ANEJOS

Anejo 1: Corrección del MDE

El Arc-Tool-Box de ArcGIS incorpora una herramienta llamada **sink** para detectar los sinks, o sumideros. Se trata de píxeles en los que el flujo se queda acumulado al tener sus ocho celdas vecinas una cota mayor. La herramienta solicita introducir el MDE y genera un nuevo ráster con los sinks detectados y numerados.

Para pasar a su relleno primero se deben generar una serie de rásters necesarios:

- zona_sink: se trata de calcular la cuenca que vierte a cada sink detectado anteriormente. Se obtiene utilizando la **watershed** tool. De esta manera se puede ver el área afectada por la presencia de un sink en el DEM.

- sinkmin: se obtiene mediante la tool **zonal statistics** (mínimo). Genera un ráster con el valor de la cota mínima del propio sink (la zona del error más deprimida).

- sinkmax: se obtiene mediante la tool **zonal fill**. Genera un ráster con el valor de la cota mínima de los límites del área de contribución al sink.

- sinkdepth: representa la profundidad de cada sink. Se genera mediante la tool **raster calculator**, restando el ráster sinkmax del sinkmin.

En la Figura A se muestra el significado de cada capa ráster. Se puede ver que sinkmax es la cota mínima a partir de la cual se inicia el sink. Por tanto, es la cota máxima del sink y mínima de la cuenca que vierte a dicho sink.

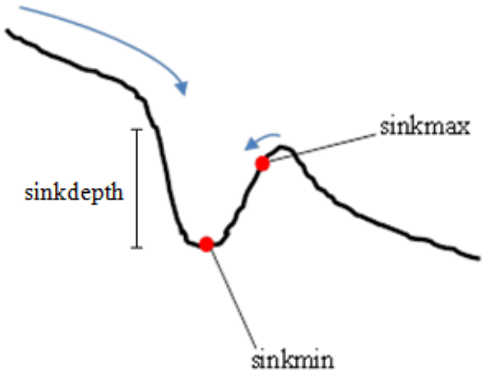

Figura A: esquema que ilustra la estructura de un sink en el MDE

El relleno de los sink sería tarea simple si no se tuviera ninguna zona de lagunas o lagos (sinks "naturales" o reales). Puesto que el estudio que se está llevando a cabo en este trabajo se sitúa en una zona de montaña, no se puede rellenar indiscriminadamente todo lo que el programa considera que son sinks. Efectivamente, hay lagos y lagunas que han de ser respetadas. Una característica que juega a favor es el hecho que los errores de MDE suelen involucrar pocos píxeles a la vez (entre 1 y 10 en un MDE de 5x5 metros), mientras que los lagos y lagunas reales tienen extensiones mucho mayores).

El estudio llevado a cabo anteriormente para determinar las profundidades de los sinks del MDE permite obtener un criterio para decidir a partir de que profundidades se van a rellenar los sinks. La función de relleno **fill**[5] de ArcGIS pide que se introduzca una altura z. Sinks con alturas menores o iguales a este valor serán rellenados. Los sinks con profundidades mayores a este valor no se rellenarán. La Figura B ilustra el proceso de rellenado de la función **fill** de ArcGIS.

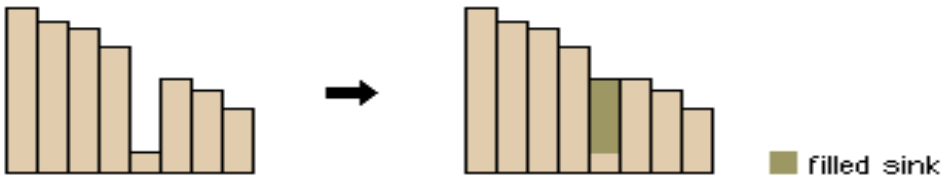

Figura B: esquema que representa el proceso de rellenado de la función de ArcGIS llamada fill. Se puede ver el sink antes y después de aplicar dicha función (ESRI, 2011).

El estudio de los sinks tal y como se ha expuesto hasta ahora muestra que la mayoría de los errores del MDE con el que se trabaja tienen profundidades menores a 0,5m. A pesar de ello, si se aplica la función fill con el valor de z de 0,5 m, se eliminan muchos de los errores del MDE pero también se rellenan muchas lagunas reales, con lo que este valor de z no es aceptable. Se ha de iniciar así un proceso iterativo para hallar un valor de z que ayude a limpiar los sinks del MDE pero que afecte lo mínimo a las lagunas naturales de la zona.

Viendo que la aplicación de la función fill con una determinada z nunca acaba de rellenar todos los errores y tampoco respeta todos los lagos, se ha acabado optando por el relleno completo del MDE, es decir, sin distinguir una profundidad. Esto corrige todos los errores reales de la MDE, pero también rellena todos los lagos, asumiendo que la lámina de agua de estos es el terreno real (y, por tanto, estableciendo flujos por encima de dichas superficies).

[5] Para poder rellenar el MDE se ha optado por aplicar esta función de ArcGIS en versiones anteriores, concretamente la 9.3., por dar mejores resultados.

Aunque no es realista, esta simplificación se aplica por el hecho de que, para el cálculo de redes de drenaje, es más importante evitar errores que corten la red real que conservar lagos (que no influirán en los resultados que se quieren obtener en este trabajo).

Anejo 2: Obtención de las cuencas de drenaje mediante herramientas de ArcGIS

Una vez se tiene el MDE corregido, se pasa a la obtención de la red de drenaje y de sus cuencas. En el siguiente diagrama de flujo se muestra el proceso con las herramientas estándar de ArcGIS al ser muy habitual su uso. Sin embargo no son las utilizadas en esta tesina, en que se ha empleado una extensión específica para este tipo de cálculos.

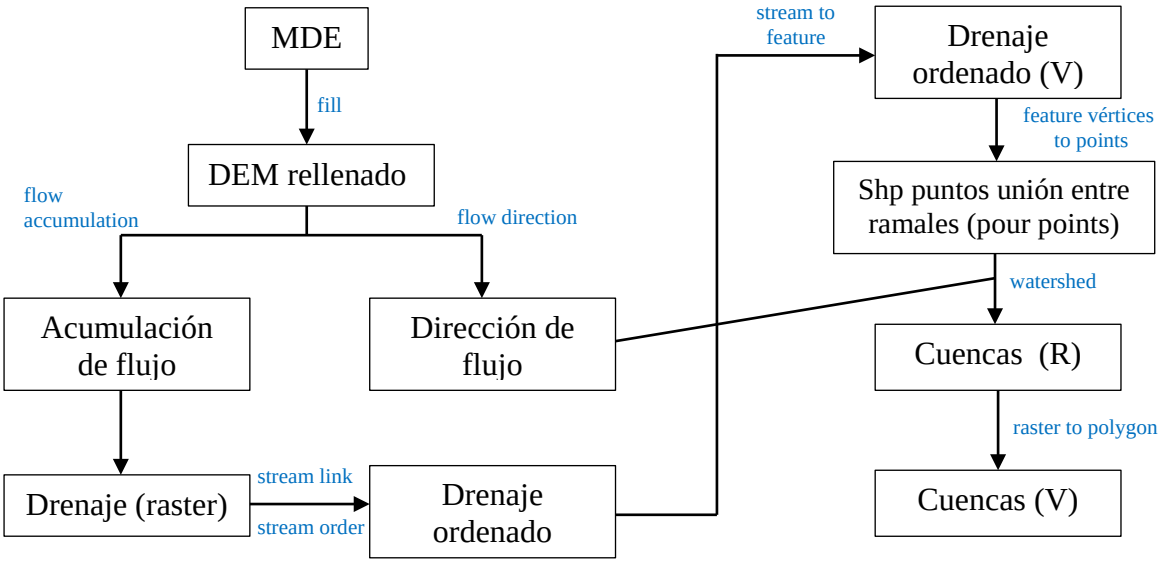

Figura C: Diagrama de flujo que muestra el proceso seguido para la obtención de la red de drenaje y de las cuencas (en azul se indican los procesos de análisis espacial realizados en ArcGIS). R significa mapa en formato raster y V en formato vectorial.

Partiendo del MDE corregida, se obtienen los rasters de dirección de flujo y acumulación de flujo de la zona de estudio. Esos rasters provienen de la MDE ya rellenada, es decir, después de aplicar la función fill, con lo que son resultados ya definitivos.

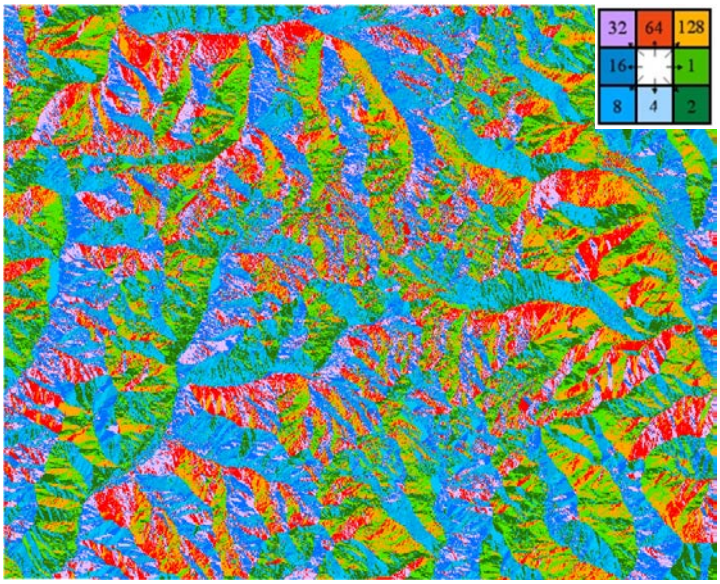

Figura D: La imagen de la izquierda muestra el raster de dirección de flujo obtenido. La zona de estudio tiene una extensión de 35 km en horizontal y 28 km en vertical.

Con el raster de acumulación de flujo se puede extraer la red de drenaje de la zona de estudio. Para ello, hay que definir un umbral de flujo al mapa de acumulación de flujo, es decir, un valor de acumulación a partir del cual se empezará a tener un ramal definido de la red de drenaje (se empezará a formar un torrente). La determinación de este umbral no es tarea trivial. Múltiples factores, tales como la geología, el clima… hacen que el valor de este umbral varíe, con lo que su determinación de forma realística es muy complicada.

En este trabajo se optó por escoger varios valores umbral de área vertiente, compararlos con la red de drenaje real (obtenible en mapas del ICGC) y escoger el valor a partir de las conclusiones llegadas mediante dicha comparación.

Como lo que se pretende es dar un umbral de área vertiente mínimo para cualquier punto, se ha de definir en la capa de acumulación de flujo el número de píxeles correspondientes a dicha área vertiente. Por ejemplo, se opta por tomar un umbral de acumulación de 0,5 km^2 (es decir, se formará escorrentía superficial en cierto punto cuando el área vertiente a dicho punto sea mayor o igual a 0,5 km^2). Por tanto, se deberá reclasificar el raster con un valor umbral de 20000 píxeles, ya que cada píxel mide 5x5 metros, con lo que:

$$\frac{mínima\ area\ vertiente}{tamaño\ píxel} = \frac{500000\ m^2}{5m \times 5m} = 20000\ píxeles$$

De esta manera, puntos con una acumulación igual o mayor a 20000 píxeles aparecerán pintados como río. El resto de puntos que no cumplan esta condición aparecerán en blanco.

Procediendo de esta manera se han generado diversas opciones para poder apreciar cuál de ellas es la más apropiada para proseguir con el análisis.

En la Figura E se puede ver cómo, a medida que el umbral mínimo de acumulación disminuye, la red de drenaje se vuelve cada vez más densificada.

A modo de comprobación de la red generada, se ha comparado con la que aparece en los mapas topográficos de 1:5000 del ICGC. Figura F muestra esta comparación. A pesar de que la red del ICGC es más densa, la similitud entre ambas pone de manifiesto la exactitud de los resultados obtenidos mediante ArcGIS.

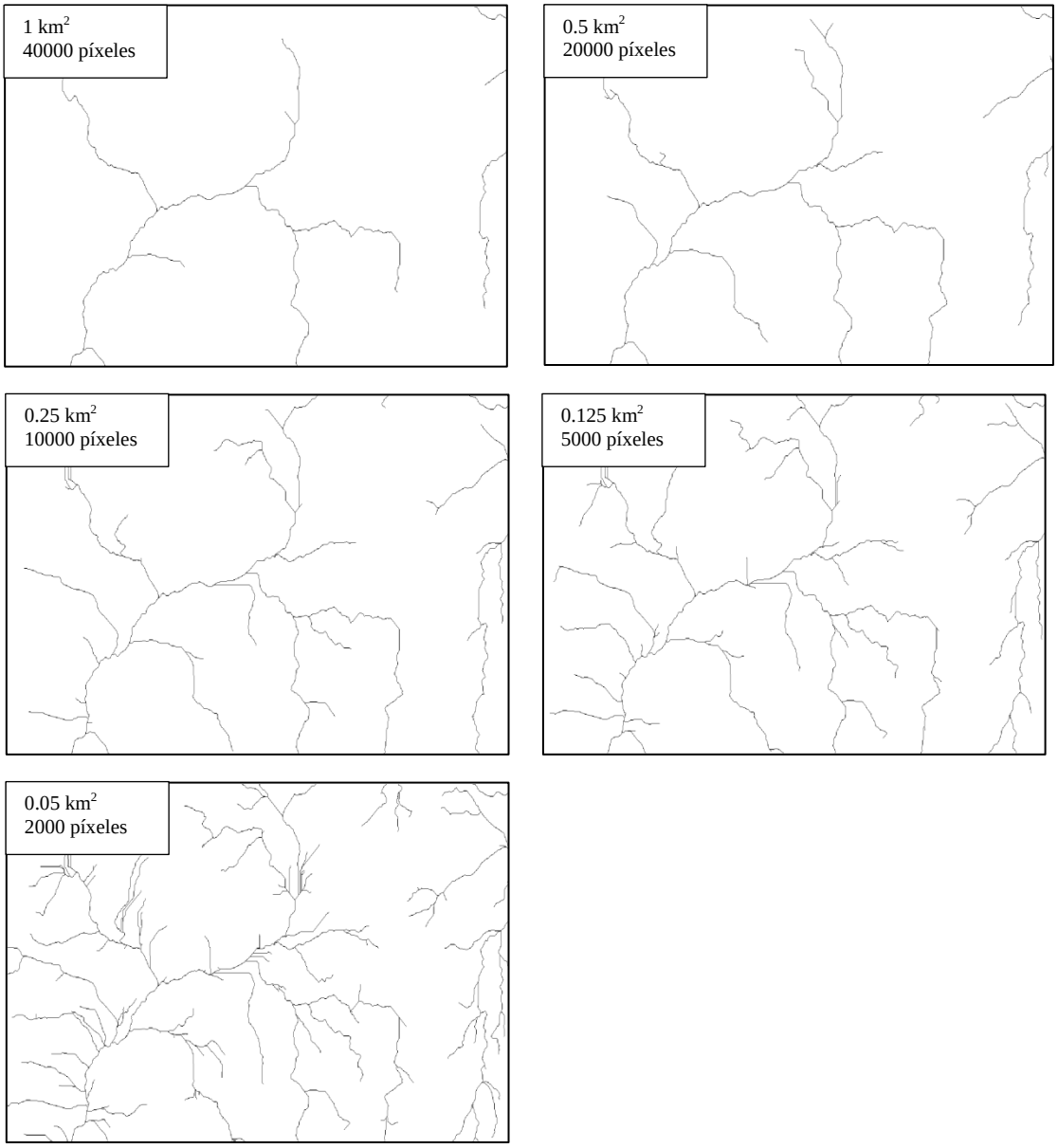

Figura E: Distintas redes de drenaje generadas según distintos valores umbral. Se puede ver cómo, a medida que el umbral de mínima acumulación disminuye, la red de drenaje se va haciendo cada vez más densa.

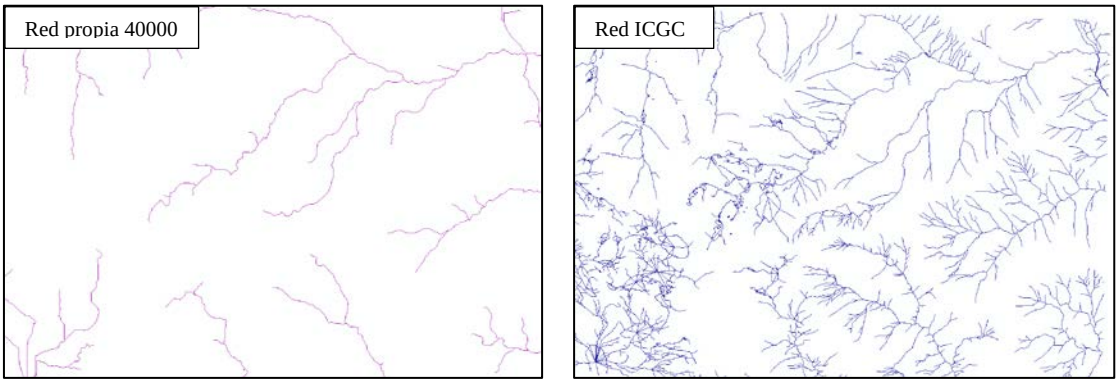

Figura F: Comparación entre la red generada mediante un valor de mínima acumulación de 40000 píxeles (izquierda) y la red de drenaje descargada del ICGC (base topográfica 1:25000 (derecha). Se aprecia que, a pesar que la del ICGC es más densa, los ramales principales coinciden. Se toma la generada a 40000 para simplificar las cuencas de drenaje que se extraerán a continuación.

Viendo la gran densidad de ramales que comporta disminuir demasiado el valor umbral, se opta por simplificar el problema y escoger una red que comporte cuencas con un tamaño mínimo de 1km^2 (es decir, un valor umbral de 40000 píxeles).

Para obtener esta red de drenaje en un nuevo mapa raster simplemente se emplea la función condicional de ArcGIS (herramienta **con** de la extensión Spatial Analyst). Dicha función dará valor 1 a todos los píxeles que cumplan una cierta condición (en este caso, la condición es que tengan un valor de acumulación de flujo igual o superior a 40000). Al resto de píxeles se les asignará en el nuevo mapa un valor nulo (NoData).

Hecho esto, se aplica la herramienta **stream link** sobre el mapa binario anterior, obteniendo así un mapa de la red de drenaje en formato raster.

El siguiente paso consiste en dar orden a la red de drenaje. Con orden se entiende una jerarquía, que vendrá dada por la relación entre el ramal estudiado con el resto de la red. El ramal situado más aguas arriba de una cuenca se le asigna orden 1. Cuando este ramal topa con otro de orden 1, el resultante de la unión pasa a tener orden 2. Si un ramal de cierto orden topa con uno de orden superior, el ramal resultante adquirirá el orden del superior. Dicho sistema de ordenación se llama Strahler. Para mayor aclaración, la ordenación de los ramales se especifica en la Figura G.

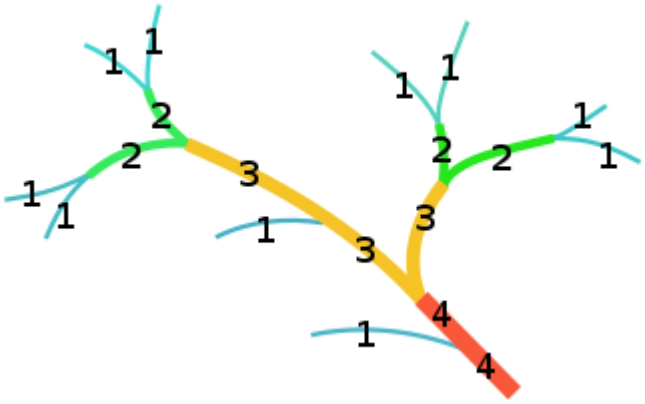

Figura G: Metodología que sigue ArcGIS para asignar un orden los diferentes ramales de una red de drenaje según el sistema Strahler (Wikipedia).

La herramienta **stream order** permite asignar el orden a la red de drenaje de manera automática.

A continuación, se pasa la red de drenaje obtenida y ya ordenada a formato vectorial (líneas). Para ello, se aplica la herramienta **stream to feature**, que efectuará esta conversión. Con la red pasada a formato vectorial ya se pueden obtener los puntos de intersección (o pour points) entre ramales del drenaje. Estos puntos se obtienen en ArcGIS mediante la herramienta **features vertices to points**, pudiendo ser los puntos iniciales, finales o a mitad de cada tramo de la red de drenaje. En este caso interesan los puntos finales de cada tramo para obtener las cuencas en ArcGIS.

Hecho esto, queda utilizar la herramienta **watershed** de ArcGIS. Utilizando tanto el raster de dirección de flujo como el shapefile de pour points, se generará un raster con las diferentes cuencas de drenaje de la zona de estudio. Si se quieren obtener estas cuencas en formato vectorial, se utiliza la herramienta **raster to polygon**.

La Figura H muestra los polígonos de las cuencas de drenaje, en formato vectorial, obtenidas para la zona estudiada siguiendo todo el proceso mostrado hasta ahora.

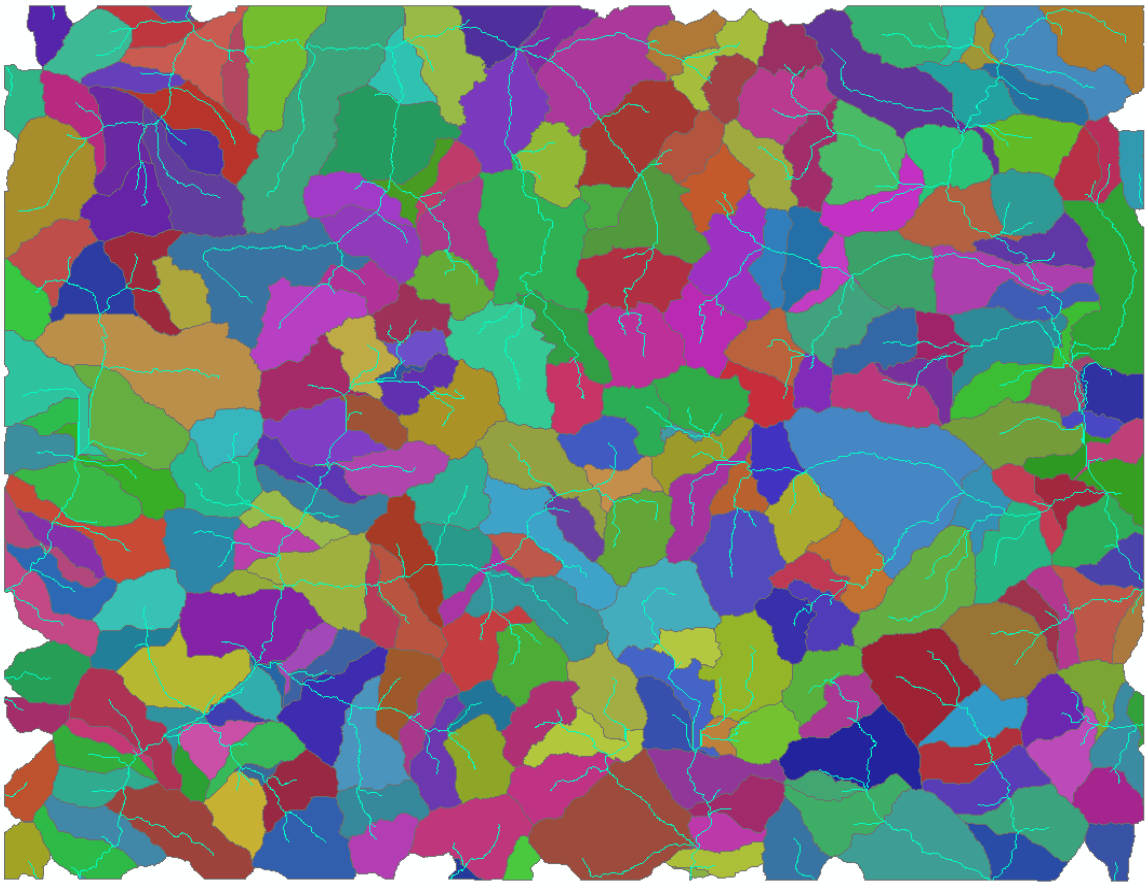

Figura H: Cuencas de drenaje generadas con ArcGIS a partir del MDE relleno. Superpuesto a las cuencas se puede ver la red de drenaje.

Pasando las cuencas (watershed) a vectorial se ha podido determinar por análisis espacial cuántos puntos de inicio de corrientes de derrubios contenía cada cuenca. Utilizando la herramienta *Join data from another layer base on spatial location* sobre las cuencas se obtiene un nuevo shapefile de las mismas cuencas pero con una tabla de atributos (VAT) con el recuento de puntos iniciales que hay en cada una y otra información estadística que se quiera especificar (como medias, máximos, mínimos…).

Antes de pasar al siguiente paso, se pasa a “limpiar” el mapa vectorial de las cuencas. Es decir, eliminar las cuencas “espúrias” que han aparecido al cortar el dominio, pegadas en los contornos de la zona de estudio y reconocibles por tener áreas de drenaje inferiores a 1 km^2 (muchas de ellas son del tamaño de un píxel, ya que provienen dela

capa de cuencas en formato ráster). Los pasos para realizar esta “limpieza” del shapefile han sido:

- Se crea una nueva columna de valores numéricos llamada “área” en la VAT del mapa de polígonos shapefile
- Mediante la herramienta “calculate geometry” de ArcGIS se calcula el área de cada polígono en metros cuadrados
- Se hace una selección por el atributo área de todas las entidades poligonales que tengan valores menores a un kilómetro cuadrado
- Se borran dichas entidades seleccionadas (para ello hay que activar la función editar).

Una vez se tiene el shp de cuencas limpio de “espúrios”, se pasa a la extracción de las cuencas de primer orden a un nuevo mapa.

A continuación lo que se pretende es hallar una manera de extraer dichas cuencas mediante un sistema automático y fiable, es decir, que extraiga todas la cuencas de primer orden y no requiera una comprobación y borrado posterior de cuencas de órdenes superiores.

La metodología hallada para realizar esta tarea se muestra en el diagrama de flujo de la Figura I.

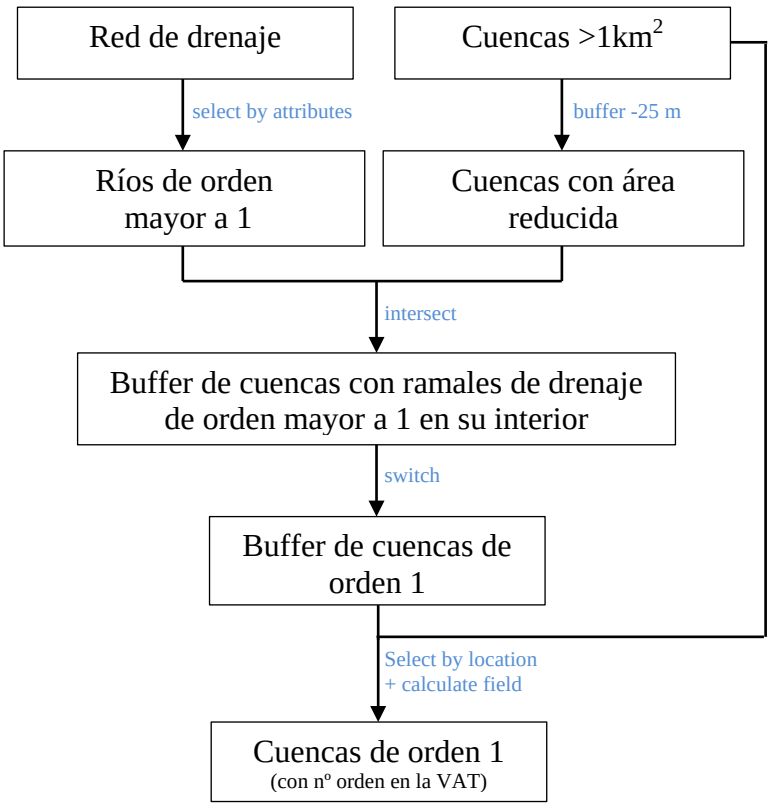

Figura I: Diagrama de flujo en el que se esquematiza el proceso de obtención de las cuencas de primer orden (en azul se indican los procesos de análisis espacial realizados en ArcGIS).

El buffer de -25 metros de las cuencas es una manera de evitar errores que se producen en los lugares de unión entre ramales de la red de drenaje. En efecto, en la mayoría de cuencas, el límite de éstas no pasa por encima del pour point, sino un poco por debajo, con lo que queda un fragmento de ramal de segundo orden dentro de la cuenca de primer orden. Este error se da porque las cuencas provienen de un ráster, con píxeles de 5x5 metros, con lo que al pasarlo a polígonos, el contorno de la cuenca tiene un error de diez metros al situarse. La herramienta de ArcGIS "snap" permite arreglar este error, pero para evitar estas zonas se prefiere trabajar con buffers de las cuencas, reduciéndolas 25 metros (un buffer de reducción se crea colocando en ArcGIS el signo negativo a la distancia) de manera temporal, tal como se muestra en el diagrama de flujo.

Una vez se intersectan espacialmente los buffers con la red de drenaje, se pueden seleccionar los buffers de cuencas de orden mayor a 1. Revirtiendo la selección (swich), se obtienen los buffers de las cuencas de orden 1. Finalmente se intersecta la capa de cuencas con la de buffers seleccionados previamente (orden 1), de manera que se obtienen por intersección espacial las cuencas que tienen en su interior dichos buffers.

Una vez se tienen las cuencas de orden 1, se pueden exportar a otro nuevo mapa. O simplemente para visualizarlas en pantalla se les coloca el atributo de orden = 1 en la tabla de atributos y se crea una función QUERY (en las propiedades de la capa de cuencas) que muestre solo las cuencas con el atributo de orden = 1.

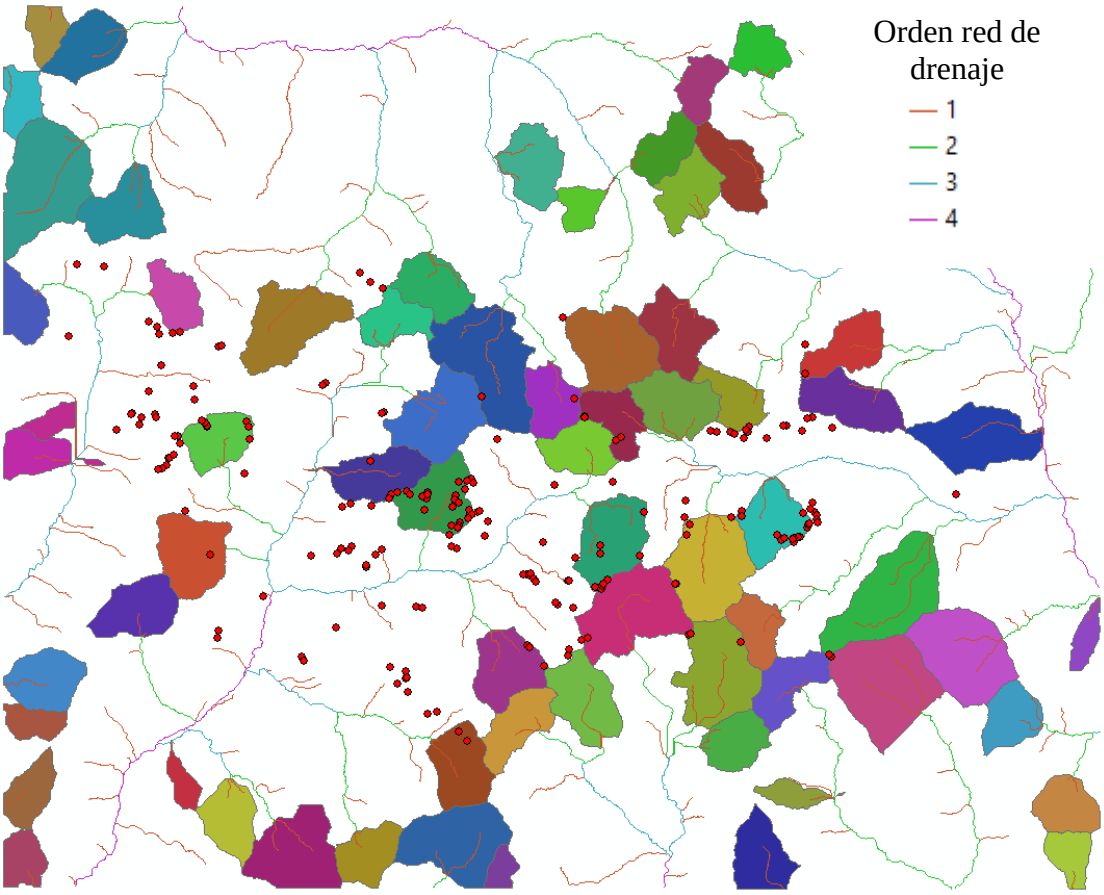

Figura J: Cuencas de primer orden de la zona de estudio obtenida tal como se ha expuesto anteriormente. Además se puede ver superpuesta la red de drenaje (cada color de la red corresponde a un orden diferente) y los puntos de inicio de corrientes de derrubios.

Anejo 3: Generación del mapa de susceptibilidad por píxeles

En el presente anejo se detalla el procedimiento seguido para confeccionar el mapa de susceptibilidad de la zona de estudio por píxeles.

1- Se reclasifica la capa de pendientes *slope* según los intervalos siguientes:

Intervalo de valores inicial (º)	Nuevo valor de reclasificación
0 a 20	1
20 a 30	2
30 a 40	3
40 a 55	4
55 a 90	5

2- Se añade un campo en la tabla de atributos de la capa *cobertura vegetal* que se denomina *reclass*. En dicho campo se establece que:

Categoría	reclass
Cauces naturales	1
Canchales	2
Prados y herbazales	3
Matorrales	3
El resto de coberturas	4

3- Se reclasifica la capa *cobertura vegetal* utilizando la nomenclatura establecida en el paso dos, de manera que queda:

Campo reclass	Reclasificación
1	1
2	2
3	3
4	4

4- Se aplica la función de ArcToolbox **combine** sobre las capas reclasificadas de cobertura vegetal y de pendientes (paso 3 y 1). Es importante retener el orden con el que se ha aplicado dicha función, ya que en el próximo paso se genera un código numérico que mantiene el orden con el que se ha aplicado el combine.

5- Se define un campo nuevo en la tabla de atributos del mapa generado en el paso 4 llamado *codigo_combine* que contendrá un código compuesto por dos números, el primero de los cuales es el valor del campo de *cobertura_reclas* y el segundo es el valor del campo *slope_reclass*.

6- Se define en una hoja Excel el grado de susceptibilidad que corresponde a cada combinación de *codigo_reclass*. Dichos valores de susceptibilidad se han definido con anterioridad en la matriz de susceptibilidad generada. Es importante que el *codigo_reclass* en el Excel esté definido de la misma manera que en la tabla de atributos de la capa combine.

7- Se realiza un **join** entre el mapa generado en el paso 4 con la hoja Excel del paso 6, utilizando como campo común el *codigo_reclass*. De esta manera se tiene ya generado el mapa de susceptibilidad por píxeles de toda la zona de estudio. Utilizando las opciones de simbología, se pinta de manera que se muestren los cuatro grados de susceptibilidad definidos con colores semafóricos.