



*Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,
Canales y Puertos.*
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Estudio de la susceptibilidad de inundación en la cuenca hidrográfica del río Saja mediante sistemas de información geográfica

Trabajo realizado por:
David Herrera Manzanedo

Dirigido:
Daniel Jato Espino, Elena Castillo López

Titulación:
Grado en Ingeniería Civil

Santander, Junio de 2018

TRABAJO FINAL DE GRADO

“Cuando un recién nacido aprieta con su pequeño puño, por primera vez, el dedo de su padre, lo tiene atrapado para siempre.”

Gabriel García Márquez

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

Resumen

Grado en Ingeniería Civil (Mención en Hidrología)

Estudio de la susceptibilidad de inundación en la cuenca hidrográfica del río Saja mediante sistemas de información geográfica

David Herrera Manzanedo

Palabras clave: inundación (susceptibilidad a), SIG (GIS), cuenca hidrográfica, Saja

El estudio que se describe a continuación corresponde al Trabajo de Fin de Grado en Ingeniería Civil del alumno de la Universidad de Cantabria David Herrera Manzanedo. Este trabajo tiene por objeto la obtención de la mención en Hidrología y ha sido dirigido por Daniel Jato Espino y Elena Castillo López.

El objetivo principal que persigue este trabajo es el desarrollo de un modelo de detección e identificación de zonas susceptibles de inundabilidad para periodos de retorno de 500, 100 y 10 años, utilizando información de libre acceso y sistemas de información geográfica (SIG). El modelo generado debe ser extrapolable a otras cuencas objeto de estudio.

El software empleado es ARCGIS de ESRI, uno de los software comerciales más utilizados para el análisis de la información geográfica. No obstante, se podría aplicar el modelo planteado a cualquier otro software libre.

Tal y como se ha indicado anteriormente, los datos usados son de libre acceso y corresponden a mapas de acceso públicos proporcionados por el Gobierno de España, Gobierno de Cantabria y WorldClim.org.

La zona piloto elegida para el desarrollo del modelo es la cuenca hidrográfica del Saja. Esta cuenca está enmarcada dentro de la del Saja-Besaya y contiene a su vez a los principales afluentes (Río Bayones, Arroyo de Barcenillas, de Montea y Rubial entre otros). El análisis realizado se ha desarrollado hasta su paso por la Hoz de Santa Lucía, donde se produce un estrechamiento origen de las inundaciones sufridas en el entorno del barrio del mismo nombre.

La aplicación del modelo planteado genera como resultado gráfico unos mapas que permiten identificar con claridad las zonas con mayor y menor grado de susceptibilidad a sufrir inundaciones.

Los resultados obtenidos se han contrastado con ortofotos de la zona, también de libre acceso, con el fin de detectar aquellas zonas de especial susceptibilidad donde el suelo inundado coincide con el suelo urbano.

Una vez completado el modelo, la información resultante ha sido validada con los datos obtenidos por el Instituto Hidráulica Ambiental empleando como soporte programas informáticos de simulación hidráulica, al objeto de detectar posibles discordancias entre ambos resultados.

La validación planteada utilizando la información del Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria y la validación a través del archivo histórico permite concluir que es un modelo extrapolable a otras cuencas a través de la adaptación de los pesos correspondientes a cada uno de los factores.

En caso de combinar el modelo propuesto con un análisis a menor escala se podrá obtener una herramienta eficaz para la detección de zonas de susceptibilidad a inundaciones a partir de la identificación de áreas susceptibles a este fenómeno. Gracias a esto es posible la aplicación de medidas preventivas bien a lo largo del cauce o en las zonas inundables, evitando así daños materiales y/o personales.

Finalmente el modelo se ha utilizado para la identificación a lo largo del área de estudio las siguientes áreas con susceptibilidad a inundación: la Campa de Santa Lucía, el barrio de Ormas y Santibañez del municipio de Cabezón de la Sal, Riente, Uceda, Barcenillas y Sopena, entre otras.

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

Abstract

Civil Engineering (Hydrology)

Flood susceptibility assessment in the Saja river watershed using geographical information systems

David Herrera Manzanedo

Key words: flooding (susceptibility to), GIS, watershed, Saja

The study that is described next corresponds to the Degree's thesis in Civil Engineering (minor on Hydrology) of David Herrera Manzanedo, student at the University of Cantabria. This project has been supervised by Daniel Jato Espino and Elena Castillo Lopez.

The objective of the study is the development of a model to identify flood prone areas under return periods of 500, 100 and 10 years using Geographical Information Systems (GIS). This model might be easily applied to other watersheds using commercial softwares, such as ArcGIS, as well as open license programs.

The data used in this analysis was open and consisted of public maps provided by the governments of Spain and Cantabria and the project WorldClim.org.

The approach was implemented in the watershed of the Saja river. This watershed is framed within the Saja-Besaya basin, which also contains its principal tributaries (Rio Bayones, Barcenillas, Montea and Rubial creeks, among others).

The analysis takes place along the Santa Lucía gorge, in where the narrowing becomes the origin of the floods experienced in this area.

This process served to generate maps of the study watershed that work as an indicator of the zones with major and minor susceptibility to flooding.

The results have been compared with the ortophotos of the zone, which stemmed from open access data, to identify areas of special susceptibility with potential to affect urban soil.

Once the model was developed, the resulting information was validated with data provided by the Environmental Hydraulics Institute of Cantabria, in order to detect discordances among results.

The main conclusions drawn from the research are as follows:

The validation of the model using data provided by the Environmental Hydraulics Institute of Cantabria, and by the historical archives ensured its applicability to other watersheds.

Combining the model with a smaller scale analysis it can be obtained an efficient tool to detect flooding susceptibility areas. Thanks to this is possible the application of preventive measures along the watershed or in areas susceptible to flooding, avoiding that way material and/or personal damage.

Finally the model has been applied over the zones of the Campa de Santa Lucía, Ormas and Santibañez in the municipality of Campa de Santa Lucía, Ormas and Santibañez in Cabezón de la Sal, Ruento, Uceda, Barcenillas y Sopena, among others.

Agradecimientos

Agradezco a mis tutores Daniel y Elena por la ayuda y la guía a través de este proceso, a mis padres, que han hecho posible mi educación, y a mis abuelos, parte imprescindible de todo.

Índice

| | |
|---|------------|
| Resumen | iii |
| Abstract | v |
| Agradecimientos | vii |
| 1 Introducción | 1 |
| Objetivo del estudio | 2 |
| 2 Desarrollo y Aplicación del Modelo | 3 |
| 2.1 Marco referencial de estudio | 4 |
| 2.2 Variables del Modelo | 6 |
| 2.2.1 Delimitación de la Cuenca Hidrográfica | 6 |
| 2.2.2 Modelo Digital de Elevaciones | 10 |
| 2.2.3 Pendiente | 12 |
| 2.2.4 Acumulación de Flujo | 13 |
| 2.2.5 Distancia Euclidiana al Cauce del Río | 16 |
| 2.2.6 Distancia a los cauces de los ríos considerando su caudal | 18 |
| 2.2.7 Cobertura del Suelo | 20 |
| 2.2.8 Geología | 21 |
| 2.2.9 Umbral de Escorrentía | 27 |
| Adaptación del mapa de permeabilidad | 27 |
| Influencia de la pendiente | 29 |
| Cálculo del umbral de escorrentía | 30 |
| 2.2.10 Nivel Freático | 31 |
| 2.2.11 Precipitación | 34 |
| 2.3 Normalización | 37 |
| 2.4 Desarrollo de Criterios de Peso | 39 |
| 2.5 Modelo creado y Verificación | 42 |
| 2.5.1 Modelo creado | 42 |
| Modelo Digital de Elevaciones | 42 |
| Pendiente | 42 |
| Acumulación de flujo | 42 |
| Distancia ponderada a los cauces de los ríos | 43 |
| Umbral de escorrentía | 43 |
| Precipitación | 43 |
| 2.5.2 Verificación del Modelo | 45 |
| 2.6 Aplicación del modelo y resultados | 47 |
| 3 Conclusiones | 61 |
| A Anejo de resultados | 63 |
| Bibliografía | 69 |

Lista de Figuras

| | | |
|------|--|----|
| 2.1 | Mapa de la situación del río Saja en Cantabria | 4 |
| 2.2 | Localización del puente de Santa Lucía | 5 |
| 2.3 | Detalle de la localización del puente de Santa Lucía | 5 |
| 2.4 | Mapa hojas descargadas del MDE | 7 |
| 2.5 | Mapa de dirección de flujo de las hojas del MDE | 8 |
| 2.6 | Mapa con todas las cuencas hidrográficas | 9 |
| 2.7 | Cuenca hidrográfica de interés | 9 |
| 2.8 | Cuadrícula MTN50 | 11 |
| 2.9 | Mapa de dirección de flujo | 14 |
| 2.10 | Red de cauces | 15 |
| 2.11 | Mapa de distancia a los cauces y red hidrográfica | 17 |
| 2.12 | Mapa de densidad ponderada de cauces con red hidrográfica | 19 |
| 2.13 | CLC para Cantabria | 20 |
| 2.14 | Mapa litoestratigráfico de España peninsular | 21 |
| 2.15 | Mapa litoestratigráfico utilizado | 23 |
| 2.16 | Tabla de agrupaciones hidrogeológicas | 24 |
| 2.17 | Tabla de atributos con permeabilidad | 24 |
| 2.18 | Mapa de permeabilidad | 25 |
| 2.19 | Detalle de la tabla 2.3. | 28 |
| 2.20 | Tabla 2.4. orden 298/2016 | 28 |
| 2.21 | Diagrama de texturas | 28 |
| 2.22 | Mapa de pendientes según 3% | 29 |
| 2.23 | Tabla de atributos para el cálculo del umbral de escorrentía | 31 |
| 2.24 | Tabla con datos de nivel freático | 32 |
| 2.25 | Mapa puntos de nivel freático con cuenca hidrográfica | 32 |
| 2.26 | Tabla con datos de nivel freático | 32 |
| 2.27 | Mapa de precipitación total anual | 34 |
| 2.28 | Tabla de datos de precipitación | 35 |
| 2.29 | Tabla de datos de precipitación según Gumbel | 35 |
| 2.30 | Mapa de puntos de precipitación | 36 |
| 2.31 | Diagrama de flujo metodología | 44 |
| 2.32 | Visor del SNCZI para la península | 46 |
| 2.33 | Zonas inundables para T = 10 años | 48 |
| 2.34 | Zonas inundables para T = 100 años | 49 |
| 2.35 | Zonas inundables para T = 500 años | 50 |
| 2.36 | Mapas de la cuenca hidrográfica | 52 |
| 2.37 | Mapa de precipitación con T = 500 años | 53 |
| 2.38 | Mapa de precipitación con T = 100 años | 54 |
| 2.39 | Mapa de precipitación con T = 10 años | 54 |
| 2.40 | Susceptibilidad a inundación para T = 10 años | 55 |
| 2.41 | Comparación entre mapas de susceptibilidad para T=10años | 56 |
| 2.42 | Susceptibilidad a inundación para T = 100 años | 57 |

| | | |
|------|---|----|
| 2.43 | Comparación entre mapas de susceptibilidad para T=100años | 58 |
| 2.44 | Susceptibilidad a inundación para T = 500 años | 59 |
| 2.45 | Comparación entre mapas de susceptibilidad para T=500años | 60 |

Lista de Tablas

| | | |
|-----|---|----|
| 2.1 | Valores máximos y mínimos para cada mapa usados en su normalización | 38 |
| 2.2 | Distintos escenarios de pesos estudiados | 41 |
| 2.3 | Resumen de pesos en el modelo de cada factor | 51 |

Lista de Abreviaturas

| | |
|---------------|--|
| BTA | Base Topográfica Armonizada |
| CLC | Corine Land Cover |
| EEA | European Environment Agency |
| IGME | Instituto Geológico y Minero de España |
| IPE | Inventario de Presas y Embalses |
| MAPAMA | Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente |
| MCDA | Multi-Criteria Decision Analysis |
| MDE | Modelo Digital de Elevaciones |
| MDT | Modelo Digital de Terreno |
| MTN | Mapa Topográfico Nacional |
| NMMA | Nivel Medio del Mar en Alicante |
| PNOA | Plan Nacional de Ortofotografía Aérea |
| SNCZI | Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables |

Capítulo 1

Introducción

El desarrollo de respuestas apropiadas para enfrentar y prevenir las inundaciones requiere de un análisis de interacciones entre elementos de un marco de susceptibilidad que combinan peligro, vulnerabilidad y exposición (Kaźmierczak and Cavan, 2011). Esto permite prepararse para un futuro incierto ampliando la adaptación a la variación actual del clima y a los eventos meteorológicos extremos (Burton, 1997). Para crear respuestas apropiadas, es necesario comprender la naturaleza de la susceptibilidad y su distribución espacial (Kaźmierczak and Cavan, 2011).

El clima y el tiempo condicionan en gran medida la vida humana. Los eventos extremos en las décadas recientes han incrementado la importancia de los peligros asociados con el clima y la meteorología, como las altas temperaturas y la susceptibilidad a inundación a consecuencia de las intensas precipitaciones (Beniston and Stephenson, 2004).

El número de inundaciones se ha visto incrementado significativamente alrededor del globo en las últimas tres décadas (Kourgialas and Karatzas, 2011). Esto se debe al cambio climático, cambios en el uso del suelo y otras intervenciones antropogénicas como el crecimiento urbano, la cobertura total o parcial de cuencas de torrentes, alineación de las cuencas de los ríos, estructuras sobre cauces dimensionadas erróneamente, deforestación y su consecuente erosión, entre otras (Kourgialas and Karatzas, 2011). De la misma manera Blistanova considera que la susceptibilidad a inundación y vulnerabilidad está viéndose aumentado debido a cambios en el patrón de precipitación, incremento en la frecuencia de eventos extremos, cambios en el uso del suelo y desarrollo de áreas propensas a la inundación como resultado de la demanda socio económica (Blistanova et al., 2016).

No cabe duda de que debido a la presencia del ser humano, los eventos de inundaciones extremas han aumentado durante los últimos años, creando una tendencia creciente para los años venideros. En el caso de las estructuras singulares sobre cauces de ríos en zonas con susceptibilidad a inundación, este cambio debe ser tenido en cuenta, ya que toda construcción debe tener una proyección de futuro en la que se asegure la integridad de esta en las condiciones más adversas.

Las inundaciones ponen el peligro las vidas y la salud de los habitantes, el patrimonio cultural y el entorno, causando daños materiales en la propiedad y limitando las actividades económicas. Aunque no es posible prevenirlas en todos los casos, la simulación de escenarios de inundación y las evaluaciones de susceptibilidad son herramientas estratégicas para la reducción efectiva de la susceptibilidad y las consecuencias de las inundaciones (Blistanova et al., 2016).

Es relativamente frecuente que puentes sobre ríos en zonas de riesgos de crecidas funcionen como cuellos de botella, generando un obstáculo que el agua ha de superar y que puede llegar a crear inundaciones aguas arriba.

El desarrollo de respuestas adecuadas requiere de un análisis de la susceptibilidad de una zona a sufrir inundaciones seguido de una consideración de los daños y de la implementación de las medidas preventivas adecuadas.

Objetivo del estudio

En base a estas consideraciones, este estudio tiene como objetivo crear un modelo funcional capaz de detectar y señalar en un mapa zonas con susceptibilidad a inundaciones gracias al uso en solitario de Sistemas de Información Geográfica (SIG), lo que supone un avance en comparación con investigaciones previas que se apoyan en el uso de software de simulación hidráulica para llevar a cabo esta tarea. La principal característica de este es la capacidad de ser reproducido utilizando herramientas simples, en cualquier cuenca hidrográfica de la cual se conozcan sus particularidades y el histórico de eventos que han producido crecidas e inundaciones. En este caso el estudio está particularizado a la zona de Cantabria, en la cuenca hidrográfica del río Saja hasta su paso por el municipio de Cabezón de la Sal, y es posiblemente extrapolable a la zona Norte Cantábrica de España.

Siguiendo con esta tónica, la salida de resultados viene dada en forma de mapas en dos dimensiones fácilmente interpretables por el lector independientemente de su experiencia previa con mapas de este tipo.

La susceptibilidad vendrá clasificado por probabilidad de ocurrencia representado a través de periodos de retorno.

Capítulo 2

Desarrollo y Aplicación del Modelo

En este segundo capítulo están contenidos todos los procesos llevados a cabo para la obtención del modelo de detección e identificación propuesto, así como su particularización en la cuenca del río Saja a su paso por Santa Lucía, en Cabezón de la Sal, que supone un estrechamiento para las avenidas extraordinarias recogidas por el río Saja. De la misma manera se incluyen los mapas generados con la utilización del mismo.

La estructura del este capítulo corresponde al orden de aplicación de los pasos en el desarrollo del proceso de creación del modelo, de tal manera que este sea fácilmente reproducible por un lector no experimentado.

El capítulo comienza describiendo la importancia de cada una de las variables usadas así como la procedencia de los datos utilizados, definiendo el procedimiento seguido y generando los mapas resultantes de dicho análisis. También se incluye una valoración acerca de la calidad del dato, es decir, de las incertidumbres de las variables utilizadas y de las precisiones obtenidas.

Una vez definido el proceso a seguir, se detallan los pasos seguidos para la normalización de los mapas, lo que es fundamental para su posterior combinación y, por tanto, para garantizar la calidad del resultado final.

Tras esto, se explica el desarrollo final del modelo, la importancia de cada factor, y la verificación o validación de los resultados obtenidos.

Finalmente se incluyen los resultados del proceso llevado a cabo y de la aplicación del modelo a la cuenca del río Saja.



FIGURA 2.1: Mapa de la situación del río Saja en Cantabria

2.1 Marco referencial de estudio

El río Saja es un curso fluvial que desde su nacimiento en la vertiente norte de la Sierra del Cordel, hasta su desembocadura en el Mar Cantábrico, en la ría de San Martín de La Arena, entre Suances y Miengo, recorre 67 km y está incluido dentro de la Confederación Hidrográfica del Cantábrico, de la cual provienen estos datos.

Nace en las fuentes Corva y del Diablo a más de 1.600 metros de altitud, siendo el primer municipio con el que se encuentra el pueblo Saja, que le da su nombre.

Circula a través de un entorno de clima típico de la zona costera de Cantabria con inviernos suaves, veranos de temperaturas moderadas, elevada humedad y precipitaciones, recogiendo en su cuenca una precipitación media anual de 1400 mm.

Encuentra en la Hoz de Santa Lucía su paso más estrecho, de unos 2 km de longitud, la entrada al valle de Cabuérniga. Cabezón de la Sal se encuentra en la ampliación de la llanura aluvial tras este paso. El río Saja desemboca en el mar Cantábrico a la orilla de Suances.

Según la Confederación Hidrográfica del Cantábrico, las tierras fértiles de la localidad de Cabezón de la Sal tienen su origen en el curso del Saja situado sobre un diapiro salino (Cantábrico (CHC), 2018).

El análisis se ha decidido llevar a cabo desde el nacimiento del río Saja hasta la Hoz de Santa Lucía, y más concretamente al puente de la CA-180 y su entorno cercano (figuras 2.2 y 2.3) que cruza el río, donde tiene lugar un estrechamiento que funciona como cuello de botella en caso de grandes avenidas del río. A esto se asocian las inundaciones periódicas que sufre la Campa de Santa Lucía, el barrio del mismo nombre, y de los barrios de Santibañez, Ormas.

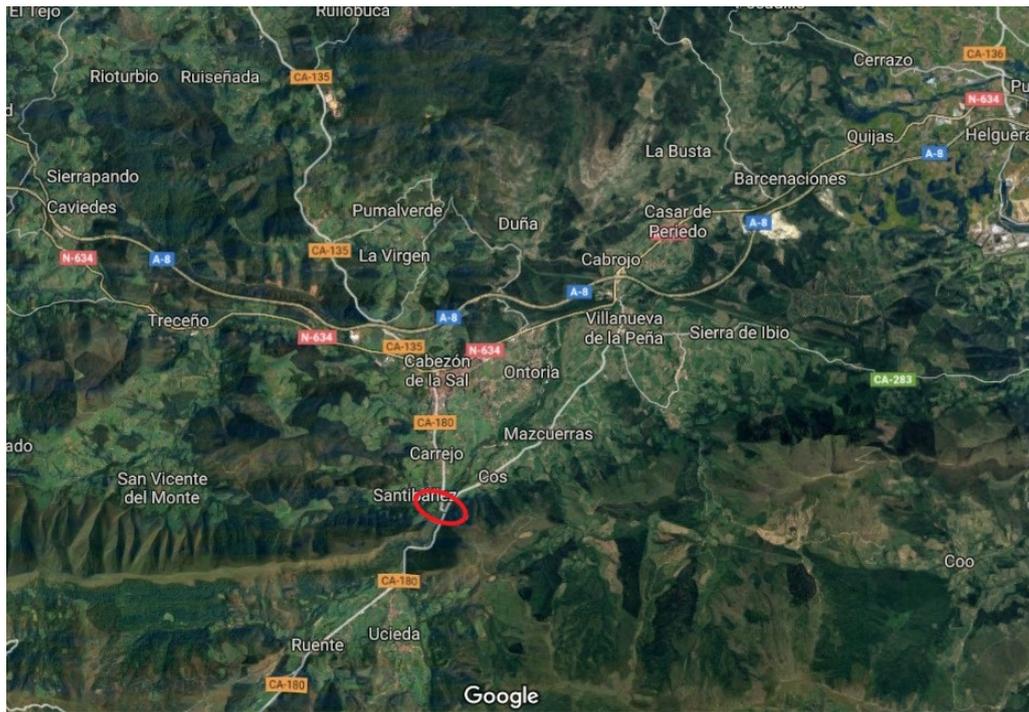


FIGURA 2.2: Localización del puente de Santa Lucía



FIGURA 2.3: Detalle de la localización del puente de Santa Lucía

2.2 Variables del Modelo

2.2.1 Delimitación de la Cuenca Hidrográfica

La delimitación de la cuenca hidrográfica no es estrictamente necesaria para llevar a cabo la metodología planteada en el caso del modelo, sin embargo, resulta muy conveniente por varias razones:

- Confirma o desmiente la estimación hecha a partir del Modelo Digital de Elevaciones (MDE) acerca de las dimensiones de la cuenca, es decir, permite saber el contorno real de esta con lo que se puede ser más preciso estableciendo los límites de cada uno de los factores necesarios.
- Crea unos resultados en forma de mapa limitado por la cuenca hidrográfica, volviendo estos más fácilmente interpretables por el lector.
- Reduce el volumen de datos con el que estamos trabajando, y en consecuencia el tamaño de los archivos que el programa necesita mover. Esto es particularmente favorecedor para trabajar con mapas como el de uso del suelo que tiene la extensión de la provincia de Cantabria.
- Permite identificar estrechamientos en la cuenca indicando las zonas con una susceptibilidad a inundación mayor.

Antes de determinar la cuenca hidrográfica de estudio es necesario descargar las hojas de los Modelos Digitales de Elevaciones (MDE) necesarias (siguiendo el proceso explicado en el capítulo 2.2.2). Para ello se ha realizado una estimación de la zona que ocupará la cuenca mediante la visualización del MDE descargado, de tal manera que ha sido posible ir identificando los límites de esta, es decir, las zonas de mayor cota y de cambio de pendiente. El resultado de este proceso es un MDE que contiene la zona de la cuenca hidrográfica (figura 2.4).

Para definir el contorno de la cuenca hidrográfica se ha usado el modelo digital de elevaciones definido a partir de las hojas descargadas (figura 2.4) y la herramienta del *Spatial Analyst* que incluye *ArcGIS, Basin*. Esta necesita de un mapa de direcciones de flujo (figura 2.5) creado a partir de la herramienta de *ArcGIS Flow Direction* que devuelve un mapa con valores 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64 y 128 según la condición de las celdas adyacentes.

El resultado de este proceso es un archivo raster con las distintas cuencas hidrográficas contenidas en el MDE (figura 2.6) en forma de polígonos, de entre los cuales es necesario identificar aquel que contiene el punto en el que se encuentra la sección de interés para el estudio. El polígono en cuestión será un conjunto de puntos con formato ráster que tendrán un mismo valor (figura 2.7), en este caso el 91.



FIGURA 2.4: MDE de las hojas descargadas para abarcar la cuenca hidrográfica del modelo

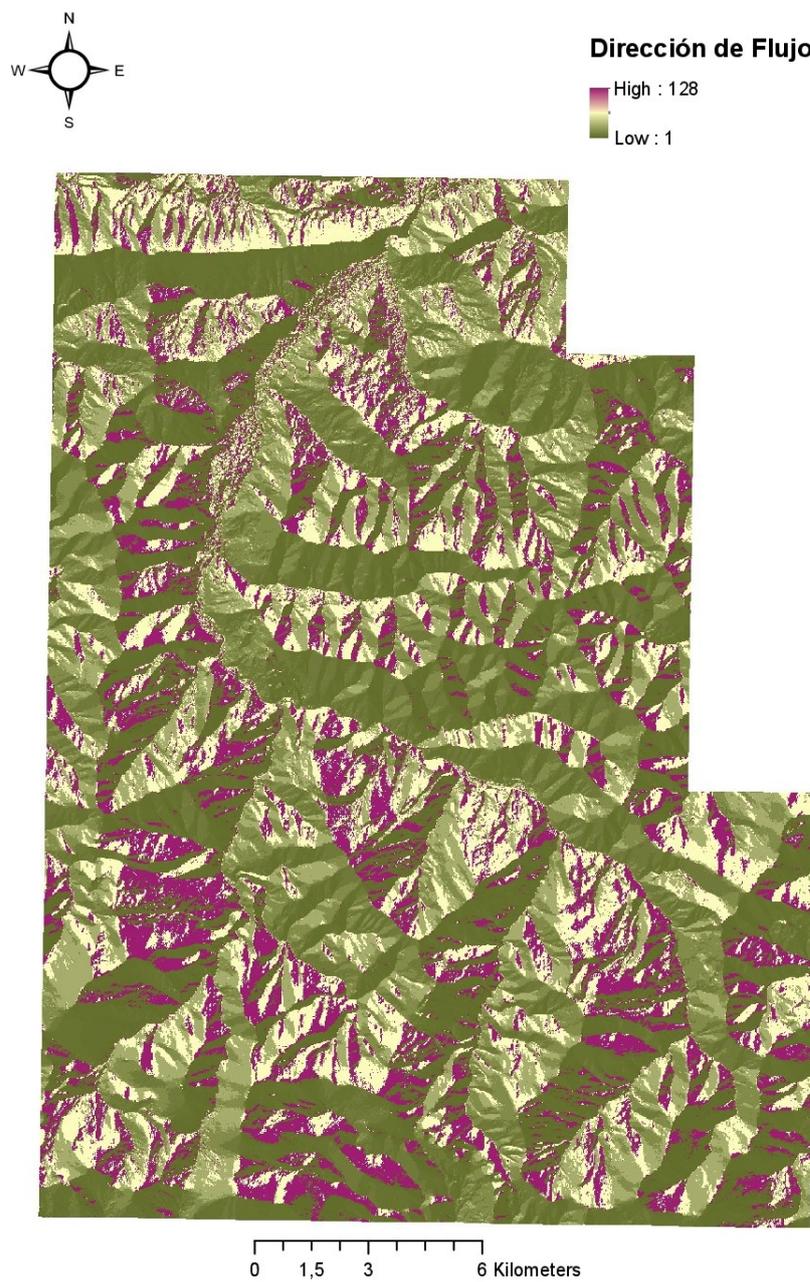


FIGURA 2.5: Mapa de dirección de flujo a partir de las hojas de MDE para la determinación de la cuenca hidrográfica



FIGURA 2.6: Mapa que contiene todas las cuencas hidrográficas contenidas en las hojas descargadas de MDE

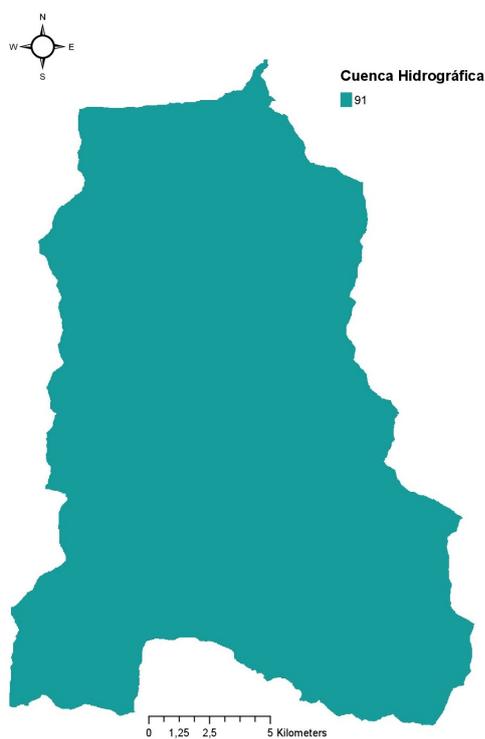


FIGURA 2.7: Polígono con la cuenca hidrográfica de interés para el estudio

2.2.2 Modelo Digital de Elevaciones

Una definición general de MDE fue proporcionada por Miller y Laflamme en 1958 como *“representación estadística del terreno, en forma de números digitales, por medio de un conjunto de puntos con coordenadas x,y,z respecto a un sistema de georreferenciación conocido”*.

Se trata de los valores de altitudes, a lo largo de toda la cuenca hidrográfica, cuyo datum vertical es el Nivel Medio del Mar en Alicante (NMMA). Este mapa, al margen de su relevancia en la creación del modelo de inundabilidad, ha sido de fundamental importancia a la hora de obtener otros mapas con más peso y delimitar la cuenca hidrográfica de estudio, dependiendo la exactitud de los resultados de la precisión del modelo digital de elevaciones (Elkhrachy, 2015). A pesar de esto, las altitudes más bajas corresponden a las zonas con más susceptibilidad a inundación, lo que, además del MDE se ve reflejado directamente en los mapas de pendiente y acumulación de flujo.

Los documentos necesarios para generar este mapa han sido obtenidos del Geoportal donde el Gobierno de España ofrece servicios de visualización, consulta y análisis de información geográfica, además de un servicio de descargas de donde provienen parte de los mapas usados (<http://sig.mapama.es/geoportal/>). El proceso de obtención de estos valores está descrito por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) como el resultado de la combinación de nubes de puntos Light Detection and Ranging (LiDAR), vuelo fotogramétrico, apoyos de campo y aerotriangulación, con tratamiento de técnicas de interpolación o correlación.

Para el MDE, el terreno está dividido en cuadrantes que abarcan el territorio de la península de la manera indicada en la figura 2.8, demarcando las hojas del Mapa Topográfico Nacional a escala 1:50000 (MTN50). En el caso de estudio, las hojas que han sido descargadas son 0057, 0058, 0082 y 0083, todas ellas proyectadas en UTM 1989 dentro del huso 30N.

Para el análisis de susceptibilidad a inundación se ha trabajado con un tamaño de celda de 5m x 5m (`Cellsize = 5`), con el fin de aumentar la precisión del modelo. Para tener esta exactitud han sido utilizados modelos digitales del terreno con paso de malla de 5 m obtenidas por estereocorrelación automática de vuelos fotogramétricos PNOA con resolución de 25 a 50 cm/píxel, revisada e interpolada con líneas de ruptura donde fuera viable. La información del MDE data de 2010 a 2012, siendo la más reciente posible. Desde el Centro de Descargas del Centro Nacional de Información Geográfica se ha accedido a estos mapas en formato `.tif` de tal manera que sean legibles por ArcGIS.

Para poder incluir los MDE como parte del modelo de susceptibilidad a inundación ha sido necesario llevar a cabo varios pasos previos. Primero, con objeto de corregir los posibles errores en el modelo, se ha usado el comando `Fill`, el cual rellena imperfecciones con una dirección de flujo indefinida. Tras esto, el modelo sigue estando formado por 63 hojas independientes, por lo tanto es necesario unir las mediante `Mosaic to New Raster`, manteniendo el tamaño de celda de 5m. Finalmente, utilizando el polígono que delimita la cuenca hidrográfica, se recorta el mapa utilizando `Extract By Mask`, donde es necesario usar dos archivos ráster: la máscara (figura 2.7) y el ráster producto de la unión de las hojas (figura 2.4). Esto dará como resultado un modelo digital de elevaciones delimitado por la cuenca de estudio (figura 2.36).

El proceso, en relación con la extracción de la zona de interés en los modelos, es siempre similar, por lo que en el resto de las variables no se explicará tan detalladamente.

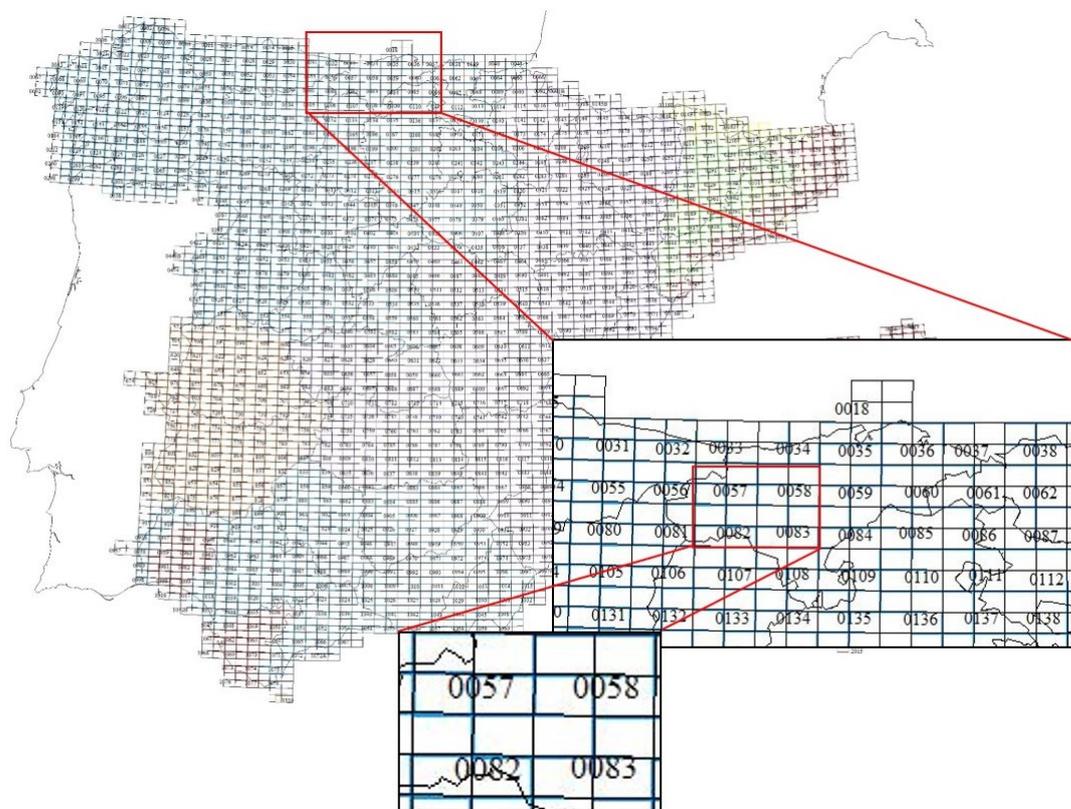


FIGURA 2.8: Cuadrícula del MTN50 incluyendo detalle de la zona de estudio.

2.2.3 Pendiente

Este mapa representa el grado de variación de la elevación en celdas adyacentes (Xiao, Yi, and Tang, 2016), siendo el factor principal que determina y diferencia las formas de relieve. En relación con la inundabilidad, afecta en gran medida a la velocidad del agua, viéndose incrementado la susceptibilidad a inundación repentina a medida que el valor de la pendiente aumenta (Elkhrachy, 2015). Este mapa señala las zonas donde es más probable que el agua se acumule y aquellas más susceptibles a sufrir escorrentía.

Para preparar este mapa se plantearon dos opciones principales. La primera de ellas es descargarlo de dominios web que ofrezcan este dato ya procesado, en este caso: mapas.cantabria.es. El Gobierno de Cantabria ofrece modelos de pendiente para el territorio de la comunidad aclarando las limitaciones del uso en mapas con detalle¹. Y la segunda metodología es procesarlo a partir del MDE descargado.

En el caso del estudio realizado, a pesar de la validez de ambas opciones, se ha decidido procesar el mapa de pendientes a partir del MDE trabajado para aumentar la precisión del modelo que será usado en la obtención de otros parámetros con posterioridad (Blistanova et al., 2016).

De esta manera, partiendo del MDE recortado para la cuenca hidrográfica de interés, se ha utilizado el paquete de Herramientas de Análisis Espacial que contiene ArcGIS con Slope para obtener pendientes en porcentajes (figura 2.36).

Cabe destacar la presencia de una zona de pendiente baja (verde oscuro) en los márgenes del río Saja hasta la zona de interés en Santa Lucía, donde se estrecha. Esto es un indicador claro de la posibilidad de que la sección de estudio funcione como cuello de botella para la salida del agua en la cuenca hidrográfica.

¹ Los modelos digitales del terreno de los que se dispone son en todo caso aproximados y dan una visión general de la morfología del terreno. Su escala de compilación, los métodos de captura y el instrumental de captación no permiten utilizar esta fuente de datos para aplicaciones de urbanismo o ingeniería de detalle. Cualquier estimación de valores de altitud, pendiente del terreno o sombreado analítico es útil sólo para aplicaciones territoriales de escalas 1:20.000 o inferiores.

2.2.4 Acumulación de Flujo

La acumulación de flujo cuantifica gráficamente el número de celdas que contribuyen hidrológicamente a cada celda del mapa resultado (Kourgialas and Karatzas, 2011). Este parámetro identifica el cauce fluvial por donde es más probable que discurra el agua en caso de precipitaciones por toda la superficie de la cuenca hidrográfica. En el análisis de inundabilidad realizado este factor será de especial importancia.

Para obtener el mapa de acumulación de flujo es necesario partir del mapa de dirección de flujo, creado a partir de la herramienta *Flow Direction*, que toma una superficie tipo MDE de entrada y devuelve un ráster con la dirección del flujo saliente de cada celda (figura 2.9)

El siguiente paso es introducir el mapa de dirección de flujo en la herramienta *Flow Accumulation* para obtener el mapa de acumulación de flujo (figura 2.36). Cabe destacar que es posible añadir un ráster de ponderación para dar un peso distinto a cada celda de la cuenca hidrográfica, que en el caso del análisis de inundabilidad a realizar en este proyecto no ha sido considerado necesario.

Este parámetro es uno de los que menos complejidad de cálculo presenta y, sin embargo, uno de los más importantes en cuanto a peso para el modelo final. Por ello se ha llevado a cabo una validación de este a partir de la Red de Cuencas de Cantabria. Para trabajar con este mapa en formato SIG, y de la misma manera que otros mapas, este ha sido descargado desde mapas.cantabria.es, dentro del conjunto de “*Base Topográfica Armonizada 1/5.000 sobre vuelo de 2007, BTA 2007*”, que viene acompañado de un Catálogo de fenómenos de la base topográfica armonizada de Cantabria con objeto de identificar cada archivo y característica del conjunto de mapas. En concreto es necesario extraer los archivos *.lin* relacionados con Hidrografía, de todas las hojas de interés, y unirlos en un sólo archivo *.shp* (figura 2.10).

El mapa de acumulación de flujo debe coincidir con el cauce del río, con lo que para la verificación se comparará este con el mapa de la red de cauces (figura 2.10). Una vez comprobado el mapa de acumulación de flujo (figura 2.36) puede ser usado en el modelo de susceptibilidad a inundación.

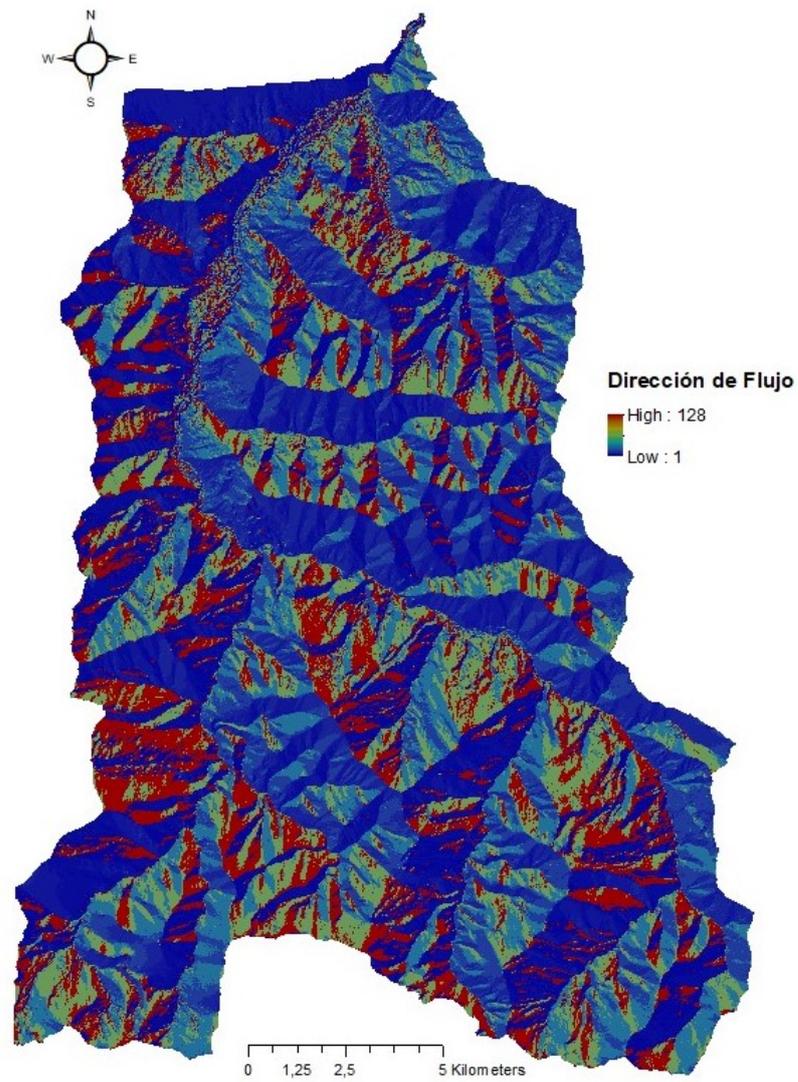


FIGURA 2.9: Mapa de dirección de flujo en la cuenca hidrográfica de estudio.

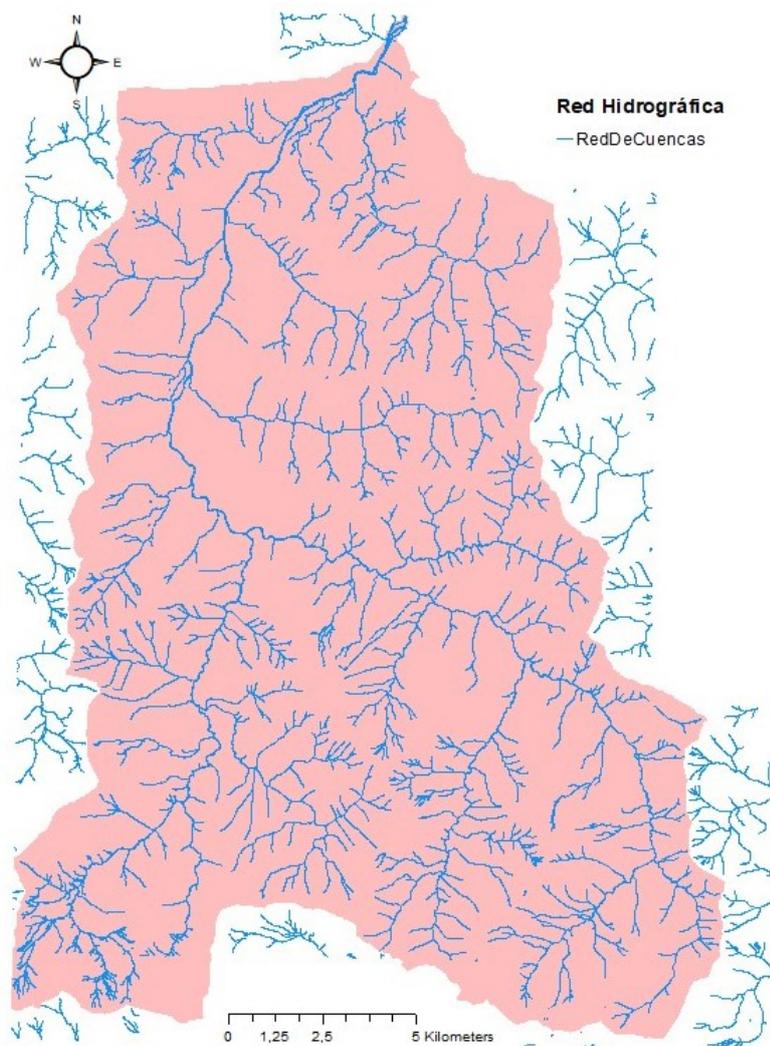


FIGURA 2.10: Mapa de red de cauces descargado de la Base Topográfica Armonizada (BTA 2007) para la cuenca hidrográfica de estudio.

2.2.5 Distancia Euclidiana al Cauce del Río

En los procesos hidrológicos naturales, el canal del río es la zona final en la que la escorrentía se acumula (Xiao, Yi, and Tang, 2016). Este mapa tiene en cuenta la distancia de cada punto de la cuenca hidrográfica al cauce de un río considerando las áreas localizadas cerca del canal principal o zonas de acumulación de flujo como más susceptibles de inundación (Elkhrachy, 2015).

Según el contenido distribuido por ArcGIS, la distancia euclidiana se calcula hasta cada una de las celdas circundantes como el recorrido en horizontal más corto hasta llegar a la vertical más próxima de las celdas del mapa introducido (ESRI, 2016). Es decir, el algoritmo de distancia euclidiana será capaz de dibujar un ráster en el que cada celda contenga el valor de la menor distancia a un cauce de río.²

Para el cálculo de este factor y el de densidad de cauces ha sido necesario recurrir a la red hidrográfica en la zona de estudio. Esto puede ser llevado a cabo con ArcGIS utilizando el mapa de acumulación de flujo, perdiendo precisión en cuanto al tipo y las características de cada cauce. En el caso del análisis que se ha llevado a cabo se han descargado los mapas de la Base Topográfica Armonizada proporcionados por el Gobierno de Cantabria en colaboración con el Gobierno de España. La BTA en formato SIG se trata de una combinación de mapas que busca resultar una “*propuesta de descripción detallada, exhaustiva y completa de una Base Topográfica a escala 1:5 000 - 1:10 000 armonizada, que sea utilizable para su producción*”. Antes de incluir el mapa en el modelo se debe identificar aquellos mapas que sean de interés, utilizando para ello los datos que vienen recogidos en las Especificaciones y Diccionario de Fenómenos de la BTA 1:5000. Al igual que en la acumulación de flujo, extrayendo los mapas en formato .tin que corresponden a la hidrografía en la cuenca de estudio se tiene un mapa con el que trabajar. Cabe destacar que este mapa contiene atributos para la identificación de cada uno de los cauces que contiene, lo que será usado más adelante.

Para el cálculo de la distancia euclidiana se ha utilizado la herramienta de ArcGIS Euclidean Distance a partir del mapa de la red hidrográfica en la cuenca de estudio. Tras recortar el resultado a la cuenca hidrográfica obtenemos un mapa con las distancias en metros (figura 2.11). En este caso, el método de verificación es sencillo, basta con superponer la red hidrográfica en la cuenca al mapa generado, haciendo corresponder los valores de menor distancia con colores claros y los cauces de la red (figura 2.11).

Sin embargo este factor presenta un inconveniente principal por el cual se ha descartado como parte del modelo. Al considerar las distancias a los cauces de la red hidrográfica, sin distinción entre caudal de los mismos, el modelo pierde precisión. Con objeto de tener en cuenta la dimensión de los cauces se ha decidido utilizar un nuevo factor de distancia a los cauces mediante la ponderación de la red hidrográfica.

²Las herramientas de distancia euclidiana brindan información sobre la distancia euclidiana, o de línea recta. Es posible que no se pueda realizar un recorrido en una línea recta hasta una ubicación específica; tal vez deba evitar obstáculos como ríos o una pendiente empinada. (ESRI, 2016)

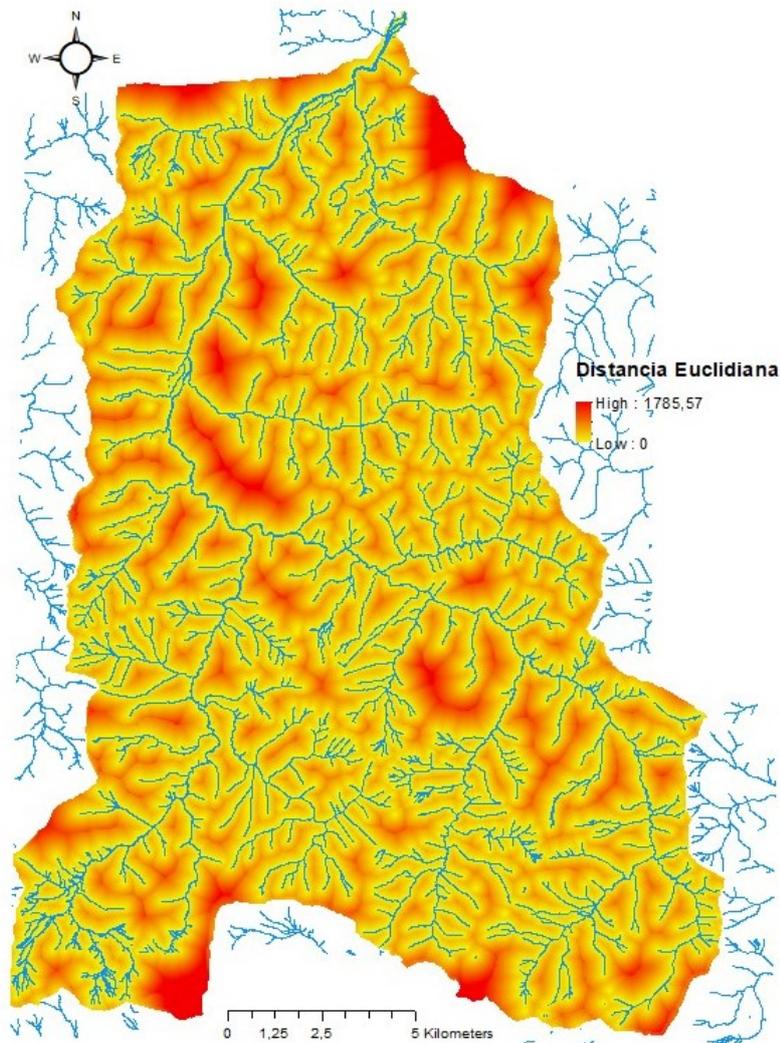


FIGURA 2.11: Mapa de distancia euclidiana a la red hidrográfica de la cuenca de estudio incluyendo la propia red

2.2.6 Distancia a los cauces de los ríos considerando su caudal

En lugar del mapa de distancias euclidianas a los cauces de los ríos, se ha decidido utilizar un factor que tenga en cuenta la importancia de estos según sus dimensiones. Se trata de una variación a todos los artículos estudiados en relación con el procedimiento llevado a cabo en este estudio. Por lo que su uso final estará condicionado por la verificación del modelo en la fase final (capítulo 2.5.2).

Para desarrollar este mapa se va a usar la herramienta Line Density, que permite obtener la densidad de entidades lineales por unidad de área. La razón por la cual se ha decidido usar esta herramienta es porque permite dar distintos pesos a las entidades lineales introducidas en el modelo, de tal manera que el resultado se trata de un mapa de densidades de línea ponderado, en favor de los cauces con mayor caudal.

El primer paso es introducir una nueva columna tipo Double de nombre PESO en la tabla de atributos del mapa. En esta columna se incluirán los valores de ponderación de cada uno de los elementos del mapa de la Red Hidrográfica. Para identificar los cauces se ha usado la columna NOMBRE dentro de la tabla de atributos que contiene el nombre completo de cada uno de los cauces. El peso dado a cada uno de los ríos ha sido el siguiente:

- Elementos con identificador 9000: un peso de 0'1 en el modelo.
- Elementos que contienen Arroyo, Vado, Vaguada, Sel, Barranco o que son el río Hormigas, río Lodar o río Queriendo: un peso de 0'6 en el modelo.
- Otros ríos no contenidos en los apartados anteriores mas el Arroyo de Viaña, Barcenillas, Madrid y Rubial: un peso de 1'0 en el modelo.
- El río Saja: un peso de 1'2 en el modelo

Destacar que el valor numérico de cada uno de los pesos para la ponderación carece de influencia mientras se mantenga la proporción entre ellos, ya que, antes de ser combinados estos mapas se normalizarán (capítulo 2.3).

Esta configuración de los pesos responde la recopilación de eventos históricos mediante noticias publicadas en periódicos regionales acerca de inundaciones en localidades próximas a las cuencas de los ríos³, en combinación con la utilización de los mapas de inundabilidad de Cantabria publicados en el Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI).

El mapa de densidad de cauces se ponderará con respecto a la nueva columna de pesos de la tabla de atributos y se le dará una precisión de celda de 5 metros de la misma manera que al resto de factores. Después de recortar el ráster para la cuenca hidrográfica de estudio se obtiene el mapa a utilizar como variable en sustitución de la distancia euclidiana (figura 2.12).

Para llevar a cabo una primera comprobación del modelo es posible añadir la red hidrográfica y comprobar que las zonas con mayor densidad corresponden a los tramos de cauces con mayor peso en la ponderación (figura 2.12).

³Alcolea, 2013; P., 2014; San Miguel, 2016 entre otros

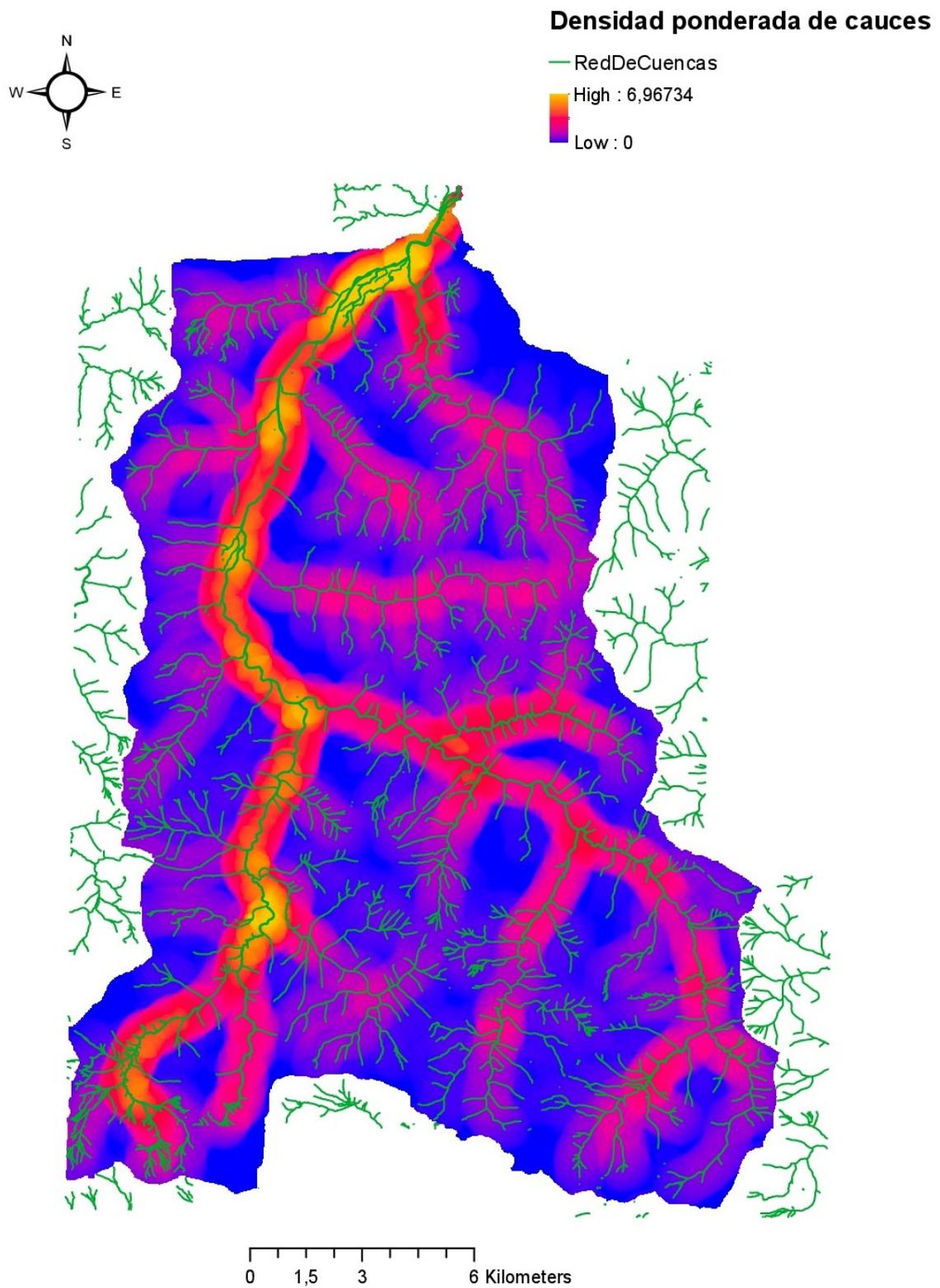


FIGURA 2.12: Mapa de densidad ponderada de cauces en la cuenca de estudio incluyendo la red hidrográfica

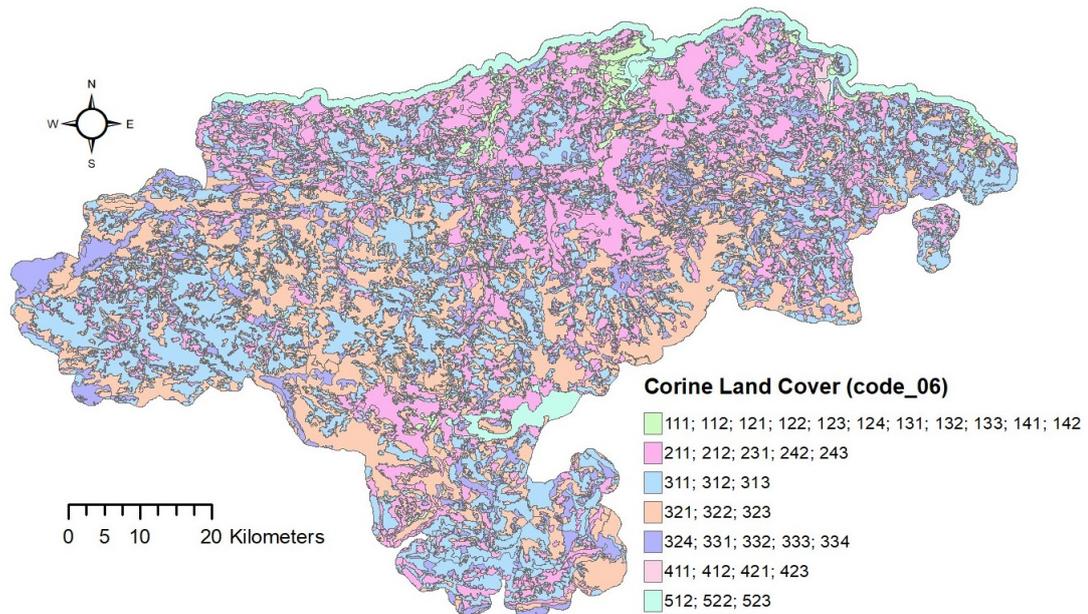


FIGURA 2.13: Uso del suelo con Corine Land Cover para la comunidad de Cantabria.

2.2.7 Cobertura del Suelo

El uso y ocupación del suelo describe la apariencia del paisaje según el material de la superficie y la cantidad y tipo de vegetación, siendo una de las principales variables en el cálculo del umbral de escorrenría (Elkhrachy, 2015). En función de la cobertura del suelo, el agua tendrá una mayor o menor facilidad para penetrarlo o llegando a producir escorrenría.

En este caso se ha decidido utilizar el proyecto Corine Land Cover (CLC) para el modelo de inundabilidad, al ser el conjunto de datos más actualizado y conveniente para la precisión de análisis que es necesaria en el modelo. Los datos de este mapa, a pesar de ser un proyecto europeo desarrollado por la European Environment Agency, se pueden descargar desde mapas.cantabria.es. Consta de una base de datos a escala 1:100.000 de ocupación del suelo obtenida a partir de la interpretación de imágenes recogidas con las series LandSat y SPOT5, y la orografía de PNOA2005. El mapa representa polígonos de superficie mínima 25 ha y por lo tanto tiene formato .shp. Como está especificado en los metadatos, el proyecto para la región de Cantabria es resultado de la combinación de esfuerzos por parte de la dirección General de Protección Civil del Gobierno de Cantabria y el Departamento de Geografía, Urbanismo y Ordenación del Territorio de la Universidad de Cantabria, para la revisión y corrección de la base de datos de CLC del año 2000, la creación de la nueva base de datos CLC del año 2006, y la identificación de cambios entre mapas.

El formato inicial de los datos de CLC descargados contiene: un archivo en formato .shp compuesto de polígonos con un ID según el tipo de cobertura (figura 2.13), un archivo excel con la explicación de los distintos tipos de cobertura que presenta el mapa, identificados con números, y la metodología europea y regional usada para obtener el CLC.

Este mapa no necesita de recorte ya que se trabajará con él posteriormente combinándolo con pendiente y permeabilidad para obtener un mapa de umbral de escorrenría.

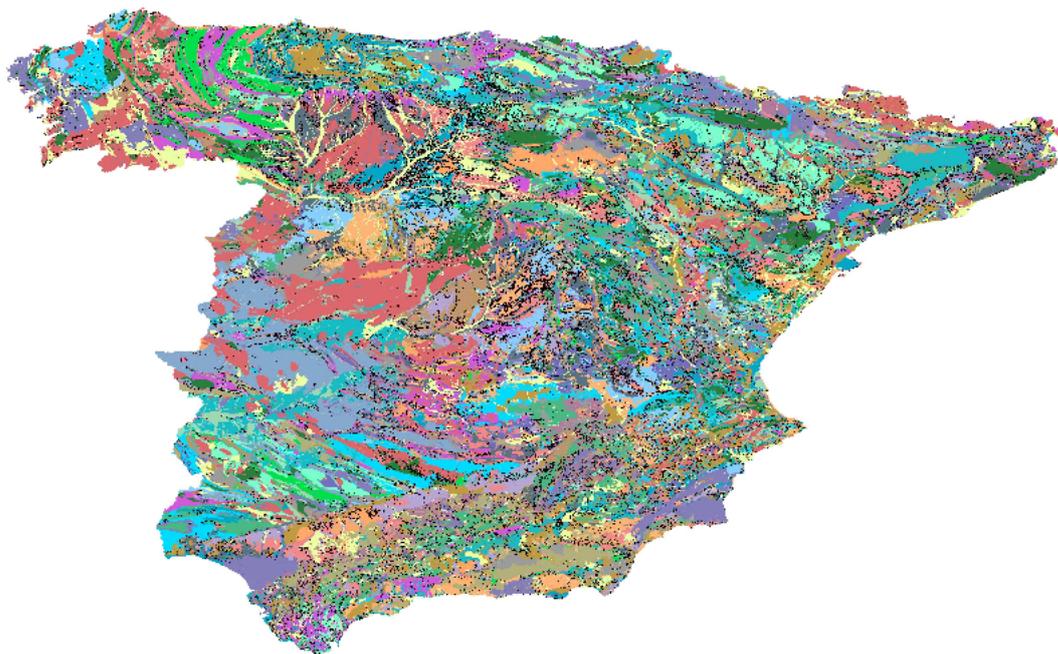


FIGURA 2.14: Mapa litoestratigráfico de España peninsular. Contiene campos sobre tipo de litología y permeabilidad.

2.2.8 Geología

El tipo de suelo y su textura tienen gran importancia, determinando sus capacidades de retención de agua de infiltración, y, por lo tanto, la susceptibilidad a inundación (Elkhrachy, 2015). De acuerdo con la National Oceanic and Atmospheric Administration, como regla general, la escorrentía generada por lluvia intensa es más probable que suceda en suelos arcillosos que en arena (Hill, Verjee, and Barrett, 2010). Queda claro que la influencia de el tipo de suelo se verá reflejada en los valores del umbral de escorrentía, proceso que se explicará más adelante. En cuanto al modelo a utilizar, se han planteado dos alternativas diferenciadas. Primero, los mapas que provee el Ministerio de Medio Ambiente (Secretaría General para el Territorio y la Biodiversidad) junto con el Instituto Geológico y Minero de España publicado por el Servicio de Cartografía Digital de la Universidad de Extremadura (figura 2.14), a escala 1/20.000. Debido a la falta de datos sobre el modelo (fecha de publicación, método empleado) se decidió usar la segunda opción.

Segundo, los mapas que pone a disposición del usuario el Gobierno de Cantabria en colaboración con el IGME en mapas.cantabria.es. Estos mapas están a escala 1:25.000 y cada uno de ellos incluye una memoria que contiene la descripción de las etapas geológicas y los materiales de cada uno de los estratos. Dentro de los metadatos de estos mapas están definidos textualmente de la siguiente manera:

La Cartografía Geológica es la representación de los materiales de la superficie con base en sus características litológicas, estratigráficas, estructurales, de antigüedad, etc. Realizado sobre la Base cartográfica oficial a escala 1:25.000. Cada hoja 25.000 se compone de los siguientes niveles de información: Unidades geológicas, Contactos, Fallas, Medidas estructurales, Estructuras de Plegamiento, Formas de relieve, Indicios minerales, Puntos de agua y Otros fenómenos de representación puntual (Evaluación Ambiental Urbanística, 2005).

Para cubrir la zona de estudio se han utilizado las hojas 57, 58, 82 y 83. La única capa de interés para el estudio de inundabilidad de la zona es la de Unidades Geológicas que define la litología y, según la *Tabla resumen de las unidades o agrupaciones hidrogeológicas* de la memoria incluida, la permeabilidad del material (figura 2.16). Todavía no es posible recortar el mapa geológico (figura 2.15), ya que se trata de un archivo tipo .shp, un archivo shapefile. Este tipo de archivos no dan valores a las celdas con un espaciado constante, sino que dividen el mapa en polígonos, cada uno de ellos con una serie de atributos no necesariamente numéricos. En este caso la tabla contiene: Unidad Geológica, Descripción, Forma Superior, Sistema, Serie, Piso, Subpiso, Color, Trama, Hoja, Formación y una serie de parámetros del polígono en el que están enmarcados. Dado que se va a relacionar con la permeabilidad, el único campo de interés es el de Unidad Geológica, que asigna un valor numérico a cada descripción del suelo (Evaluación Ambiental Urbanística, 2005).

Para trabajar con el mapa se deben relacionar los valores de unidades geológicas con la permeabilidad de cada una, entendiendo como permeabilidad la resistencia de un material a permitir el flujo a través de su estructura interna. A mayores permeabilidades, mayor facilidad. En relación con esto, la memoria del mapa geológico define varias clases de permeabilidad (figura 2.16). Para poder operar con este mapa ha sido necesario dar un valor numérico a cada una de las clases de la manera indicada a continuación:

- Alta: 0
- Alta – Media: 0'15
- Media – Alta: 0'30
- Media: 0'45
- Media – Baja: 0'6
- Baja – Media: 0'75
- Baja: 0'9

Se puede observar que los valores varían desde 0 hasta 0'9. El motivo de que el máximo sea distinto de 1 es que las divisiones tengan valores decimales exactos, teniéndose esto en cuenta a la hora de deshacer la transformación.

El resultado, después de introducir una nueva columna PermA0Baj09 dentro de la Tabla de Atributos del mapa litoestratigráfico, queda representado en la figura 2.17. Esto no tiene consecuencias gráficas sobre el mapa (figura 2.15), sin embargo, es el atributo que será usado para la obtención del umbral de escorrentía del suelo.

Tras dar valores numéricos a la permeabilidad, es posible crear un archivo tipo ráster con la precisión necesaria para el modelo. Para ello se utilizó el comando Polygon to Raster, que permite, introduciendo un archivo .shp y definiendo el atributo de interés, crear un archivo ráster, tipo .tif. Además, se eligió un tamaño de celda de 5m para la precisión del modelo, de la misma manera que en el MDE. Después se debe recortar el archivo para abarcar sólo el territorio de la cuenca hidrográfica. El resultado es un mapa con valores de permeabilidad distintos para cada uno de los tipos de suelo recogidos en el mapa litoestratigráfico (figura 2.18). Cabe destacar que los cambios abruptos de valor se deben a variaciones en la permeabilidad de los suelos predominantes en el polígono analizado de cada hoja, por lo que es posible que se observen estos cambios en las fronteras entre hojas.

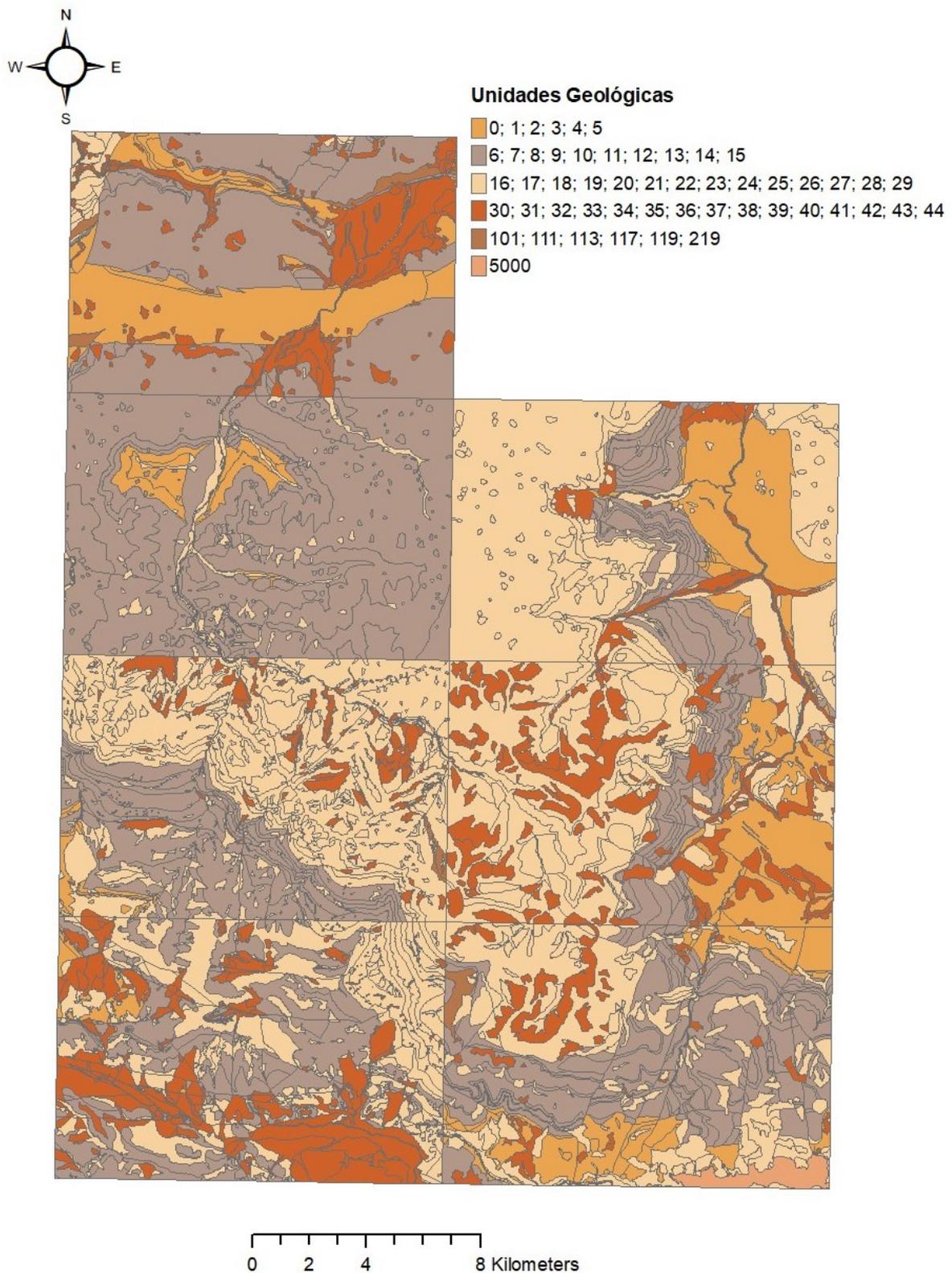


FIGURA 2.15: Hojas del mapa litoestratigráfico descargadas para cubrir la zona de estudio

| EDAD | UNIDAD O AGRUPACIÓN HIDROGEOLOGICA | UNIDADES CARTOGRAFICAS AGRUPADAS | LITOLOGÍAS | GRADO/TIPO DE PERMEABILIDAD | TIPOS DE ACUÍFEROS Y OBSERVACIONES |
|-----------------------------|--|--|--|---|---|
| PLEISTOCENO-HOLOCENO | Conos de deyección, avalanchas, abanicos torrenciales, terrazas fluviales altas, turberas y pedriza | 38, 39, 41, 42, 43, 44, 48, 49, 50, 53, 55, 56 y 57. | Conglomerados, gravas, arenas sueltas y turbas. | Media - Alta por porosidad intergranular | Acuíferos libres de productividad alta |
| | Fondos de valle, aluvial-columbion, coluviones, deslizamientos, terrazas bajas, flujos, llanuras de inundación y coluviones. | 40, 45, 46, 47, 51, 52 y 54 | Limos y arcillas con niveles de arenas y cantos. | Media - Baja por porosidad intergranular. | Sin acuíferos significativos |
| NEOGENO | Glacis | 36 y 37 | Arcillas y limos | Media-Baja por porosidad intergranular | Acuíferos puntuales libres. Fundamentalmente, la alimentación es a partir de la infiltración del agua de lluvia. |
| | Fm. Utrillas | 35 | Areniscas y limos | Baja - media por fracturación y porosidad intergranular | Sin acuíferos importantes. Dependientes de la fracturación |
| CRETÁCICO APTIENSE-ALBIENSE | Fms. San Esteban, Cuchía, Reocín y Peñosas | 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33 y 34. | Calizas, margas y areniscas. | Alta-media por fracturación y karstificación | Acuíferos puntuales libres. Fundamentalmente, la alimentación es a partir de la infiltración del agua de lluvia. |
| | Fms. Los Llares, Saja, Arcera, Aroco, Loma Somera, Vega de Pas Barcena Mayor | 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25 y 26 | Lutitas, limonitas, areniscas y conglomerados. | Media - Baja por fracturación y porosidad intergranular | Acuíferos puntuales asociados a estructuras de fracturación y a las litologías más gruesas. Transmisividad y coeficiente de almacenamiento, generalmente, bajos. Alimentación por infiltración del agua de lluvia. |
| CRETÁCICO MALM. BARREMIENSE | Fms. Puerto del Pozazal, Camino, Castillo Pedroso, San Vicente de León y Los Llares. | 13, 14, 15, 16 y 17 | Margas y calizas | Media - Baja por fracturación | Acuíferos puntuales libres y confinados. La alimentación es a partir de la infiltración del agua de lluvia, acuíferos, suprayacente y por infiltración del agua de ríos y arroyos |
| | Fms. Puerto de Palombrera, Villanueva de Puerta, Sopena, Río Polla, | 9, 10, 11, y 12, | Brechas dolomíticas, dolomías, y calizas | Media - Alta por fracturación y karstificación | Acuíferos libres y confinados. Transmisividad y almacenamiento alto. La alimentación se produce principalmente por infiltración directa de agua de lluvia y percolación del agua contenida en los acuíferos Weald - Purbeck, sumideros de ríos y arroyos. |
| TRIÁSICO | Fm. Imón, | 7 y 8 | Brechas dolomíticas, dolomías y tobas | Media-Alta por fracturación y karstificación | Acuíferos libres y buena transmisividad. La alimentación se produce principalmente por infiltración directa de agua de lluvia y percolación del agua contenida en los acuíferos Jurásicos, |
| | Ofitas | 6 | Ofitas | | Acuíferos puntuales asociados a estructuras de fracturación |
| | Facies Keuper | 5 | Lutitas rojas, yesos y sales | Impermeable | |
| | Facies Buntsandstein | 1, 2, 3 y 4 | Areniscas y conglomerados | Baja por fracturación y porosidad | Acuíferos puntuales asociados a estructuras de fracturación y a las litologías más gruesas. Transmisividad y coeficiente de almacenamiento muy bajos. Alimentación por infiltración del agua de lluvia |

FIGURA 2.16: Tabla resumen de las unidades o agrupaciones hidrogeológicas

| FID | Shape | PermA0Ba09 | UnidadGeol | Descripcio |
|-----|------------|------------|------------|---------------------------------|
| 269 | Polygon ZM | 0,15 | 27 | Arcillas, limos, arenas, gravas |
| 270 | Polygon ZM | 0,15 | 34 | Arcillas, limos, arenas, gravas |
| 271 | Polygon ZM | 0,15 | 34 | Arcillas, limos, arenas, gravas |
| 272 | Polygon ZM | 0,6 | 15 | Arcillas abigarradas, yesos |
| 273 | Polygon ZM | 0,6 | 15 | Arcillas abigarradas, yesos |
| 274 | Polygon ZM | 0,6 | 13 | Areniscas, lutitas rojas |
| 275 | Polygon ZM | 0,6 | 15 | Arcillas abigarradas, yesos |
| 276 | Polygon ZM | 0,15 | 27 | Arcillas, limos, arenas, gravas |
| 277 | Polygon ZM | 0,15 | 34 | Arcillas, limos, arenas, gravas |
| 278 | Polygon ZM | 0,15 | 31 | Arcillas, limos, arenas, gravas |
| 279 | Polygon ZM | 0,15 | 33 | Arcillas, limos, arenas, gravas |
| 280 | Polygon ZM | 0 | 0 | Masa de agua |
| 281 | Polygon ZM | 0,15 | 33 | Arcillas, limos, arenas, gravas |
| 282 | Polygon ZM | 0,15 | 34 | Arcillas, limos, arenas, gravas |
| 283 | Polygon ZM | 0,15 | 32 | Arcillas, limos, arenas, gravas |
| 284 | Polygon ZM | 0,15 | 27 | Arcillas, limos, arenas, gravas |

FIGURA 2.17: Tabla de atributos para el mapa litoestratigráfico incluyendo valor numérico para la permeabilidad.

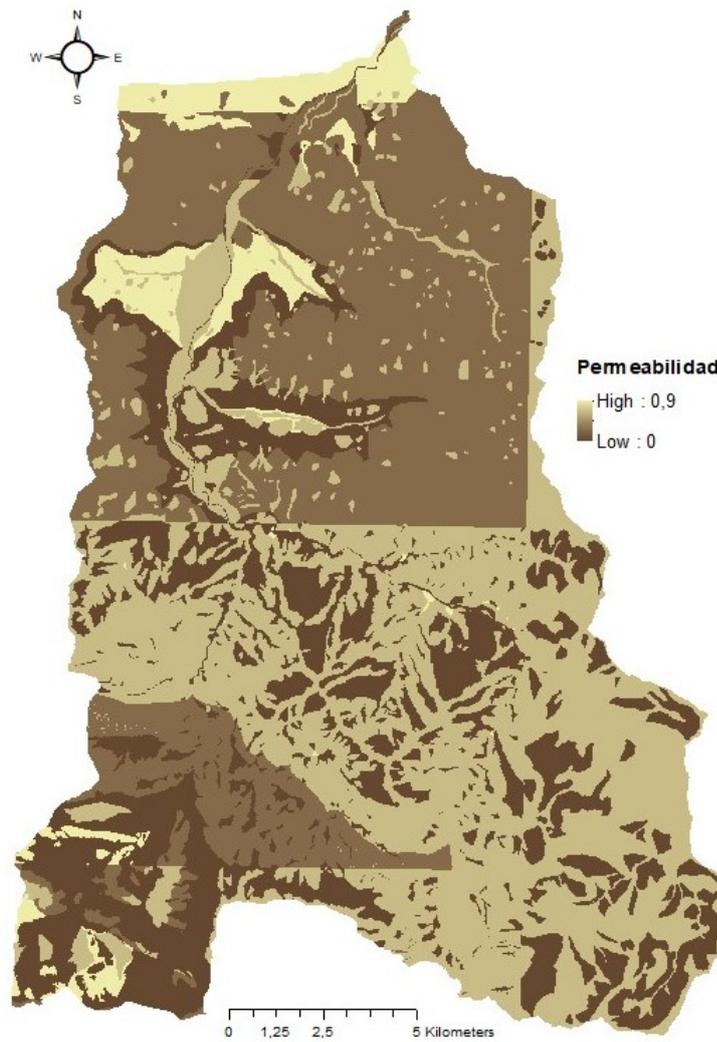


FIGURA 2.18: Mapa de permeabilidad según el mapa litoestratigráfico para la cuenca hidrográfica de estudio.

El resto de pasos ejecutados en relación al mapa de permeabilidad están relacionados con el mapa de umbral de escorrentía, ya que es necesario combinar permeabilidad con pendiente y usos del suelo.

2.2.9 Umbral de Escorrentía

El umbral de escorrentía es la cantidad de precipitación a partir de la cual ya no sólo se produce infiltración sino que también se produce escorrentía ⁴.

Según la orden 298/2016 del Ministerio de Fomento, capítulo 2.2.3.2 *Umbral de Escorrentía*, el valor de este parámetro depende de las siguientes variables (Fomento, 2016):

- Uso de suelo
- Práctica de cultivo
- Pendiente
- Grupo de suelo a partir del mapa de permeabilidad.

En la tabla *Valor inicial del umbral de escorrentía POi (mm)* (figura 2.19) (Fomento, 2016), el Ministerio de Fomento da valores del umbral de escorrentía para cada combinación de los parámetros mencionados con anterioridad. Para poder llegar a trabajar con un mapa ráster de valores numéricos de umbral de escorrentía son necesarios varios pasos previos.

Adaptación del mapa de permeabilidad

A partir del mapa litoestratigráfico de la región de Cantabria, se ha obtenido un ráster con valores de 0 a 0'9 para la permeabilidad del suelo. Dentro de la tabla *Valor inicial del umbral de escorrentía POi (mm)* (figura 2.19) esto queda representado como Grupo de suelo. Para relacionar la permeabilidad con este valor, dentro del mismo capítulo, el ministerio utiliza dos recursos (figuras 2.20 y 2.21). Por simplicidad se ha decidido utilizar la tabla de *Grupos hidrológicos del suelo* (figura 2.20) de la Orden 298/2016.

Ya que el mapa de usos de suelo se va a utilizar como base, es necesario obtener el valor medio de la permeabilidad para cada uno de los polígonos de este mapa. Para ello se ha usado la herramienta de ArcGIS *Zonal Statistics as a Table*, que devuelve una tabla de valores medios del mapa de permeabilidad con respecto a los polígonos relacionados con el atributo de la tabla que se haya elegido. Como en este caso se buscaba un valor para cada elemento, se ha relacionado con la columna FID. Tras ejecutar la herramienta se obtiene una tabla con valores medios de permeabilidad que ha sido incluida mediante *Joins and Relates* dentro de la tabla de atributos para el mapa de usos de suelo.

Debido al proceso de obtención del mapa de permeabilidad explicado con anterioridad, es necesario fijar unas condiciones de transformación de los datos numéricos en las categorías especificadas, para ello se utilizarán las siguientes equivalencias correspondientes al grupo de suelo a introducir en la Tabla 2.3. (figura 2.19):

- De 0 a 0'15 - Grupo A (infiltración rápida)
- De 0'16 a 0'45 - Grupo B (infiltración moderada)
- De 0'46 a 0'75 - Grupo C (infiltración lenta)
- De 0'76 a 0'9 - Grupo D (infiltración muy lenta)

| Código | Uso de suelo | Práctica de cultivo | Pendiente (%) | Grupo de suelo | | | |
|--------|--|---------------------|---------------|----------------|----|---|---|
| | | | | A | B | C | D |
| 11100 | Tejido urbano continuo | | | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 11200 | Tejido urbano discontinuo | | | 24 | 14 | 8 | 6 |
| 11200 | Urbanizaciones | | | 24 | 14 | 8 | 6 |
| 11210 | Estructura urbana abierta | | | 24 | 14 | 8 | 6 |
| 11220 | Urbanizaciones exentas y/o ajardinadas | | | 24 | 14 | 8 | 6 |
| 12100 | Zonas industriales y comerciales | | | 6 | 4 | 3 | 3 |
| 12100 | Granjas agrícolas | | | 24 | 14 | 8 | 6 |
| 12110 | Zonas industriales | | | 12 | 7 | 5 | 4 |

FIGURA 2.19: Detalle de la tabla 2.3. - Valor inicial del umbral de escorrentía en la Orden 298/2016

| Grupo | Infiltración (cuando están muy húmedos) | Potencia | Textura | Drenaje |
|-------|---|---|---|-------------------|
| A | Rápida | Grande | Arenosa Areno-limosa | Perfecto |
| B | Moderada | Media a grande | Franco-arenosa Franca Franco-arcillosa-arenosa Franco-limosa | Bueno a moderado |
| C | Lenta | Media a pequeña | Franco-arcillosa Franco-arcillo-limosa Arcillo-arenosa | Imperfecto |
| D | Muy lenta | Pequeño (litosuelo) u horizontes de arcilla | Arcillosa | Pobre o muy pobre |

FIGURA 2.20: Grupos hidrológicos de suelo a efectos de la determinación del valor inicial del umbral de escorrentía obtenido directamente de la Orden 298/2016 (Fomento, 2016).

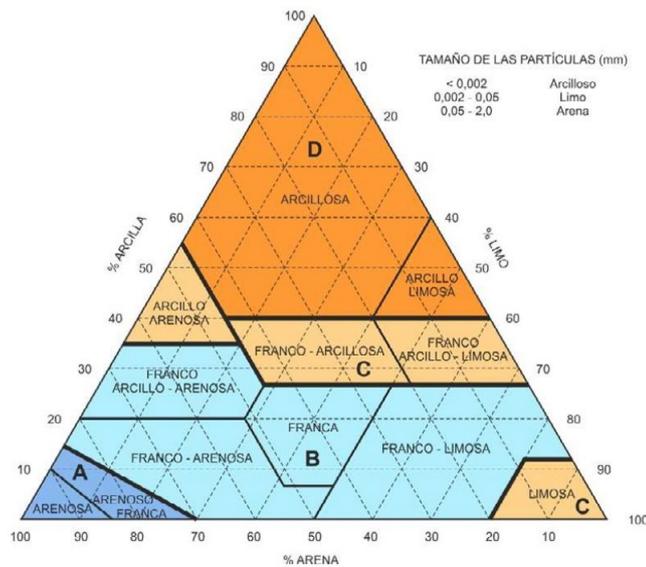


FIGURA 2.21: Diagrama triangular para la determinación de la textura en materiales tipo suelo obtenido directamente de la Orden 298/2016 (Fomento, 2016).

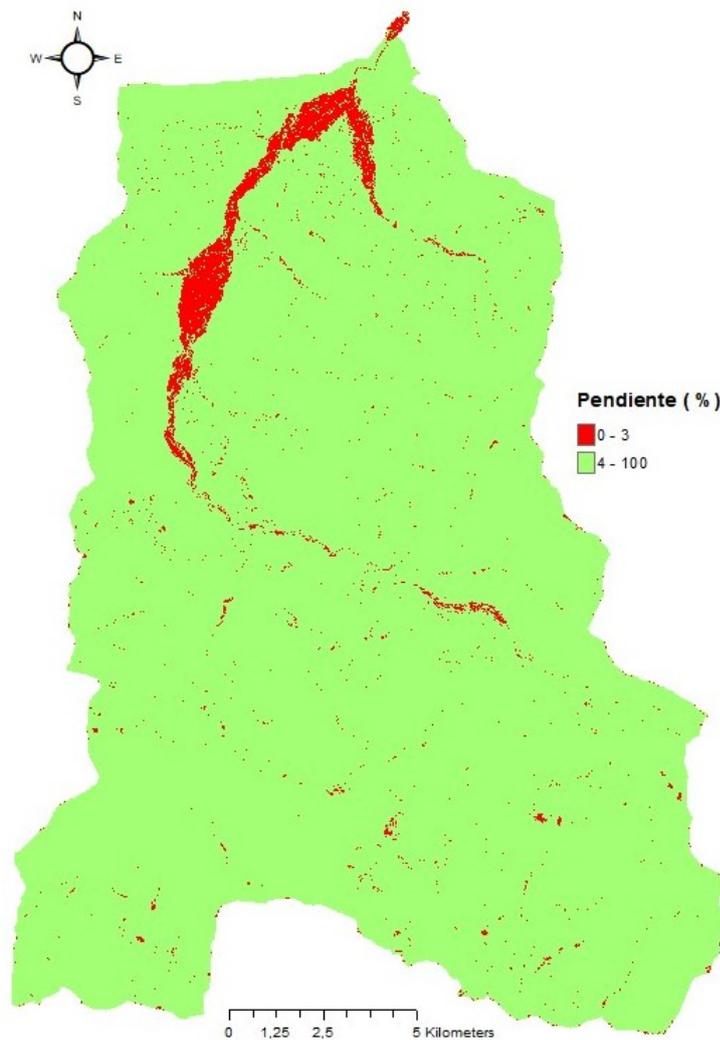


FIGURA 2.22: Mapa de pendientes representando pendientes mayores (verde) y menores (rojo) de un 3%

Por comodidad a la hora de dar valores al umbral de escorrentía, se ha decidido crear una nueva columna Grupo_Suel en la tabla de atributos del mapa con valores alfabéticos A, B, C o D, mediante las herramientas Select by Attribute y Field Calculator.

Influencia de la pendiente

A lo largo de la tabla para dar un valor inicial al umbral de escorrentía (figura 2.19) la única distinción relativa a la pendiente que se hace es si es mayor o menor del 3%. Antes de operar con pendientes, es posible cambiar los códigos de color de la distribución con verde para los mayores de 3% y rojo para los estrictamente menores de 3% (figura 2.22).

El código de color en el nuevo mapa nos ayuda a estimar las zonas con una pendiente reducida. Sin embargo, para combinarlo con el resto de factores es necesario

⁴De es- y correntío. 1. f. Agua de lluvia que discurre por la superficie de un terreno.

llevar a cabo el mismo proceso que con el mapa de permeabilidad. Mediante la herramienta *Zonal Statistics as a Table* se ha transformado el mapa de pendientes en el valor medio de las pendientes dentro de cada polígono del mapa de usos de suelo, dando como resultado la columna *Mean Perm* incluida en el mapa de CLC con *Joins and Relates*.

Ordenando las pendientes de la tabla puede observarse que su valor mínimo es de un 5% a diferencia del mapa de pendientes, ya que se trata de valores medios para los polígonos. Debido a esto, será posible considerar la pendiente mayor de un 3% en todo caso.

Cálculo del umbral de escorrentía

El resultado de los factores necesarios para dar un valor inicial al umbral de escorrentía. (figura 2.19), ha sido procesado e incluido en la tabla de atributos del mapa de usos de suelo (figura 2.23), en la que, después de ocultar las columnas que no iban a ser utilizadas en el análisis, queda:

- *code_06* distingue entre códigos para los distintos usos de suelo.
- *MEAN_PEND%* corresponde al valor medio de la pendiente en cada polígono.
- *MEAN_PERM (mm)* mide la permeabilidad del suelo en función de su litografía.
- *Grupo_Suel* escribe la notación que corresponde a cada valor de permeabilidad.

Es importante destacar que el mapa de usos del suelo abarca la comunidad autónoma de Cantabria, mientras que el mapa de permeabilidad corresponde a las hojas descargadas de un tamaño mayor a la cuenca hidrográfica, que es el área al que se limita el mapa de pendientes. Debido a esto existen celdas para las que uno o varios de los factores tienen el valor *<Null>*, representando los polígonos que no se encuentran contenidos dentro de los mapas de los factores pendiente y permeabilidad.

Para el cálculo del umbral de escorrentía se ha añadido una columna *P0_mm* que permite edición manual en la que se han introducido los resultados de operar con la tabla para la obtención del valor inicial del umbral de escorrentía (figura 2.19). La metodología seguida en este caso ha sido la explicada a continuación. Se ha ordenado la tabla en orden descendente en cuanto a la columna *MEAN_PEND%*, ya que el mapa de pendiente cubre exactamente el área de la cuenca hidrográfica de estudio, siendo el menor de todos. Esto quiere decir que ninguna fila en la que haya un valor de pendiente tendrá un valor *<Null>* en la columna de permeabilidad. Con la herramienta *Select by Attributes* se progresa a través de la tabla, seleccionando filas con un código de uso de suelo y un grupo de suelo determinados, a las que se da el valor de umbral de escorrentía que determine la tabla 2.3. (figura 2.19) mediante la herramienta *Field Calculator*.

Finalmente se exporta la columna mediante *Polygon to Raster* con los datos de umbral de escorrentía en mm a un mapa en formato ráster con el que se puede operar para incluirlo en el mapa de susceptibilidad a inundación (figura 2.36).

| FID | Area ha | code 06 | MEAN PEND % | MEAN PERM (mm) | Grupo_Suel | P0 mm |
|-----|----------|---------|-------------|----------------|------------|-------|
| 567 | 451.4881 | 231 | <Null> | <Null> | | 0 |
| 126 | 452.2602 | 311 | <Null> | <Null> | | 0 |
| 293 | 452.8979 | 421 | <Null> | <Null> | | 0 |
| 109 | 454.0342 | 311 | <Null> | 0.487374 | C | 31 |
| 170 | 455.4624 | 312 | <Null> | <Null> | | 0 |
| 583 | 457.1587 | 231 | <Null> | <Null> | | 0 |
| 130 | 457.9805 | 311 | <Null> | <Null> | | 0 |
| 153 | 458.0348 | 311 | <Null> | <Null> | | 0 |
| 781 | 461.0616 | 243 | <Null> | <Null> | | 0 |
| 124 | 463.0412 | 112 | <Null> | <Null> | | 0 |
| 222 | 464.4054 | 322 | <Null> | <Null> | | 0 |
| 540 | 464.6708 | 231 | <Null> | <Null> | | 0 |
| 222 | 468.3800 | 322 | <Null> | 0.483035 | C | 22 |
| 161 | 471.9191 | 312 | <Null> | <Null> | | 0 |
| 424 | 472.1428 | 231 | <Null> | 0.339364 | B | 33 |
| 239 | 474.1603 | 324 | 42.651415 | 0.486994 | C | 22 |
| 156 | 475.9041 | 311 | <Null> | <Null> | | 0 |
| 103 | 478.7243 | 311 | <Null> | <Null> | | 0 |
| 609 | 481.1060 | 231 | <Null> | <Null> | | 0 |
| 111 | 481.1684 | 311 | 52.114522 | 0.312956 | B | 47 |
| 132 | 484.0095 | 311 | <Null> | <Null> | | 0 |
| 251 | 485.3971 | 324 | <Null> | <Null> | | 0 |
| 405 | 488.4540 | 322 | <Null> | <Null> | | 0 |

FIGURA 2.23: Tabla de atributos para el cálculo del umbral de escorrentía sobre el mapa de usos de suelo

2.2.10 Nivel Freático

El nivel freático se planteó en inicio como adición a las variables tradicionales con las que hallar la susceptibilidad a inundación, ya que era usada en diversos estudios hidrogeológicos como de inestabilidad de taludes (Federici, Bovolenta, and Passalacqua, 2015).

Se trata del lugar geométrico de los puntos en los que la presión hidráulica en el agua contenida en los poros es equivalente a la presión atmosférica, medido mediante sus distancias desde la superficie del terreno. No necesariamente coincide con el nivel del agua en el suelo, ya que es necesario tener en cuenta otros factores como la capilaridad. La influencia del nivel freático en el modelo es directa, a menor valor del mapa, menor distancia entre el nivel freático y la superficie, y por lo tanto menos volumen necesario de agua para alcanzar niveles de inundación.

El conjunto de datos se obtuvo en formato excel y tuvo que ser importado y tratado en ArcGIS siguiendo el proceso que se va a explicar a continuación. El archivo excel es tipo .xls para que pueda ser interpretado por ArcGIS. Este contiene tres columnas distintas de datos (figura 2.24): latitud, longitud y WTD, valor de la profundidad del nivel del agua con respecto a la superficie.

Con las herramientas de ArcGIS Add XY Data se añaden los datos en forma de tabla al programa. Usando Export Data se transforman en un mapa de puntos que, tras cambiar la proyección de WGS 1984 a ETRS 1989 30 N, se coloca sobre la cuenca hidrográfica de estudio (figura 2.25).

Para poder incluir estos datos en el modelo es necesario transformarlos en una superficie mediante la herramienta de interpolación Geostatistical Wizard utilizando alguno de los métodos siguientes: Inverse Distance Weighting, Radial Basis Function, Ordinary Kriging o Simple Kriging. En el caso de la interpolación llevada a cabo, el valor mínimo obtenido de la raíz del error cuadrático medio es de 47'69 con Ordinary Kriging, un resultado pésimo. De la misma manera, los valores de menor profundidad del modelo (en azul) deberían coincidir con la localización de los cauces de los ríos donde la infiltración es mayor (figura 2.26).

| | A | B | C |
|----|------------|------------|------------|
| 1 | Lon | Lat | WTD |
| 2 | -4,3958335 | 42,904167 | 37,638462 |
| 3 | -4,3958335 | 42,912498 | 145,48557 |
| 4 | -4,3958335 | 42,920834 | 174,65952 |
| 5 | -4,3958335 | 42,929165 | 36,004009 |
| 6 | -4,3958335 | 42,9375 | 53,296291 |
| 7 | -4,3958335 | 42,945835 | 13,624425 |
| 8 | -4,3958335 | 42,954166 | 13,764781 |
| 9 | -4,3958335 | 42,962502 | 106,62696 |
| 10 | -4,3958335 | 42,970833 | 20,918402 |
| 11 | -4,3958335 | 42,979168 | 59,056335 |

FIGURA 2.24: Tabla de excel con datos de nivel freático para el área de estudio

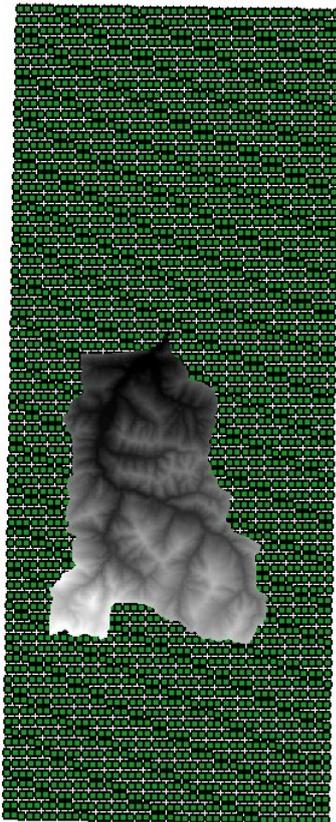


FIGURA 2.25: Mapa de puntos de nivel freático superpuesto con la extensión de la cuenca hidrográfica

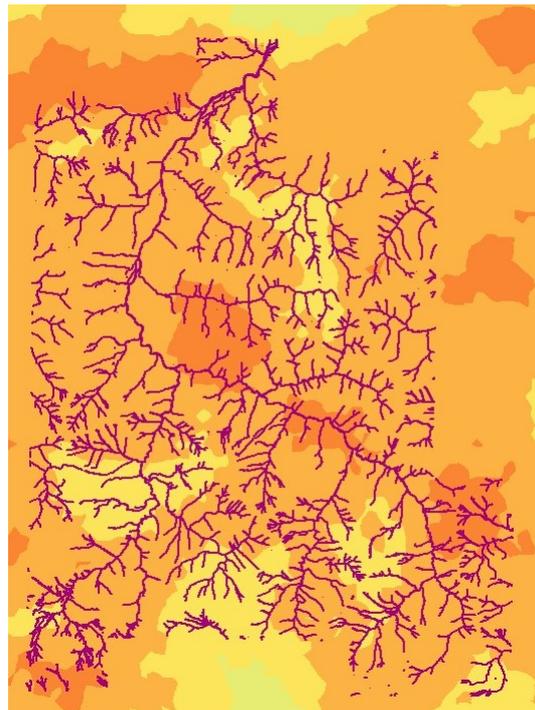


FIGURA 2.26: Tabla de excel con datos de nivel freático para el área de estudio

Debido a la poca precisión del modelo, a pesar de tener el mapa procesado, se ha decidido no utilizarlo en la obtención de la susceptibilidad a inundación en este estudio.

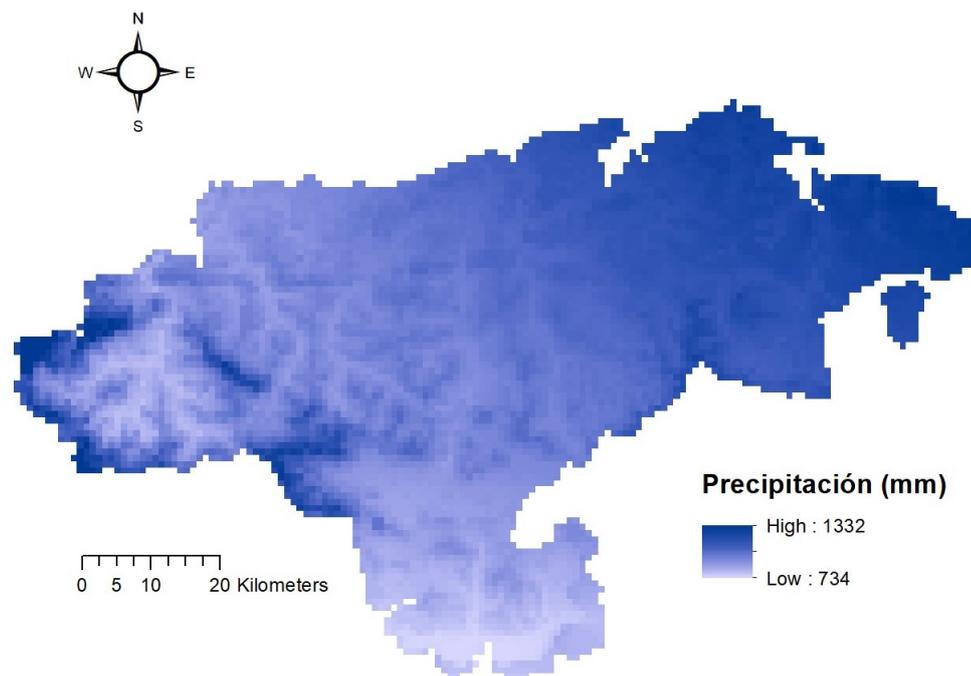


FIGURA 2.27: Mapa de precipitación total anual por WorldClim.org

2.2.11 Precipitación

Si la intensidad de precipitación excede la evaporación y la capacidad de infiltración tiene lugar escorrentía dando lugar a una inundación repentina, de la misma manera que cuando la lluvia cae sobre superficies impermeables como áreas pavimentadas (Elkhrachy, 2015). La probabilidad de sufrir inundación aumenta en una zona con la cantidad de precipitación sobre esta (Nyarko, 2002), ya que para intensidades de precipitación mayores, la tierra no puede absorber el agua de manera suficientemente rápida (Elkhrachy, 2015).

La obtención de los datos de precipitación ha sido uno de los procesos más complejos del modelo. En este caso no ha sido necesaria la interpolación de datos de estaciones meteorológicas al tenerlo integrado ya los mapas, siendo los datos una malla de datos igualmente separados. A nivel europeo se ofrecen datos mensuales en formato ráster en <http://worldclim.org/version2> que combinados mediante la herramienta Raster Calculator, transformados para un tamaño de celda de 5x5m con Resample, proyectados a ETRS 1989 30N, y recortados para Cantabria con Extract by Mask resultan en el mapa de precipitaciones anuales (figura 2.27).

Sin embargo, con los datos anteriores no es posible comparar valores con los datos presentados por el Gobierno de Cantabria en colaboración con el Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria (IH), ya que estos se presentan en función de periodos de retorno ⁵ de 10, 100 y 500 años. Debido a esto ha sido necesario llevar a cabo el proceso explicado a continuación.

Se ha partido de datos de precipitación anuales de 1950 a 2003 en formato excel para un marco de latitudes y longitudes que contienen el área de estudio (figura 2.28). Se trata de 1089 puntos distintos para los que obtener valores de precipitación para periodos de retorno de 10, 10 y 500 años, por lo que se ha decidido utilizar

⁵Sea “p” la probabilidad de un evento extremo. Esa probabilidad está relacionada con el periodo de retorno T en la forma: $p=1/T$

| Lon | Lat | 1950 | 1951 | 1952 | 1953 | 1954 |
|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| -4,3832002 | 43,0336 | 79,279999 | 76,21965 | 46,009876 | 65,840981 | 52,982151 |
| -4,3832002 | 43,041901 | 82,086922 | 75,422585 | 44,991978 | 64,764526 | 52,821453 |
| -4,3832002 | 43,050201 | 78,77861 | 75,302109 | 44,571014 | 64,47007 | 51,138805 |
| -4,3832002 | 43,058601 | 78,302788 | 78,949883 | 46,114082 | 65,072212 | 47,131615 |
| -4,3832002 | 43,066898 | 82,370758 | 78,290443 | 44,904327 | 63,604214 | 50,508205 |
| -4,3832002 | 43,075199 | 77,290329 | 77,170769 | 43,681076 | 62,669239 | 49,915714 |
| -4,3832002 | 43,083599 | 70,731705 | 77,694565 | 43,260506 | 62,059353 | 48,47192 |
| -4,3832002 | 43,0919 | 67,930977 | 81,151512 | 45,203754 | 64,144485 | 46,636322 |
| -4,3832002 | 43,100201 | 66,466507 | 82,460449 | 45,072918 | 63,603905 | 47,776947 |
| -4,3832002 | 43,108501 | 64,863144 | 80,662903 | 43,810184 | 63,565857 | 45,764458 |
| -4,3832002 | 43,116901 | 62,611015 | 82,531296 | 45,390129 | 66,538483 | 44,522297 |
| -4,3832002 | 43,125198 | 63,912308 | 86,814125 | 47,227192 | 67,827126 | 43,15044 |

FIGURA 2.28: Tabla de datos de precipitación de 1950 a 2003

| XT (mm) | XT (mm) | XT (mm) | Lon | Lat |
|------------|------------|------------|------------|-----------|
| 83,4969338 | 151,465897 | 206,639494 | -4,3832002 | 43,0336 |
| 82,666578 | 150,01604 | 204,694615 | -4,3832002 | 43,041901 |
| 80,6454875 | 145,62715 | 198,283077 | -4,3832002 | 43,050201 |
| 79,5784334 | 143,492565 | 195,254232 | -4,3832002 | 43,058601 |
| 80,0080854 | 144,415618 | 196,597802 | -4,3832002 | 43,066898 |
| 76,6194188 | 137,473597 | 186,660695 | -4,3832002 | 43,075199 |
| 74,2665336 | 132,569206 | 179,596557 | -4,3832002 | 43,083599 |
| 73,7705262 | 131,176803 | 177,407924 | -4,3832002 | 43,0919 |
| 73,0449522 | 129,395744 | 174,705362 | -4,3832002 | 43,100201 |
| 71,858379 | 127,56357 | 172,393717 | -4,3832002 | 43,108501 |
| 73,6221505 | 131,053487 | 177,325253 | -4,3832002 | 43,116901 |

FIGURA 2.29: Tabla de datos de precipitación para periodos de retorno de 10, 100 y 500 años según la distribución de Gumbel

una distribución. En concreto la distribución de Gumbel utiliza la media, desviación típica, α y u , en combinación con el valor de probabilidad dada por el periodo de retorno (Nadarajah and Kotz, 2004). Después de procesar los datos quedan tres columnas con cada periodo de retorno (figura 2.29).

Para incluir los datos en ArcGIS se utilizará la herramienta Add XY Data y Export, creando un mapa de puntos. Es importante destacar que los datos están en el sistema geográfico WGS 1984, y que es necesario utilizar Project para transformarlo a ETRS 1989 30N (figura 2.30).

Para obtener un mapa combinable con el resto de variables, es necesario crear una superficie a partir del mapa de puntos. En este caso, el método de interpolación utilizado en cada uno de los tres casos (10, 100 y 500 años) dependerá de la precisión de cada uno medida con su raíz del error cuadrático medio. Para esto ha usado la herramienta de ArcGIS Geostatistical Wizard⁶ y los métodos: Inverse Distance

⁶"The Geostatistical Wizard is a dynamic set of pages that is designed to guide you through the process of constructing and evaluating the performance of an interpolation model." (ESRI, 2016)

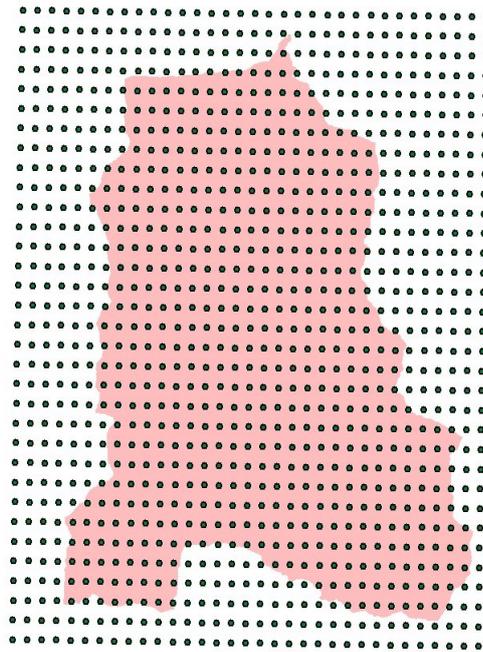


FIGURA 2.30: Mapa de puntos de precipitación importados desde Excel

Weighting, Radial Basis Function, Ordinary Kriging y Simple Kriging, optimizando cada uno para el conjunto de datos correspondiente. En el caso del análisis que se ha realizado, los resultados de los modelos obtenidos han sido los siguientes:

- Periodos de retorno de 10 años: Ordinary Kriging RMSE = 1'569
- Periodos de retorno de 100 años: Ordinary Kriging RMSE = 3'024
- Periodos de retorno de 500 años: Ordinary Kriging RMSE = 4'290

En todos los casos el método más apropiado para la interpolación es Ordinary Kriging⁷, resultando en tres superficies de precipitación sobre la cuenca hidrográfica (figuras 2.37, 2.38 y 2.39).

De la misma manera que con el nivel freático, es posible llevar a cabo una verificación de los mapas creados, comparándolos con el mapa de precipitación generado a partir de los datos de WorldClim.org (figura 2.27). En este caso se ve que los valores de mayor precipitación en ambos casos están localizados en las mismas zonas, por lo que la interpolación del modelo se considera válida.

⁷"Kriging asume que por lo menos algo de la variación espacial observada en fenómenos naturales puede ser modelada mediante procesos aleatorios con autocorrelación espacial." (ESRI, 2016)

2.3 Normalización

Los distintos mapas producto de los factores seleccionados han sido combinados mediante análisis de decisión multicriterio, en este caso, con un modelo de suma ponderada, por lo que es necesario partir de los mapas normalizados. Los métodos de análisis multicriterio han sido aplicados en diversos estudios en asignación de s de inundabilidad. Yalcin and Akyurek, 2004; Ouma and Tateishi, 2014 aplicaron herramientas SIG multicriterio para analizar vulnerabilidad a inundación en áreas de Turquía y Kenia. Yahaya, Ahmad, and Abdalla, 2010 identificaron áreas vulnerables a inundación en Hadejia-Jama'are cuenca en Nigeria. Tanavud et al., 2004 valoraron la susceptibilidad a inundación en Hat Yai, en el sur de Tailandia usando SIG e imagen por satélite. Kandilioti and Makropoulos, 2012 y Kazakis, Kougiyas, and Patsialis, 2015 aplicaron SIG análisis multicriterio en el área de Atenas y la región de Ródope-Evros, en Grecia (Blistanova et al., 2016).

Los factores considerados para ponderar en el modelo son una combinación de factores naturales y factores en los que se manifiesta la influencia del ser humano :

- Densidad ponderada de cauces (contiene la red hidrográfica).
- Acumulación de flujo.
- Umbral de escorrentía (producto de permeabilidad y uso de suelo).
- Precipitación para periodos de retorno de 10, 100 y 500 años.
- MDE
- Pendiente (a partir del MDE)

Con objeto de combinar los mapas, estos deben estar normalizados, es decir, deben tener un rango de valores de 0 a 1 manteniendo la proporción del mapa original. Mediante este proceso se suprime la influencia de las unidades de tal manera que los resultados son combinables a través del método usado, de suma ponderada. En este caso se ha considerado el 1 como el valor de mayor susceptibilidad a inundación, por lo cual distinguimos dos categorías de mapas: aquellos que no necesitan inversión, para los que los valores mayores implican mayor susceptibilidad a inundación (acumulación de flujo, densidad de cauces y precipitación); y aquellos que sí la necesitan (umbral de escorrentía, MDE y pendiente).

Para transformar los criterios de evaluación en unidades comparables se va a usar el siguiente criterio (Xiao, Yi, and Tang, 2016):

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - x_j^{\min}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}} \quad (2.1)$$

$$r_{ij} = \frac{x_j^{\max} - x_{ij}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}} \quad (2.2)$$

Donde los parámetros son los siguientes:

- r_{ij} es el valor i -ésimo normalizado para el mapa j -ésimo.
- x_{ij} es el valor del mapa j -ésimo.
- x_j^{\max} y x_j^{\min} corresponden al máximo y al mínimo de la capa j -ésima (tabla 2.1).

TABLA 2.1: Valores máximos y mínimos para cada mapa usados en su normalización

| Mapa | Máximo | Mínimo |
|-------------------------------|-----------|--------|
| Densidad de cauces | 6,96734 | 0 |
| Acumulación de flujo (celdas) | 1'3633 e7 | 0 |
| Umbral de escorrentía (mm) | 90 | 8 |
| Precipitación (mm) | 239'91 | 62'592 |
| MDE (m) | 2084'24 | 137'82 |
| Pendiente (%) | 79'308 | 0 |

Usándose la ecuación 2.1 en el caso de no necesitarse inversión, y 2.2 en el caso de que sí sea necesaria.

Para los mapas de precipitación, se considerarán como máximo y mínimo aquellos valores máximo y mínimo de los tres mapas de distintos periodos de retorno en conjunto, de tal manera que estos mapas no van a tener un rango de valores de 0 a 1, sino que el mapa para un periodo de retorno de 500 años contendrá el máximo, y el mapa para un periodo de retorno de 10 años contendrá el mínimo. Gracias a esto se consigue tener tres combinaciones distintas para cada resultado del modelo, con periodos de retorno de 10, 100 y 500 años.

Después de este proceso, los factores ya normalizados están listos para ser combinados.

2.4 Desarrollo de Criterios de Peso

La susceptibilidad a inundación se trata de una combinación de distintos factores: elevación, pendiente, acumulación de flujo, distancia euclidiana, MDE y precipitación. Cada uno de estos factores no tiene igual importancia a la hora de determinar la susceptibilidad a inundación en la cuenca de estudio.

En el caso de este estudio se ha considerado como método más adecuado un modelo de suma ponderada desarrollado mediante la herramienta de ArcGIS Weighted Sum. El peso dado a cada uno de los mapas indica su importancia relativa (Xiao, Yi, and Tang, 2016) comparado con el resto de criterios.

Como referencia se han utilizado los valores presentes en varios artículos (Xiao, Yi, and Tang, 2016; Kourgialas and Karatzas, 2011; Blistanova et al., 2016; Pradhan, 2009; Elkhachy, 2015; Nyarko, 2002) teniendo en cuenta la diferencia en cuanto a las características de las zonas hidrográficas de estudio.

El primer paso ha sido la creación de mapas con escenarios de pesos particulares para facilitar la identificación de los cambios producidos por cada uno de los mapas. El mapa 1 corresponde a un escenario equilibrado, en el que todos los factores están ponderados 1/6. Los mapas de 2 a 7 corresponden a escenarios en los que el factor predominante está ponderado un 0'5 y el resto un 0'1, siendo respectivamente distancia euclidiana, pendiente, umbral de escorrentía, MDE, acumulación de flujo y precipitación.

A partir de ahí, y mediante la comparación con las láminas de zonas inundables con alta, media y baja probabilidad descargadas desde <http://www.mapama.gob.es/es/cartografia-y-sig/ide/descargas/agua/zi-lamina.aspx>, se ha ido variando los valores de los pesos hasta llegar al escenario final.

Las variaciones de los pesos están recogidas en la tabla 2.2. Entre las observaciones hechas para cambiar los pesos del modelo están las siguientes:

- Las variables de acumulación de flujo y Densidad ponderada de cauces dan cohesión al modelo alrededor del cauce.
- La pendiente aumenta la importancia de valores aguas arriba mientras que MDE la disminuye.
- En el escenario 13 se aprecia la necesidad de darle importancia a los valores que aumentan la susceptibilidad a inundación aguas arriba.
- En el escenario 18 queda claro que es necesario un equilibrio entre MDE y Pendiente, al margen de la importancia total de ambos.
- En el escenario 21 se hace patente la mayor influencia de los valores de precipitación.
- En el escenario 24 se identifica una discordancia entre modelos y se solventa aumentando la influencia de Umbral de Escorrentía y Pendiente frente a Densidad ponderada de cauces y Precipitación.
- En el escenario 25 se reduce la Acumulación de flujo con respecto a la Densidad ponderada de cauces para los valores río arriba.
- A partir del escenario 26 se ha considerado más adecuado para progresar en el ajuste del modelo utilizar pesos no normalizados. Dejando este proceso para el final (los mapas no normalizados están marcados con un *).

- A partir del escenario 32 se ha añadido el segundo mapa de densidad de cauces para dar cohesión al modelo.
- Con el escenario 34 ajustado para un periodo de retorno de 500 años, procedemos a ajustar la precipitación para el resto de periodos de retorno.

El proceso seguido para verificar los mapas resultado está recogido en el capítulo [2.5.2.](#)

TABLA 2.2: Distintos escenarios de pesos estudiados

| | Acum. de Flujo | Densidad | Precip. | Pendiente | Umbral de Esc. | MDE |
|-----|----------------|----------|---------|-----------|----------------|--------|
| 1 | 0'166 | 0'166 | 0'166 | 0'166 | 0'166 | 0'166 |
| 2 | 0'500 | 0'100 | 0'100 | 0'100 | 0'100 | 0'100 |
| 3 | 0'100 | 0'500 | 0'100 | 0'100 | 0'100 | 0'100 |
| 4 | 0'100 | 0'100 | 0'500 | 0'100 | 0'100 | 0'100 |
| 5 | 0'100 | 0'100 | 0'100 | 0'500 | 0'100 | 0'100 |
| 6 | 0'100 | 0'100 | 0'100 | 0'100 | 0'500 | 0'100 |
| 7 | 0'100 | 0'100 | 0'100 | 0'100 | 0'100 | 0'500 |
| 8 | 0'500 | 0'200 | 0'075 | 0'075 | 0'075 | 0'075 |
| 9 | 0'525 | 0'100 | 0'150 | 0'075 | 0'075 | 0'075 |
| 10 | 0'525 | 0'075 | 0'125 | 0'125 | 0'075 | 0'075 |
| 11 | 0'550 | 0'075 | 0'125 | 0'125 | 0'0625 | 0'0625 |
| 12 | 0'575 | 0'075 | 0'125 | 0'100 | 0'0625 | 0'0625 |
| 13 | 0'575 | 0'050 | 0'150 | 0'100 | 0'0625 | 0'0625 |
| 14 | 0'050 | 0'525 | 0'150 | 0'075 | 0'075 | 0'125 |
| 15 | 0'250 | 0'325 | 0'150 | 0'075 | 0'075 | 0'125 |
| 16 | 0'250 | 0'225 | 0'150 | 0'075 | 0'075 | 0'225 |
| 17 | 0'225 | 0'200 | 0'150 | 0'075 | 0'075 | 0'275 |
| 18 | 0'225 | 0'200 | 0'150 | 0'075 | 0'275 | 0'075 |
| 19 | 0'225 | 0'200 | 0'150 | 0'075 | 0'175 | 0'175 |
| 20 | 0'250 | 0'200 | 0'150 | 0'075 | 0'125 | 0'200 |
| 21 | 0'150 | 0'250 | 0'150 | 0'125 | 0'125 | 0'200 |
| 22 | 0'150 | 0'200 | 0'200 | 0'125 | 0'125 | 0'200 |
| 23 | 0'100 | 0'250 | 0'200 | 0'200 | 0'125 | 0'125 |
| 24 | 0'100 | 0'275 | 0'200 | 0'220 | 0'100 | 0'100 |
| 25 | 0'150 | 0'250 | 0'200 | 0'225 | 0'050 | 0'100 |
| 26 | 0'075 | 0'300 | 0'200 | 0'225 | 0'100 | 0'100 |
| 27* | 0'075 | 0'300 | 0'200 | 0'275 | 0'100 | 0'100 |
| 28* | 0'075 | 0'325 | 0'200 | 0'300 | 0'100 | 0'100 |
| 29* | 0'125 | 0'300 | 0'200 | 0'275 | 0'100 | 0'100 |
| 30* | 0'125 | 0'300 | 0'200 | 0'275 | 0'100 | 0'150 |
| 31* | 0'125 | 0'350 | 0'200 | 0'275 | 0'100 | 0'100 |
| 32* | 0'125 | 0'350 | 0'240 | 0'300 | 0'100 | 0'100 |
| 33* | 0'250 | 0'350 | 0'240 | 0'300 | 0'100 | 0'100 |
| 34* | 0'125 | 0'350 | 0'240 | 0'300 | 0'100 | 0'100 |
| 34 | 0'103 | 0'288 | 0'198 | 0'247 | 0'082 | 0'083 |

2.5 Modelo creado y Verificación

A lo largo de este apartado se va a desarrollar brevemente la metodología llevada a cabo durante el proceso de creación del modelo (figura 2.31) y la verificación del mismo para el caso particular que nos ocupa.

2.5.1 Modelo creado

Para la ejecución de este modelo se han utilizado mapas georreferenciados de distintos grupos de datos. Estos se han tratado para adecuarlos a su utilización en el modelo final, sobre el cuál les ha sido asignada una importancia.

Los distintos mapas de datos utilizados están recogidos a continuación, incluyendo el tratamiento que cada uno ha recibido y la justificación de la presencia de los mismos en el modelo.

Tras esto cada uno de los mapas resultado ha sido normalizado, haciendo que su máximo valor igual a 1 corresponda con la mayor susceptibilidad de inundación a cargo de ese factor.

Finalmente, para obtener un sólo mapa que indique la susceptibilidad a inundación en cada uno de los distintos periodos de retorno, se han combinado los factores mediante suma lineal ponderada, ajustando el peso de cada uno de estos al archivo histórico y los datos complementarios sobre inundabilidad.

Modelo Digital de Elevaciones

Datos de las cotas con datum vertical en el nivel medio del mar para la cuenca de interés.

Este mapa se utiliza directamente en el modelo final y como método de obtención de el mapa de pendientes y de acumulación de flujo, así como en la delimitación de la cuenca.

Una mayor cota del punto se traduce en una menor susceptibilidad a inundación.

Pendiente

Este mapa deriva del MDE y contiene las variaciones de inclinación en celdas adyacentes para cada uno de los puntos de la cuenca.

De este factor depende el umbral de escorrentía, que se reduce con el aumento de esta.

Con el aumento de la pendiente la susceptibilidad a inundación de ese punto se reduce.

Acumulación de flujo

A partir del MDE es posible crear el mapa de dirección de flujo que permite generar este último factor que referencia a la superficie que contribuye hidrológicamente con cada punto de la cuenca.

Este parámetro muestra el punto en cada sección de la cuenca por el que es más probable que discurra el agua.

Distancia ponderada a los cauces de los ríos

Partiendo de la red hidrográfica se ha operado para obtener un mapa con valores numéricos que consideran la distancia de cada punto a los cauces de los ríos teniendo en cuenta el caudal y las dimensiones de los mismos.

De esta manera es posible cuantificar la distancia que tiene que viajar un volumen de agua para llegar a un cauce que favorezca su evacuación.

Umbral de escorrentía

Cantidad de precipitación a partir de la cual el agua no sólo se infiltra en el terreno, sino que también fluye sobre este.

Se ha obtenido a partir de los datos de mapas de pendiente, cobertura de suelo y permeabilidad del mismo a partir de la litoestratigrafía de la zona.

Un mayor umbral de escorrentía indica una mayor capacidad del terreno de absorber agua por lo que está inversamente relacionado con la susceptibilidad a inundación.

Precipitación

Medida directa de la sensibilidad a inundaciones de una zona, se trata de la medición del volumen de agua que recoge el área de estudio a través de datos puntuales, y la relación de este con las zonas susceptibles de inundación.

A través de este parámetro se introduce el carácter estadístico con periodos de retorno para los evento extremos sobre la cuenca hidrográfica.

El aumento de precipitación se relaciona directamente con la susceptibilidad de la zona a sufrir inundaciones.

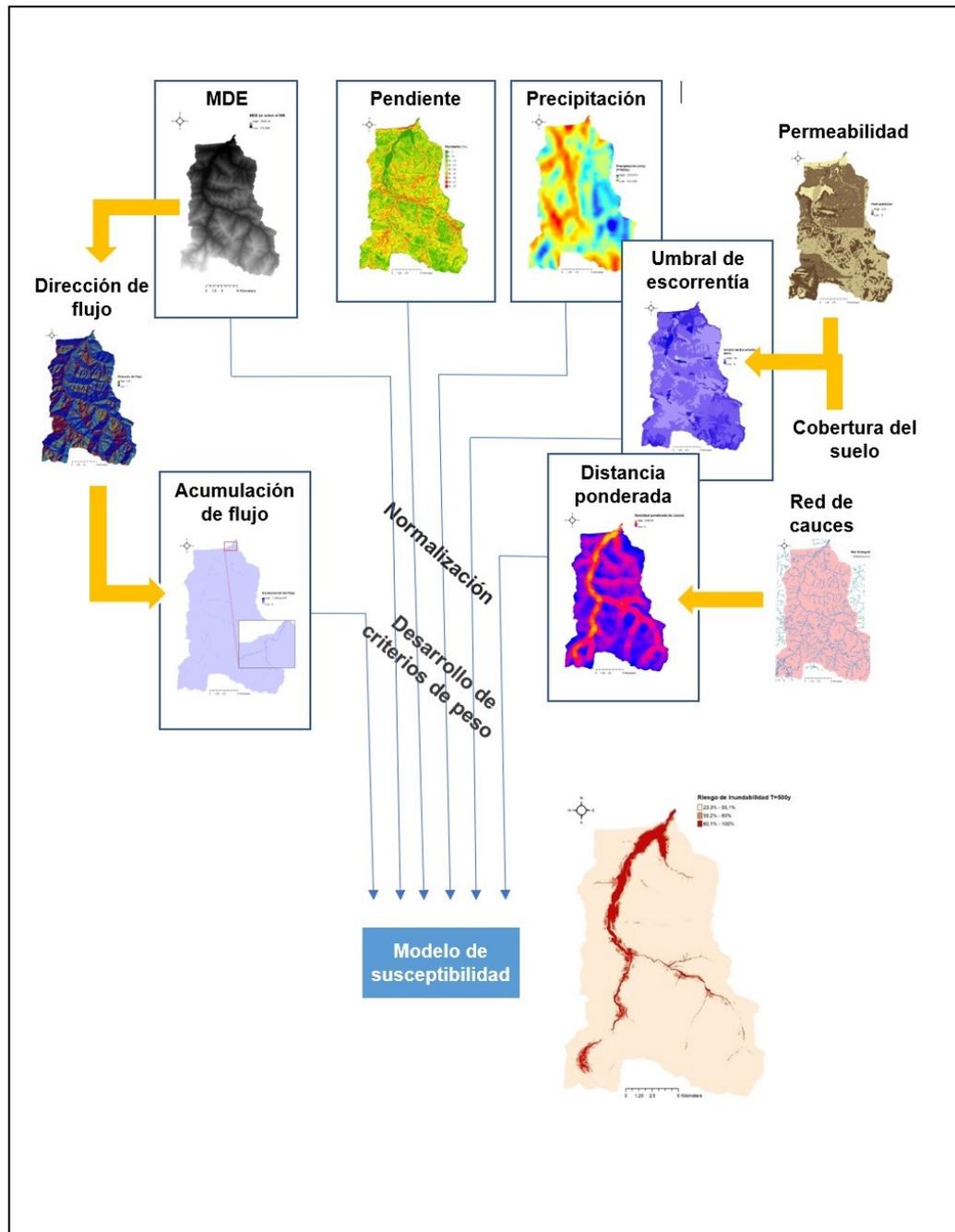


FIGURA 2.31: Diagrama de flujo de la metodología llevada a cabo en el estudio

2.5.2 Verificación del Modelo

Para modelos de susceptibilidad a inundación, dos suposiciones básicas son necesarias. Una es que las áreas inundadas están relacionadas con información espacial topográfica, de usos de suelo o dirección de flujo; y la otra es que las futuras áreas inundadas se verán afectadas por un factor específico como la precipitación (Pradhan, 2009). Estas dos condiciones son sencillamente comprobables en cada escenario planteado. La primera mediante la comparación con los mapas de MDE o pendiente (figura 2.36).

En el caso del estudio de inundabilidad realizado se cuenta con un mapa de susceptibilidad a inundación ya desarrollado por el gobierno de España bajo el nombre de zonas inundables asociadas a periodos de retorno, llevado a cabo por las autoridades competentes en cada zona de ordenación del territorio y protección civil.

En estos modelos la delimitación de las zonas inundables se realiza de una de las siguientes maneras:

- A partir de un estudio hidrológico en el que se determinan los caudales asociados al periodo de retorno correspondiente (10, 50 y 100 años) y se realiza un estudio hidráulico para determinar el nivel alcanzado por la lámina de agua.
- A partir de estudios geomorfológico-históricos que permiten delimitar zonas con probabilidad baja de inundación en función de las evidencias del mismo tipo.
- Metodologías mixtas que combinen alguno de los dos anteriores.

Para desarrollar el modelo se han elegido los periodos de retorno de 10 años (alta probabilidad), 100 años (probabilidad media) y 500 años (probabilidad baja)⁸. Estos mapas creados por SNCZI-IPE (figura 2.32) delimitan las zonas de tres maneras distintas.

La primera de ellas a partir de un estudio hidrológico en el que se determinan los caudales correspondientes a los periodos de retorno usados. Con este dato se lleva a cabo un estudio hidráulico para determinar los niveles que alcanza la lámina de agua y la extensión de área inundada en cada caso. La segunda utiliza estudios geomorfológicos-históricos para determinar zonas con susceptibilidad a inundación según las evidencias históricas y geomorfológicas identificadas. La última combina los métodos anteriores para mejorar la fiabilidad de los resultados.

Dentro de la propia información que adjunta el MAPAMA se incluye las limitaciones que el modelo presenta respecto a la inundación en un evento concreto. Los efectos de erosiones, deslizamientos, sedimentaciones, etc... sólo se tienen en cuenta mediante criterios geomorfológicos y, en una situación concreta, sobre todo en tramos de altas pendientes, los cambios geomorfológicos pueden ser muy importantes y los resultados diferir de lo previsto significativamente. Los modelos matemáticos existentes no pueden tener en cuenta los efectos que determinados elementos puedan producir mediante obstrucciones y derivaciones del flujo, por ejemplo árboles caídos, vehículos, etc.. que pueden obstruir puentes, calles, etc.. y derivando el flujo en cualquier sentido, siendo esto impredecible. En los casos de zonas inundables de gran extensión con asentamientos urbanos (concentrados y dispersos) importantes, las dificultades para representar adecuadamente en el modelo hidráulico todos los elementos artificiales que influyen en las características del flujo,

⁸Estos mapas son propiedad de © Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (MAPAMA)

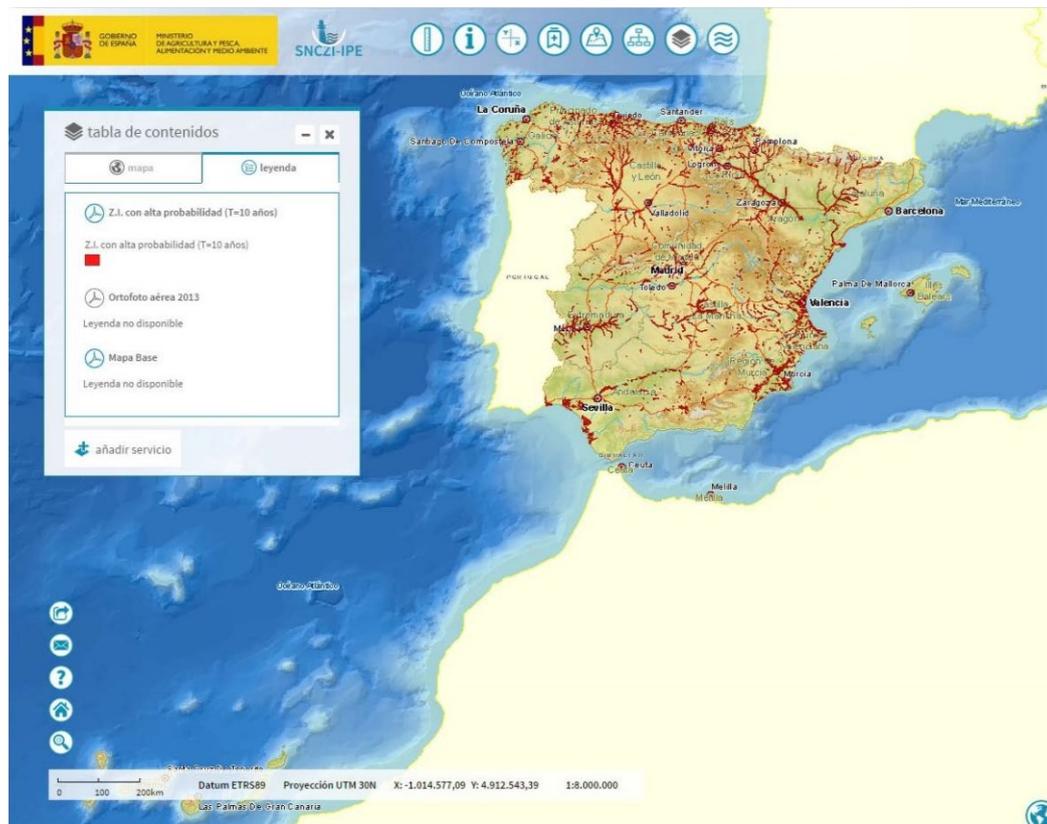


FIGURA 2.32: Visor del SNCZI para la península con las zonas de susceptibilidad a inundación para T = 10 años

y las propias limitaciones computacionales derivadas de gran cantidad de datos procesados, también pueden hacer que los resultados de la inundación difieran de las previsiones del modelo.

El centro de descargas del MAPAMA permite descargar en formato .shp los mapas de susceptibilidad a inundación con alta, media y baja probabilidad (figuras 2.33, 2.34 y 2.35). Usados para contrastar los distintos escenarios de pesos.

El resultado que se obtiene de cada una de las sumas ponderadas es un mapa que contiene un valor para cada celda de la cuenca hidrográfica (figuras 2.40, 2.42 y 2.44). Para poder compararlo es necesario utilizar sólo los valores correspondientes a un porcentaje de susceptibilidad determinado. En cada uno de los escenarios, mediante la herramienta de ArcGIS Symbology/Classified en combinación con el histograma del mapa, se ha iterado hasta encontrar los valores que más se ajustan al resultado buscado. Estos corresponden al tanto por 1 de susceptibilidad a inundación sobre la zona de estudio a partir de el cual se debe considerar como zona de susceptibilidad para el periodo de retorno del mapa.

La superposición de los mapas (figuras 2.41, 2.43 y 2.45) muestra un ajuste satisfactorio con los datos empleados para la validación, dando lugar a unos resultados ligeramente más conservadores. No obstante, posicionarse del lado de la seguridad puede resultar recomendable en un contexto de Cambio Climático en el que se prevé una aceleración del ciclo hidrológico por el que se incrementará la frecuencia e intensidad de las inundaciones.

2.6 Aplicación del modelo y resultados

Este estudio presenta la metodología desarrollada para llevar a cabo un análisis de susceptibilidad a inundación en la cuenca del río Saja a su paso por Santa Lucía. La Hoz de Santa Lucía, por su situación, es una vía de paso donde el ancho de la cuenca se reduce. Esta zona, en caso de fuertes avenidas, puede causar inundaciones en el casco urbano actual de la localidad. Además se tiene constancia de que esto supone un problema y que el ayuntamiento de Cabezón de la Sal ha ejecutado distintas obras de canalización o protección para minimizar el efecto de los mismo sobre el suelo residencial tanto en el municipio como en los alrededores, como la recuperación del aliviadero en Santibañez o la renovación parcial de saneamiento en el barrio de Barrecabras.

Por su parte, el río Saja, a su paso por la Hoz de Santa Lucía cuenta con un cauce extenso y suficiente. El problema aparece asociado al puente, este no es rebasado por ninguna llanura de inundación pero provoca una retención importante de las aguas que supone una sobre elevación de la lámina de agua que afecta al casco urbano de la localidad situada aguas abajo.

En el estudio se ha considerado la cuenca del río Saja hasta su intersección con la CA-180, junto con sus subcuencas correspondientes estudiados todos mediante el uso de sistemas de información geográfica.

Los factores introducidos han sido usados para estimar las áreas con susceptibilidad a inundación y crear el mapa que las contenga. En todos los casos se han traducido los valores de los mapas a caracteres numéricos con los que operar en ArcGIS, siendo los siguientes (figuras 2.36, 2.37, 2.38 y 2.39):

- Modelo digital de elevaciones a partir de los mapas de la Base topográfica armonizada 1/5.000 sobre vuelo de 2007.
- Pendiente a partir del modelo digital de elevaciones.

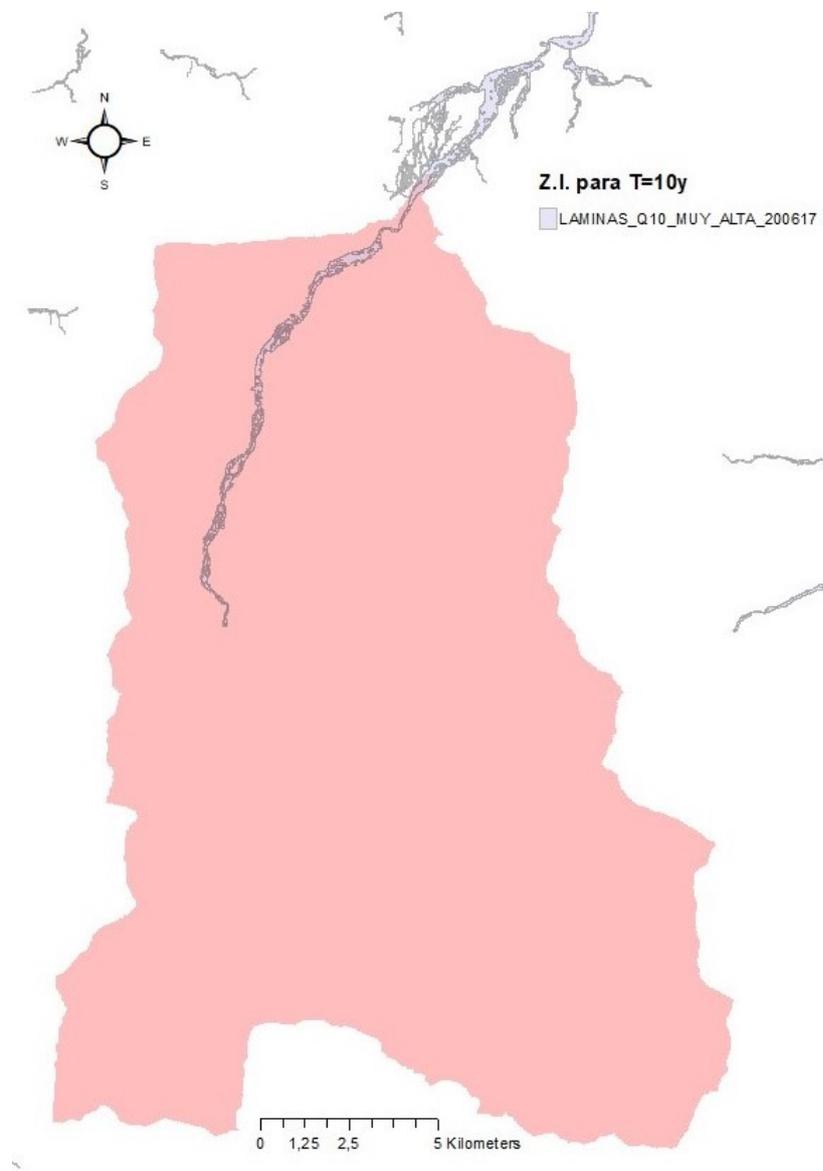


FIGURA 2.33: Mapa de zonas inundables para un periodo de retorno de 10 años

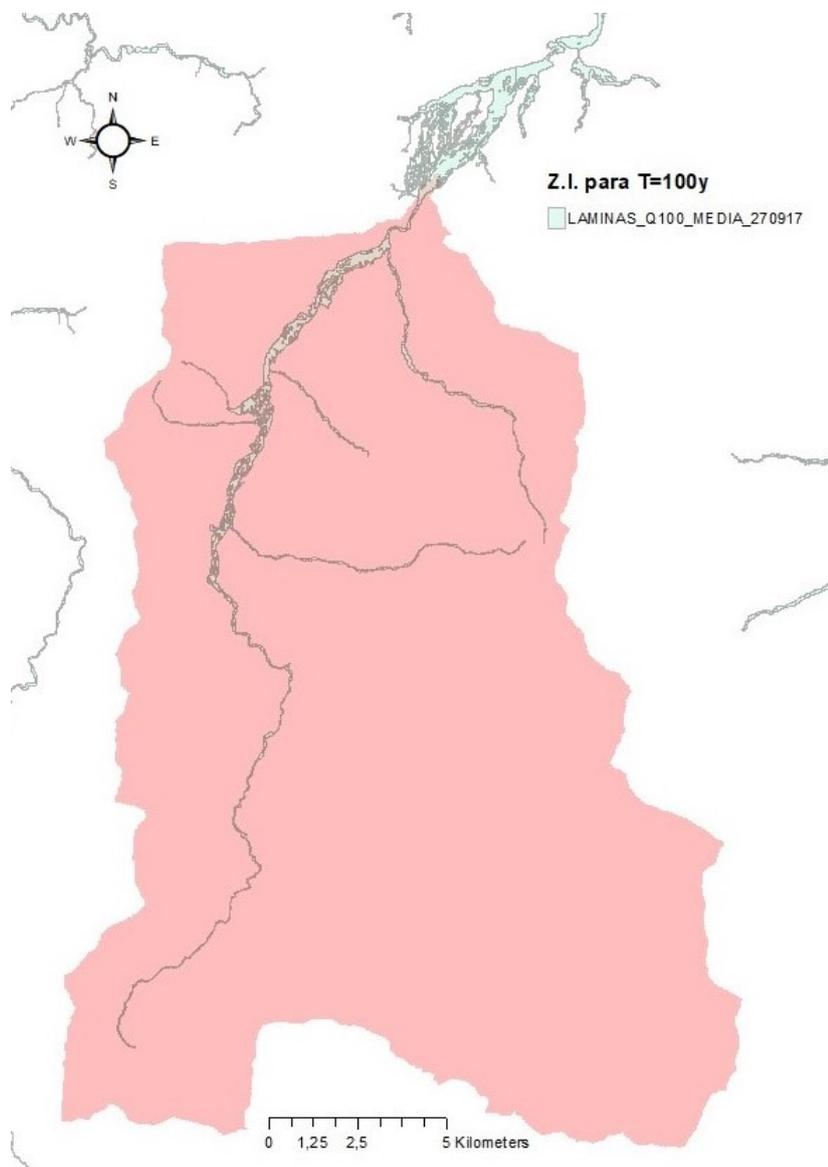


FIGURA 2.34: Mapa de zonas inundables para un periodo de retorno de 100 años

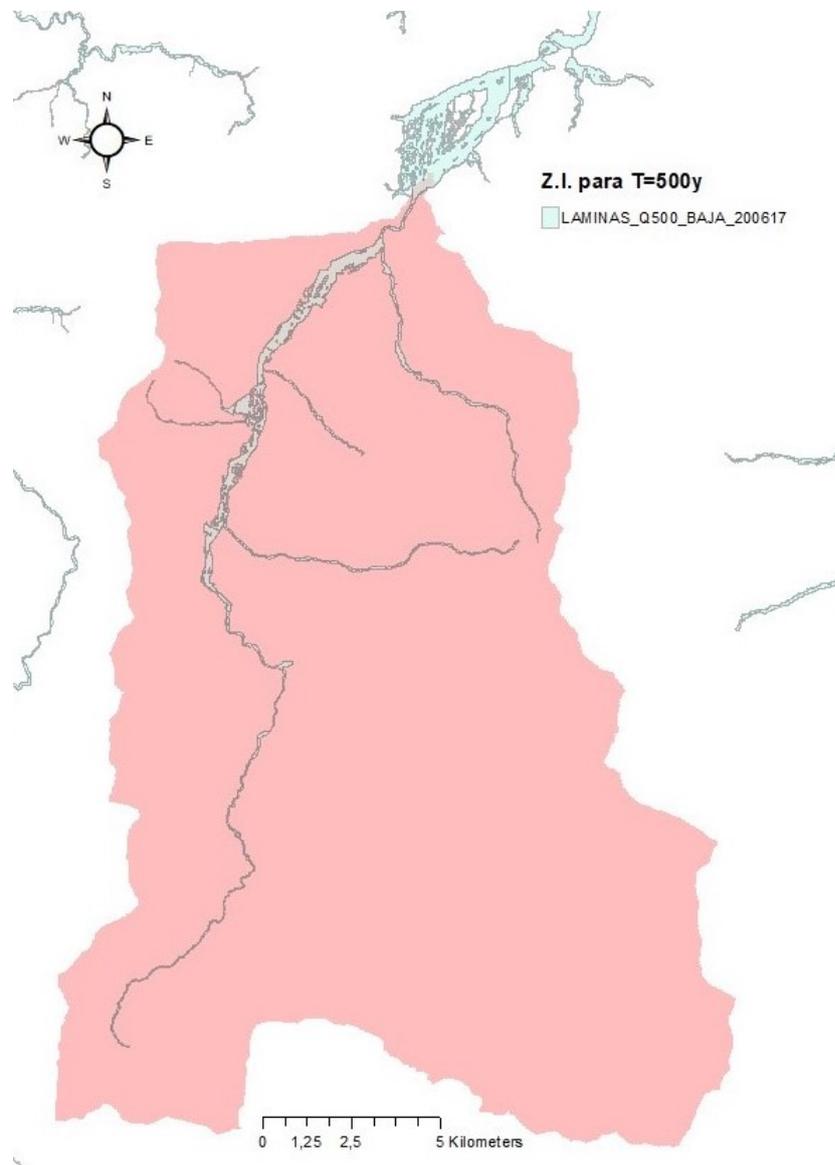


FIGURA 2.35: Mapa de zonas inundables para un periodo de retorno de 500 años

TABLA 2.3: Resumen de pesos en el modelo de cada factor

| Factor | Peso en el modelo |
|-------------------------------|-------------------|
| Acumulación de flujo | 10'3 % |
| Distancia ponderada | 28'8 % |
| Precipitación | 19'8 % |
| Pendiente | 24'7 % |
| Umbral de escorrentía | 8'2 % |
| Modelo digital de elevaciones | 8'3 % |

- Acumulación de flujo para la cuenca hidrográfica.
- Distancia ponderada a los cauces de los ríos considerando su caudal.
- Umbral de escorrentía a partir de mapas de usos y cobertura del suelo.
- Mapas de precipitación a partir de datos mensuales a nivel europeo.

Tras normalizar los mapas se han combinado utilizando la suma ponderada de los distintos factores.

Para verificar el modelo se ha comparado con el MDE y las pendientes en la cuenca, y los mapas de susceptibilidad a inundación proporcionados por el MA-PAMA.

La asignación de susceptibilidad a inundación y la localización de las zonas de susceptibilidad dan una comprensión intuitiva de las localizaciones de peligro a nivel regional, útil para delimitar las zonas edificables y la elaboración de estrategias para prevenir sus consecuencias derivadas (Xiao, Yi, and Tang, 2016).

En la metodología usada no hay ninguna conversión de formato SIG a ASCII por lo que resulta particularmente conveniente para procesar grandes cantidades de datos de manera rápida.

Los mapas son producto de la combinación de los factores estudiados (capítulo 2.2) con los pesos obtenidos mediante la verificación del modelo (capítulo 2.4). Los valores definitivos para cada uno de los mapas normalizados están indicados a continuación.

Los mapas de susceptibilidad a inundación obtenidos (figuras 2.40, 2.42 y 2.44) se presentan como valores en porcentaje. Por ello ha sido necesario considerar un límite a partir del cual calificar a la zona como susceptible a inundaciones para el periodo de retorno de estudio.

En todos los mapas se ha utilizado un valor del 60% de probabilidad para considerar la zona con susceptibilidad a inundación. También se incluyen los valores a partir de un 55% de probabilidad para los distintos periodos de retorno.

A modo de comprobación de la efectividad del modelo se ha considerado conveniente realizar un comparativo con los mapas creados por el Gobierno de Cantabria en colaboración con el Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria y los mapas generados con este proceso, los cuales están recogidos en mapas comparativos de ambos modelos (figuras 2.45, 2.43 y 2.41).

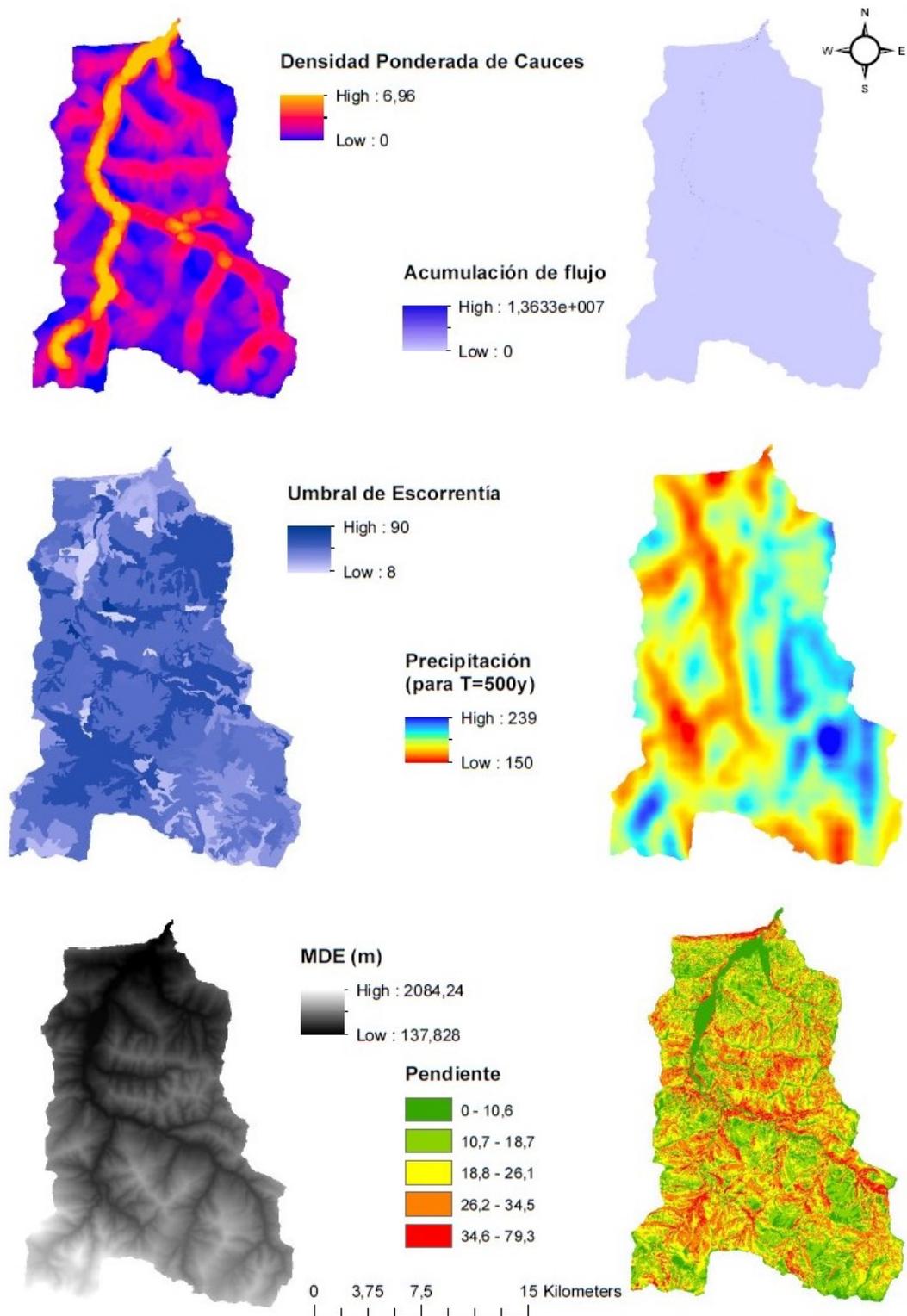


FIGURA 2.36: Mapas de los factores tenidos en cuenta: densidad ponderada de cauces, acumulación de flujo, umbral de escorrentía, precipitación, MDE y pendiente.

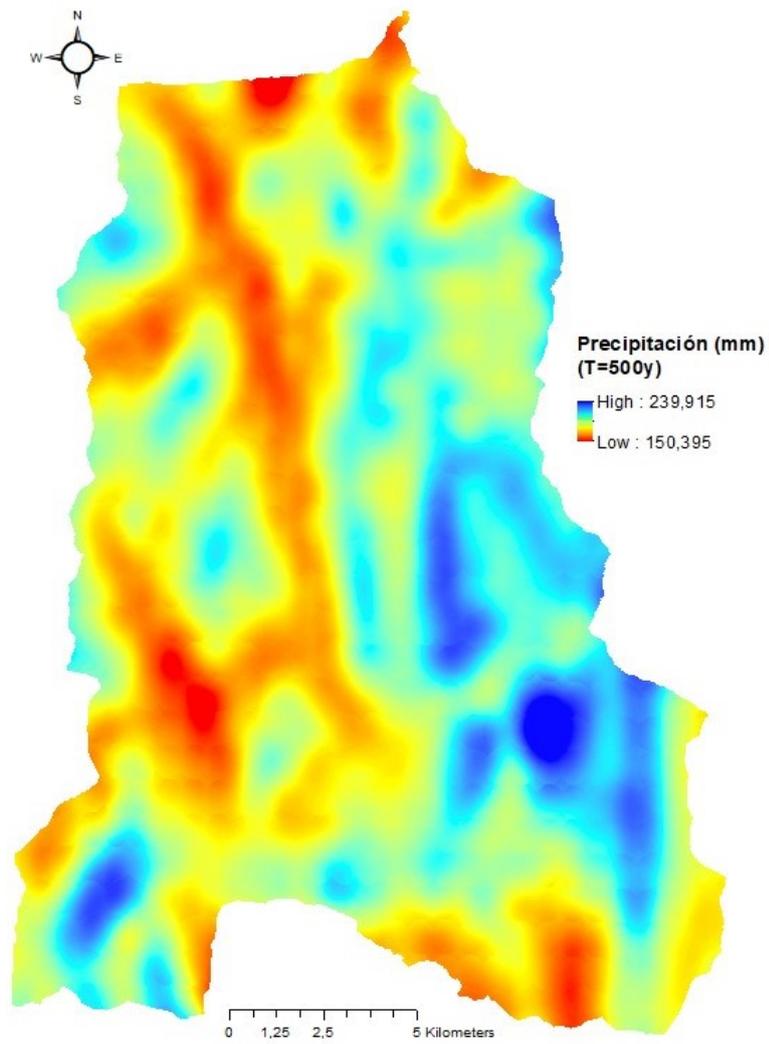


FIGURA 2.37: Mapa de precipitación para un periodo de retorno de 500 años

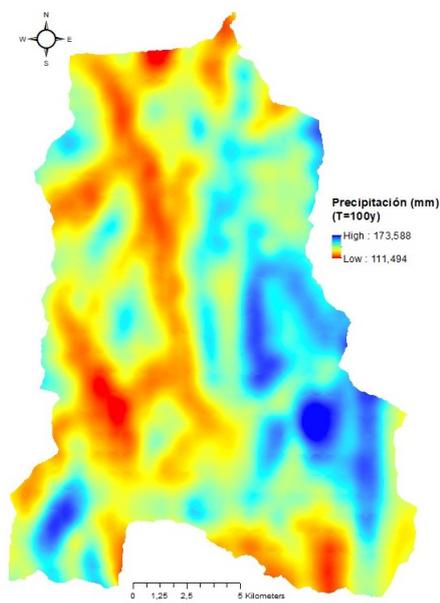


FIGURA 2.38: Mapa de precipitación para un periodo de retorno de 100 años

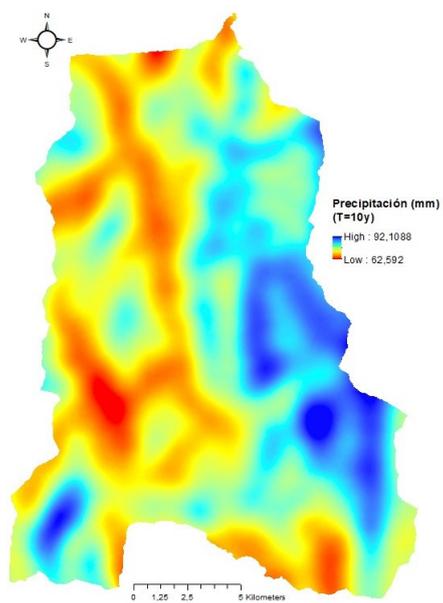


FIGURA 2.39: Mapa de precipitación para un periodo de retorno de 10 años

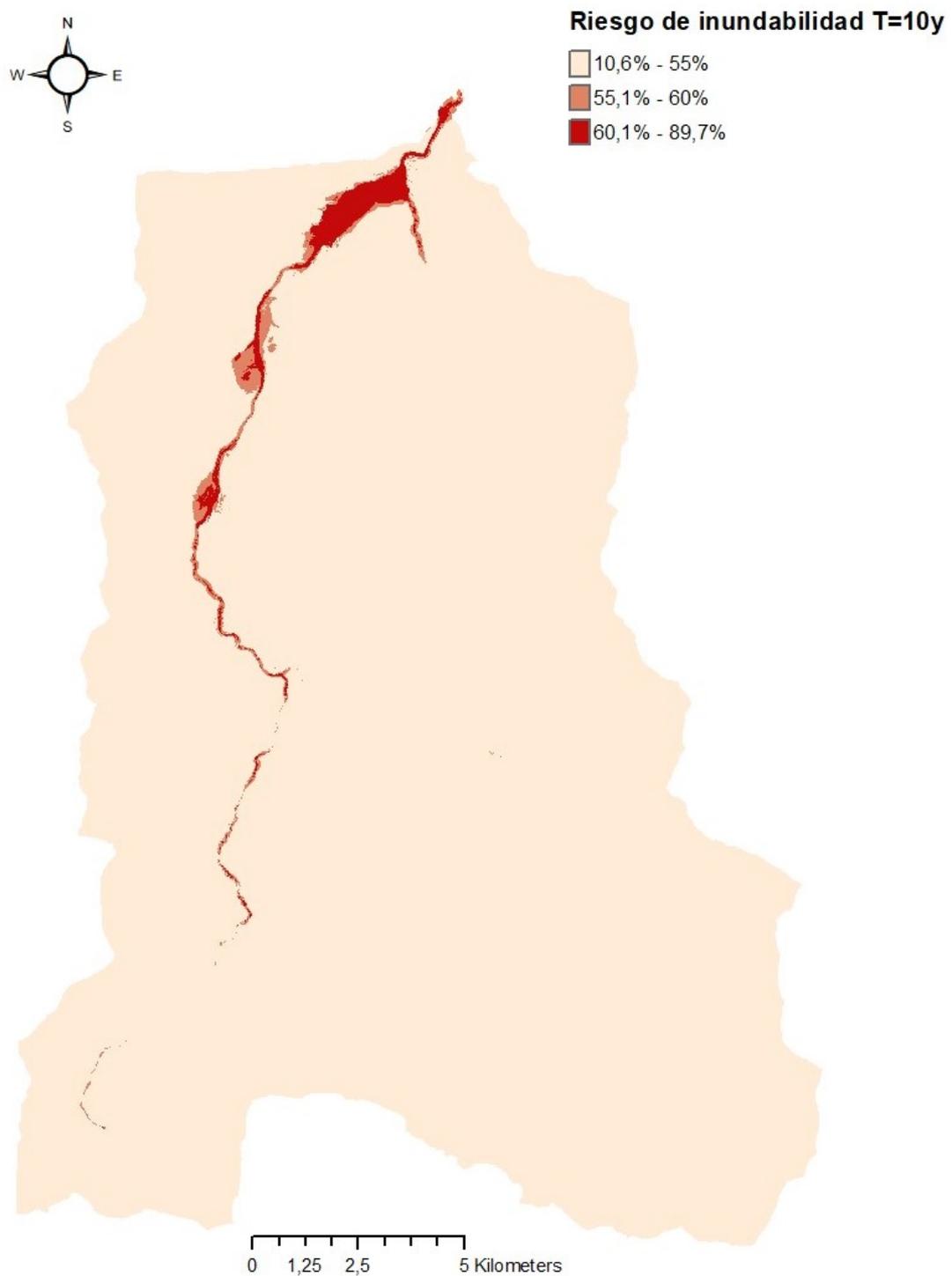


FIGURA 2.40: Mapa de susceptibilidad a inundación resultante del modelo para un periodo de retorno de 10 años

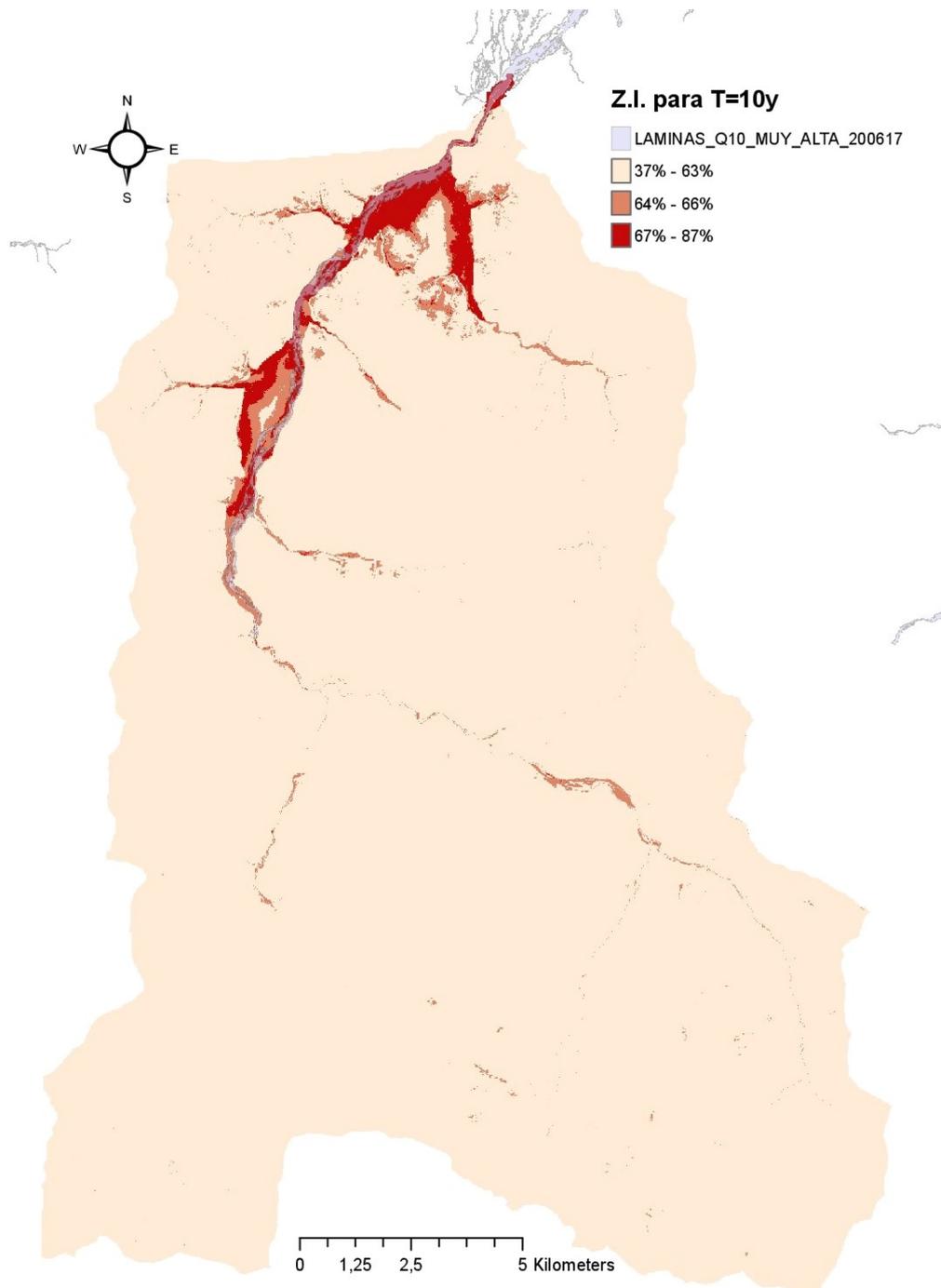


FIGURA 2.41: Comparación entre mapas de susceptibilidad para T=10años

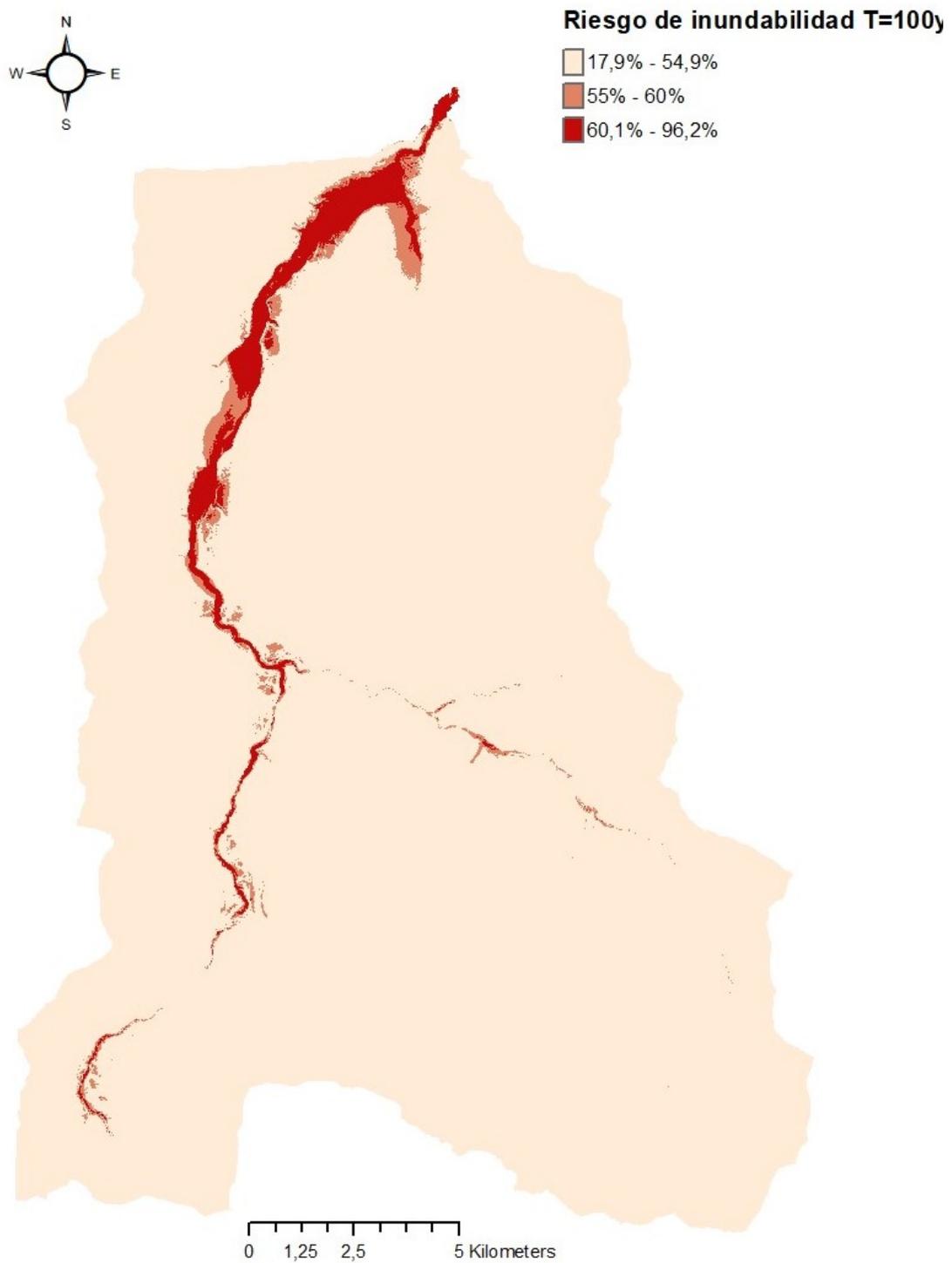


FIGURA 2.42: Mapa de susceptibilidad a inundación resultante del modelo para un periodo de retorno de 100 años

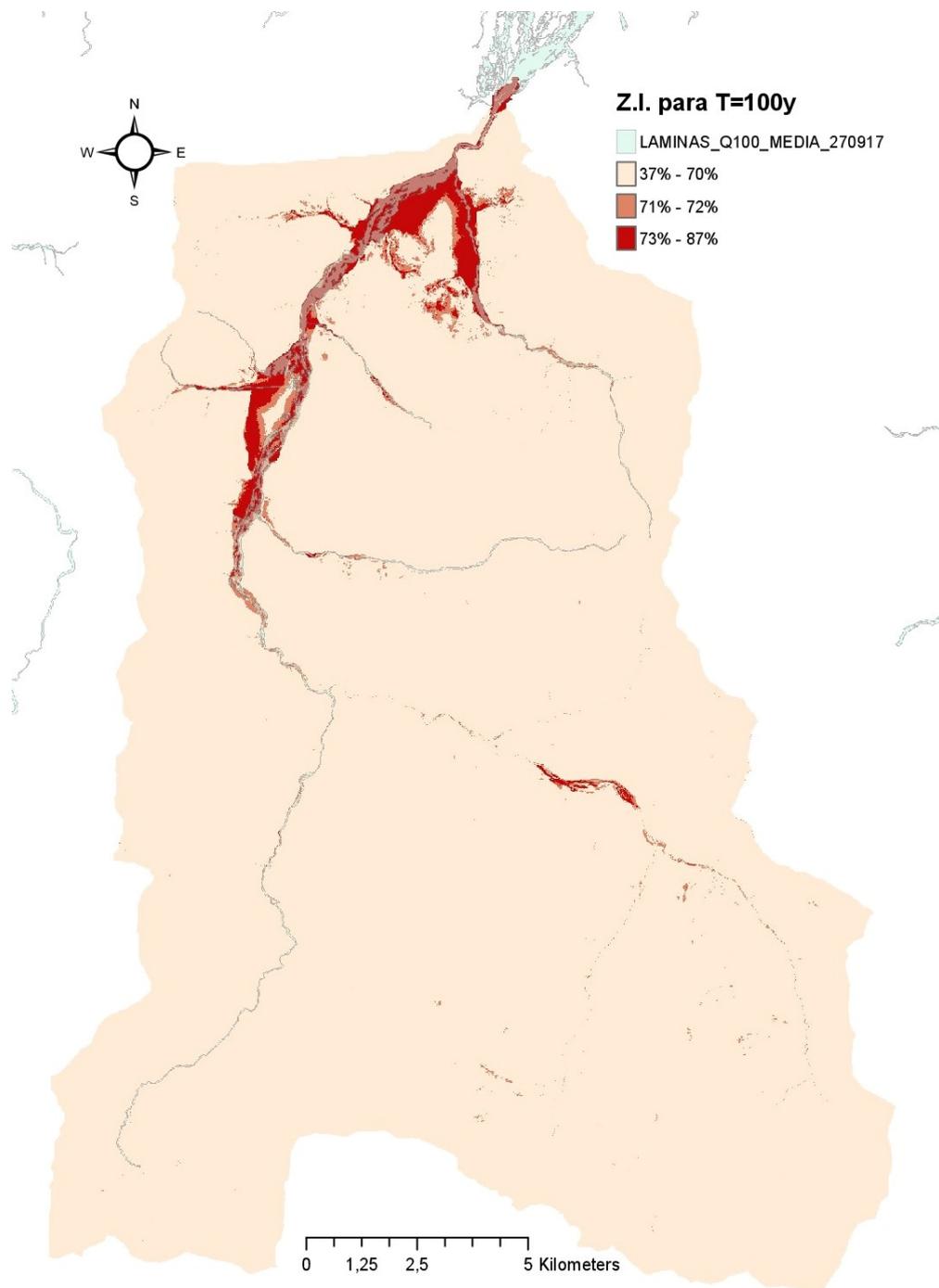


FIGURA 2.43: Comparación entre mapas de susceptibilidad para T=100años



FIGURA 2.44: Mapa de susceptibilidad a inundación resultante del modelo para un periodo de retorno de 500 años

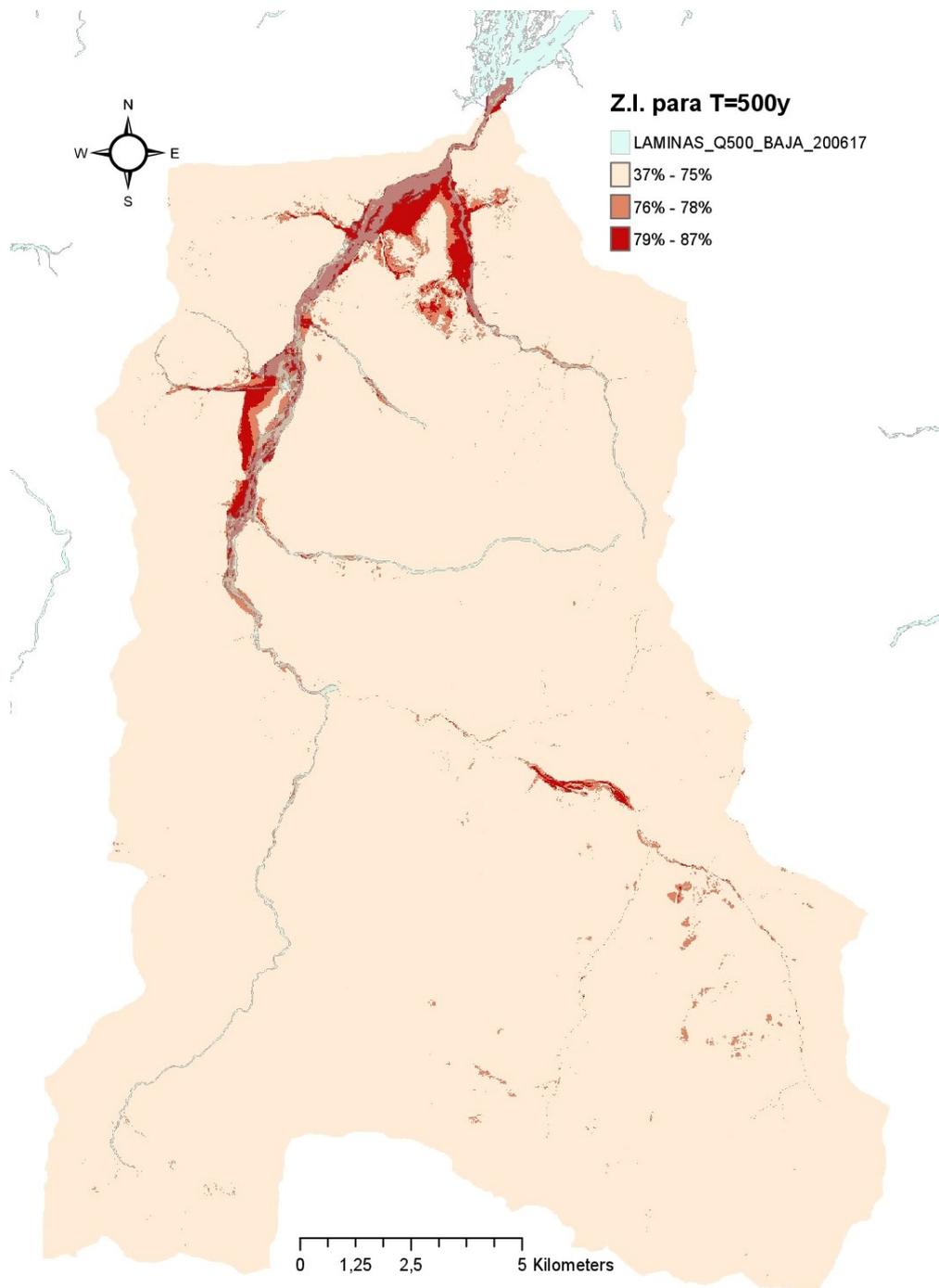


FIGURA 2.45: Comparación entre mapas de susceptibilidad para T=500 años

Capítulo 3

Conclusiones

Llegados a este punto merece la pena recordar el objeto de este estudio, que no es otro que el desarrollo de un modelo de detección e identificación de zonas con susceptibilidad a inundación, un modelo fácilmente extrapolable a otras cuencas haciendo uso de los software comerciales más extendidos como es ARCGIS de ESRI y empleando datos de libre acceso.

Para la realización del análisis se ha delimitado la cuenca hidrográfica del río Saja hasta su paso por la Hoz de Santa Lucía, donde se produce un estrechamiento. En esta cuenca se ha analizado la susceptibilidad a inundación de la zona mediante la combinación de: modelos digitales de terreno, red de cauces, mapas de usos del suelo, de geología y litología y mapas de precipitación.

Estos mapas base se han procesado y combinado para dar resultado a los mapas utilizados para el modelo: MDE, pendiente, acumulación de flujo, distancia ponderada a los cauces de los ríos según caudal, umbral de escorrentía y precipitación.

En este último se ha introducido la probabilidad mediante la distribución mensual con la que se ha trabajado, de tal manera que el modelo distingue entre periodos de retorno siendo 100, 50 y 10 años los seleccionados.

A partir de toda la información expuesta en los apartados anteriores, la validación de los modelos de susceptibilidad creados permiten extraer las siguientes conclusiones específicas:

- La validación del modelo planteado utilizando la información del Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria permite concluir que es un modelo extrapolable a otras cuencas.
- El procedimiento utilizado permite extrapolar el modelo planteado a otras cuencas hidrográficas, con independencia de sus localización geográfica o de las condiciones climáticas existentes, modificando los pesos de cada uno de los factores intervinientes.
- Si el modelo propuesto se combina con un modelo de análisis para zonas pequeñas obtenemos una herramienta eficaz para la detección de zonas con susceptibilidad a inundación, para su cuantificación y para la prevención de la misma.
- La utilización de información del libre acceso aplicada al modelo propuesto da buenos resultados, siempre teniendo en cuenta la calidad del dato utilizado y, en consecuencia, las precisiones obtenidas.
- El modelo presenta una similitud patente con el modelo desarrollado por el Gobierno de Cantabria en combinación con el Instituto de Hidráulica Ambiental (figuras 2.45, 2.43 y 2.41).

- El periodo de retorno de 500 años presenta la situación más desfavorable a lo largo de la cuenca.
- De la misma manera para todos los periodos de retorno la zona bajo el puente de la CA-180 es invadida, poniendo de manifiesto la probabilidad de esta zona de sufrir inundaciones.
- Los comercios próximos a la zona (Santa Lucía Espazio Gastronómico, Apartamentos Santa Lucía); las zonas urbanas correspondientes al barrio Santibañez y a Ormas; y la zona de Sopeña (incluyendo Cabuérniga) sufren inundaciones en el mapa de periodo de retorno menor, de 10 años, por lo que el impacto de las grandes avenidas sobre estos es constante.

Esta herramienta se presenta como una medida eficaz y fácilmente reproducible para la detección de zonas susceptibles de inundación en una cuenca hidrográfica a gran escala.

El uso de la misma debe ir complementado con el uso de un modelo a menor escala, ya que el principal inconveniente que presenta este estudio es la dimensión de análisis del mismo, al cubrir una zona extensa mediante mapas en formato GIS se pierde mucha información relacionada con el flujo del agua de escorrentía sobre la superficie, con lo que no es posible obtener la descarga en caudal que presenta el Saja para cada periodo de retorno.

Anejo A

Anejo de resultados

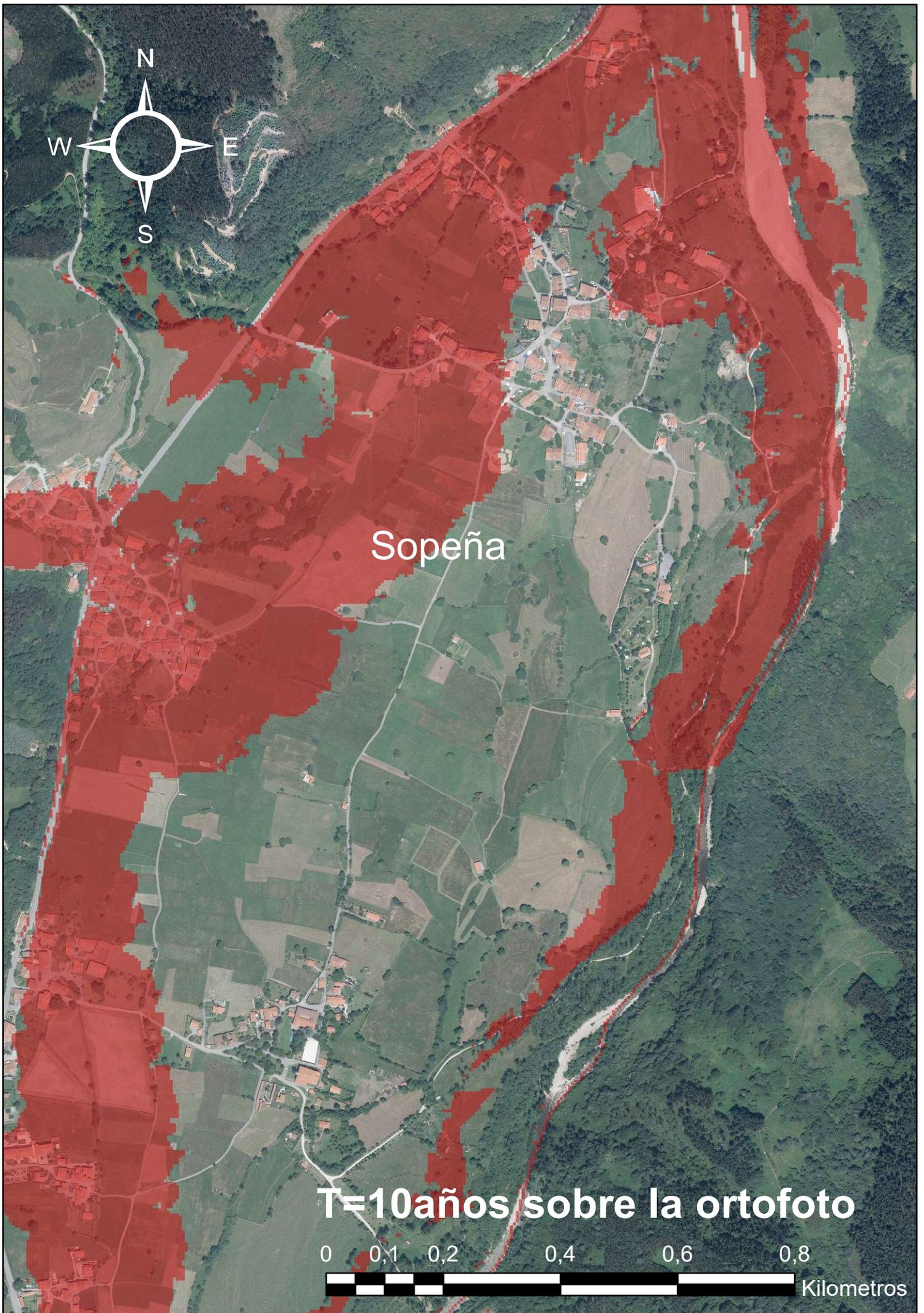
A continuación se presentan una serie de mapas que contienen los resultados obtenidos superpuestos a las ortofotos.

Utilizando estos mapas se ha identificado las zonas urbanas más susceptibles a sufrir inundaciones.









Sopenña

T=10 años sobre la ortofoto

0 0,1 0,2 0,4 0,6 0,8

Kilometros



Bibliografía

- Alcolea, Lucía (2013). "La crecida del río Saja inundó casas y cortó carreteras". In: *El Diario Montañés*.
- Beniston, Martin and David B Stephenson (2004). "Extreme climatic events and their evolution under changing climatic conditions". In: *Global and Planetary Change* 44.1-4, pp. 1–9.
- Blistanova, Monika et al. (2016). "Assessment of flood vulnerability in Bodva river basin, Slovakia". In: *Acta Montanistica Slovaca* 21.1, pp. 19–28.
- Burton, Ian (1997). "Vulnerability and adaptive response in the context of climate and climate change". In: *Climatic Change* 36.1-2, pp. 185–196.
- Cantábrico (CHC), Confederación Hidrográfica del (2018). *Río Saja*. URL: <https://www.chcantabrico.es/rios/saja> (visited on 04/2018).
- Elkhrachy, Ismail (2015). "Flash Flood Hazard Mapping Using Satellite Images and GIS Tools: A case study of Najran City, Kingdom of Saudi Arabia (KSA)". In: *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences* 18, pp. 261–278.
- ESRI, Environmental Systems Research Institute (2016). *Manual de ayuda al usuario de ArcGIS*. URL: <http://desktop.arcgis.com/es/> (visited on 04/2018).
- Evaluación Ambiental Urbanística, Dirección General de Ordenación del Territorio y (2005). *Servicios de Información Geográfica del Gobierno de Cantabria Geo-Servicios*. URL: <http://geoservicios.cantabria.es/> (visited on 04/2018).
- Federici, Bianca, Rossella Bovolenta, and Roberto Passalacqua (2015). "From rainfall to slope instability: an automatic GIS procedure for susceptibility analyses over wide areas". In: *Geomatics, Natural Hazards and Risk* 6.5-7, pp. 454–472.
- Fomento, Ministerio de (2016). "Orden FOM/298/2016". In: *BOE* 60, pp. 18882–19023.
- Hill, C, F Verjee, and C Barrett (2010). "Flash flood early warning system reference guide". In: *University Corporation for Atmospheric Research: Boulder, CO, USA*.
- Kandilioti, Georgia and Christos Makropoulos (2012). "Preliminary flood risk assessment: the case of Athens". In: *Natural hazards* 61.2, pp. 441–468.
- Kazakis, Nerantzis, Ioannis Kougiaris, and Thomas Patsialis (2015). "Assessment of flood hazard areas at a regional scale using an index-based approach and Analytical Hierarchy Process: Application in Rhodope–Evros region, Greece". In: *Science of the Total Environment* 538, pp. 555–563.
- Kaźmierczak, Aleksandra and Gina Cavan (2011). "Surface water flooding risk to urban communities: Analysis of vulnerability, hazard and exposure". In: *Landscape and Urban Planning* 103.2, pp. 185–197.
- Kourgialas, Nektarios N. and George P. Karatzas (2011). "Flood management and a GIS modeling method to assess flood-hazard areas — a case study". In: *Hydrological Sciences Journal - Journal des Sciences Hydrologiques* 56.2, pp. 2150–3435.
- Nadarajah, Saralees and Samuel Kotz (2004). "The beta Gumbel distribution". In: *Mathematical Problems in engineering* 2004.4, pp. 323–332.
- Nyarko, Benjamin Kofi (2002). "Application of a rational model in GIS for flood risk assessment in Accra, Ghana". In: *Journal of Spatial Hydrology* 2.1.

- Ouma, Yashon O and Ryutaro Tateishi (2014). "Urban flood vulnerability and risk mapping using integrated multi-parametric AHP and GIS: methodological overview and case study assessment". In: *Water* 6.6, pp. 1515–1545.
- P., C. DE LA (2014). "Las lluvias torrenciales provocaron inundaciones en la zona occidental". In: *El Diario Montañés*.
- Pradhan, Biswajeet (2009). "Flood susceptible mapping and risk area delineation using logistic regression, GIS and remote sensing". In: *Journal of Spatial Hydrology* 9.2, pp. 1–18.
- San Miguel, Álvaro (2016). "Sopeña, un día después de las inundaciones". In: *El Diario Montañés*.
- Tanavud, Charlchai et al. (2004). "Assessment of flood risk in Hat Yai municipality, Southern Thailand, using GIS". In: *Journal of natural disaster science* 26.1, pp. 1–14.
- Xiao, Yangfan, Shanzhen Yi, and Zhongqian Tang (2016). "GIS-based multi-criteria analysis method for flood risk assessment under urbanization". In: *Geoinformatics, 2016 24th International Conference on*. IEEE, pp. 1–5.
- Yahaya, Sani, Noordin Ahmad, and Rania Fadlallah Abdalla (2010). "Multicriteria analysis for flood vulnerable areas in Hadejia-Jama'are River basin, Nigeria". In: *European Journal of Scientific Research* 42.1, pp. 71–83.
- Yalcin, G and Z Akyurek (2004). "Analysing flood vulnerable areas with multicriteria evaluation". In: *20th ISPRS congress*, pp. 1–6.