



Facultad de Ciencias Geológicas
Universidad Complutense de Madrid

MÁSTER UNIVERSITARIO EN GEOLOGÍA
AMBIENTAL

Curso 2021-2022

Cartografía probabilística de la peligrosidad por inundaciones en el entorno de Villafranca del Bierzo (España) mediante el uso del software hidrodinámico Iber. Análisis de daños a edificaciones, personas y vehículos

Probabilistic mapping of flood hazard to the surroundings of Villafranca del Bierzo (Spain) using Iber hydrodynamic software. Analysis of damage to buildings, people and vehicles

LUIS FELIPE CONTRERAS SOTO

TUTOR DEL TRABAJO: JULIO GARROTE REVILLA



Facultad de Ciencias Geológicas
Universidad Complutense de Madrid

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN GEOLOGIA
AMBIENTAL**

Curso 2021-2022

Cartografía probabilística de la peligrosidad por inundaciones en el entorno de Villafranca del Bierzo (España) mediante el uso del software hidrodinámico Iber. Análisis de daños a edificaciones, personas y vehículos

Probabilistic mapping of flood hazard to the surroundings of Villafranca del Bierzo (Spain) using Iber hydrodynamic software. Analysis of damage to buildings, people and vehicles

LUIS FELIPE CONTRERAS SOTO

TUTOR DEL TRABAJO:

JULIO GARROTE REVILLA

Fdo.:



Facultad de Ciencias Geológicas

Universidad Complutense de Madrid

DECLARACIÓN DE NO PLAGIO

NOMBRE APELLIDO APELLIDO (autor) Luis Contreras Soto
con NIF Y8823889-E, estudiante de Máster en Geología Ambiental en la Facultad de Ciencias Geológicas de la Universidad Complutense de Madrid en el curso 2021-2022, como autor/a del trabajo de fin de máster titulado Cartografía probabilística de la peligrosidad por inundaciones en el entorno de Villafranca del Bierzo (España) mediante el uso del software Hidrodinámico Iber. Análisis de daños a edificaciones, personas y vehículos y presentado para la obtención del título correspondiente, cuyo tutor es: Julio Garrote Revilla

DECLARO QUE: El trabajo de fin de máster que presento está elaborado por mí y es original. No copio, ni utilizo ideas, formulaciones, citas integrales e ilustraciones de cualquier obra, artículo, memoria, o documento (en versión impresa o electrónica), sin mencionar de forma clara y estricta su origen, tanto en el cuerpo del texto como en la bibliografía. Así mismo declaro que los datos son veraces y que no he hecho uso de información no autorizada de cualquier fuente escrita de otra persona o de cualquier otra fuente. De igual manera, soy plenamente consciente de que el hecho de no respetar estos extremos es objeto de sanciones universitarias y/o de otro orden.

En Madrid, a 26 de Julio de 20

Fdo. 

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a mi familia por apoyarme siempre en mi formación profesional, en mis viajes por el mundo y en cada aspecto de la vida.

A mi profesor patrocinante, el Dr. Julio Garrote Revilla, por confiar en mi para la realización de este TFM y, por su compromiso y entera disposición para resolver preguntas y dar recomendaciones para el exitoso desarrollo de este trabajo.

Finalmente doy las gracias a mis amigos en Chile y España, y colegas del Máster de Geología Ambiental por estar siempre presente en los momentos de distracción y soporte anímico mientras se realizaba el curso y el TFM.

“Si es Dios lo que te mueve, peregrino, o es el arte, la historia o poesía, Villafranca del Bierzo ya sería el principio y el final de tu camino”.

Hernán Alonso

RESUMEN

Las avenidas o inundaciones fluviales son un riesgo frecuente en España y, por ello, se ha utilizado un análisis probabilístico mediante técnicas de Monte-Carlo para determinar caudales punta asociados a distintos periodos de retorno de la avenida e intervalos de confianza en la estimación de los mismos para los ríos Burbia y Valcarce, que confluyen en el centro del Villafranca del Bierzo, donde existen edificaciones patrimoniales y un turismo emergente. Sobre los resultados obtenidos, se han desarrollado modelos hidráulicos mediante el software Iber, seleccionando periodos de retorno extraordinarios para evaluar su impacto en la localidad. Estos modelos han sido implementados sobre una base topográfica consistente en una combinación de un Modelo Digital del Terreno (interpolado a partir de nubes de puntos LiDAR) con resolución de 1 metro, y el Modelo Digital de Edificaciones con resolución de 2.5 metros (en ambos casos procedentes del Instituto Geográfico Nacional - IGN). Posterior a ello, se ha realizado una cartografía probabilística de zonas inundables para los periodos de retorno de $Q_T=100$, $Q_T=100+IC99\%$, $Q_T=500$ y $Q_T=500+IC99\%$, que permite evidenciar los posibles daños en edificaciones en distintas zonas (A, B y C) de la localidad y también, la distribución de peligrosidades para vehículos de tipo Sedan, así como para el arrastre de personas; en ambos casos utilizando modelos de daños existentes previamente en la literatura. Se obtiene como resultado que la zona A (confluencia de los ríos Burbia y Valcarce) es la que presentaría mayor problemática frente a inundaciones, dada su concentración de edificaciones cercana a ambos ríos como, por ejemplo, el Convento de la Purísima Concepción (patrimonio monumental de la localidad), la zona B presentaría principalmente un peligro para el arrastre de personas y para edificaciones singulares como el Estadio Municipal La Ruquela y Convento de la Anunciada (patrimonio monumental de la localidad), y la zona C, es la que mayores daños económicos generaría para el sector industrial en caso de avenidas. Finalmente se obtienen conclusiones y recomendaciones tanto para organismos de gestión del dominio público hidráulico y diseño de edificaciones, como para la población en general.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	3
2.1. Objetivo general.....	3
2.2. Objetivos específicos	3
3. ZONA DE ESTUDIO	4
3.1. Ubicación.....	4
3.2. Contexto patrimonial	5
4. METODOLOGÍA	6
4.1. Parámetros de ajuste de la función de distribución de valores extremos	6
4.2. Series derivadas de los parámetros de ajuste.....	7
4.3. Modelización hidráulica.....	8
4.3.1. Modelo Digital de Terreno	8
4.3.2. Coeficientes de rugosidad de Manning.....	8
4.3.3. Modelización de caudales mediante Iber.....	9
4.3.4. Elaboración de cartografía de zonas inundables	9
4.4. Modelos de peligrosidad por inundaciones	10
4.4.1. Peligrosidad en edificaciones	10
4.4.2. Daños económicos para edificaciones.....	10
4.4.3. Peligrosidad de arrastre para personas	11
4.4.4. Daños a vehículos Sedán.....	11
5. RESULTADOS	12
5.1. Resultados de modelo probabilístico con MATLAB.....	12
5.2. Rugosidad superficial.....	13
5.3. Mapa de Modelo Digital del Terreno (MDT) más edificaciones	15
5.4. Mapa de elementos expuestos (construcciones singulares y tipología)	16
5.5. Modelos hidráulicos para distintos periodos de retorno.....	19
5.5.1. Período de retorno Q_{T100} e intervalos de confianza (IC).....	19
5.5.2. Período de retorno Q_{T500} e intervalos de confianza (IC)	20
5.5.3. Período de retorno Q_{T1000} e intervalos de confianza (IC).....	21
5.6. Comparación de estudio con mapa de peligrosidad proporcionados por el IGN	22
5.7. Modelo de daños para edificaciones	23
5.7.1. Modelo de daños en Zona A.....	28
5.7.2. Modelo de daños en Zona B.....	29
5.7.3. Modelo de daños en Zona C	30
5.8. Modelo de daños económicos para edificaciones	32

5.9. Modelo de daños para vehículos Sedán	33
5.10. Modelo de peligrosidad por arrastre de personas	34
6. DISCUSIÓN	36
7. CONCLUSIÓN	40
8. REFERENCIAS.....	41
9. ANEXOS.....	42

1. INTRODUCCIÓN

Las avenidas se definen como el aumento del nivel del curso fluvial por encima de su flujo promedio. Son fenómenos extremadamente variables en frecuencia y magnitud y, son inviábiles de predecir de manera determinística. En este sentido, la estimación de caudales máximos permite caracterizar estadísticamente este tipo de eventos relacionando la magnitud del caudal punta con el periodo de retorno, es decir, su probabilidad anual de ocurrencia (Jiménez Álvarez, *et al.*, 2013).

En el año 1715 ocurrió una gran avenida que dañó considerablemente al Convento de la Anunciada y algunas edificaciones de Calle del Agua en Villafranca del Bierzo, Comunidad Autónoma de Castilla y León, España (Villafranca del Bierzo, 2022). Desde entonces, y especialmente en el periodo temporal reciente, ha aumentado la inquietud por proteger de este tipo de eventos a la población en general y al patrimonio monumental de la localidad, como lo son los Bienes de Interés Cultural (BIC) de la Colegiata de Santa María de Cluni, y el Castillo de los Marqueses de Villafranca, u otros elementos patrimoniales como el Convento de la Anunciada y el Convento de la Purísima Concepción.

Villafranca del Bierzo, al igual que la inmensa mayoría del territorio, presenta un déficit de falta información de caudales para caracterizar el comportamiento de los mismos y así su influencia sobre el territorio ante estos eventos de alta energía. Como no existe un registro suficientemente largo de información sistemática (es decir, información registrada en estaciones de aforo) para acotar la incertidumbre en la estimación de caudales de baja frecuencia de ocurrencia (o periodos de retorno elevados), no se puede conocer bien como se ajustará (o comportará) la curva de distribución de avenidas (o caudales máximos instantáneos) en periodo de retornos grandes. En la localidad estos datos de caudal punta son muy limitados, por lo que, si se desea acotar la incertidumbre asociada a la estimación de caudales punta para distintos periodos de retorno, se pueden (o se tiene la opción) utilizar métodos probabilísticos para tratar de acotar dicha incertidumbre. Una de las técnicas posibles es la implementación de un modelo de Monte-Carlo que parta de los parámetros de ajuste de la función de distribución ajustada sobre los datos sistemáticos de caudal disponibles; para a partir de ahí, generar muchas series sintéticas de mayor longitud, volver a ajustar la función de distribución sobre las mismas y, para un periodo de retorno determinado, obtener el valor de caudal punta asociado, la dispersión y el valor del intervalo de confianza.

En este trabajo se abordará la frecuencia de caudales punta y su extrapolación a grandes periodos de retorno ($Q_T=100$, $Q_T=500$ y $Q_T=1000$) utilizando modelos probabilísticos Monte-Carlo); partiendo de la información disponible en la aplicación CauMAX (Jimenez Alvarez *et*

al., 2013), que para esta zona obtiene los valores de caudal punta mediante el uso de ecuaciones de regresión múltiple con variables determinadas en consideración a las características fisiográficas y climáticas de la cuenca del Miño-Sil. El ajuste de una función de distribución de valores extremos (en este caso la función GEV – *Generalized Extreme Values*) sobre los caudales punta obtenidos aporta los datos de los parámetros de ajuste de dicha función, que serán aquellos utilizados en el modelo de Monte-Carlo aplicado a la localidad de Villafranca del Bierzo. Posterior a ello se realizará la modelización hidráulica y cartografía probabilística de las zonas afectadas. Se obtendrán modelos de daños para edificaciones, vehículos y arrastre de personas y, posteriormente, se hará una discusión de los resultados y áreas más vulnerables frente a avenidas de periodos de retorno importantes en Villafranca del Bierzo.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

- ✓ Determinar la inundabilidad del entorno de Villafranca del Bierzo en función del periodo de retorno de avenida.

2.2. Objetivos específicos

- ✓ Establecer caudales punta de avenida e intervalos de confianza de la estimación.
- ✓ Efectuar una modelización hidráulica de caudales punta para distintos periodos de retorno e intervalos de confianza.
- ✓ Realizar cartografía probabilística de inundabilidad de diferentes zonas afectables por inundación.
- ✓ Obtener porcentaje de daños y cuantificación económica para edificaciones patrimoniales y residenciales.
- ✓ Generar las cartografías de peligrosidad por inundaciones para vehículos y personas.

3. ZONA DE ESTUDIO

3.1. Ubicación

Villafranca del Bierzo es una localidad de la provincia de León, comunidad autónoma de Castilla y León, España (Figura 1). Se sitúa a 500 m.s.n.m y, según el Instituto Nacional de Estadística (2021), su casco urbano posee 2058 habitantes, aunque su población flotante aumenta considerablemente durante los meses de verano. En la ciudad confluyen las aguas de los ríos Valcarce y Burbia, cuyas máximas crecidas ordinarias según la aplicación CauMAX son 217 m³/s y 101 m³/s, respectivamente, con un periodo de retorno de 3 años.

El clima es mediterráneo suave, generado a partir del clima atlántico y del mediterráneo continental, con una temperatura media de 12°C. El período donde más llueve es entre noviembre y diciembre, mientras que el período donde menos llueve es entre en julio y agosto (Weather Spark, 2022).

El área considerada para el estudio abarca 5 km² y se puede observar en la Figura 1.

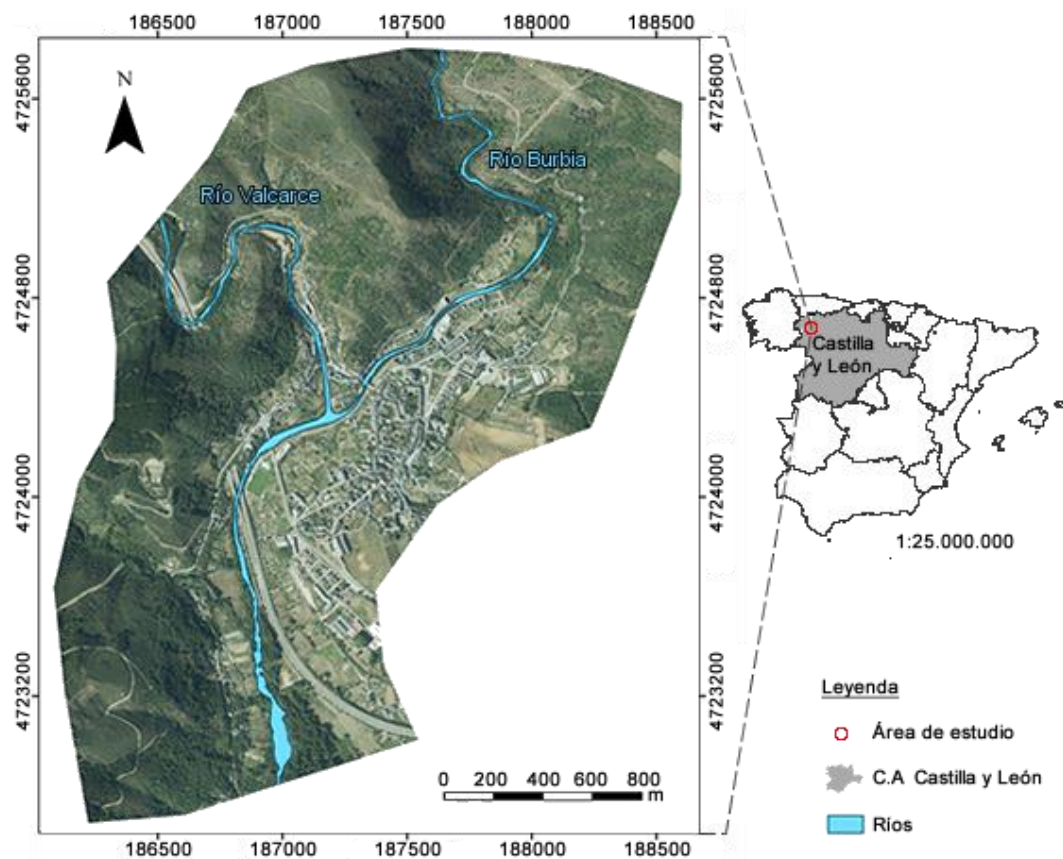


Figura 1. Mapa de ubicación Villafranca del Bierzo. Elaboración propia a partir de Ortofoto PNOA 2020.

3.2. Contexto patrimonial

Villafranca del Bierzo forma parte del Camino de Santiago y, debido a las peregrinaciones a Compostela, que desde el siglo IX se han ido construyendo edificaciones con motivo religioso y de asistencia al viajero, por lo que su patrimonio histórico es significativo (Villafranca del Bierzo, 2022). En 1965, la localidad fue declarada Conjunto Histórico-Artístico.

En la Figura 2 se puede apreciar un mapa de la edad de edificaciones en Villafranca del Bierzo. El color negro indica construcciones que pertenecen al casco histórico de la ciudad, es decir, anteriores a 1900. Entre los edificios que constituyen el patrimonio monumental destacan la Colegiata de Santa María de Cluni (Siglos XVI-XVII), Iglesia de San Nicolás El Real (Siglo XVII), la Iglesia de Santiago el Apóstol (Siglos XII-XIII), Convento de la Anunciada (Siglo XVII), y el Castillo-Palacio de los Marqueses de Villafranca (Siglo XVI).

La localidad se desarrolla principalmente en una ladera, por lo cual, si bien muchos edificios están próximos a los cauces del Burbia o Valcarce, se sitúan a una altura notable. Solo algunos edificios singulares como el Convento de la Anunciada o el Convento de la Purísima Concepción se encuentran en situación de ser afectados directamente por avenidas.

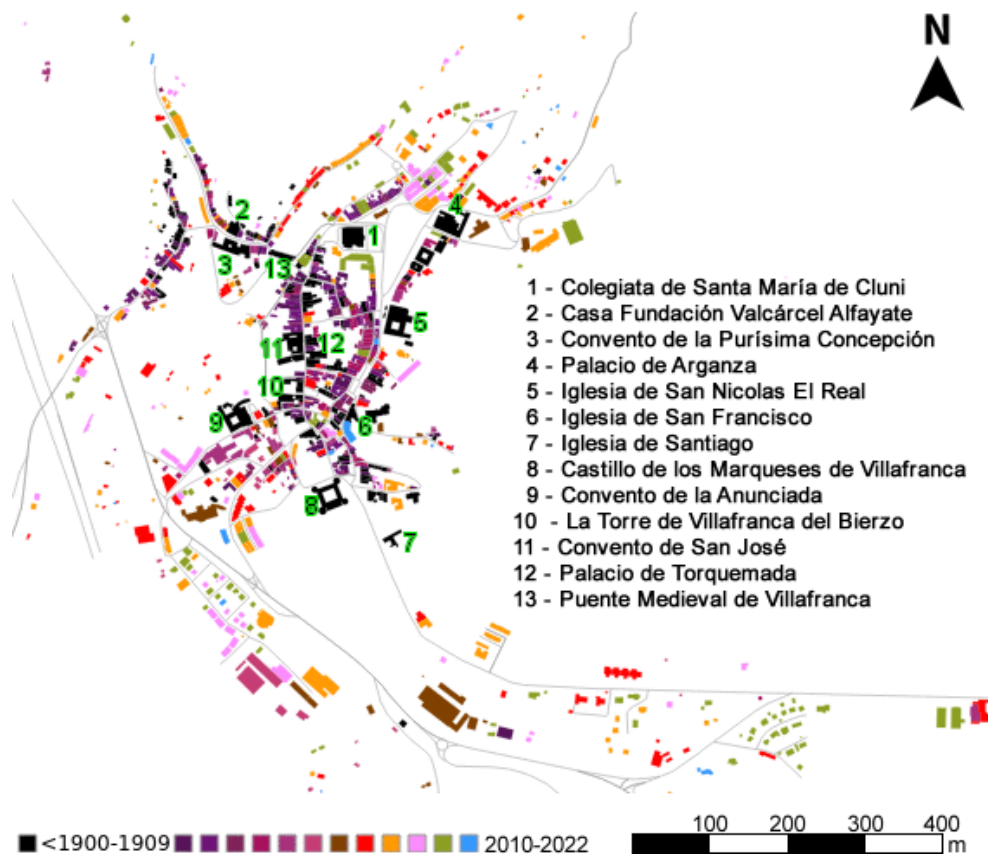


Figura 2. Edificaciones y década de construcción. Fuente: Sede Electrónica del Catastro (2022) y foro-ciudad.com.

4. METODOLOGÍA

4.1. Parámetros de ajuste de la función de distribución de valores extremos

Se ha utilizado el software CauMAX (Jiménez Álvarez, *et al.*, 2013) para obtener los parámetros de ajuste de la función GEV, la cual es utilizada en dicho estudio para definir los valores de caudal punta ligados a los distintos periodos de retorno en Villafranca del Bierzo, tanto para el río Burbia como para el Valcarce. CauMAX estima los cuantiles en los puntos de la red fluvial no aforados de forma diferente dependiendo del área drenante de la zona. Para cuencas $\leq 50 \text{ km}^2$ utiliza el método racional (calibrado mediante un factor ponderador el umbral de escorrentía), que asume uniformidad en la precipitación en toda la cuenca asociada a un periodo de retorno determinado. Para cuencas $>50 \text{ km}^2$, cuyo caso es el eje principal de la cuenca del Miño-Sil (17.619 km^2), así como los ríos Burbia y Valcarce a su paso por Villafranca del Bierzo, utiliza regresiones lineales múltiples considerando variables como el área drenante, el área drenante con altitud mayor a 1500 m.s.n.m (debido a posible acumulación de nieve), cuantiles de precipitación máxima diaria, altitud media de la cuenca, pendiente media de la cuenca, umbral de escorrentía y la tasa máxima de infiltración.

A partir de las características de la cuenca, y de algunas estaciones de aforo en la misma, se puede obtener una curva de datos ajustada aplicable a la totalidad del recorrido del cauce, de tal forma que se puede conseguir el valor de caudal para cada periodo de retorno en cualquier punto del cauce, y tras ello, se pueden derivar los parámetros de ajuste de la función que más se adapte a la morfología de la cuenca. Este análisis tiene un enfoque regional en cuanto a la resolución espacial de las variables utilizadas, en su mayoría en formato de mallas con un tamaño de lado de 500 metros.

La función de distribución seleccionada para describir las leyes de frecuencia es la de valores extremos generalizada (GEV), la cual tiene 3 parámetros de ajuste, y utiliza la expresión algebraica:

$$F(q) = \exp \left\{ - \left[1 - k \left(\frac{q - u}{\alpha} \right) \right]^{-1/k} \right\}$$

Donde, y mediante CauMAX, para el río Burbia se han obtenido los parámetros:

u : 65,12
 k : -0,09
 α : 37,647

Mientras que para el río Valcarce:

u : 150,927
 k : -0,1
 α : 70,295

El hecho de que la función GEV esté controlada por tres parámetros de ajuste, va a controlar la mayor capacidad que tiene esta función de distribución de curvarse (frente a otras definidas por solo dos parámetros de ajuste, como la función Gumbel), lo cual define a su vez la capacidad de dicha función de distribución de representar curvas con mayores cambios en su pendiente a lo largo del conjunto de datos ajustado.

4.2. Series derivadas de los parámetros de ajuste

Los parámetros de ajuste obtenidos se han utilizado para realizar un análisis estadístico de Monte Carlo en MATLAB R2021b a partir de la generación de 1000 series de valores de probabilidad de 1000 datos cada una (siguiendo una distribución uniforme) con el fin de transformarlas a caudal (Qc_i ; utilizando los parámetros de ajuste indicados en el epígrafe anterior) y obtener 1000 series de caudales punta. A cada una de estas series generadas (sintéticas), se les vuelve a ajustar la función de distribución GEV y se obtienen valores para probabilidades determinadas que permiten definir los periodos de retorno a utilizar en este estudio, es decir, $Q_T= 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500$ y 1000. Esto, ofrecerá un conjunto de 1000 valores de caudal punta asociados a cada uno de los periodos de retorno considerados. Con ello, es posible cuantificar el estimador central de ese conjunto de 1000 valores, y la incertidumbre de dicho estimador a partir del cálculo de los intervalos de confianza.

Los intervalos de confianza obtenidos para cada periodo de retorno son del 50%, 67%, 80%, 90%, 95%, 99%, y se han utilizado tanto para la modelización hidráulica, como para obtener la cartografía probabilística de diferentes zonas que se verán afectadas por la inundación con periodos de retorno determinados.

Los caudales punta asociados a cada periodo de retorno y sus intervalos de confianza para río Burbia y Valcarce, pueden encontrarse en Anexo 1 y Anexo 2, respectivamente.

4.3. Modelización hidráulica

4.3.1. Modelo Digital de Terreno

Para la creación del modelo digital de terreno (MDT), se han utilizado datos de la primera cobertura del proyecto PNOA-LiDAR, capturada en el año 2010, cuya densidad de puntos es de 0,5 puntos/m². Las nubes a puntos se han transformado a un modelo de elevación de terreno (MDT), al cual se le ha removido la vegetación mediante la no utilización durante el proceso de interpolación (generación del MDT) de aquellos puntos clasificados como vegetación por el Instituto Geográfico Nacional (2022). Posteriormente, se ha combinado el MDT con aquel proporcionado por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) y que representa las elevaciones de las edificaciones; puesto que se asume que podrían representar los bienes expuestos a ser afectados por las avenidas y producen un MDT final más representativo de la realidad desde un punto de vista de la modelización hidrodinámica. Además, se ha procedido a corregir el MDT, eliminando los puentes para evitar un “efecto presa” de estos en el cauce cuando se simulen las avenidas y también, arreglando los tramos del cauce donde las alturas habían sido mal extrapoladas en la creación del MDT (zonas de ribera en las que al descartar los puntos clasificados como vegetación, se produce una deficiencia en la distribución espacial de puntos que provoca la generación de formas artificiales no representativas de la realidad del terreno).

4.3.2. Coeficientes de rugosidad de Manning

A partir de un previo ordenamiento territorial del SIOSE, año 2014, se ha procedido a delimitar y actualizar el uso del suelo mediante la utilización de una Ortofoto PNOA 2020 y Google Earth. A las zonas delimitadas, se le ha asignado un coeficiente de rugosidad de Manning según su capacidad para oponerse al movimiento de avance de las aguas. Los datos de rugosidad utilizados en el modelo hidráulico para cada categoría de uso del suelo fueron derivados de la literatura científica, en concreto a partir de la propuesta de Chow (2004).

4.3.3. Modelización de caudales mediante Iber

Se han modelado caudales de distintos períodos de retorno e intervalos de confianza mediante el software Iber 2.6, el cual, es un modelo matemático bidimensional para la simulación de flujos en cauces y ríos. Iber resuelve las ecuaciones de aguas someras (Saint-Venant) promediadas en altura, mediante el uso de un modelo de volúmenes finitos no estructurado (Iberaula, 2022). La interfaz está desarrollada en base al programa GiD, que es una plataforma de análisis elementos finitos, con herramientas de preproceso y postproceso para simulaciones numéricas (Bladé *et al.*, 2014).

Iber requiere definir las condiciones de contorno (entradas y salidas de caudal), la topografía (MDT) y el coeficiente de rugosidad de Manning, para una posterior generación de una malla no estructurada, y resolución de las ecuaciones para calcular la profundidad del agua y la velocidad. La malla de cálculo en este estudio ha tenido una resolución de 1 m para la zona urbana (incluido el cauce allí presente), 3 m para cauce lejos de área urbana y 10 m para las zonas alejadas del cauce y del poblado.

El modelo hidráulico permite transformar los datos de caudales máximos a extensión del territorio afectado por las inundaciones. Sus algoritmos han sido extensamente validados y aplicados a una gran cantidad de estudios en inundaciones fluviales y estuarios (Iberaula, 2022).

4.3.4. Elaboración de cartografía de zonas inundables

Mediante ArcGIS 10.8.1, un software de Sistemas de Información Geográfica (SIG), se ha realizado un análisis de la peligrosidad a partir de eventos de recurrencia conocida, es decir, utilizando los caudales punta de los períodos de retorno obtenidos en este trabajo para determinar la cartografía probabilística de las zonas a ser afectadas por las avenidas. Se utilizarán diferentes rampas de colores para simbolizar las variables a mostrar según el mapa específico, todos ellos en el sistema de coordenadas ETRS 1989 UTM Zona 30. Además, se realizará una comparación con los modelos propuestos por el Instituto Geográfico Nacional (2022) para los períodos de retorno de $Q_T=100$ y $Q_T=500$, los cuales se pueden encontrar en el Anexo 3.

4.4. Modelos de peligrosidad por inundaciones

4.4.1. Peligrosidad en edificaciones

En base al catastro de construcciones de Villafranca del Bierzo (Sede Electrónica del Catastro, 2022), se han clasificado las edificaciones en cuatro categorías, que son las usadas por la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias (FEMA) de EE. UU. A partir del modelo de daño para edificaciones propuesto por USACE (2003) para estas categorías, se ha procedido a aplicar formulas polinómicas que mejor se ajustan a la línea de tendencia que relaciona el porcentaje de daños respecto al calado (Anexo 4). Las cuatro categorías y su respectiva ecuación propuesta se muestran a continuación. Suelo y Ruinas no se han considerado.

- Tipo I: Una planta sin sótano: $y = -1,947x^2 + 15,685x + 8,9179$
- Tipo II: Una planta con sótano: $y = -0,6361x^2 + 7,8815x + 18,289$
- Tipo III: Más de una planta sin sótano: $y = -1,1019x^2 + 11,898x + 5,7163$
- Tipo IV: Más de una planta con sótano: $y = 0,4785x^2 + 5,9965x + 11,778$

4.4.2. Daños económicos para edificaciones

Garrote *et al.* (2014) han propuesto un método para calcular el daño económico de las edificaciones afectadas por diferentes alturas de la lámina de agua para viviendas de 1 y/o más de una planta, con ocupación principal u ocasional. Se estimó el coste económico de distintos elementos en las viviendas (Anexo 5). En este estudio, aquellos valores fueron ajustados según el IPC del 2022 (+13,8%), con lo cual se calculó una curva de daño económico según la lámina de agua, y cuyo ajuste de tendencia polinómica permite obtener una ecuación útil para extrapolar los daños económicos para diferentes calados en este estudio. La ecuación es la siguiente:

- $y = 0,0014x^3 - 0,921x^2 + 210,37x - 0,9488$

4.4.3. Peligrosidad de arrastre para personas

Russo *et al.* (2013) proponen un modelo para determinar la peligrosidad de inundaciones utilizando como variables principales la altura del calado (h) en m y la velocidad del flujo de agua (v) en m/s. La ecuación para cada nivel de peligrosidad y su explicación se encuentra en la Tabla 1, mientras que la gráfica con detalles del modelo se encuentra en el Anexo 6. El límite de seguridad para niños es el calado 0,4 m, por lo que una altura lámina de agua mayor significará que sean arrastrados por el agua.

Tabla 1. Niveles de peligrosidad para arrastre de personas propuesto por Russo *et al.* (2013).

Nivel	Ecuación	Peligrosidad
1	$v \cdot h < 0,4$	Baja para adultos y niños
2	$0,4 \leq v \cdot h < 0,6$	Baja para adultos
3	$0,6 \leq v \cdot h < 0,8$	Moderada para adultos
4	$0,8 \leq v \cdot h < 1,2$ OR $v \geq 1,88$	Significante para adultos
5	$v \cdot h \geq 1,2$ OR $h \geq 1,2$ OR $v \geq 3,0$	Extrema para adultos

4.4.4. Daños a vehículos Sedán

Se ha utilizado el modelo de USACE (2009) para la estimación de arrastre de vehículos de tipo Sedan para Villafranca del Bierzo, pues constituyen los tipos de vehículos más comunes de la localidad, descartando el análisis para SUV u otro tipo de automóvil. Detalles de la regresión lineal y daños por profundidad de calado para los vehículos pueden encontrarse en Anexos 7. Hay que considerar que a los resultados se les ha hecho una reclasificación de los datos para mostrar porcentajes de peligrosidad asociada. La ecuación utilizada para el modelo de arrastre es la siguiente:

- $y = 1,1216x^5 - 7,4089x^4 + 17,24x^3 - 34,335x^2 + 90,274x$

5. RESULTADOS

5.1. Resultados de modelo probabilístico con MATLAB

Mediante el análisis estadístico a partir de MATLAB, se han generado distintas simulaciones para estimar caudales máximos tanto para el río Burbia como para el Valcarce, en su paso por Villafranca del Bierzo.

Se han estimado caudales máximos para distintos periodos de retorno $Q_T = 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500$ y 1000, y sus respectivos intervalos de confianza en cada río para acotar la incertidumbre y definir extensiones máximas de inundación asociados a cada periodo de retorno (Anexo 1 y Anexo 2). En las Figuras 3 y 4 se puede apreciar además de los caudales punta, los distintos intervalos de confianza (99%, violeta; 95%, amarillo; 90%, azul; 80%, celeste; 67%, verde; 50%, rojo), y el valor central de los datos (línea semi-horizontal negra inferior) para el río Burbia y Valcarce, respectivamente. Las pseudo-líneas negras verticales son realmente puntos que representan cada uno de los 1000 valores generados para cada serie sintética de caudales. Para cada uno de estos periodos de retorno (o probabilidades de excedencia) se obtiene un valor central y sus intervalos de confianza. Se muestra entonces el valor del cuantil y la varianza, la cual se observa como incrementa conforme se desplaza hacia periodos de retorno más grandes.

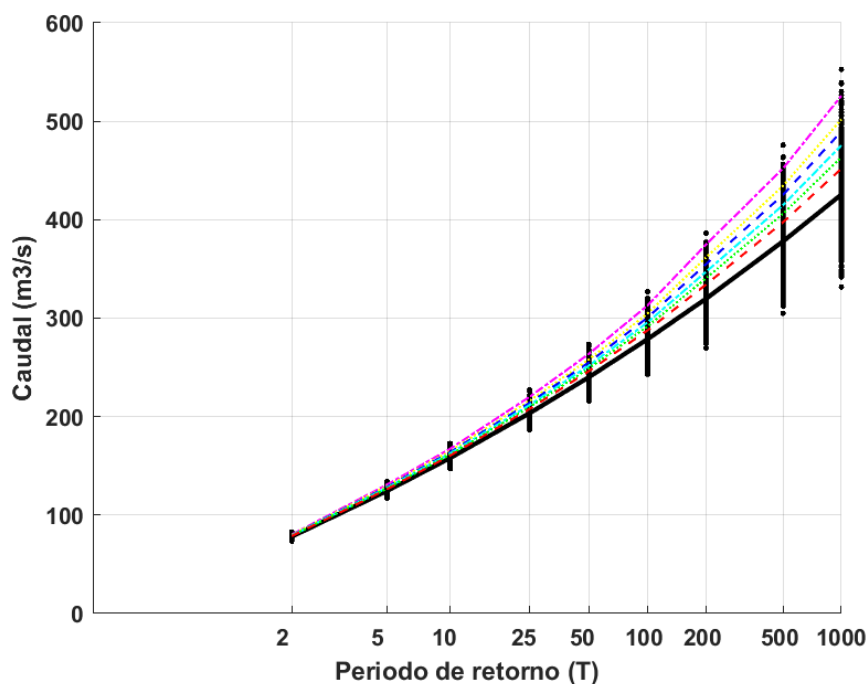


Figura 3. Caudales punta para distintos periodos de retorno e intervalos de confianza para río Burbia.

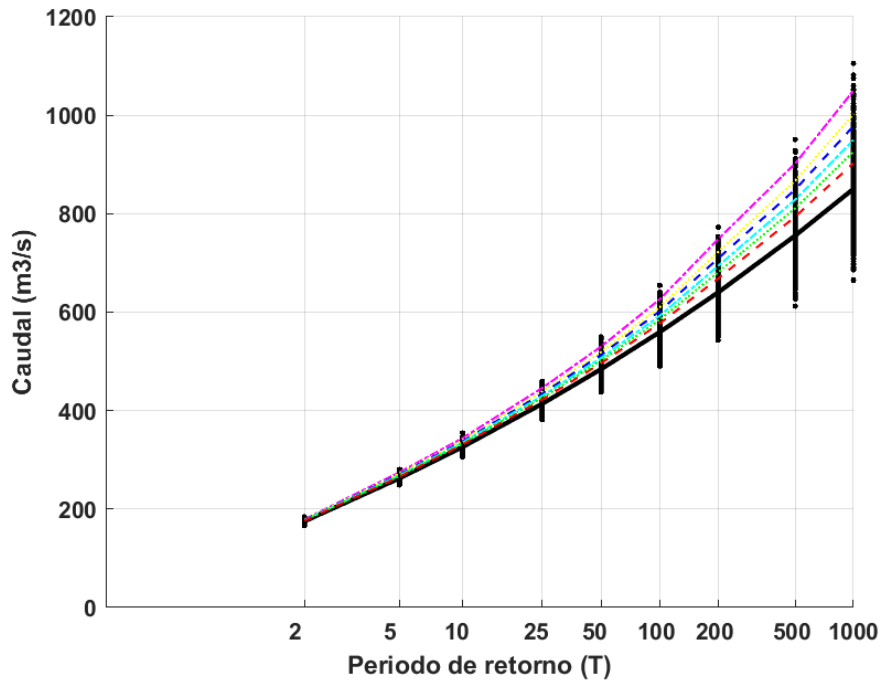


Figura 4. Caudales punta para distintos periodos de retorno e intervalos de confianza para río Valcarce.

En las figuras 3 y 4 se muestran los límites superiores de los intervalos de confianza, pero puede observarse como el conjunto de valores para cada periodo de retorno también se propaga por debajo de la línea del estimador central (donde se encontrarían los límites inferiores de dichos intervalos de confianza). Teniendo en cuenta el propósito del presente estudio, los límites inferiores no han sido considerados puesto que representan situaciones de menor peligrosidad potencial.

5.2. Rugosidad superficial

La información disponible de la cartografía SIOSE acompañada de los trabajos de fotointerpretación dieron lugar a la definición de hasta 7 tipologías de uso del suelo diferentes. La Tabla 2 muestra las categorías definidas y su respectiva rugosidad asignada a partir de la propuesta de Chow (2004).

Tabla 2. Rugosidad asignada para la localidad de Villafranca de Bierzo. Valores obtenidos de Chow (2004).

Categoría	Rugosidad
Bosque	0,07
Matorrales	0,05
Pastizales	0,03
Cultivos	0,035
Puentes	0,12
Zona urbana	0,3
Cursos de agua	0,045

En la Figura 5 se puede visualizar el mapa con la distribución espacial de la rugosidad superficial del terreno para este estudio.

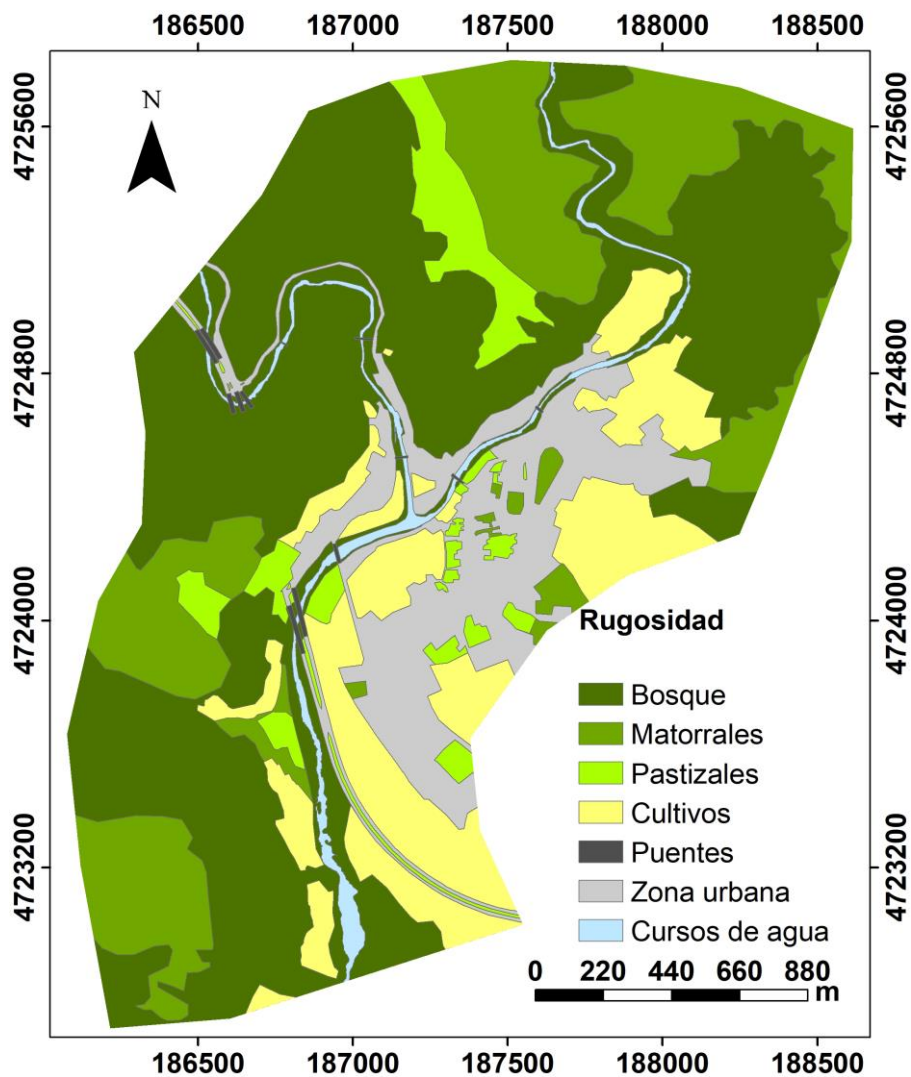


Figura 5. Rugosidad para Villafranca del Bierzo. Elaboración propia a partir de datos de Chow (2004).

5.3. Mapa de Modelo Digital del Terreno (MDT) más edificaciones

En la Figura 6 se puede visualizar el MDT generado a partir de nube de puntos LiDAR. En general, la resolución de los datos iniciales ha permitido obtener un modelo de terreno de gran calidad, el cual, permite obtener el detalle de elevaciones en el área de estudio, así como un sombreado que proporciona una visualización cualitativa de la topografía.

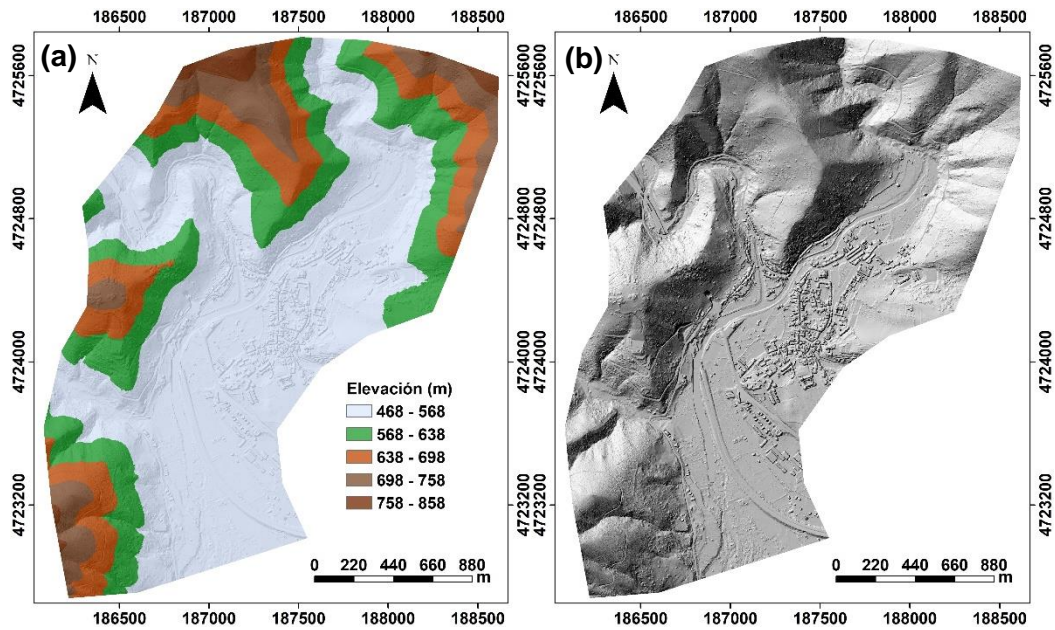


Figura 6. Modelo Digital de Terreno (MDT) resolución LiDAR. (a) Mapa de elevación. (b) Modelo de sombras.

La Figura 7 muestra algunas de las correcciones realizadas al cauce tanto por errores de extrapolación en la generación del MDT, como para eliminar los puentes que puedan restringir el paso del agua en los modelos hidráulicos.

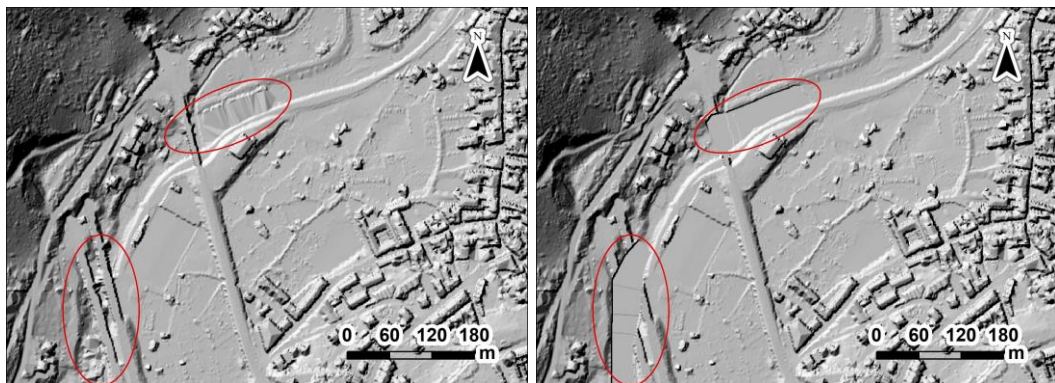


Figura 7. Ejemplo de corrección de MDT. (a) MDT sin correcciones en cauce. (b) MDT con correcciones en cauce.

5.4. Mapa de elementos expuestos (construcciones singulares y tipología)

Se han caracterizado las edificaciones de dos formas tal que, se pueda analizar el riesgo por inundación tanto para elementos singulares (Figura 8) que por sus particularidades puedan representar lugares donde exista acumulación de gente (o que las propias edificaciones tengan alguna característica que las haga singulares en su entorno), como para el resto de las edificaciones que presentan un carácter fundamentalmente residencial.

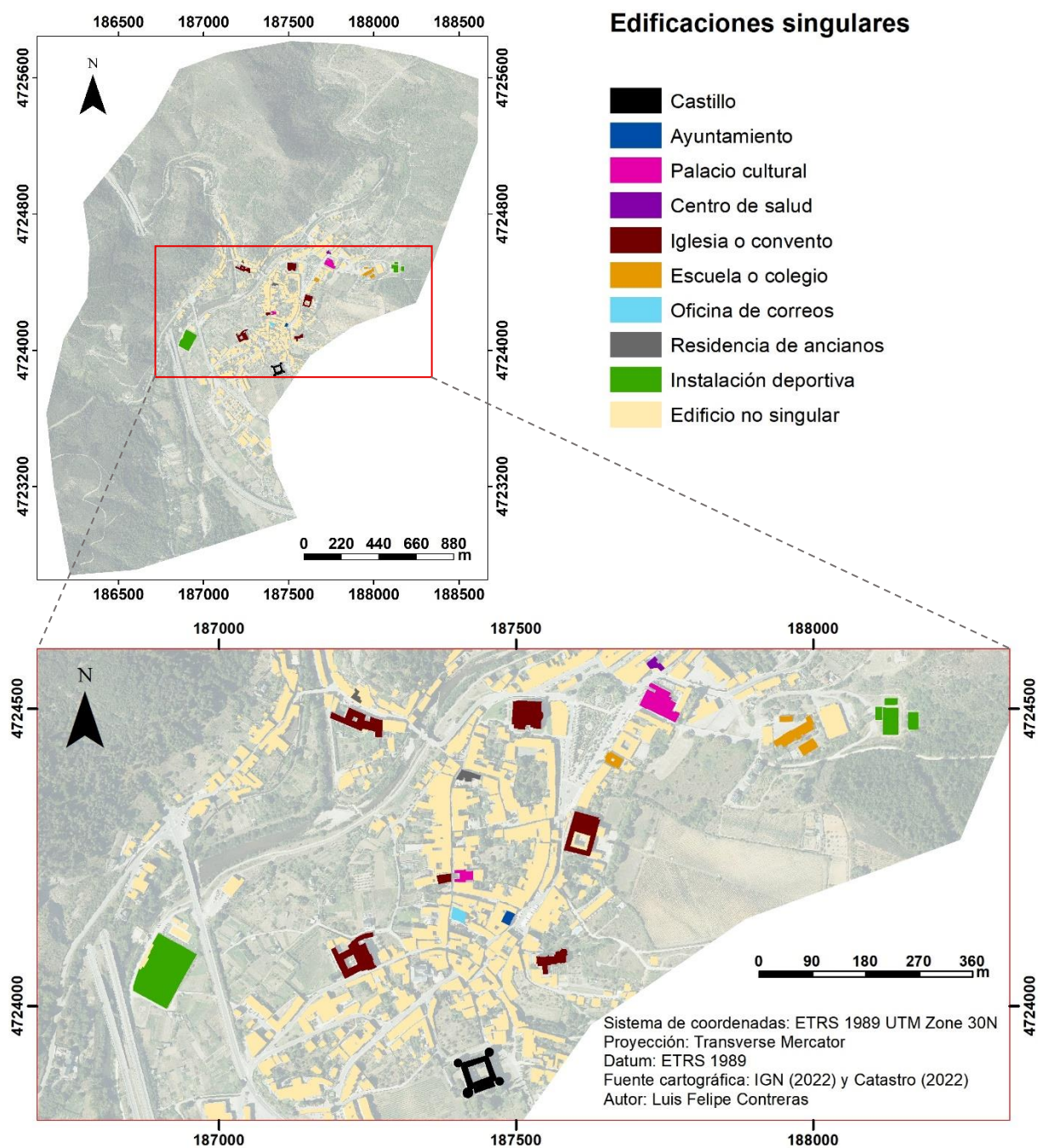


Figura 8. Mapa de edificaciones singulares en Villafranca del Bierzo

Seis de las edificaciones singulares antes mencionadas constituyen parte del patrimonio monumental de Villafranca del Bierzo y pueden apreciarse en la Figura 9.

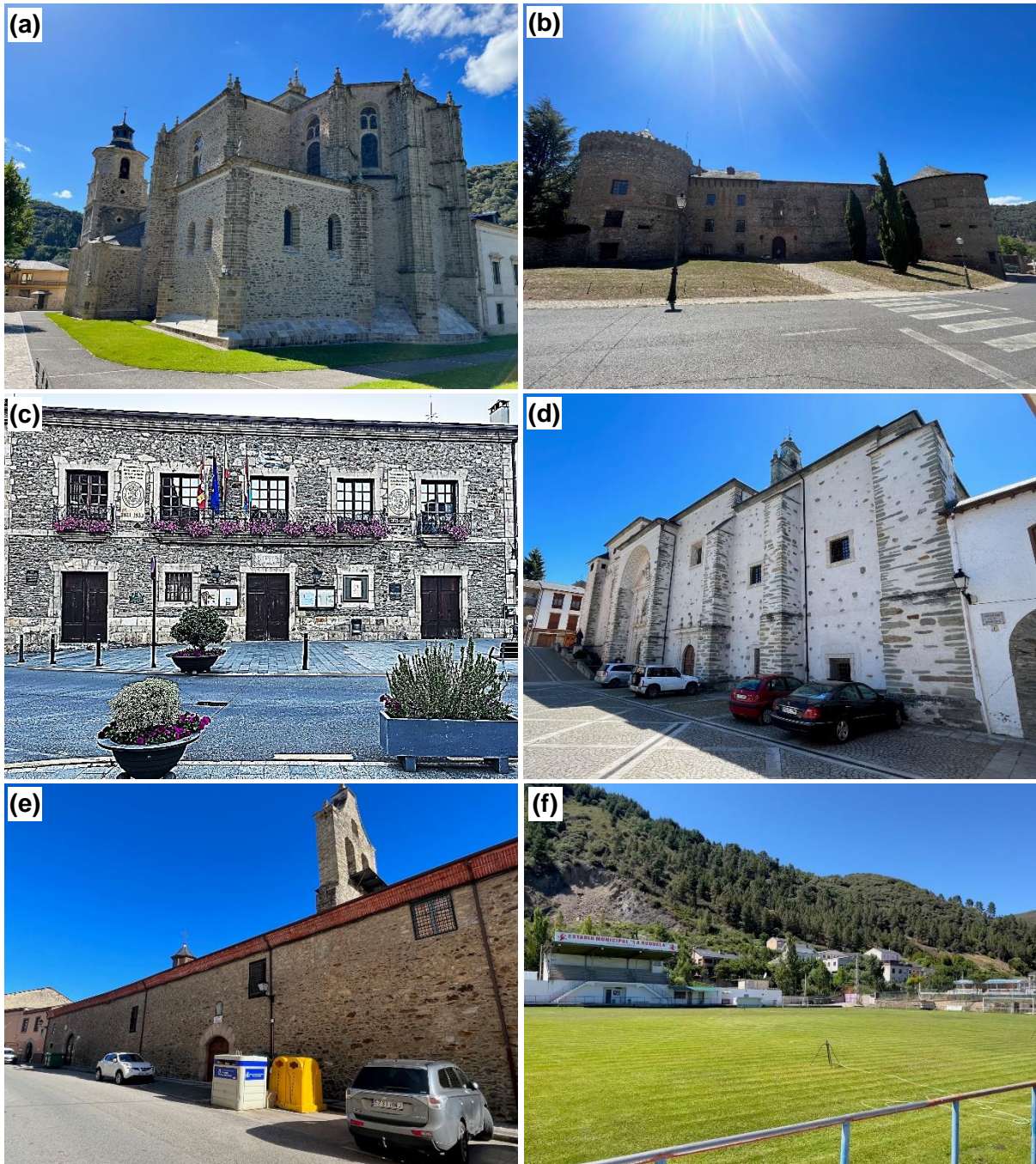


Figura 9. Ejemplos de Edificaciones singulares. (a) Colegiata Santa María de Cluni (BIC). (b) Castillo de los Marqueses de Villafranca (BIC). (c) Ayuntamiento. (d) Convento de la Anunciada. (e) Convento de la Purísima Concepción. (f) Instalación deportiva - Estadio Municipal La Ruquela. Fotografías de Luis Felipe Contreras.

Se ha identificado la cantidad de pisos (plantas sobre-rasante) y presencia o no de sótano en las edificaciones a partir de la Sede Electrónica de Catastro (2022), de tal forma que aquella información se pueda utilizar para un posterior análisis de daño en los inmuebles (Figura 10).

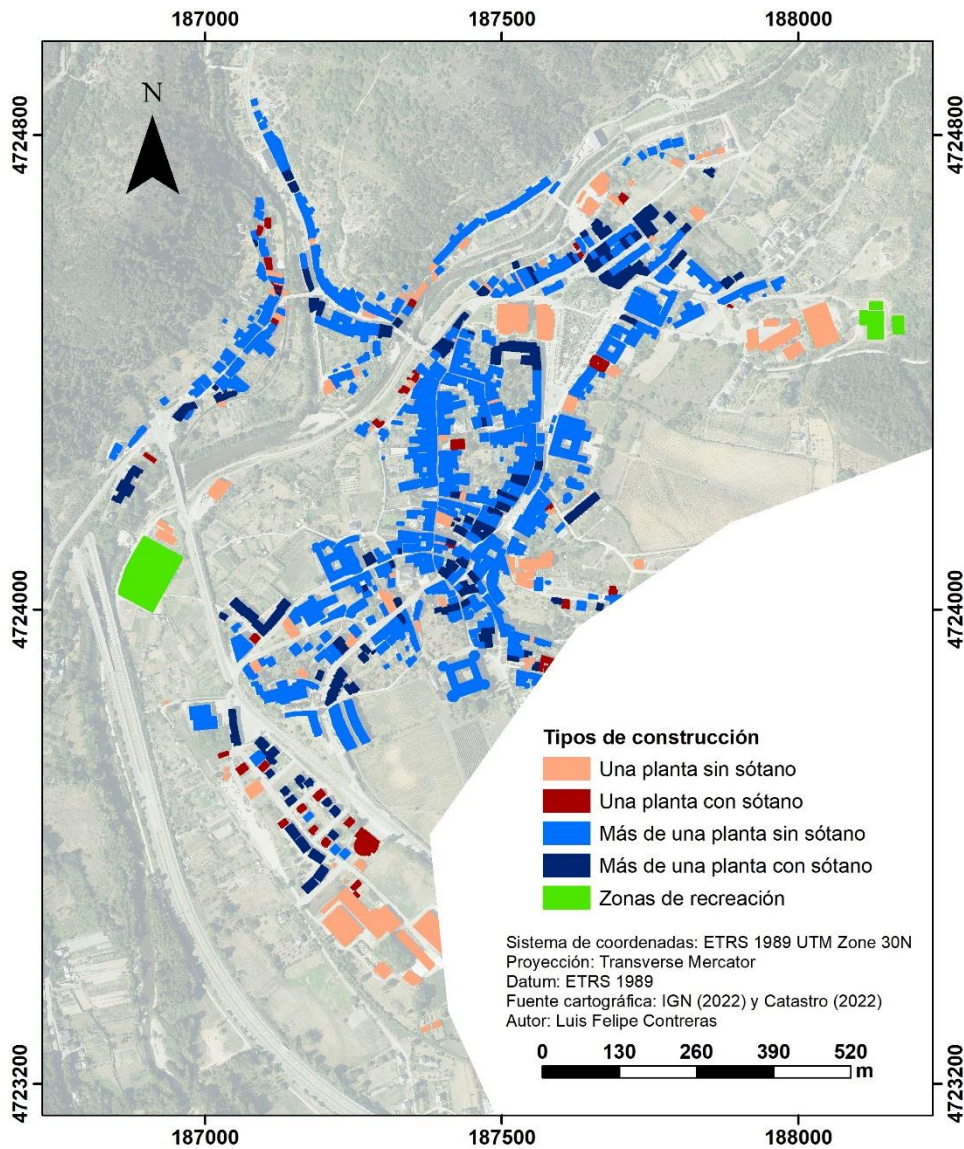


Figura 10. Mapa de edificaciones según su categoría. Elaboración propia a partir de datos de Sede Electrónica de Catastro (2022).

Las edificaciones identificadas en Villafranca del Bierzo con diferente referencia catastral ascienden a 789, cuya categorización y cuantía individual puede observarse en la Tabla 3.

Tabla 3. Categorías de edificaciones en función de sótanos, pisos y otras características.

Número categoría	Nombre categoría	Unidades	Superficie (m ²)
I	Una planta sin sótano	84	38369
II	Una planta con sótano	37	8901
III	Más de una planta sin sótano	553	164724
IV	Más de una planta con sótano	112	40722
V	Zonas de recreación	3	10989

5.5. Modelos hidráulicos para distintos periodos de retorno

5.5.1. Período de retorno QT100 e intervalos de confianza (IC)

En la Figura 11 se puede ver el mapa de calado para período de retorno de $Q_T=100$ y sus intervalos de confianza (IC) +90% y +99%. Se observa que a medida que aumentan los intervalos de confianza, mayor es el calado máximo, el cual se concentra en la parte alta del río Valcarce, en la confluencia de ambos ríos y en la parte inferior del río Burbia, cuya misma tendencia se visualiza en los mapas de velocidades respectivos (Anexo 8). Además, se distingue como el agua desborda en la parte oeste y suroeste de Villafranca del Bierzo.

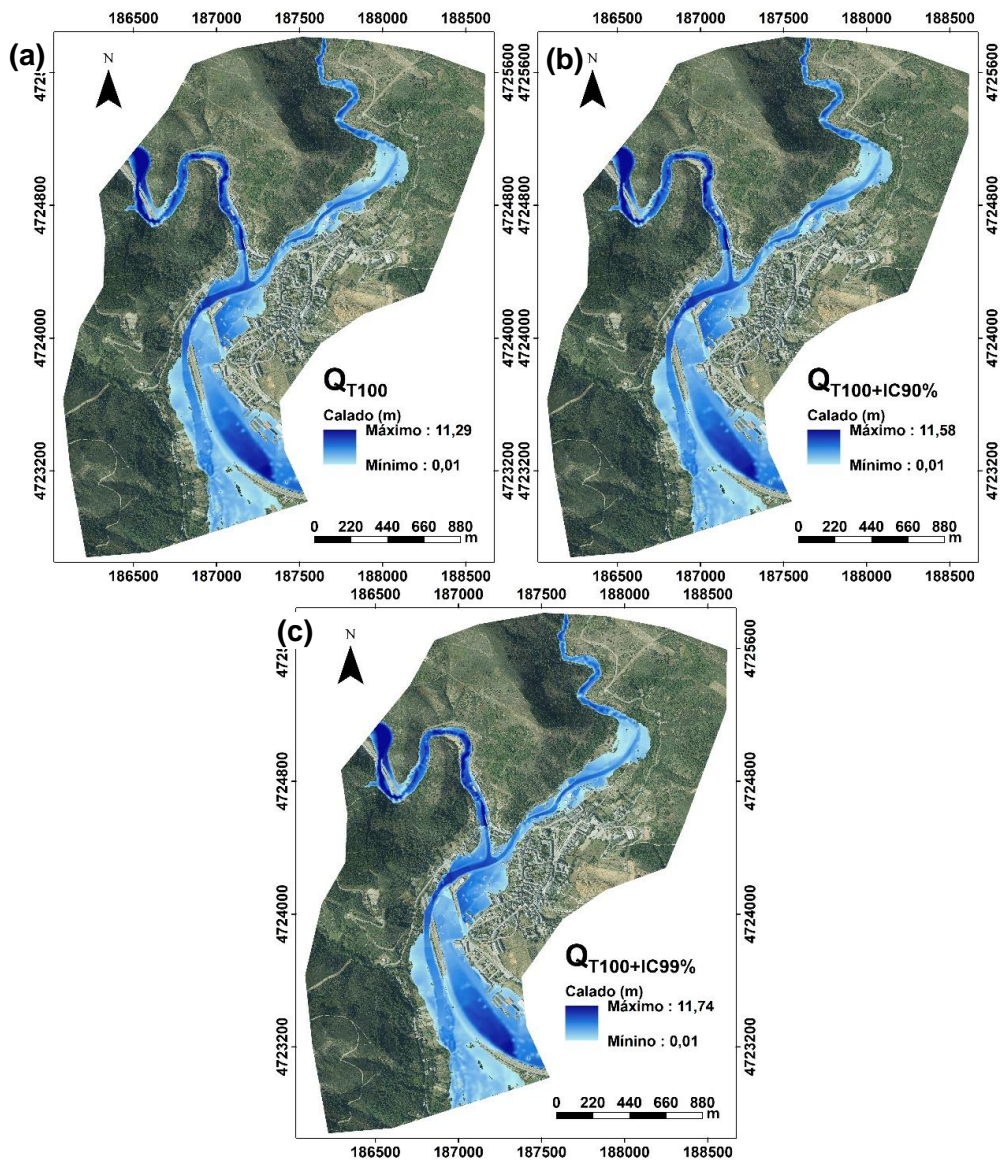


Figura 11. Modelo hidráulico periodo de retorno de 100. (a) $Q_T=100$. (b) $Q_T=100+IC99\%$. (c) $Q_T=100+IC99\%$.

5.5.2. Período de retorno Q_{T500} e intervalos de confianza (IC)

En la Figura 12 se puede ver el mapa de calado para período de retorno de $Q_T=500$ con sus intervalos de confianza (IC) +90% y +99%. Las tendencias, son similares que para el periodo de retorno de $Q_T=500$, es decir, aumenta el calado máximo a medida que se utilizan intervalos de confianza mayores, se concentra en las mismas áreas y existe un pequeño cambio en la extensión de la lámina de agua a medida que se va a intervalos de confianza mayores, lo cual ocurre principalmente cerca de la confluencia. En el Anexo 9 se pueden encontrar las velocidades asociadas a este periodo de retorno y sus intervalos de confianza, donde también se observa que las velocidades son mayores en los sectores donde el calado es máximo.

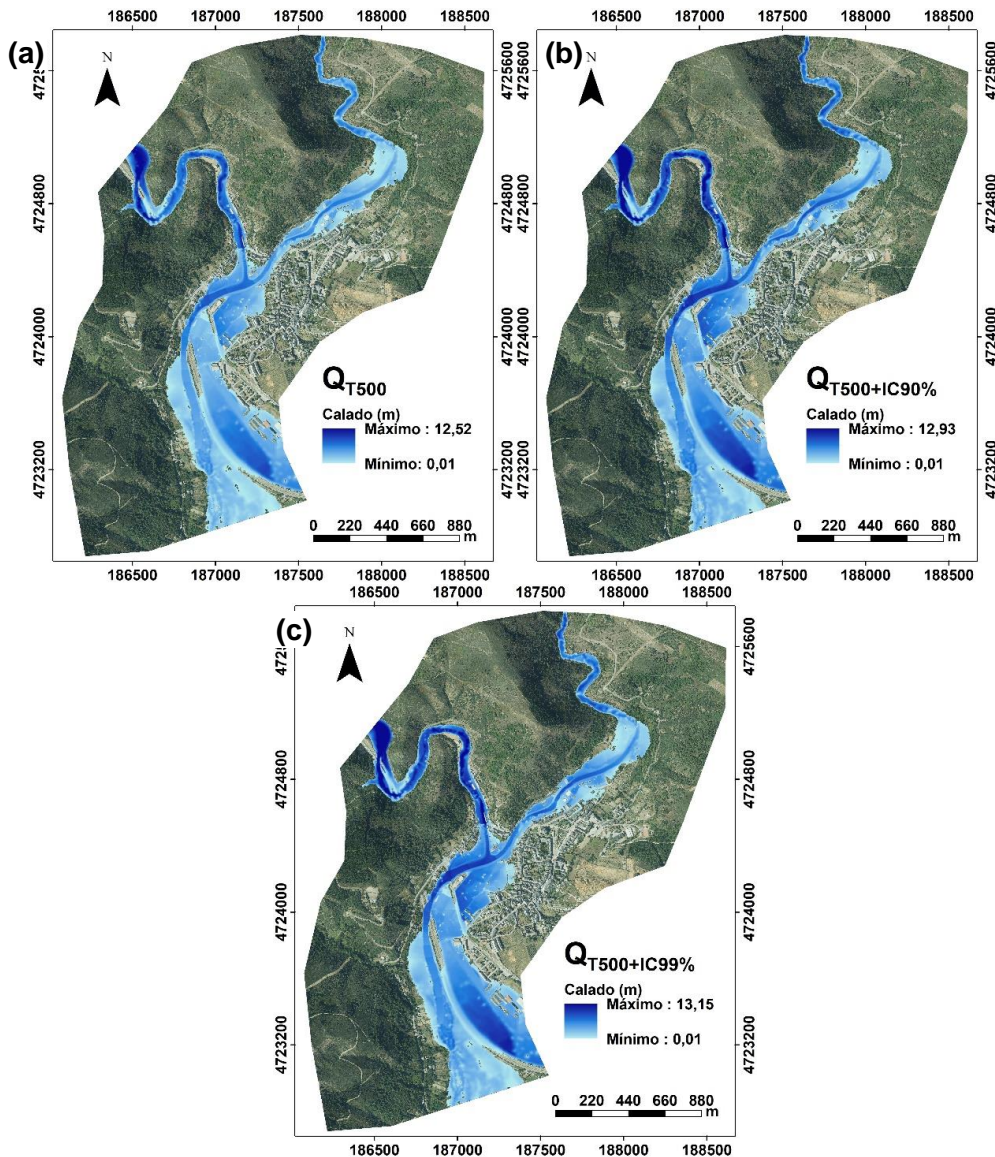


Figura 12. Modelo hidráulico periodo de retorno de 500. (a) $Q_T=500$. (b) $Q_T=500+IC90\%$. (c) $Q_T=500+IC99\%$.

5.5.3. Período de retorno Q_{T1000} e intervalos de confianza (IC)

En la Figura 13 se observa el calado para período de retorno de $Q_T=1000$ e intervalos de confianza (IC) +90% y +99% respectivos. La extensión de la lámina de agua aumenta levemente en comparación con los periodos de retorno de $Q_T=100$ y $Q_T=500$, sin embargo, el calado y velocidad máximos (Anexo 10) aumentan notoriamente al utilizar un periodo e intervalos de confianza mayores. Tanto los lugares donde se concentran los mayores calados y velocidades, como donde desborda el agua, son similares a lo ya descritos con $Q_T=100$. La Tabla 4, muestra las diferencias de calado máximo, velocidad máxima y superficie cubierta por las aguas para los periodos de retorno de $Q_T=100$, $Q_T=500$ y $Q_T=1000$ y sus IC.

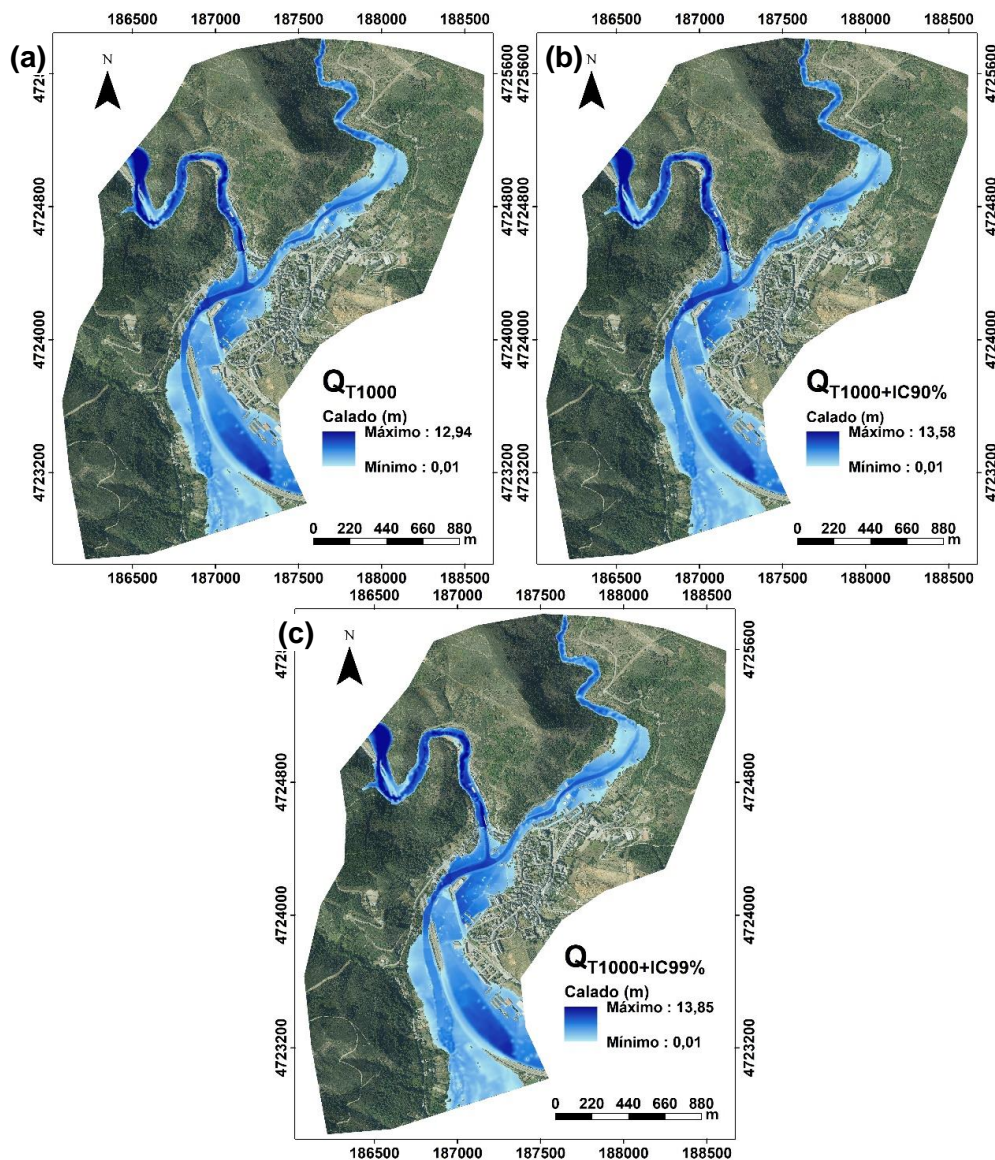


Figura 13. Modelo hidráulico periodo de retorno de 1000. (a) $Q_T=1000$. (b) $Q_T=1000+IC99\%$. (c) $Q_T=1000+IC99\%$.

Tabla 4. Diferencias de calado, velocidad y superficie afectada para los distintos periodos de retorno e IC.

Periodo de retorno (Q_T)	Calado máximo (m)	Velocidad máxima (m/s)	Superficie afectada (km ²)
100	11,29	10,39	0,86
100+IC90%	11,58	10,46	0,87
100+IC99%	11,74	10,52	0,88
500	12,52	11,18	0,91
500+IC90%	12,93	12,64	0,94
500+IC99%	13,15	13,51	0,95
1000	12,94	12,68	0,94
1000+IC90%	13,58	14,67	0,96
1000+IC99%	13,85	15,74	0,97

5.6. Comparación de estudio con mapa de peligrosidad proporcionados por el IGN

Se han comparado los modelos $Q_T=100$ y $Q_T=500$ de este estudio (Figura 11(a) y 12(a), respectivamente) con los datos proporcionados por el IGN para los mismos periodos de retorno, puesto que son los únicos disponibles en aquella plataforma (Anexos 3). La Figura 14 resalta las zonas donde existe diferencia entre los modelos.

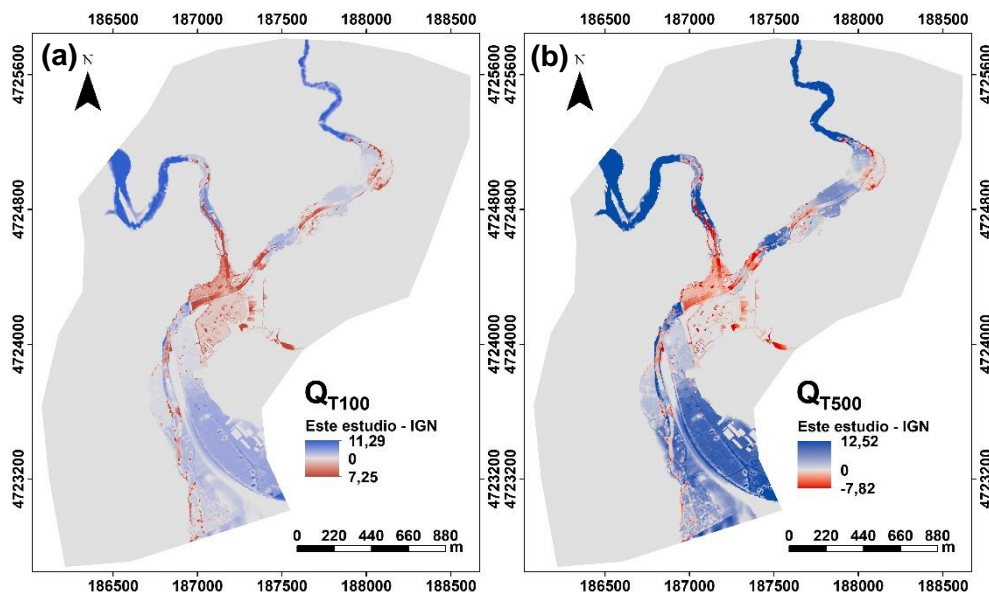


Figura 14. Mapa de diferencia calados entre los modelos generados en este estudio y los propuestos por Instituto Geográfico Nacional (2022) para periodos de retorno de (a) $Q_T=100$ y (b) $Q_T=500$.

Las principales diferencias positivas al comparar los resultados de ambos estudios, tanto para $Q_T=100$ como $Q_T=500$, son en el curso superior del río Burbia y Valcarce, y en menor medida, en la parte sur de la localidad. Las principales diferencias negativas, es decir, donde el modelo proporcionado por el Instituto Geográfico Nacional (2022) presenta mayor calado que en el modelo de este estudio, se manifiestan principalmente en el centro de la localidad.

Otras diferencias destacables son que el calado máximo generado por el modelo de este estudio para $Q_T=100$ es de 11,29 m, mientras que para el modelo del IGN para el mismo periodo de retorno, el calado máximo es de 9,62 m. Por otra parte, el calado máximo generado por el modelo de este estudio para $Q_T=500$ es de 12,52 m, mientras que para el modelo del IGN para el mismo periodo de retorno, el calado máximo es de 10,91 m.

5.7. Modelo de daños para edificaciones

El número de edificaciones afectadas según el modelo hidráulico asociado al periodo de retorno de $Q_T=100$ asciende a 130, con el asociado al $Q_T=100+IC99\%$ asciende a 142, con el asociado al periodo de retorno de $Q_T=500$ asciende a 166 y finalmente con el modelo asociado al periodo de retorno de $Q_T=500+IC99\%$ se elevan a 184. El detalle del porcentaje de daño, calculado en función de su calado, puede observarse en la Tabla 5.

Tabla 5. Edificaciones totales afectadas y su porcentaje de daño.

Edificaciones totales afectadas según periodo de retorno (Q_T)				Porcentaje daño (%)
100	100+IC99%	500	500+IC99%	
658	646	622	605	0
19	22	18	17	1-10
55	51	78	77	11-20
42	52	54	63	21-30
14	17	16	24	31-40
1	1	1	3	41-100

Focalizando los resultados en edificaciones singulares, es decir, aquellas que por su actividad podrían favorecer la concentración de personas, se observa que únicamente hay tres casos, en los que la situación podría ser comprometida desde el punto de vista de las avenidas para todos los periodos de retorno estudiados. Ellos son el Estadio Municipal La Ruquela, el Convento de la Anunciada y el Convento de la Purísima Concepción.

En la Figura 15 se muestra Villafranca del Bierzo con el modelo de daños para edificaciones con el periodo de retorno de $Q_T=100$. En ella, se observa una delimitación del área de estudio en tres zonas (A, B y C) para su posterior evaluación del daño a las construcciones en detalle en las secciones 5.7.1, 5.7.2 y 5.7.3. Estas zonas también se considerarán para la evaluación a detalle de los daños para periodos de retorno de $Q_T=100+IC99\%$, $Q_T=500$ y $Q_T=500+IC99\%$.

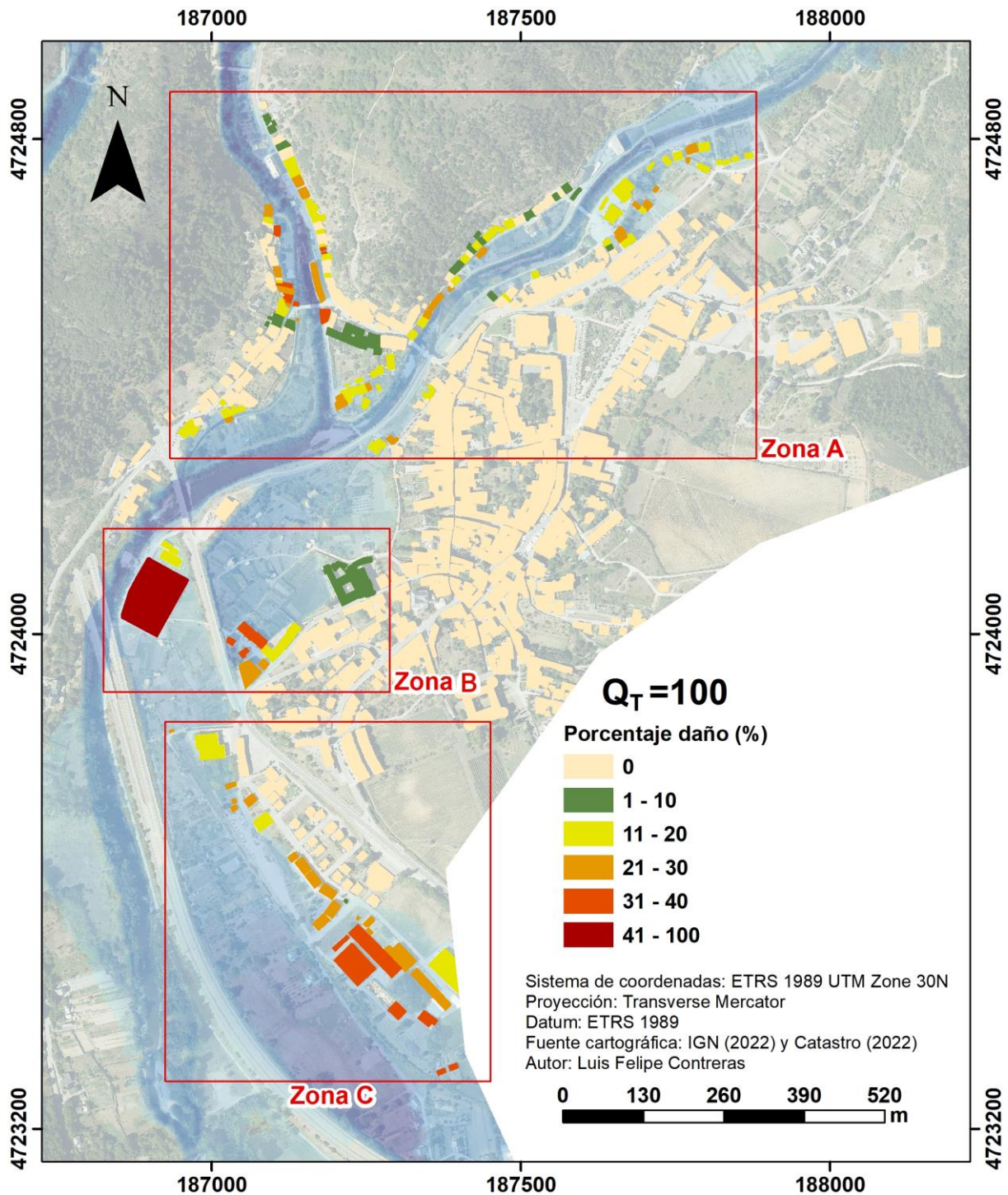


Figura 15. Daño a edificaciones en Villafranca del Bierzo según calado de periodo de retorno de $Q_T=100$.

La Figura 16 muestra el modelo de daños para el periodo de retorno de $Q_T=100+IC99\%$. Al aumentar el calado máximo en unos 45 cm respecto al modelo de periodo de retorno de $Q_T=100$, la cuantificación de los daños en las edificaciones también aumenta.

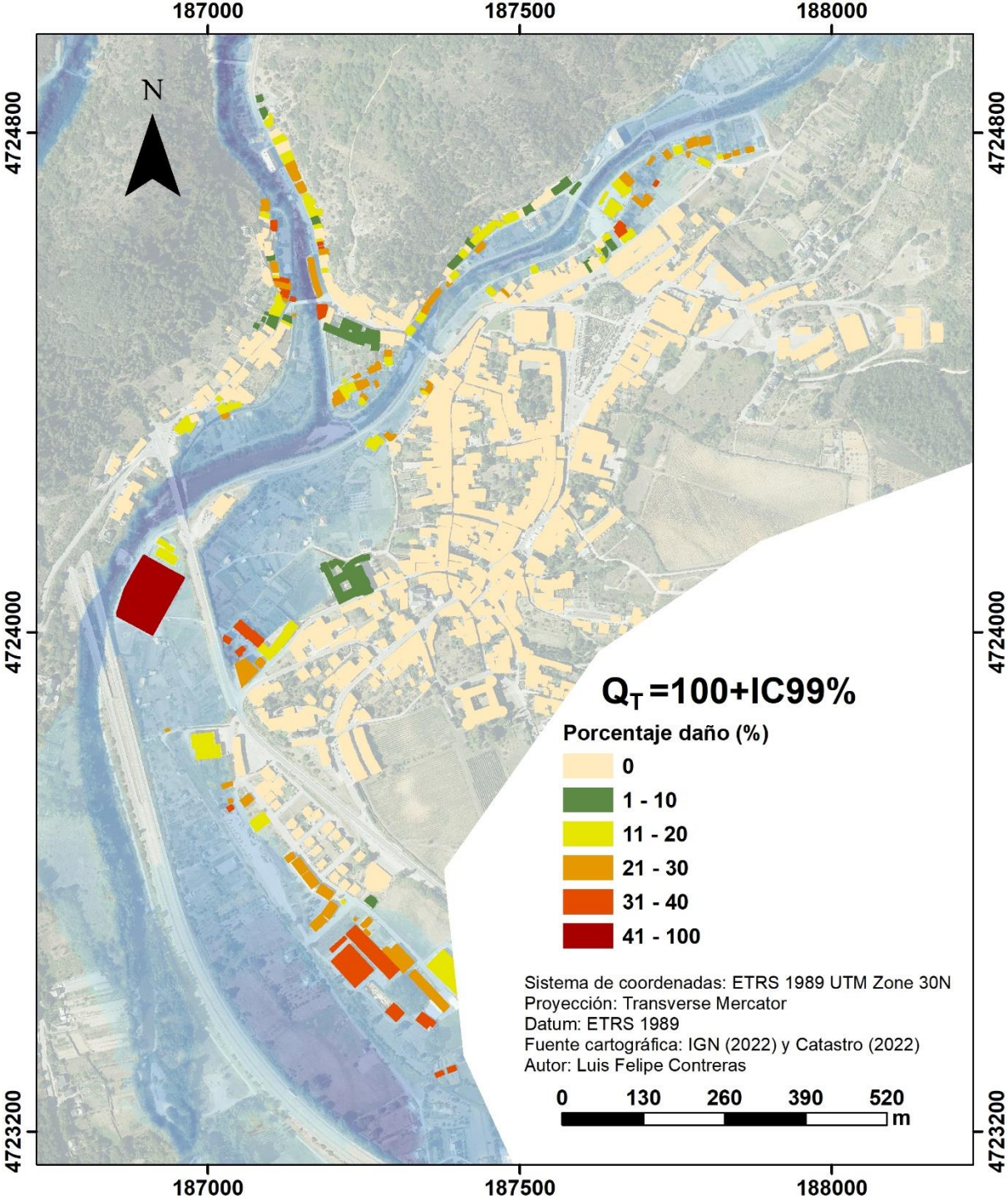


Figura 16. Daño a edificaciones en Villafranca del Bierzo según calado de periodo de retorno de $Q_T=100+IC99\%$.

La Figura 17 muestra el modelo de daños para el periodo de retorno de $Q_T=500$. El calado máximo esperable de 12,52 m y el aumento la superficie de afección respecto al modelo de $Q=100$ y su intervalo de confianza del 99%, evidencian daños más importantes en la localidad.

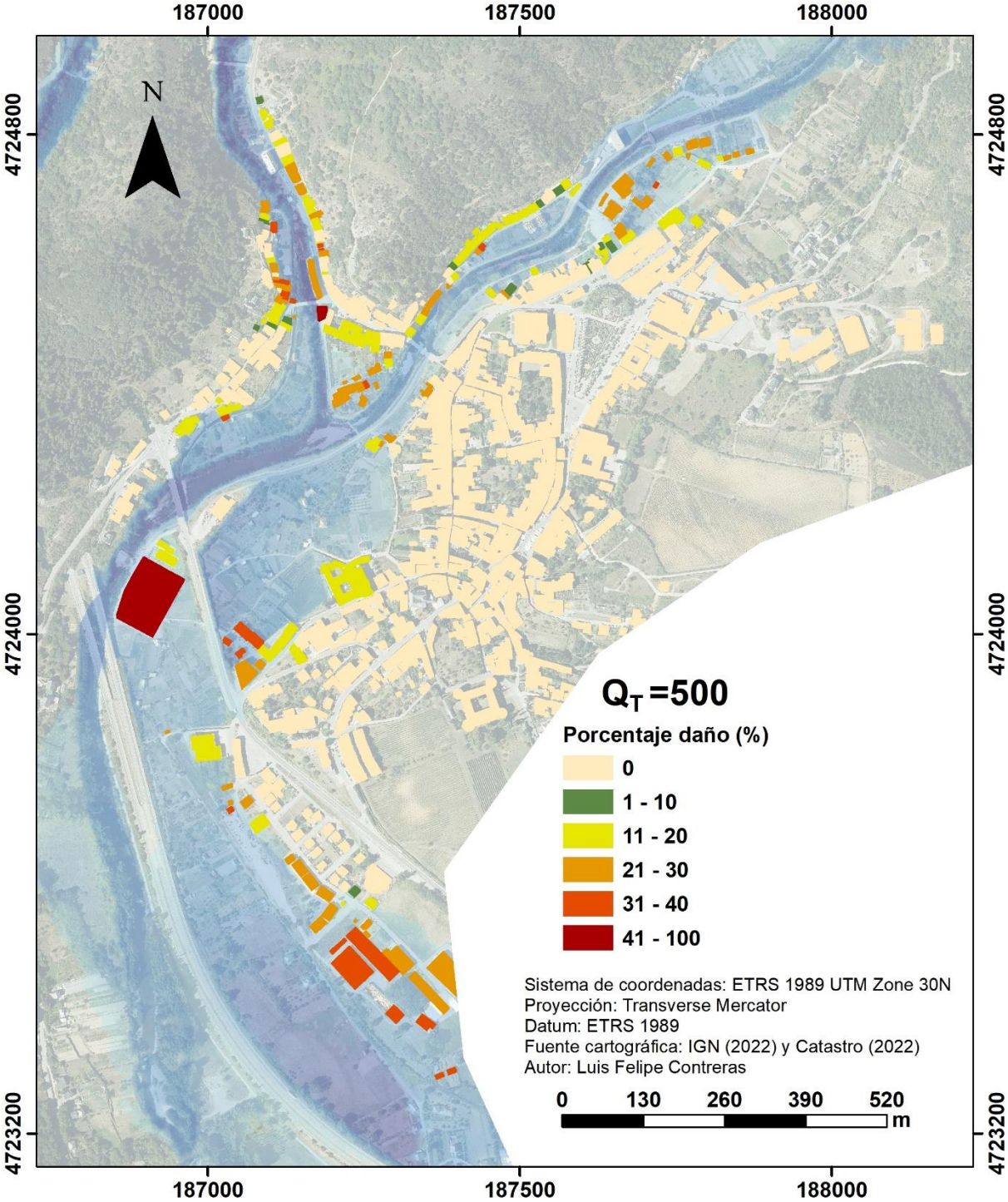


Figura 17. Daño a edificaciones en Villafranca del Bierzo según calado de periodo de retorno de $Q_T=100$.

Finalmente, la Figura 18, muestra los daños a edificaciones para el periodo de retorno de 500+IC99%, cuyos daños son más importantes que los modelos antes descritos.

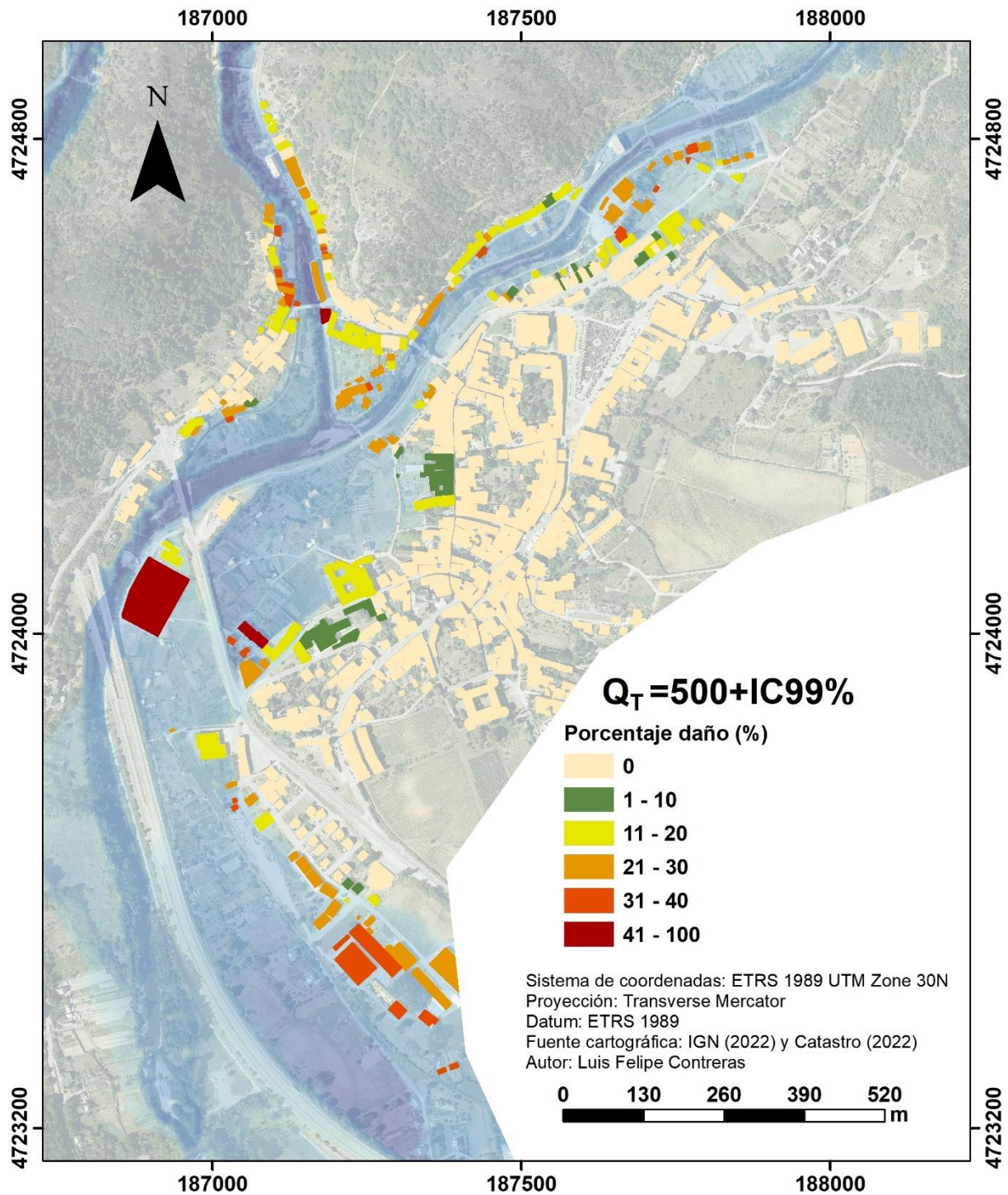


Figura 18. Daño a edificaciones en Villafranca del Bierzo según calado de periodo de retorno de $Q=500+IC99\%$.

En las tres siguientes secciones, se describirán los daños en detalle para las zonas A, B y C.

5.7.1. Modelo de daños en Zona A

La zona A (Figura 19) posee 431 edificaciones y es la zona donde más construcciones se ven afectadas. El detalle según su período de retorno está en la Tabla 6 donde, por ejemplo, el número de edificaciones con un daño superior al 20% se duplica desde $Q_T=100$ al $Q_T=500+IC99\%$. El detalle según la categoría está en la Tabla 7 donde se observa que las edificaciones especialmente dañadas son del tipo III, seguidas por las de tipo I.

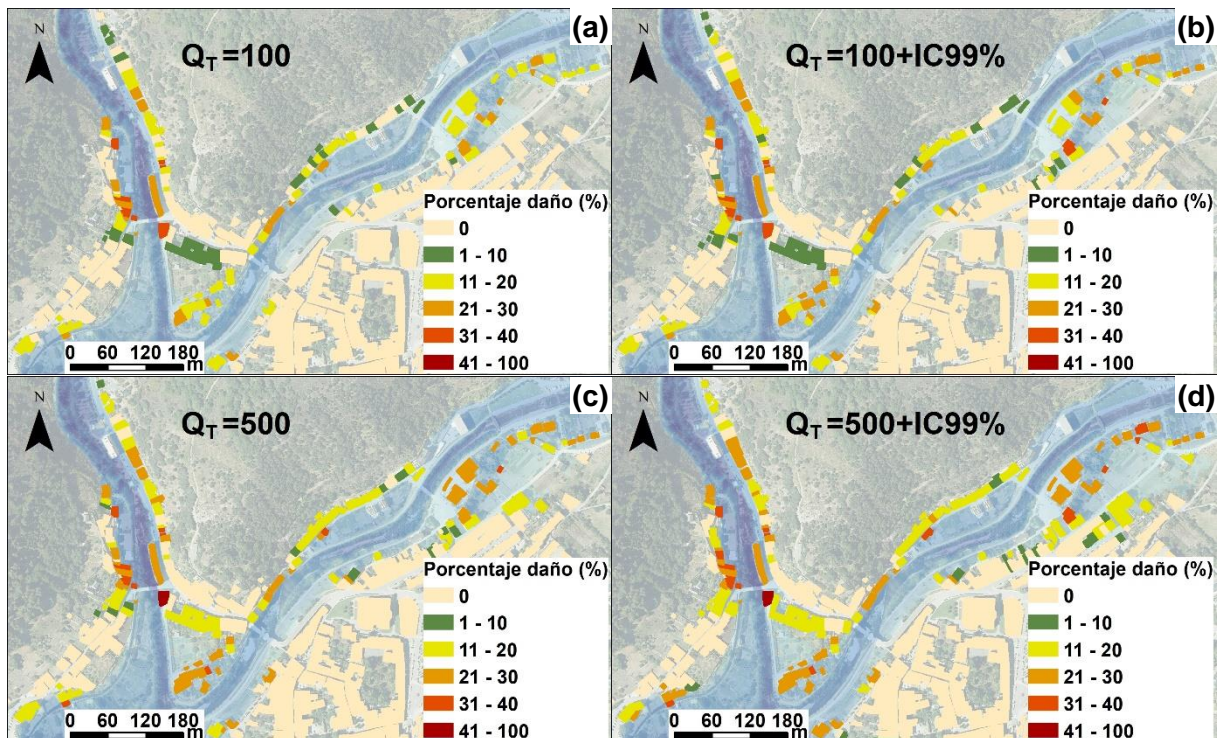


Figura 19. Modelo de daños en zona A para distintos periodos de retorno. (a) $Q_T=100$. (b) $Q_T=100+IC99\%$. (c) $Q_T=500$. (d) $Q_T=500+IC99\%$.

Tabla 6. Edificaciones afectadas y su porcentaje de daño en zona A.

Porcentaje daño (%)	Edificaciones afectadas según periodo de retorno (Q_T) zona A			
	100	100+IC99%	500	500+IC99%
0	327	316	304	279
1-10	17	20	13	13
11-20	50	45	56	68
21-30	28	39	45	50
31-40	9	11	12	18
41-100	0	0	1	1

Tabla 7. Cantidad de edificaciones afectadas según su categoría en zona A.

Período retorno (Q_T)	Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo IV
100	28	10	51	14
100+IC99%	28	11	61	14
500	29	11	68	18
500+IC99%	30	13	83	25

El Convento de la Purísima Concepción resulta dañado, por ejemplo, con un calado máximo de 0,11 m para el periodo retorno $Q_T=100$ y 0,94 m para periodo de retorno de $Q_T=500+IC99\%$.

5.7.2. Modelo de daños en Zona B

La Zona B se caracteriza por 37 edificaciones, de las cuales, muy pocas son afectadas (Figura 20). En ella sufren daño importante dos edificaciones singulares: Convento de la Anunciada y Estadio Municipal La Ruquela. A modo de ejemplo, para el periodo retorno $Q_T=100$, el calado máximo en ellas es de 0,35 m y 1,57 m, respectivamente, para el de $Q_T=500$, de 0,74 m y 2,15 m, respectivamente, y para el de $Q_T=500+IC99\%$ es de 1,03m y 2,61m, respectivamente.

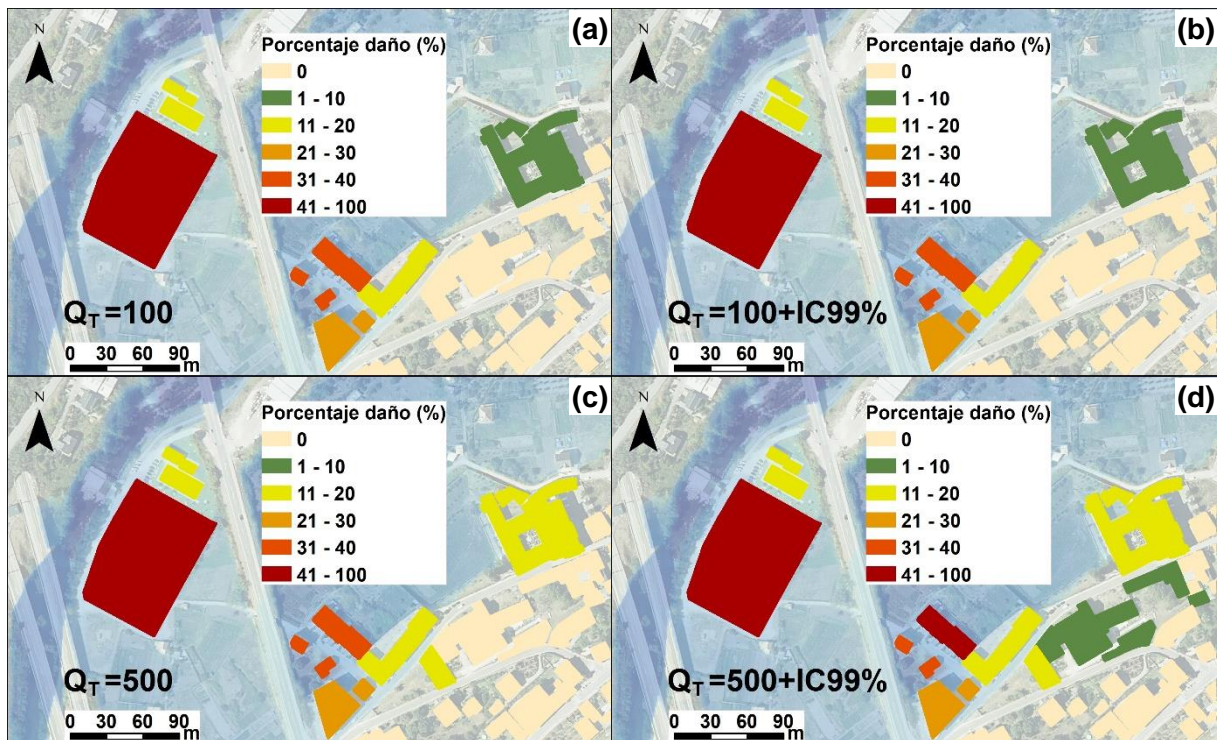


Figura 20. Modelo de daños en zona B para distintos periodos de retorno. (a) $Q_T=100$. (b) $Q_T=100+IC99\%$. (c) $Q_T=500$. (d) $Q_T=500+IC99\%$.

El detalle de daños según su período de retorno está en la Tabla 8, donde se ve que a medida que se va a periodos de retorno mayores, aumentan las edificaciones afectadas sobre el porcentaje de daños del 10%, incluso se duplica en el rango del 11-20%, comparando periodos de retorno de $Q_T=500$ y $Q_T=500+IC99\%$ respecto a $Q_T=100$ y $Q_T=100+IC99\%$.

Tabla 8. Edificaciones afectadas y su porcentaje de daño en zona B.

Porcentaje daño (%)	Edificaciones afectadas según periodo de retorno (Q_T) zona B			
	100	100+IC99%	500	500+IC99%
0	29	28	27	26
1-10	0	1	0	1
11-20	2	2	4	4
21-30	2	2	2	2
31-40	3	3	3	2
41-100	1	1	1	2

La Tabla 9 muestra el detalle según la categoría de los edificios, siendo los de tipo III y tipo IV los que más se ven afectados por avenidas. Además, también se observa que a periodos de retorno más grandes, son más las edificaciones afectadas de un mismo tipo.

Tabla 9. Cantidad de edificaciones afectadas según su categoría en zona B.

Período retorno (Q_T)	Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo IV
100	1	1	2	3
100+IC99%	1	1	3	3
500	2	1	3	3
500+IC99%	2	1	4	3

5.7.3. Modelo de daños en Zona C

La zona C se caracteriza principalmente por industrias, bodegas, talleres mecánicos y algunos hoteles. De estas edificaciones, las más afectadas por los distintos periodos de retorno y sus intervalos de confianza son las que se encuentran en la margen derecha del río Burbia, tal y como se aprecia en la Figura 21, donde los daños aumentan visiblemente hacia el sureste de la zona C, conforme se va a periodos de retorno mayores.

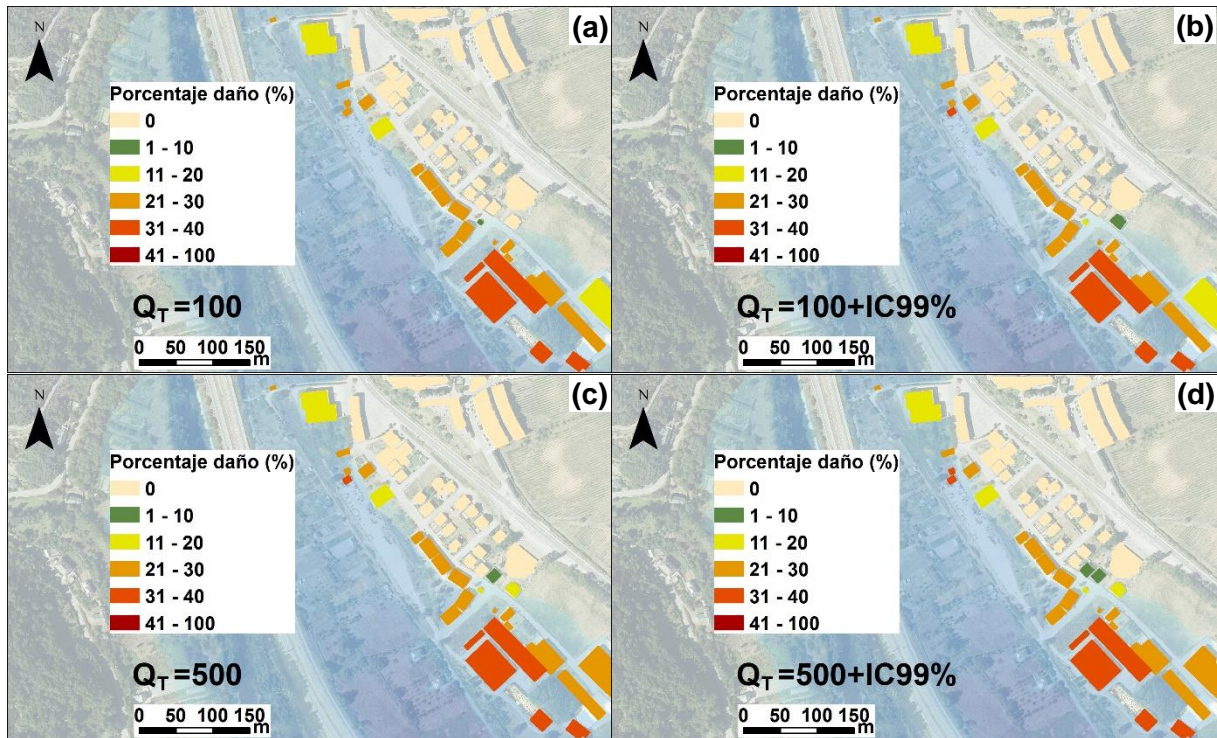


Figura 21. Modelo de daños en zona C para distintos periodos de retorno. (a) $Q_T=100$. (b) $Q_T=100+IC99\%$. (c) $Q_T=500$. (d) $Q_T=500+IC99\%$.

En la Tabla 10, se observa que las edificaciones aumentan en rango de daños a medida que se va a periodos e intervalos de confianza más grandes. Así por ejemplo en el periodo de retorno de $Q_T=100$ hay solo dos edificaciones afectadas en un rango de 31-40% de daños, mientras que para un periodo de retorno $Q_T=500$ son 3 edificaciones afectadas y para un periodo de retorno $Q_T=500+IC99\%$ son 4 edificaciones dañadas. No existen edificaciones dañadas en un rango de 41-100%.

Tabla 10. Edificaciones afectadas y su porcentaje de daño en zona C.

Porcentaje daño (%)	Edificaciones afectadas según periodo de retorno (Q_T) zona C			
	100	100+IC99%	500	500+IC99%
0	37	36	35	34
1-10	1	1	1	2
11-20	3	4	4	4
21-30	12	11	12	11
31-40	2	3	3	4
41-100	0	0	0	0

El detalle de edificaciones dañadas según su categoría puede observarse en la Tabla 11. Las edificaciones más dañadas son del tipo I, es decir, una planta sin sótano, seguidas por las de tipo II, tipo III y finalmente las de tipo IV.

Tabla 11. Cantidad de edificaciones afectadas según su categoría en zona C.

Período retorno (Q_T)	Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo IV
100	12	4	1	1
100+IC99%	13	4	1	1
500	13	4	2	1
500+IC99%	13	4	3	1

5.8. Modelo de daños económicos para edificaciones

De la categoría I, es decir, edificaciones con una planta y sin sótano, se ha realizado una cuantificación económica para estimar sus pérdidas en euros (€) según distintos periodos de retorno (Figura 22), todo ello de acuerdo con el modelo de Garrote *et al.* (2014).

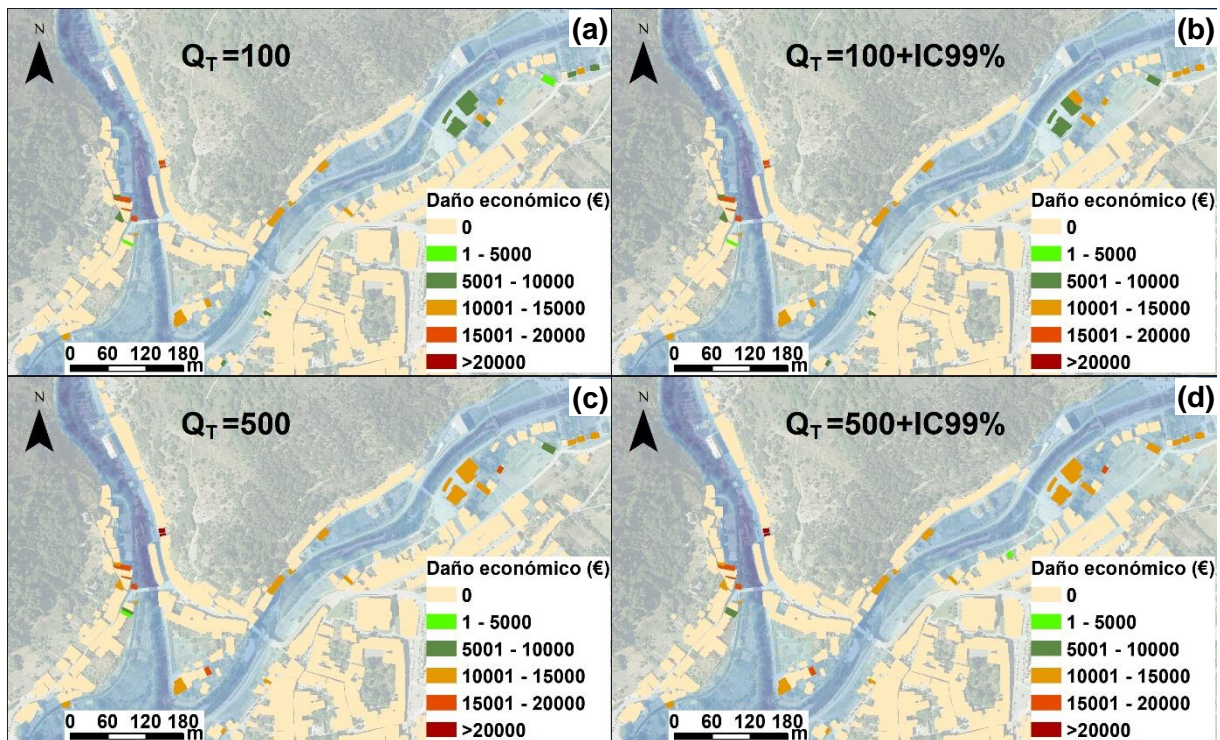


Figura 22. Daños económicos para zona A. (a) $Q_T=100$, (b) $Q_T=100+IC99\%$, (c) $Q_T=500$ y (d) $Q_T=500+IC99\%$.

No se han contemplado edificaciones con sótano, por lo cual las otras categorías se han descartado para la estimación, sin embargo, no significa que no exista daño económico en ellas. Solo se ha realizado esta estimación para la zona A, puesto que es la zona que presenta más edificaciones de esta categoría, mientras que la zona B solo 1 edificación tipo I, y la zona C son principalmente industrias, bodegas, talleres mecánicos y algunos hoteles, cuyo valor económico no es fácilmente cuantificable (la cuantificación económica del “contenido” no es sencilla, y puede representar un porcentaje muy importante de los daños económicos, a sumar a los provocados en el “continente”).

El detalle económico y cuantía de edificaciones de categoría I afectadas para distintos periodos de retorno en la zona A, se encuentra en la Tabla 12. La gran mayoría de las edificaciones presentan daños que se evaluarían entre los 10000 y 15000 €, cifras que podrían ser útiles para la gestión del riesgo para seguros de viviendas, ya que, se podría estimar la cuantía de las pólizas en función de los daños esperados.

Tabla 12. Edificaciones de categoría I y su daño económico según período de retorno.

Daño económico (€)	Edificaciones afectadas según periodo de retorno zona A (Q_T)			
	100	100+IC99%	500	500+IC99%
1-5000	2	1	1	1
5001-10000	9	6	2	2
10001-15000	13	17	20	21
15001-20000	4	4	5	5
>20000	0	0	1	1

5.9. Modelo de daños para vehículos Sedán

En la Figura 23 se aprecia el modelo de daños para vehículos Sedan (USACE, 2009) realizado para periodos de retorno de $Q_T=100$ y $Q_T=500$, y sus respectivos intervalos de confianza. Las áreas rojas representan las zonas donde la peligrosidad es mayor, mientras que las verdes, donde la afección será menor. Se aprecia que dominan las áreas con daños importantes, es decir, del 80-100%, lo cual se podría utilizar para la gestión del territorio en el planteamiento de limitaciones a la circulación de vehículos, o bien, para que ante alertas de avenidas, se pueda restringir el aparcamiento o el funcionamiento de los talleres mecánicos en estas zonas.

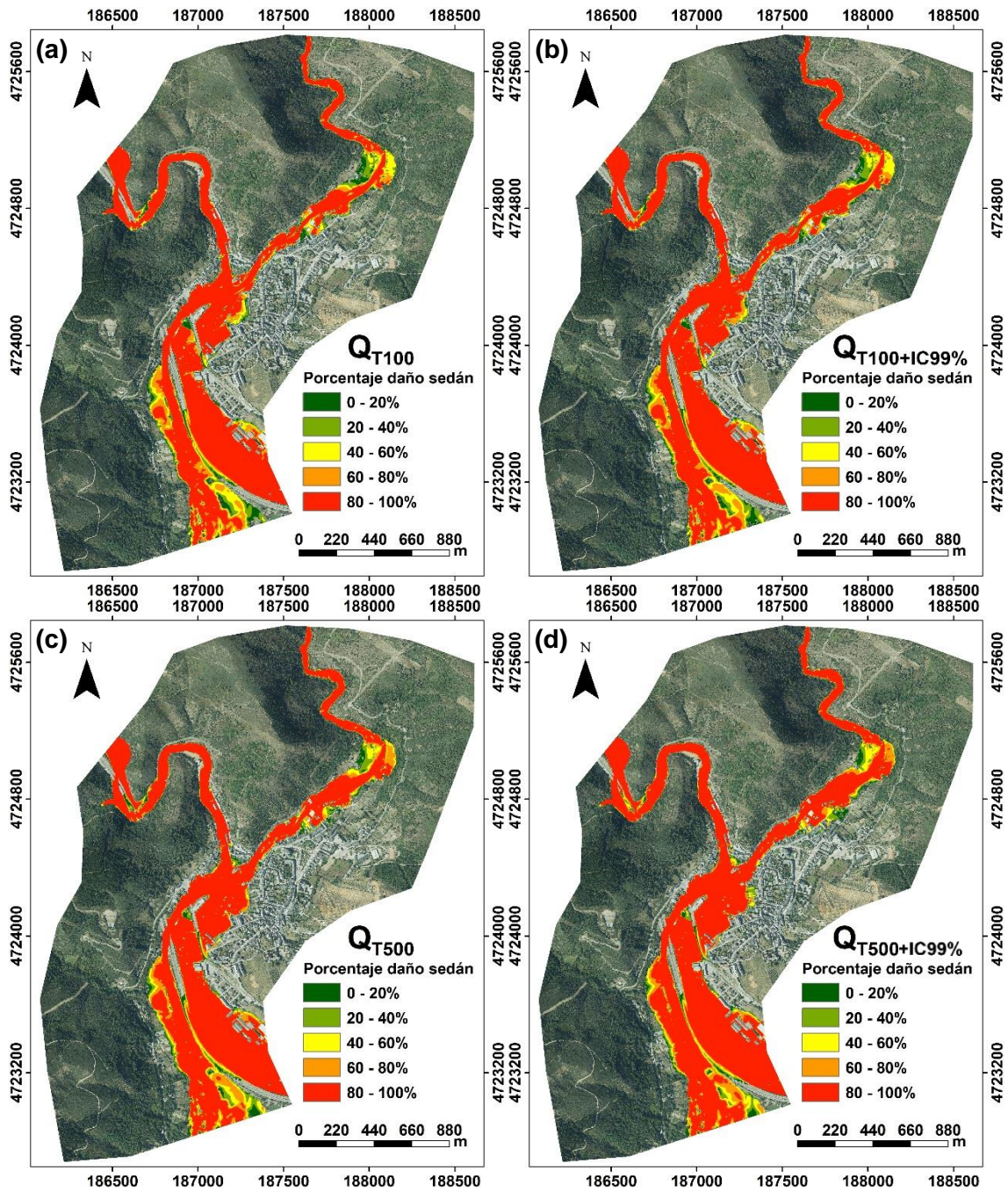


Figura 23. Modelo de daños a Sedan para distintos periodos de retorno. (a) $Q_T=100$. (b) $Q_T=100+IC99\%$. (c) $Q_T=500$. (d) $Q_T=500+IC99\%$.

5.10. Modelo de peligrosidad por arrastre de personas

En la Figura 24 se puede apreciar el modelo de arrastre de personas (Russo *et al.*, 2013) para distintos periodos de retorno. Las áreas más peligrosas para las personas son las riberas de los ríos Valcarce y Burbia, y el sureste de la localidad donde se ubica la ruta fluvial caminante, lo cual se debiese considerar en la gestión del territorio ante alertas de avenidas. Además, se

observa que en el sector sureste y noreste del poblado, margen derecha del río Burbia, son áreas donde es más visible el cambio en la peligrosidad para personas al aumentar el periodo de retorno y/o el intervalo de confianza, pues son sectores sensibles al aumento de calado (Figuras 11 y 12) y velocidad (Anexos 8 y 9) al incrementarse los caudales punta.

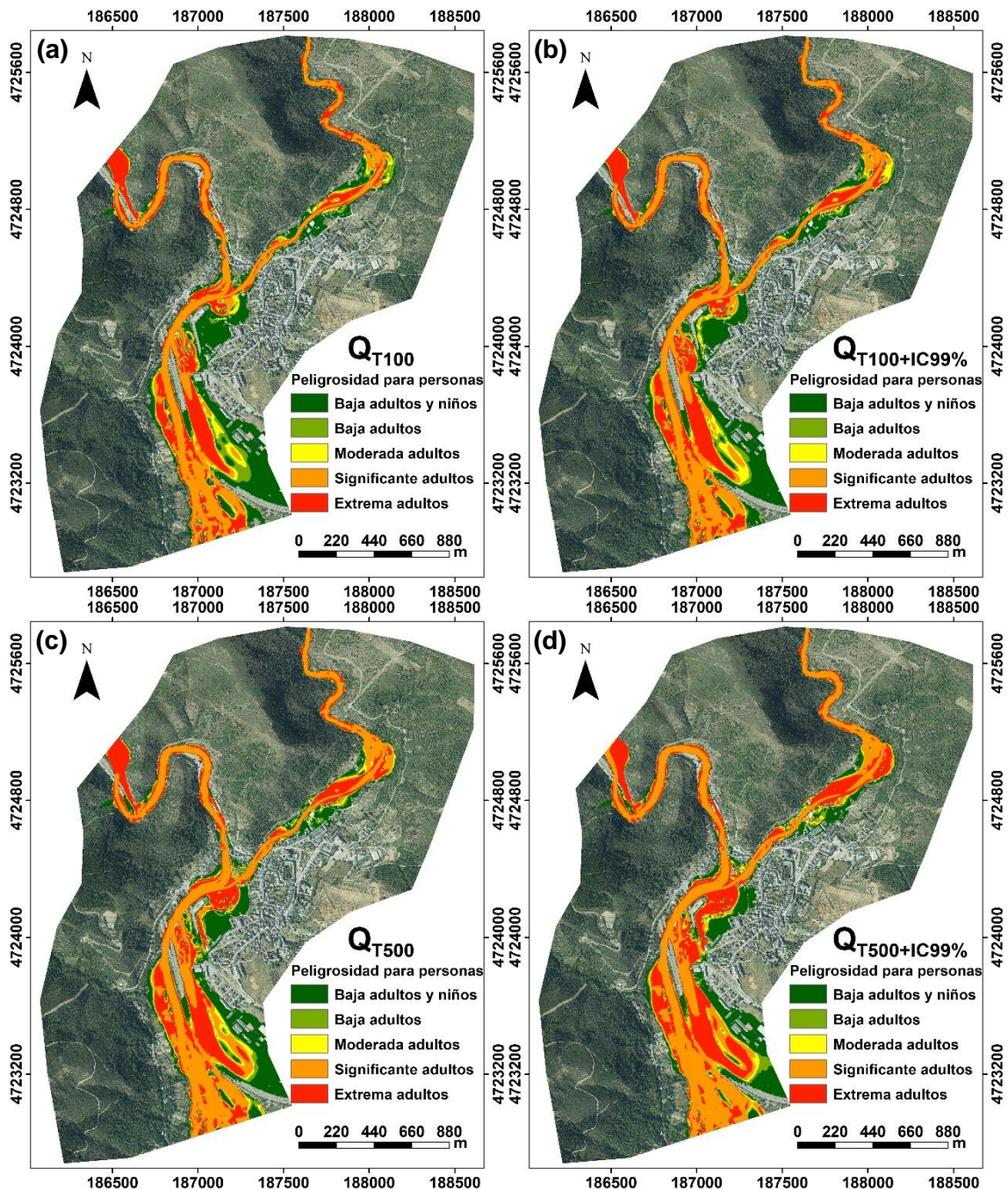


Figura 24. Modelo arrastre de personas para distintos periodos de retorno. (a) $Q_T=100$. (b) $Q_T=100+IC99\%$. (c) $Q_T=500$. (d) $Q_T=500+IC99\%$.

6. DISCUSIÓN

Villafranca del Bierzo es principalmente atravesada por el río Burbia, pero como en las cercanías existe una confluencia con el río Valcarce, se ha decidido incluirlo en el estudio, puesto que, podría haber una inundación donde justo coincidiesen espacial y temporalmente los máximos de las avenidas de ambos ríos, de tal forma que se ocasionase una adición de caudales que aumente la peligrosidad y la superficie inundada.

La cartografía probabilística tiene una gran ventaja que es su versatilidad para estimación de caudales punta y para incorporar intervalos de confianza a los resultados, además, de ser fácil para adaptarse a nuevos escenarios producto del cambio climático o cambios en el uso de la tierra, por lo que en este estudio resulta fundamental para la estimación de posibles daños, en el manejo del riesgo por avenida y en la adopción de medidas de mitigación cuando no se dispone de información para la realización de cartografía convencional (Garrote *et al.*, 2021). De esta forma, se espera que los resultados aquí mostrados podrían acercarse mucho a la realidad, al menos en periodos de retorno de $Q_T=100$ y $Q_T=500$, puesto que para $Q_T=1000$, la incertidumbre aumenta considerablemente, por lo que, si bien se ha realizado el modelo hidrodinámico (Figura 13) y de velocidades (Anexo 10) para aquel periodo de retorno y sus intervalos de confianza, no se ha utilizado para estimación de los modelos de daños.

Para estimar riesgos fluviales, lo importante es conocer con seguridad el límite máximo de una inundación, por lo cual, se ha utilizado la parte positiva de los intervalos de confianza (Anexos 1 y 2). Se podrían haber utilizado los valores negativos del intervalo de confianza para definir zonas mínimas de inundación, pero lo que interesa es saber el escenario menos favorable, para estar preparados y tener los medios para mitigar la problemática. El caudal punta esperable para cada periodo de retorno es el interesante para el análisis de la peligrosidad, porque puede definir cuál es la zona máxima afectada por las aguas.

Tanto el calado (Figuras 11, 12 y 13) como la velocidad (Anexos 8, 9 y 10) aumentan a medida que se va a periodos de retorno más grande, como sería esperable. Los errores (o incertidumbres) en las estimaciones de caudales aumentan al incrementarse el periodo de retorno estimado, siendo mayor la incertidumbre cuanto menor es la longitud de la serie temporal aforada disponible. Una forma de aumentar la precisión consistiría en reducir la incertidumbre con que se estiman los datos estadísticos mediante información regional, o bien, empleando antecedentes de avenidas históricas como la del año 1715, pues son datos que no están registrados en estaciones de aforo y puede aportar información directa sobre el comportamiento de la cola derecha de la distribución de valores extremos en aquel rango de probabilidades, permitiendo una mejora en las estimaciones de los caudales (Jiménez

Álvarez, *et al.*, 2013). Por otra parte, ha de considerarse (o tenerse en consideración) los errores en la modificación del modelo digital de terreno en la zona de ambos cauces (asociados a la falta de información real disponible en estas zonas por la presencia de vegetación de ribera y estructuras transversales al cauce), la precisión en la digitalización de áreas para la asignación de rugosidad y las aproximaciones realizadas a los cálculos numéricos por la función de distribución, el software de modelización y los modelos de daños. Todo ello lleva a que los modelos generados en este estudio no pueden considerarse una verdad absoluta, sino una aproximación a la realidad.

Las principales diferencias de los modelos de $Q_T=100$ y $Q_T=500$ propuestos en este estudio con los del Instituto Geográfico Nacional (2022) para los mismos periodos de retorno se deberían principalmente a tres razones: (1) El MDT generado a partir de nubes de puntos ha sido corregido en el tramo de los cauces Burbia y Valcarce donde se observó un evidente error de interpolación con los árboles circundantes, además de que ha sido modificado en los tramos donde habían puentes, por lo cual, se espera que el detalle de este estudio se acerque más a la realidad que los modelos del IGN respecto a la resolución topográfica. (2) En los mapas del IGN se consideró un pequeño arroyo denominado San Juan y que se situaría en el sureste del área de estudio, pero que estudios fotogramétricos y en terreno no lo han hallado, sin embargo, induce una diferencia negativa de caudal a favor de los modelos del IGN. (3) Los modelos del IGN utilizan caudales punta de $Q_T=25$ y $Q_T=100$ para el río Valcarce en las estimaciones de periodos de retorno de $Q_T=100$ y $Q_T=500$ que consideran ambos cauces (Burbia y Valcarce) funcionando a la vez, respectivamente, lo cual, podría explicar las diferencias positivas a favor de los modelos de este estudio principalmente en la zona donde se ubica el río Valcarce y condiciona las diferencias aguas abajo de la confluencia con el río Burbia (puesto que se está considerando un mayor volumen global para el evento de avenida). En esta zona las lluvias provienen de frentes atlánticos, lo que las hace prolongadas en el tiempo y más homogéneas espacialmente (aunque es cierto que considerar una homogeneidad espacial de la lluvia para el conjunto de ambas cuencas de drenaje, puede llevar a una sobre-estimación de caudales punta para un periodo de retorno determinado), por lo cual, no está claro el criterio seguido para asumir heterogeneidad en las cuencas y utilizar caudales de diferentes periodos de retorno en los ríos de esta zona, ni tampoco la razón de haber escogido $Q_T=25$ y $Q_T=100$ en lugar de otro periodo de retorno para el Valcarce. En principio, no se conoce que exista alguna estimación del aporte de ambas cuencas por lo que los caudales habrían sido utilizados arbitrariamente (o al menos es lo que puede plantearse en primera instancia). De todas formas, los modelos de este estudio asumen una homogeneidad diferente a lo planteado en los trabajos llevados a cabo para el desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI), y permite llevar las

estimaciones a un escenario menos probable (al asumir la uniformidad de las lluvias a lo largo de ambas cuencas) y más catastrófico, pero que es útil para estar preparados para el peor escenario posible.

Se pueden distinguir tres zonas en Villafranca del Bierzo, donde se observa que la peligrosidad asociada a las inundaciones sería de consideración. En la zona A, existe una gran cantidad de edificaciones cercana a la confluencia que se ven afectadas con distinto porcentaje de daños según el periodo de retorno aplicado, además de afectar al Convento de la Purísima Concepción. En la Zona B, tanto por el calado como la velocidad máxima alcanzada en esta área, se dañaría gravemente el Estadio Municipal La Ruquela y el Convento de la Anunciada, además de una decena de casas. En la zona C, en cambio, el principal daño sería a industrias y bodegas. La situación se ve agravada en cuanto se va yendo a periodos de retorno mayores, lo cual es esperable, pues los caudales iniciales para ambos ríos son mayores y, por ende, el calado máximo en los modelos también aumenta. Entonces se podría observar que, a mayor periodo de retorno, mayores son los daños esperados, y como se aprecia en el modelo de daños económico de Garrote *et al.* (2014) aplicado para la zona A, también aumentan los daños económicos asociados. Sería esperable que, si se realizan inventarios para desarrollar modelos económicos aplicables para los edificios singulares como iglesias, palacios o escuelas, también se observe la misma tendencia.

Los modelos de daños a edificaciones han permitido cuantificar el porcentaje de daño en las construcciones para distintos periodos de retorno, por lo que se puede ver cuáles son las construcciones que requieren de forma más necesaria medidas de mitigación para reducir las pérdidas. Aparte de aquello, sería óptimo considerar la época del daño y el tiempo en que el terreno este bajo las aguas, porque podría influir en que si la planta finalmente se pudre o no o si las pérdidas económicas son o no de gran trascendencia. Se recomienda que en base al porcentaje de daño y a las pérdidas estimadas, los propietarios de las edificaciones potencialmente afectables contraten una póliza de seguros que cubra el valor económico presupuestado, ya sea mediante medidas individuales o colectivas. También, en función del número de edificaciones afectadas, es posible que la implementación de medidas de auto-protección como puertas anti-inundaciones sea una medida efectiva y viable económicamente para limitar los posibles daños por inundaciones en las edificaciones afectadas, como se observa de las conclusiones expuestas por Garrote *et al.* (2019) para la localidad de Pajares de Pedraza (Segovia, España).

Los modelos de daños a vehículos (considerando la tipología Sedan) y para el arrastre de personas para los distintos periodos de retorno podrían ser muy útiles para aquellos organismos o entidades encargadas de la gestión de riesgos de desastres y emergencias,

aportando valiosa información que da soporte a la toma de decisiones en situaciones de alerta por una avenida inminente. En el caso del modelo de daños para vehículos Sedan, se aprecia que para el período de retorno de $Q_T=100$ y $Q_T=500$, como en sus respectivos intervalos de confianza, prácticamente existirían daños de pérdida total en gran parte de la extensión de la avenida, y pudiendo afectar gravemente a vehículos que transitando por el costado oeste de la localidad. Es de consideración para el daño de vehículos Sedan no solo restringir la circulación de automóviles por las calles (en situaciones de emergencia o alerta por posibles inundaciones), sino también, plantear una posible evacuación de los talleres San Juan Carlos y Luis Potes, ambos dedicados a la mantención de vehículos, ya que, se ubican aledaños al cauce principal del río Burbia, y concentran varias decenas de coches en sus instalaciones. Las personas, en tanto, ante una avenida inminente deberían evacuar la ruta fluvial caminable del río Burbia, que es muy concurrida por deportistas y gente que suele transitar con animales domésticos, además de la zona sureste de la localidad y la totalidad de la ribera de los ríos Burbia y Valcarce.

7. CONCLUSIÓN

La cartografía probabilística es una opción válida para la estimación de caudales punta cuando no se tienen datos concretos de estaciones de aforo para estimar avenidas (o al menos no se tienen los suficientes como para que la longitud de la serie de datos aforados permita estimar con una baja incertidumbre los caudales punta asociados a periodos de retorno de entre $Q_T=100$ y $Q_T=500$), puesto que no solo se obtiene el máximo de la lámina de agua en un sitio específico, sino que también, se puede conocer el grado de incertidumbre que conlleva la estimación.

Si bien el propósito inicial de este estudio era comprobar si el patrimonio histórico español, compuesto por los Bienes de Interés Cultural en Villafranca del Bierzo, como la Colegiata de Santa María de Cluni eran afectados o no por avenidas asociadas a elevados periodos de retorno, la generación de cartografía probabilística ha sido útil para cuantificar posibles daños a la totalidad de edificaciones de la localidad, además de visualizar el potencial daño a vehículos y arrastre de personas. De los edificios singulares, tanto en los periodos de retorno de $Q_T=100$ como $Q_T=500$ y con todos sus intervalos de confianza, se verían afectados el Estadio Municipal La Ruquela, el Convento de la Purísima Concepción y el Convento de la Anunciada (estos últimos dos forman parte del patrimonio monumental de Villafranca del Bierzo), con calados máximos y daños que aumentan en relación directa con el periodo de retorno.

Subdividiendo el entorno de Villafranca del Bierzo en tres zonas, los resultados de la zona A, donde confluyen los ríos Burbia y Valcarce, muestran que esta puede ser una de las más problemáticas porque en ella se ven afectadas una mayor cantidad de edificaciones que en las otras zonas. La zona B podría representar un riesgo para las personas si están realizando actividades deportivas, mientras que la zona C el principal problema sería el daño económico que significaría para las industrias y bodegas allí asentadas.

Los resultados aquí mostrados también adolecen de una cierta incertidumbre, puesto que parten de una tendencia de comportamiento definida por los parámetros de ajuste de la función de distribución GEV obtenida en la aplicación CauMAX. Por ello, podría ser de gran interés el considerar para el ajuste de los datos la información indirecta disponible, como aquella información relativa al evento de inundación de 1715. De esta forma, se podrían obtener datos que ayudarían a mejorar la estimación y el comportamiento de las avenidas asociadas a elevados periodos de retorno (baja frecuencia de ocurrencia), mediante una mejora de la estimación de la parte alta de la ley de frecuencia de avenidas de este punto del territorio.

8. REFERENCIAS

- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., Dolz, J. Coll, A. (2014). Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 30(1), 1-10, <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.004>
- Chow, V. (2004). Hidráulica de canales abiertos. Bogotá: *McGraw-Hill*.
- Garrote, J., Alvarenga, F.M., Díez-Herrero, A. (2014). Quantification of flash flood economic risk using ultra-detailed stage–damage functions and 2-D hydraulic models. *Journal of Hydrology*, 541(A), 611-625, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.02.006>
- Garrote, J., Bernal, N., Díez-Herrero, A., Martins, L., Bodoque, J. (2019). Civil engineering works versus self-protection measures for the mitigation of floods economic risk. A case study from a new classification criterion for cost-benefit analysis. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 37, 101157, <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2019.101157>
- Garrote, J., Peña, E., Díez-Herrero, A. (2021). Probabilistic Flood Hazard Maps from Monte Carlo Derived Peak Flow Values-An Application to Flood Risk Management in Zamora Cit (Spain). *Applied Sciences*, 11, 6629, <https://doi.org/10.3390/app11146629>
- Iberaula.(2022). About the model: Iber. <https://www.iberaula.es/1070/iber-model>
- Instituto Geográfico Nacional.(2022). Mapa de peligrosidad por inundación fluvial: Centro de Descargas del CNIG (Centro Nacional de Información Geográfica). <https://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp>
- Instituto Nacional de Estadística.(2022). Población del Padrón Continuo por Unidad Poblacional: Villafranca del Bierzo. <https://www.ine.es/nomen2/index.do?accion=busquedaDesdeHome&nombrePoblacion=Villafranca%20del%20Bierzo&x=5&y=11>
- Jiménez Álvarez, A., García Montañés, C., Mediero Orduña, L., Incio Caballero, L., Garrote Revilla, J. (2013). Bases metodológicas del mapa de caudales máximos de las cuencas intercomunitarias. Madrid, España: *Monografías, M-120 CEDEX, Centro de Publicaciones, Ministerio de Fomento*.
- Russo, B., Gómez, M., Macchione, F. (2013). Pedestrian hazard criteria for flooded urban areas. *Nat. Hazards* 2013, 69, 251-265, <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0702-2>
- Sede Electrónica del Catastro.(2022). <https://www.sedecatastro.gob.es/Accesos/SECAccDescargaDatos.aspx>
- USACE.(2003). Economic Guidance Memorandum (EGM) 04-01, Generic Depth-Damage Relationships for Residential Structures with Basements. Washington, DC: *Army Corps of Engineers*, 17. <https://planning.erdc.dren.mil/toolbox/library/EGMs/egm04-01.pdf>
- USACE.(2009). Economic Guidance Memorandum (EGM) 09-04, Generic Depth-Damage Relationships for Vehicles. Washington, DC: *Army Corps of Engineer*, 9. <https://planning.erdc.dren.mil/toolbox/library/EGMs/egm09-04.pdf>
- Villafranca del Bierzo. (2022). Orígenes y evolución histórica local. <http://www.villafrancadelbierzo.org/turismo-historia.php>
- Weather Spark (2022). El clima y el tiempo promedio en todo el año en Villafranca del Bierzo. <https://es.weatherspark.com/y/33702/Clima-promedio-en-Villafranca-del-Bierzo-Espa%C3%B1a-durante-todo-el-a%C3%B1o>

9. ANEXOS

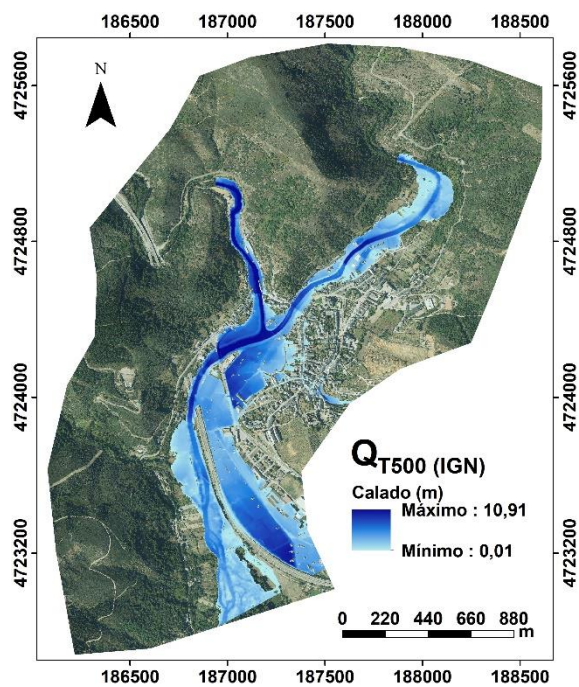
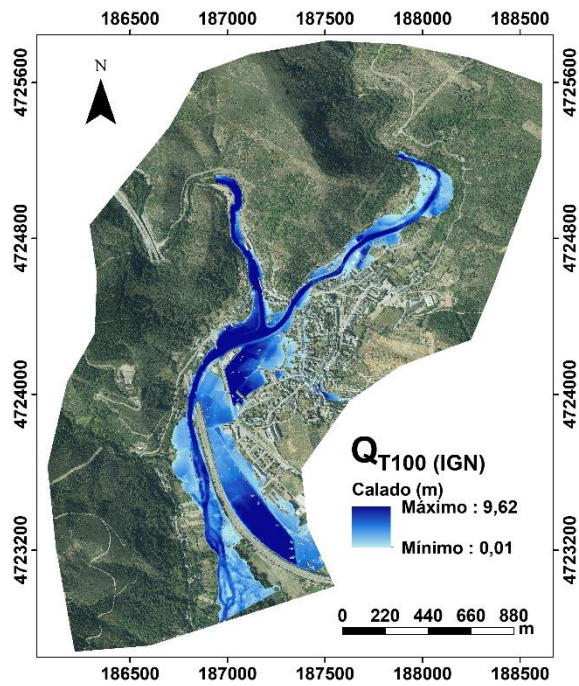
Anexo 1. Tabla de datos de caudales punta para río Burbia.

	Q_{T2}	Q_{T5}	Q_{T10}	Q_{T25}	Q_{T50}	Q_{T100}	Q_{T200}	Q_{T500}	Q_{T1000}
Q_T + IC									
99%	80,169	130,92	167,27	220,16	263,65	312,83	374,69	452,15	525,87
Q_T +									
IC 95%	79,682	129,39	165,04	216,19	258,01	304,67	361,56	434,46	501,92
Q_T +									
IC 90%	79,433	128,61	163,89	214,16	255,12	300,49	354,83	425,39	489,65
Q_T +									
IC 80%	79,145	127,7	162,58	211,82	251,79	295,67	347,07	414,94	475,51
Q_T +									
IC 67%	78,902	126,94	161,46	209,83	248,97	291,59	340,5	406,09	463,54
Q_T +									
IC 50%	78,665	126,19	160,38	207,9	246,22	287,61	334,1	397,47	451,87
Q_T	78,132	124,51	157,93	203,55	240,03	278,66	319,7	378,06	425,61
Q_T - IC									
50%	77,598	122,83	155,48	199,19	233,84	269,7	305,29	358,65	399,35
Q_T -									
IC 67%	77,361	122,08	154,4	197,26	231,09	265,73	298,89	350,03	387,68
Q_T -									
IC 80%	77,118	121,32	153,28	195,27	228,27	261,64	292,32	341,19	375,71
Q_T -									
IC 90%	76,831	120,41	151,96	192,93	224,94	256,82	284,57	330,73	361,57
Q_T - IC									
95%	76,582	119,63	150,82	190,9	222,05	252,64	277,83	321,66	349,3
C	76,095	118,1	148,59	186,93	216,41	244,48	264,7	303,97	325,35

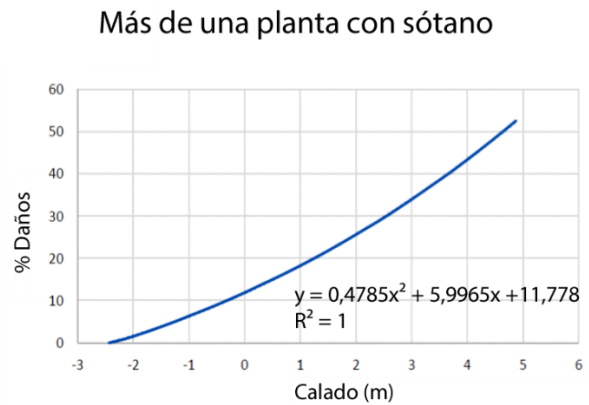
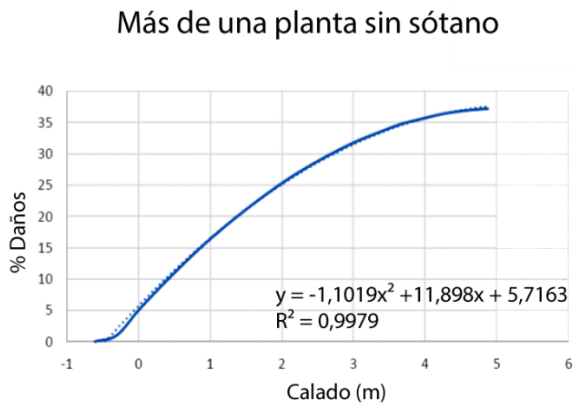
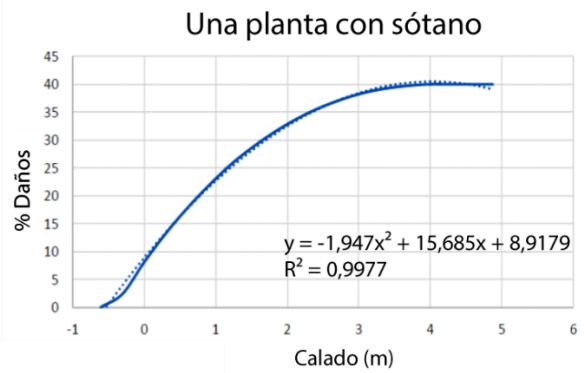
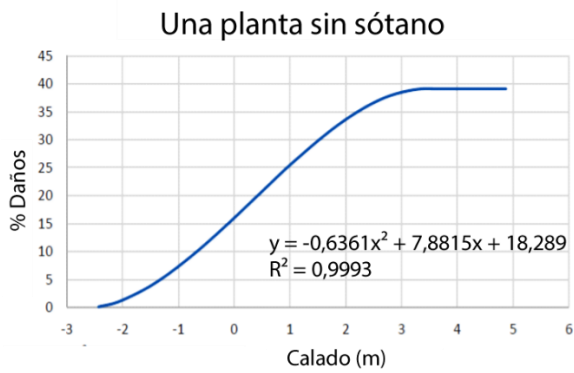
Anexo 2. Tabla de datos de caudales punta para río Valcarce.

	Q_T2	Q_T5	Q_T10	Q_T25	Q_T50	Q_T100	Q_T200	Q_T500	Q_T1000
Q_T+ IC									
99%	179,03	274,84	344,1	445,82	530,15	626,25	748,31	902,1	1049,9
Q_T +									
IC 95%	178,13	271,93	339,84	438,17	519,22	610,34	722,48	867,12	1002,3
Q_T +									
IC 90%	177,67	270,45	337,65	434,25	513,62	602,19	709,25	849,2	977,89
Q_T +									
IC 80%	177,14	268,73	335,14	429,73	507,16	592,79	693,99	828,53	949,74
Q_T +									
IC 67%	176,69	267,28	333,01	425,91	501,7	584,84	681,08	811,05	925,93
Q_T +									
IC 50%	176,25	265,87	330,94	422,19	496,38	577,09	668,5	794	902,72
Q_T	175,27	262,68	326,27	413,8	484,39	559,65	640,18	755,64	850,47
Q_T - IC									
50%	174,28	259,5	321,59	405,41	472,4	542,2	611,86	717,27	798,22
Q_T -									
IC 67%	173,84	258,08	319,52	401,68	467,08	534,46	599,27	700,23	775,01
Q_T -									
IC 80%	173,39	256,63	317,39	397,86	461,62	526,5	586,36	682,74	751,19
Q_T -									
IC 90%	172,86	254,92	314,88	393,34	455,16	517,11	571,11	662,08	723,05
Q_T - IC									
95%	172,4	253,43	312,69	389,42	449,56	508,96	557,87	644,15	698,63
C	171,51	250,52	308,43	381,77	438,63	493,05	532,05	609,17	650,99

Anexo 3. Modelos hidráulicos del Instituto Geográfico Nacional (2022) para periodos de retorno de $Q_T=100$ y $Q_T=500$.

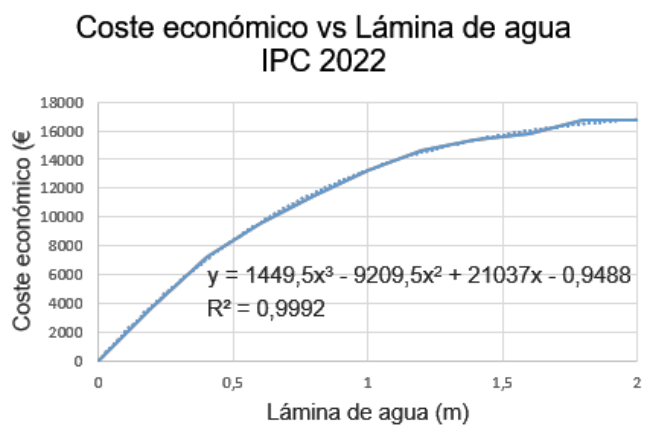


Anexo 4. Modelo de daños a edificaciones (USACE, 2003).

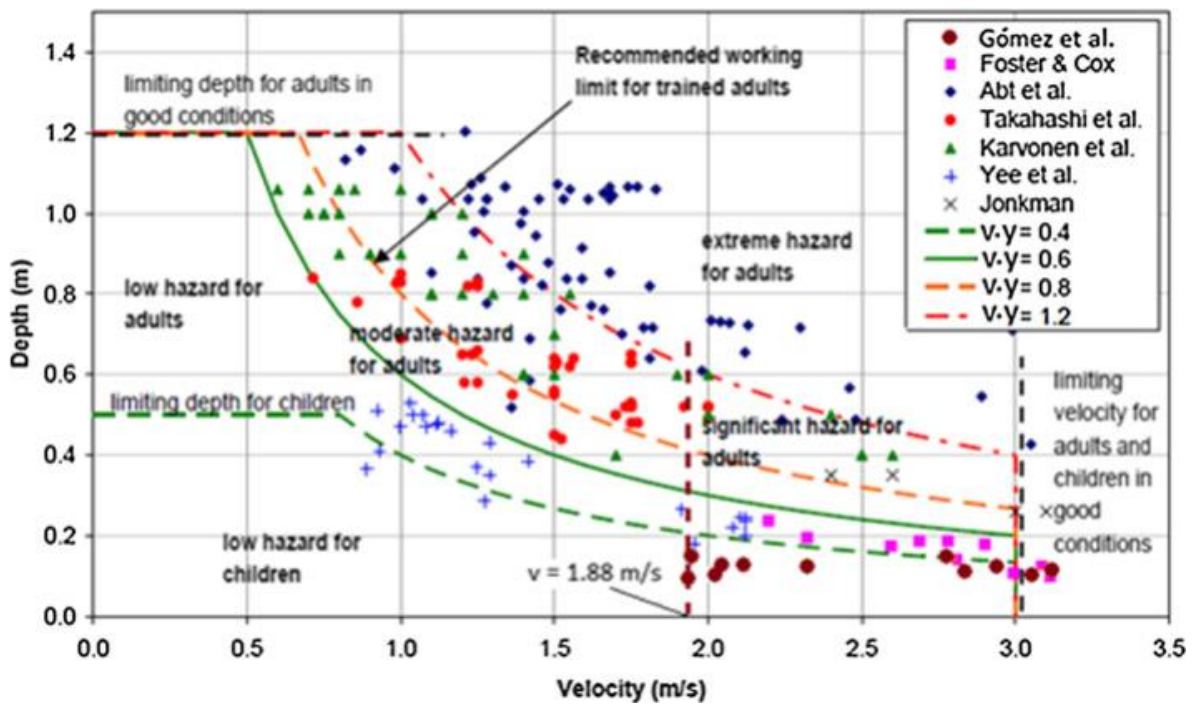


Anexo 5. Daño económico para edificaciones (Garrote *et al.*, 2014).

Lámina de agua (m)	Coste económico IPC 2014 (€)	Coste económico IPC 2022 (€)
0	0	0
0,2	3283,83	3737,00
0,4	6387,68	7269,17
0,6	8438,70	9603,24
0,8	10099,30	11493,00
1	11629,95	13234,88
1,2	12886,33	14664,64
1,4	13519,98	15385,73
1,6	13879,35	15794,70
1,8	14684,35	16710,79
2	14718,85	16750,05

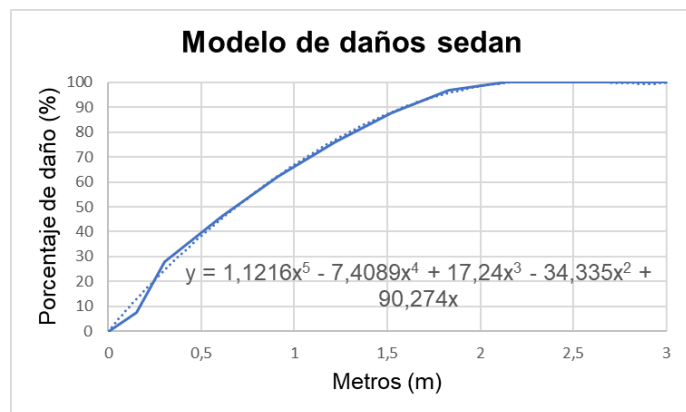


Anexo 6. Gráfica de niveles de peligro propuestos en función de la profundidad y la velocidad (Russo et al., 2013).



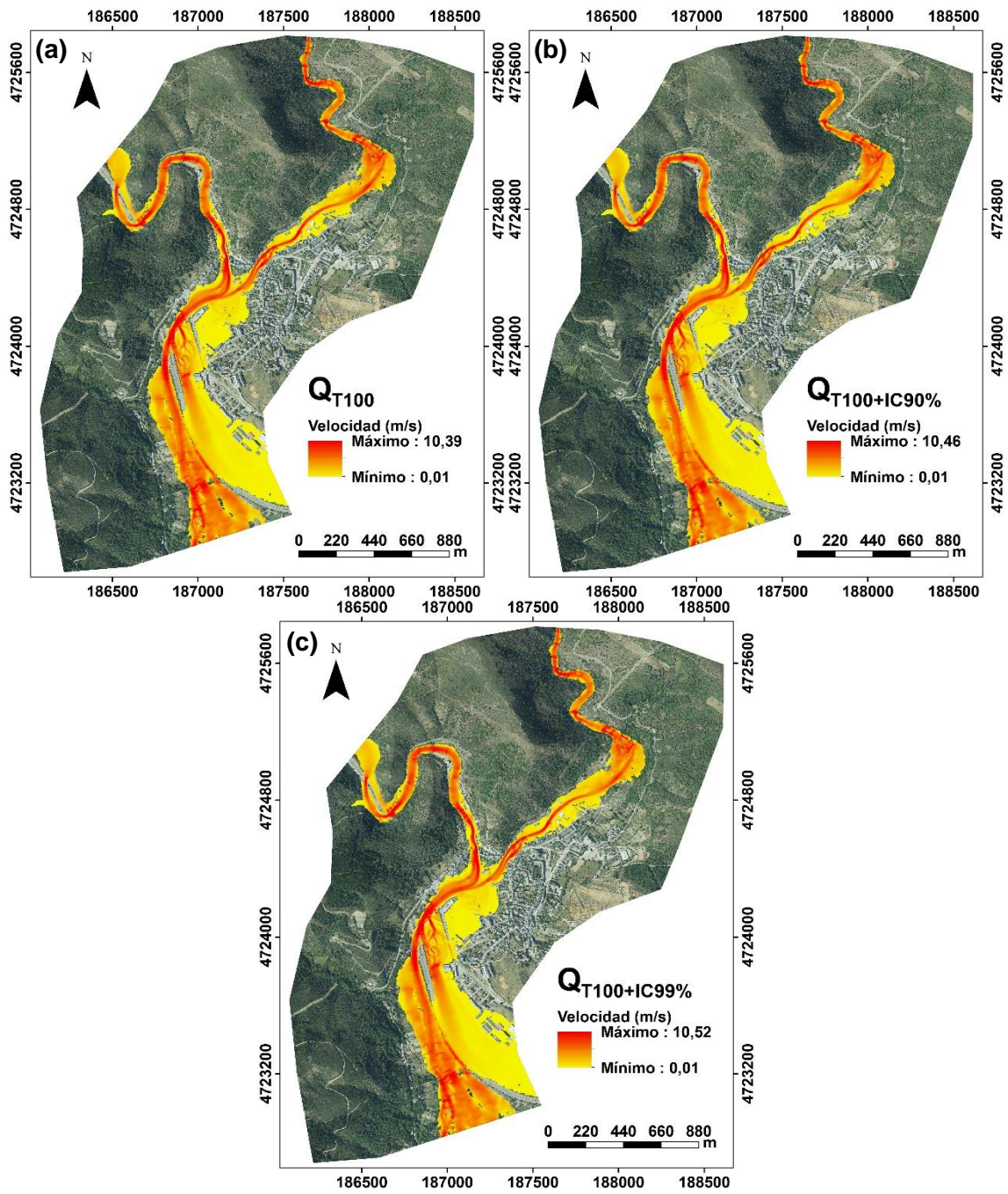
Anexo 7. Tabla de porcentaje de daño a vehículos de tipo Sedan y gráfica de la regresión lineal (USACE, 2009).

Profundidad (m)*	Porcentaje daño a Sedan (%)
0	0
0,1524	7,6
0,3048	28
0,6096	46,2
0,9144	62,2
1,2192	76
1,524	87,6
1,8288	97
2,1336	100
2,4384	100
2,7432	100
3,048	100

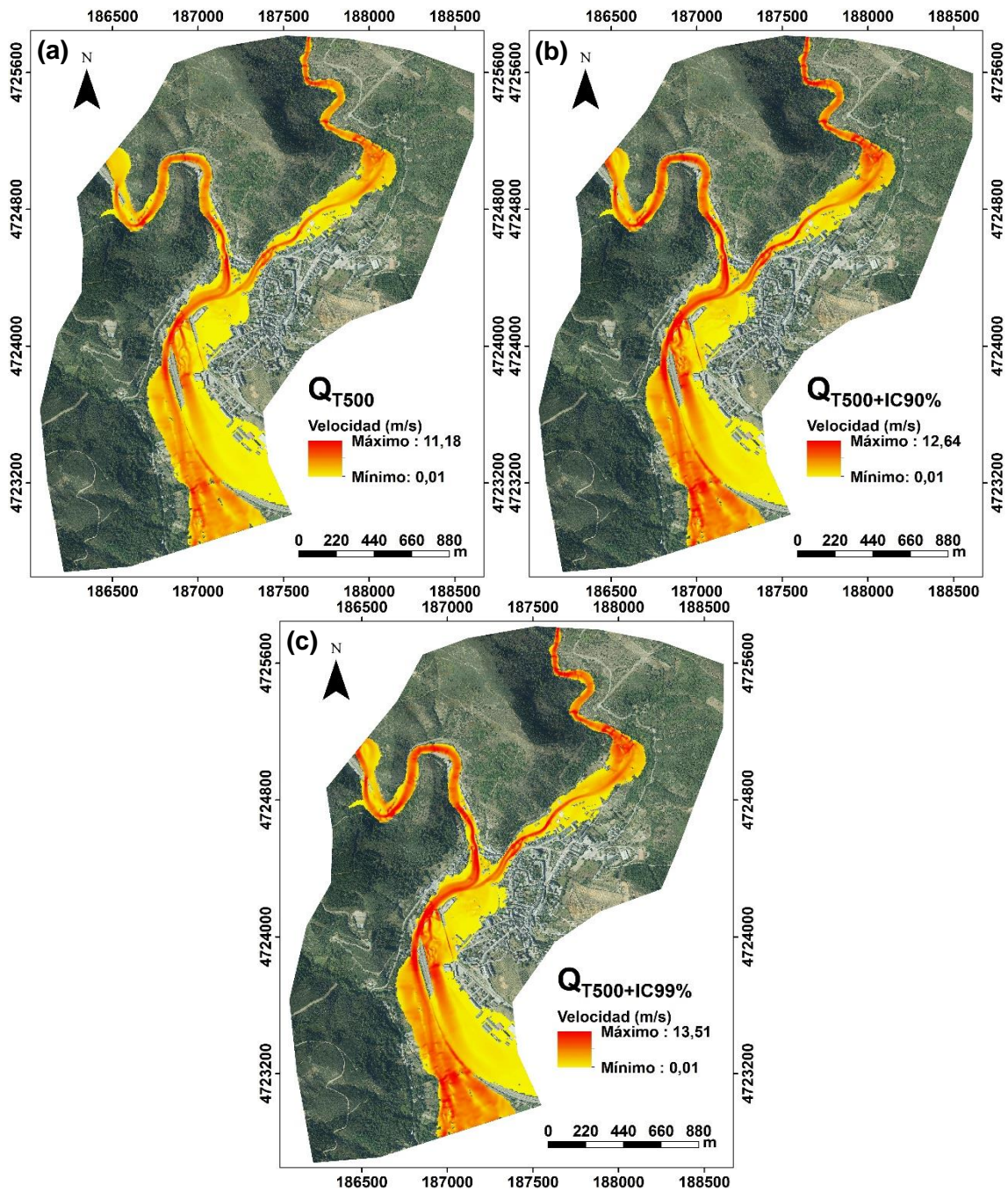


*Los datos originales en la publicación de Russo et al. (2013) están en unidad de medida pies, por lo que se han transformado a metros. Además, se le ha añadido la condición de que cuando el calado es 0 m, el daño también es 0%.

Anexo 8. Modelo de velocidades para periodo de retorno de 100 e intervalos de confianza. (a) $Q_T=100$. (b) $Q_T=100+IC90\%$. (c) $Q_T=100+IC99\%$.



Anexo 9. Modelo de velocidades para periodo de retorno de 500 e intervalos de confianza. (a) $Q_T=500$. (b) $Q_T=500+IC90\%$. (c) $Q_T=500+IC99\%$.



Anexo 10. Modelo de velocidades para periodo de retorno de 1000 e intervalos de confianza. (a) $Q_T=1000$. (b) $Q_T=1000+IC90\%$. (c) $Q_T=1000+IC99\%$.

