



**UNIVERSIDAD
COMPLUTENSE
MADRID**

**FACULTAD DE GEOGRAFÍA E HISTORIA
MÁSTER UNIVERSITARIO EN TECNOLOGÍAS DE LA
INFORMACIÓN GEOGRÁFICA**

**TRABAJO FIN DE MÁSTER
CURSO 2020-2021**

**ANÁLISIS DE LA SUSCEPTIBILIDAD DE RIESGO DE
INUNDACIÓN DEL RÍO TAJUÑA A SU PASO POR MORATA
DE TAJUÑA, PERALES DE TAJUÑA Y VALDILECHA.**

MARTA BLANCO GONZÁLEZ

SEPTIEMBRE 2021

TUTORA: MARÍA EUGENIA PÉREZ GONZÁLEZ. Departamento de Geografía.
Facultad de Geografía e Historia. Universidad Complutense de Madrid (UCM).

RESUMEN:

El presente estudio se basa en el análisis de la susceptibilidad del riesgo de inundación del río Tajuña en los municipios de Morata de Tajuña, Perales de Tajuña y Valdilecha (Comunidad de Madrid) a través de las Tecnologías de la Información Geográfica (TIG), y consta de tres fases diferenciadas: modelización hidráulica y representación de resultados, cálculo de la superficie afectada y clasificación de la misma según el Corine Land Cover y análisis de imágenes satélite de los ámbitos estudiados como refuerzo a los resultados obtenidos en las fases anteriores.

Los resultados muestran no solo la superficie afectada en cada municipio y su clasificación, sino también la localización de edificaciones externas a los usos urbanos, que permite valorar como poco adecuada la ordenación territorial de los tres municipios al no tener en cuenta lo establecido en las últimas modificaciones del Reglamento de Dominio Público Hidráulico relacionadas con la prevención de riesgos de inundación.

Palabras clave: *susceptibilidad, riesgo de inundación, río Tajuña, Morata de Tajuña, Perales de Tajuña, Valdilecha, Tecnologías de la Información Geográfica (TIG).*

ABSTRACT:

This study is based on the analysis of the susceptibility of the flood risk of the Tajuña river in the municipalities of Morata de Tajuña, Perales de Tajuña and Valdilecha (Community of Madrid) through the Geographical Information Technologies (GIT) and consists of three differentiated phases: hydraulic modeling and representation of results, calculation of the affected area and its classification according to the Corine Land Cover and analysis of satellite images of the areas studied to reinforce the results obtained in the previous phases.

The results show not only the affected area in each municipality and its classification, but also the location of buildings outside urban uses, which allows us to assess the territorial planning of the three municipalities as inadequate by not considering what is established in the last modifications of the Hydraulic Public Domain Regulation related to the prevention of flood risks.

Keywords: *susceptibility, flood risk, Tajuña river, Morata de Tajuña, Perales de Tajuña, Valdilecha, Geographic Information Technologies (GIT).*

ÍNDICE DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN, NORMATIVA Y JUSTIFICACIÓN.....	5
2.	OBJETIVOS	7
3.	ÁREA DE ESTUDIO.....	7
3.1.	MEDIO FÍSICO	7
3.1.1.	LOCALIZACIÓN Y LÍMITES DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	7
3.1.2.	RELIEVE Y GEOLOGÍA	8
3.1.3.	HIDROLOGÍA.....	9
3.1.4.	CLIMATOLOGÍA	13
3.1.5.	USOS DEL SUELO Y VEGETACIÓN	14
3.2.	POBLACIÓN	14
4.	MATERIALES, METODOLOGÍA Y FUENTES	17
4.1.	MATERIALES.....	18
4.2.	METODOLOGÍA	21
4.2.1.	MODELIZACIÓN HIDRÁULICA CON HEC-RAS Y ArcGIS	21
4.2.2.	AFECCIÓN DE LOS USOS DE SUELO PRÓXIMOS A LA INUNDACIÓN. 31	
5.	RESULTADOS.....	34
5.1.	RUGOSIDAD DEL TERRENO EN LOS ÁMBITOS SELECCIONADOS	35
5.2.	RESULTADOS DE LA MODELIZACIÓN HIDRÁULICA	36
5.3.	ANÁLISIS VISUAL Y CÁLCULO DEL NDVI EN IMÁGENES SATÉLITE.....	46
6.	REFLEXIONES FINALES Y CONCLUSIONES.	52
7.	REFERENCIAS.....	54
	ANEXOS	56

1. INTRODUCCIÓN, NORMATIVA Y JUSTIFICACIÓN

El riesgo de inundación forma parte del conjunto provocado por fenómenos naturales, también denominados riesgos geológicos (Servicio Geológico Mexicano, 2017), que afectan gravemente a numerosos países. Se sitúa dentro de aquellos derivados de la dinámica de procesos geológicos externos, junto con los movimientos gravitacionales, y es considerado como uno de los riesgos con más capacidad destructiva (Ayala_Carcedo & Cantos, 2002), pudiendo provocar numerosos daños tanto económicos como en vidas humanas.

Concretamente en España, el asociado a las inundaciones por avenidas de los ríos es el más significativo de todos los riesgos naturales que afectan al país, asumiendo una media de cinco inundaciones importantes al año (Casafont, 2011). Entre las inundaciones más significativas a lo largo de la historia del país destaca la catástrofe ocurrida en septiembre de 1962 en la Comarca del Vallés en Cataluña, con 973 víctimas mortales (Casafont, 2011), junto con la avenida ocurrida en 1973 en Zúgena (Almería) y Albuñol (Granada), con 250 víctimas mortales y numerosas pérdidas económicas (García, 2018). Más adelante en el tiempo, concretamente en 1996, destaca la riada en el camping Las Nieves (Biescas), que dejó a su paso 87 víctimas mortales (García, 2018).

Con el objetivo de mitigar riesgos y catástrofes en España, en 1986 se aprobó la Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas, en la que se dictamina la necesidad de desarrollar un Real Decreto que amplíe las materias de los títulos referidos a la definición del Dominio Público Hidráulico y a su correcta utilización y protección.

Desde su aprobación hasta la fecha, el Reglamento del Dominio Público Hidráulico (DPH) ha sufrido numerosas modificaciones con el objetivo de mejorar la gestión y prevención de riesgos por inundación, todas ellas a través de la redacción de Reales Decretos o Planes de actuación en las que se especifican dichos cambios.

Entre estas modificaciones destaca en materia de inundaciones y prevención de riesgos la aprobación del Real Decreto 9/2008, de 11 de enero, amparada en la necesidad de optimizar la gestión de riesgo ante inundaciones, modificando la normativa sobre esta materia y añadiendo al reglamento un capítulo relativo a la seguridad de presas, embalses y balsas. Esta modificación surge como respuesta ante los nuevos criterios sobre la protección del Dominio Público Hidráulico que establece en el año 2000 la Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo y que quedan recogidas en el artículo 92 del texto refundido de la ley de aguas, aprobado por el Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio. Además, se modifica para añadir los criterios que se deben tener en cuenta según la Directiva 2007/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2007, para una correcta gestión de los riesgos de inundación.

Esta modificación supone la definición del cauce y la regulación de la zona de servidumbre, de policía y las zonas inundables del DPH.

Tres años más tarde se redacta la segunda modificación a través del Real Decreto 903/2010, de 9 de julio, de evaluación y gestión de riesgos de inundación, que determina una serie de obligaciones a la hora de gestionar los riesgos de inundación, centradas en la evaluación preliminar a partir de cartografías de peligrosidad y riesgo y en la correcta coordinación de las administraciones competentes en materia de participación pública y redacción de planes de gestión de riesgos. Además, se establece la necesidad de realizar una ordenación territorial que incluya limitaciones a los usos del suelo en aquellas zonas clasificadas como inundables en sus diferentes escenarios de peligrosidad, además de que los mismos contemplen la consideración de establecer estos territorios como no urbanizables en caso de ser necesario o para establecer criterios constructivos en el caso de no definirlos como tal.

Así mismo, La Directiva 2007/60/CE exige la generación a nivel comunitario de cartografías de peligrosidad y riesgo de inundación (En escenarios con periodo de retorno de 10, 100 y 500 años), como método de apoyo para la gestión de riesgos. Es por esta razón por la que se crea el Sistema Nacional de cartografía de Zonas Inundables. Las cartografías se realizarán en cada demarcación hidrográfica para determinar en qué zonas del territorio existe un riesgo potencial de inundación significativo o en aquellas zonas en las que este riesgo sea probable.

La tercera y última reforma del Reglamento del Dominio Público Hidráulico se realiza en 2016, a través del Real Decreto 638/2016, de 9 de diciembre. Una de las modificaciones significativas en este Reglamento fue la definición de zona de flujo preferente, en la que solo se podía autorizar aquellas actividades no vulnerables frente avenidas y que no provocasen la reducción de la capacidad de desagüe de la vía.

Con el objetivo de cumplir con la normativa vigente, la Confederación hidrográfica del Tajo realizó las últimas actualizaciones de los mapas de peligrosidad y riesgo de inundación en diciembre de 2019, definiendo 221 tramos incluidos como áreas de riesgo potencial significativo de inundación (ARPSIs) (Confederación Hidrográfica del Tajo (O.A), 2020). Esta normativa exige la actualización de estos mapas cada 6 años a partir de 2019, por lo que en 2025 deberán estar actualizadas todas estas zonas.

Con el presente estudio se pretende participar en la actualización de los mapas de riesgo de inundación de tres de los municipios de la Comunidad de Madrid que presentan ARPSIs: Morata de Tajuña, Perales de Tajuña y Valdilecha.

2. OBJETIVOS

Con motivo de la actualización de las zonas con riesgo de inundación definidas por la Confederación Hidrológica del Tajo, se quiere desarrollar una serie de cartografías de riesgo de inundación como ejemplo de actualización a las ya desarrolladas en 2019 sobre los municipios de Morata de Tajuña, Perales de Tajuña y Valdilecha, obteniendo la ventaja de disponer de primera mano de las capas resultantes para el seguimiento de la evolución urbana en áreas de riesgo de inundación. Estos resultados cartográficos no solo mostrarán la superficie afectada por riesgo de inundación con un periodo de retorno de 10, 100 y 500 años, sino también el tipo de uso de suelo afectado y, en caso de existir, la localización de las edificaciones aisladas con posibilidad a ser afectadas en caso de inundación. Además, y a partir de las cartografías de riesgo, se pretende realizar un cálculo sobre la superficie total susceptible de inundación según el tipo de uso y la población estimada que podría ser afectada en ese caso.

Por último, se pretende realizar tanto un análisis visual como un cálculo del índice de vegetación NDVI para cada ámbito a través de imágenes satélite Sentinel 2A y Spot 5.

3. ÁREA DE ESTUDIO

El presente estudio se centra en los municipios de Perales de Tajuña, Morata de Tajuña y Valdilecha, localizados en la subcuenca del río Tajuña, dentro de los límites administrativos de la Comunidad de Madrid. De esta forma, se procede a desarrollar un estudio previo de los componentes físicos y socioeconómicos de dicha cuenca y municipios, con el objetivo de presentar el contexto físico y demográfico de estas localizaciones y entender mejor los resultados obtenidos.

3.1. MEDIO FÍSICO

3.1.1. LOCALIZACIÓN Y LÍMITES DEL ÁREA DE ESTUDIO.

La subcuenca del río Tajuña forma parte de la cuenca o fosa del Tajo, localizada en la submeseta meridional de la Península Ibérica (Figura 1) y cuya superficie, de unos 88.700 km², se reparte en un 69% en territorio español y en un 31% en territorio portugués (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2021).

La subcuenca del río Tajuña se localiza en la vertiente sureste de la Comunidad de Madrid, aunque parte de la misma forma parte de la Comunidad Autónoma de Castilla la Mancha, concretamente de la provincia de Guadalajara en su vertiente suroeste. Dentro de los límites de la Comunidad Autónoma de Madrid (Figura 1), la cuenca del Tajuña se encuadra en las hojas 560, 561, 583, 584 y 606 del Mapa Topográfico Nacional (1:50.000) (Instituto Geográfico Nacional , 2021).

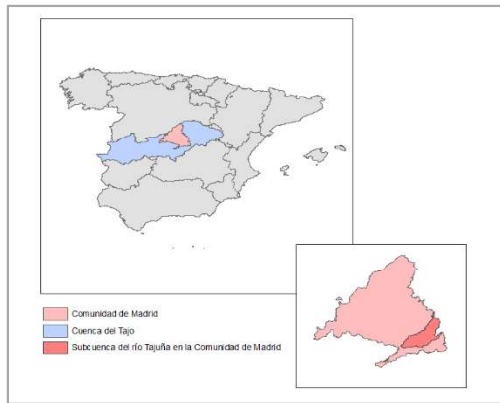


Figura 1. Localización de la cuenca del río Tajo y subcuenca del río Tajuña. Fuente: Datos IGN. Elaboración propia.

Los municipios de Morata de Tajuña, Perales de Tajuña y Valdilecha se encuentran en la vertiente central de la cuenca del Tajuña, con coordenadas de latitud $40^{\circ} 13' 39''$ N y longitud $3^{\circ} 26' 13''$ W en el caso del primero, latitud $40^{\circ} 14' 4''$ N y longitud $3^{\circ} 21' 8''$ W en el caso del segundo, y $40^{\circ} 17' 44''$ N, $3^{\circ} 18' 14''$ W en el caso del tercero, dentro de los límites autonómicos de la Comunidad de Madrid.

3.1.2. RELIEVE Y GEOLOGÍA

La cuenca del río Tajo, orientada de este a oeste, está delimitada por el norte por alineaciones montañosas como la Sierra de Gredos, Sierra de Guadarrama y por el sur por los Montes de Toledo, obteniendo una configuración o forma alargada. Las escarpadas pendientes de la vertiente norte y noreste de la cuenca contrastan con los terrenos llanos o poco escarpados de la vertiente suroeste de la misma.

La Comunidad de Madrid se encuadra en su totalidad dentro de la cuenca hidrográfica del Tajo, y en ella se distinguen dos unidades de relieve muy diferenciadas: por un lado, la Sierra Norte, que constituye un tramo del Sistema Central y que está formada, a su vez, por la sierra de Somosierra, Guadarrama y zonas cercanas a Gredos (Martínez, y otros, 2012); y, por otro lado, la cuenca formada por páramos, vegas y campiñas (Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio de la Comunidad de Madrid, 2016).

La subcuenca hidrográfica del Tajuña se localiza en la fosa del Tajo, de origen terciario (Benito López, 2017), entre los municipios de Aranjuez (suroeste de la subcuenca) y Los Santos de la Humosa (noreste de la subcuenca). El valle de esta cuenca se encuentra situado en la vertiente sureste de la región natural de La Alcarria, territorio calcáreo o yesífero, raso y con una altitud máxima de 860 m.s.n.m en el municipio de Ambite al norte del Valle y mínima de 535 m.s.n.m en el municipio de Morara de Tajuña, colindante al cauce del río (Ayuntamiento de Madrid, 2006). La morfología de esta región se caracteriza por la presencia de tres componentes: los páramos, las cuestas y las vegas. Estas últimas cuentan con el río Tajuña como elemento estructural (Ayuntamiento de Ambite, 2021). De esta forma, la fisiografía de esta cuenca es ondulada, formada por llanuras aluviales cerca del cauce del Tajuña, rodeadas por páramos y alcarrias, con terrenos intermedios de campiñas de sustitución del páramo, todas ellas formando parte de la unidad de altas superficies de la depresión del Tajo.

En la mayor parte de este tramo de la cuenca, los valores de pendiente (Figura 3) son bajos, entre el 0% y el 13 % (es decir, terrenos llanos, suavemente inclinados o inclinados), aunque colindantes a la vega del río pueden llegar a alcanzar valores de entre el 13% y el 25 % de inclinación (es decir, terrenos moderadamente escarpados) (FAO, 2009). Esto se debe a la formación por parte del cauce del río de valles estrechos entre los páramos, delimitados por laderas con pendientes pronunciadas.

Respecto a la composición litológica de la subcuenca (Figura 3), se encuentran cuatro tipos principales de rocas: calizas lacustres y serie blanca (sepiolita y sílex) en las laderas a una altitud de entre 650 m.s.n.m y 860 m.s.n.m, yesos en los páramos localizados en zonas de entre 600 m.s.n.m y 650 m.s.n.m, y terrazas y depósitos aluviales en los valles y arroyos a una altitud de entre 535 m.s.n.m y 600 m.s.n.m (Datos abiertos de la Comunidad de Madrid, 2021). Tanto las calizas como los yesos son de origen Terciario (Miocenos) y las terrazas y depósitos aluviales de origen Cuaternario (Aluvial/Diluvial).

3.1.3. HIDROLOGÍA

El río Tajo discurre por el límite sur de la Comunidad de Madrid (Figura 2), generando una red fluvial desde su límite hasta la sierra en la que se desarrollan el río Jarama, Guadarrama y Alberche como sus afluentes principales (Consejería de Medio Ambiente de la Comunidad de Madrid, 1999).

La cuenca del río Tajuña se localiza en las Comunidades Autónomas de Madrid y Castilla la Mancha, sobre la unidad hidrogeológica de la Alcarria, masa de agua subterránea que cuenta con un acuífero carbonatado del periodo Terciario (Consejería de Medio Ambiente, Administración Local y Ordenación del Territorio, 2020).

El río Tajuña nace próximo a la localidad de Clares (Figura 2), extremo nororiental de Guadalajara, como un pequeño manantial (Comunidad de Madrid, 2021). En el límite de la Comunidad de Madrid recorre unos 35 km (Benito López, 2017) y, discuriendo en dirección sureste-suroeste y paralelo al río Henares, desemboca en el Jarama, cerca del municipio de Titulcia. El Tajuña en toda su extensión tiene unos 254 kilómetros de longitud y un caudal medio de 1.87 m³/s (CEDEX, 2018). Posee un cauce estrecho y plano que va ensanchando a medida que discurre hacia su desembocadura, alcanzando su máximo ensanchamiento, llegando a valores de mil metros, en el municipio de Morata de Tajuña (Medina, 2018), poco antes de su desembocadura.

Los arroyos y manantiales que forman parte de los afluentes del río Tajuña no suponen una diferencia de caudal significativo respecto al cauce principal, aunque sí que cumplen funciones de modelaje del valle y sirven para aprovechamiento agrícola como fuente de regadío (López, Estudio territorial en el Valle del Tajuña (Madrid): una aproximación arqueológica, 2016). Como afluentes principales pueden destacarse el río Ungría, Arroyo de la Vega, Arroyo de la Veguilla, Arroyo Valdecañas, Río San Andrés y Arroyo Fuentelviejo, Arroyo del Sagral, Arroyo de la Sierra, Arroyo de la Espinosa, Arroyo de Matacuera, Arroyo de Pajares, Arroyo del Berral, Río Peñón, y Arroyo de Hontaba (Comunidad de Madrid, 2021).

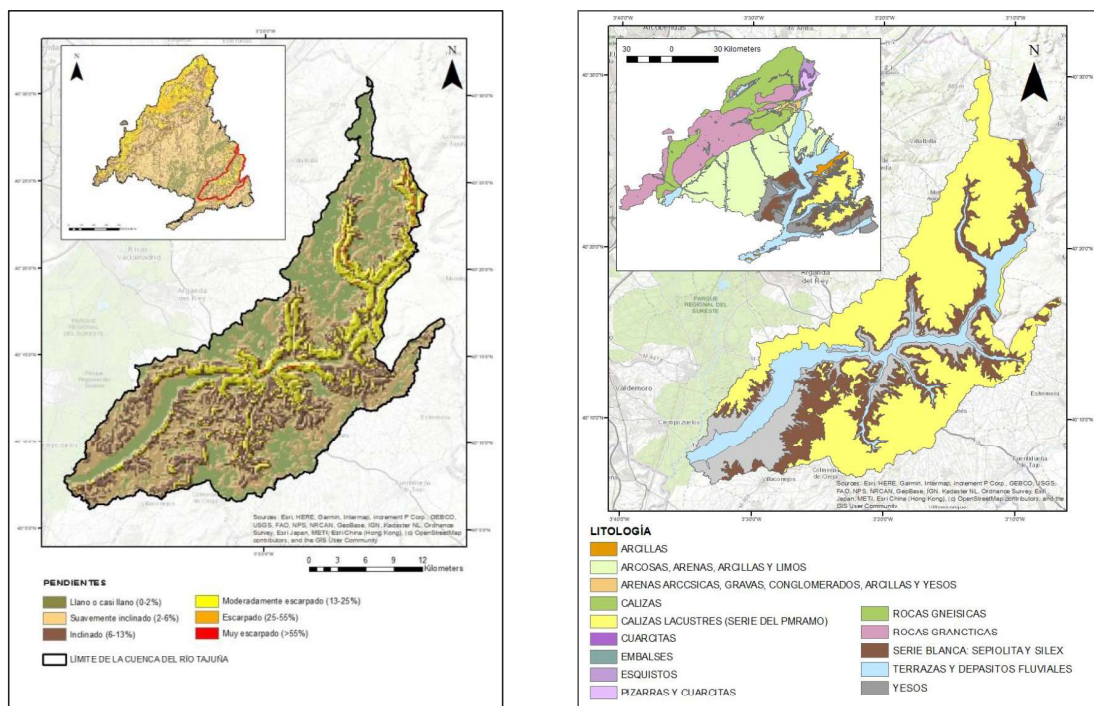


Figura 3. Pendientes y litología en la Comunidad de Madrid y ampliación a la cuenca del río Tajuña. Fuente: software ArcMap, datos del IGN. Elaboración propia

3.1.4. CLIMATOLOGÍA

La cuenca del Tajo en la Comunidad de Madrid se localiza en un área con un clima mediterráneo de matiz continental. Este clima está marcado por una distribución estacional de la temperatura y las precipitaciones, dando lugar a veranos secos y calurosos frente a inviernos fríos, pasando por temperaturas moderadas y precipitaciones elevadas en otoño y primavera (Valladares, 2007).

Concretamente en el Valle del Tajuña, teniendo en cuenta los datos recopilados hasta 1992 (Figura 4) en las dos únicas estaciones meteorológicas que se encuentran localizadas en este valle: Tielmes y Carabaña (desde entonces cerradas y sin datos que ofrecer), la temperatura media anual varía entre los 12 °C a los 16 °C, siendo su temperatura en el mes más frío de 4 °C y su temperatura máxima en el mes más cálido de 26 °C (la temperatura varía en el valle según la altitud, siendo más alta en aquellas zonas de altitud más baja, que corresponden con las zonas cercanas al cauce principal, y más bajas en aquellas zonas de altitud más alta, que corresponden con las laderas y páramos de umbría).

La precipitación media anual es de 250 a 600 mm, teniendo una duración media de 3 a 6 meses en el periodo seco y un déficit anual de entre 250 y 550 mm. El porcentaje de precipitación más alto se da en los meses de invierno, con valores de 31%, seguido de los meses de primavera y otoño, en los que el porcentaje es un poco menor, siendo del 29% (Benito López, 2017).

VARIABLE CLIMÁTICA	VALOR MEDIO
Temperatura media anual	12 a 16 °C
Temperatura media mes más frío	4 a 6 °C
Temperatura media mes más cálido	22 a 26 °C
Duración media del periodo de heladas	6 a 7 meses
Precipitación media anual	250 a 600 mm.
Déficit medio anual	250 a 550 mm.
Duración media del periodo seco	3 a 6 meses
Precipitación de invierno	31%
Precipitación de primavera	29%
Precipitación de otoño	29%

Figura 4. Valores medios generales de las variables climáticas en el entorno del Valle del Tajuña. Fuente: Benito López, 2017.

3.1.5. USOS DEL SUELO Y VEGETACIÓN

Según la clasificación Corine Land Cover (Figura 7), en la cuenca del Tajuña predominan los usos de suelo dedicados a labores agrícolas de secano, es decir, aquellas en la que no se contribuye a la irrigación de los campos, sino que se mantienen con agua proveniente de las precipitaciones. Este tipo de cultivos ocupan unas 74.300 hectáreas (aproximadamente el 52% de la cobertura total de la cuenca). Seguido a este tipo de uso, se encuentra la superficie dedicada al cultivo de Olivares, ocupando unas 18.487 ha (aproximadamente el 7.7% de la cobertura total). Además, también destaca la presencia de áreas con vegetación frondosa, con 10.960 ha ocupadas, y áreas con vegetación esclerófila, con 11.308 hectáreas (ocupando un 7.7% y un 7.9 % del terreno total, consecutivamente).

Tanto la vegetación esclerófila como la vegetación frondosa invaden zonas con pendientes inclinadas o moderadamente escarpadas, estableciéndose, de esta forma, en las zonas de laderas pronunciadas cercanas al cauce del Tajuña. Por su parte, las zonas agrícolas de labor de secano se encuentran en los terrenos llanos o casi llanos de pendientes por debajo del 2%, localizados en la zona norte y suroeste de la cuenca, lejos del cauce principal. Los Olivares se encuentran en zonas caracterizadas por tener una pendiente suavemente inclinada o inclinada, y, aunque en algunas zonas sí que se pueden encontrar próximas al cauce principal, suelen encontrarse en áreas alejadas del mismo.

3.2. POBLACIÓN

En la Comunidad de Madrid la población ha aumentado de forma continuada durante el último siglo, destacando un crecimiento más rápido durante los años 50 y 60 debido a la inmigración de población de las diferentes provincias españolas y a principios del siglo XXI debido a la inmigración de población de origen extranjero (Naredo & Frías, 2015). En los municipios de la cuenca del Tajuña, la evolución demográfica ha sido lenta desde la Edad Moderna y, aunque en la primera década del siglo XXI este crecimiento fuese más rápido (Figura X), en la actualidad el crecimiento sigue de nuevo un ritmo lento o casi estancado (Benito López, 2017). Esta ralentización se debe a un freno drástico en la entrada de extranjeros a la comunidad desde 2008 unido al éxodo rural hacia la capital de la población joven en busca de trabajo. Morata de Tajuña, Perales de Tajuña y Valdilecha no son una excepción y siguen un ritmo de crecimiento demográfico creciente pero lento, tal y como se ha comentado anteriormente.

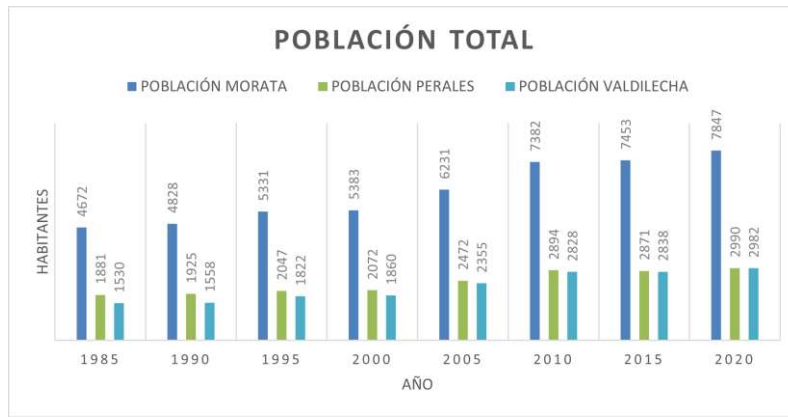


Figura 5. Desarrollo de la población total en los municipios de Morata de Tajuña, Perales de Tajuña y Valdilecha de 1985 a 2020. Fuente: Instituto Nacional de estadística, 2021. Elaboración propia.

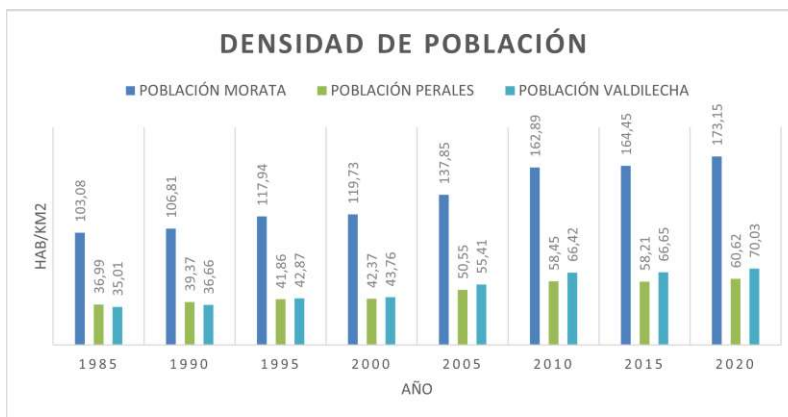


Figura 6. Desarrollo de la densidad de población en los municipios de Morata de Tajuña, Perales de Tajuña y Valdilecha de 1985 a 2020. Fuente: DESVAN, Banco de Datos Estructurales, 2021. Elaboración propia.

El aumento de población en Morata de Tajuña respecto a Perales de Tajuña y Valdilecha ha sido más notable, aunque sigue siendo escaso en comparación con la capital. Desde 1986 hasta 2020, la población total en Morata de Tajuña creció de 4672 hab a 7847, variando así su densidad de 103.08 hab por kilómetro cuadrado en 1986 a 173.15 hab/km² en 2020. En Perales de Tajuña el aumento únicamente fue de 1881 hab a 2990 en este periodo de tiempo, haciendo variar su densidad de población de 36.99 hab/km² a 60.62 hab/km². El desarrollo en Valdilecha, aunque bastante menor que en Morata, fue algo superior que en el caso de Perales, variando de 1530 hab en 1986 a 2982 en 2020, y provocando un aumento de la densidad de población de 35.01 hab/km² a 70.03 hab/km² (Instituto Nacional de Estadística y Banco de datos estructurales, 2021). Tanto en la Figura 5 como en la Figura 6 puede observarse el aumento más rápido de la población en los tres municipios durante la primera década del siglo XXI, seguido del estancamiento hasta el año 2020.

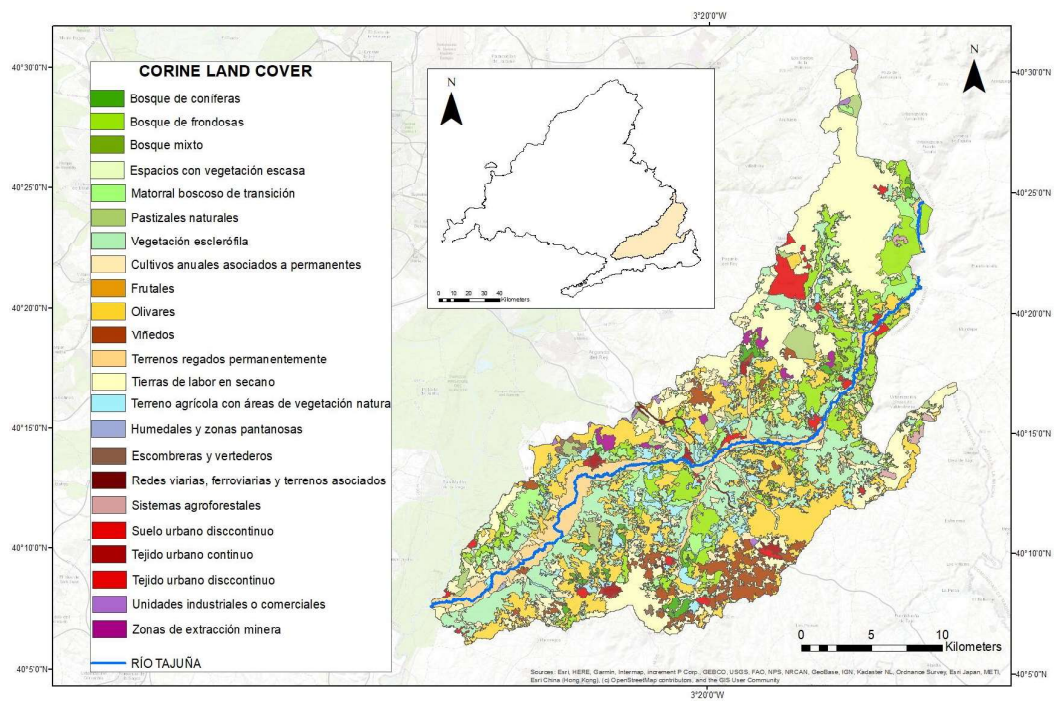


Figura 7. Mapa de usos del suelo en la cuenca del Tajuña y localización de la cuenca en ámbito autonómico. Elaboración propia. Fuente: IGN y CORINE LAND COVER)

4. MATERIALES, METODOLOGÍA Y FUENTES

En este apartado se procederá a presentar tanto los materiales necesarios como la metodología llevada a cabo para el correcto desarrollo de la modelización hidráulica del río Tajuña a su paso por Valdilecha, Morata de Tajuña y Perales de Tajuña, en la Comunidad de Madrid, y del análisis visual y cálculos llevados a cabo sobre las imágenes satélite Sentinel 2A y Spot5. A su vez, se describirán los diferentes softwares utilizados para dichas tareas, destacando sus principales utilidades y herramientas para el desarrollo del proceso.

La metodología para la modelización hidráulica descrita a continuación se basa en el procedimiento ya realizado por López Rodríguez y González Saavedra (2017) para la cuenca del río Sagua la Chica, en la provincia de Villa Clara, Cuba; y en el procedimiento desarrollado por Zárate Miranda y Cornejo Tejada (s.f) para el río Paucartambo, en el distrito de Paucartambo, Cusco.

Los softwares utilizados para dichos estudios han sido ArcGIS 10.7.1 (ArcMap y ArcCatalog), HEC-RAS 6.0.0 y ERDAS imagine 2018. Los dos primeros se han utilizado para la obtención de los resultados de la modelización hidráulica del río Tajuña en los tramos antes mencionados, y el tercero para el procesamiento de las imágenes satélite Sentinel y Spot.

Para la modelización hidráulica de cauces, ArcGIS cuenta con la interfaz HEC-GeoRAS, desarrollada de manera conjunta por ESRI y HEC y que cuenta con un conjunto de herramientas y utilidades diseñadas para procesar datos georreferenciados. Con esta interfaz se desarrollará tanto el preprocesamiento como el postprocesamiento de los datos hidráulicos necesarios para la modelización.

De esta forma, la interfaz HEC-GeoRAS cuenta con una pestaña dedicada a cada fase: *Ras-Geometry* (crea los archivos de geometría que serán exportados a HEC-RAS) y *Ras-Mapping* (recoge el archivo exportado de HEC-RAS y representa la lámina de inundación completa de manera mucho más efectiva que en el software de partida). Por su parte, el software HEC-RAS posee dos grupos de herramientas: las de introducción de datos (con las que es posible abrir archivos, guardar proyectos, visualizar geometría, introducir los datos de caudales, definir los periodos de retorno, entre otras utilidades) y las de visualización de resultados (con las que es posible generar una simulación en cada sección de control del régimen fluvial, obtener resultados del perfil longitudinal del río, gráficas y visualización de hidrogramas, entre las principales funcionalidades).

El software ArcMap también será utilizado para generar las salidas gráficas de los resultados obtenidos en el procesamiento hidráulico.

4.1. MATERIALES

CAPA DE INFORMACIÓN	FORMATO	FUENTE
<p style="text-align: center;">IMÁGENES LIDAR SEGUNDA COBERTURA PERALES DE TAJUÑA</p> <p>PNOA_2016_MAD_468_4453_ORT_CLA_RGB PNOA_2016_MAD_468_4454_ORT_CLA_RGB PNOA_2016_MAD_468_4455_ORT_CLA_RGB</p> <p>PNOA_2016_MAD_469_4453_ORT_CLA_RGB PNOA_2016_MAD_469_4454_ORT_CLA_RGB PNOA_2016_MAD_469_4455_ORT_CLA_RGB</p> <p>PNOA_2016_MAD_470_4453_ORT_CLA_RGB PNOA_2016_MAD_470_4454_ORT_CLA_RGB PNOA_2016_MAD_470_4455_ORT_CLA_RGB</p> <p>PNOA_2016_MAD_475_4453_ORT_CLA_RGB PNOA_2016_MAD_475_4454_ORT_CLA_RGB PNOA_2016_MAD_475_4455_ORT_CLA_RGB</p>	LAZ	IGN

**IMÁGENES LIDAR SEGUNDA COBERTURA MORATA DE
TAJUÑA**

PNOA_2016_MAD_461_4451_ORT_CLA_RGB
PNOA_2016_MAD_461_4452_ORT_CLA_RGB
PNOA_2016_MAD_461_4453_ORT_CLA_RGB
PNOA_2016_MAD_461_4454_ORT_CLA_RGB
PNOA_2016_MAD_461_4455_ORT_CLA_RGB
PNOA_2016_MAD_461_4456_ORT_CLA_RGB

PNOA_2016_MAD_462_4451_ORT_CLA_RGB
PNOA_2016_MAD_462_4452_ORT_CLA_RGB
PNOA_2016_MAD_462_4453_ORT_CLA_RGB
PNOA_2016_MAD_462_4454_ORT_CLA_RGB
PNOA_2016_MAD_462_4455_ORT_CLA_RGB
PNOA_2016_MAD_462_4456_ORT_CLA_RGB

PNOA_2016_MAD_463_4451_ORT_CLA_RGB
PNOA_2016_MAD_463_4452_ORT_CLA_RGB
PNOA_2016_MAD_463_4453_ORT_CLA_RGB
PNOA_2016_MAD_463_4454_ORT_CLA_RGB
PNOA_2016_MAD_463_4455_ORT_CLA_RGB
PNOA_2016_MAD_463_4456_ORT_CLA_RGB
PNOA_2016_MAD_463_4457_ORT_CLA_RGB

PNOA_2016_MAD_464_4451_ORT_CLA_RGB
PNOA_2016_MAD_464_4452_ORT_CLA_RGB
PNOA_2016_MAD_464_4453_ORT_CLA_RGB
PNOA_2016_MAD_464_4454_ORT_CLA_RGB
PNOA_2016_MAD_464_4455_ORT_CLA_RGB
PNOA_2016_MAD_464_4456_ORT_CLA_RGB

PNOA_2016_MAD_465_4451_ORT_CLA_RGB
PNOA_2016_MAD_465_4452_ORT_CLA_RGB
PNOA_2016_MAD_465_4453_ORT_CLA_RGB
PNOA_2016_MAD_465_4454_ORT_CLA_RGB

LAZ

IGN

<p>PNOA_2016_MAD_465_4455_ORT_CLA_RGB PNOA_2016_MAD_465_4456_ORT_CLA_RGB</p> <p>PNOA_2016_MAD_466_4451_ORT_CLA_RGB PNOA_2016_MAD_466_4452_ORT_CLA_RGB PNOA_2016_MAD_466_4453_ORT_CLA_RGB PNOA_2016_MAD_466_4454_ORT_CLA_RGB PNOA_2016_MAD_466_4455_ORT_CLA_RGB PNOA_2016_MAD_466_4456_ORT_CLA_RGB</p>		
<p>IMÁGENES LIDAR SEGUNDA COBERTURA VALDILECHA:</p> <p>PNOA_2016_MAD_473_4460_ORT_CLA_RGB PNOA_2016_MAD_473_4461_ORT_CLA_RGB PNOA_2016_MAD_473_4462_ORT_CLA_RGB</p> <p>PNOA_2016_MAD_474_4460_ORT_CLA_RGB PNOA_2016_MAD_474_4461_ORT_CLA_RGB PNOA_2016_MAD_474_4462_ORT_CLA_RGB</p> <p>PNOA_2016_MAD_475_4460_ORT_CLA_RGB PNOA_2016_MAD_475_4461_ORT_CLA_RGB PNOA_2016_MAD_475_4462_ORT_CLA_RGB</p>	LAZ	IGN
CORINE LAND COVER	SHP	IGN
<p>IMAGEN SENTINEL</p> <p>S2A_MSIL1C_20210518T105621_NO3...T30TVK_20210518TI31440</p>	TIFF	COPERNICUS OPEN ACCESS HUB
<p>IMAGEN SPOT</p> <p>pnt_spot5_hrg_269035_20110409_geo_pan_etr89_hu30_gsd2_5_std pnt_spot5_hrg_269035_20110409_geo_xsbic_etr89_hu30_gsd10_std</p>	TIFF	IGN

Tabla 8. Materiales iniciales necesarios para la modelización hidráulica. Elaboración propia.

4.2. METODOLOGÍA

4.2.1. MODELIZACIÓN HIDRÁULICA CON HEC-RAS Y ArcGIS

4.2.1.1. PRE-PROCESAMIENTO EN ARCGIS

En esta primera fase del estudio el objetivo principal es la representación de la superficie del terreno a través de la creación de un archivo *TIN* (*Triangular irregular networks*) basado en datos *LIDAR* (*light detection and ranging*) (este tipo de datos utilizan luz láser para la obtención de la morfología de la superficie terrestre a través de mediciones exactas en los ejes x, y, z, ESRI, 2021). Además, se han generado las capas de información geométrica de la cuenca de manera manual, a través de la extensión Ras-Geometry en la interfaz de *HEC-GeoRAS*. Una vez generadas han sido exportadas para su procesamiento en el software *HEC-RAS*.

Para la generación del archivo *TIN* es necesaria la previa descarga de los archivos *LIDAR* que cubran el ámbito de estudio. Esta descarga se realiza de forma gratuita a través del Centro de Descargas del Instituto Geográfico Nacional (CNIG), concretamente en el apartado de Modelos Digitales de Elevaciones, seleccionando la capa *LIDAR* segunda cobertura (2015-Actualidad). Estos archivos se encuentran en un formato incompatible con ArcMap (formato. laz), por lo que será necesario contar con la extensión de herramientas para ArcMap *LasTools*, que cuenta con la herramienta *laszipPro* (Figura 9), con la que se podrán convertir a formato. las, ya compatibles con el software.

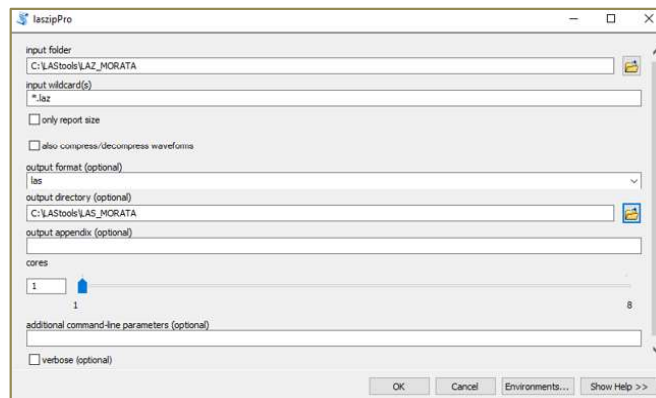


Figura 9. Ejecución de la herramienta *LaszipPro* durante la modelización hídrica del río Tajuña en su paso por Morata de Tajuña y mejoras espectrales de las imágenes satélite de la cuenca. Fuente: software ArcMap 10.7.1 y elaboración propia.

Una vez descargadas y en el formato adecuado, se han utilizado las imágenes *LIDAR* para generar un *TIN*. Para ello se crea un *LAS Dataset* (Figura 10) a partir de todas las imágenes *LIDAR* descargadas. Una vez creado, será necesario activar las propiedades de este y en el apartado *Files* adjuntar las imágenes en formato *laz*. Además, se configura el sistema de coordenadas

seleccionando la opción *ETRS_1989_UTM_Zone_30N* (Figura 10), y se calculan las estadísticas, ya que permiten mejorar los procesos llevados a cabo con la capa y determinar la calidad y extensión de los datos utilizados (ESRI, 2020).

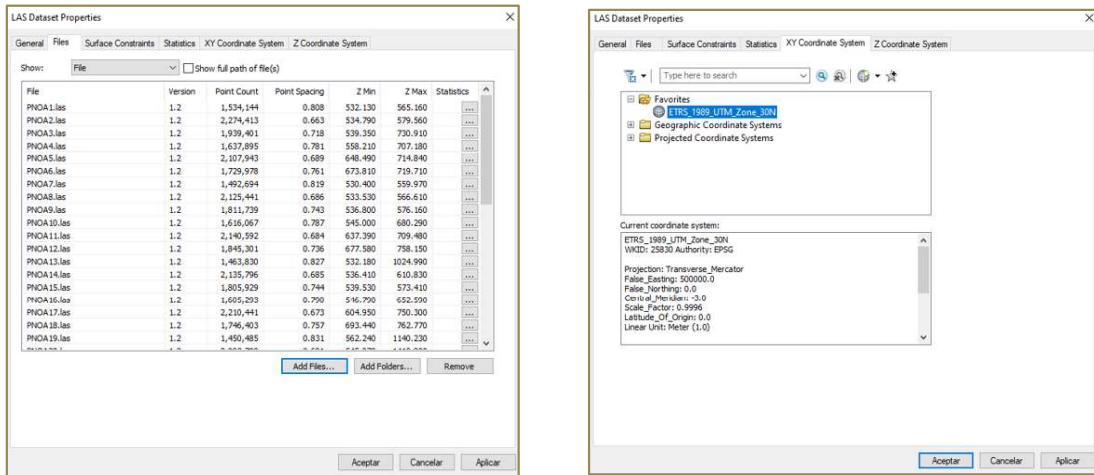


Figura 10. Creación del *LAS Dataset* durante la modelización hídrica del río Tajuña en su paso por Morata de Tajuña. Inserción de archivos las y determinación del sistema de coordenadas. Fuente: software ArcMap 10.7.1. Elaboración propia.

Tras crear el archivo *LAS Dataset*, se marca en las propiedades de la capa la opción de filtro *Ground*, que reduce los puntos de información únicamente a aquellos que den información sobre el terreno. De esta forma, marcada la opción anterior, se selecciona la herramienta *LAS Dataset to TIN* con la que se obtiene de forma automática el modelo de superficie. En esta herramienta se elige la opción de *Thinning Type* igual a *Random* que selecciona aleatoriamente aquellos puntos de datos *LAS* en función de las propiedades *Thinning method* definido en este caso como *Node Count*, que refleja el número total de nodos permitidos en el apartado *Thinning value*, en este caso de 1 500 000 (el número total de puntos de información *LIDAR* en estos casos han sido de unos 30 000 000, que debe reducirse para que el procesamiento sea más rápido y los datos más ligeros).

Una vez generado el *TIN*, se activa la extensión *HEC-GeoRAS* y se comienza a digitalizar la información correspondiente con el cauce del río, las orillas, las líneas de flujo y las secciones de control.

Para la digitalización del cauce del río es necesario utilizar la herramienta *Stream Centreline* (Figura 11), que se encuentra dentro del menú de herramientas *RAS Geometry*. Una vez creada la capa del cauce a partir de la misma, es necesario activar la edición de la capa y dibujar con la herramienta *Create Feature* la línea del recorrido de este a partir de una ortofotografía referenciada (en este caso se ha utilizado la proporcionada por las capas base del software, concretamente la nombrada como *Imágenes*, ya que son de máxima actualidad y tiene muy alta resolución espacial). Es determinante que a la hora de digitalizar todas las geometrías se realice en sentido de la corriente, en caso contrario el resultado no se obtendrá correctamente. Una vez

se ha digitalizado el cauce se indica el nombre del mismo utilizando la herramienta de *Assign River and Reach Name*.

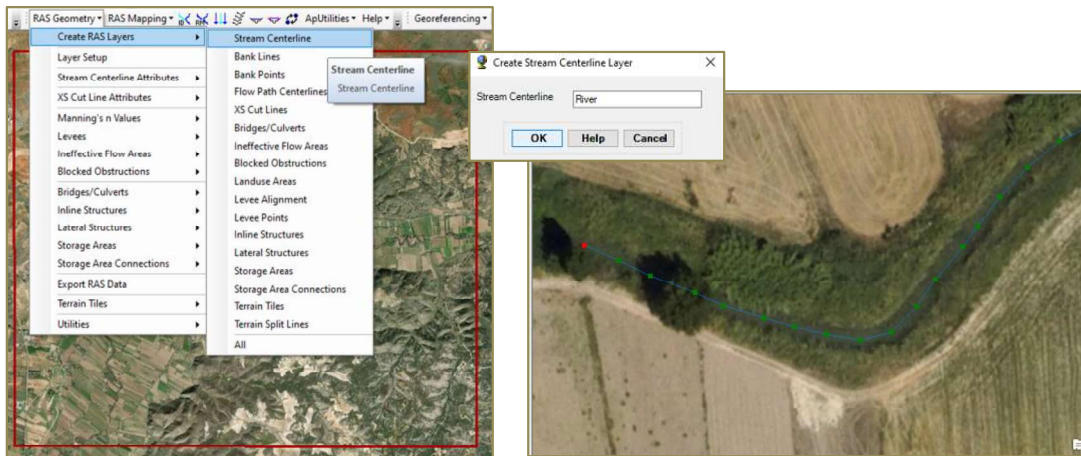


Figura 11. Digitalización del cauce durante la modelización hídrica del río Tajuña en su paso por Morata de Tajuña utilizando la herramienta *Stream Centerline*. Fuente: imágenes PNOA, software ArcMap 10.7.1. Elaboración propia.

El proceso de digitalización se repetirá de la misma forma en el caso de las orillas, utilizando la herramienta *Bank line*. Estas líneas deberán digitalizarse de forma independiente, también en sentido de la corriente.

En el caso de las líneas de flujo, es necesario utilizar la herramienta *Flow Path Centrelines* en la que se define la línea central del cauce de forma automática marcando como tal la capa del cauce generada anteriormente. Para la definición de las orillas de inundación se utiliza como información de apoyo el visor del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables. Este visor permite visualizar las llanuras a un periodo de 10, 50, 100 y 500 años de retorno. Con el objetivo de tener en cuenta el mayor periodo posible, se activa la capa de 500 años de retorno y se digitalizan los límites de estas de forma manual y aproximada siguiendo el mismo procedimiento que en el caso del cauce y las orillas. Una vez generadas, se añaden los atributos con la herramienta *Select Flowpath and Assign Flowpath Type*, definiendo cuál es la línea del margen derecho e izquierdo de la llanura de inundación y cuál la del cauce central.

En el caso de las secciones de control, se utiliza la herramienta *XS Cut Lines* y se sigue el mismo procedimiento que en los casos anteriores. Una vez activada la edición de la capa, las líneas de control se dibujan en sentido de la corriente, de izquierda a derecha del mismo, sin cruzarse unas con otras y teniendo en cuenta que su trazo sea lo más perpendicular posible a la línea central del cauce. Además, las líneas tienen que cruzar de lado a lado las dos líneas de flujo (estas secciones de control también se pueden generar de manera automática, pero no suelen ofrecer buenos resultados).

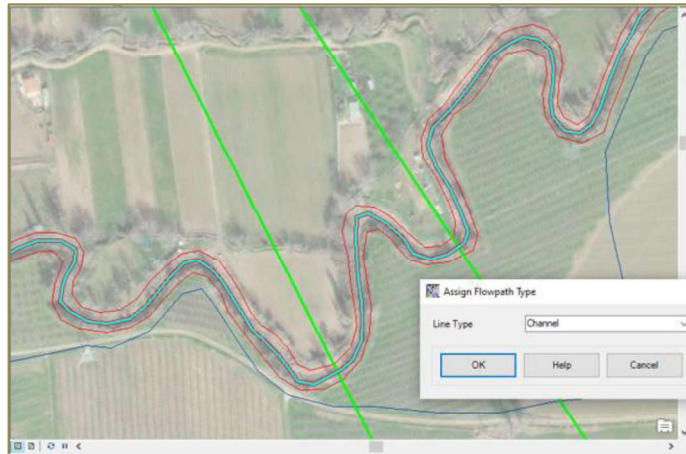


Figura 12. Ejemplo de definición de la línea central del cauce con la herramienta *Assign Flowpath Type* para la modelización del río Tajuña a su paso por Morata de Tajuña. Fuente: imágenes PNOA, software ArcMap 10.7.1. Elaboración propia.

Antes de exportar los datos de las geometrías generadas, se ejecutan los atributos del cauce utilizando la herramienta *Stream Centreline Attributes: All*, en el que se selecciona como *Stream Centreline* de cauce la capa del río y como *Terrain* el *TIN* creado en pasos anteriores. A su vez, se ejecutan los atributos de las líneas de control con la herramienta *XS Cut Lines Attributes: All*, seleccionando como “*Stream Centreline*” la capa del río, como *Bank lines* la capa de las orillas, como *Flowpaths* la capa de llanuras de inundación, como *Cut lines* la capa de líneas de control y como *Terrain* el *TIN* antes creado.

Como último paso en la etapa de preprocesamiento, se exportan los datos de las geometrías para poder ser importadas en HEC-RAS en la siguiente fase. De esta forma, en el menú *RAS Geometry* se selecciona la opción *Export RAS Data* (Figura 13) y, una vez marcada la ruta del directorio de salida, exporta de manera automática los datos.

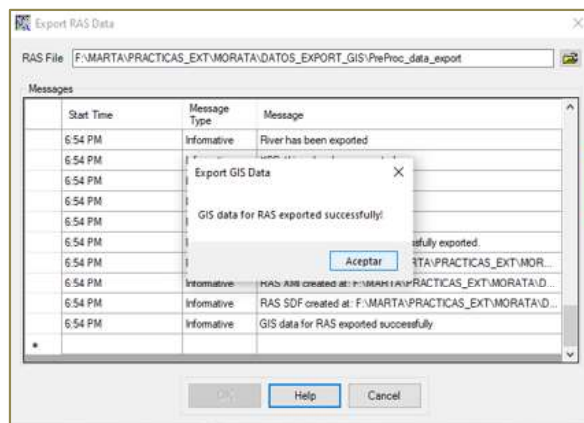


Figura 13. Exportación de la geometría generada en la etapa de preprocesamiento durante la modelización hídrica del río Tajuña en su paso por Morata de Tajuña. Fuente: software ArcMap 10.7.1. Elaboración propia.

4.1.2.1. PROCESAMIENTO EN HEC-RAS

En esta fase se añade tanto un proyecto como un directorio nuevo en el programa (Figura 14), que se identifica con un nombre propio. Además, se define el sistema de medida como *System International*, que concreta el sistema métrico como predeterminado en todo el proceso que se realice a partir de ese momento.

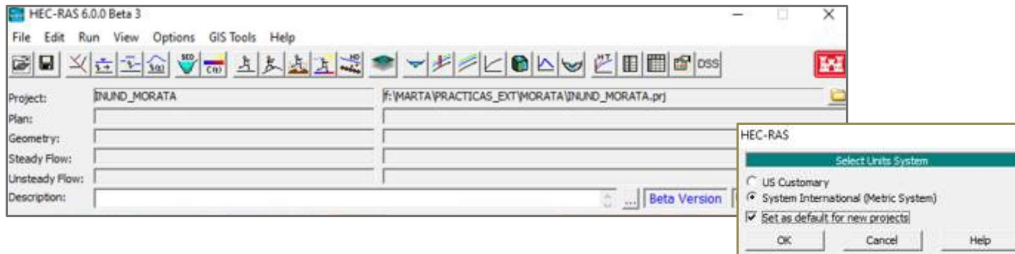


Figura 14. Generación de un proyecto nuevo en el software HEC-RAS y selección del sistema métrico en la etapa de procesamiento durante la modelización hídrica del río Tajuña en su paso por Morata de Tajuña.

Fuente: software HEC-RAS 6.0.0. Elaboración propia.

Una vez realizados los pasos previos al estudio se importan los datos de geometría generados en la etapa de preprocesamiento. Para ello, se abre la ventana *Geometric Data* y en la ventana *File* se selecciona la opción de *Import Geometry Data: GIS format* (Figura 15). Seguidamente, aparecen una serie de ventanas en las que se acepta la información recogida de forma predeterminada (excepto en el caso de seleccionar de nuevo el sistema métrico), marcando la opción *Next* hasta la opción *Finished-Import Data*. En estas ventanas se recopilan los datos geométricos utilizados para generar el cauce.

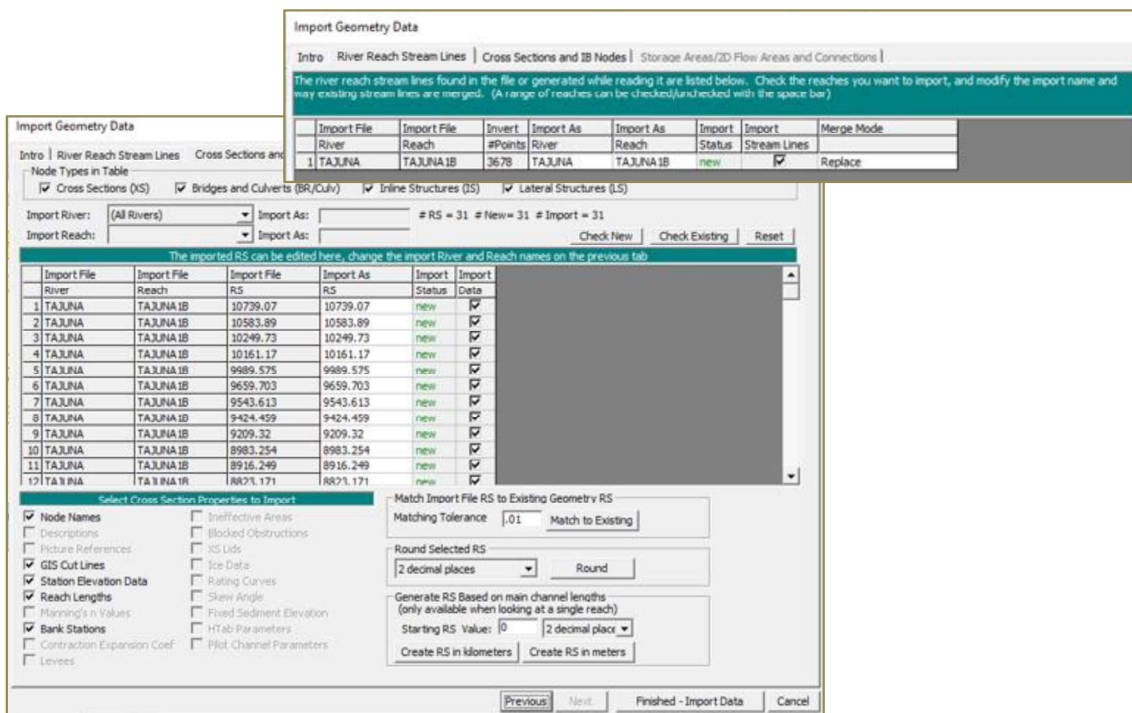


Figura 15. Importación de los datos geométricos al software HEC-RAS en la etapa de procesamiento durante la modelización hídrica del río Tajuña en su paso por Morata de Tajuña. Fuente: software HEC-RAS 6.0.0. Elaboración propia.

El siguiente paso consiste en introducir el valor del coeficiente de rugosidad del cauce, denominado *Manning value*. Para ello se abre en la pestaña de *Geometric Data* la opción *Tables* y concretamente la herramienta *Manning's n or k values* (Figura 16).

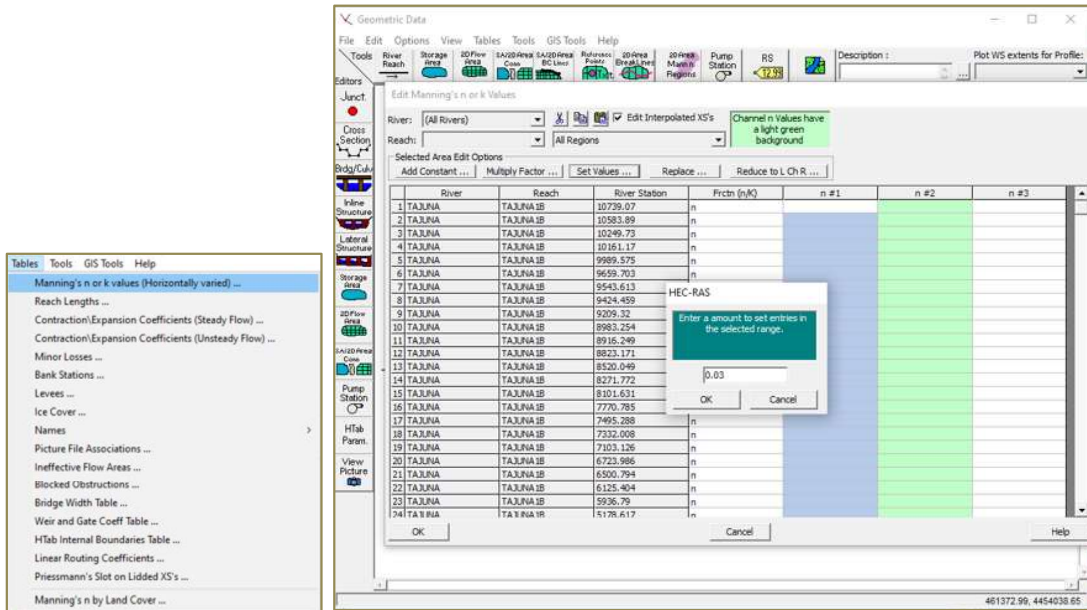


Figura 16. Determinar el valor de rugosidad del cauce para el cauce y las orillas del río a través de la herramienta *Manning's n or k values* en la etapa de procesamiento durante la modelización hídrica del río Tajuña en su paso por Morata de Tajuña. Fuente: software HEC-RAS 6.0.0. Elaboración propia.

En esta ventana se introducen los valores para tres columnas: n#1 (correspondiente a la rugosidad de la orilla izquierda), n#2 (correspondiente con la rugosidad del cauce) y n#3 (correspondiente a la rugosidad de la orilla derecha). Los valores asociados a cada cauce y orilla se seleccionan a partir del método propuesto por Cowan. W en 1956, utilizado por los ingenieros Mosquera Flores y Rojas Ulco durante su estudio de inundabilidad en el río Moche en el año 2019. En este método el valor del coeficiente de rugosidad se estima mediante la siguiente fórmula:

$$n = m5 (n0 + n1 + n2 + n3 + n4)$$

Los valores recogidos en la anterior fórmula corresponden con:

n0: rugosidad base para un canal recto, uniforme, prismático y con rugosidad homogénea.

n1: rugosidad adicional debida a irregularidades superficiales del perímetro mojado a lo largo del tramo en estudio.

n2: rugosidad adicional equivalente debida a variación de forma y de dimensiones de las secciones a lo largo del tramo en estudio.

n_3 : rugosidad equivalente debida a obstrucciones existentes en el cauce.

n_4 : rugosidad adicional equivalente debida a la presencia de vegetación.

m_5 : factor de corrección para incorporar efecto de sinuosidad del cauce o presencia de meandros.

Los valores que pueden adquirir dichas variables están recogidos en la figura 17 y corresponden al informe generado por Felices (2007):

CONDICIONES DEL CANAL		VALORES	
Material Involucrado	Tierra	n_1	0.020
	Corte en Roca		0.025
	Grava Fina		0.024
	Grava Gruesa		0.028
Grado de Irregularidad	Suave	n_2	0.000
	Menor		0.005
	Moderado		0.010
	Severo		0.020
Variaciones de la Sección Transversal	Gradual	n_3	0.000
	Ocasionalmente Alternante		0.050
	Frecuentemente Alternante		0.010-0.015
Efecto Relativo de las Obstrucciones	Insignificante	n_4	0.000
	Menor		0.010-0.015
	Apreciable		0.020-0.030
	Severo		0.040-0.060
Vegetación	Baja	n_5	0.005-0.010
	Media		0.010-0.025
	Alta		0.025-0.050
	Muy Alta		0.050-0.100
Grado de los Efectos por Meandro	Menor	m_5	1.000
	Apreciable		1.150
	Severo		1.300

Figura 17: Valores de las variables para el cálculo de la rugosidad del terreno o coeficiente de Manning (Felices, 2007).

Una vez seleccionado el valor adecuado de rugosidad para las tres zonas, se realiza un filtrado para aquellas secciones de control que contengan más de 500 puntos (el software está limitado a ese número y si se supera los datos no podrán exportarse de forma correcta). Para ello se utiliza la herramienta *Cross Section Points Filter* (Figura 18), localizada en la ventana de *Tools*. Esta herramienta muestra el número de puntos de cada sección, permitiendo la selección de aquellas que contengan los valores adecuados.

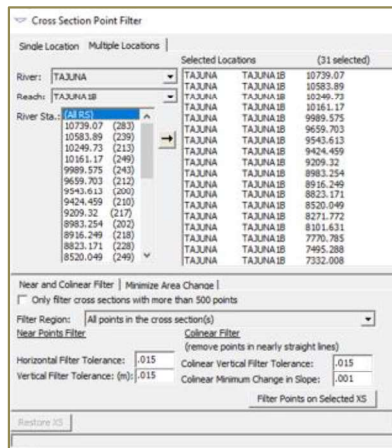


Figura 18. Filtrado de puntos en las secciones de control en la etapa de procesamiento durante la modelización hídrica del río Tajuña en su paso por Morata de Tajuña. Fuente: software HEC-RAS 6.0.0. Elaboración propia.

De esta forma, ya se han realizado los cálculos y modificaciones necesarias para obtener resultados geométricos adecuados, por lo que solo queda guardar el archivo en formato compatible *Save Geometry data as* (Figura 19) utilizando un nombre que permita reconocer el archivo. Una vez guardado, el archivo aparece en la pantalla principal. Concretamente en el apartado dedicado a la geometría.

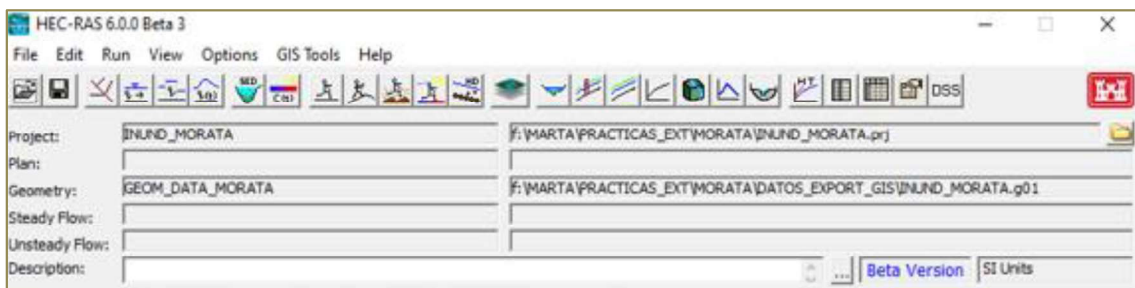


Figura 19. Salvar los datos de geometría modificados en el archivo del proyecto principal en la etapa de procesamiento durante la modelización hídrica del río Tajuña en su paso por Morata de Tajuña. Fuente: software HEC-RAS 6.0.0. Elaboración propia

El siguiente paso consiste en configurar el caudal y las condiciones de contorno del cauce. Para ello, y considerando el flujo de agua como continuo, se utiliza la herramienta *Steady Flow Data* (Figura 20), donde se determina tanto el número de periodos de retorno con los que se está trabajando (en este caso tres: 10 años, 100 años y 500 años) como el caudal del flujo en cada uno de esos casos. El nombre del periodo puede modificarse para poder identificar con mayor claridad los resultados. En este caso se ha denominado al periodo de retorno de diez años PR10, al periodo de retorno de cien años PR100 y al periodo de retorno de quinientos años PR500. Los datos de caudal se han recopilado de los informes generados por el Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables, y sus unidades son metros cúbicos por segundo.

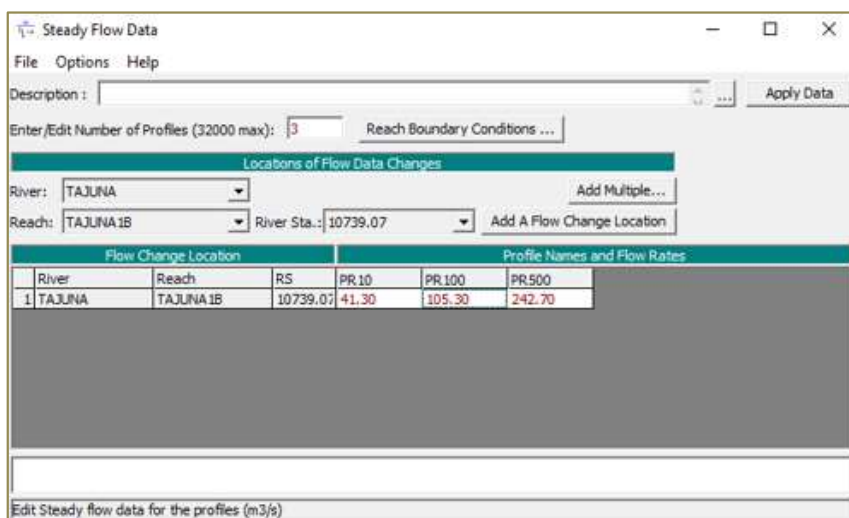


Figura 20. Determinación del número de periodos de retorno y caudal principal en la etapa de procesamiento durante la modelización hídrica del río Tajuña en su paso por Morata de Tajuña. Fuente: software HEC-RAS 6.0.0. Elaboración propia.

Además, es necesario definir las condiciones de flujo. Los ríos de llanura o situados en terrenos con pendientes entre el 1% y el 2% (se indica régimen crítico aguas abajo) se seleccionan como condición de flujo subcrítico o lento. En caso de que el cauce se encuentre en terrenos con pendientes entre 2% y el 10%, el flujo del río se define como mixto (Calado Crítico tanto aguas arriba como aguas abajo). En este caso, tanto Perales de Tajuña como Valdilecha se encuentran localizados en terrenos con pendientes del 3% al 12%, por lo que su régimen es mixto. En el caso de Morata de Tajuña, se encuentra en terrenos con pendiente entre el 0% y el 3%, por lo que su flujo es subcrítico o lento.

Finalmente, la modelización en *HEC-RAS* se realiza mediante la herramienta *Run: Steady Flow Análisis*, en la que se selecciona la opción de *Subcritical* para el caso de Morata de Tajuña y *Mixed* en el caso de Perales de Tajuña y Valdilecha, y se computa el resultado. Si no aparece ningún error se pueden exportar los resultados en la opción *Export GIS Data* (Figura 21) y pasar a la siguiente fase. Es importante seleccionar todos los tramos que se quieren representar durante la exportación de resultados, en este caso se seleccionan los tres periodos de retorno: diez, cien y quinientos años.

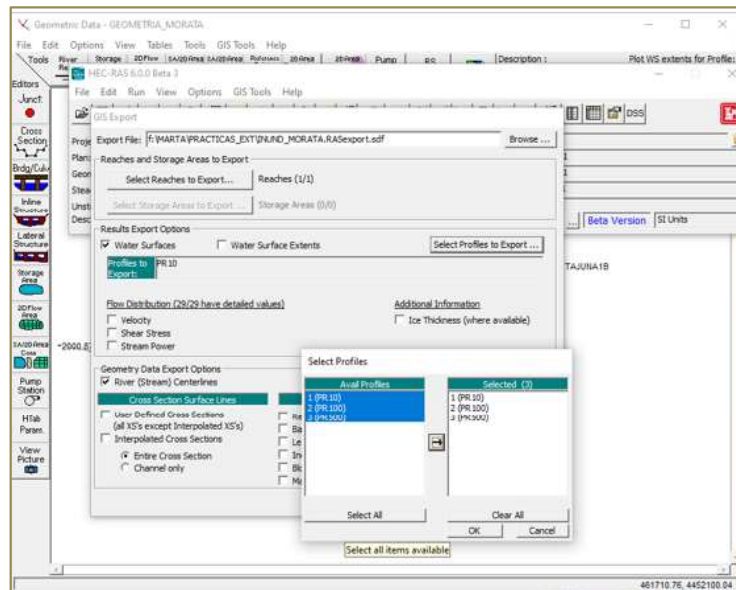


Figura 21. Selección de los perfiles al exportar la información a formato GIS en la etapa de procesamiento durante la modelización hídrica del río Tajuña en su paso por Morata de Tajuña. Fuente: software HEC-RAS 6.0.0. Elaboración propia.

4.1.2.2. REPRESENTACIÓN DE RESULTADOS EN ARCMAP (HEC GeoRAS)

En este apartado se procede a obtener las láminas de inundación representadas espacialmente utilizando de nuevo el conjunto de herramientas de *HEC-GeoRAS*. Esta vez se utilizan las herramientas del apartado *Ras Mapping*, además de las que se encuentran de forma independiente en la barra de tareas.

En primer lugar, se utiliza la herramienta de *Import RAS SDF File*, que permite transformar el archivo de *HEC-RAS* de formato *SDF* a formato *XML*.

Una vez transformado el formato, se selecciona la opción *Layer Set Up* (Figura 22) en el menú de *RAS Mapping*. En esta ventana, es necesario adjuntar tanto los datos que se acaban de exportar a formato *XML* como la capa *TIN* creada en la primera fase. A su vez, hay que seleccionar ruta de salida, nombre del proyecto y tamaño de celda para el raster. En este caso este tamaño es de 1 metro, ya que se necesita una buena resolución para los posteriores análisis visuales del terreno afectado por la inundación.

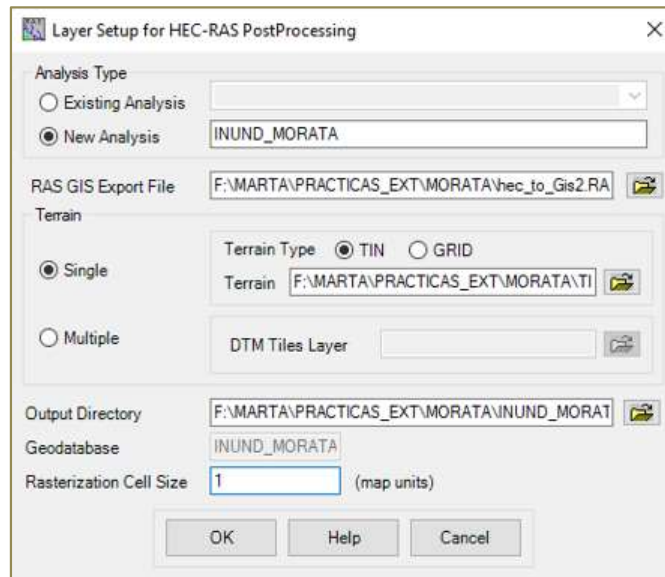


Figura 22. Crear los datos finales a partir de la información *Hec-RAS* y el modelo digital del terreno en la etapa de postprocesamiento durante la modelización hídrica del río Tajuña en su paso por Morata de Tajuña. Fuente: software ArcMap 10.7.1. Elaboración propia.

Estos datos no se importan de manera automática en el software, por lo que se utiliza la herramienta *Import RAS Data*, que lo hace de forma automática una vez generado el *Layer Setup*. Una vez importados estos datos se deben utilizar las herramientas *Inundation Mapping: wáter Surface Generation* e *Inundation Mapping: Floodplain Delineation Using Rasters*, de forma consecutiva para la representación de la profundidad de las láminas de agua teniendo en cuenta toda la información generada anteriormente.

4.2.2. AFECCIÓN DE LOS USOS DE SUELO PRÓXIMOS A LA INUNDACIÓN.

Gracias a la modelización hidráulica llevada a cabo anteriormente, se ha generado una capa de información que delimita aquellas zonas que pueden ser afectadas por una inundación en los distintos periodos de retorno. La superficie perjudicada en caso de inundación en un periodo de 500 años es la más elevada y cubre la superficie de los dos periodos anteriores, por lo que será la que se tenga en cuenta a la hora de realizar los estudios de exposición.

De esta forma, se genera un recorte, o *clip* (Figura 23), entre la capa de usos de suelo del *Corine Land Cover* con la capa delimitante de la extensión de la inundación a 500 años, identificando así los usos de suelo en esas zonas.

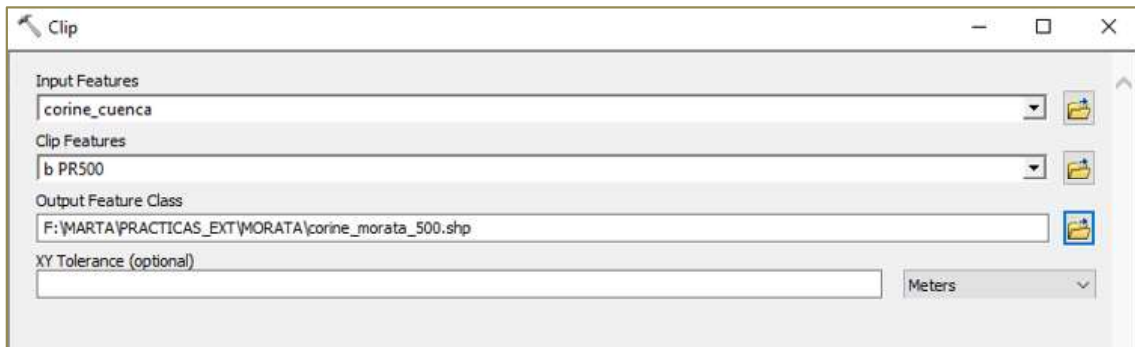


Figura 23. Recorte de la capa de usos de suelo sobre la capa de terrenos afectados por la inundación con un periodo de retorno de 500 años en la etapa de postprocesamiento durante la modelización hídrica del río Tajuña en su paso por Morata de Tajuña. Fuente: software ArcMap 10.7.1. Elaboración propia

Con el objetivo de contrastar y apoyar la información sobre los usos de suelo anteriormente obtenida, se ha realizado un análisis visual de la cuenca y de los ámbitos de estudio a partir de imágenes satélite.

Para la selección y descarga de estas imágenes se han llevado a cabo dos métodos. Por una parte, la imagen *Sentinel* se ha seleccionado desde el portal *Copernicus Open Access Hub*. Este portal permite seleccionar, a partir de un cuadro manual y escogiendo tanto el tipo de satélite como la fecha de la producción de la imagen, el ámbito que se necesita estudiar y, una vez delimitado, ofrece una serie de imágenes para su descarga. Para evitar incorrecciones, se ha seleccionado una imagen correspondiente al 18 de mayo de 2021, que no presenta fenómenos atmosféricos como nubes o partículas en suspensión y que permite la clara visualización de la cuenca. Por otra parte, se ha pedido al Instituto Geográfico Nacional la imagen *SPOT 5* referente al ámbito de estudio en abril del 2021, que posteriormente se recortó a únicamente la superficie de la cuenca del río Tajuña.

La imagen del satélite *Sentinel 2* se toma con un nivel de procesamiento *level 2A*. Estas imágenes se encuentran corregidas tanto geoméricamente como para eliminar el efecto de dispersión atmosférica y cuentan con un total de 12 bandas. De esta forma, se han realizado una serie de composiciones de bandas que permitan una mejor diferenciación de los diferentes usos del suelo tanto en el terreno de la cuenca y sus alrededores como en los ámbitos a estudiar. Para este procesamiento se ha utilizado el software *SNAP*.

En total se han realizado dos combinaciones de bandas distintas, con la intención de efectuar una comparativa entre los resultados obtenidos. En primer lugar se ha llevado a cabo la composición en falso color infrarrojo (Figura 24), asignando a los colores primarios rojo, verde y azul unas bandas que no corresponden con los mismos, en este caso las bandas 8, 4 y 3, respectivamente.

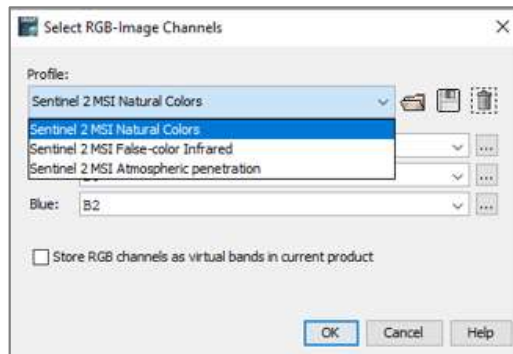


Figura 24. Combinación de bandas en falso color infrarrojo para la imagen *Sentinel 2A*. Fuente: software *SNAP*. Elaboración propia.

Para mejorar la calidad visual de la imagen y poder realizar la segunda combinación, para la que es necesario que las bandas combinadas tengan la misma resolución espacial, se ha realizado un proceso de resamplado (Figura 25) de los píxeles de las bandas de 20 metros para que tengan una resolución de 10 metros. Una vez finalizado, se puede observar cómo las posibilidades en cuanto a combinación de bandas aumentan (Figura 25), realizándose la combinación *Agriculture*, correspondiente con la combinación de las bandas 8,11 y 2 (rojo, verde, azul).

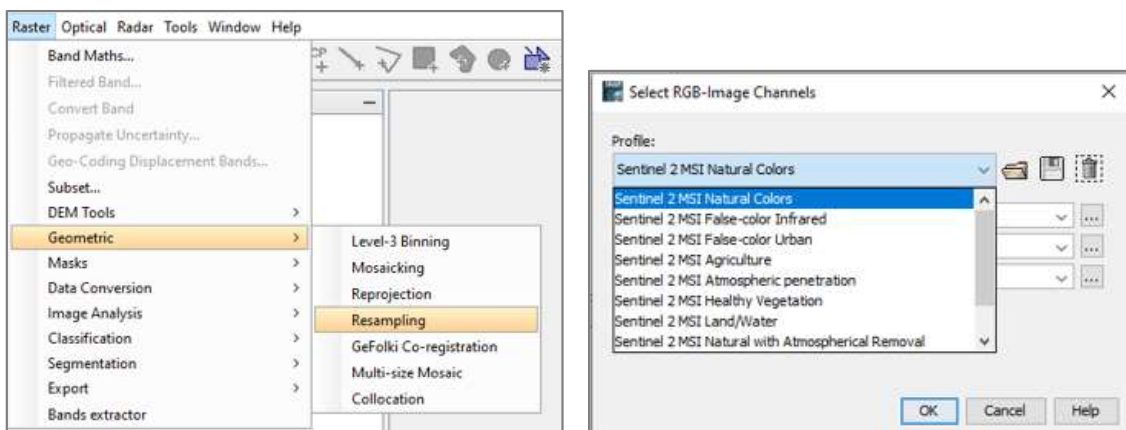


Figura 25. Resamplado y tipos de combinación de bandas para la imagen *Sentinel 2A*. Fuente: software *SNAP*. Elaboración propia.

Seguidamente, se ha realizado el cálculo del índice de vegetación *NDVI* (*Normalized Difference Vegetation Index*) para estimar la cantidad, calidad y grado de desarrollo de la vegetación de las tres áreas de estudio. Este cálculo se realiza midiendo la intensidad de la radiación que emite o refleja la vegetación en las bandas roja e infrarroja del espectro electromagnético. Para una mayor resolución de los resultados se ha utilizado la imagen *SPOT 5* y su procesamiento y visualización se han realizado a través del software *ERDAS IMAGINE 2018*.

El cálculo del *NDVI* se realiza a partir de la diferencia normalizada entre la reflectancia de las bandas del infrarrojo cercano (banda 4) y del rojo (banda 3), siendo la fórmula la siguiente:

$$NDVI = \frac{\rho_{i,IRC} - \rho_{i,R}}{\rho_{i,IRC} + \rho_{i,R}}$$

De esta forma, una vez abierta la imagen *SPOT* en el software *ERDAS*, y tras realizar la fusión de las bandas pancromática y multiespectral para una mayor resolución de la imagen, se selecciona la opción *NDVI* de la pestaña *Unsupervised* en el menú *Raster*, en la que se determina tanto el tipo de sensor del que procede la imagen sobre la que se calcula el índice como el tipo que va a calcularse (Figura 26). Esta herramienta calculará de forma automática el índice determinado, por lo que da como resultado una imagen pancromática en la que las superficies con valores de pixel menores o iguales a cero son aquellas desprovistas de vegetación, las superficies con valores entre 0.1 y 0.5 son aquellas con vegetación de baja o media densidad y las de valores superiores a 0.5 aquellas con vegetación de alta densidad (Fereire, Cascón, Dominguez, & Nieto, 2011).

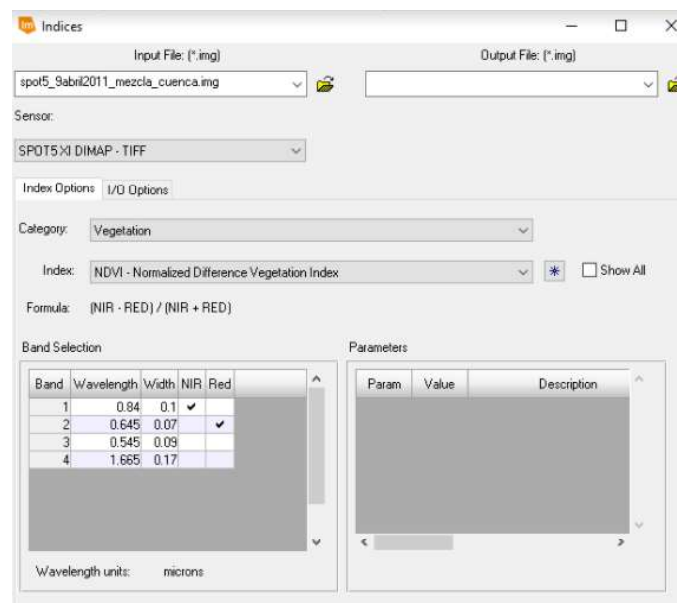


Figura 26. Cálculo del índice no supervisado NDVI. Fuente: software ERDAS. Elaboración propia.

5. RESULTADOS

En este apartado se muestran tanto las tablas con los valores de las variables que han sido calculadas durante el procedimiento de modelización hidráulica como los resultados cartográficos generados para cada una de las localizaciones. La cartografía resultante revela la extensión y profundidad de la lámina de agua en caso de inundación en los periodos de retorno a diez, cien y quinientos años, los usos de suelo con riesgo de inundación en el último de los mencionados periodos de retorno, y aquellas zonas tanto de uso urbano continuo como de edificaciones aisladas afectadas por el mismo. Además, se realiza un cálculo aproximado de la población con riesgo de

inundación, utilizando los datos tanto de densidad de población en cada localidad, como de la superficie total afectada. Por último, se muestran los resultados procedentes del análisis visual y el cálculo del índice NDVI en imágenes satélite Sentinel 2A y SPOT 5.

De esta manera, se distinguen tres apartados diferenciados: el primero dedicado a los resultados de las variables de rugosidad del terreno calculadas para cada tramo, el segundo dedicado a los resultados generados para el núcleo urbano de Perales de Tajuña, Morata de Tajuña y Valdilecha y el tercero dedicado a los resultados de los análisis de imágenes satélite.

5.1. RUGOSIDAD DEL TERRENO EN LOS ÁMBITOS SELECCIONADOS

La Figura 27 muestra el cálculo del índice de rugosidad del terreno o índice de Manning. Este cálculo se diferencia para el cauce y para las orillas de las corrientes estudiadas en cada ámbito.

En el caso de Perales de Tajuña, el estudio de inundación engloba tanto las superficies en riesgo de inundación del río Tajuña como del arroyo de La Vega Del Lugar, ya que el primero pasa cercano al núcleo urbano y el segundo lo atraviesa. Además, se ha realizado una diferenciación entre las secciones del arroyo, ya que pasa de recorrer una zona natural a una sellada, cambiando las condiciones de rugosidad. Esta diferenciación también ocurre en el caso del estudio en Valdilecha, ya que el principio de la sección de cauce estudiada discurre por terrenos sellados y la segunda parte por terrenos naturales. En el caso de Morata de Tajuña, todo el curso del río transcurre por el mismo tipo de terreno, por lo que no se ha realizado ninguna diferenciación entre secciones.

NOMBRE	ZONA	ECUACIÓN	RESULTADO
PERALES DE TAJUÑA			
ARROYO DE LA VEGA DEL LUGAR	ORILLAS (primera sección)	$IR=1(0.020+0.00+0.00+0.010+0.010)$	0.040
	CAUCE (primera sección)	$IR=1(0.020+0.00+0.00+0.00+0.05)$	0.025
ARROYO DE LA VEGA DEL LUGAR	ORILLAS (segunda sección)	$IR=1(0.020+0.00+0.00+0.010+0.05)$	0.035
	CAUCE (segunda sección)	$IR=1(0.025+0.00+0.00+0.020+0.05)$	0.050

RÍO TAJUÑA	ORILLAS	$IR=1.150(0.020+0.00+0.00+0.00+0.010)$	0.035
	CAUCE	$IR=1.150(0.020+0.00+0.00+0.00+0.005)$	0.030
MORATA DE TAJUÑA			
RÍO TAJUÑA	ORILLAS	$IR=1.150(0.020+0.00+0.00+0.00+0.010)$	0.035
	CAUCE	$IR=1.150(0.020+0.00+0.00+0.00+0.005)$	0.030
VALDILECHA			
ARROYO DE LA VEGA	ORILLAS (primera sección)	$IR=1(0.020+0.00+0.00+0.010+0.005)$	0.035
	CAUCE (primera sección)	$IR=1(0.025+0.00+0.00+0.020+0.005)$	0.050
ARROYO DE LA VEGA	ORILLAS (segunda sección)	$IR=1(0.020+0.00+0.00+0.010+0.010)$	0.040
	CAUCE (segunda sección)	$IR=1(0.020+0.00+0.00+0.00+0.005)$	0.025

Figura 27. Cálculo de los índices de rugosidad del terreno. Elaboración propia.

5.2. RESULTADOS DE LA MODELIZACIÓN HIDRÁULICA

Aunque en diferente extensión, los tres ámbitos de estudio poseen superficie afectada por riesgo de inundación. Esta superficie, en los tres casos, no solo perjudica a terrenos naturales sin edificar, sino que también a terrenos clasificados como urbanos continuos o discontinuos, lo que pone en grave riesgo la seguridad de los habitantes de sus localidades.

Tal y como puede apreciarse en las figuras 28, 29 y 30, la superficie afectada por riesgo de inundación en Perales de Tajuña varía considerablemente entre los diferentes periodos de retorno. En el caso del periodo de retorno de 10 años, la superficie total afectada por riesgo a inundación es de 74.74 ha, aumentando a 91.09 ha en el caso del periodo de retorno de 100 años y llegando a las 99.37 ha en el caso del periodo de retorno de 500 años.

En el caso de Morata de Tajuña la superficie que ocupa la lámina de agua en caso de inundación también varía de forma significativa entre los diferentes periodos de retorno.

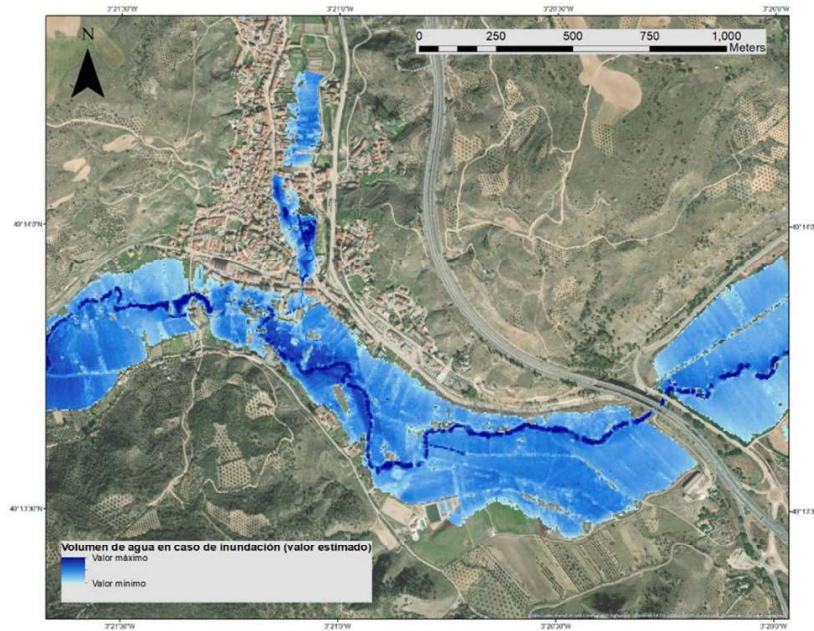


Figura 28. Representación de la lámina de inundación a un riesgo de diez años en Peralas de Tajuña.
Fuente: software ArcMap. Elaboración propia.

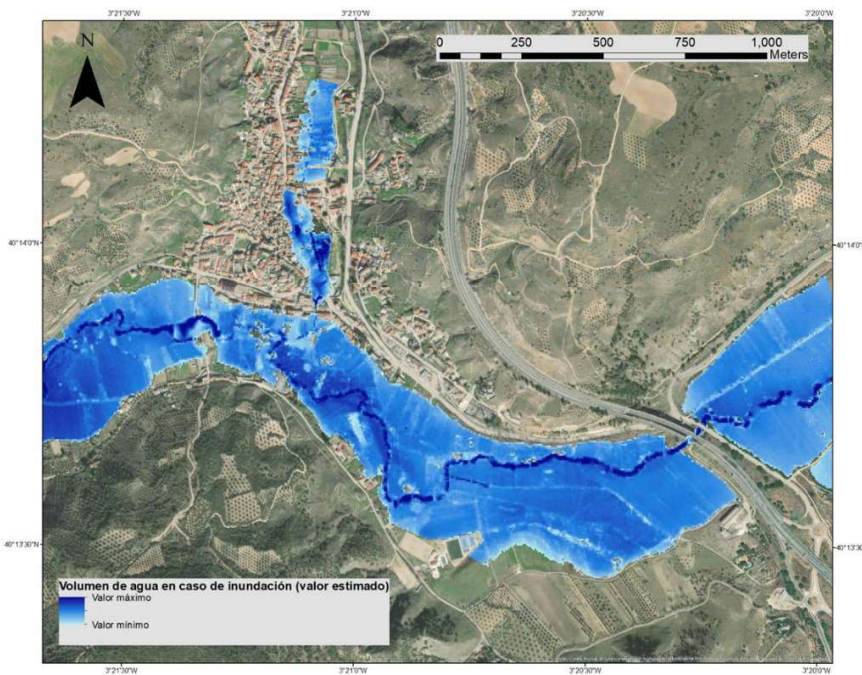


Figura 29. Representación de la lámina de inundación a un riesgo de cien años en Peralas de Tajuña.
Fuente: software ArcMap. Elaboración propia.

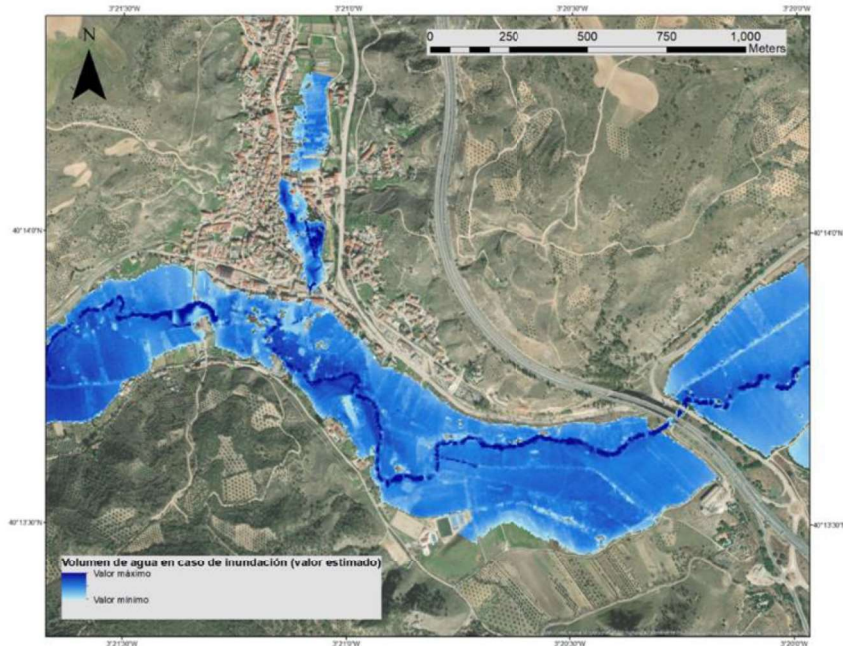


Figura 30. Representación de la lámina de inundación a un riesgo de quinientos años en Peralas de Tajuña.
Fuente: software ArcMap. Elaboración propia.

En el caso de Morata de Tajuña (figuras 31, 32 y 33) la superficie que ocupa la lámina de agua en caso de inundación también varía de forma significativa entre los diferentes periodos de retorno. La superficie con riesgo de inundación en un periodo de 10 años es de 150.96 ha, aumentando a 203.54 ha en caso de considerar un periodo de 100 años y llegando a ocupar una superficie de 252.63 ha en un periodo de 500 años.

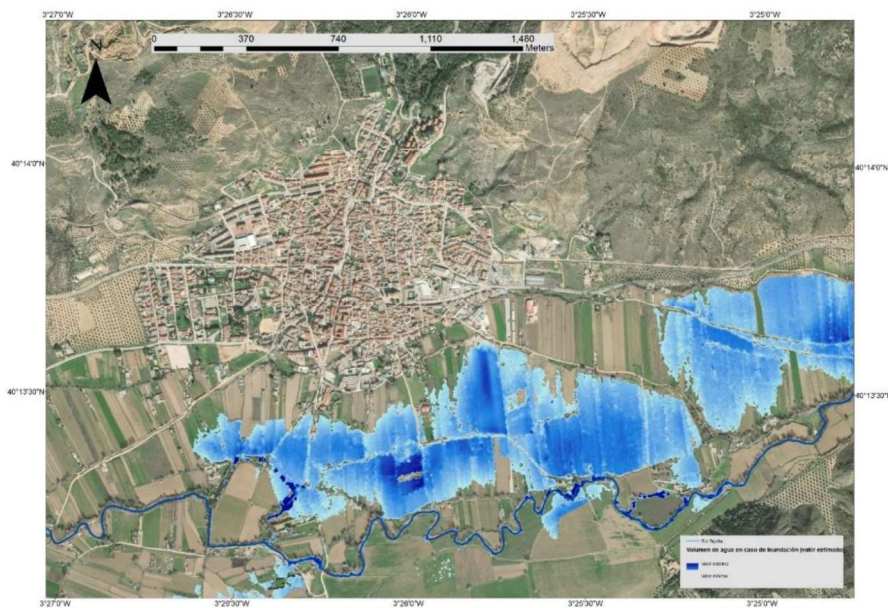


Figura 31. Representación de la lámina de inundación a un riesgo de diez años en Morata de Tajuña.
Fuente: software ArcMap. Elaboración propia.

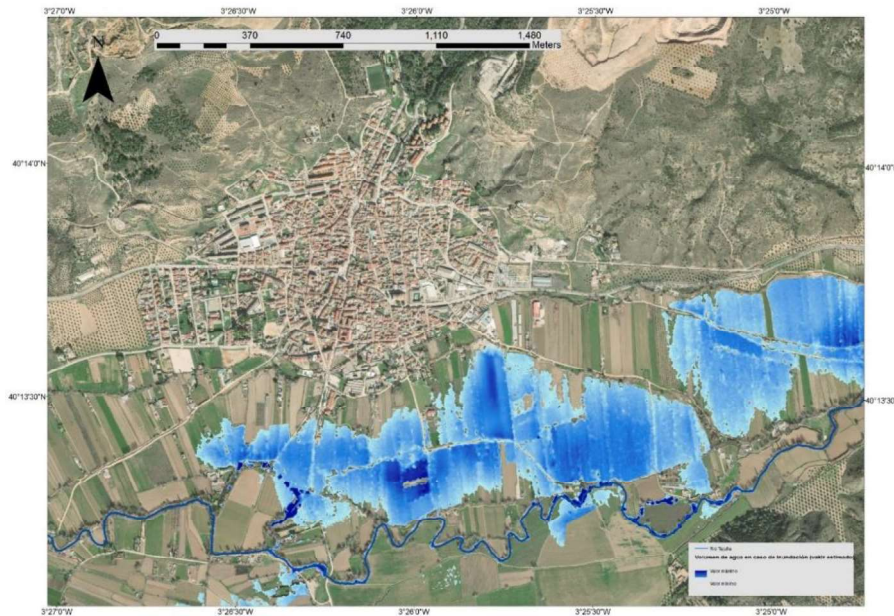


Figura 32. Representación de la lámina de inundación a un riesgo de cien años en Morata de Tajuña.
Fuente: software ArcMap. Elaboración propia.

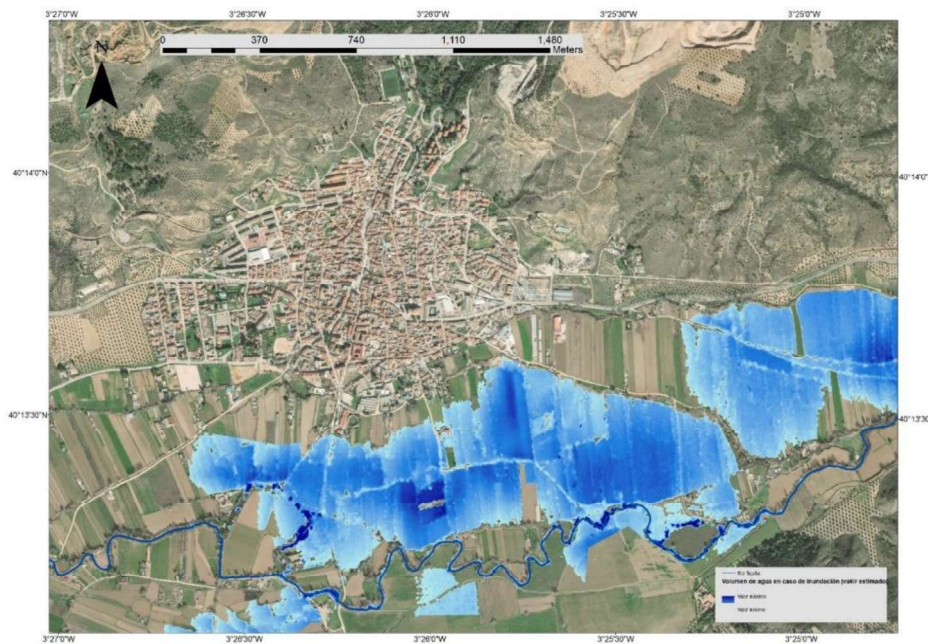
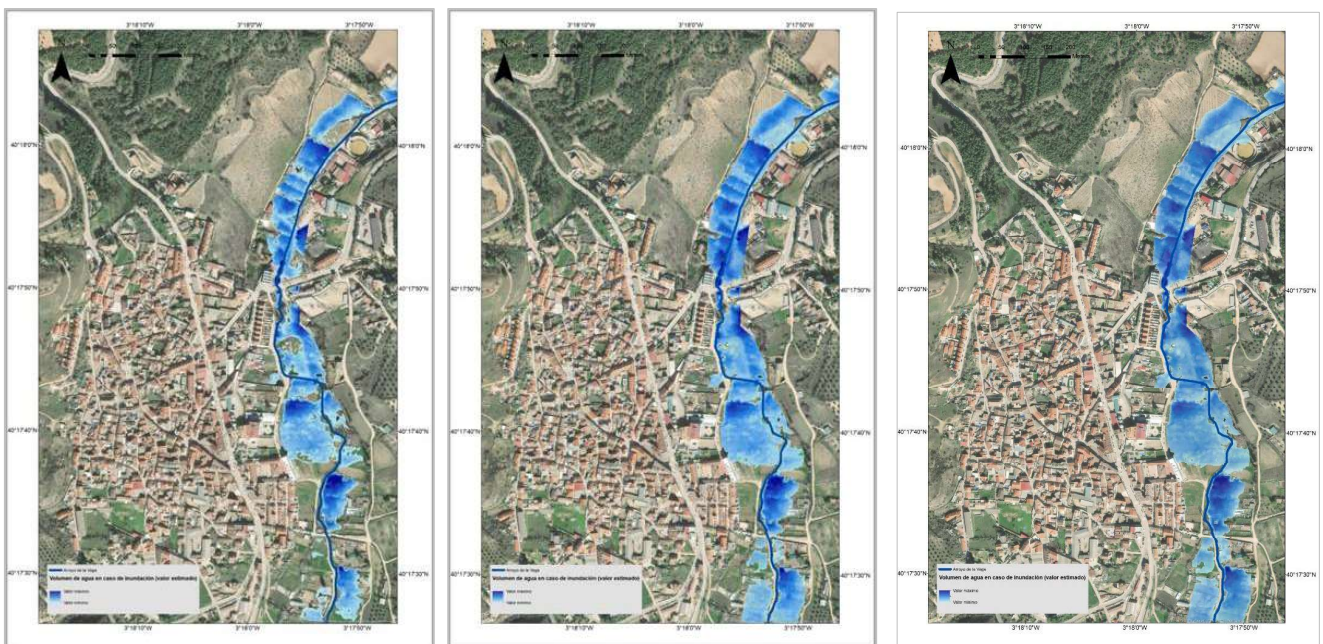


Figura 33. Representación de la lámina de inundación a un riesgo de quinientos años en Morata de Tajuña.
Fuente: software ArcMap. Elaboración propia.

En el caso de Valdilecha (figuras 34, 35 y 36) la variación entre periodos no es tan significativa como en los casos anteriores, siendo la superficie afectada de 6.27 ha en el periodo de retorno de 10 años, de 8.86 hectáreas en el periodo de retorno de 100 años y de 10.20 ha en el periodo de retorno de 500 años.



Figuras 34, 35 y 36 (Izda-dcha). Representación de la lámina de inundación a un riesgo de diez, cien y quinientos años, respectivamente, en Valdilecha. Fuente: software ArcMap. Elaboración propia.

En Morata y Perales de Tajuña, la mayor variación de superficie se produce con el salto temporal del periodo de retorno de 10 a 100 o 500 años, ya que, para esos dos últimos, la superficie afectada es muy parecida. En el caso de Valdilecha, la variación es proporcional entre los periodos de 10 a 100 años y de 100 a 500 años.

De esta forma, y teniendo en cuenta el periodo que más superficie puede llegar a afectar, se ha realizado el cálculo sobre la superficie total que puede sufrir inundación según el tipo de cobertura del suelo en cada uno de los ámbitos (figuras 37, 38 y 39):

En Perales de Tajuña, aproximadamente el 92% del terreno con riesgo de inundación pertenece a terrenos clasificados como “regados permanentemente”, tratándose de zonas verdes cultivables de las vegas de los citados ríos. Seguidamente, con aproximadamente un 7% del terreno inundable, se corresponde con terrenos clasificados como “urbano continuo”, al superar el 50% de la superficie edificada. El 1% restante se corresponde con terreno clasificado como olivar.

En Morata de Tajuña, la mayor parte de la superficie afectada por riesgo de inundación pertenece a la clasificación de “terrenos regados permanentemente” llegando a ocupar aproximadamente el 99% por ciento de este. El 1% restante está clasificado como tejido urbano discontinuo, esto es con menos del 50% de la superficie edificada.

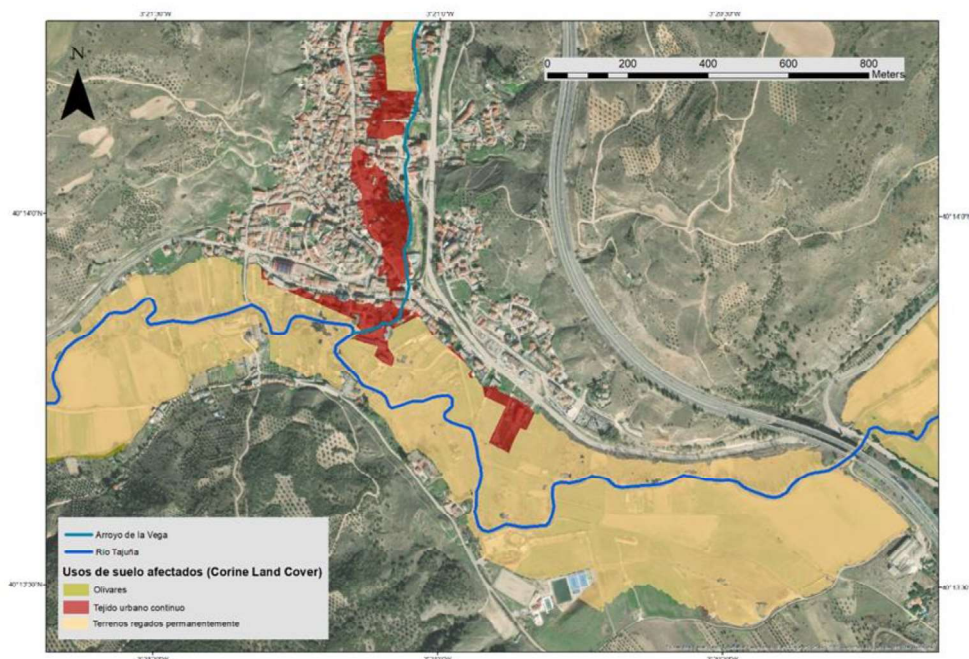


Figura 37. Representación de los usos de suelo (Corine Land Cover) afectados por la lámina de inundación con riesgo a quinientos años en Perales de Tajuña. Fuente: software ArcMap. Elaboración propia.

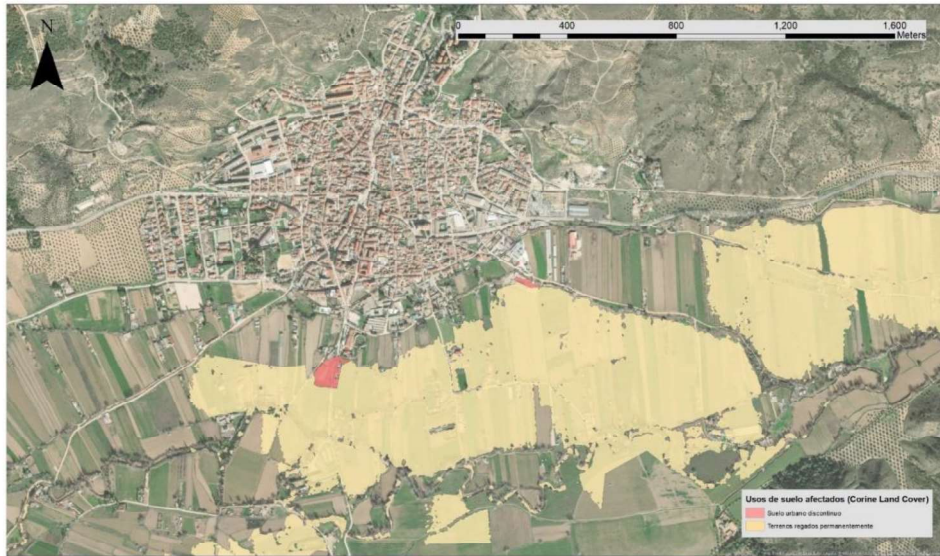
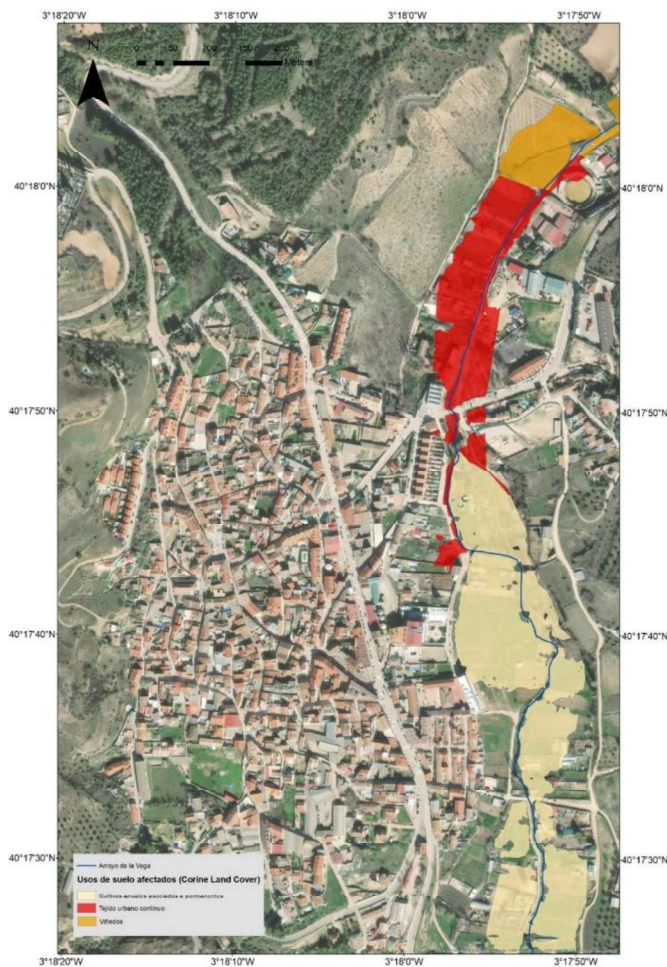


Figura 38. Representación de los usos de suelo (Corine Land Cover) afectados por la lámina de inundación con riesgo a quinientos años en Morata de Tajuña. Fuente: software ArcMap. Elaboración propia.



En el caso de Valdilecha, el 58% del terreno afectado por riesgo de inundación pertenece a la clasificación de cultivos anuales asociados a permanentes, seguido del 27% del terreno clasificado como tejido urbano continuo y el 15% clasificado como viñedos.

Figura 39. Representación de los usos de suelo (Corine Land Cover) afectados por la lámina de inundación con riesgo a quinientos años en Valdilecha. Fuente: software ArcMap. Elaboración propia.

Los valores resultantes de este cálculo se han recogido en la siguiente tabla:

Clasificación Corine Land Cover	Superficie con riesgo potencial de inundación (ha)	Superficie aproximada con riesgo potencial de inundación (%)
PERALES DE TAJUÑA		
Tejido urbano continuo	7.29	7
Terrenos regados permanentemente	91.91	92
Olivares	0.17	1
MORATA DE TAJUÑA		
Tejido urbano discontinuo	1.06	1
Terrenos regados permanentemente	251.55	99
VALDILECHA		
Tejido urbano continuo	2.75	27
Viñedos	1.37	15
Cultivos anuales asociados a permanentes	5.99	58

Figura 40. Superficie afectada por el riesgo de inundación a quinientos años en hectáreas y porcentaje para los tres ámbitos de estudio. Elaboración propia.

A pesar de no estar clasificado como terreno urbano continuo o discontinuo, las zonas clasificadas como “terreno regado permanentemente”, tanto en Perales de Tajuña como en Morata de Tajuña, cuentan con edificaciones aisladas que pueden ser afectadas en caso de inundación. En el primer caso, se han podido identificar un total de 65 edificaciones aisladas, tratándose de parcelas residenciales o edificaciones destinadas a labores agrícolas. En el segundo caso, se han identificado un total de 110 edificaciones, también dedicadas a labores agrícolas o residenciales, alguna de ellas transformadas como viviendas habituales o segundas residencias.

En el caso de Valdilecha, las edificaciones aisladas se encuentran en los terrenos clasificados como viñedos o cultivos anuales asociados a permanentes, siendo un total de 2 edificaciones en el primer caso y 17 en el segundo.

Para una mejor visualización de la exposición de estas edificaciones aisladas, se ha generado una cartografía especializada con los puntos de localización de estas, unidos a aquellos terrenos clasificados como urbanos continuos y/o discontinuos (figuras 41, 42 y 43).

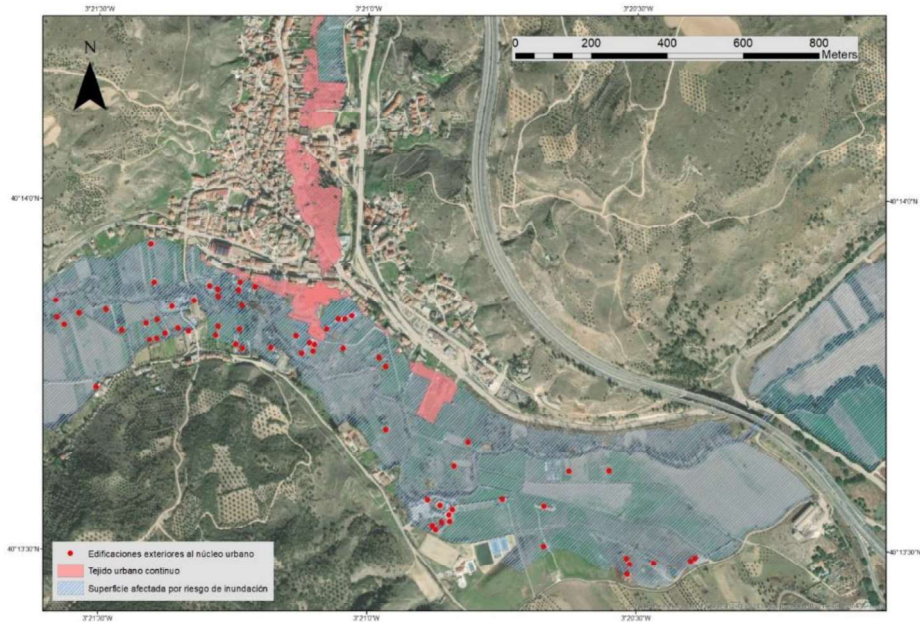


Figura 41. Representación del terreno urbano continuo y edificaciones exteriores afectadas por la lámina de inundación con riesgo a quinientos años en Peralas de Tajuña. Fuente: software ArcMap. Elaboración propia.

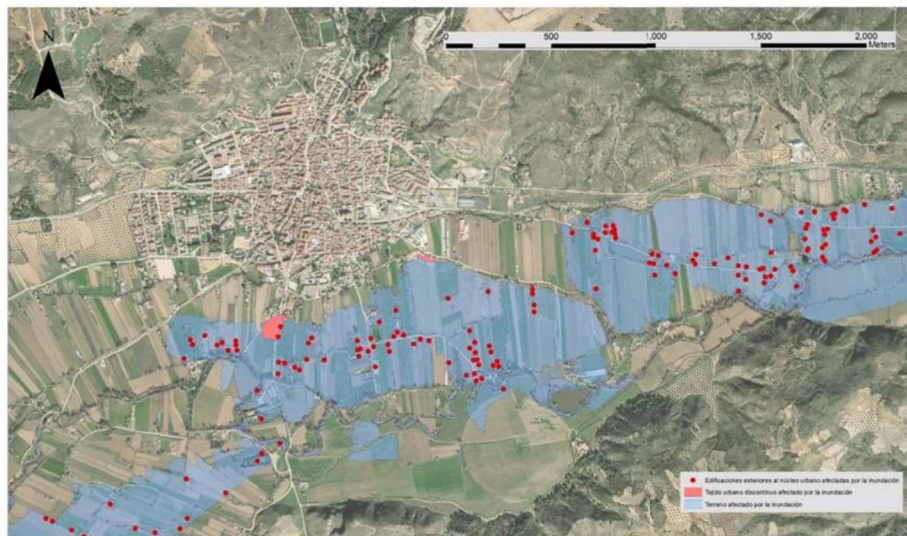


Figura 42. Representación del terreno urbano continuo y edificaciones exteriores afectadas por la lámina de inundación con riesgo a quinientos años en Morata de Tajuña. Fuente: software ArcMap. Elaboración propia.

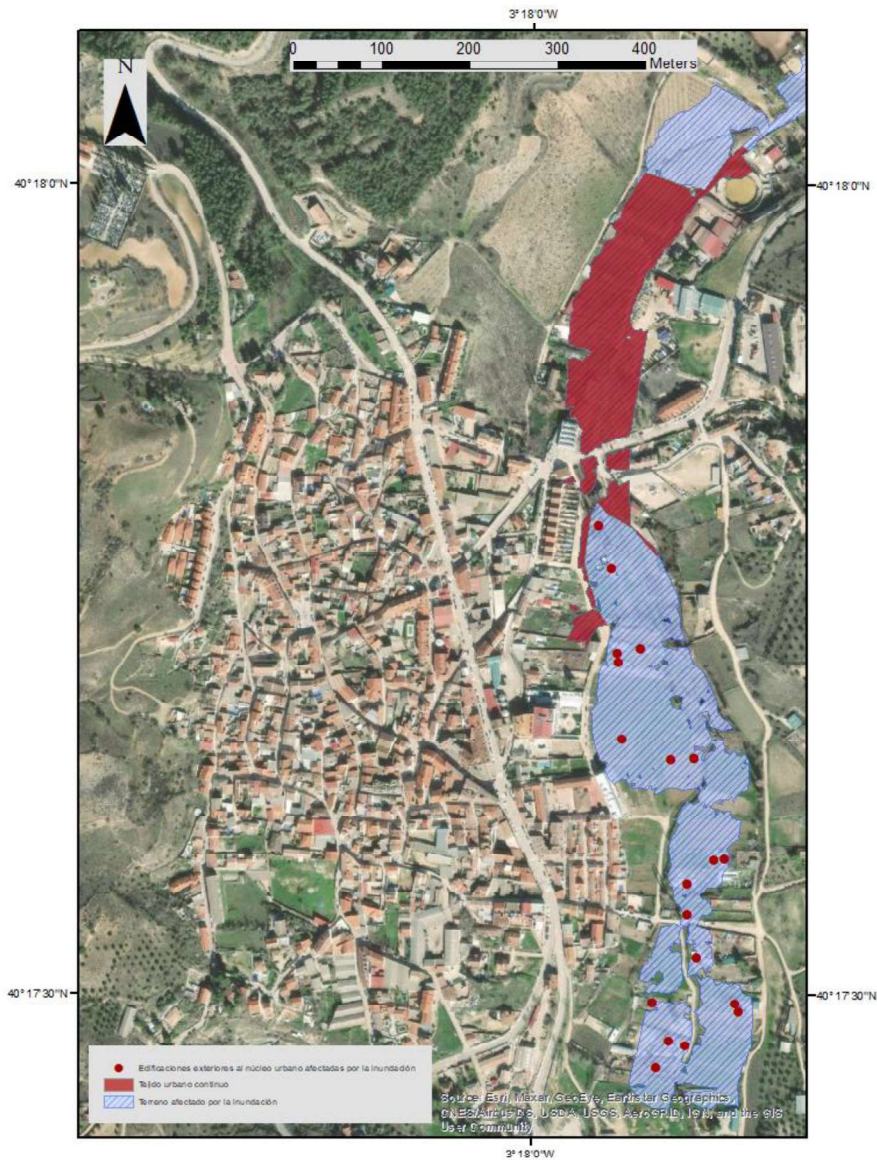


Figura 43. Representación del terreno urbano continuo y edificaciones exteriores afectadas por la lámina de inundación con riesgo a quinientos años en Valdilecha. Fuente: software ArcMap. Elaboración propia.

Teniendo en cuenta los datos de densidad de población (hab/km²) aportados por el Banco de Estudios Estructurales del Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid en cada uno de los ámbitos de estudio, la estimación de la población en riesgo de inundación en los diferentes periodos de retorno puede observarse en la figura 44.

DENSIDAD DE POBLACIÓN EN 2020 (hab/km ²)	PERIODO DE RETORNO (años)	POBLACIÓN AFECTADA ESTIMADA (habitantes)
PERALES DE TAJUÑA		
60.62	10	45
	100	55
	500	60
MORATA DE TAJUÑA		
173.15	10	26
	100	35
	500	44
VALDILECHA		
70.03	10	5
	100	7
	500	8

Figura 44. Estimación de la población susceptible a sufrir inundaciones en los diferentes periodos de retorno. Elaboración propia.

5.3. ANÁLISIS VISUAL Y CÁLCULO DEL NDVI EN IMÁGENES SATÉLITE

En primer lugar se presentan los resultados procedentes del análisis visual de la combinación de bandas de la imagen Sentinel 2A en el software SNAP:

La combinación de las bandas 8a , 4 y 3 de la imagen Sentinel 2A (Figura 45) da lugar a la diferenciación de siete tonalidades principales: en tonos rojos-magentas se aprecian aquellas superficies compuestas por una cubierta de vegetación vigorosa, como regadíos o prados de montaña; en tonos rosados o verdosos aquellas superficies también cubiertas de vegetación pero siendo esta menos densa o de menor grado de crecimiento; en tonos blancos los suelos desprovistos de vegetación mientras que en gris o azul metalizado corresponderán como ciudades o áreas pobladas e industriales; en tonos marrones aquellas zonas de vegetación arbustiva y en tonos dorados aquellos prados secos o suelos con poca vegetación.

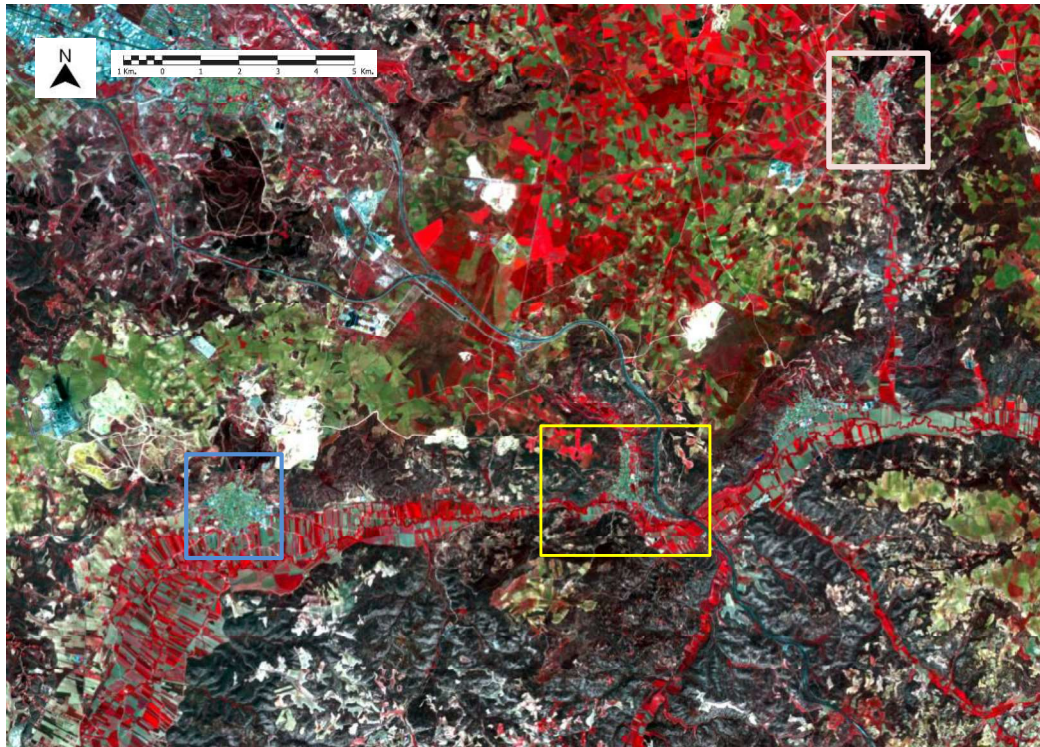


Figura 45. Imagen Sentinel 2A en falso color infrarrojo 8a 43(R-V-A) y localización de Morata de Tajuña (cuadro azul), Perales de Tajuña (cuadro amarillo) y Valdilecha (cuadro rosado). Fuente: software SNAP, datos Copernicus Open Access Hub. Elaboración propia.

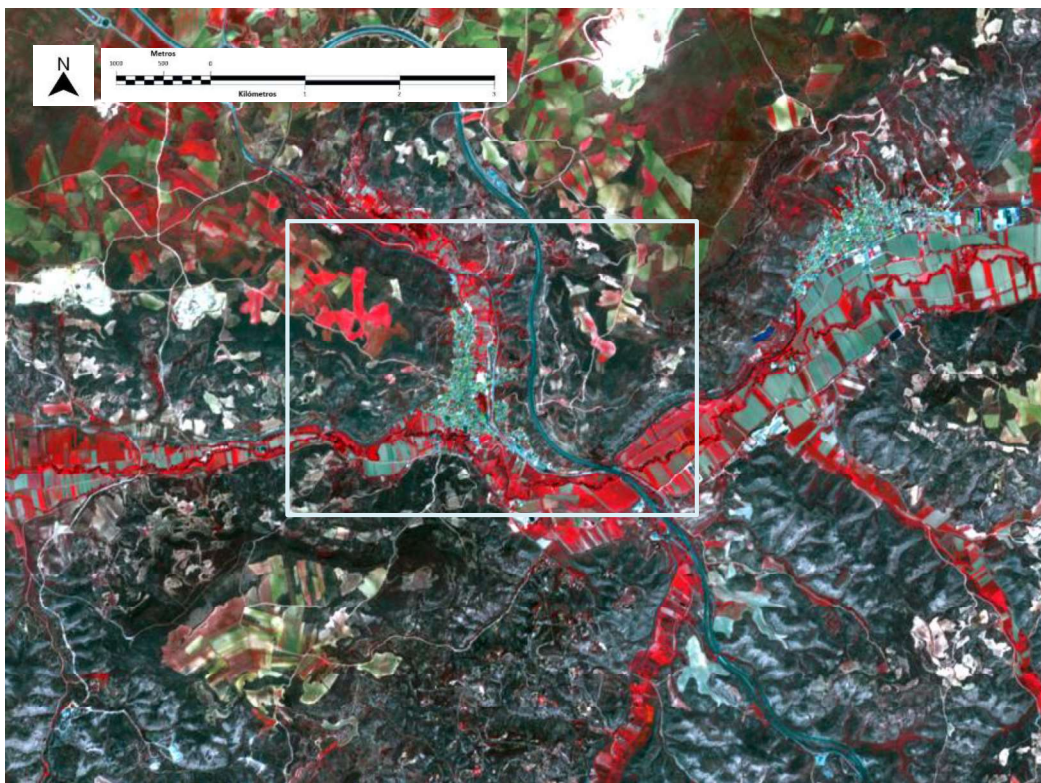


Figura 46. Ampliación Imagen Sentinel 2A en falso color infrarrojo 8a 43(R-V-A) y localización de Perales de Tajuña (cuadro blanco). Fuente: software SNAP, datos Copernicus Open Access Hub. Elaboración propia.

De esta forma, puede observarse como aquellas zonas clasificadas por el *Corine Land Cover* como *Tejido urbano continuo o discontinuo* (Figura 45 y 46) aparecen en tonos grises/azulados, mientras que los clasificados como *Terrenos regados permanentemente* presentan tonos rojizos, confirmando así que la clasificación es correcta.

La combinación de las bandas 11, 8a y 2 (Figura 47 y 48) ha dado como resultado una diferenciación de 5 tonalidades principales: las cubiertas vegetales adquieren tonos verdes brillantes, que serán más claros e intensos a medida que aumente la humedad en la superficie; las zonas cubiertas de agua se aprecian en un color azul oscuro o negro; las superficies desprovistas de vegetación en tonos blancos y las zonas urbanas en tonos azulados o violetas; en tonos rosados se aprecian aquellas zonas con vegetación en crecimiento o escasa.

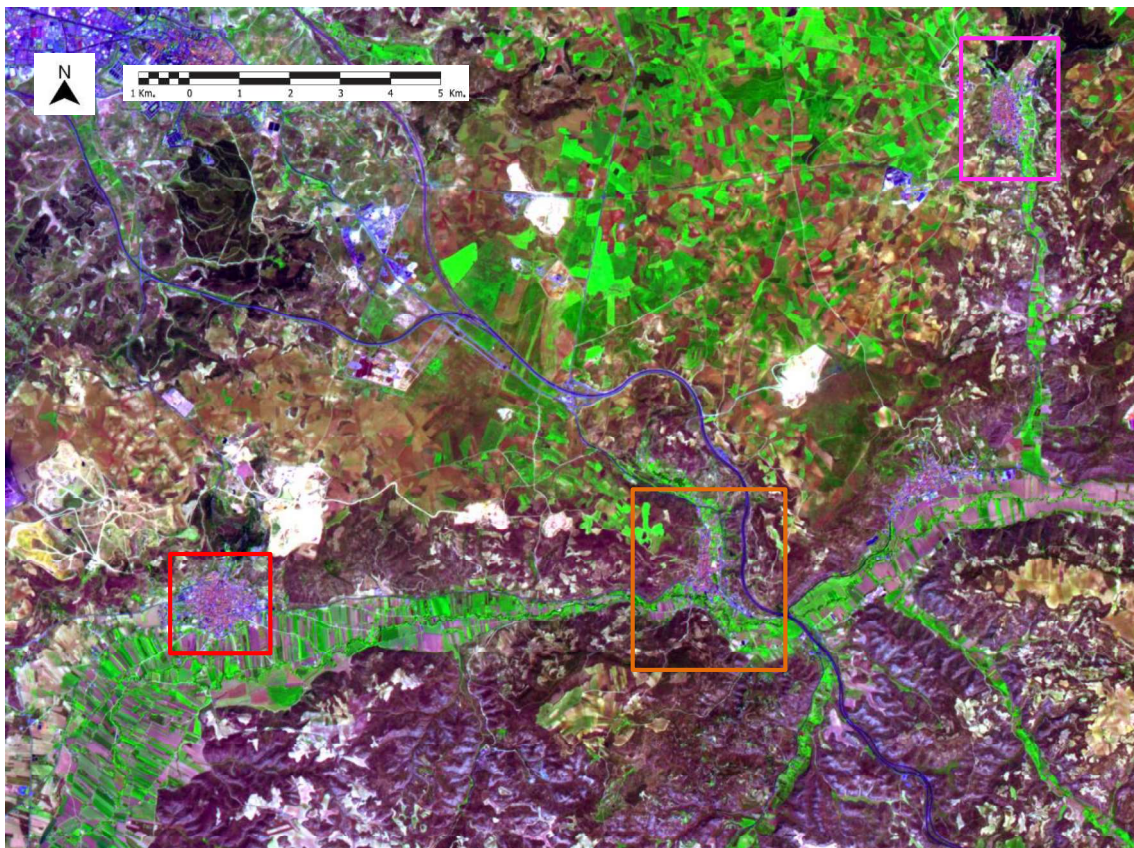


Figura 47. Imagen Sentinel 2A combinación 11, 8a ,2(R-V-A) y localización de Morata de Tajuña (cuadro rojo), Perales de Tajuña (cuadro naranja) y Valdilecha (cuadro rosa). Fuente: software SNAP, datos Copernicus Open Access Hub. Elaboración propia.

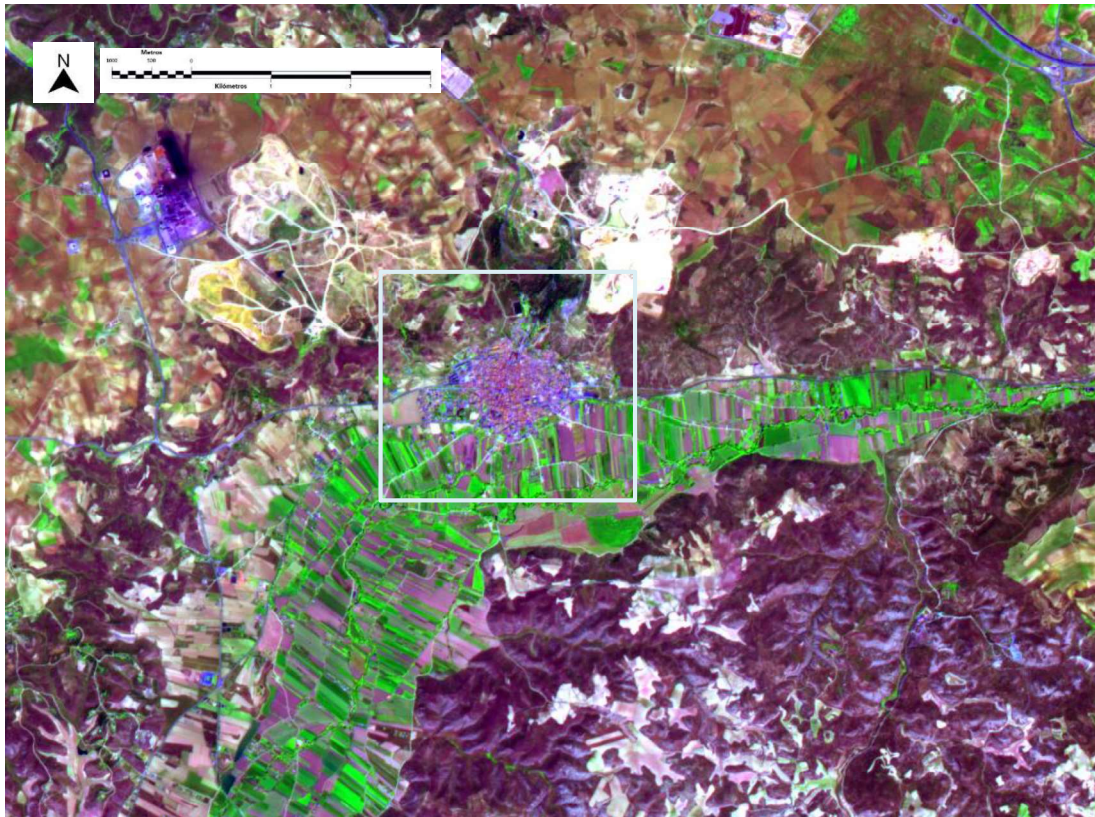


Figura 48. Ampliación Imagen Sentinel 2A combinación 11, 8a ,2(R-V-A) y localización de Morata de Tajuña (cuadro blanco). Fuente: software SNAP, datos Copernicus Open Access Hub. Elaboración propia.

En este caso las superficies clasificadas por *Corine Land Cover* como *Tejido urbano continuo o discontinuo* se aprecian en tonos violetas o azulados, mientras que los clasificados como *Terrenos regados permanentemente* presentan colores verdes vivos o rosados.

En segundo lugar, el cálculo del índice NDVI sobre la imagen SPOT 5 ha dado como resultado una imagen en la que se diferencian en colores blancos aquellas zonas desprovistas de vegetación, en colores grises las cubiertas por vegetación poco densa o escasa y en colores blancos aquellas cubiertas de vegetación densa y de alto desarrollo (Figuras 49, 50 y 51). Comparando estos resultados con los obtenidos en gracias a la clasificación *Corine Land Cover*, se observa como las superficies clasificadas como terrenos regados permanentemente se aprecian en su mayor parte en colores blancos, aunque también se observan colores grises o negros procedentes de parcelas abandonadas o con poca vegetación. Por su parte, las superficies clasificadas como terreno urbano continuo o discontinuo se visualizan en color negro.

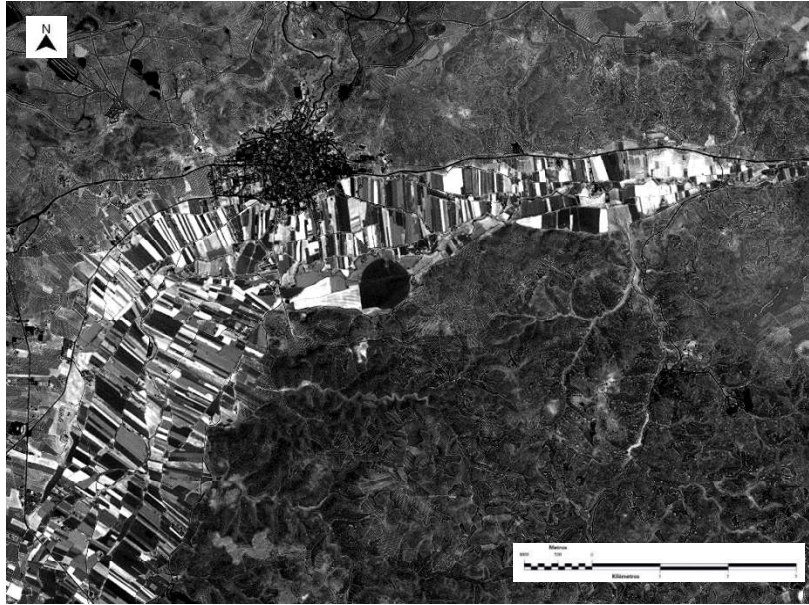


Figura 49. Índice NDVI en Morata de Tajuña. Fuente: software ERDAS Imagine 2018. Elaboración propia.

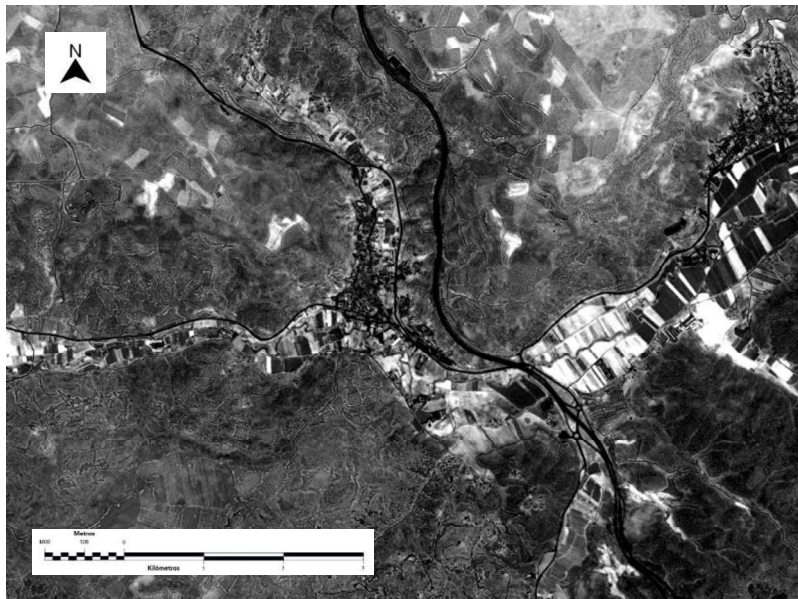


Figura 50. Índice NDVI en Perales de Tajuña. Fuente: software ERDAS Imagine 2018. Elaboración propia.

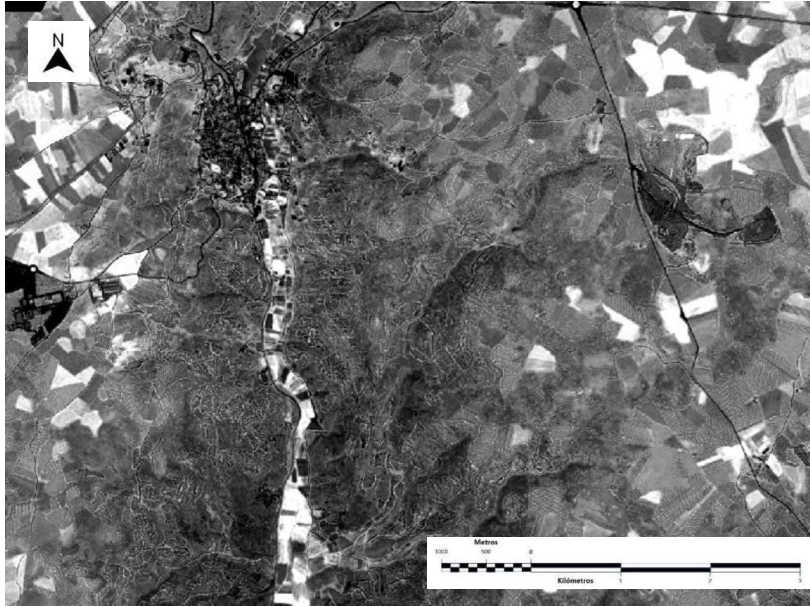


Figura 51. Índice NDVI en Valdilecha. Fuente: software ERDAS Imagine 2018. Elaboración propia.

Observando los resultados de la cuenca completa (Figura 52), se aprecia como la vegetación vigorosa y bien desarrollada se encuentra principalmente a lo largo del cauce principal del río Tajuña y en la zona noroeste de la misma. Esto se debe a que es en estas zonas donde se encuentran la mayor parte de los cultivos de regadío, coincidentes con terrenos de pendientes muy bajas y de composición caliza.

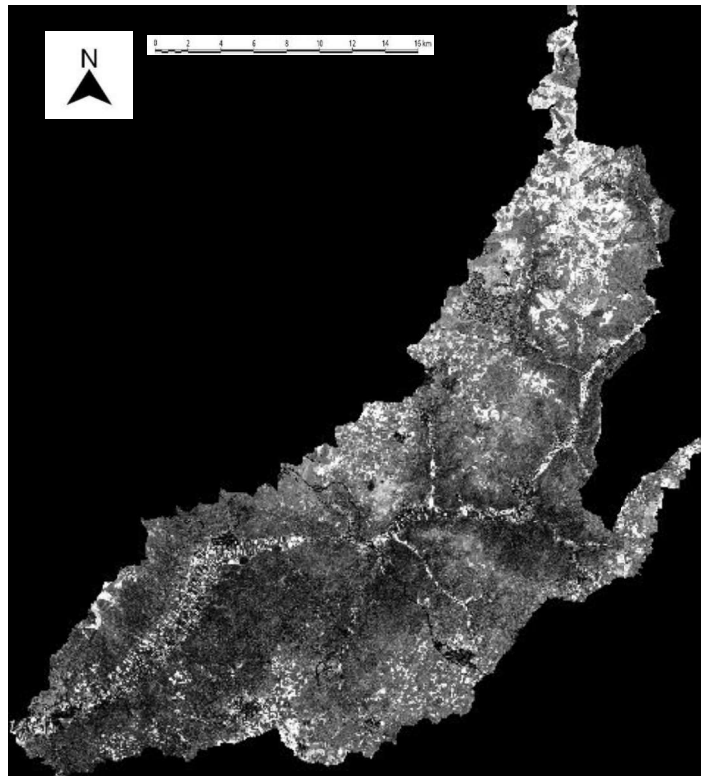


Figura 52. Índice NDVI en la cuenca del río Tajuña. Fuente: software ERDAS Imagine 2018. Elaboración propia.

6. REFLEXIONES FINALES Y CONCLUSIONES.

El grado de precisión de este estudio se ve condicionado por factores referentes a la metodología y al cálculo de resultados:

La metodología llevada a cabo para la representación y cálculo del riesgo de inundaciones no ha tenido en cuenta la presencia de infraestructuras como puentes, diques o tuberías, lo que puede dar lugar a imprecisiones en la superficie de inundación generada automáticamente por el software *HEC-RAS*. Además, las llanuras de inundación o *Flow paths* han sido delimitadas de forma manual teniendo como referencia la imagen del *SNCZI*, ya que este servicio no da la oportunidad de descargar las capas en formato vectorial o raster. Este factor puede suponer una imprecisión de algunos metros respecto al límite de referencia. Sumado a esto, el trabajo de campo ha servido para conocer el área de estudio y comprobar la validez de algunos resultados, pero sería recomendable realizar trabajos post-gabinete que permitan valorar la microtopografía del cauce y sus alrededores, ya que debido a esto el valor del coeficiente de rugosidad puede variar, pudiendo provocar cambios en la superficie total afectada en caso de inundación.

Respecto al cálculo de la población total afectada por este riesgo, se ha tenido en cuenta la densidad de población por kilómetro cuadrado, pudiendo mejorarse en el caso de tener la información de la población asentada en cada uno de los edificios de los núcleos urbanos continuos y de las residencias exteriores a éste.

Los resultados obtenidos en el caso de Perales de Tajuña y Valdilecha resultan acordes a lo esperado, con llanuras de inundación a cada lado del cauce y variando según la pendiente y tipo de terreno. Sin embargo, en el caso de Morata de Tajuña los resultados resultan ser poco precisos o erróneos, mostrando la superficie inundada lejos del cauce principal en muchos de sus tramos. El proceso de generación cartográfica en este caso se ha repetido varias veces, modificando las variables con un mayor índice de error que pudiesen estar provocando estos problemas (como puede ser la digitalización manual de la geometría del cauce o el cálculo de la rugosidad de este). Sin embargo, los resultados han sido muy similares en cada uno de los casos, provocando la imposibilidad de una mejora en los mismos.

Las Tecnologías de la Información Geográfica (TIG) han asumido un papel fundamental en el desarrollo de esta investigación, ya que los resultados y cálculos finales se basan en la cartografía generada a partir de estas. Las TIG suponen un gran avance en lo que respecta a prevención de riesgos naturales, ya que gracias a ellas es posible delimitar aquellas zonas con mayor peligro a

ser afectadas por desastres naturales de forma rápida y muy precisa, evitando así pérdidas humanas y económicas y mejorando la ordenación territorial a pequeña y gran escala.

Gracias a las TIG ha sido posible cumplir con los objetivos propuestos al inicio de este estudio, habiendo podido generar las cartografías de riesgo de inundación en los tres periodos de retorno y determinar tanto la clasificación del uso de suelo como el total de población afectado en cada uno de ellos. Además, y gracias a las tecnologías especializadas en imágenes satélite, se ha podido corroborar que la clasificación del suelo es la correcta, dando un valor superior a los resultados obtenidos.

Sumado a esto, se ha podido comprobar como la ordenación territorial en los tres municipios estudiados no ha tenido en cuenta lo establecido en las últimas modificaciones del Reglamento del Dominio Público Hidráulico (Real Decreto 903/2010 y Real Decreto 638/2016), que establecen como zonas no urbanizables aquellas calificadas con riesgo de inundación y que solo permiten el desarrollo de actividades no vulnerables frente avenidas.

En el caso de Perales de Tajuña y Valdilecha, tanto suelo calificado como “Tejido urbano continuo” como edificaciones aisladas exteriores al mismo son afectadas en los tres periodos de retorno en caso de inundación. En Morata de Tajuña el suelo calificado como “Suelo urbano discontinuo” es únicamente afectado en un periodo de retorno de 500 años, pero las edificaciones aisladas exteriores sí que son afectadas en los tres periodos.

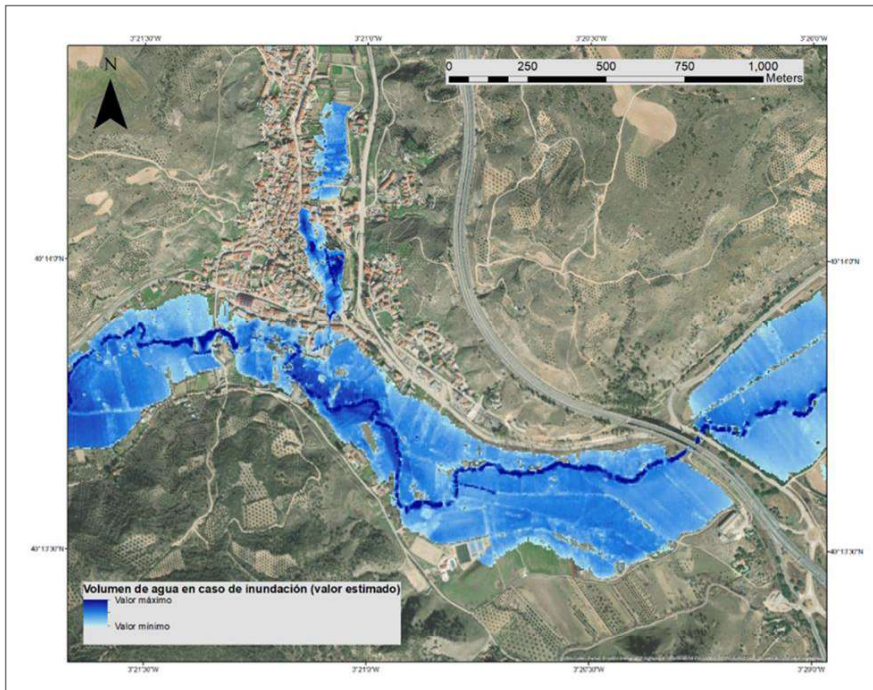
Estas afecciones muestran la urgencia de llevar a cabo una ordenación territorial acorde a los planes de prevención de riesgos frente inundaciones, ya que de esta manera se podrán prevenir daños no solo económicos sino también en vidas humanas.

7. REFERENCIAS

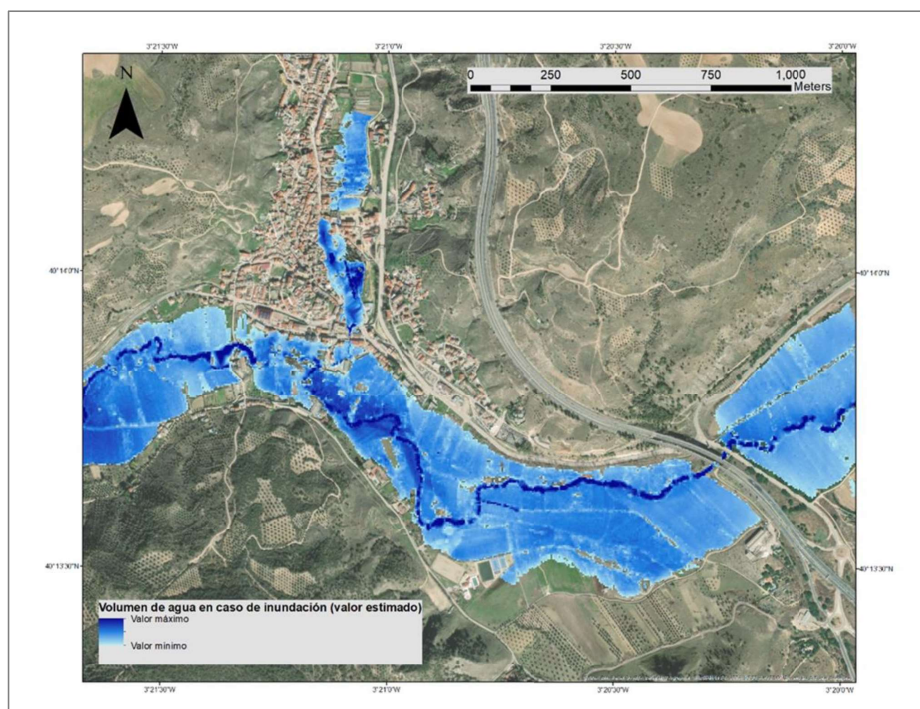
- Ayuntamiento de Ambite. (2021). *Entorno Natural del municipio*. Obtenido de <https://www.ambite.es/entorno-natural>
- Ayuntamiento de Madrid. (2006). *Guía Turística: Alcarria de Madrid*.
- Benito López, J. (2017). *Estudio territorial en el Valle del Tajuña (Madrid): una aproximación arqueológica*. Universidad Complutense de Madrid.
- Carcedo, F. A., & Cantos, J. (2002). *Riesgos naturales*. Ariel.
- Casafont, L. (2011). Las inundaciones en España. La nueva Directiva Europea de inundaciones. *Revista de Obras Públicas* n° 3.520, 7-18.
- CEDEX. (2018). *ESTACIONES DE AFORO: Datos de estación foronómica*. Ministerio para la Transición Ecológica. Obtenido de <https://ceh.cedex.es/anuarioaforos/afo/estaf-datos.asp?indroea=3080>
- Comunidad de Madrid. (2021). *Río Tajuña*. Obtenido de https://www.concentracionvegadeltajuna.com/?page_id=590
- Confederación Hidrográfica del Tajo. (2020). *Revisión y actualización de los mapas de peligrosidad y riesgo de inundación. Segundo ciclo*. Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico.
- Confederación Hidrográfica del Tajo. (2021). *Contexto Geológico y Geomorfológico*. Obtenido de <http://www.chtajo.es/LaCuenca/MedioFisico/Paginas/ContextoGeol%C3%B3gico.aspx>
- Confederación Hidrográfica del Tajo. (2021). *La cuenca: Rasgos Climáticos*. Obtenido de <http://www.chtajo.es/LaCuenca/MedioFisico/Paginas/RasgosClimaticos.aspx>
- Consejería de Medio Ambiente de la Comunidad de Madrid. (1999). *El Medio Ambiente en la Comunidad de Madrid. Capítulo III: el agua*.
- Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio de la Comunidad de Madrid. (2016). *El medio ambiente en la Comunidad de Madrid*. Madrid.
- Consejería de Medio Ambiente, Administración Local y Ordenación del Territorio. (2020). *Masas de agua subterránea de la Comunidad de Madrid*.
- Datos abiertos de la Comunidad de Madrid. (2021). *Catálogo de Datos abiertos de la Comunidad de Madrid: Altimetría*. Obtenido de <https://datos.comunidad.madrid/catalogo/organization/comunidad-de-madrid>
- ESRI. (07 de 2020). *El análisis estadístico para datasets LAS (ArcGIS Desktop)*. Obtenido de <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/las-dataset/statistical-analysis-for-las-datasets.htm>

- ESRI. (07 de 2021). *ArcGIS Desktop ¿Qué son los datos LIDAR?* Obtenido de <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/las-dataset/what-is-lidar-data-.htm>
- FAO. (2009). *Guía para la descripción de perfiles del suelo*. . World Soil Resources Reports.
- Felices, A. R. (2007). *Hidráulica de tuberías y canales*. Lima. : Consejo departamental de Lima. Colegio de ingenieros del Perú. .
- Fereire, C. F., Cascón, M. V., Dominguez, A. G., & Nieto, I. G. (2011). *Introducción a la teledetección con ERDAS Imagine*. . CSIC.
- García, P. (2018). *Las inundaciones más catastróficas de las últimas décadas en España*. Obtenido de <https://www.tiempo.com/noticias/actualidad/las-inundaciones-mas-catastroficas-de-las-ultimas-decadas-en-espana.html>
- IEDA. (2021). *Clima mediterráneo de interior o continentalizado*. Recuperado el 26 de 05 de 2021, de http://agrega.juntadeandalucia.es/repositorio/18072017/73/es-an_2017071812_9132323/32_clima_mediterraneo_de_interior_o_continentalizado.html
- Instituto Geográfico Nacional . (2021). *Centro de descargas* . Obtenido de <https://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp#>
- Instituto Geográfico Nacional. (03 de 2019). *ATLAS NACIONAL DE ESPAÑA: Clima*. . Recuperado el 2021 de 05 de 27, de <http://atlasnacional.ign.es/wane/Clima>
- López, J. E. (2016). *Estudio territorial en el Valle del Tajuña (Madrid): una aproximación arqueológica*. Madrid.
- López, J. E. (2017). *Estudio territorial en el Valle del Tajuña (Madrid): una aproximación arqueológica*. Universidad Complutense de Madrid.
- Martínez, E. D., López, F., González, A. P., Karampaglidis, T., Matas, J., Parra, L. M., & Nozal, F. (2012). *Geología de la Sierra Norte de Madrid: tan cerca y tan desconocida*. . Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.
- Medina, L. (2018). *Revista Ibérica: Los ríos de Madrid a su paso por la provincia*. Obtenido de <https://www.revistaiberica.com/rios-de-madrid/>
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2021). *Confederación Hidrográfica del Tajo*. Obtenido de <https://hispagua.cedex.es/instituciones/confederaciones/tajo>
- Naredo, J. M., & Frías, J. (2015). El metabolismo socioeconómico de la Comunidad de Madrid, 1996-2010. *Ecosocial*, 691-729.
- Servicio Geológico Mexicano. (2017). *Riesgos geológicos*.
- Valladares, F. (2007). El hábitat mediterráneo continental: un sistema humanizado, cambiante y vulnerable. . En *Ambientes mediterráneos. Funcionamiento, biodiversidad y conservación de los ecosistemas mediterráneos*. (págs. 2019-239). Instituto de Estudios Almerienses (Diputación de Almería).

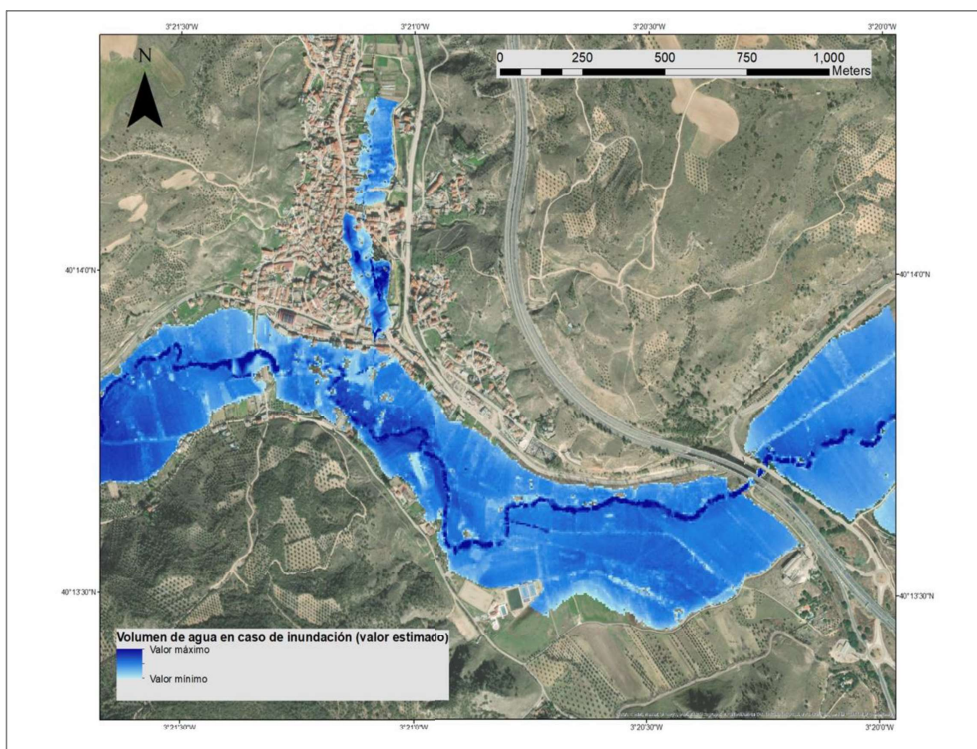
ANEXOS
MAPAS FINALES AMPLIADOS DE LA MODELIZACIÓN
HIDRÁULICA



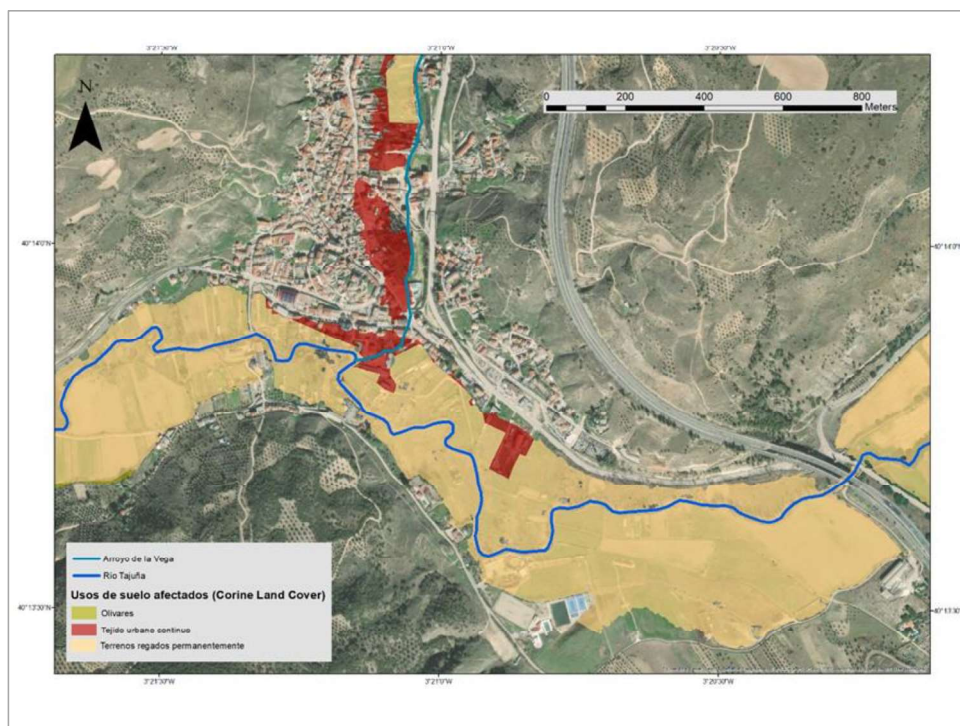
ANEXO 1. Representación de la lámina de inundación a un riesgo de diez años en Perales de Tajuña. Fuente: software ArcMap. Elaboración propia.



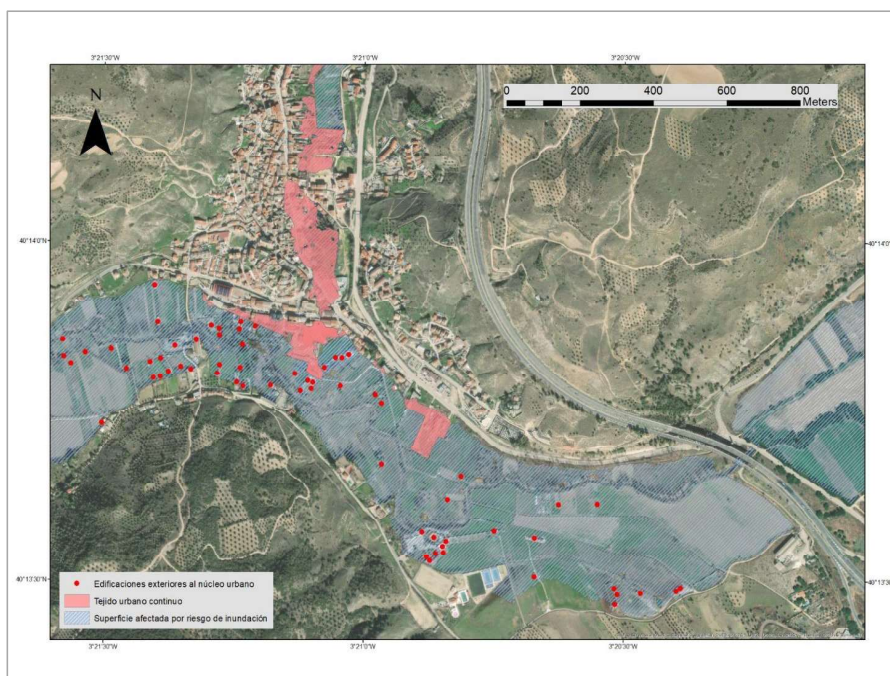
ANEXO 2. Representación de la lámina de inundación a un riesgo de cien años en Perales de Tajuña. Fuente: software ArcMap. Elaboración propia.



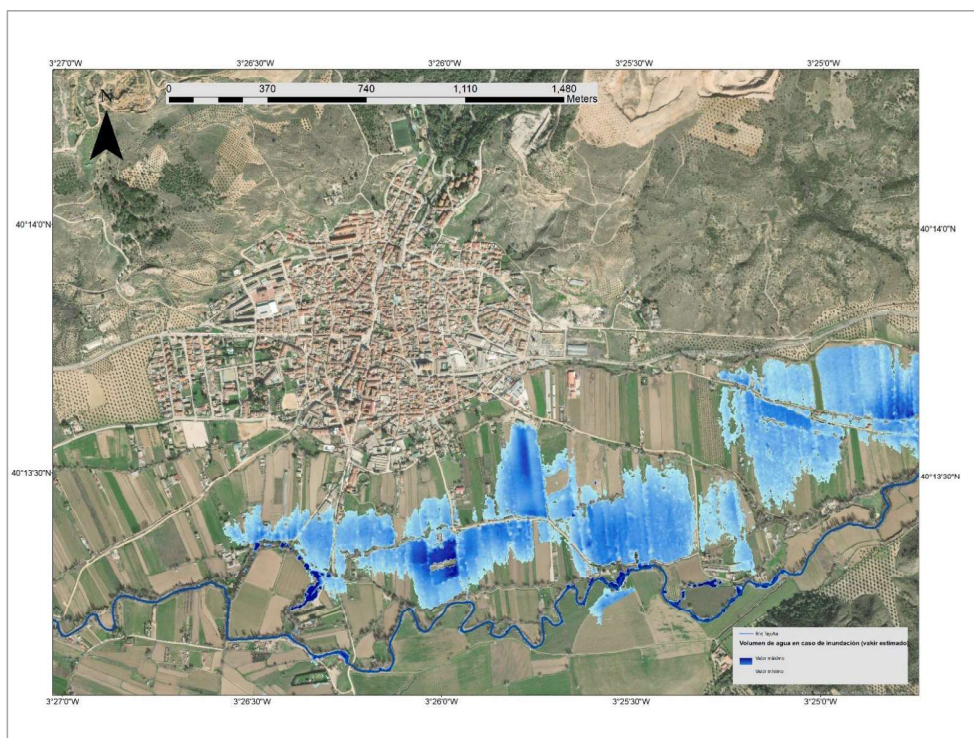
ANEXO 2. Representación de la lámina de inundación a un riesgo de quinientos años en Perales de Tajuña. Fuente: software ArcMap. Elab. propia.



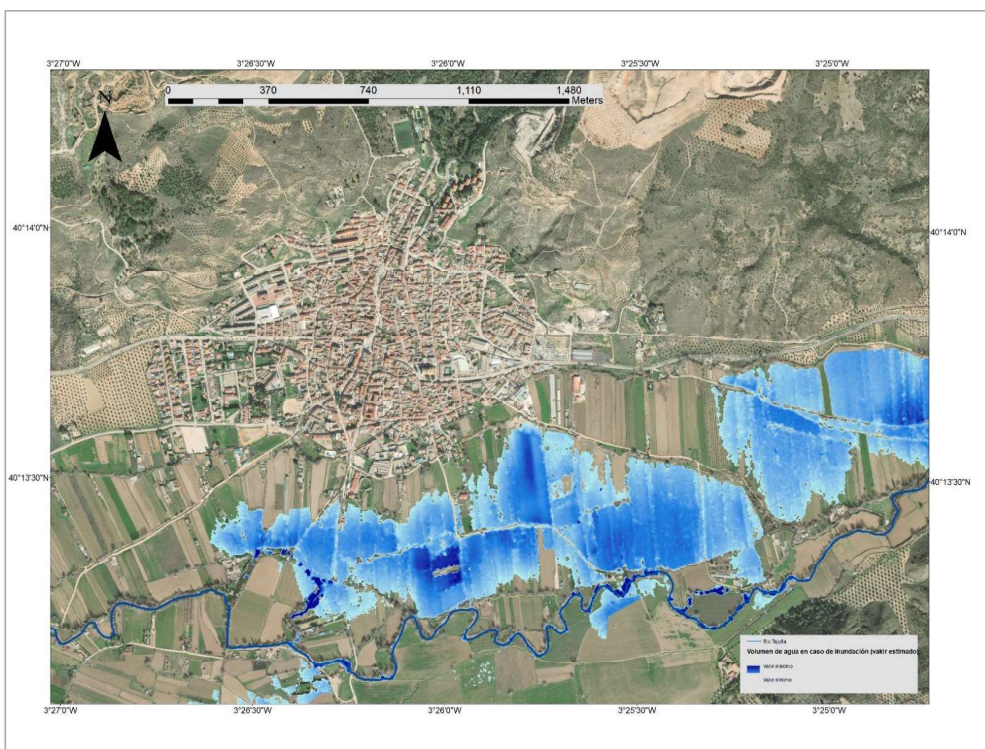
ANEXO 3. Representación de los usos de suelo (Corine Land Cover) afectados por la lámina de inundación con riesgo a quinientos años en Perales de Tajuña. Fuente: software ArcMap. Elaboración propia.



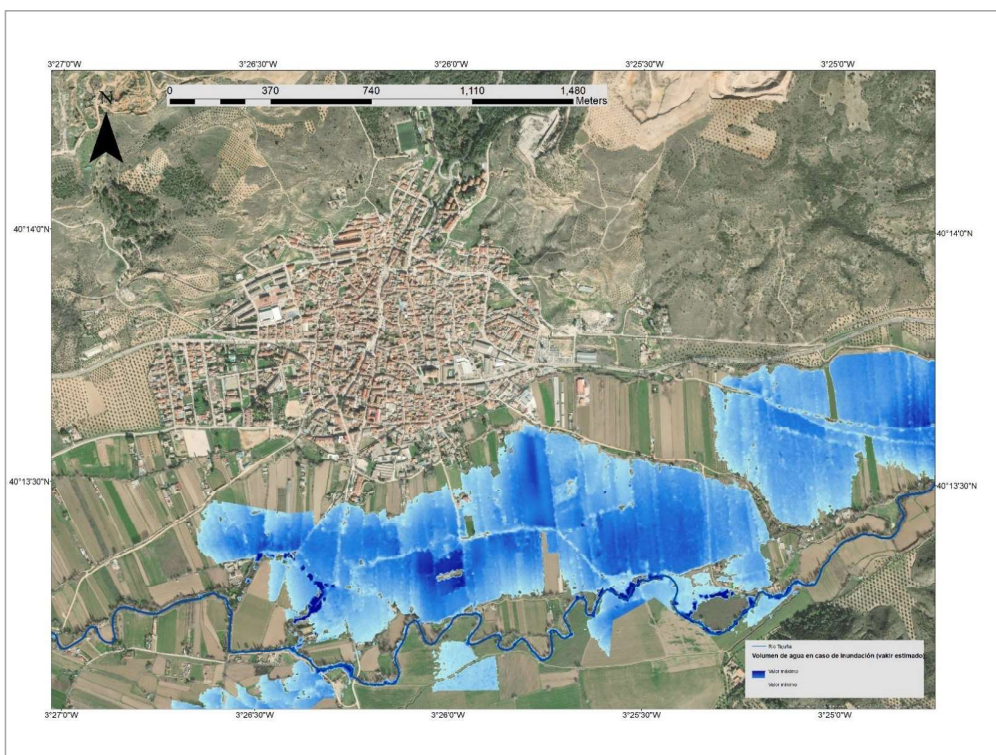
ANEXO 4. Representación del terreno urbano continuo y edificaciones exteriores afectadas por la lámina de inundación con riesgo a quinientos años en Perales de Tajuña. Fuente: software ArcMap. Elaboración propia.



ANEXO 5. Representación de la lámina de inundación a un riesgo de diez años en Morata de Tajuña. Fuente: software ArcMap. Elaboración propia.



ANEXO 6. Representación de la lámina de inundación a un riesgo de cien años en Morata de Tajuña. Fuente: software ArcMap. Elaboración propia.



ANEXO 7. Representación de la lámina de inundación a un riesgo de quinientos años en Morata de Tajuña. Fuente: software ArcMap. Elaboración propia.

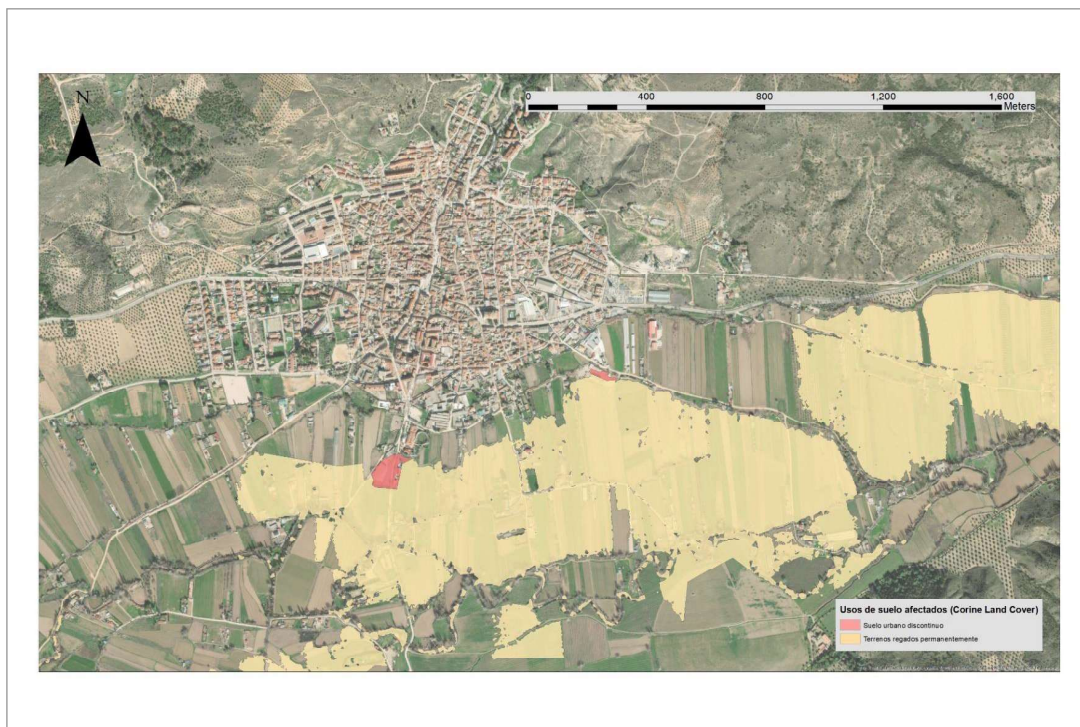
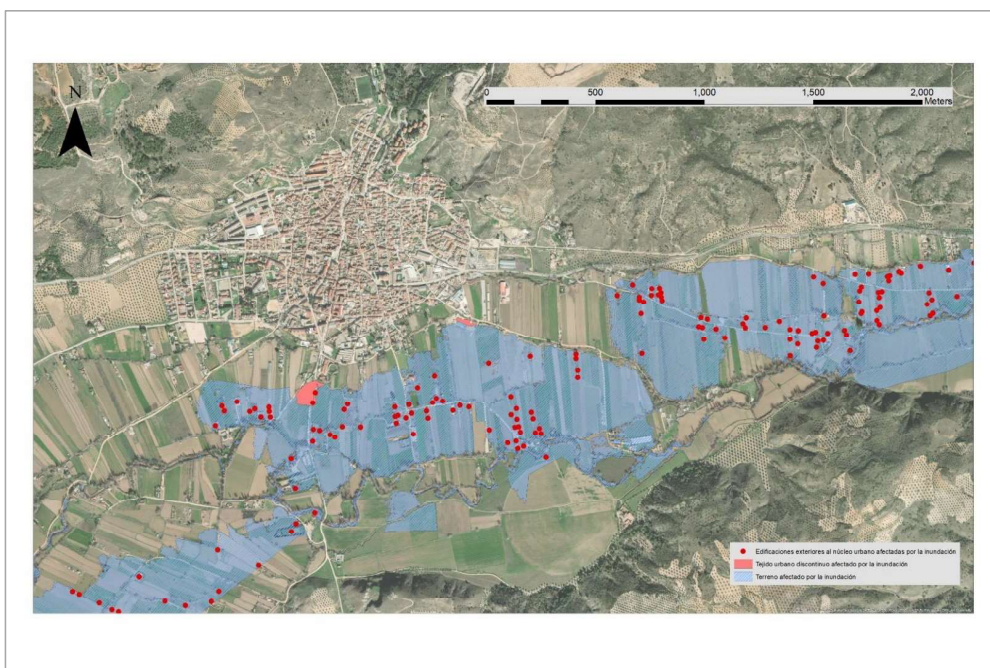
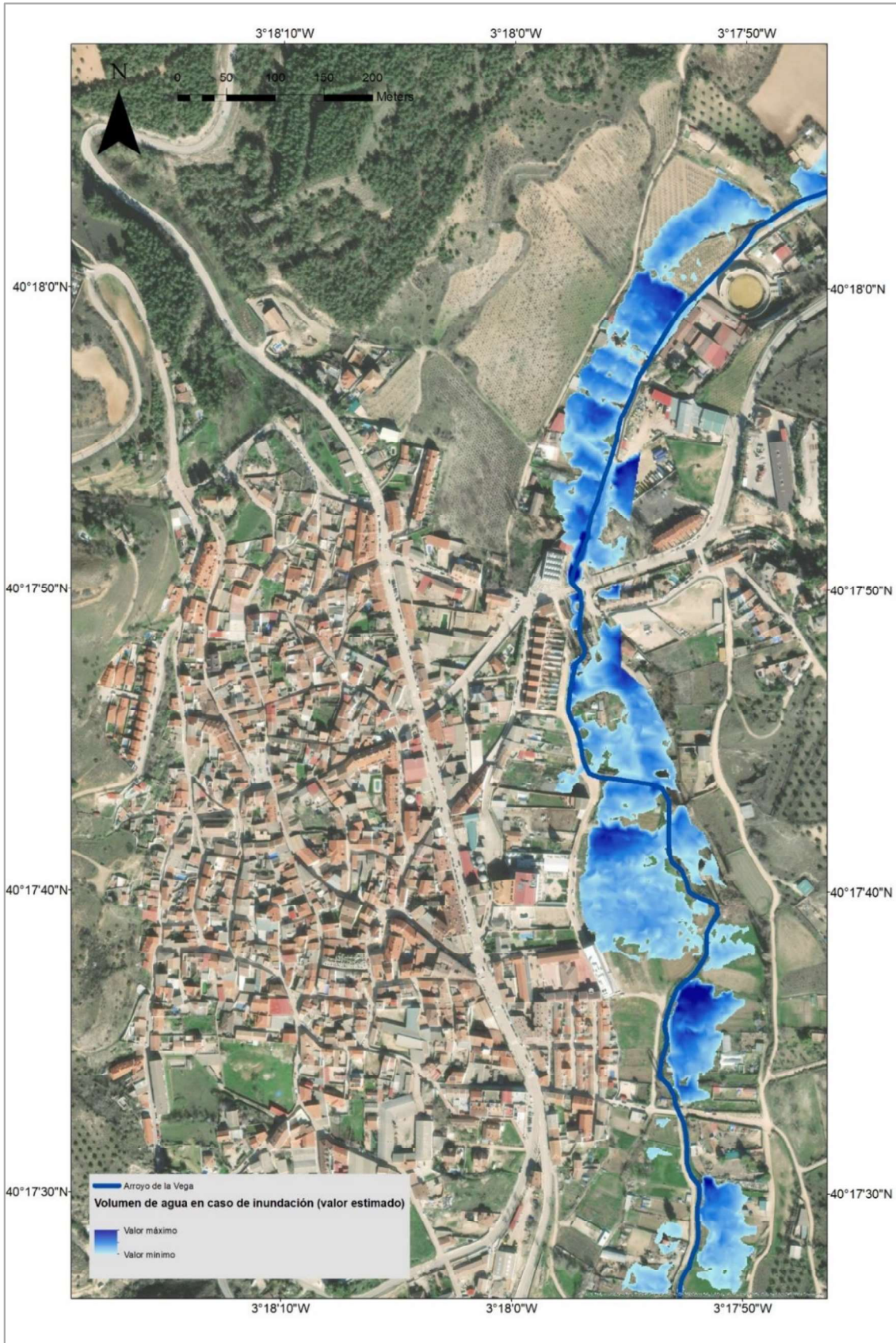


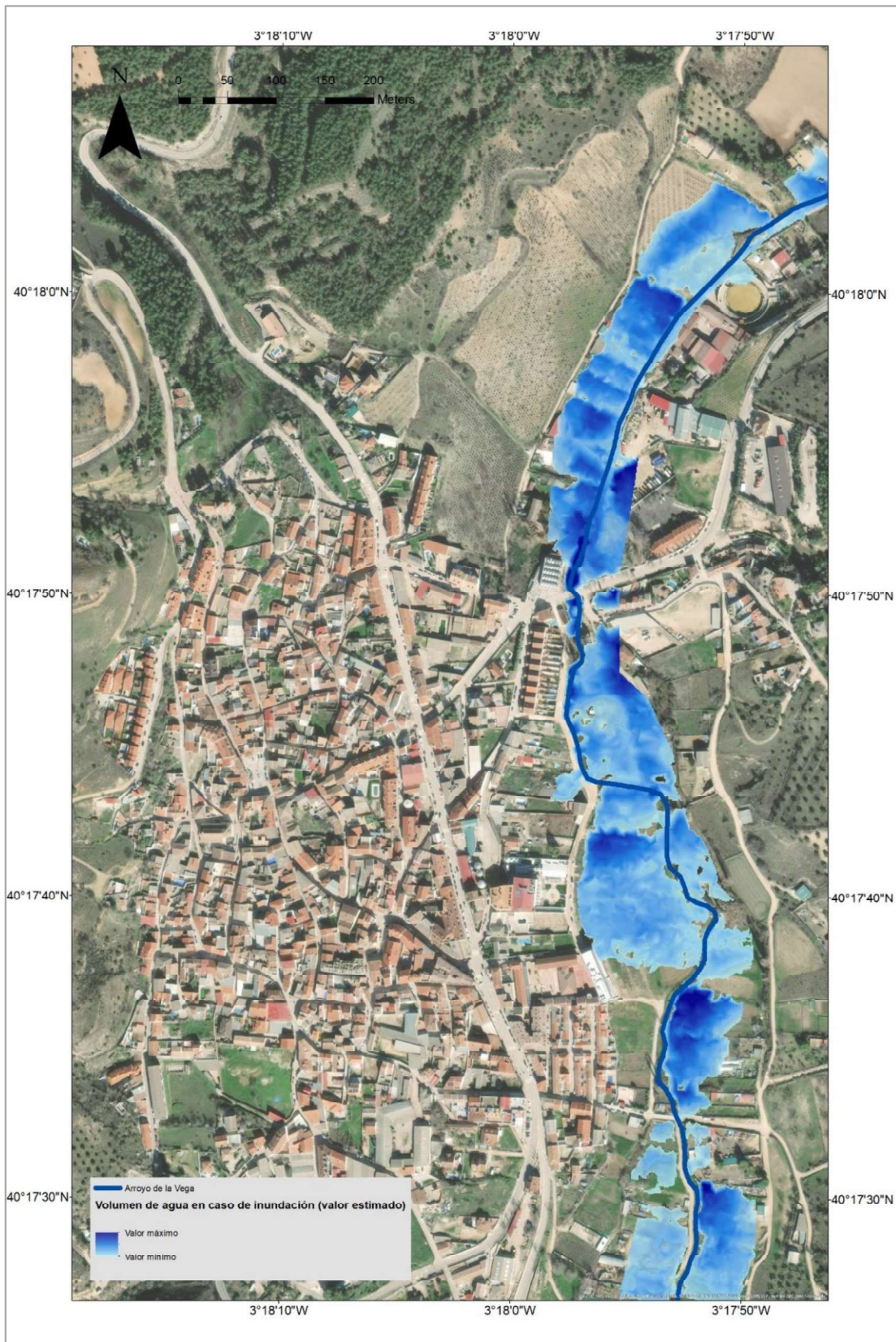
Figura 8. Representación de los usos de suelo (Corine Land Cover) afectados por la lámina de inundación con riesgo a quinientos años en Morata de Tajuña. Fuente: software ArcMap. Elaboración propia.



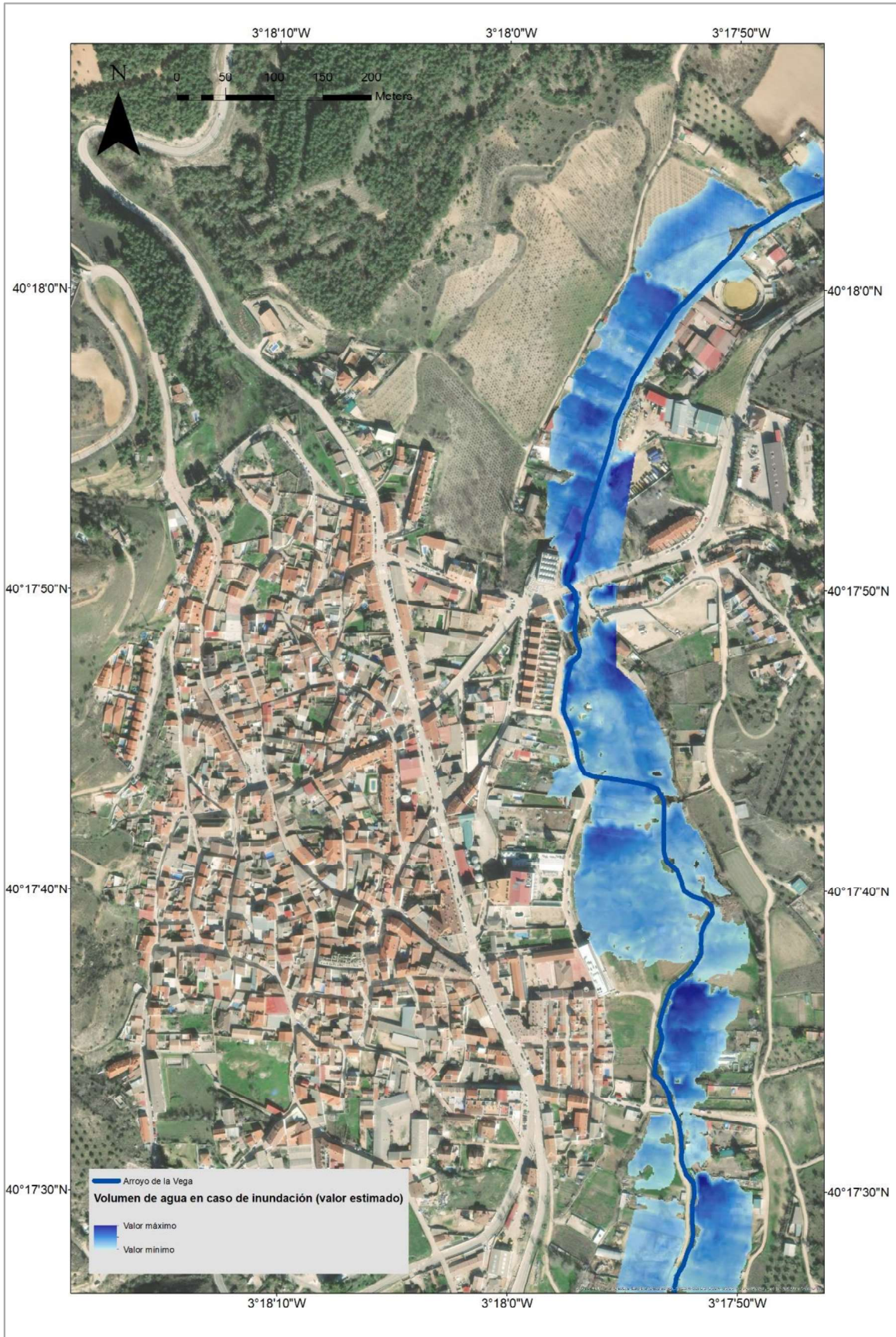
ANEXO 9. Representación del terreno urbano continuo y edificaciones exteriores afectadas por la lámina de inundación con riesgo a quinientos años en Morata de Tajuña.
Fuente: software ArcMap. Elaboración propia



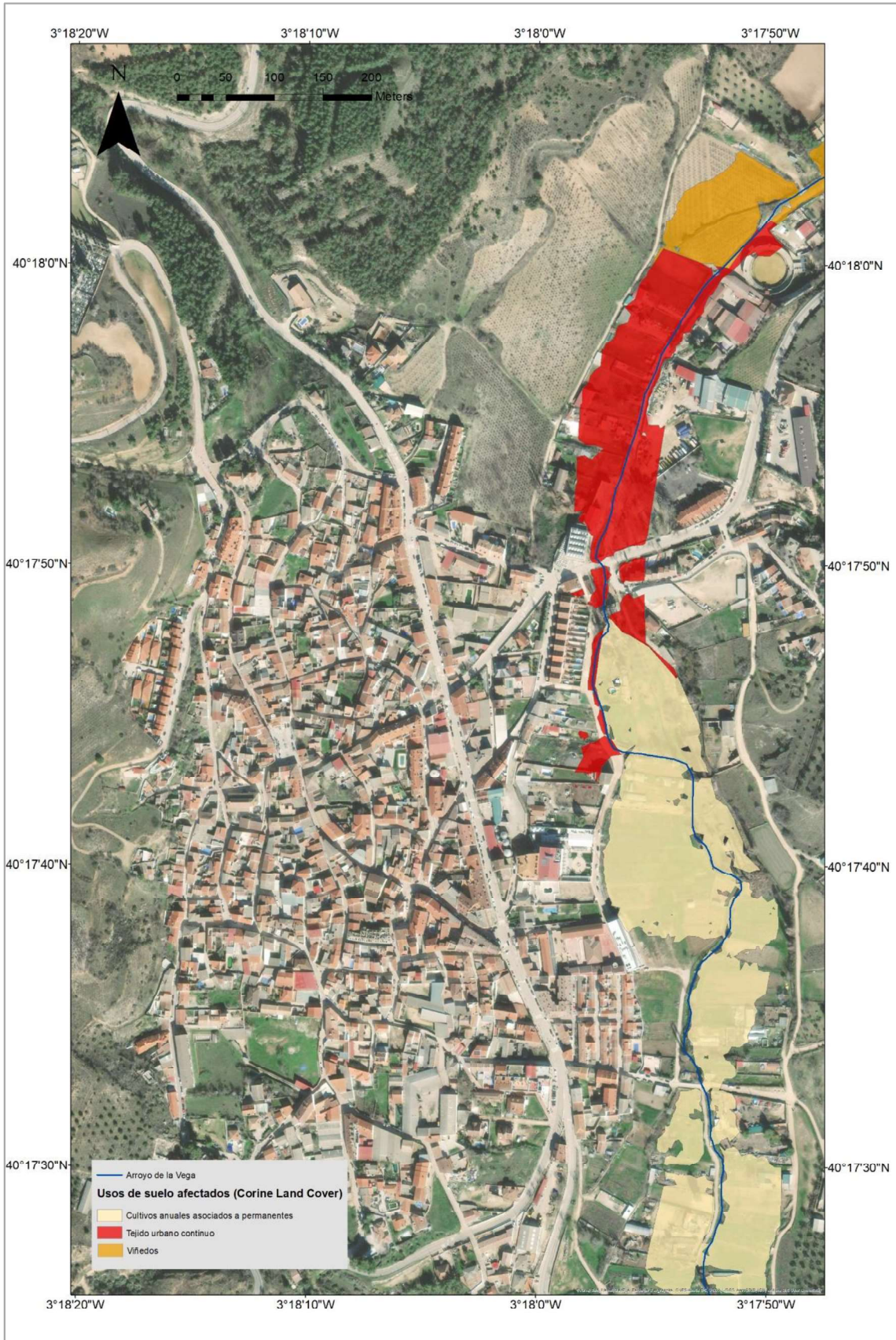
ANEXO 10. Representación de la lámina de inundación a un riesgo de diez años en Valdilecha.
Fuente: software ArcMap. Elaboración propia.



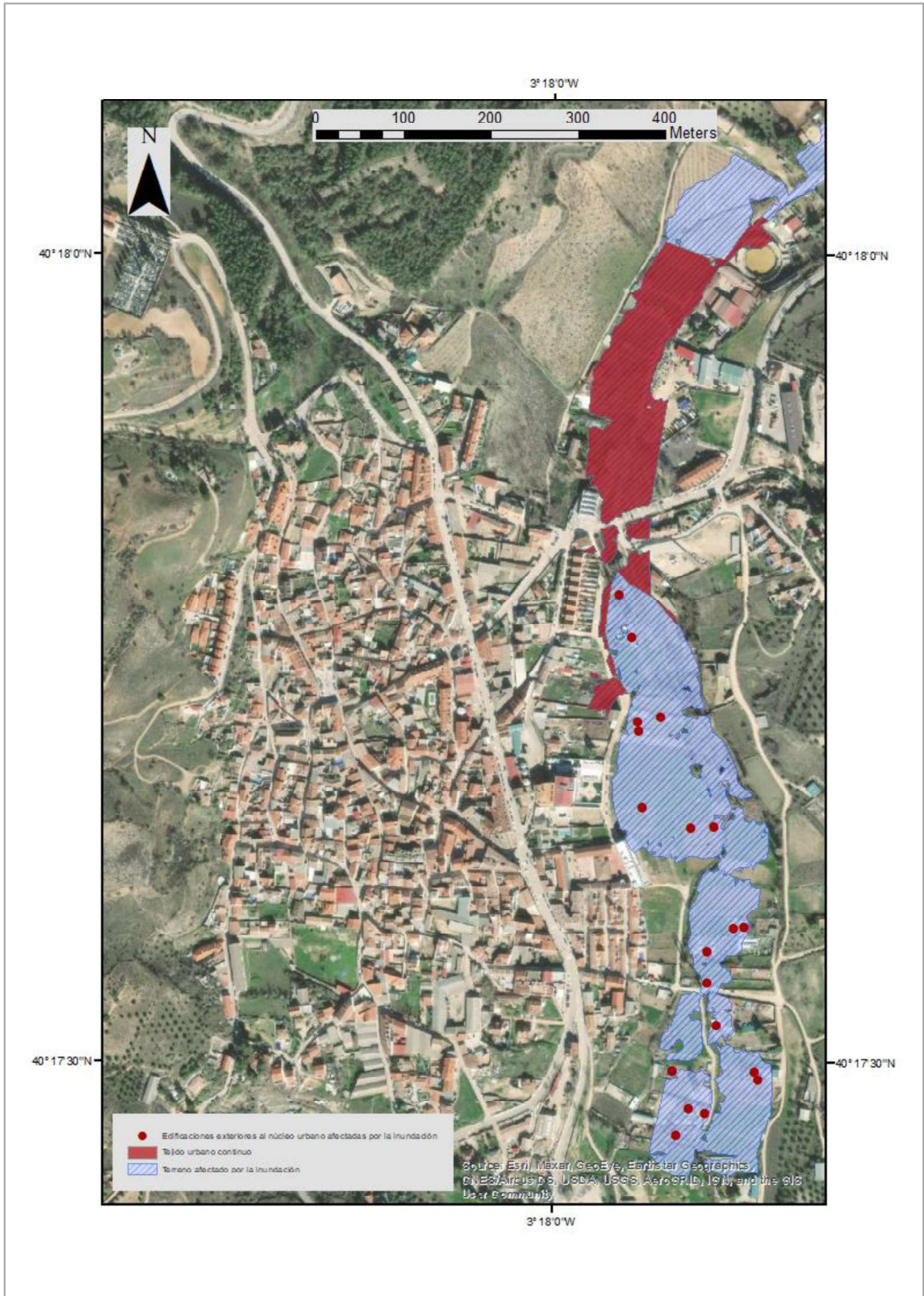
ANEXO 11. Representación de la lámina de inundación a un riesgo de cien años en Valdilecha. Fuente: software ArcMap. Elaboración propia.



ANEXO 12. Representación de la lámina de inundación a un riesgo de quinientos años en Valdilecha.
Fuente: software ArcMap. Elaboración propia.



ANEXO 13. Representación de los usos de suelo (Corine Land Cover) afectados por la lámina de inundación con riesgo a quinientos años en Valdilecha. Fuente: software ArcMap. Elaboración propia.



ANEXO 14. Representación del terreno urbano continuo y edificaciones exteriores afectadas por la lámina de inundación con riesgo a quinientos años en Valdilecha. Fuente: software ArcMap. Elaboración propia.