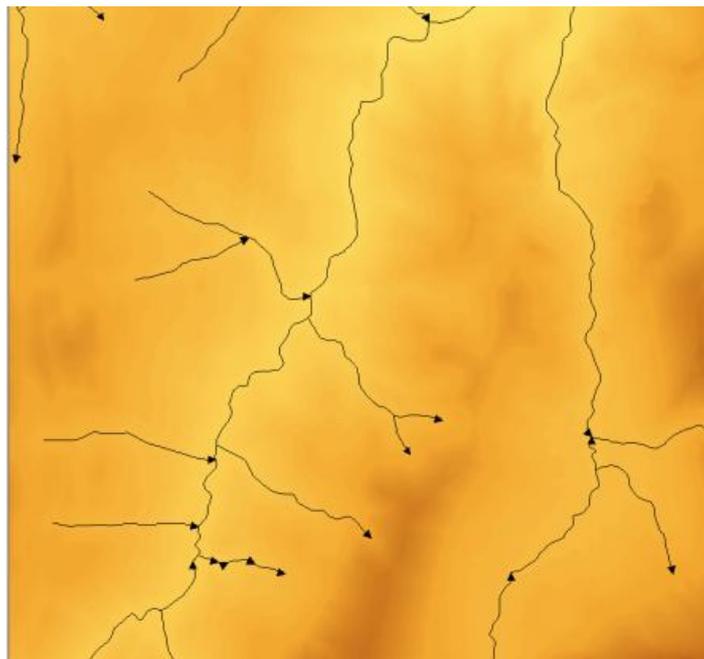


Figura 14: Ejemplos de tramos de río cuya circulación sería hacia arriba, por no estar correctamente digitalizados.

Una vez que todos los tramos siguen el curso del río de forma correcta, el siguiente problema que se encontró fue que muchos de los tramos de cada río no estaban perfectamente unidos (Figura 15: Ejemplo de tramos de río sin unir, con afluentes que no llegan a unirse al cauce principal.) sino que existía cierto desfase entre el punto final de un tramo y el punto inicial del siguiente. Esto supondría un problema a la hora de corregir el MDE, por lo que nuevamente, con el modo editor abierto, en esos tramos, se

procedió a la unión de los extremos con las herramientas avanzadas de edición (*Editor/MoreEditigTools/AdvancedEditing*).

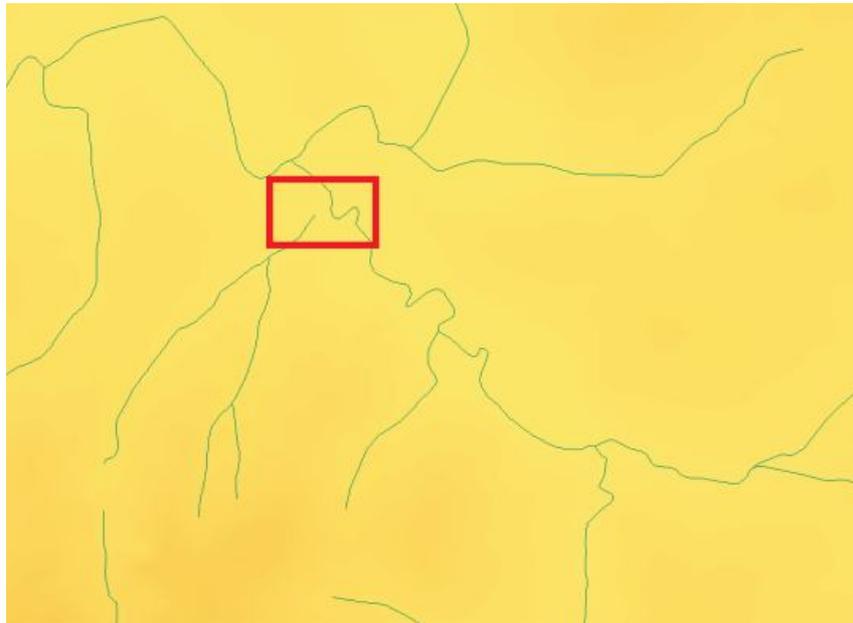


Figura 15: Ejemplo de tramos de río sin unir, con afluentes que no llegan a unirse al cauce principal.

En las partes donde los ríos adquieren una anchura significativa, es frecuente que su representación en el mapa no se haga mediante una sola línea, sino por dos. En estos casos fue necesario editarlos para convertir esos tramos en una única línea.

Por último, a partir del *shape* que contiene los cuatro ríos con todas las modificaciones señaladas anteriormente, se extrajo uno a uno cada río creando *shapes* independientes en los que, con el modo edición abierto, se utilizó la herramienta *Merge* (*Editor/Merge*), para proceder a unir todos los tramos del río en una única línea. El procedimiento supone ir seleccionando los tramos que se van uniendo con la herramienta *Merge* hasta que al abrir la tabla de atributos del *shape*, solo contiene un único registro, es decir, todo el río está representado por una sola línea.

2.4 Procesado de la información mediante *Archydro Tools*

ArcHydro Tools consiste en un conjunto de herramientas que permite trabajar con gran variedad de datos sobre recursos hídricos: balances hídricos, calidad de agua, parámetros morfométricos, etc. Una vez que se dispone de un fichero vectorial (*shape*) de ríos completamente depurado y correcto, se puede realizar el preprocesado del terreno mediante una serie de procedimientos recogidos en la extensión de ArcGIS ArcHydro (ArcHydro1.4.0.256) (Tabla I) y que a continuación se explican en detalle.

Tabla I: Pasos a seguir en el procesado del MDE mediante *ArCHydro Tools*

PASOS	COMANDOS
Preprocesado del terreno teniendo en cuenta los pantanos	<i>Terrain Preprocessing/LevelDEM/Input RawDEM:mde Input LakePolygon:pantanos</i>
Preprocesado del terreno en función de la red de drenaje	<i>Terrain Preprocessing/DEM Reconditioning/InputRawDEM: mde_1 InputAGREEDEM:dem</i>
Asignación de ladera correspondiente a cada corriente Generación de campos "From_node" "To_node" en la tabla de atributos	<i>Terrain Preprocessing/ DEM Manipulation / Assign Stream Slope</i>
Conversión del shape ríos en un shape de puntos	<i>Terrain Preprocessing/ DEM Manipulation/ Burn Stream Slope</i>
Generación de "paredes" exteriores e interiores en la red	<i>Terrain Preprocessing/ DEM Manipulation/ Build Walls</i>
Previsualización de sumideros (definir umbral de superficie)	<i>Terrain Preprocessing/ DEM Manipulation / Sink Preescrining</i>
Evaluación de las características de los sumideros	<i>Terrain Preprocessing/ DEM Manipulation / Sink Evaluation</i>
Elección de los sumideros que se quiere sean considerados como tal	<i>Terrain Preprocessing/ DEM Manipulation / Sink Selection</i>
Rellenado de los sumideros	<i>Terrain Preprocessing/ DEM Manipulation / Fill Sinks</i>
Elaboración del Modelo de Dirección de Flujo	<i>Terrain Preprocessing/ Flow Direction</i>
Elaboración del Modelo de Flujo Acumulado	<i>Terrain Preprocessing/ Flow Accumulation</i>
Creación de shape de puntos "desembocadura"	<i>Arc Catalog / New / Shape</i>
Delimitación de la cuenca de drenaje	<i>Spatial Analyst Tools/ Hidrology/ Watershed Inputs: f_dir / desembocadura</i>
Definición de la red de drenaje	<i>Terrain Preprocessing/ Stream Definition</i>
Transformación a vectorial de la red de drenaje	<i>Spatial Analyst Tools/ Hidrology/ Stream to Feature</i>

Con todos estos pasos se persigue generar un nuevo MDE más correcto que el inicial.

Preprocesado del terreno teniendo en cuenta los pantanos

En un primer paso, dentro del menú "Terrain Preprocessing" se corrige el MDE teniendo en cuenta la posición de los pantanos. Para ello se utiliza la herramienta "Level DEM" (*Terrain Preprocessing/LevelDEM InputRawDEM:mde InputLakePolygon:pantanos OutputAGREEDEM:mde_1*).

Preprocesado del terreno en función de la red de drenaje

El segundo paso es reacondicionar el terreno teniendo en cuenta la red de drenaje. De Nuevo, en el menú *Terrain Preprocessing/DEMReconditioning InputRawDEM:mde_1 InputAGREESTream:ríos OutputAGREEDEM:dem*. Ello permite modificar los datos de elevación del MDE para hacerlos más consistentes con la red de drenaje. En esta herramienta se necesitan definir tres parámetros: *Vector buffer (cells)*, qué es el número de celdas alrededor del vector que define el centro del cauce en que se realizará el reacondicionamiento (daremos como valor: 5); *Smooth drop/raise*, número de unidades que será modificada la elevación de la celda que define el centro del cauce (si el número es positivo se bajará el cauce, si es negativo se elevará) (daremos valor 5) y *Sharp drop/raise*, número de unidades adicionales en que será modificada la elevación de la celda del centro del cauce (en este caso se le ha asignado valor 2) (Figura 16; Martínez García, 2007).

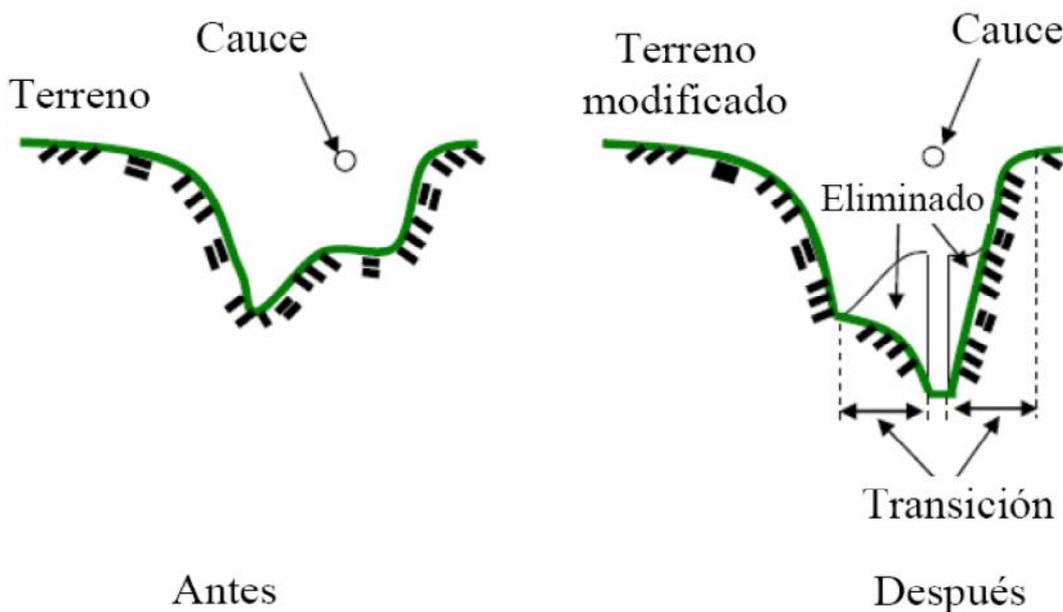


Figura 16: Efecto que el proceso de *reacondicionamiento* (*ArcHydro Tools*) produce en la sección transversal de un río (tomado de Martínez García, 2007).

Tras estos pasos, el MDE sigue sin ser lo suficientemente correcto hidrológicamente y para que lo sea han de seguirse una serie de pasos con las herramientas de la extensión ArcHydro.

Asignación de laderas correspondientes a cada corriente. Generación de campos "From_node" "To_node" en la tabla de atributos. Conversión del shape ríos en un shape de puntos

En primer lugar, se corre la herramienta “*Assign Stream Slope*” (*Terrain Preprocessing/DEM Manipulation/Assign Stream Slope*), la cual genera en la tabla de atributos del shape de ríos los campos “*From_Node*” y “*To_Node*” necesarios en el siguiente paso. Seguidamente, se pasará la herramienta “*Burn Stream Slope*”, disponible en el mismo menú, la cual convertirá el *shape* de ríos, en un *shape* de puntos con los valores que aparecen en los campos creados en el paso anterior “*From_node*” y “*To_Node*”.

Generación de “paredes” exteriores e interiores en la red

Antes de llegar a la evaluación de los sumideros, falta un paso previo, “*Build Walls*”, esta herramienta genera dos tipos de “paredes” en la red de entrada, paredes exteriores y paredes interiores que conducirían el flujo del río. Además se crean una serie de fisuras en esas “paredes” que permitirían que el agua fluya fuera del lecho.

Previsualización de sumideros (definición del umbral de superficie).

Tras ello, ya se puede, previsualizar los sumideros mediante la herramienta “*Sink Prescreening*” (*Terrain Preprocessing/DEM Manipulation/Sink Prescreening*), que permite definir un umbral que establece la superficie mínima que ha de tener un sumidero en el MDE para ser considerado como tal y que sea visualizado. Por ello, si se aumenta su valor, habrá una menor superficie de sumideros visualizados, porque habrá un menor número de ellos que cumplan la restricción (Figura 17).

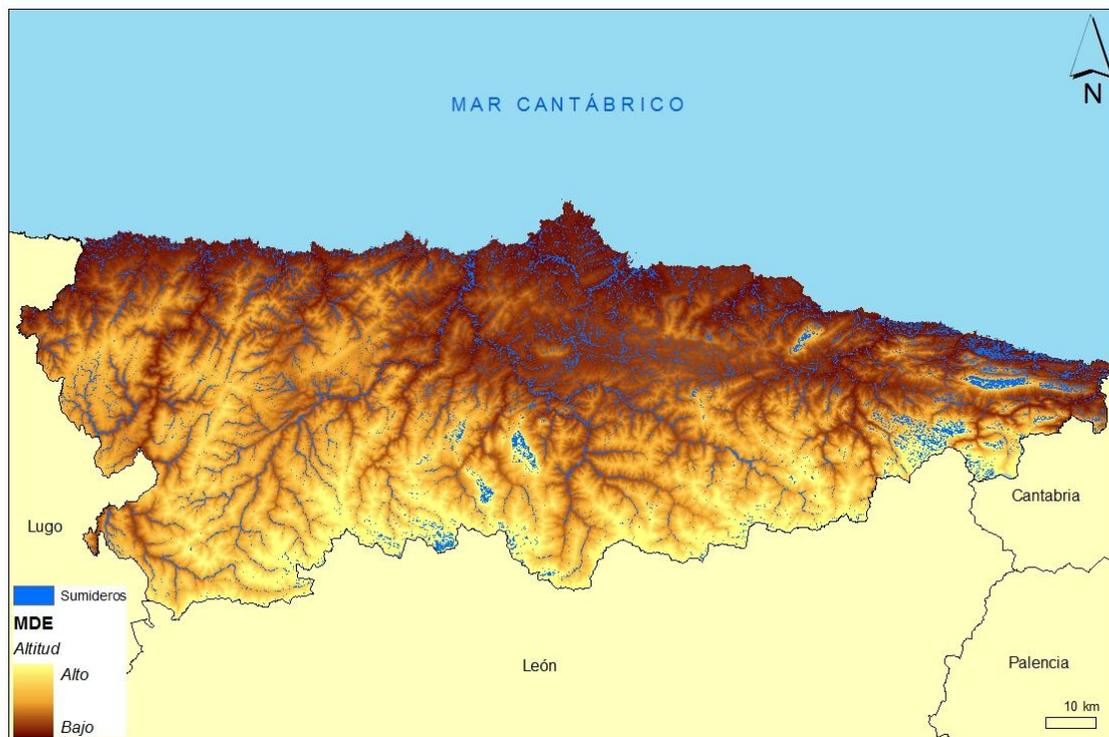


Figura 17: Previsualización de sumideros con la herramienta “*Sink Prescreening*”

Evaluación de las características de los sumideros.

Una vez que se previsualizan los sumideros, con la herramienta “*Sink Evaluation*” se pueden conocer las características de los mismos y su área de drenaje (*Terrain Preprocessing/DEM Manipulation/Sink Evaluation*). Esta herramienta genera dos *shapes* vectoriales en cuya tabla de atributos se encuentra toda la información necesaria para conocer las características de los sumideros lo que permite diferenciar entre sumideros que se desea considerar como tal (por ejemplo: porque estén desarrollados en un terreno calcáreo) y los que no, antes de realizar el llenado.

Elección de los sumideros que se quiere sean considerados como tal

Siguiendo el orden de procesado de las herramientas de ArcHydro para elaborar un MDE correcto hidrológicamente, el siguiente paso sería “*Sink Selection*” (*Terrain Preprocessing/DEM Manipulation/Sink Selection*) mediante el cual se puede elegir qué sumideros son considerados como tales y, por lo tanto, en pasos posteriores sean rellenados y cuáles no. Se ha podido comprobar que, a pesar de que en nuestra zona de estudio existen calizas, la mayoría de los sumideros no se corresponden con dichas litologías, sino que son fallos del MDE y, por ello, se rellenaron todos los sumideros previsualizados.

Rellenado de los sumideros

Si un pixel está rodeado por pixels de mayor elevación, el agua quedará “atrapada” en ese pixel y no fluye. La herramienta “*Fill Sinks*”, permite rellenar los sumideros encontrados en el MDE (*Terrain Preprocessing/DEM Manipulation/Fill Sinks*) (Figura 18). Con esta herramienta se modifica el valor de ese pixel permitiendo que el agua fluya. Se ejecutará la herramienta dos veces. En el “*first run*” se rellenaran todos los sumideros creando una plantilla cuadrículada. En el “*second run*” solo se rellenarán los que cumplan como característica que en el campo “*IsSink*” en la tabla de atributos tengan valor 1.

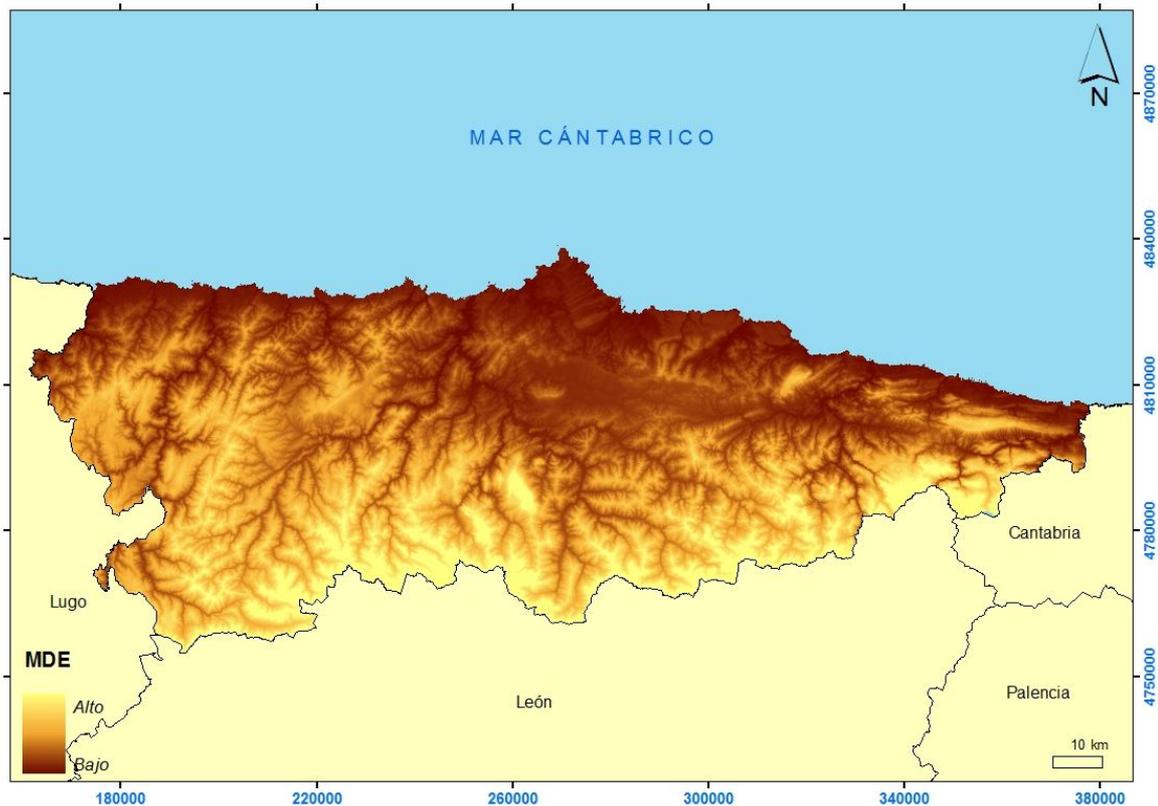


Figura 18: MDE resultante tras rellenar los sumideros.

Elaboración del Modelo de Dirección de Flujo

Una vez terminados todos estos pasos, el nuevo MDE debería tener continuidad hidrológica, por lo que es posible definir las direcciones de flujo a través de la herramienta “*Flow Direction*” (*Terrain Preprocessing/Flow Direction*). Este modelo, representa la dirección hacia la que drenaría un determinado volumen de agua de una celda en función del valor de cota que toma cada píxel circundante del MDE. Para ello, en primer lugar es necesario realizar el Modelo de Direcciones de Flujo y, a partir de él, se genera el Modelo de Flujo Acumulado (*Terrain Preprocessing/Flow Accumulation*) el cual, calcula el número de celdas que vierten a cada celda.

Tras haber realizado todos los pasos descritos anteriormente, necesarios para que un MDE sea correcto hidrológicamente mediante ArcHydro, nuestro MDE seguía presentando problemas. En los modelos tanto de dirección de flujo como de flujo acumulado se observa cómo aparece una zona reticulada (Figura 19). Tras realizar diversas pruebas con diferentes herramientas de ArcGIS, se detectó que el problema se presentaba únicamente en la parte más occidental, coincidiendo con el cambio de huso ya que este reticulado solo aparecía en la parte occidental del modelo, coincidiendo con el cambio del huso 30 al 29.

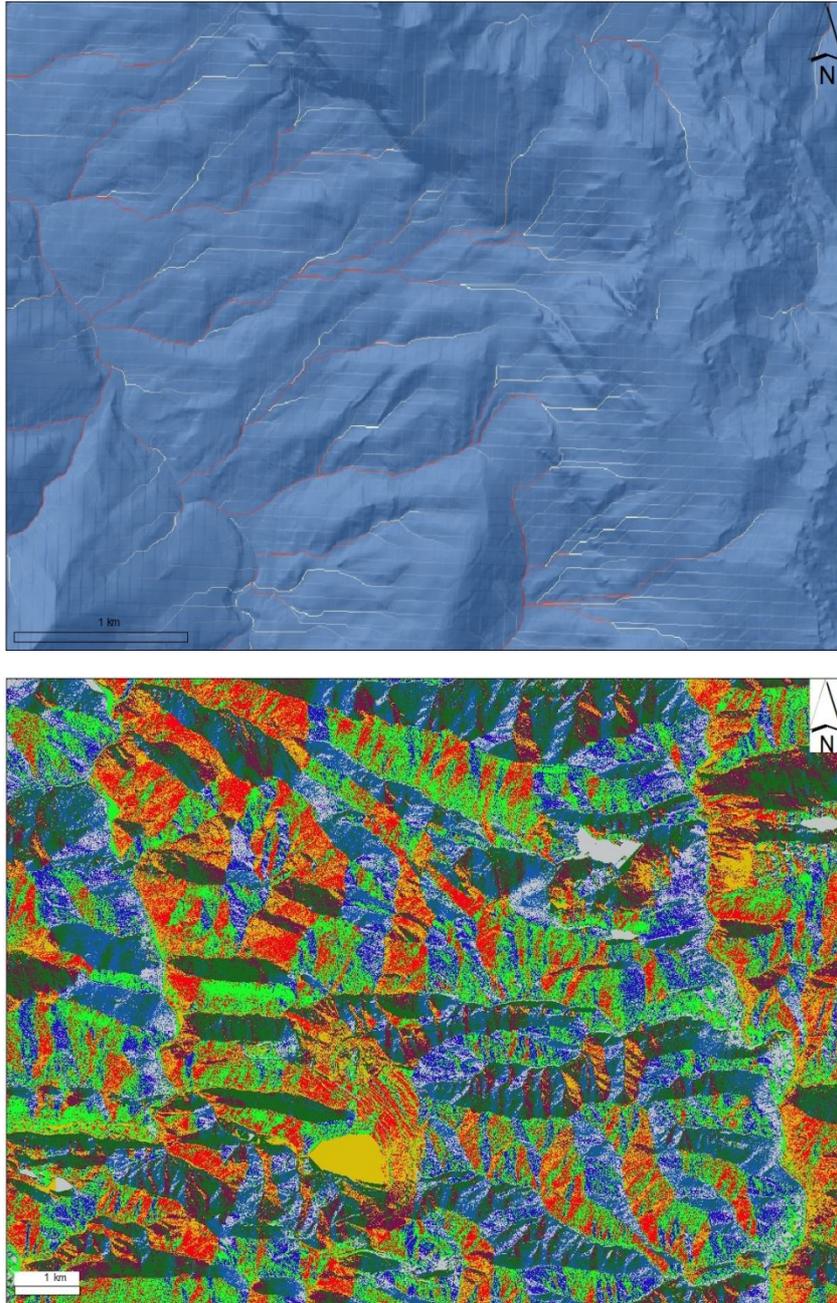


Figura 19 : Modelos digitales de flujo acumulado (a) y de dirección de flujo (b) que muestran un patrón reticulado (artefactos) que no se ajusta a ningún parámetro topográfico.

Ante la imposibilidad de corregir este problema, se descartó seguir trabajando con el MDE del Principado de Asturias (tamaño de pixel 5 m) con el que se había estado trabajando hasta ese momento y se descargó del Centro de Descargas (<http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas>) del Centro Nacional de Información Geográfica el modelo “LIDAR” (*Light Detection and Ranging o Laser Imaging Detection and Ranging*). Dicho modelo está disponible en ficheros en formato ASCII para cada una de las hojas 1:50.000 que incluyen el área de estudio. A partir de estos ficheros se creó un raster para cada una de las hojas y a partir de ellas, mediante la herramienta “*Mosaic*”, un nuevo Modelo Digital de Elevaciones (Figura 20).

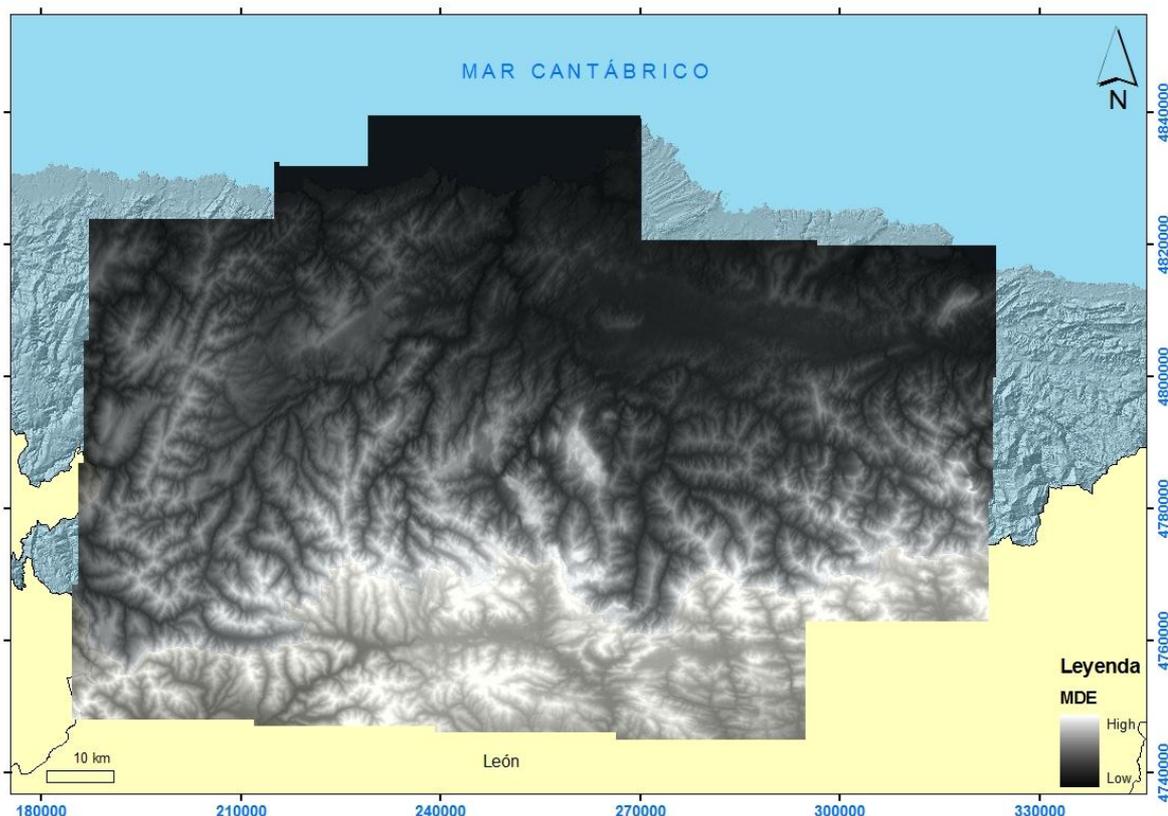


Figura 20: MDE construido a partir de los ficheros "LIDAR" con resolución 25-50 cm descargados de <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas>.

Este nuevo MDE, aunque está más depurado que el del Principado de Asturias, sigue sin ser correcto hidrológicamente por completo. Por ello, se realizan nuevamente todos los pasos correspondientes al depurado de los sumideros descritos con anterioridad. En primer lugar, se procedió a previsualizar los sumideros mediante la herramienta "Sink Prescreening" (*Terrain Preprocessing/DEM Manipulation/Sink Prescreening*). Una vez previsualizados y localizados todos los sumideros existentes en nuestro MDE se aplica herramienta "Sink Evaluation" (*Terrain Preprocessing/DEM Manipulation/Sink Evaluation*) y por último con la herramienta "Fill Sinks", se rellenan los sumideros encontrados en nuestro MDE (*Terrain Preprocessing/DEM Manipulation/Fill Sinks*).

Elaboración del Modelo de Flujo Acumulado

Una vez que este MDE ha sido depurado, se crean los modelos de Dirección de Flujo y de Flujo Acumulado, explicados con anterioridad.

Creación de shape de puntos "desembocadura" A partir del modelo de Direcciones de Flujo y utilizando el SIG se puede definir la cuenca hidrográfica del Río Nalón. Para ello es necesario crear un *shape* de puntos, con un único punto que representa la desembocadura del río.

Delimitación de la cuenca de drenaje

A partir de este *shape* y el *ráster* correspondiente al Modelo de Direcciones de Flujo mediante la herramienta “*Watershed*” (*Spatial Analyst Tools/Hidrology/Watershed*), se delimita automáticamente la cuenca (Figura 21).

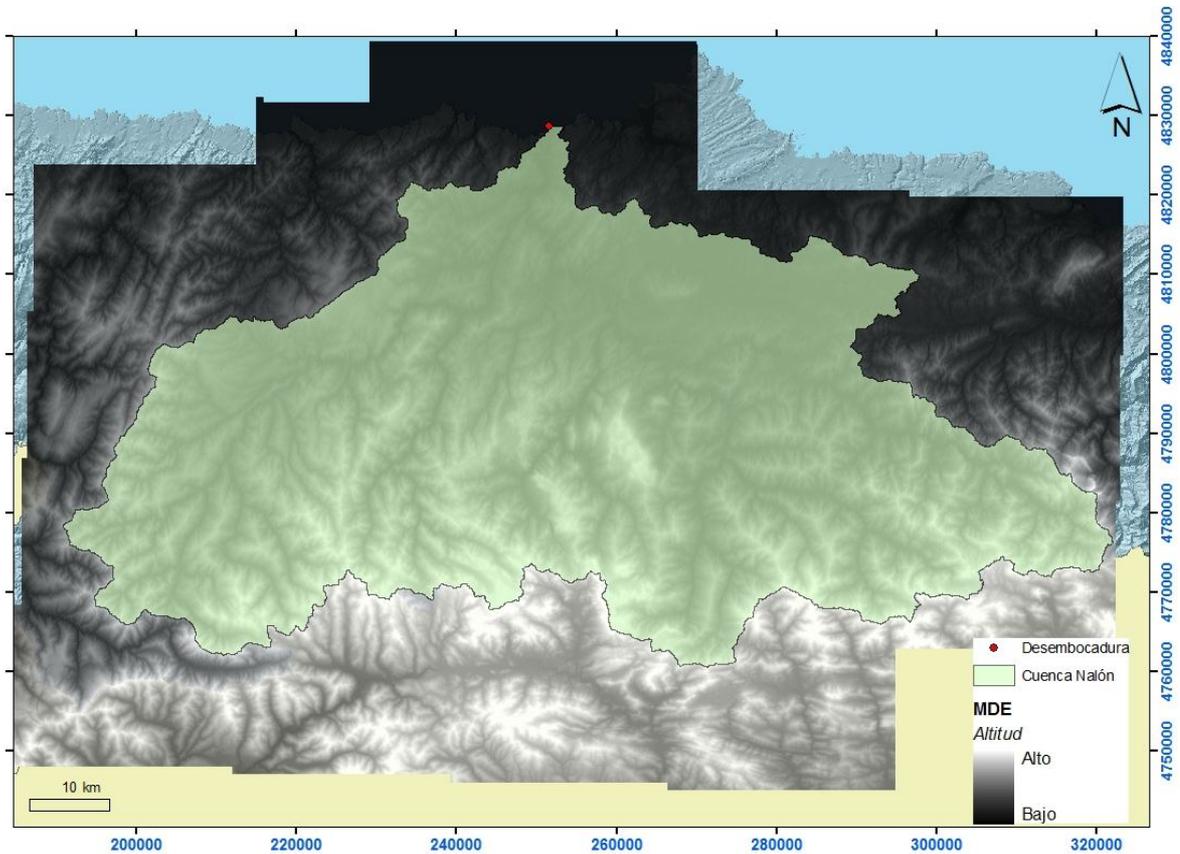


Figura 21: Cuenca hidrográfica del Río Nalón delimitada mediante la herramienta *Watershed* de ArcGIS.

Obtención de la red de drenaje

El último paso es obtener la red de drenaje, que permitirá elaborar posteriormente los perfiles longitudinales. Para ello, mediante la herramienta “*Stream Definition*” (*Terrain Preprocessing/Stream definition*) se calcula un *ráster* de corrientes a partir del modelo de flujo acumulado, especificando un área o un número de celdas que, desde un punto de vista hidrológico, indica el momento en que se genera la escorrentía (Figura 22). En esta ocasión se dio un valor de área en torno a 40 (un valor bajo respecto al dado por defecto superior a 4000) ya que nos interesa una red densa. En el archivo *ráster* generado, todas las celdas que sean consideradas como cauce tendrán valor 1, mientras que a las que a las demás se les asigna el valor “no data”.

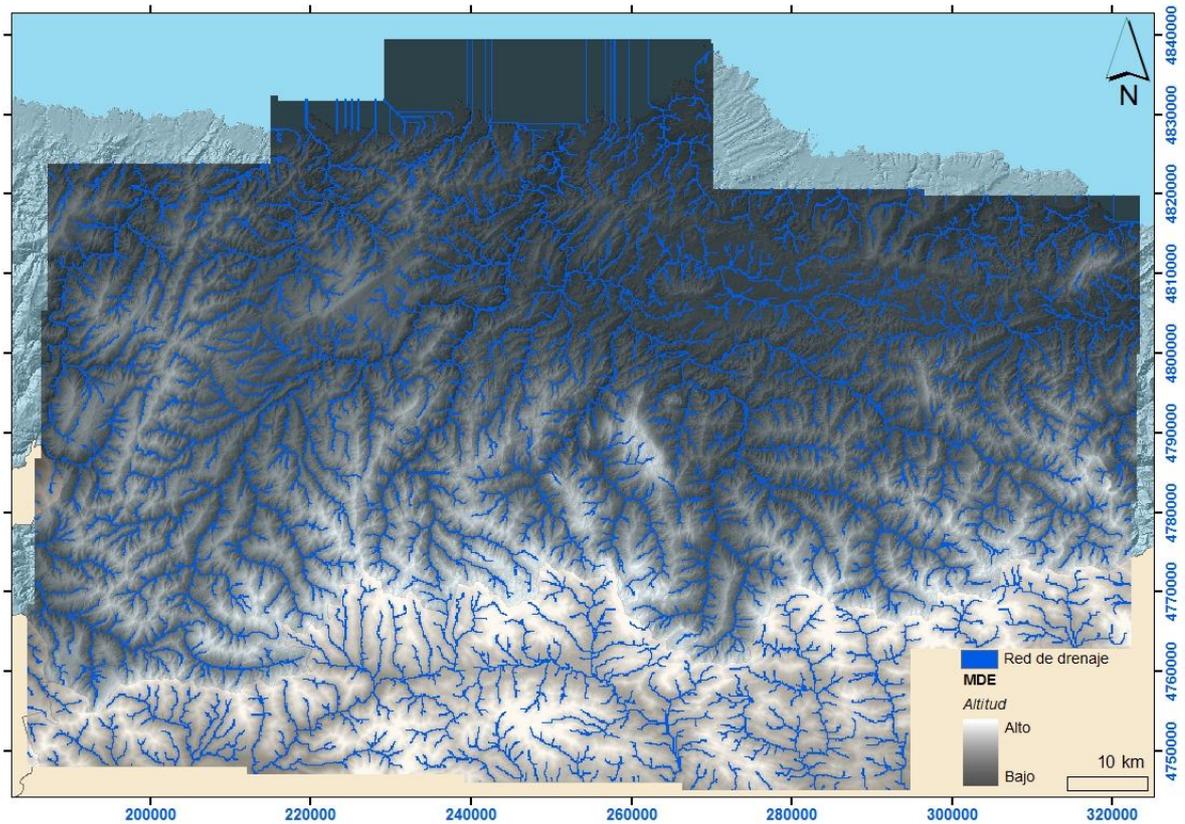


Figura 22: Red de drenaje en formato ráster obtenida mediante la herramienta *Stream Definition* de ArcGIS.

Transformación de la red de drenaje a fichero vectorial

A partir de la red de drenaje en formato *ráster*, se transforma en formato vectorial para poder realizar posteriormente los perfiles longitudinales. Mediante la herramienta “*Stream to Feature*” (*Spatial Analyst Tools/Hydrology/Stream to Feature*) se convierte el raster a *shape*. Una vez creado el *shape*, se corta mediante la herramienta “*clip*” usando el límite de la cuenca (Figura 23).

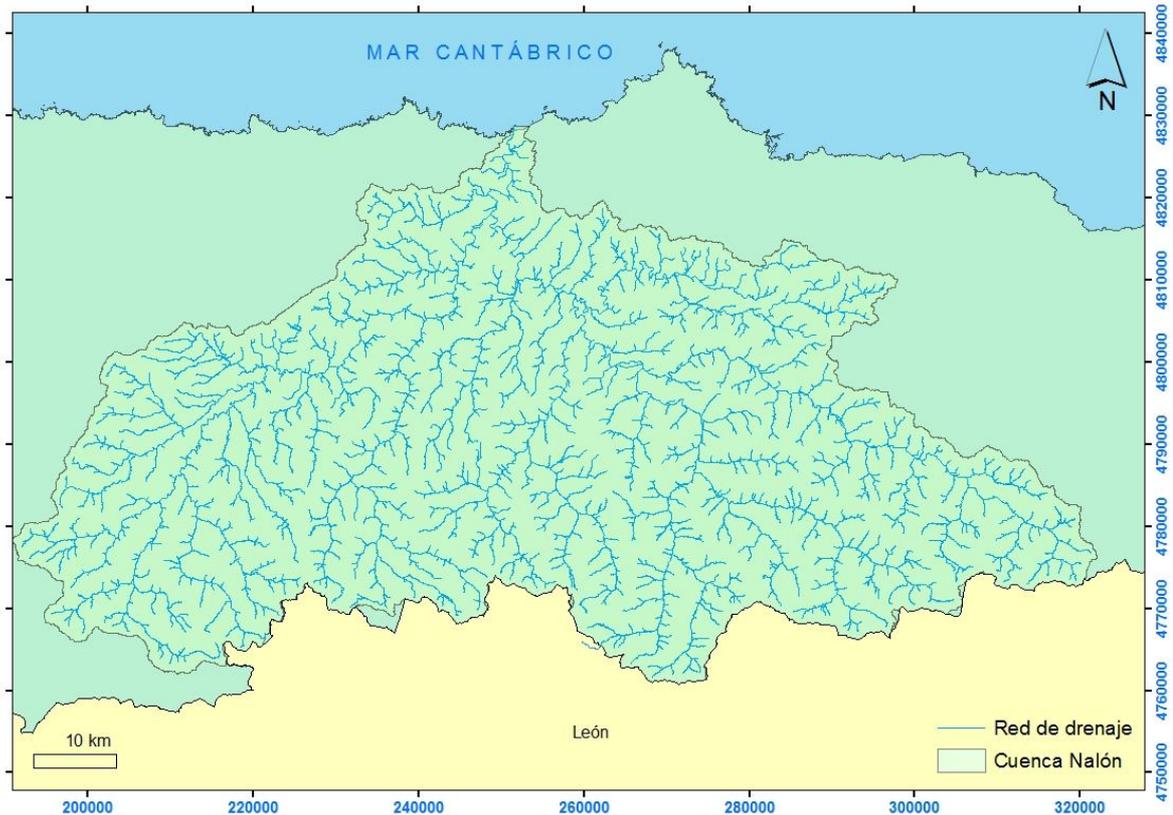


Figura 23: Fichero vectorial correspondiente a la red de drenaje de la cuenca del Río Nalón.

2.5 Jerarquización de la red de drenaje

El análisis de la red de drenaje permite deducir la relación entre el sistema fluvial y otras características de la cuenca como la litología, el relieve, la vegetación, etc.

La jerarquización de la red de drenaje consiste en subdividir los cursos de agua que forman dicha red de drenaje superficial en segmentos de cauce clasificados en función del orden de magnitud de los mismos. Horton (1945) propuso un esquema de ordenamiento para la red de drenaje. Estableció una jerarquización de los cauces de un río asignando a cada segmento de la red un orden según el número de afluentes. Mediante esto, encontró una serie de regularidades en la red de drenaje relacionadas con la estructura de bifurcación y su distribución espacial. Los primeros resultados de estas regularidades fueron recogidos en las conocidas como “leyes de Horton”: ley de los números de corriente y ley de longitudes de corriente. Strahler (1952) revisó y perfeccionó (1957) este esquema de Horton dando lugar al esquema de clasificación Horton-Strahler, el cual es el más utilizado hoy en día.

Las redes de drenaje pueden ser representadas como árboles formados por un conjunto de nodos conectados por segmentos, de tal modo que cada nodo solo tenga una ruta de salida. Según Strahler una corriente puede tener uno o más segmentos ya que un canal es una unión arbitraria de segmentos.

Es decir, para jerarquizar una red por el método Horton-Strahler se asignan valores numéricos a los cauces de la siguiente manera (Figura 24):

1. A los cursos que son los nacientes de la red se les asigna valor 1.
2. La unión de dos cauces de orden 1 implica un aumento de orden de magnitud en el curso resultante de la confluencia. Ese curso resultante tendría valor 2.
3. Si se encuentran dos cursos de orden 2, la magnitud vuelve a incrementarse en el curso resultante, siendo el valor tras la confluencia 3. Es decir, cuando confluyan dos cursos de orden de magnitud “U”, el curso resultante tras la confluencia obtendrá el valor “U+1”.

Así sucesivamente hasta completar la red. El encuentro de un curso de orden inferior con otro de orden superior no significa un cambio de orden de magnitud. Es decir, si se origina una confluencia entre un curso de orden 1 y otro de orden 3, el curso resultante continúa siendo 3. Solo aumenta cuando se da la confluencia entre dos cursos de idéntica magnitud.

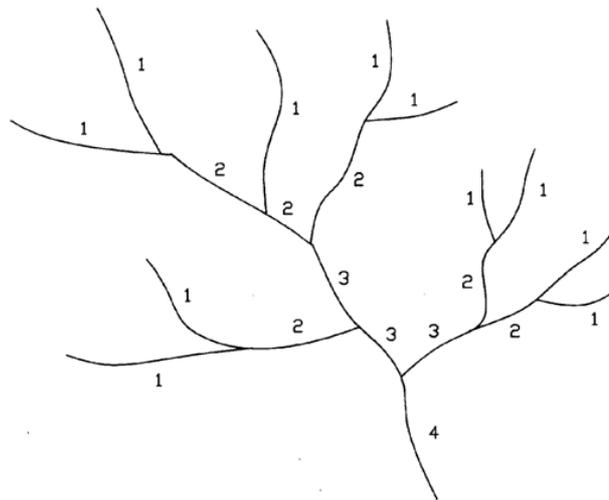


Figura 24: Jerarquización de una red hidrográfica según el criterio de Strahler (1952).

2.6 Elaboración de los perfiles fluviales

Una vez que se dispone de una red fluvial coherente es posible construir una serie de perfiles longitudinales y transversales en los cauces principales de la cuenca del Río Nalón.

Para los perfiles longitudinales, se extrajeron de la red de drenaje calculada los cuatro ríos principales de la zona de estudio (Caudal, Nora, Narcea y Nalón). Una vez que se dispone de un shape independiente para cada río, se convierten los *shapes* a 3D (*3DAnalyst/Convert/Featuresto3D*) y una vez convertidas a 3D se convierten a gráficos

(seleccionando la línea, *Convert to Graphics*) y una vez convertidas mediante el comando perfiles de la barra de herramientas se crean los perfiles.

El último paso es mediante el comando perfiles de la barra de herramientas “3D Analyst” crear los perfiles. Se genera un gráfico del cual exportaremos los datos en formato Excel.

A lo largo del proceso, aparecieron varios problemas. Los gráficos no eran muy correctos ya que aparecían numerosos picos inexplicables (Figura 25). Para solventarlo fue necesario partir los ríos en diversos tramos de los cuales se fueron extrayendo los datos de altitud del MDE. Los datos obtenidos se exportaron a Excel donde fueron unidos y se construyó la gráfica correspondiente a cada uno.

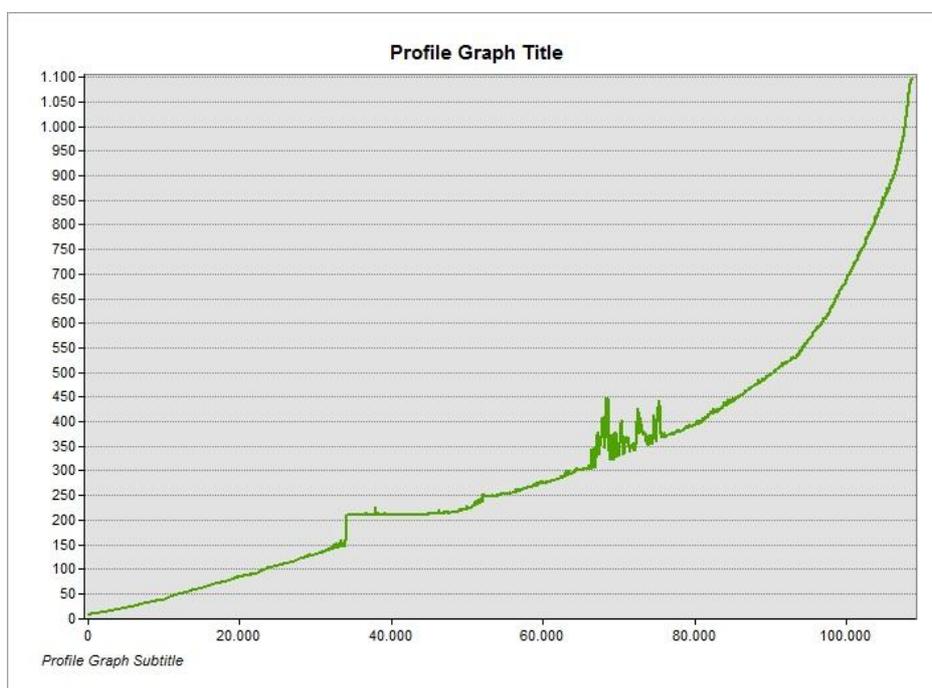


Figura 25: Perfil longitudinal del Río Narcea extraído directamente de ArcGIS mostrando errores en su tramo medio.

Una vez se dispone de los cuatro perfiles (uno por cada río), se representaron los cuatro en un mismo gráfico y a partir de ahí se sacaron diversas conclusiones que serán detalladas más adelante.

Para llevar a cabo los perfiles transversales se siguieron los siguientes pasos. Primero se creó un nuevo *shape* de tipo polígonos con el mismo sistema de coordenadas que el Modelo Digital de Elevaciones para que todo fuera concordante. Una vez se ha creado el nuevo *shape* se carga en ArcMap y se procede a editarlo. Dado que el tamaño del MDE es muy grande, mediante el comando *Extrac by Mask* se recortaron pequeños polígonos correspondientes a las zonas en las que se querían realizar los perfiles. Una vez creados, con el editor se digitalizan una serie de líneas (siempre de izquierda a derecha visto desde la cabecera del río) que serán el trazado de nuestros perfiles.

Se han creado un total de treinta y dos perfiles, de los cuales doce pertenecen al trazado del Río Caudal antes de la posible captura, doce al trazado del Río Nalón antes de la posible captura y ocho al trazado del Río Nalón aguas debajo de la posible captura.

2.7 Hipsometría: Curva e Integral Hipsométrica

La hipsometría de un territorio describe cómo se distribuye su superficie en los distintos rangos de elevación (Strahler, 1952; Schumm, 1956) y puede estimarse usando una curva hipsométrica o una integral hipsométrica (IH). La curva hipsométrica representa la proporción relativa de área bajo una altura dada (Strahler, 1952; Schumm, 1956). Por tanto, una curva hipsométrica se define como la sección de área horizontal de una red de drenaje respecto a una elevación relativa (Strahler, 1952).

A la hora de representar una curva hipsométrica, en el eje de ordenadas se colocan los valores obtenidos de la relación de alturas entre un punto dado y la altura total de la cuenca, mientras que en el eje de abscisas se colocan los valores correspondientes a la relación entre el área por encima de una altura dada respecto al área total de la cuenca. Así obtenemos una curva acumulada en la que cada punto expresaría el área total situada por encima de una determinada altura.

Cálculo de la Integral Hipsométrica.

Se han obtenido los parámetros necesarios para representar la curva y la integral hipsométrica según la nomenclatura de Strahler (1952) (Tabla II):

A: área total de la cuenca. Se obtiene mediante la herramienta “*Calculate Areas*” (*SpatialAnalystTools/Utilities/CalculateAreas*)

H: diferencia de cota entre el nivel de base y la altura máxima en cada cuenca. Estos datos se obtienen a partir del MDE.

a: área perteneciente a la cuenca por encima de la altura dada. Estos datos pueden obtenerse a partir de un “*Reclassify*” del MDE o bien a partir de la tabla de atributos del MDE exportándola a formato EXCEL.

h: diferencia de cota entre el nivel de base y la altura considerada en cada caso. Se han realizado 24 intervalos de 100 m cada uno.

Tabla II. Parámetros necesarios para el cálculo de la curva y la integral hipsométricas.

h (m)	h/H	A (m ²)	a/A
100	0,04142502	4899372100	1
200	0,08285004	4815605350	0,98290255
300	0,12427506	4530726525	0,92475657
400	0,16570008	4106212600	0,83810997

500	0,2071251	3731640200	0,76165683
600	0,24855012	3363449225	0,68650618
700	0,28997514	2960160775	0,60419187
800	0,33140017	2532105525	0,51682246
900	0,37282519	2143753200	0,43755672
1000	0,41425021	1787398825	0,36482202
1100	0,45567523	1458752225	0,29774269
1200	0,49710025	1163928400	0,23756685
1300	0,53852527	900752525	0,18385061
1400	0,57995029	679260575	0,13864237
1500	0,62137531	501005925	0,10225921
1600	0,66280033	354460075	0,07234806
1700	0,70422535	227363125	0,04640658
1800	0,74565037	128864625	0,02630227
1900	0,78707539	59267275	0,01209691
2000	0,82850041	20897975	0,00426544
2100	0,86992543	6004425	0,00122555
2200	0,91135046	1480750	0,00030223
2300	0,95277548	478725	9,7712E-05
2414	1	194700	3,974E-05

Área máxima (m²)	4899372100
h máxima (m)	2414
h mínima (m)	0
H (m)	2414

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La totalidad de la cuenca hidrográfica del Río Nalón cuenta con una superficie de 4899,4 km², la subcuenca del Narcea tiene una superficie de 1847,45 km² y la subcuenca más pequeña del Caudal con un área de 928,9 km² aproximadamente (Figura 26).

A partir de los modelos digitales del terreno elaborados, se obtienen los siguientes valores: el valor medio de pendiente es de 23,76 °, llegando a alcanzar los 86,6° en las zonas más abruptas; en cuanto a las orientaciones, predominan las norte y el modelo de índice de relieve muestra que se alcanzan valores máximos de 172,68 .

En cuanto a la longitud de los ríos, el de mayor longitud (tratándose del cauce principal) es el Río Nalón con una longitud aproximada de 143,8 km; el segundo en longitud es el Río Narcea, con 112 km; en tercer lugar el río Nora con 69,2 km y por último el Río Caudal con una longitud de 56,5 km.

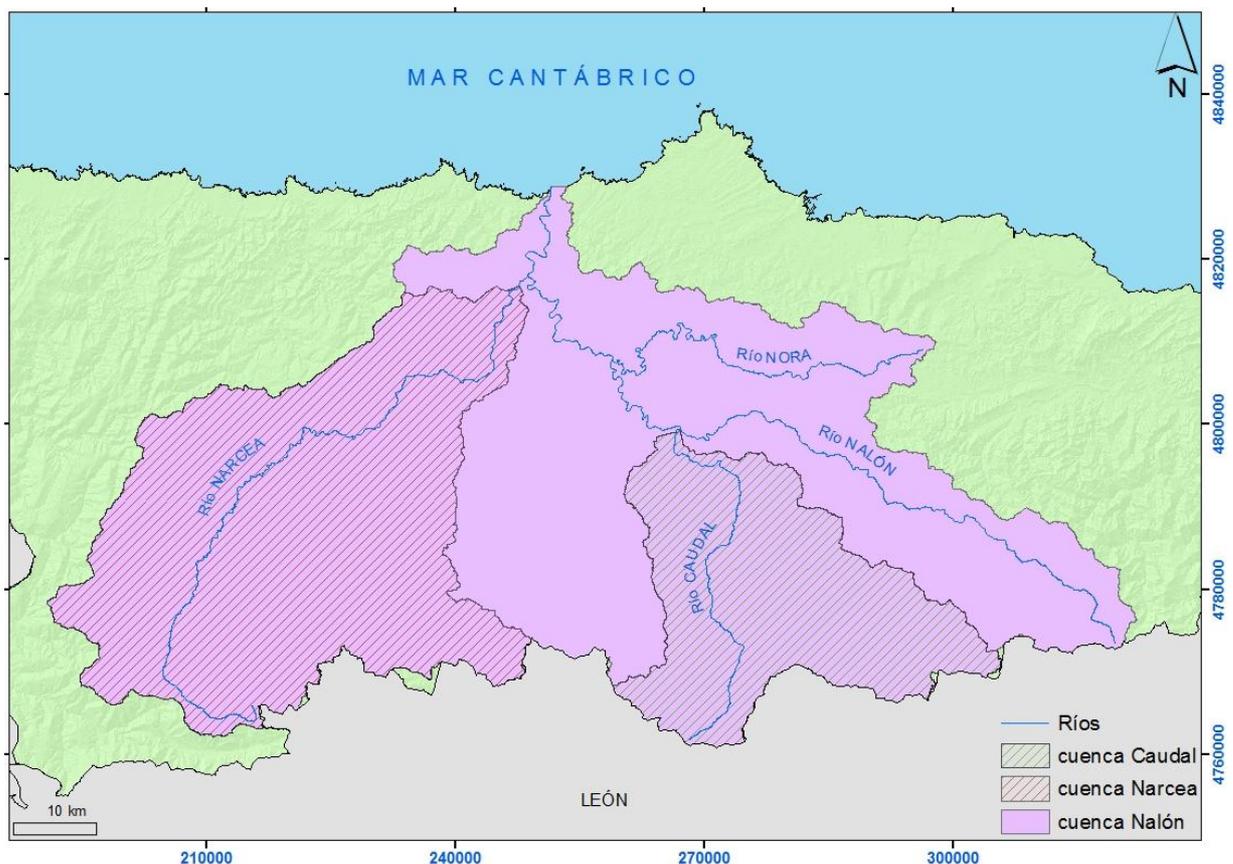


Figura 26: Representación de las cuencas hidrográficas del Nalón, Caudal y Narcea, respectivamente.

3.1 Litologías presentes en la cuenca

Se ha calculado mediante GIS el área ocupada por cada una de las litologías presentes en la cuenca (*Arctoolbox/Spatial Statistics Tools/ Utilities/ Calculate Areas*). Se conoce la superficie total de la cuenca, que ha sido calculada con la misma herramienta, por lo que con todos esos valores ha sido posible construir la tabla que se muestra a continuación (Tabla III).

Tabla III: Tabla de porcentaje en superficie de las litologías presentes en la cuenca. Fuente de los datos: Cartografía Temática Ambiental del Principado de Asturias, 2002.

Formación	%	Edad	Litología
Pizarras del Narcea	10,798	Precámbrico y Cambro- Ordovícico	Detrítico
Fm. Cándana	2,433		Calcáreo
Fm. Herrera	3,043		Detrítico
Caliza de Vegadeo	0,237		Calcáreo
Fm. Láncara	5,218		Calcáreo
Pizarras de Luarca	0,139		Detrítico
Fm. Oville	2,753		Detrítico
Fm. Barrios	6,892		Detrítico
Miembro Ligüeria	0,066		Detrítico
Pizarras negras en Barrios	0,053		Detrítico
Niveles de cuarcitas en Luarca	0,002		Detrítico
Serie de los Cabos	1,827		Detrítico
Pizarras del Sueve	0,012		Detrítico
Fm. Formigoso	0,655		Detrítico
Fm. Furada - San Pedro	1,798	Detrítico	
Grupo Rañeces - La Vid	6,091	Mixto	
Fm. Moniello - Sta Lucia	2,417	Calcáreo	
Fm. Naranco – Huergas	4,140	Detrítico	
Fm. Portilla – Candás	0,934	Silúrico, Devónico y Carbonífero Preorogénico	Calcáreo
Fm. Piñeres – Candás	0,771		Detrítico
Fm. Candamo - Baleas - Calizas de las Portillas	0,097		Calcáreo
Fm. Alba	0,485		Calcáreo
Caliza de Montaña	8,165		Calcáreo
Pizarras de la Vid	0,671		Detrítico
Calizas de la Vid	0,097		Calcáreo
Dolomias de la Vid	0,088		Calcáreo
Formación Vegamian	0,014		Detrítico
San Emiliano y Fm. Olleros	2,481		Detrítico
Niveles de calizas en el Carbonífero superior	1,081		Calcáreo
Niveles de areniscas en el Carbonífero superior	0,193		Detrítico
Grupo Lena	7,159		Detrítico
Grupo Sama	5,065		Detrítico
Pudingas	0,289	Detrítico	
Paquete Pudingas - Paquete Esperanza -Paquete Ablanado	0,278	Carbonífero Sin y Postorogénico	Detrítico
Tercer y cuarto tramo productivos	2,455		Detrítico
Primer tramo productivo (subhullera) - Paquete Levinco	5,488		Detrítico
Caliza de Peña Redonda	0,188		Calcáreo
Formaciones de pizarras y areniscas	1,800		Detrítico
Caliza de la Escalada	0,517		Calcáreo
Formaciones de pizarras, areniscas y calizas (Fito)	1,221		Mixto
Paquete Fresnedo	0,909		Detrítico
Conglomerados silíceos, areniscas, pizarras y carbón estefanienses	1,695		Detrítico
Pizarras, areniscas y carbón del estefaniense	0,787		Detrítico
Unidad del Pérmico Indiferenciado	0,367	Pérmico	Detrítico
Unidad del Triásico Indiferenciado	0,039		Detrítico
Unidad del Buntsandstein-Muschelkalk Medio (Conglomerados, arcillas y areniscas)	0,272	Triásico	Detrítico
Unidad del Triásico Indiferenciado en el área de Gijón	0,043		Detrítico
Unidad del Muschelkalk Medio-Keuper	0,135		Detrítico
Unidad del Terciario Indiferenciado	2,718	Terciario	Mixto
Unidad del Eoceno Superior-Oligoceno Inferior	0,743		Mixto

Unidad del Terciario Indiferenciado	0,472		<i>Detrítico</i>
Unidad del Eoceno Superior-Oligoceno Inferior	0,051		<i>Calcáreo</i>
Unidad del Sinemuriense-Toarciense	0,031		<i>Mixto</i>
Unidad del Jurásico Medio	0,109	<i>Jurásico</i>	<i>Detrítico</i>
Unidad del Jurásico Superior	0,290		<i>Mixto</i>
Unidad del Cretácico en el área de Oviedo y Grado	0,062		<i>Mixto</i>
Unidad del Barremiense	0,003		<i>Detrítico</i>
Unidad del Albiense	1,082		<i>Detrítico</i>
Unidad del Aptiense	0,009		<i>Mixto</i>
Unidad del Cenomaniense, Turoniense y Coniaciense	0,956		<i>Mixto</i>
Unidad del Cenomaniense	0,188	<i>Cretácico</i>	<i>Mixto</i>
Unidad del Cenomaniense y Turoniense	0,119		<i>Calcáreo</i>
Unidad del Coniaciense	0,114		<i>Detrítico</i>
Unidad del Coniaciense-Santoniense en el área de Oviedo	0,054		<i>Calcáreo</i>
Cuaternario indiferenciado	0,651	<i>Cuaternario indiferenciado</i>	<i>Detrítico</i>

En total, en la cuenca, se diferencian un total de 65 litologías diferentes. Como se muestra en la tabla, gran parte de ellas apenas alcanzan un 2% sobre la superficie total de la cuenca y, aunque individualmente no se las puede considerar como muy relevantes, en conjunto ocupan casi el 50% de la cuenca del Río Nalón. Se consideran más representativas aquellas que superan un 5% de la superficie, las cuales son: Pizarras del Narcea (529,04 km²), Fm. Láncara (255,65 km²), Fm. Barrios (337,66 km²), Grupo Rañeces-La Vid (298,43 km²), Caliza de Montaña (400,02 km²), Grupo Lena (350,74 km²), Grupo Sama (248,16 km²) y Primer tramo productivo (subhullero)-Paquete Levinco (268,87 km²). Todas ellas representan el 54,87 % de la superficie total de la cuenca.

Si se agrupan las distintas formaciones en cuanto a su naturaleza, se pueden simplificar en 3 categorías: litologías calcáreas, litologías detríticas y litologías mixtas. Predominan las litologías detríticas con un 65,52% de superficie ocupada.

Los procesos de captura fluvial también dependen de la naturaleza de la litología del sustrato por el que transcurren. Observando el mapa litológico simplificado (Figura 27) de la cuenca, se observa como en la zona donde se encuentra el posible codo de captura del Río Caudal sobre el Río Nalón, el río va bordeando una zona de litologías mixtas para aprovechar una zona de sustratos de naturaleza calcárea que favorecen el encajamiento del cauce dado que el carbonato se disuelve al paso del agua (a mayor poder erosivo mayor disolución y por tanto mayor encajamiento, en los procesos de captura la erosión es fuerte). Aguas debajo de la captura el cauce del Nalón continúa su curso atravesando materiales de naturaleza calcárea o mixta, mayoritariamente.



Figura 27: Litología simplificada de la cuenca del Río Nalón y supuesto trazado del antiguo Río Nalón. Fuente de los datos: Cartografía Temática Ambiental del Principado de Asturias, 2002.

3.2 Recubrimientos superficiales presentes en la cuenca

El mismo procedimiento realizado para calcular el área de las litologías se ha repetido para calcular el área ocupada por los distintos recubrimientos superficiales encontrados en la cuenca. Como se conoce la superficie total de la cuenca (4.899 km²) y el área ocupada por cada uno de los tipos de recubrimiento se han plasmado los datos de superficie en la Tabla IV.

Un 70,5% de la cuenca carece recubrimiento superficial (Figura 28) representable a escala 1:25.000, repartiéndose el 29,5% restante mayoritariamente en depósitos de ladera (20,3% que representan unos 1220 km²), como ya ha sido puesto de manifiesto en trabajos previos (Domínguez-Cuesta, 2003 y Domínguez-Cuesta, et al., 2007). En ese 20,3% correspondiente a depósitos de ladera diferenciamos: formaciones clásticas con escasa matriz (silíceas, 7,9%), formaciones clásticas con abundante matriz (silíceas, 6,5% y mixtas, 5,8%).

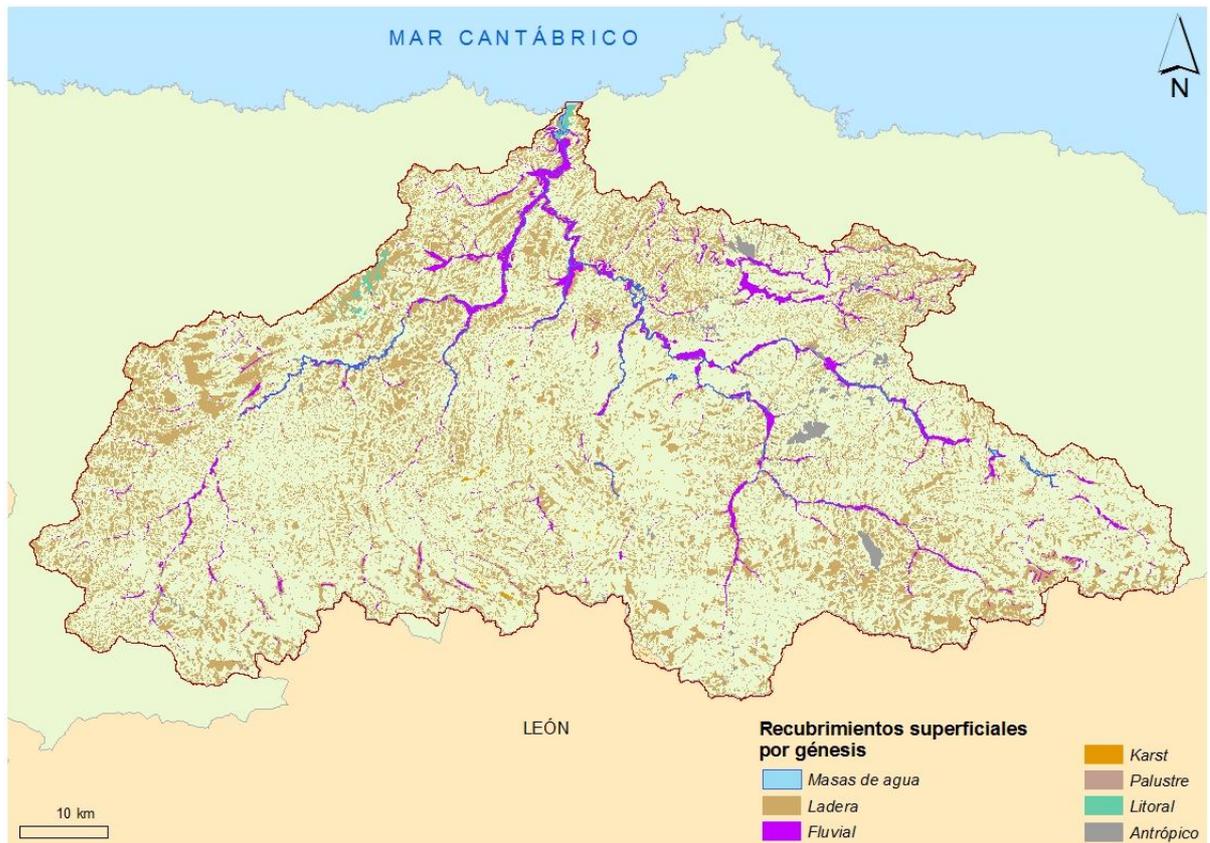


Figura 28: Mapa de recubrimientos superficiales de la cuenca del Río Nalón. Fuente de los datos: Cartografía Temática Ambiental del Principado de Asturias, 2002.

Las terrazas fluviales a pesar de estar escasamente representadas (0,43% de superficie) resultan muy interesantes cuando se analiza su posición. Como muestra la Figura 29 esas terrazas se encuentran en torno al Río Nalón, más concretamente en la zona de confluencia del Río Caudal y el Río Nalón. La presencia de terrazas en el curso de un río indica un encajamiento del mismo lo cual puede ser debido, entre otras razones, a un incremento de su caudal, que puede estar a su vez relacionado con un proceso de captura. La concentración de la mayoría de las terrazas aguas debajo de la confluencia de los ríos Caudal y Nalón apoyaría esta idea.

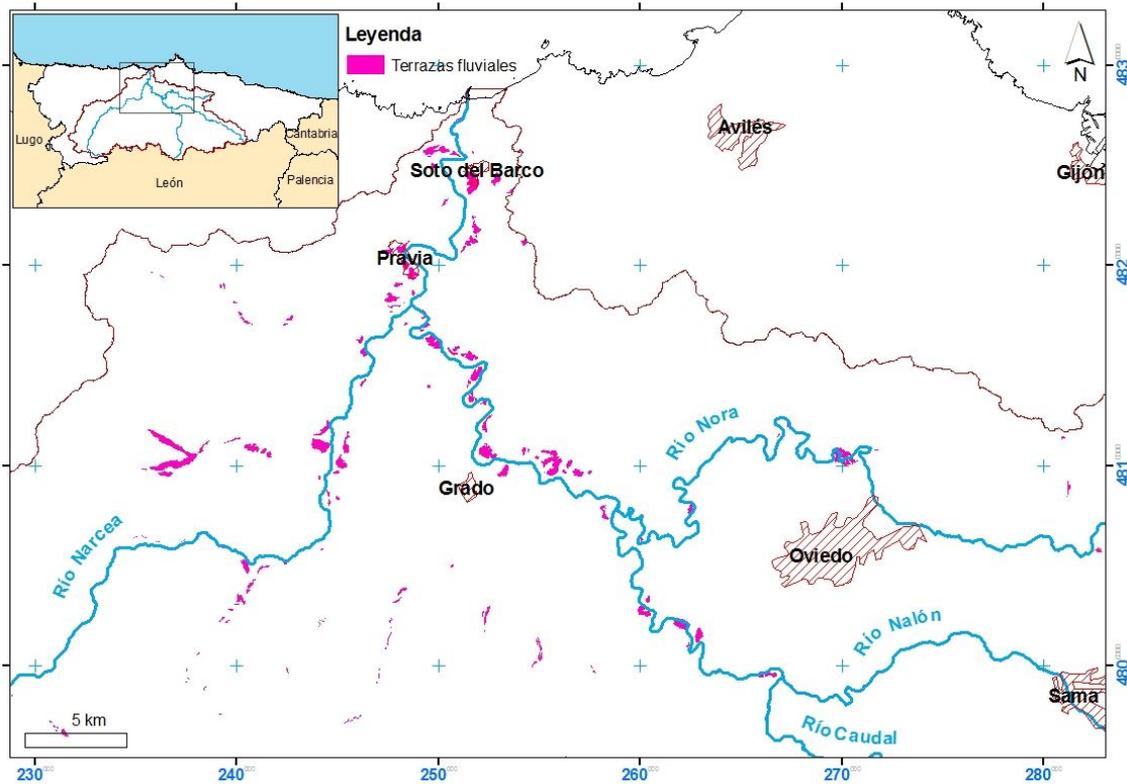


Figura 29: Mapa de posición de las terrazas fluviales en la cuenca del Nalón.

En el campo se puede observar que el número y extensión de depósitos correspondientes a grandes movimientos en masa es mayor en el tramo del Río Caudal que transcurre por materiales de la Cuenca Carbonífera Central que en el tramo del Río Nalón durante su trayectoria por dicha zona geológica. Esto estaría en consonancia con un mayor encajamiento del Río Caudal y, por tanto, una mayor capacidad erosiva lo que apoyaría la hipótesis de la captura por parte de este río al Nalón.

Tabla IV : Porcentaje de superficie de los recubrimientos superficiales en la cuenca. Fuente de los datos: Cartografía Temática Ambiental del Principado de Asturias, 2002.

	Tipo	Génesis	km2	%
Sin recubrimiento			116,1941546	70,5125
Masas de agua (embases, ríos...)	<i>Masas de agua</i>	<i>Masas de agua</i>	14,85784946	0,3032
Formaciones clásticas sin matriz (silíceas)	<i>Canchales</i>	<i>ladera</i>	82,32972954	1,6804
Formaciones clásticas sin matriz (mixtos)	<i>Canchales</i>		0,565063067	0,0115
Formaciones clásticas sin matriz (calcáreas)	<i>Canchales</i>		20,60331958	0,4205
Formaciones clásticas con escasa matriz (silíceas)	<i>Derrubios</i>		391,7405048	7,9957
Formaciones clásticas con escasa matriz (mixtos)	<i>Derrubios</i>		51,53617948	1,0519
Formaciones clásticas con escasa matriz (calcáreos)	<i>Derrubios</i>		34,06629316	0,6953
Formaciones clásticas con abundante matriz (silíceas)	<i>Coluviones</i>		320,4503352	6,5406
Formaciones clásticas con abundante matriz (mixtas)	<i>Coluviones</i>		284,4177912	5,8052
Formaciones clásticas con abundante matriz (calcáreas)	<i>Coluviones</i>		35,21091126	0,7187
Aluviales y fluvio-glaciares	<i>Aluvial y fluvio-glaciár</i>	<i>fluvial</i>	121,9628343	2,4894
Terrazas fluviales y fluvio-glaciares	<i>Terraza</i>		21,10362529	0,4307
Aluviales antiguos (terrazas terciarias)	<i>Terraza</i>		0,021534292	0,0004
Rellenos turbosos	<i>Turboso</i>	<i>palustre</i>	0,996108551	0,0203
Áreas mal drenadas	<i>Turberas</i>		0,022434566	0,0004
Rellenos de depresiones (kársticas)	<i>Rellenos karst</i>	<i>karst</i>	9,003852019	0,1838
Escombreras y otros depósitos antrópicos	<i>Rellenos antrópicos</i>	<i>antrópico</i>	47,46533676	0,9688
Depósitos con abundante materia orgánica	<i>Rasa</i>	<i>litoral</i>	5,751515279	0,1174
Depósitos litorales de arenas	<i>Litoral arenas</i>		0,887279302	0,0181
Depósitos litorales de fangos	<i>Litoral fangos</i>		0,205145713	0,0042
Depósitos litorales de arenas y fangos	<i>Litoral arenas y fangos</i>		1,502946678	0,0307

Como es conocido, la formación de las playas se debe a las corrientes de deriva litoral. La deriva litoral es el proceso por el cual el oleaje distribuye los sedimentos a lo largo de la costa. El oleaje incide oblicuamente en la costa, arrastrando los sedimentos en esa misma dirección. Sin embargo, al retirarse las olas, estas lo hacen paralelamente a la dirección de la costa, movilizándolo en esta nueva dirección. Esto hace que el transporte del sedimento en la franja litoral se produzca mediante un movimiento en zig-zag enmarcado por la dirección preferente de las corrientes de deriva. De esta manera se distribuye el sedimento a lo largo de la costa, desde su área fuente (normalmente la desembocadura de un río). Si el aporte sedimentario permanece constante, se establece un equilibrio en la línea de costa, pero si los aportes de sedimento disminuyen, se producirá una tendencia erosiva de la línea de costa. Así mismo, cualquier obstáculo que se interponga al movimiento del sedimento, producirá una acumulación en su parte trasera y una erosión pronunciada en su parte delantera.

De acuerdo con lo anterior, se sobreentiende que aquellas playas cercanas a desembocaduras de ríos de gran envergadura recibirán grandes aportes sedimentarios de éstos.

La ría o estuario de Avilés, presenta unas dimensiones y una concentración de sedimentos que parecen no corresponderse con la superficie de cuenca vertiente de apenas 200 km² del Río Alvares, que es la corriente fluvial que actualmente desemboca en dicho estuario (Figura 30). Además, la presencia de la Playa de Xagó, al este de la Ría de Avilés, con unas dimensiones que alcanzan un máximo de 420 metros de ancho suponen una gran acumulación de arena, que incluye incluso dunas remontantes fosilizadas (Flor, 1981). Flor-Blanco et al. (2012) reconstruyen los procesos evolutivos que han generado el campo dunar de Xagó partiendo de la hipótesis de una entrada de sedimento siliciclástico muy voluminosa desde el estuario del Nalón situado a 12 kilómetros al Oeste, además de las variaciones del nivel del mar en el Holoceno. En los últimos años la playa de Xagó ha sufrido una progradación (45 metros) relacionada directamente con la gestión de dragados en la desembocadura de la ría de Avilés (Flor-Blanco, 2013). El estuario de la ría de Avilés, está formado por dos subsistemas; el principal (ría de Avilés) y el subordinado de Lloredo (López Peláez y Flor, 2008). El estuario principal recibe grandes volúmenes de arenas siliciclásticas del Río Nalón que tiene su fuente a 12 km al oeste con una media de escorrentía anual de 15,77 m³/s.

Por otra parte, el Cañón de Avilés con un desnivel de 4.600 m en apenas 12 km, que tradicionalmente se ha ligado a la trayectoria de la Falla de Ventaniella, parece no corresponderse exactamente con la dirección de dicho accidente tectónico, según han puesto de manifiesto recientemente algunos autores (Fernández-Viejo et al., 2014). Así, tanto las dimensiones de la ría, como las del cañón, la presencia del arenal de Xagó y el relleno del estuario de Avilés serían explicables bajo la hipótesis de que en algún momento geológico pasado el Río Nalón hubiera desembocado en este estuario,.

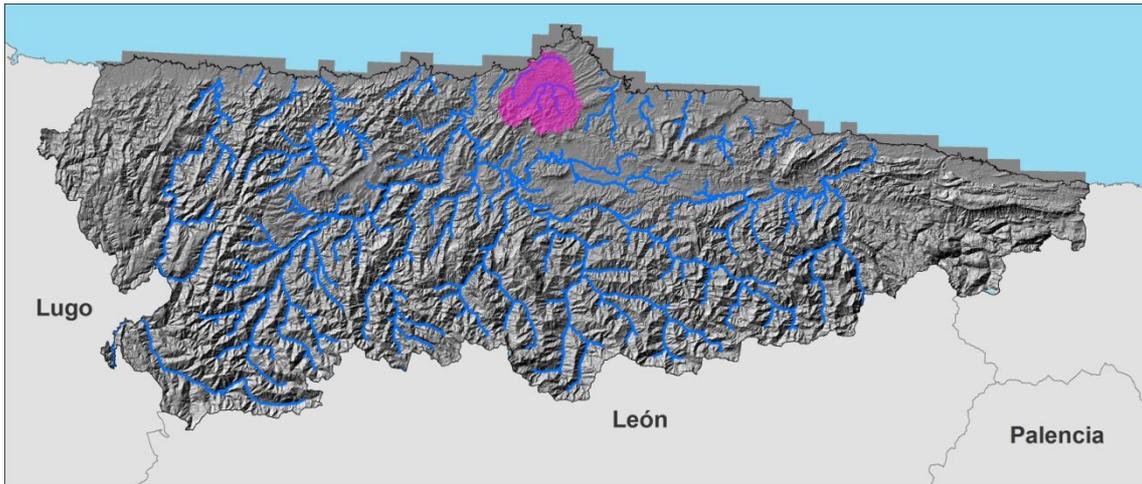


Figura 30: Cuenca hidrográfica actual del Río Alvares que desemboca en el Estuario de Avilés.

3.3 Dinámica fluvial: jerarquización de la red y perfiles

Jerarquización de la red fluvial

A través de la herramienta “Stream order” (*Spatial Analyst Tools/Hidrology/Stream Order*) se ha jerarquizado la red de drenaje correspondiente con la cuenca del Nalón. Al cauce principal le corresponde un orden igual a 6 según el método de Strahler (Figura 31).

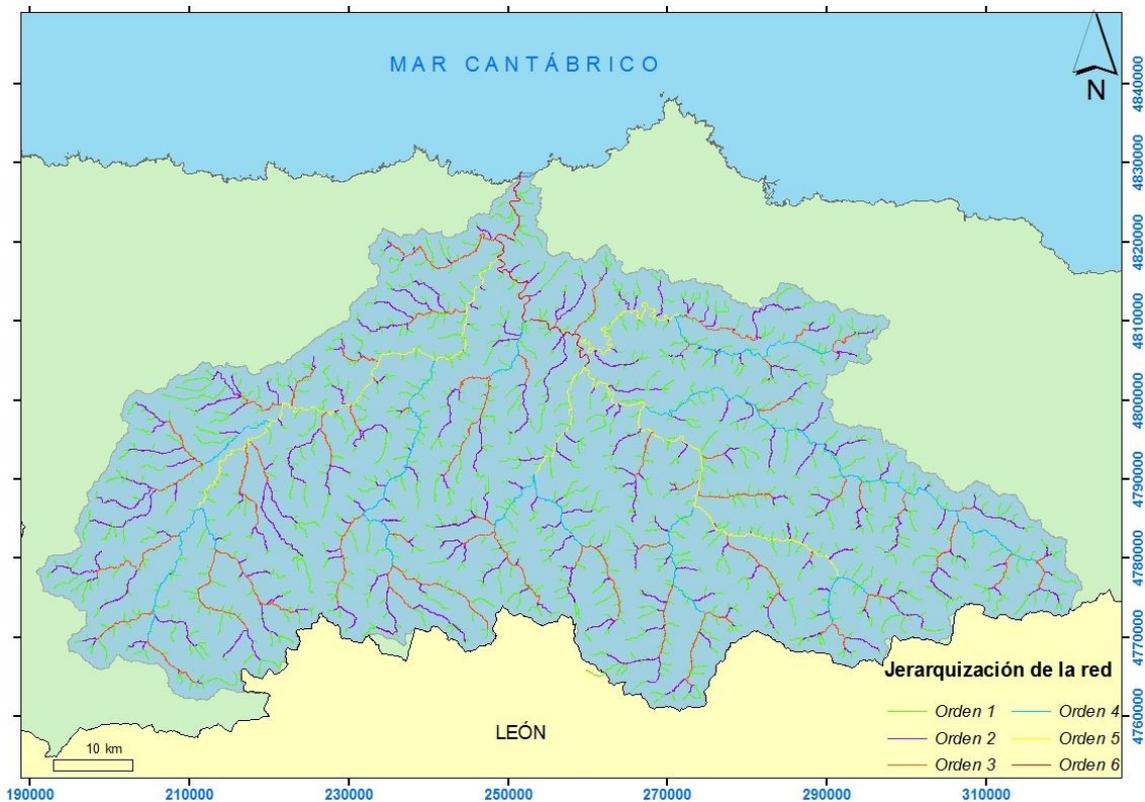


Figura 31: Jerarquización de la red de drenaje de la cuenca del Río Nalón según Horton-Strahler.

El curso de agua cuyo cauce alcanza la máxima magnitud dentro del área determinada es el río principal. La jerarquización de la red de drenaje es importante a la hora de:

1. Evaluar los cursos de agua que mantienen caudal de forma permanente.
2. Analizar la importancia cuantitativa del caudal dentro de la cuenca.
3. Subdividir la cuenca en subcuencas.

Perfiles longitudinales.

Generalmente los ríos tienen un perfil longitudinal cóncavo, con una pendiente que disminuye desde las zonas más erosivas (cabecera) a las zonas donde predomina la sedimentación (desembocadura). En ocasiones esos perfiles longitudinales pueden presentar partes aplanadas o abruptas que son debidos a la presencia de llanuras aluviales o a litologías con distinta competencia.

Se han construido cuatro perfiles longitudinales correspondientes a los ríos: Caudal, Nora, Narcea y Nalón (Figura 32) y se han estudiado en detalle aquellas irregularidades que presentan, sobre todo en el Río Nalón y en el Río Caudal, apoyándose en perfiles transversales.

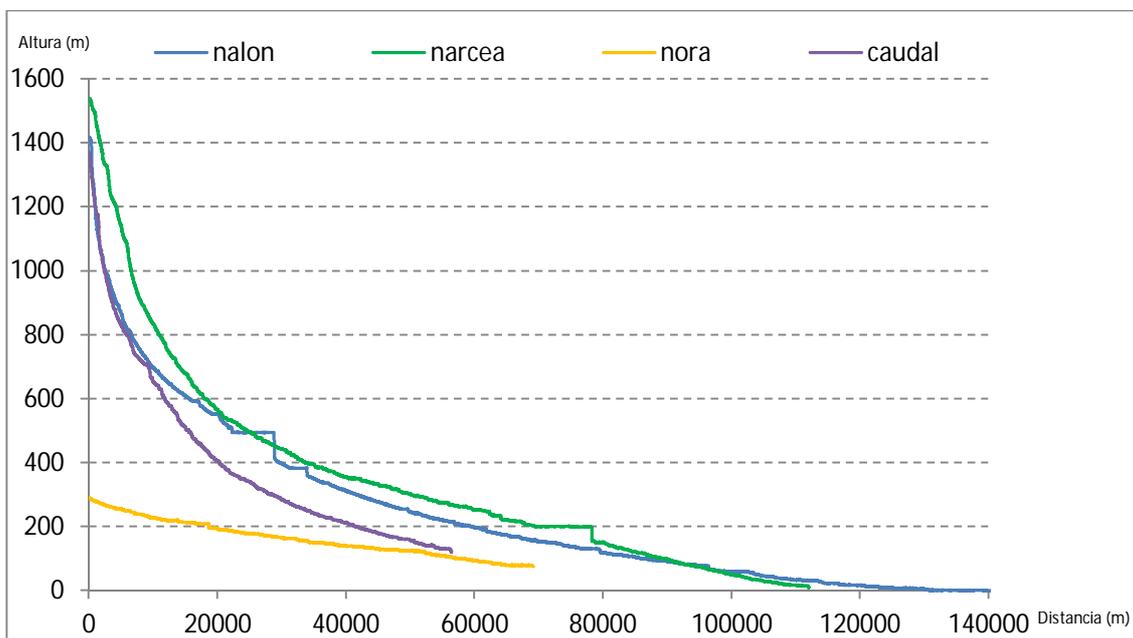


Figura 32: Perfiles longitudinales de los ríos Caudal, Nora, Narcea y Nalón.

Todos los perfiles longitudinales que se han realizado cumplen esa “pauta” de perfil cóncavo. En todos ellos se observan pequeñas irregularidades que carecen de gran importancia ya que en su mayoría se corresponden con pequeñas roturas de pendiente o cambios en la litología.

Por su parte, sobre los perfiles longitudinales del Río Nalón y del Río Narcea, se localizan unos tramos planos que se corresponden con los embalses. En el caso del Río Nalón son los embalses de Rioseco y Tanes, mientras que en el Río Narcea se corresponde con el embalse de la Barca.

Localizando todos ellos sobre un mismo gráfico de manera que se representen las desembocaduras sobre el Río Nalón se puede analizar más en detalle qué ocurre en cada una de las zonas de desembocadura (Figura 33).

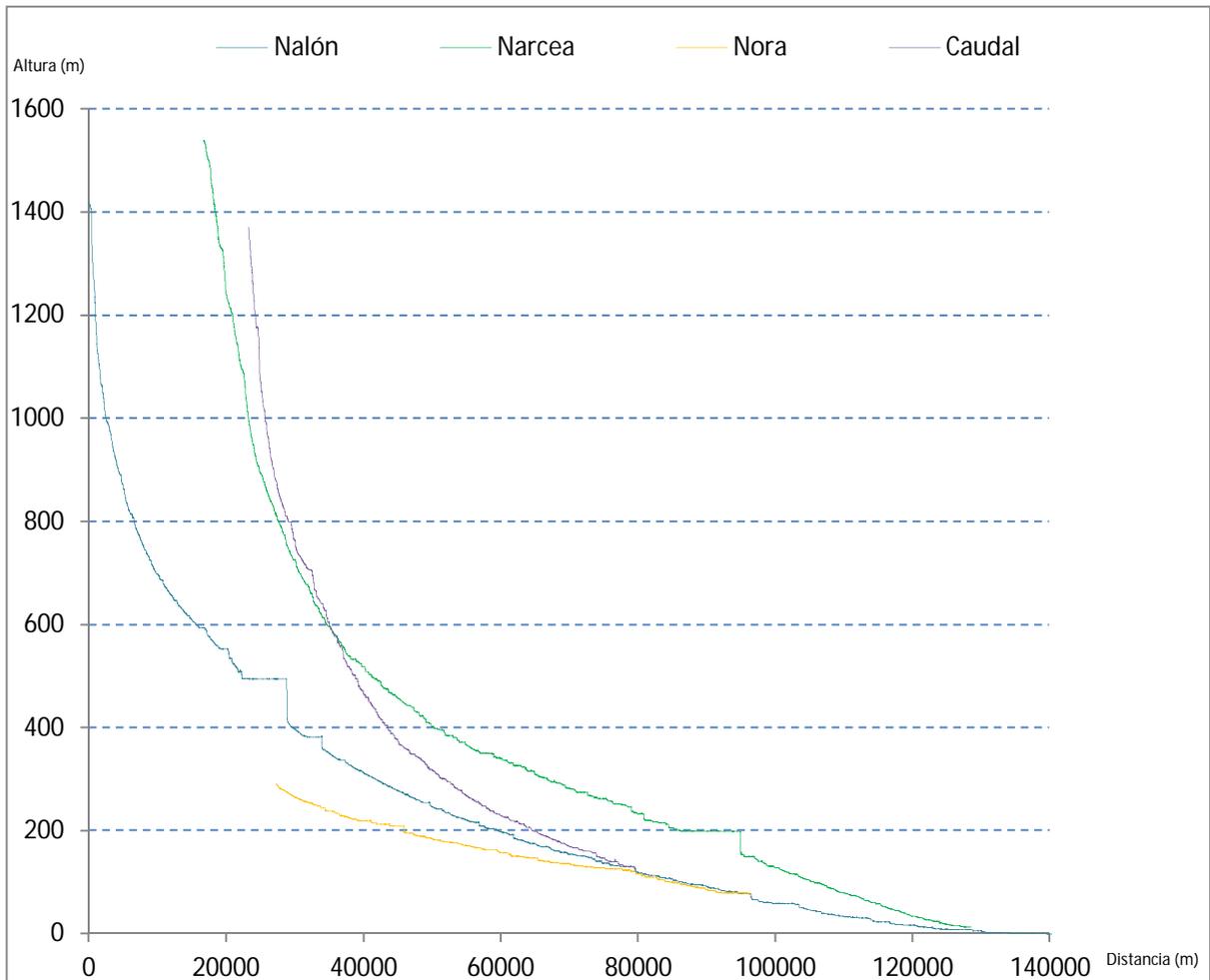


Figura 33: Perfiles longitudinales del Río Nalón y sus afluentes con su desembocadura en el Río Nalón

En la zona próxima a la desembocadura del río Nora en el Río Nalón, este también presenta alguna irregularidad sobre su perfil que se corresponde con los meandros encajados presentes en la zona. Lo que es otra prueba hacia la hipótesis de captura fluvial, ya que la presencia de meandros es también una consecuencia más de los procesos de captura fluvial.

Tras la confluencia del Río Caudal y el Río Nalón (Figura 34) comienzan a verse sobre el perfil de este último una serie de irregularidades que señalan encajamientos del cauce a partir de ese punto de posible captura. Estos encajamientos, apoyándose en los perfiles

transversales realizados en la zona se corresponden con diversos niveles de terrazas fluviales, como se verá más adelante.

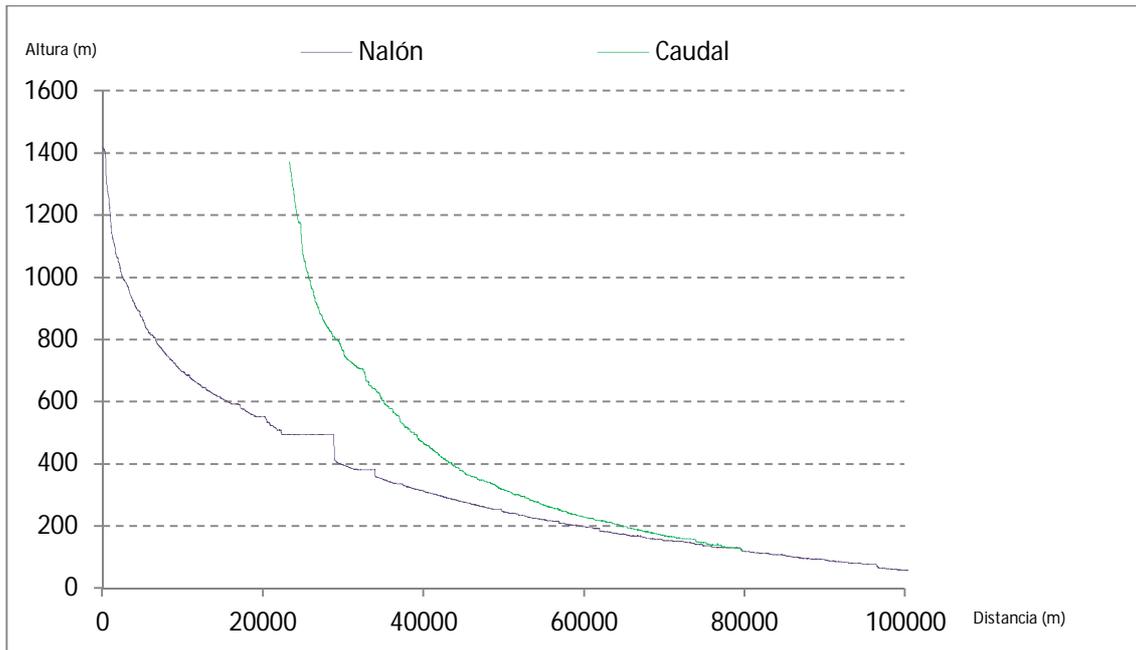


Figura 34: Perfiles longitudinales de los ríos Caudal y Nalón.

Perfiles transversales.

Se han realizado un total de treinta y seis perfiles transversales, de los cuales, doce se localizan sobre el trazado del Río Caudal antes de la posible captura fluvial de éste sobre el Nalón; los veinticuatro restantes se distribuyen sobre el cauce del Nalón de manera que doce de ellos se ubican aguas arriba a la captura y los otros doce por debajo de la posible captura.

Los perfiles transversales del Caudal (Figura 35) como los del Nalón (Figura 36 y Figura 37) en su zona alta se corresponden con el modelo general de perfil transversal de un río en forma de “V”.

En aquellos realizados en el Nalón aguas abajo del Caudal, se observan numerosas irregularidades que han sido resaltadas sobre los perfiles y que se corresponden con terrazas fluviales. En la zona correspondiente a estos perfiles, sobre el perfil longitudinal, se presentan varios encajamientos que se relacionan con niveles de terrazas lo que podría apoyar la hipótesis de la captura sufrida por el Nalón. También se observan niveles de terrazas en los perfiles 9 y 12 construidos sobre el Nalón antes de la captura lo que indica que comienza a darse un encajamiento del cauce, lo que también llevaría a pensar en un proceso de captura.

También se encuentra alguna terraza localizada en la parte alta del Río Nalón cuyo origen es glaciar o fluvio-glaciar (Jiménez-Sánchez, 1994; Jiménez-Sánchez, 1996; Rodríguez-Rodríguez et al., 2013).

Tras un análisis detallado de cada uno de los perfiles transversales, se observa un cambio en ellos. Mientras que en los perfiles levantados a lo largo del cauce del Río Caudal y los de la parte alta del Río Nalón, no se aprecian irregularidades de gran interés; en los construidos en la parte media-baja del Río Nalón se observan numerosas irregularidades.

Esas irregularidades, apoyándose en los encajamientos apreciados sobre el perfil longitudinal del Río Nalón y como se ha podido constatar al observar el mapa de recubrimientos, se corresponden con terrazas fluviales. Las terrazas fluviales son antiguas llanuras de inundación que están por encima del nivel máximo de aguas de un río, con un ligero buzamiento aguas abajo. Dado que las terrazas aparecen por el encajamiento de un río y este encajamiento puede darse por cuestiones tectónicas o por un incremento en el caudal del río que hace que la corriente sea más erosiva. Un incremento en el caudal puede estar asociado a procesos de captura fluvial.

Estas irregularidades presentadas en la gran mayoría de los perfiles realizados en dicha zona podrían no ser atribuidos a terrazas fluviales ya que una zona aplanada o un cambio abrupto en un perfil puede deberse a roturas de pendiente o a cambios en la litología, pero apoyándose en el mapa de recubrimientos superficiales de Asturias (Figura 28), podemos ver como en esa misma zona se localizan numerosas terrazas a lo largo del curso del Nalón.

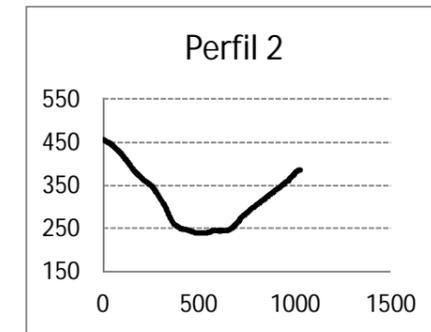
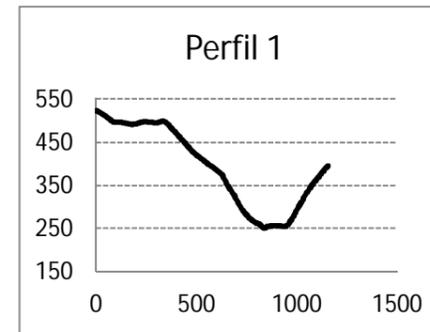
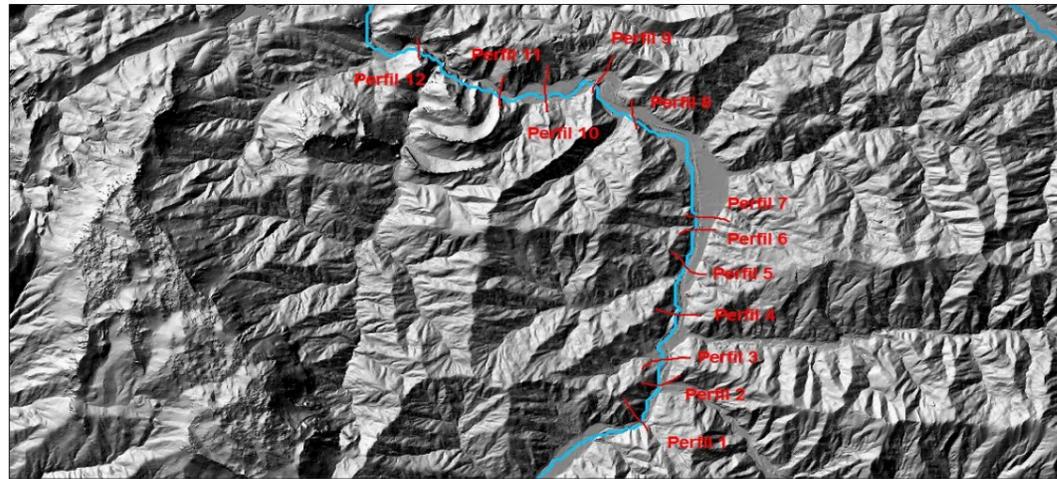
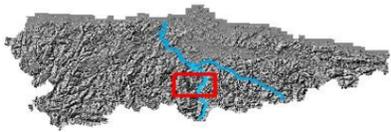
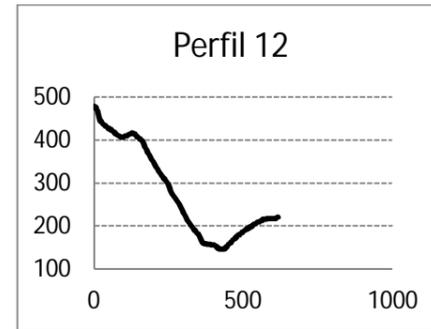
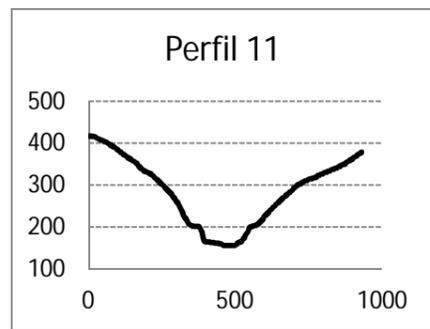
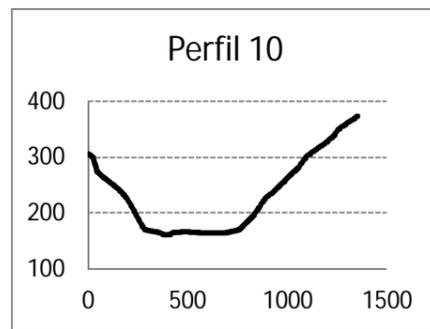
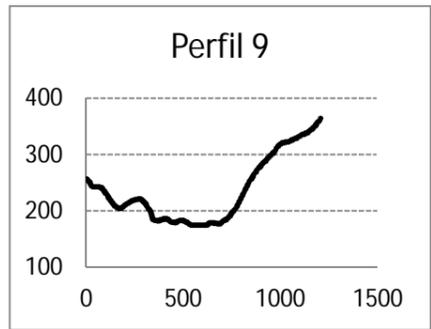
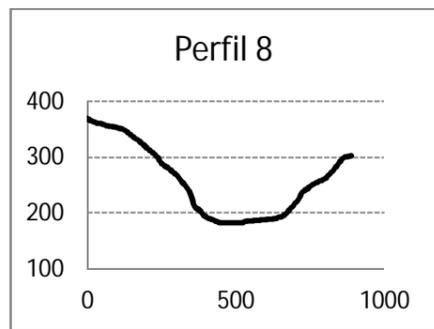
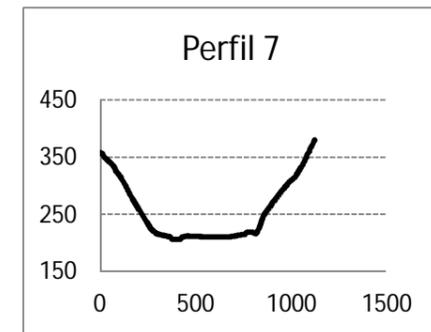
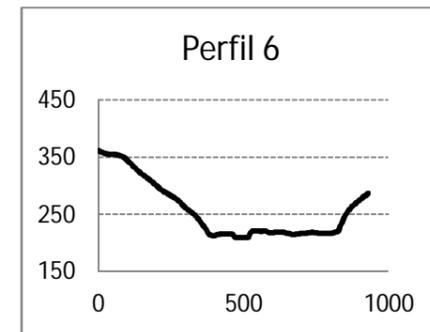
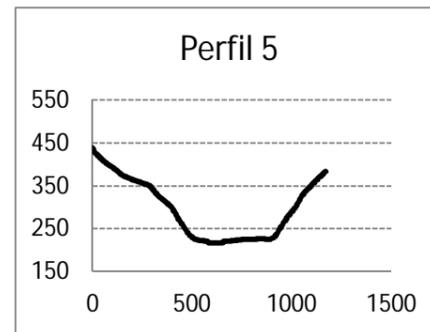
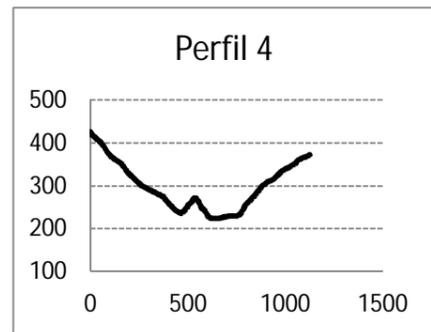
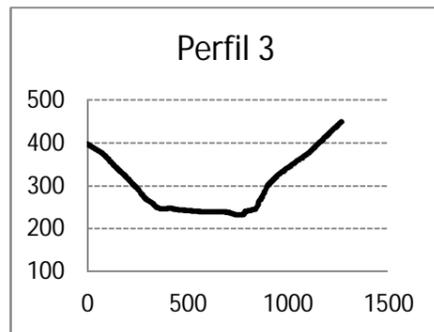


Figura 35. Localización de los perfiles transversales a lo largo del Río Caudal.



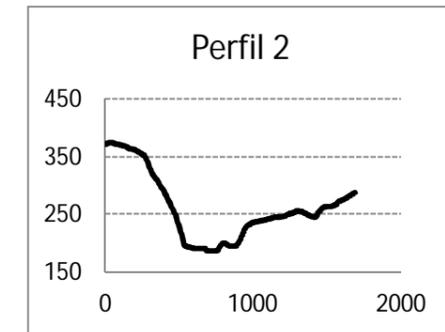
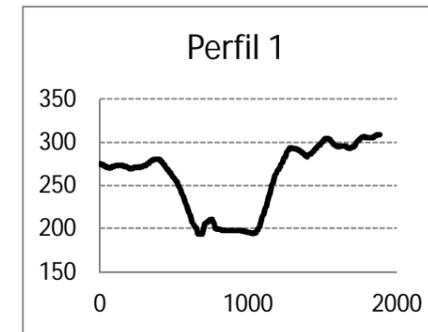
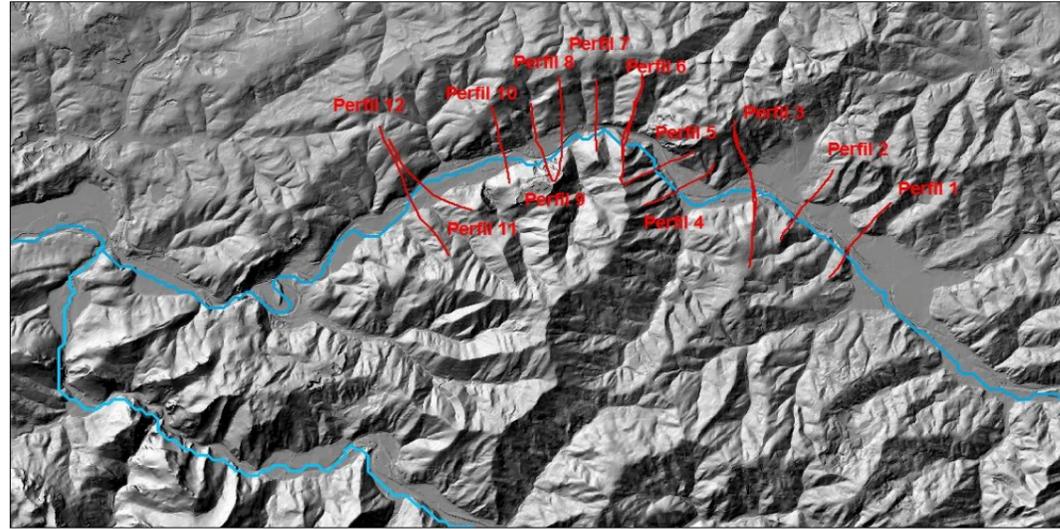
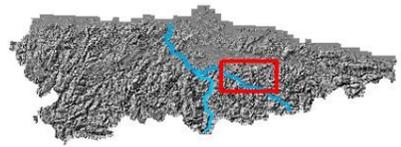
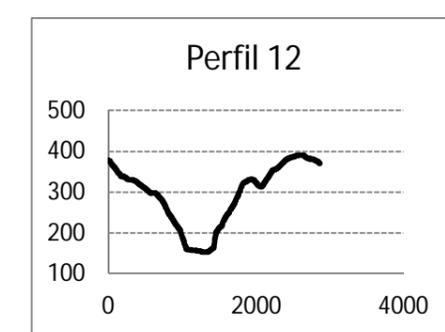
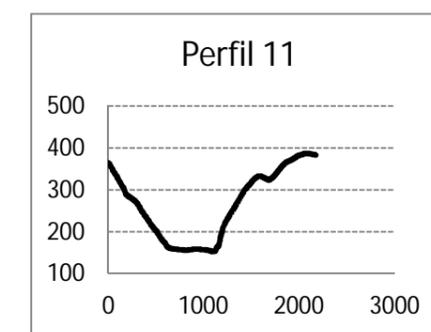
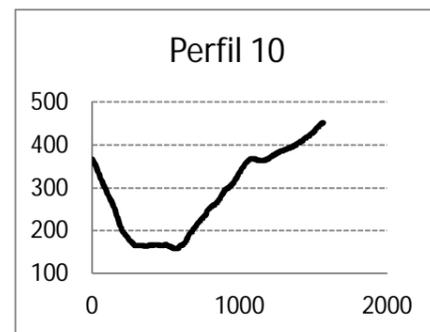
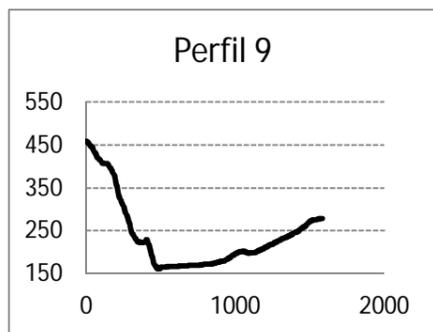
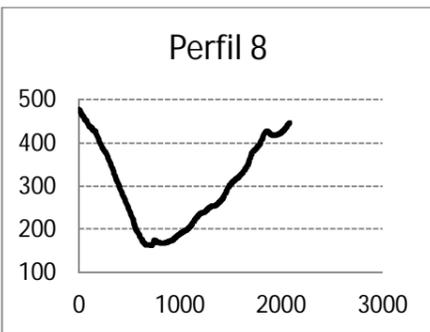
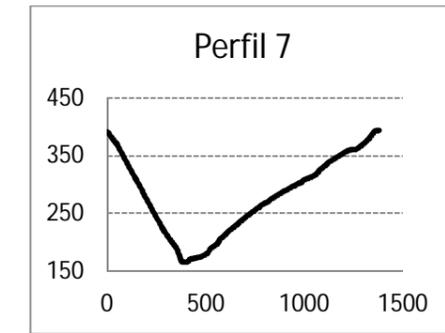
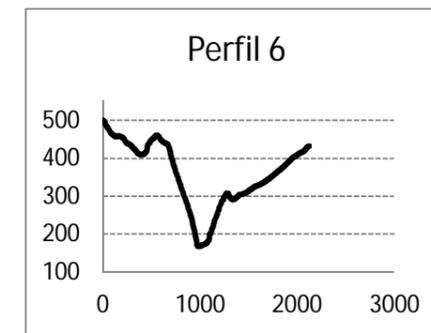
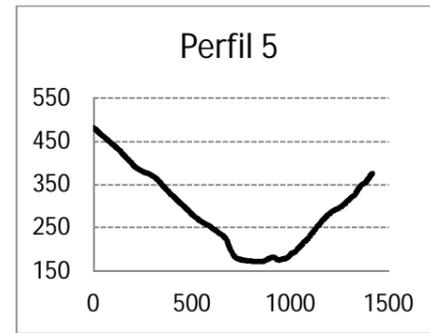
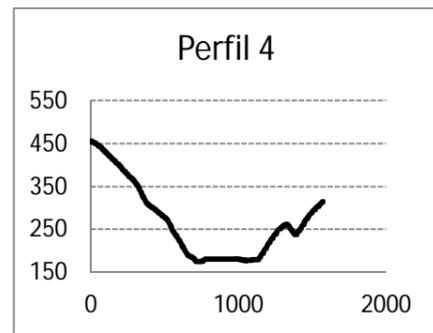
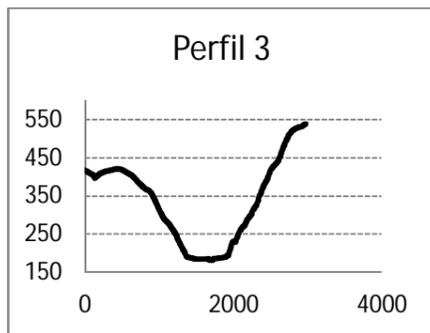


Figura 36. Localización de los perfiles transversales sobre el Río Nalón anteriores a la captura propuesta.



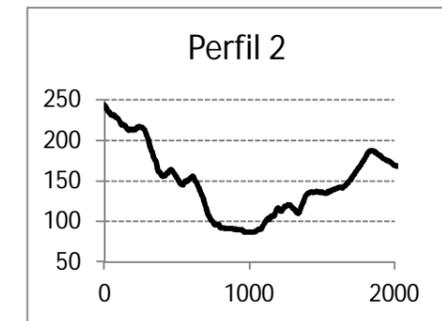
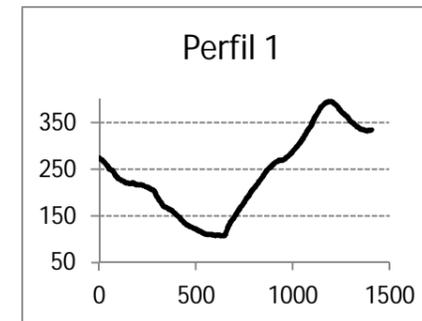
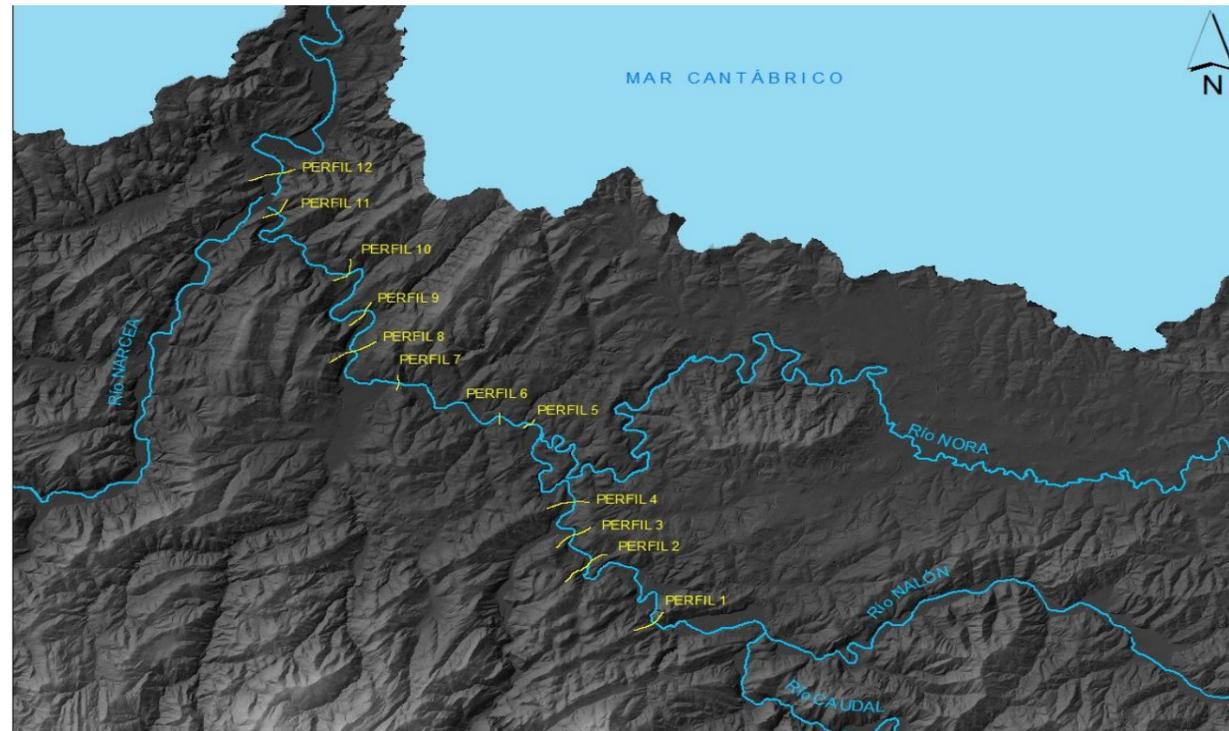
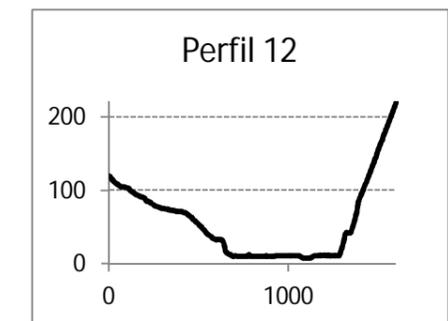
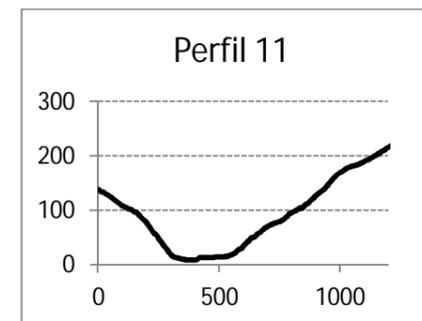
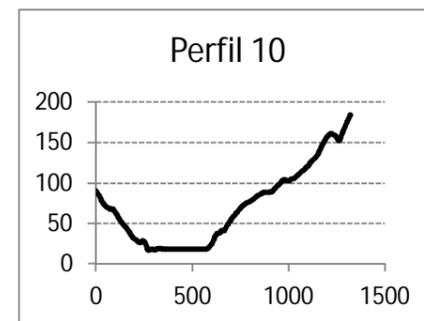
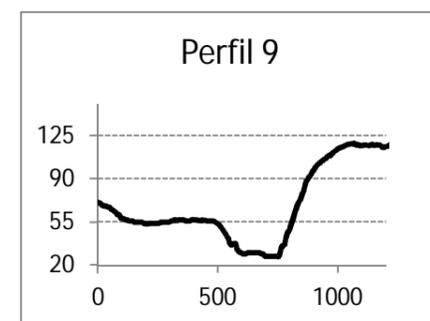
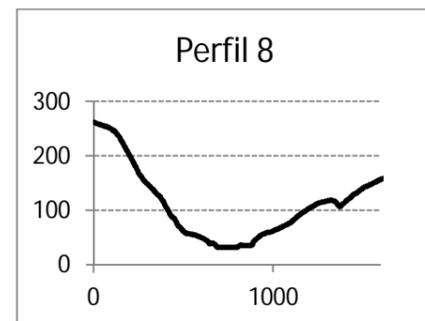
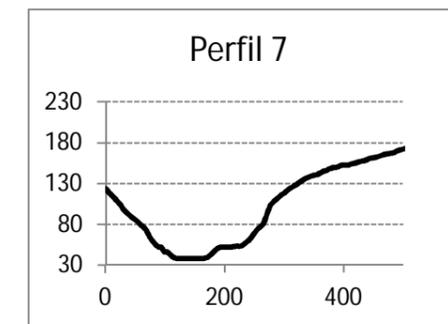
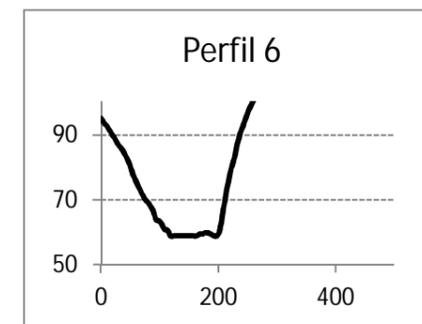
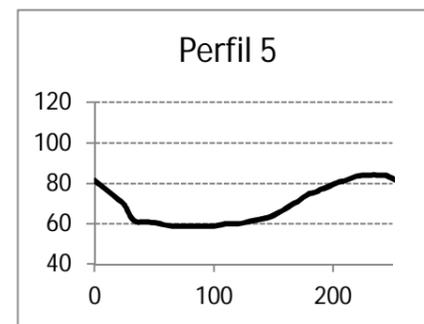
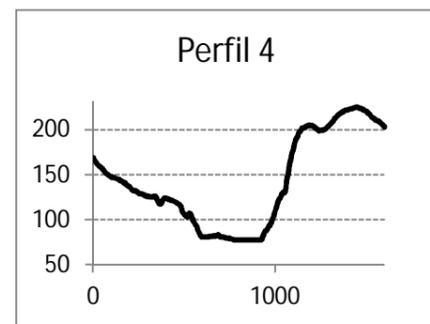
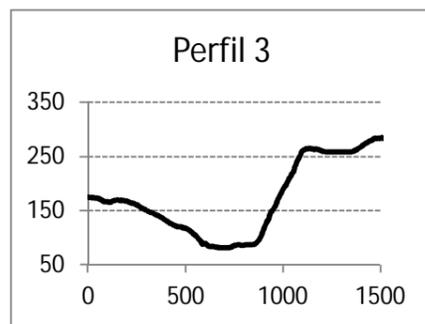


Figura 37. Localización de los perfiles transversales sobre el Río Nalón aguas abajo de la captura propuesta.



3.4 Hipsometría

Según el estadio de evolución de las cuencas las curvas muestran diferencias entre la sinuosidad y la proporción de área bajo la curva. Según esto Strahler (1952) correlaciona curvas hipsométricas convexas con estadios jóvenes, curvas con forma de S con estadios intermedios y curvas cóncavas con estadios últimos de evolución (Figura 38).

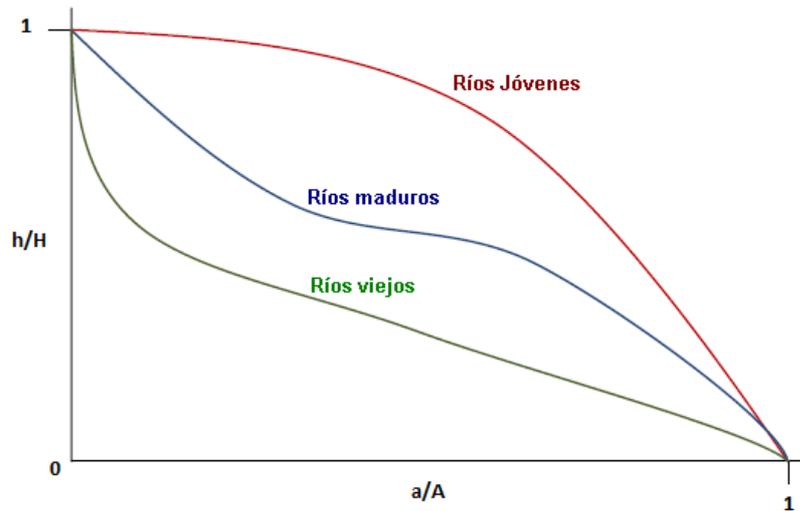


Figura 38: Relación entre la curva hipsométrica y el estadio de evolución de la cuenca (Strahler, 1952).

Además, de acuerdo con los planteamientos más clásicos de evolución del relieve (Davis, 1899), las áreas de cabecera pueden ser consideradas como “cuencas maduras” con vertientes que se van reduciendo y van dando formas más redondeadas. Los tramos bajos de la red serían cauces en proceso de rejuvenecimiento donde la erosión fluvial es más activa, considerándose “cuencas inmaduras”.

La integral hipsométrica (IH) es definida como el área bajo una curva hipsométrica y presenta valores comprendidos entre 0 y 1 (Strahler, 1952; Schumm, 1956). El valor de IH es usado para identificar el estado de evolución de la cuenca, al igual que la curva. Con valores cercanos a 1 de IH, estaríamos ante curvas convexas las cuales indican estadios jóvenes mientras que con valores de IH cercanos a 0 encontramos curvas cóncavas que se asocian con cuencas evolucionadas. Por el contrario, aquellas curvas con forma de S que indican estadios maduros pueden presentar una gran variedad de formas pero siempre el mismo valor de IH (Ohmori, 1993; Hurtez y Lucazeau, 1999).

Resumiendo, la curva y la IH se pueden usar como herramientas para caracterizar el paisaje por su relación con el estadio de evolución geomorfológica (Strahler, 1952).

Cuando las curvas hipsométricas presentan variaciones, ya sea por apartarse de las curvas teóricas o por presentar más de un punto de inflexión, ello puede relacionarse con controles tectónicos o litológicos.

El valor del área relativa que yace bajo la curva (integral hipsométrica) es indicativo del estadio de desarrollo de la cuenca, Strahler (1952) clasifica esos valores en:

- Valores superiores al 60%, la cuenca se caracteriza por un desequilibrio en el funcionamiento de la misma (estadio de juventud).
- Valores entre el 35-60% representan una cuenca en equilibrio (madurez).
- Valores inferiores al 35% implican fase de senectud (cuencas envejecidas).

Uno de los presupuestos básicos de Strahler (1952) para la aplicación de este método es que la superficie inicial de los ríos sea horizontal. Lo que puede condicionar nuestra cuenca a la hora de realizar este estudio ya que Maquínez (1992), sugiere que la red hidrográfica de la Cordillera Cantábrica se encaja en un relieve terciario lo que podría hacer no adecuada la utilización de la curva hipsométrica en esta zona.

Con los datos mostrados en el capítulo anterior, se ha construido la curva hipsométrica de la cuenca del Río Nalón cuyo resultado se muestra a continuación (Figura 39).

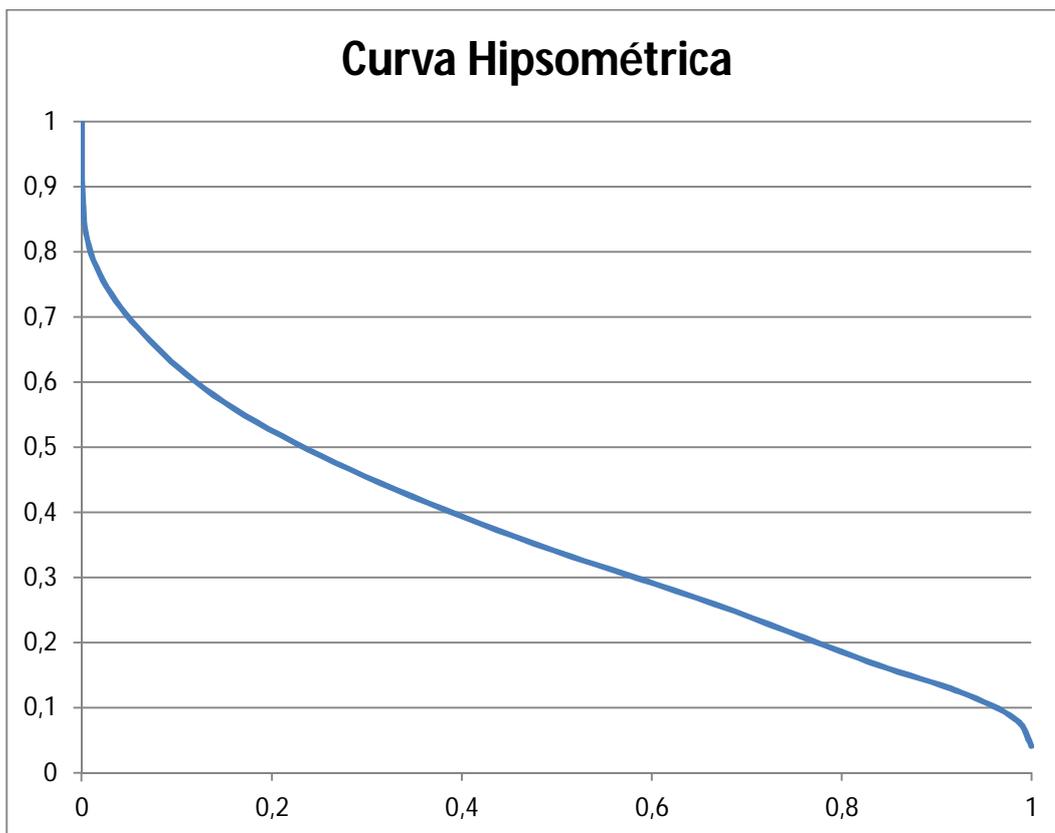


Figura 39: Curva hipsométrica para la cuenca del Río Nalón elaborada según el método de Strahler (1952) a partir de un mapa hipsométrico con equidistancia de 100 m.

Obtenida la curva hipsométrica se realizan los cálculos para obtener el área por debajo de ella, es decir, el valor de la integral hipsométrica (Tabla V). Se ha utilizado el método del trapecioide, en el que se divide el área por debajo de la curva en secciones que se aproximan a trapecios. Se calcula el área para cada una de estas secciones y se suman todas las áreas, los que nos da el valor de IH.

Método del trapecioide: $\int = (1/2)*(b-a)*(f(a)+f(b))$

Tabla V: Cálculo del área (IH) bajo la curva por el método del trapecioide.

a/A	h/H	área trapecio
1	0,041425021	0,001062393
0,982902554	0,082850041	0,006021747
0,924756567	0,124275062	0,01256268
0,838109969	0,165700083	0,014251829
0,761656825	0,207125104	0,017122144
0,68650618	0,248550124	0,022164169
0,604191867	0,289975145	0,027144597
0,516822457	0,331400166	0,02791047
0,437556723	0,372825186	0,028623848
0,36482202	0,414250207	0,029177008
0,297742689	0,455675228	0,028667032
0,237566851	0,497100249	0,028667032
0,183850605	0,538525269	0,025282151
0,138642373	0,57995029	0,021854012
0,102259211	0,621375311	0,021854012
0,072348062	0,662800331	0,017731333
0,046406584	0,704225352	0,014574376
0,026302274	0,745650373	0,010886462
0,012096912	0,787075394	0,006326169
0,004265439	0,828500414	0,002581513
0,00122555	0,869925435	0,000822341
0,000302233	0,911350456	0,000190627
9,77115E-05	0,952775476	5,66029E-05
3,97398E-05	1	0
área total		0,365534546

$0,5*(1-0,98)*(0,08+0,04)$

Según Strahler (1952), en lo anterior citado, de acuerdo con la forma de la curva hipsométrica, en este caso de tendencia en forma de S ligeramente cóncava, se habla de

un río maduro lo que estaría acorde al valor obtenido para la IH del 36% que caracteriza a la cuenca por un estadio de madurez. Uno de los presupuestos básicos de Strahler (1952) para la aplicación de este método es que la superficie inicial a partir de la cual se encajan los ríos sea horizontal. Sin embargo Marquínez (1992), sugiere que la red hidrográfica de la Cordillera Cantábrica se encaja en un relieve terciario lo que podría condicionar la utilización de la curva hipsométrica en esta zona.

4. CONCLUSIONES

Tras la realización de este trabajo se pueden extraer una serie de conclusiones, tanto metodológicas, como a partir de los resultados obtenidos.

Metodológicas:

- Las herramientas asociadas a la extensión Archydro Tools para ArcGIS permiten obtener Modelos Digitales del Terreno hidrológicamente correctos.
- Cuando los MDT corresponden a zonas en las que se produce un cambio de Huso es necesario controlar muy bien los parámetros de proyección de cada parte a ambos lados del cambio de Huso, antes de llevar a cabo la unión. Si existe algún tipo de divergencia entre ambos, se originan una serie de artefactos que dan un aspecto reticulado al MDT y lo hacen inservible para poder trabajar con él.

De resultados:

- La cuenca hidrográfica del Río Nalón ocupa una superficie total de 4.899,4 km², con un desnivel de 2.414 m desde la cabecera de la cuenca a los 0 en su desembocadura en el mar. Presenta unas pendientes medias de 23,76 °, llegando a alcanzar los 86,6° en las zonas más abruptas. Las orientaciones dominantes son las norte. Y el índice de relieve indica que las zonas más acusadas están en 172,68.
- Su sustrato está constituido por 65,52% de litologías silíceas, 22,18% de litologías calcáreas y el resto (12,30%) rocas de naturaleza mixta. El 29,18% de la cuenca está recubierto por formaciones superficiales, de ellas el 24,92% son depósitos de ladera, el 2,92% fluviales, el 0,96% antrópico, el 0,17% litoral, el 0,18%, karst y el 0,02% restante corresponde a recubrimientos lacustres.
- La presencia de terrazas fluviales se restringe casi exclusivamente al Río Nalón aguas abajo de su confluencia con el Caudal, lo que apoyaría la idea de un encajamiento a partir de dicha confluencia, que pudiera estar relacionado con un proceso de captura.
- La mayoría de los grandes movimientos en masa que se producen en la Cuenca Carbonífera Central, se desarrollan en el valle del Río Caudal, a pesar de que el sustrato es similar en la cuenca del Río Nalón. Ello apoyaría la idea de una mayor capacidad erosiva del Río Caudal y, por ello, una captura del Nalón.

- La Ría o Estuario de Avilés, en la que actualmente desemboca el Río Alvares, presenta un desarrollo demasiado grande para el tamaño de cuenca hidrográfica de dicho río (200 km²).
- La comparativa entre los perfiles transversales al cauce del Río Caudal y del Río Nalón, pone de manifiesto que los del Río Caudal son menos encajados que los del Nalón aguas debajo de la supuesta captura.
- La curva hipsométrica de la cuenca del Río Nalón presenta forma de S ligeramente cóncava y la integral hipsométrica alcanza un valor del 36%, por lo que se podría considerar un río maduro.

Aunque no se han obtenido resultados concluyentes que apoyen definitivamente la existencia de una captura del Río Nalón por parte del Río Caudal, algunas de las observaciones realizadas permiten pensar que esta hipótesis es plausible.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Alonso, J.L., Pulgar, J.A., Pedreira, D. (2007): El relieve de la Cordillera Cantábrica. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*. 151-163.
- Barrois, Ch. (1882): Recherches sur les terrains anciens des Asturies et de la Galice. *Mém. Soc. Geol. Nord.*, 2 (1). 630 pp.
- Bishop, P. (1995): Drainage rearrangement by river capture, beheading and diversion. *Progress in Physical Geography*, 19 (4): 449-473.
- Bosque Sendra, J. (1997): Sistemas de información geográfica. Ed. Rialp. 451 pp.
- Clayton, C.J. (1994): A rock volume accumulation curve for the late Ordovician-Silurian Welsh basin. *Geological Magazine* 131 (4): 539-544.
- Comte, P. (1959): Recherches sur les terrains anciens de la Cordillère Cantabrique. *Mem. Inst. Geol. Min. Esp.*, LX, 440 pp. Madrid.
- Davis, W.M. (1899): "The Geographical cycle". *Geographical Journal*, XIV. 481-504.
- Dingley, R.V. y Hendey, Q.B. (1984): Late Mesozoic and Tertiary sediment supply to the eastern Cape Basin (SE Atlantic) and palaeo-drainage systems in southwestern Africa. *Marine Geology* 56, 13-26.
- Domínguez-Cuesta, M.J (2003): Geomorfología e Inestabilidad de laderas en la Cuenca Carbonífera Central (Valle del Nalón, Asturias). Análisis de la susceptibilidad ligada a los movimientos superficiales del terreno. *Tesis Doctoral. Departamento de Geología. Universidad de Oviedo*.
- Domínguez-Cuesta, M.J., Jiménez-Sánchez, M. y Berrezueta, E. (2007): Landslides in the Central Coalfield (Cantabrian Mountains, NW Spain): Geomorphological features, conditioning factors and methodological implications in susceptibility assesment. *Geomorphology*, 89, 358 – 369.
- Farias, P. y Marquínez, J. (1995): El Relieve de Asturias. En: *Geología de Asturias (Aramburu, C. y Bastida, F., Eds)*, 203-212. Trea.
- Felicísimo, A.M. (1990): El clima de Asturias. *Enciclopedia Temática de Asturias, vol.10*. Silverio Cañada. Gijón, 179-208.
- Felicísimo, A.M. (1994): Modelos Digitales del Terreno. Introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales. Biblioteca de Historia Natural, 3. *Pentalfa*, Oviedo. 220 pp.
- Felicísimo, A.M. (1999): La utilización de los MDT en los estudios del medio físico.

- Fernández Rodríguez, F.J., Menéndez Duarte, R. y Marquínez, J. (1997): Aplicación de un sistema de información geográfica en la cartografía temática y clasificación geomorfológica de los sistemas fluviales en Asturias. *Rev. Soc. Geol. Esp.*, 10 (1-2): 117-130.
- Fernández-Viejo, G., López-Fernández, C., Domínguez-Cuesta, M.J. y Cadenas, P. (2014): How much confidence can be conferred on tectonic maps of continental shelves? The Cantabrian-Fault case. *Nature Scientific Reports*, 4, 3661.
- Flor, G. (1981): Las dunas eólicas costeras de la playa de Xagó (Asturias). *Trabajos de Geología, Univ. de Oviedo*, 11, 61-71.
- Flor, G. (1992): Enciclopedia de la naturaleza de Asturias. *La voz de Asturias*, Oviedo. págs. 1-32.
- Flor-Blanco, G., Flor, G. y Pando, L. (2013): Evolution of the Salinas-El Espartal and Xagó beach/dune systems in north-western Spain over recent decades: evidence for responses to natural processes and anthropogenic interventions. *Geo-Mar Lett.* 143-157.
- Flor-Blanco, G., Rubio Melendi, D., Flor, G. y Fernandez Alvarez, J.P. (2012): Estructura interna e interpretación de la evolución del campo dunar eólico de Xago (costa central de Asturias, NO de España). *7º Simpósio sobre a Margem Ibérica Atlântica – MIA*.
- García-Loygorri, A., Ortuño, G., Caride de Liñán, C., Gervilla, M., Greber, CH. y Feys, R. (1971): El Cabonífero de la Cuenca Central Asturiana. *Trabajos de Geología. Universidad de Oviedo*, 3, 101-150.
- García-Loygorri, A. (1974): Características generales de la Cuenca Central Asturiana (España). *C. R. VII Congr. Int. Estrat. Geol. Carb.*, 3: 111-127.
- Hovius, N. (1996): Regular spacing of drainage outlets from linear mountain belts. *Basin Research*, 8: 29 - 44.
- Hurtez, J.E. y Lucazeau, F. (1999): Lithological control on relief and hypsometry in the Hérault drainage basin (France), *C.R. Acad. Sci. IIA*, 328: 687-694.
- Jiménez-Sánchez, M. y Marquínez, J. (1990): Morfología glacial en la cuenca alta del Río Nalón, Cordillera Cantábrica. *Actas I Reunión Nacional de Geomorfología*. Vol.1. 179-189.
- Jiménez-Sánchez, M. (1994): Geomorfología de la cuenca alta del Río Nalón (Cordillera Cantábrica, Asturias). *Tesis Doctoral. Departamento de Geología. Universidad de Oviedo*. 297 pp.
- Jiménez-Sánchez, M. (1996): El glacialismo en la Cuenca alta del Río Nalón: una propuesta de evolución de los sistemas glaciares cuaternarios en la Cordillera Cantábrica. *Rev. Soc. Geol. Esp.* 9 (3-4): 157-168.

- Jiménez-Sánchez, M. (1997): Movimientos en masa en la cabecera del Río Nalón (Cordillera Cantábrica, NO España). *Cuaternario y Geomorfología*, 11 (3-4), 3-16.
- Jiménez-Sánchez, M. (1999): Geomorfología fluvial en la cuenca alta del Río Nalón (Cordillera Cantábrica, Noroeste de España). *Trabajos de Geología. Universidad de Oviedo*, 21, 189-200.
- Jiménez-Sánchez, M. (2002): Slope deposits in the Upper Nalón River Basin (NW Spain) an approach to a quantitative comparison. *Geomorphology*, 43, 165-178.
- Julivert, M. (1967): La ventana del río Monasterio y la terminación meridional del Manto del Ponga. *Trabajos de Geología. Universidad de Oviedo*, 1, 39-46.
- Llopis, N. (1954): El relieve de la región central de Asturias. *Estudios geográficos*, 57: 501-550.
- López Peláez, J. y Flor, G. (2008): Evolución ambiental del estuario de Avilés (1833-2006). *Trabajos de Geología, Universidad de Oviedo*, 28: 119-135.
- Marquínez, J. (1992): Tectónica y relieve en la Cornisa Cantábrica. In: Cearreta, A., Ugarte, F. (Eds), The Late Quaternary in the Western Pyrenean Region. *Servicio Editorial Universidad del País Vasco, Bilbao*, 141-157.
- Martínez García, P. (2007): Metodología para el estudio de avenidas en ramblas de cuencas mediterráneas utilizando sistemas de información geográfica y modelos semidistribuidos. Proyecto fin de carrera, Universidad Politécnica de Cartagena.
- Ohmori, H. (1993): Changes in the hypsometric curve through mountain building resulting from concurrent tectonics and denudation. *Geomorphology*, 8, 263-277.
- Peón, A. y Flor, G. (1993): La red fluvial asturiana: características y origen. *Resúmenes de la XV Reunión de Xeología e Minería do NO Peninsular*, 32-35.
- Pérez-Estaún, A. (1973): Datos sobre la sucesión estratigráfica del Precámbrico y la estructura del extremo Sur del Antiforme del Narcea (NW de España). *Brev. Geol. Astur., año XVIII (1)*, 3-5.
- Pérez-Estaún, A. (1975): La estratigrafía y la estructura de la rama Sur de la Zona Asturoccidental-Leonesa (W de León, NW de España). *Tesis, Universidad de Oviedo*.
- Pérez-Estaún, A. y Martínez, F.J. (1978): El Precámbrico del Antiforme del Narcea en el sector de Tineo-Cangas del Narcea (NW de España). *Trabajos de Geología, Universidad de Oviedo*, 10.
- Rodríguez-Rodríguez, L., Jiménez-Sánchez, M. y Domínguez-Cuesta, M.J. (2013): The Quaternary glacial maximum in the center of the Cantabrian Mountains (northern Iberian Peninsula): Aller-Nalón-Porma catchments. *8th IAG/AIG International Conference on Geomorphology*. 27-31

- Schum, S.A. (1956): A tentative classification of river channels. *U.S Geol. Survey Circular*, 477.
- Sitter, L.U De. (1961): Le Précambrien dans la chaîne cantabrique. *C.R.Somm. Soc. Géol. France*, 9, 253.
- Strahler, A.N. (1952): Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, 63: 1117-1142.
- Strahler, A.N. (1979): Geografía Física. *Editorial Omega*. 767 pp.
- Teeuw, R.M. (1991): Comparative-studies of adjacent drainage basins in Sierra-Leone-som insights into tropical landscape evolution. *Zeitschrift fuer Geomorphologie* 35 (3), 257-267.
- Van der Beek, P.A., Champbel, B. y Mugnier, J.L. (2002): Control of detachment dip on drainage development in regions of active fault propagation folding. *Geology*, 30: 471-474.
- Weibel, R. y Heller, M. (1991): Digital terrain modeling. *Hidrological Processes*, vol.1: 269-297.
- Zamarreño, I. (1972): Las litofacies carbonatadas del Cámbrico de la Zona Cantábrica (NW de España) y su distribución paleográfica. *Trabajos de Geología. Universidad de Oviedo*, 5, 1-118.