

Cómo citar este trabajo: Gallegos Reina, A., & Perles Roselló, M. J. (2020). Methodology for the integrated analysis of hazards associated to flooding: proposal adapted to the spatial planning in Mediterranean regions. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, (86). <https://doi.org/10.21138/bage.2950>

Metodología para el análisis integrado de peligros asociados a la inundación: propuesta adaptada a la ordenación territorial en regiones mediterráneas

Methodology for the integrated analysis of hazards associated to flooding:
proposal adapted to the spatial planning in Mediterranean regions

Antonio Gallegos Reina 

a.gallegos@uma.es

María Jesús Perles Roselló 

mjperles@uma.es

Departamento de Geografía

Universidad de Málaga (España)

Resumen

El objetivo del presente trabajo es presentar una propuesta metodológica de análisis de inundabilidad, incorporando peligros asociados, para adaptar la evaluación de la inundabilidad a las particularidades del área geográfica del litoral mediterráneo español como región-riesgo. Se pretende con ello dar un enfoque territorial al análisis de la inundabilidad, siguiendo los nuevos requisitos introducidos por la legislación en materia de riesgos naturales e inundaciones, orientándolo de manera directa a la gestión y ordenación territorial para escalas locales y regionales, y buscando una estimación más fiable de su estudio en regiones mediterráneas. La normativa española en la actualidad establece el estudio hidrológico-hidráulico como documento

Recepción: 06.04.2020

Aceptación: 31.07.2020

Publicación: 11.10.2020



Este trabajo se publica bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional.

que evalúa el riesgo de inundación de una zona. La metodología propone incorporar a este estudio un análisis de la potencial generación de aportes al caudal por erosión de suelos en la cuenca, así como por movimientos en masa, incluyendo así información tanto cuantitativa como cualitativa sobre el aporte de partículas sólidas al flujo de inundabilidad. Los resultados, tras su aplicación en una cuenca piloto en el litoral malacitano, muestran una mejor estimación de la lámina de inundación de la propuesta metodológica con respecto a la metodología convencional.

Palabras clave: inundabilidad; peligros asociados; regiones mediterráneas; ordenación territorial; erosión hídrica.

Abstract

The objective of this research is to present a methodological proposal for flood analysis, incorporating associated hazards, to adapt the flood assessment to the particularities of the geographical area of the Spanish Mediterranean coast as a risk region. The aim is to give a territorial approach to the analysis of flooding, following the new requirements introduced by the legislation on natural hazards and floods, directing it directly to territorial management and planning for local and regional scales, and seeking an estimate most reliable of his study in Mediterranean regions. Spanish regulations currently establish the hydrological-hydraulic study as a document that evaluates the risk of flooding in an area. The methodology proposes to incorporate into this study an analysis of the potential generation of contributions to the flow by soil erosion in the basin, as well as by mass movements, thus including both quantitative and qualitative information on the contribution of solid particles to the flood flow. The results, after its application in a pilot basin on the Malaga coast, show a better estimation of the flood plate than the methodological proposal with respect to the conventional methodology.

Key words: flooding; multi-hazard; mediterranean regions; spatial planning; water erosion.

1 Introducción y antecedentes

Los procesos de crecida e inundación en medios rexistásicos, como es el caso del mediterráneo español, se ven marcadamente influenciados por otros peligros asociados como la erosión y los movimientos en masa. En la actualidad, en un contexto de cambio climático, los indicadores de peligrosidad de estos riesgos en el ámbito mediterráneo están siendo elevados en su metrología. El V Informe del IPCC sobre Cambio Climático (IPCC, 2014) confirma las incidencias de los cambios previstos en varios riesgos de comportamientos asociado tales como incendios, sequía,

erosión, inundaciones y movimientos en masa, así como en los procesos costeros. Como se destaca en este documento, se trata, además, de riesgos de potencial funcionamiento asociado, con probabilidad de crear escenarios de crisis muy complejos y catastróficos, por sus potenciales efectos sinérgicos (Perles & Cantarero, 2010).

1.1 Antecedentes

El análisis de la peligrosidad se ha realizado tradicionalmente con una perspectiva sectorial que analiza por separado los tipos de peligro según su etiología. Esta vía ha dado como resultado un avance muy productivo en las metodologías de evaluación particular de cada uno de los tipos de peligros o amenazas, que cuentan con antecedentes múltiples. En España, en el ámbito del riesgo de erosión, pueden citarse, entre otras aportaciones relevantes, textos compilatorios como los de Arnáez (2014), sobre trabajos de García Ruíz, o los de Camarasa, Caballero e Iranzo (2018), Martínez Navarro (2017), León et al. (2015), García Ruiz & Lana-Renault (2011), Gómez Gutiérrez et al. (2011), o Lasanta et al. (2010). Las interrelaciones entre el incendio, el suelo y la erosión han sido tratadas recientemente por Martínez et al. (2016) o Cerdá & Jordán (2010), entre otros. Algunos autores se centran en la cuantificación de los procesos de intervención antrópica en la erosión (Martín Moreno et al., 2016; Ruíz Sinoga et al., 2011). En una línea más orientada hacia la mitigación, recuperación y restauración de espacios erosionados, pueden citarse igualmente los trabajos de Lima et al. (2017, 2018), Hueso et al. (2014), o Conesa & García (2007). En relación al riesgo de movimientos en masa, la mayoría de las investigaciones se centran en la deducción de metodologías de susceptibilidad predictivas, como es el caso de los trabajos de Bornaetxea & Ormaetxea (2019), García (2018), Bornaetxea et al. (2018 y 2016), o Felicísimo et al. (2013). En lo que se refiere a la peligrosidad de inundación, desde la publicación de la Directiva Europea de Inundaciones los estudios de inundabilidad se han generalizado, especialmente en el ámbito de la gestión institucional de este riesgo, y se ha dado contenido al SNCZI (Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables) para las principales ARPSi (Áreas de Riesgo Potencial Significativo) de España. Desde el ámbito académico y de investigación se ha contribuido a sistematizar la elaboración de los mapas de peligrosidad en trabajos como los de Sánchez & Lastra (2011) o Díez et al. (2008), y se han elaborado cartografías aplicadas en diversas zonas de estudio. Pueden citarse, entre otros, los trabajos de Camarasa (2016) o Segura (2014), que centran su atención en las cuencas efímeras y ramblas mediterráneas, Gallegos & Perles (2019), que amplían el análisis a la provincia de Málaga para poner en relación las peligrosidades de inundación y erosión con la ordenación territorial, o el trabajo de Salazar (2013), que propone medidas de mitigación de inundaciones mediante

retención de agua en el territorio. Otros autores como Ollero et al. (2019) plantean medidas de restauración específicas para cursos efímeros.

En síntesis, puede observarse que el conocimiento específico de los procesos morfogénéticos y climáticos que generan peligrosidad de erosión, movimientos gravitacionales e inundación es cada vez más preciso. Sin embargo, una cuestión poco abordada en los estudios de peligrosidad es la discusión y propuesta de metodologías para el análisis de los peligros de funcionamiento asociado, cuestión que resulta clave al tratar el riesgo de inundación en un contexto mediterráneo. En un ambiente tectónico y propicio a las inundaciones relámpago, la principal cadena de peligros asociados a resolver es la que vincula a la erosión hídrica, los movimientos gravitacionales y la inundación. No considerar las interconexiones y efectos en cadena entre los distintos tipos de peligros conlleva minusvalorar la sinergia conjunta de los procesos, y en definitiva, supone minusvalorar la peligrosidad.

Diversos foros internacionales llevan tiempo advirtiendo sobre la necesidad de evaluar de forma conjunta los peligros de funcionamiento asociado. Ya en 2005, la Conferencia Mundial de la ONU en Kobe (2005) centró su atención en los conceptos de multi-peligrosidad y multi-riesgo, aspectos que se recogen también en la *Risk assesment and mapping guidelines for disaster management* publicada por la Comisión Europea en 2010 (European Comision, 2010). Esta idea ha sido retomada con más fuerza en los documentos que alertan sobre el comportamiento de los riesgos en un contexto de cambio climático. La propia Directiva Europea de Inundaciones (2007/60/CE) señala la necesidad de analizar de forma asociada a la inundación los procesos naturales de movimientos en masa, flujos de derrubios, sedimentación de acarrees, zapado de orillas y transgresión marina. Más recientemente, el V Informe del IPCC sobre Cambio Climático (IPCC, 2014) indica de forma expresa cómo es necesario avanzar en el conocimiento de escenarios de riesgo concretos y realistas, que contemplen efectos asociados y sinérgicos.

Los resultados efectivos de estas indicaciones no son numerosos, aunque a nivel internacional, pueden citarse programas y proyectos que han abordado este enfoque a un nivel genérico¹. En España, algunos Planes reguladores de la inundación, como es el caso del INUNCAT,

1 Ejemplos de proyectos y programas orientados al análisis multi-riesgo son ARMONIA (Applied multi Risk Mapping of Natural Hazards for Impact Assessment), DDRM Multi-Risk approach (Délégation aux Risques Majeurs), ESPON (European Spatial Observation Network. Natural and technological hazards and risk in European Regions), GHRIMS (Generalization of Hazard/Risk predictive Mapping Standard for disaster management), JRC Multi-risk Approach, MEDIGRID (Mediterranean Grid of Multi-Risk Data and Models), ORCHESTRA (Open Architecture and Spatial Data Infraestructura for Risk Management), TEMRAP (The European Multi-Risk Assesment Project) y TIGRA (Integrated Geological Risk Assesment).

PATRICOVA y PRICAM, han incorporado criterios geomorfológicos a la hora de delimitar el área inundable. También en esta línea, el Plan PRIGEO propuesto por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), propone cartografiar de forma unitaria las zonas inundables junto a los riesgos asociados de sufusión, movimientos de ladera, erosión o de aterramiento, entre otros. No obstante, en los casos citados, se propone más una cartografía conjunta de los distintos riesgos concernidos, que una evaluación de cuál es la incidencia de los riesgos asociados en la peligrosidad efectiva de inundación. En la mayor parte de las cartografías de inundabilidad recogidas en el SNCZI no se han considerado los criterios geomorfológicos recomendados en la delimitación de las áreas inundables. Este hecho ha sido tratado por Soriano et al. (2019), que observan las diferencias en la delimitación de las zonas inundables pronosticadas en las cartografías de inundabilidad elaboradas en el PATRICOVA, con criterios geomorfológicos, y las del SNCZI, que utilizan criterios hidrológico-hidráulicos. En definitiva, puede observarse que en la mayor parte de las cartografías de inundabilidad por las que se rige el planeamiento a distintas escalas en el territorio español, el grado de peligrosidad pronosticado para el caudal de inundación no considera la incorporación de sólidos al caudal, ni la posibilidad de colapsos u otras interferencias con los movimientos de ladera aledaños a los cauces. Esta situación conduce a infravalorar la virulencia real de la inundación y de sus consecuencias, tal y como se demuestra en diversos estudios que comparan la inundabilidad teórica predicha con la constatada empíricamente en eventos reales (Perles et al., 2006 o Camarasa & Bescos, 2004).

Es posible diferenciar distintos niveles de desarrollo y complejidad en la cartografía de multi-peligrosidad. Liu et al. (2016) y Kappes et al. (2012) distinguen entre dos tipos de peligros múltiples: los que concurren en el espacio y/o tiempo sin una causa común evidente, y los que se activan por un evento común desencadenante.

En el nivel más básico se sitúan las que Perles & Cantarero (2010) denominan cartografías de peligros agrupados, que agrupan los distintos tipos de peligros que se dan en un territorio, sin que se evalúe la interrelación que pueda existir entre ellos. Trabajos recientes en esta línea son, por ejemplo, los elaborados por Ley, 2019; Liu et al., 2016; Marzocchi et al., 2012; Carpignano et al., 2009; o Tarvainen et al., 2006, entre otros.

En un nivel más complejo se sitúan los mapas de peligros en cadena, en los que se evalúan las interacciones entre los distintos procesos de peligrosidad, y sus posibles efectos sinérgicos. Los trabajos pueden abordar cadenas simples de interacción entre dos tipos de peligro, o evaluar interacciones más complejas en las que se impliquen un mayor número de procesos peligrosos.

Como ejemplo de cadenas simples de interacción pueden citarse los trabajos de Meyenfeld (2008), que analizan la conexión de los terremotos y los movimientos en masa, o la de las tormentas y la inundación (Marzocchi et al., 2012; Frolova et al., 2012). Cannon & De Graff (2009) analizan las relaciones del incendio sobre la producción de deslizamientos, mientras Bovolo et al. (2009) y Ewen et al. (2000) investigan el efecto de los mismos en la hidrología, el depósito de sedimentos y la erosión. Wichmann et al. (2009) observan las interrelaciones entre las distintas vías de movilización de sedimentos en alta montaña, conectando distintos procesos gravitacionales de ladera, aludes y cauces fluviales. Los autores modelizan la erosión, transporte y sedimentación de forma independiente para posteriormente simular el proceso de transferencia de masa y energía entre procesos relacionados.

Otros trabajos abordan el análisis asociado de un mayor número de procesos de peligrosidad, por lo que proponen cadenas de interconexiones más complejas, habitualmente basadas en un árbol de interconexiones entre los distintos peligros, o en un sistema de matrices. Un ejemplo pionero en este sentido fue el trabajo de Egli (1996). Posteriormente estos métodos han sido utilizados por Marzocchi et al. (2012) y Kappes et al. (2010), que interconectan mediante una matriz las posibles relaciones desencadenantes de un total de siete peligros; o Gill & Malamud (2014) que utilizan el mismo método para analizar 21 peligros, utilizando una matriz que se centra en interacciones donde un peligro desencadena o aumenta la probabilidad de que ocurran otros. Estas metodologías de análisis más complejo han sido aplicadas también a trabajos en los que en las reacciones en cadena intervienen acciones de origen antrópico y peligrosidad inducida. Es el caso de las propuestas de García-Aristizabal & Marzocchi (2013) para el análisis de varios tipos de peligros asociados (volcánico, sísmico, lluvia y deslizamientos), entre los que se cuentan procesos de rotura de diques artificiales de defensa contra inundaciones originados por terremotos. Otros trabajos se centran en la posibilidad de activación de peligros tecnológicos a partir de eventos extremos de origen natural. Este es el caso de la investigación de Frolova et al. (2012), que analiza la conexión de los incendios, explosiones y liberación de materiales químicos provocados por terremotos. En una línea similar, Eshtrati et al. (2015) conectan la sismicidad con la producción de incendios tras el evento extremo.

En España, la mayor parte de estos trabajos están siendo realizados en una escala de detalle que permita el control y cuantificación de las interacciones entre sólidos movilizados y caudal, por lo que se sitúan en el ámbito de la investigación básica. En esta línea, los trabajos de Sanchís et al. (2017) y Navarro et al. (2016), ponen en relación la incidencia en el balance morfo-sedimentario de la actividad humana (extracción de gravas y construcción de embalse), con la dinámica fluvial

y su peligrosidad. El análisis se realiza para estudios concretos y puntales. Ibarra et al. (2016) pone en relación la producción de incendios y el cambio en el comportamiento hidrológico de la inundación. Los trabajos de Conesa et al. (2017, 2014, 2013) y García & Pérez (2017) evalúan la interferencia que producen elementos artificiales del medio (carreteras, puentes y entubamientos) en la dinámica de erosión, sedimentación e inundación de un cauce. Otros trabajos, como el de Pedraza et al. (2004), conectan de forma específica la incidencia de los procesos gravitacionales en la incorporación de carga sólida al caudal de inundación. Ruíz Villanueva et al. (2013 y 2012), han avanzado sobre una cuestión novedosa en esta línea, centrándose en las repercusiones de la incorporación de madera y restos vegetales al flujo de inundación.

Las aportaciones citadas se basan en experiencias de monitorización a escala muy detallada, o en casos de estudio puntales, por lo que, en la práctica, no tienen aplicación efectiva en la escala de planeamiento. En una escala más afín a este, Perles & Cantarero (2010) aportan una propuesta para la cartografía de peligros interrelacionados espacial y temporalmente. En una línea similar, Gallegos (2015) y Cantarero (2013) proponen estrategias metodológicas para evaluar cómo inciden los peligros asociados al proceso de inundación en la aportación de carga sólida al caudal; a partir de este punto intentan deducir las consecuencias sobre el incremento de la peligrosidad del proceso y sobre la extensión del área inundable. Perles et al. (2019) analiza igualmente el comportamiento conjunto de diversos tipos de riesgo asociados (movimiento en masa, erosión e inundación) cuando concurren en el entorno de infraestructuras viarias.

1.2 Bases conceptuales y retos que fundamentan la metodología

Si bien el número de trabajos que avanzan el concepto de multi-peligrosidad está creciendo y cuenta con aportaciones recientes, existen una serie de problemas de base no resueltos que constituyen retos a abordar para avanzar en la materia. Entre las principales cuestiones pendientes pueden citarse las siguientes: la disparidad de metodologías para abordar la integración de peligros, la diferencia de criterios para su agrupamiento, la metodología utilizada para interconectar los peligros y la escala de trabajo considerada.

La disparidad de metodologías para abordar la integración de peligros. El problema se plantea a varios niveles. Existe discrepancia de criterios a la hora de evaluar y medir los peligros individuales por sí mismos, dado que sus características son distintas (Carpignano et al., 2009), y existe, además, una inercia histórica a tratarlos por separado, utilizando para ello métodos,

terminología y enfoques de disciplinas dispares (Kappes et al., 2012). Los autores citados señalan como los peligros individuales son medidos además en diferentes unidades de medida, lo que dificulta encontrar una gradación de los distintos peligros equivalente (Menoni, 2006). Sobre este asunto se centró, por ejemplo, el proyecto ARMONIA project (Applied Multi Risk Mapping of Natural Hazards for Impact Assessment). En este caso se apostó por una definición de intervalos que se ajustara a los requerimientos normativos de las directivas europeas de armonización de productos cartográficos, y, a la vez, por una gradación y escala de trabajo compatible con la de planeamiento, no con la de experimentación. Otros autores utilizan estrategias de equiparación de intervalos fundamentadas en la estandarización. Moran et al. (2004), propuso usar como criterio unificador entre distintos peligros el de la hipótesis de máximo riesgo, o peor escenario posible. Al equiparar el peor de los grados posible en cada caso de estudio, los grados de peligrosidad resultantes pueden ser comparados entre sí en distintas áreas.

Son también dispares los criterios que proponen distintos autores a la hora de agrupar los peligros para aunarlos. Christen et al. (2007) proponen tratar como asociados los peligros que poseen un comportamiento similar en lo que se refiere a sus dinámicas y características procesuales, y agrupan por ello los peligros de aludes, deslizamientos y caída de rocas. Perles & Cantarero (2010) proponen la conexión de los peligros asociados en razón de la existencia entre ellos de un vector de transmisión de materia y/o energía. Por su parte, Liu et al. (2016) ofrecen una clasificación sistemática de las interacciones de los peligros basada en el análisis del entorno geofísico de origen de los peligros. Diferencia, además, cuatro posibles tipos de relación entre los distintos tipos de peligros: independencia, relación excluyente, relación de ocurrencia paralela, y relación de ocurrencia en serie.

En un segundo nivel, existe igualmente dispersión en lo que se refiere al método a utilizar para interconectar unos peligros con otros. Los métodos más usuales se basan en árboles de decisión o matrices de riesgo que permiten sistematizar las relaciones entre los peligros, y la probabilidad de que unos procesos desencadenen consecuencias en los otros. Perles & Cantarero (2010) insisten en esta línea en la importancia de añadir a estos criterios otros de raíz espacial, que indiquen en la metodología la secuencia topológica de interconexión en el espacio de los procesos, complemento imprescindible para definir la conexión efectiva entre ellos.

Otro aspecto que ofrece disparidad en lo que se refiere a los métodos de peligrosidad múltiple es la escala de trabajo para la que se diseñan los métodos. Son frecuentes tanto los análisis de

detalle a escala de experimentación e investigación básica (Carrasco et al., 2003, por ejemplo), como los que proponen escalas de trabajo muy genéricas, aptas únicamente para estudios prospectivos de reconocimiento del problema a escala regional. En este sentido, el estudio de las relaciones en cadena entre peligros de comportamiento asociado, como afirma Delmonaco et al. (2006), está necesitado de propuestas a escalas intermedias, que sean afines a la escala de planeamiento, y, por tanto, faculten la aplicación de los resultados en el ámbito de la gestión preventiva del riesgo, vocación para la que se definen. Autores como Kappes (2011) indican como, a la hora de diseñar las metodologías de evaluación multi-peligros, el procedimiento debe ajustarse al propósito para el que el mapa está concebido, y no al contrario. Otros consejos para el desarrollo de futuras metodologías de peligrosidad en cadena se centran en la necesidad de incorporar los conceptos de no-linearidad en las relaciones intervariables, complejidad, auto-organización y definición de umbrales críticos.

1.3 Fundamentos de la secuencia multi-riesgo

El planteamiento en el que se fundamenta la propuesta metodológica en este trabajo es el sostenido por Perles y Cantarero (2010), que apuesta por agrupar los peligros no según su etiología, sino en razón de las relaciones funcionales y topológicas entre los procesos de peligrosidad de cada uno de ellos. El caso que se aborda en este trabajo es un ejemplo de la dinámica funcional que acompaña al peligro de inundación en entornos mediterráneos. Por las características de torrencialidad de la lluvia y elevada pendiente, se activan en las cuencas altas de los ríos y arroyos procesos muy virulentos de erosión hídrica. La sequía estival, y la posible afección de estas zonas por incendios forestales, agudizan las condiciones de sellado del suelo y ausencia de infiltración por lo que se generan grandes volúmenes de escorrentía superficial que activan de forma drástica la erosión hídrica y arrastre de partículas sólidas, especialmente eficaz en suelos con baja densidad de vegetación y/o prácticas agrarias poco adaptadas al cultivo en pendiente. Como resultados, se generan caudales súbitos y con gran competencia y capacidad erosiva en los cauces secos, que son capaces de incorporar al caudal gran cantidad de material en suspensión y arrastre. Varios factores contribuyen a elevar la disponibilidad de material para el arrastre en el cauce. La sequía estival produce gran cantidad de restos vegetales secos en el propio cauce y laderas adenañas. Por otra parte, la percepción humana del cauce seco durante buena parte del año como un espacio vacío, apto para el uso humano, propicia su identificación como un espacio a utilizar, por lo que suele estar lleno de materiales procedente del uso humano del territorio, tales como basuras, materiales de construcción o labranza, construcciones efímeras, mobiliario urbano o incluso automóviles. El volumen de caudal aumenta

su fuerza erosiva al incorporar esta carga sólida, y produce labores de zapado en sus propias márgenes, así como en la base de las laderas aledañas. Esto activa un proceso de desestabilización de las laderas afectadas, que propicia que se desencadenen movimientos en masa. El resultado de la movilización es el posible colapso del cauce y el represamiento e inundación remontante del caudal, así como la destrucción súbita del colapso, y la generación de un posible pico de crecida y avalancha de barro aguas abajo. Este material procedente de la ladera inestable, junto al aportado por la erosión hídrica, pasará a formar parte de los arrastres para alterar todos los parámetros hidrológicos previstos en la crecida (aumento de la energía cinética, posibilidad de colapsos, atascos, desvíos del caudal y relleno del fondo del cauce), para, en definitiva, elevar la peligrosidad de la crecida y la expansión de la lámina de agua desbordada.

1.4 Objetivos

Considerando todo lo anterior, y tomando como doble hipótesis de partida los hechos constatables de que un mismo evento tormentoso genera láminas de inundación de extensión y características muy diferentes en entornos mediterráneos frente a otras regiones, y que existe una importante interrelación entre la peligrosidad de una inundación y el porcentaje de material sólido que esta arrastra, se plantean los objetivos que se describen a continuación. Éstos se sitúan en la última línea de trabajo citada en el subapartado anterior.

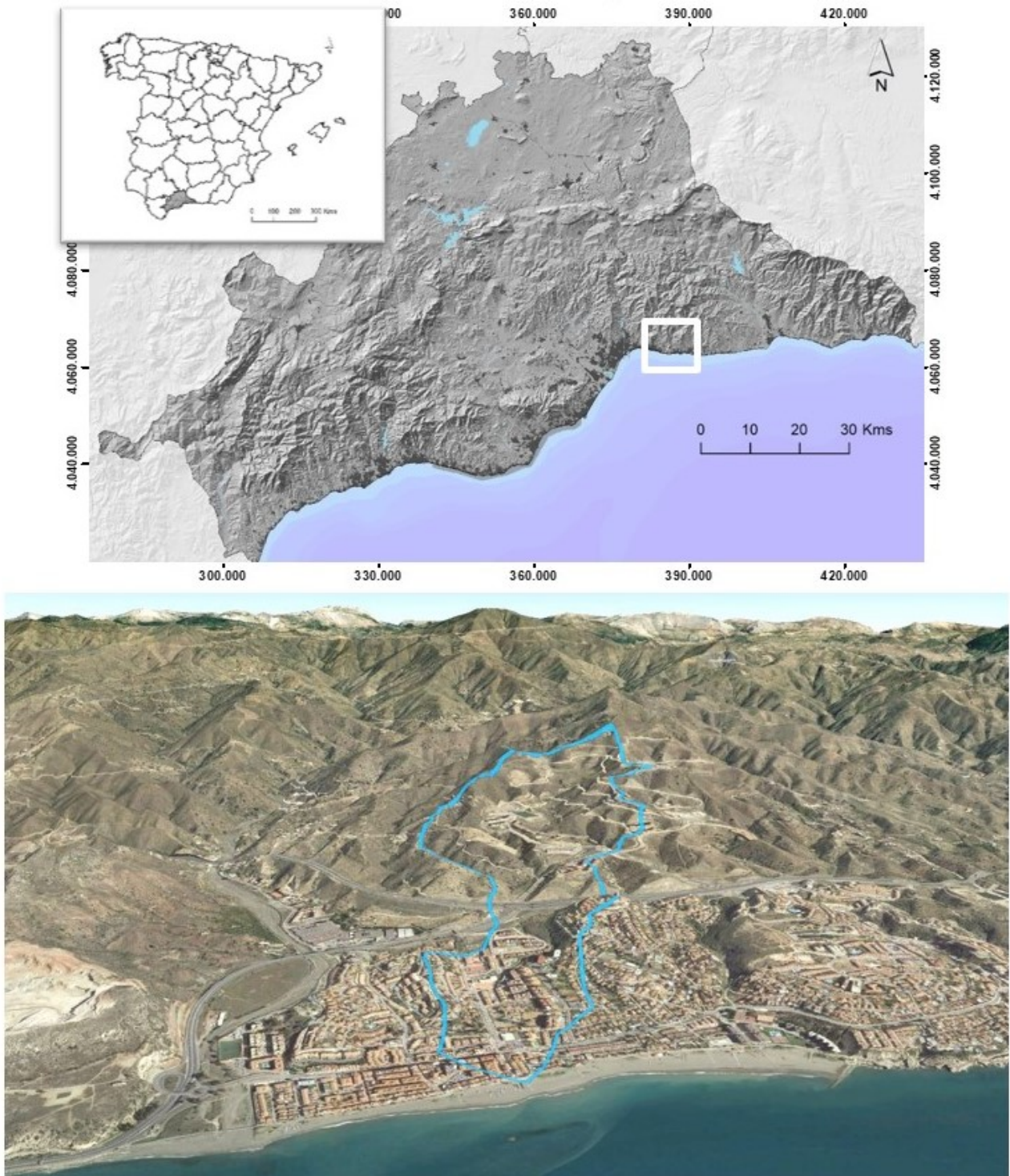
Así, proponiendo una secuencia metodológica que permita integrar, a una escala afín a la del planeamiento, la acción de los procesos de erosión y movimientos en masa en la dinámica y peligrosidad de la inundación, puede definirse como objetivo general el diseño de una estrategia metodológica de adecuación del análisis de la inundabilidad para entornos mediterráneos, centrada en el estudio asociado de las inundaciones y la producción e incorporación de elementos sólidos por erosión de suelos o deslizamientos de ladera. Dicho objetivo recoge la complejidad específica de la región mediterránea, con condicionantes rexistásicos severos, tales como la torrencialidad pluviométrica, la elevada erosión potencial, la morfología del relieve, el sistema hidrológico o los patrones urbanísticos característicos (Gallegos, 2018). Y tiene en consideración, asimismo, su orientación final a la ordenación y gestión territorial, con el uso de cartografía y metodologías de fácil disponibilidad y aplicabilidad. Como objetivo añadido, se pretende incorporar al análisis algunos de los requisitos exigidos por el Plan de gestión del riesgo de inundación (PGRI) de la demarcación de las Cuencas Mediterráneas Andaluzas.

2 Área de estudio

Para este trabajo se ha seleccionado cómo área de estudio una cuenca costera representativa del patrón territorial de la región mediterránea española, tanto en lo que se refiere a las características ecogeomorfológicas, como al patrón de uso del suelo. Se trata de la cuenca hidrográfica del arroyo Piletas, localizada en el término municipal de Rincón de la Victoria, en el extremo oriental de la aglomeración urbana de Málaga, al sur de España (ver Figura 1). Su extensión es de 159,9 hectáreas, y tiene un importante porcentaje de superficie alterada antrópicamente, de modo que el suelo urbano y las infraestructuras alcanzan el 24,3 % del total, y las zonas en construcción suman un 54,5 % más, restando únicamente un 21,2 % del suelo con usos no urbanos (ver Figura 2). El área de estudio es representativa del modelo de periurbanización que ha hecho crecer notablemente las áreas metropolitanas en el litoral mediterráneo español. También coexisten viviendas de primera residencia de una población que se desplaza diariamente a la ciudad de Málaga, haciendo uso de la autovía A7, en un constante movimiento pendular. En esta cuenca se produce una mezcla compleja de funciones y patrones urbanísticos que responden a un esquema de desarrollo con dinámicas de expansión muy rápidas. De manera residual también existen zonas agrícolas, en uso o en abandono.

Asimismo, se ha elegido esta área de estudio porque en marzo del año 2004 se produjo sobre la cuenca un importante evento tormentoso que desencadenó graves inundaciones sobre el núcleo urbano de Rincón de la Victoria, con una población afectada superior a los 30 000 habitantes, existiendo suficiente información tanto de los aspectos hidrológicos como hidráulicos que originaron y resultaron de tales inundaciones (TYPESA, 2004; Yus Ramos et al., 2004; Asistencias Técnicas Clave, 2004; Junta de Andalucía, 2004; Pereda 4, 2004). En aquella ocasión llovieron 229 l/m^2 en 24 horas, una cantidad muy próxima a los 238 l/m^2 que establece la publicación 'Máximas lluvias diarias en la España peninsular' (Ministerio de Fomento, 1999) para el periodo de retorno de 500 años.

Figura 1. Localización y representación tridimensional del área de estudio en la provincia de Málaga

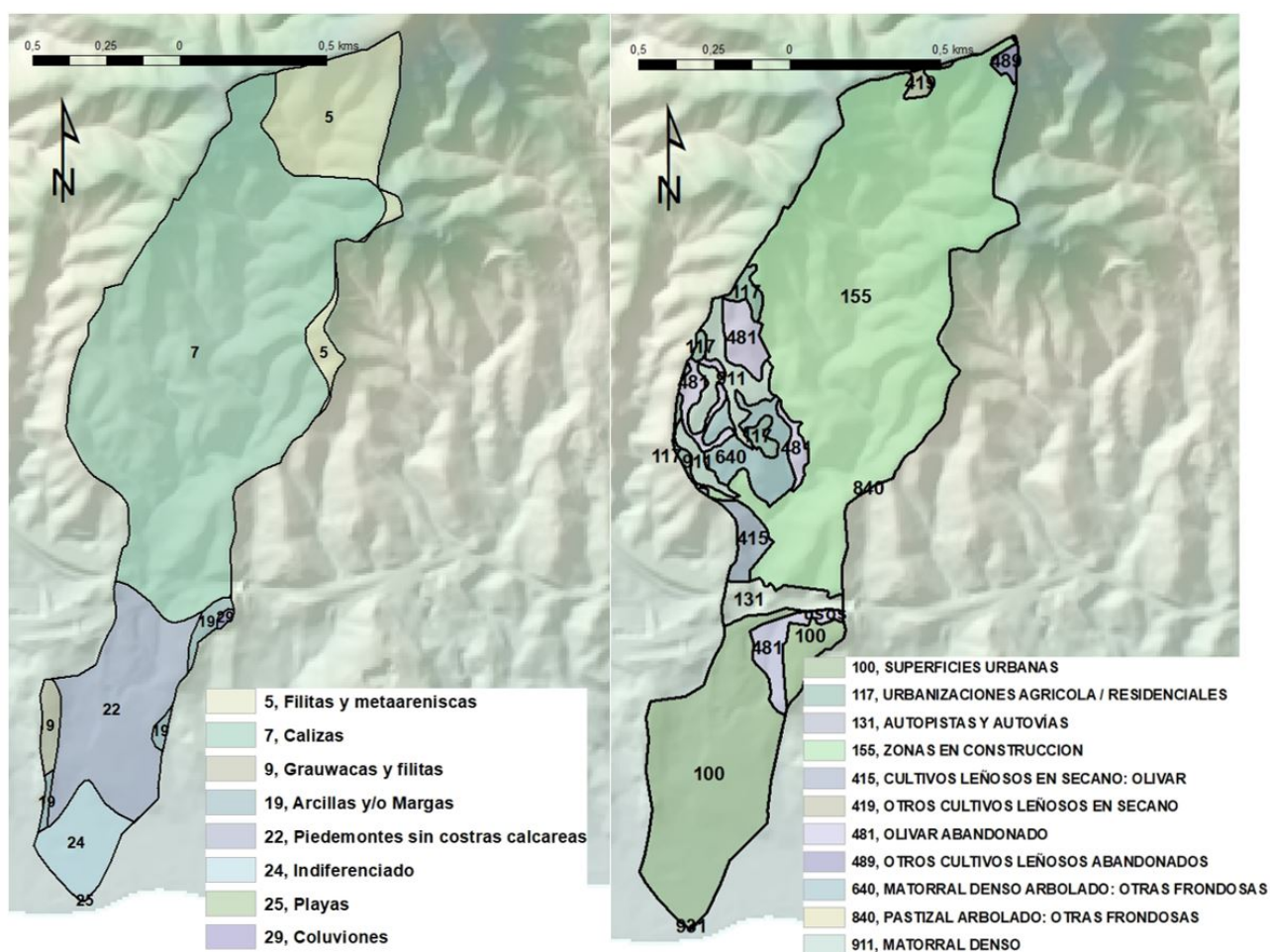


Fuente: elaboración propia

El patrón de usos citado para la cuenca considerada se desarrolla sobre un sustrato físico muy poco afín a los mismos. Desde el punto de vista del medio físico, la cuenca se sitúa sobre litología metamórfica (ver Figura 2), con cabecera escarpada y muy cercana a la costa, que

conecta de forma brusca con estrechas planicies litorales. La cota máxima es de 431 metros y el intervalo de pendiente más representativo oscila entre el 20 y el 50 %, siendo la pendiente media de la cuenca del 30,4 %. Su edafología se distribuye entre los antrosoles úrbicos del suelo urbano consolidado, los regosoles calcáricos al norte de los anteriores y los leptosoles éutricos en las cabeceras de cuenca. La pluviometría responde a un régimen torrencial y de aridez estival característico de escenarios mediterráneos, particularizado en este caso por su orientación a barlovento de las perturbaciones atlánticas. El valor medio anual de la máxima lluvia diaria es de 66,02 l/m². La orientación del cauce y afluentes, todos con comportamiento de rambla, es mayoritariamente Norte-Sur, con un patrón hidrográfico dendrítico con ramificación arborescente en la que los tributarios se unen a la corriente principal formando ángulos agudos.

Figura 2. Litologías y usos del suelo presentes en la cuenca del arroyo Piletas



Fuente: elaboración propia

El litoral mediterráneo como área de riesgo debe interpretarse considerando un conjunto de particularidades que lo individualizan frente a otras regiones-riesgo, y que hacen aún más

ineludible la readaptación de las metodologías de análisis a sus características. En la cuenca de estudio, representativa de esta región riesgo, concurren problemáticas asociadas a la inundabilidad derivadas principalmente de la abundante pérdida de suelos e incorporación al caudal de residuos sólidos, como el frecuente colapso y socavación de infraestructuras por este material arrastrado, así como la inestabilidad de los taludes más próximos al cauce por socavamiento debido a la alta capacidad erosiva del flujo. También es frecuente la formación de represas formadas con el material natural o antrópico arrastrado por las crecidas.

La gran presión antrópica característica de los entornos litorales mediterráneos se relaciona históricamente con el uso agrario de las llanuras de inundación, y, más recientemente, con la urbanización del terreno con destino residencial o turístico, proceso que ha propiciado la periurbanización de las localidades costeras, y la aparición de neo-relieves y movimientos del terreno. Todo ello da aún mayor complejidad a la base topográfica, y a las dinámicas geomorfológicas.

Estos condicionantes humanos y físicos y propician en la cuenca de estudio una elevada incidencia de la erosión hídrica, los movimientos gravitacionales del terreno y las inundaciones, tanto de origen natural, como inducido. Ello, unido a la alta exposición humana, genera unos valores de riesgo para la zona muy acusados.

3 Material y métodos

3.1 Fases metodológicas

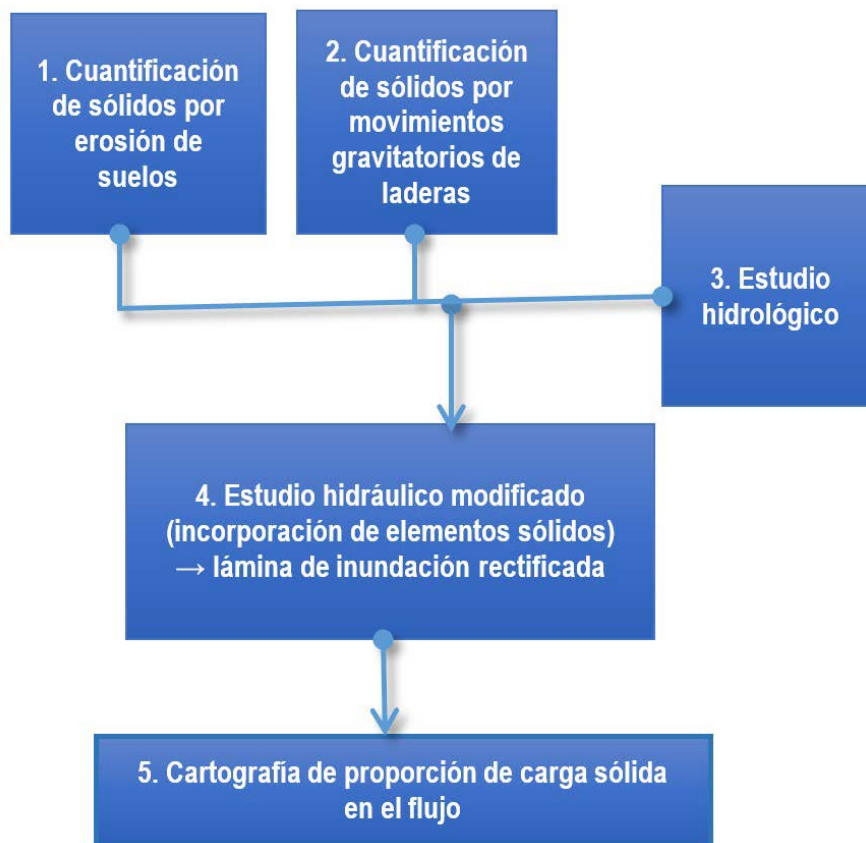
Se propone a continuación una estrategia metodológica fundamentada en los pasos considerados por Egli (1996), y adaptada a los requerimientos expresados en el apartado dedicado a las bases conceptuales de la metodología, así como a las características específicas de la región mediterránea. La propuesta está pensada para trabajar en escalas intermedias, afines a la de planeamiento.

El procedimiento de trabajo se estructura en las siguientes fases (ver Figura 3):

1. Cuantificación de la generación de sólidos arrastrados al flujo de inundación por erosión hídrica de suelos.
2. Cuantificación de la generación de tierra movilizada por movimientos gravitatorios de laderas.
3. Cálculo de caudales mediante estudio hidrológico.

4. Elaboración de estudio hidráulico modificado y obtención de lámina de inundación rectificada.
5. Cartografía de valoración cualitativa y cuantitativa de los elementos sólidos del caudal.

Figura 3. Flujo de trabajo del proceso metodológico propuesto



Fuente: elaboración propia

a) *Cuantificación de la generación de sólidos arrastrados al flujo de inundación por erosión hídrica de suelos*

El aporte de partículas de suelo al que da lugar la intensa erosión hídrica que acompaña los eventos tormentosos en regiones mediterráneas define distintos aspectos trascendentes de la peligrosidad de la inundación, tales como la energía erosiva del caudal, el posible colapso y socavación de infraestructuras, la formación y rotura de presas naturales que puedan provocar puntas de crecida e inundaciones locales, la reducción de la sección hidráulica del cauce, o la disminución de la velocidad del flujo (Gallegos & Perles, 2015).

La metodología propone, en este sentido, la modificación del caudal instantáneo máximo con el que se realiza la modelización hidráulica de un evento de inundación dado, en función de la

relación porcentual entre el volumen de sedimentos producidos en la cuenca en el mismo evento y el caudal estimado. De este modo se pretende ponderar el caudal efectivo del río, y, con ello, de la lámina de inundación, en razón de la proporción de carga sólida que transporta.

A continuación se exponen los pasos acometidos para abordar el procedimiento propuesto:

- Cálculo del peso potencial de pérdida de suelo específico para el evento de inundación en la cuenca estudiada (kg)

Para conocer la cantidad de suelo movilizado en el evento de inundación se ha aplicado al área de estudio la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos Modificada (MUSLE), una variación de la USLE que permite conocer la cantidad estimada de sedimentos producidos en un suceso pluviométrico concreto y en un área concreta. Como evento pluviométrico se ha utilizado la máxima lluvia esperada para el periodo de retorno considerado, al objeto de estimar el comportamiento sedimentológico concreto de la cuenca en el acontecimiento para el que estamos evaluando su inundación. Mediante este procedimiento se ha obtenido la cantidad de toneladas métricas de suelo movilizable y susceptible de ser incorporado al flujo de hídrico.

Esta formulación trabaja con el volumen de escorrentía y el caudal instantáneo máximo. Aunque existen otros modelos para el cálculo del aporte de sedimentos en cuencas, como el de Meyer-Peter, Guy-Norman o Fournier (Senciales, 1999), se ha considerado la MUSLE el más apropiado por su uso extendido y normalizado, además de su orientación a cuencas pequeñas como las del ámbito espacial que nos ocupa.

- Conversión de peso a volumen (m^3)

Para poder incorporar la cantidad de suelo movilizado durante el evento pluviométrico a la lámina de inundación es preciso transformar el resultado de peso a volumen, al objeto de que éste pueda ser asimilable al volumen de escorrentía que ha producido la precipitación neta considerada. La transformación se realiza dividiendo el peso de sólidos obtenido con la MUSLE (kg) por una densidad media relativa de las partículas minerales en el área de estudio (kg/m^3), de lo que resulta un valor de metros cúbicos.

Como valor medio de densidad de las partículas minerales en la zona, se ha tomado como referencia el estudio de Conesa et al. (2009), que aporta cuál es la tipología mineralógica más frecuente en los cauces mediterráneos, basándose en el estudio de variación granulométrica y mineralógica de sedimentos retenidos por diques en cauces torrenciales semiáridos del sureste peninsular. Las principales partículas minerales que pueden encontrarse en estos ambientes son

cuarzo, moscovita, dolomita y calcita. La densidad relativa de estos minerales respecto al agua se ha derivado de los valores aportados por Maza (1987), que se recogen en la Tabla 1:

Tabla 1. Densidades relativas de las partículas minerales más frecuentes en los cauces mediterráneos

| Partícula mineral | Densidad relativa de las partículas minerales sedimentarias frente al agua (gr/cm ³) | | |
|-------------------|--|--------------|-------------|
| | Valor mínimo | Valor máximo | Valor medio |
| Cuarzo | 2,60 | 2,70 | 2.65 |
| Moscovita | 2,76 | 3,10 | 2.93 |
| Dolomita | 2,85 | | 2,85 |
| Calcita | 2,72 | | 2,72 |

Fuente: elaboración propia a partir de Maza (1987)

La densidad relativa media para la zona atendiendo a lo anterior es de 2,79 gr/cm³ o 2 790 kg/m³. Los valores de peso de material movilizado, al ser divididos por la densidad media para la zona, nos ofrece el valor de volumen de material movilizado por la erosión en el evento de inundación.

- -Cálculo del porcentaje de volumen de sólidos transportados durante el evento de inundación respecto al volumen de escorrentía del evento.

El volumen de sedimentos movilizados durante el evento pluviométrico se ha puesto en relación con el volumen de escorrentía total para el evento pluviométrico considerado, lo que permite obtener una relación porcentual de la cantidad potencial de fracción sólida transportada en la cuenca durante la crecida o inundación.

b) Cuantificación de la generación de tierra movilizada por movimientos gravitatorios de laderas

Los movimientos en las laderas de cuencas generadoras de inundación tienen un papel muy importante en el posible agravamiento de la peligrosidad: más allá del aporte de sólidos al flujo que conllevan, los movimientos en masa pueden generar puntos de colapso en el cauce, represas del flujo y picos de crecida posteriores (Chacón, 2012; Densmore et al., 2011; Bathurst et al., 2007; Lorente et al., 2003). En esta fase de la propuesta metodológica se realiza un análisis cartográfico de la susceptibilidad a los movimientos en masa en la cuenca de estudio, atendiendo a los principales factores condicionantes y desencadenantes. El objetivo del análisis es obtener el volumen de material movilizable y susceptible de ser incorporado al caudal por movimientos gravitatorios de laderas próximas al cauce, atendiendo en todo caso a una hipótesis de máximo riesgo.

Las fases seguidas en este apartado han sido las siguientes:

- Delimitación de áreas de alta susceptibilidad a los movimientos gravitatorios de laderas.

La metodología propuesta para delimitar las áreas con alta susceptibilidad a los movimientos gravitatorios se ha basado en un modelo paramétrico fundamentado en una sumatoria lineal ponderada de factores condicionantes y desencadenantes. Para seleccionar estos, se ha realizado una síntesis de la amplia experiencia científica sobre la materia, tomando el aporte de diversos autores (Bornaetxea et al., 2019, 2018, 2016; Felicísimo et al., 2013; Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2006; Marsh, 1978; Dunne & Leopold, 1978; Tubbs, 1975). Así, se han utilizado los siguientes potenciales factores determinantes y desencadenantes del movimiento en masa (ver Tabla 2):

Tabla 2. Factores incorporados al modelo de elaboración del mapa de susceptibilidad a los movimientos en masa

| Grupo de factores | | Factor | Representación cartográfica | Fuente de partida | Grado de peligrosidad | Ponderación |
|-------------------------|----------------|----------------|-----------------------------|--|---|-------------|
| Factores condicionantes | Litológicos | Litología | Poligonal | Cartografía MAGNA adaptada (e.1/50 000) ² | Alta (coherencia baja), Baja (coherencia media) ³ | |
| | Topográficos | Pendientes | Poligonal | Modelo digital del terreno (e. 1/10 000) > Pendientes ⁴ | Alta (pendientes >50 %), Media (30-50 %), Baja (10-30 %) | x 2 |
| | Usos del suelo | Usos del suelo | Poligonal | Mapa de usos y coberturas vegetales de Andalucía (e. 1/10 000) | Alta (zonas sin vegetación), Media (zonas arbustivas, cultivos), Baja (zonas forestales, tejido urbano, llanuras aluviales) | |

2 Instituto Geológico y Minero de España (2003).

3 Según Modelo de cuadro sintético mostrando una aproximación a las propiedades de las rocas (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2006, p. 89).

4 Burrough, P. A., & McDonell, R. A. (1998). *Principles of Geographical Information Systems* (Oxford University Press, New York).

Tabla 2. Continuación

| Grupo de factores | | Factor | Representación cartográfica | Fuente de partida | Grado de peligrosidad | |
|--------------------------|--|---|-----------------------------|---|---|--------|
| Factores condicionantes | Elementos geomorfológicos | Contactos entre materiales | Lineal poligonal → | Cartografía MAGNA (e. 1/50 000) | Alta (Cabalgamientos y fallas), Media (contactos discordantes), Baja (contactos normales) | |
| | | Depósitos susceptibles de ser movilizados, naturales (cuaternarios) o antrópicos | Poligonal | Observación directa (ortofotografías, observación de campo) | Media | |
| | Signos de procesos gravitatorios previos, activos o antiguos | Deslizamientos / Cicatriz de movimientos / Bloques movilizados / Aludes de piedras en torrentes | Poligonal | Observación directa (ortofotografías, observación de campo) | Alta | x 2 |
| Factores desencadenantes | Procesos geomorfológicos | Descalce de taludes por acciones antrópicas | Poligonal | Observación directa (ortofotografías, observación de campo) | Alta | |
| | | Descalce de taludes en cauces por erosión fluvial | Lineal poligonal → | Observación directa (ortofotografías, observación de campo) – Cartografía MAGNA (erodabilidad litológica) | Alta | |
| | | Áreas de erosión acelerada | Poligonal | Observación directa (ortofotografías, observación de campo) | Media | |
| | Hidráulica fluvial | Área de inundación | Poligonal | Delineación mediante criterios geomorfológicos | Alta | |

Fuente: elaboración propia

Estos factores se han cartografiado solo en laderas situadas directamente sobre al cauce.

- Delimitación de áreas de susceptibilidad con base en grados de peligrosidad y ponderación.

Cada uno de los factores tiene una peligrosidad alta, media o baja (ver columna 'Grado de peligrosidad' de la Tabla 2), y junto a esto, a los más decisivos se les ha dado mayor peso (ver columna 'Ponderación'). Esto último se ha hecho con las pendientes y con el inventario de

procesos activos o antiguos, dada la importancia constatada de ambos factores en el proceso de revisión bibliográfica.

El mapa resultante se ha construido usando elementos poligonales reclasificados, ponderados, rasterizados y sumados entre sí. Los elementos lineales (contactos entre materiales y descalce de taludes por acciones naturales) se han convertido a polígonos, aplicando, basado en experiencia de campo, un área de influencia de 50 metros para los contactos y 10 metros para el descalce de taludes. Tras lo anterior, se han delimitado como áreas susceptibles aquellas en las que concurren 3 factores cualesquiera de los citados con peligrosidad alta, o 6 factores con peligrosidad media, teniendo en consideración en todo caso que los factores cuya ponderación es "x 2" pesan el doble que los anteriores.

- Cálculo del volumen movilizable en las áreas de susceptibilidad a los movimientos gravitatorios.

Para la conversión de las áreas susceptibles a los movimientos gravitatorios en volumen de sólidos incorporable al flujo de inundación se ha considerado un espesor medio de 1 metro de profundidad en dichas áreas. La consideración de este espesor ha partido del hecho de que la práctica totalidad de los deslizamientos que se producen en el ámbito geográfico de referencia, las regiones mediterráneas, se dan en laderas con espesores muy limitados (Chacón, 2012). Así, se calculará el volumen movilizable mediante el producto de la superficie citada y el espesor de referencia de un metro.

Atendiendo a la hipótesis de máximo riesgo, se ha considerado que el evento tormentoso pone en marcha la movilización de la totalidad de estas superficies.

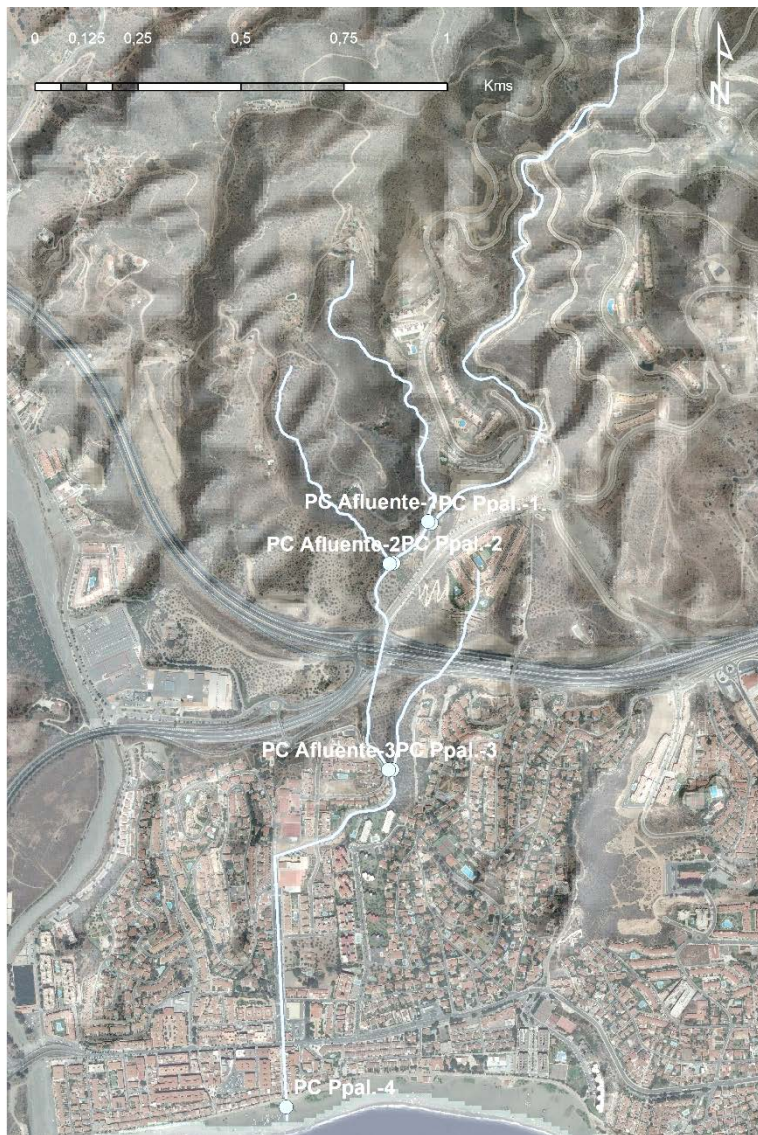
c) Cálculo de caudal inicial mediante estudio hidrológico

El caudal de crecida constituye el vector que unifica los procesos de peligrosidad considerados: la inundabilidad, la incorporación de material sólido procedente de la erosión hídrica y la incorporación de material sólido por deslizamientos en laderas anexas al cauce.

Para obtener el caudal inicial se ha trabajado con un modelo hidro-meteorológico obtenido a partir de la precipitación total diaria del área de estudio según la publicación del Ministerio de Fomento "Máximas lluvias diarias en la España Peninsular" (Ministerio de Fomento, 1999). El caudal máximo instantáneo de escorrentía superficial deriva de lo anterior mediante el 'Método Racional Modificado'. En este trabajo se ha usado un periodo de retorno de 500 años.

El área de estudio considerada en este trabajo se ha subdividido en un cauce principal y 3 afluentes. Para el cauce principal se trabajará con 4 puntos de caudal, y para cada uno de los afluentes con un punto de caudal (ver Figura 4).

Figura 4. Ejes y puntos de caudal considerados en el estudio hidrológico



Fuente: elaboración propia

d) *Análisis integrado de las peligrosidades individuales: elaboración de estudio hidráulico con caudal modificado*

Este último paso de la metodología integra en el mapa de inundabilidad los efectos de los peligros asociados que se producen en la cuenca, y que pueden agravar la peligrosidad de inundación por el aumento de la extensión del área inundable. Para ello se propone la ponderación del caudal máximo instantáneo del evento de inundación calculado en el estudio

hidrológico, en función de la proporción de sólidos transportados en el caudal, respecto al caudal limpio. Ello se consigue atendiendo a los siguientes pasos:

- Cálculo de la relación porcentual entre el volumen de residuos minerales y caudal neto escurrido en la precipitación considerada, obtenido según la fórmula de precipitación neta del *Soil Conservation System* de Estados Unidos. Como resultado tenemos el porcentaje de sedimentos sólidos en el caudal (%).
- Modificación del caudal instantáneo máximo en la misma proporción que el porcentaje de sedimentos sólidos en el caudal. Se obtiene, de tal modo, un caudal instantáneo máximo modificado con la incorporación de residuos sólidos (m^3/s).
- Modelización hidráulica, con el modelo unidimensional de libre uso HEC-RAS (v. 5.0.7). Como resultado se obtiene el área inundable y la distribución territorial de la velocidad, calado y tensión cortante del flujo.

e) Cartografía de proporción de carga sólida en el flujo

De lo visto hasta ahora resulta, por tanto, una lámina de inundación extendida en la que se ha tenido en consideración el aporte de residuos sólidos. No obstante, la mera incorporación del volumen de estas partículas a la lámina de inundación deja fuera una serie de consideraciones que, por su difícil cuantificación o modelación, no pueden ser incluidas en el análisis hidráulico. Tal sería el caso del incremento de la peligrosidad abrasiva del flujo sobre personas y bienes por el propio transporte de sedimentos y restos sólidos, la reducción de la velocidad y el consecuentemente el aumento de la cota inundable, o el alto riesgo de bloqueo de infraestructuras transversales de paso por arrastres de sólidos que en ocasiones son de mayor tamaño. Estos aspectos son recogidos en una segunda cartografía, que complementa la lámina de inundación, donde se representa en porcentaje la cantidad de partículas sólidas que incorpora el caudal en cada subcuenca (ver Figura 5). Para ello se dota de un color la lámina de inundación en atención a la Tabla 3. Este segundo mapa, también recogido en la propuesta normalizada de mapas de peligrosidad del proyecto PRIGEO con la denominación de “rangos de porcentaje de carga sólida respecto al caudal total” (Díez Herrero et al., 2008), permitirá al técnico que lo evalúe tener en cuenta la peligrosidad del flujo.

Tabla 3. Peligrosidad de la lámina de inundación según la proporción de residuos minerales en el flujo

| Peligrosidad | % elementos sólidos respecto al caudal limpio ⁵ | Color de representación |
|--------------|--|-------------------------|
| Máxima | ≥ 30 % | Rojo |
| Muy Alta | 20 al 29 % | Naranja |
| Alta | 10 al 19 % | Amarillo |
| Normal | < 10 % | Azul claro |

Fuente: elaboración propia a partir de Díez Herrero et al. (2008)

Figura 5. Detalle de la cartografía de peligrosidad del flujo por carga sólida en la confluencia del eje principal con los afluentes 1 y 2



Peligrosidad del flujo por carga sólida

- Muy Alta (20 al 30% sólidos en el flujo)
- Alta (10 al 20% sólidos en el flujo)
- Normal (<10% sólidos en el flujo)



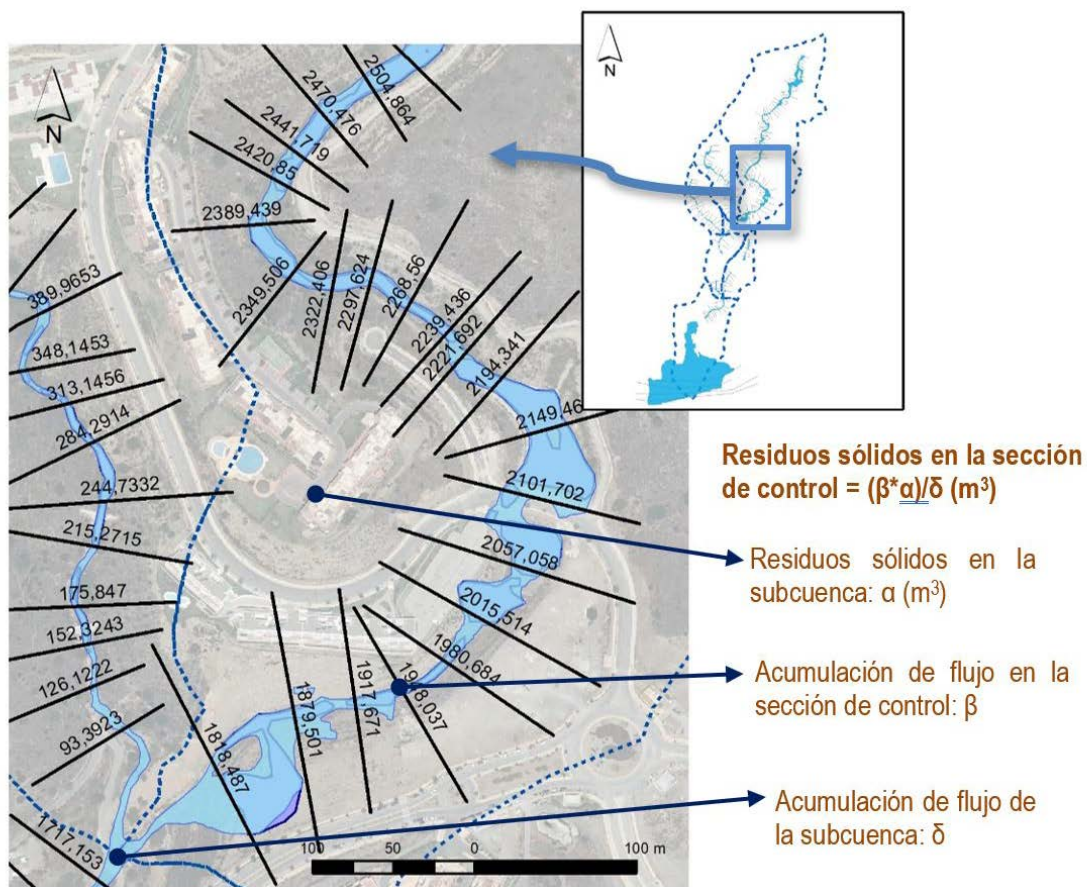
Fuente: elaboración propia

5 Por caudal limpio se entiende el obtenido del estudio hidrológico. Los sedimentos sólidos consideran la suma de los residuos por erosión de suelos y movilización de laderas

Otro indicador de interés resultante de la metodología propuesta es el valor numérico de residuos sólidos en cada sección de control. Este dato puede resultar de utilidad para evaluar el potencial daño o afección a infraestructuras longitudinales o transversales.

Para la obtención de este dato se ha extrapolado el valor de sedimentos sólidos de la subcuenca a cada sección de control, usando para ello la herramienta de acumulación de flujo. Esta herramienta de los SIG para los formatos ráster calcula la acumulación del peso de todas las celdas que fluyen hacia cada celda de pendiente descendente, simulando el proceso de desplazamiento hidráulico. Conociendo la acumulación de flujo de la última celda en la que drena la subcuenca, y de la celda donde se intersecta la sección de control y el eje del cauce, puede obtenerse la proporción que representa esa sección con respecto al total de la subcuenca, y con ello, el valor de elementos minerales correspondientes (ver Figura 6). De tal modo, se puede incorporar la información de bloqueo en las tuberías, usando la herramienta 'depth blocked' del 'Culvert data editor' de HEC-RAS.

Figura 6. Ejemplo de cálculo del valor de residuos sólidos proporcional a cada sección de control



Fuente: elaboración propia

3.2 Consideraciones sobre el proceso cartográfico y metodológico

En relación a la elaboración cartográfica y superposición de capas, se ha estimado la conveniencia de trabajar con información rasterizada. En el proceso de análisis tanto de la incorporación de elementos sólidos por erosión hídrica como en movimientos gravitacionales se obtienen resultados de residuos por unidad de superficie, si bien las variables de entrada en cada uno de dichos análisis resultan de tipos de elementos cartográficos dispares, que precisan ser homogeneizados. Las tareas de homogeneización y superposición resultan fáciles mediante conversión a ráster, con un tamaño de celda determinado y fijo para todas las variables, y el uso de la 'calculadora ráster' de álgebra de mapas, común a cualquier software SIG. El tamaño de celda a usar depende tanto de la información de entrada como de la información que se pretende obtener de salida. En relación a esta última, el estudio hidráulico no debería superar en ningún caso la escala 1/2 000 para aportar cierta precisión, tanto más considerando el reducido tamaño medio de las cuencas consideradas. Por otro lado, las variables de entrada manejan escalas que oscilan entre 1/1000 y 1/10 000, de modo que el tamaño de celda, que debe buscar un equilibrio entre la precisión y la agilidad de cálculo, podría oscilar entre 2 y 10 metros de lado de píxel.

Por otro lado, respecto a la metodología descrita para delimitar las áreas con alta susceptibilidad a los movimientos gravitatorios, ésta cuenta con sobrados antecedentes, pues han sido muchos los autores que han trabajado sobre ello, pero no ocurre igual con la cuantificación del volumen movilizable y el estudio de los mecanismos de transporte y sedimentación de dicho material, que están aun insuficientemente estudiados debido a la complejidad de las interacciones que los condicionan o simplemente a la dificultad de medir sus parámetros principales (Berti & Simoni, 2014; Rickenmann et al., 2006; Puglisi, 2001). Diversos autores recomiendan por ello recurrir a métodos empíricos en lugar de usar modelos o métodos numéricos (Densmore et al., 2011; Berti & Simoni, 2007; Rickenmann, 1999), habiendo llegado a desarrollarse el modelo DFLOWZ (Berti & Simoni, 2007), a partir del modelo LAHARZ (Schilling, 1998), que permite evaluar a partir de datos empíricos el área potencialmente afectada por un determinado movimiento en masa. Además de las zonas inestables, sería necesario conocer los espesores de las distintas unidades de suelo de la cuenca, y aun así la cantidad de terreno que se movilice respondería a otros factores de gran variabilidad en cada subcuenca. Dado que dicho análisis de campo se saldría del objetivo de aplicabilidad metodológica de este trabajo, se ha optado por tomar un valor volumétrico que responde a la superficie con alta susceptibilidad y a un espesor medio para el ámbito de trabajo.

4 Resultados y discusión

4.1 Incorporación de elementos sólidos al caudal de inundación provenientes de la erosión hídrica.

Atendiendo en primer lugar a la incorporación de sólidos por erosión de suelos, los datos resultantes se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Producción de sedimentos por erosión de suelos para un evento tormentoso dado, según formulación MUSLE, y porcentaje que representa respecto al caudal

| Subcuenca | Punto de caudal | Volumen total escurrido (m ³) para el evento considerado | Producción total de sedimentos (t) | Producción media de sedimentos (t/ha) | Sedimentos en el flujo (kg/m ³) | Producción total de sedimentos (m ³) | m ³ de sedimentos por m ³ de agua | % sedimentos en el flujo |
|-----------|-----------------|--|------------------------------------|---------------------------------------|---|--|---|--------------------------|
| 1 | PC 1 | 21 897 | 7534 | 443 | 344 | 2 700 | 0,123 | 12,3 |
| 2 | PC 1 | 11 869 | 2270 | 227 | 191 | 814 | 0,069 | 6,9 |
| 3 | PC 1 | 18 036 | 12 368 | 1374 | 686 | 4433 | 0,246 | 24,6 |
| 0 | PC 1 | 160 254 | 36 310 | 472 | 227 | 13 014 | 0,081 | 8,1 |
| | PC 2 | 192 345 | 62 637 | 652 | 326 | 22 451 | 0,117 | 11,7 |
| | PC 3 | 230 117 | 96 643 | 833 | 420 | 34 639 | 0,151 | 15,1 |
| | PC 4 | 297 656 | 149 112 | 975 | 501 | 53 445 | 0,180 | 18,0 |

Fuente: elaboración propia

Cabe destacar que comparativamente con la extensión de la cuenca, en la producción de sedimentos por erosión de suelos se aprecian cifras muy elevadas. Así, según se ha calculado, para una superficie de apenas 160 hectáreas (ver Figura 1), para el evento tormentoso considerado la estimación potencial de sedimentos movilizados asciende a 149 112 toneladas. El valor de estos sedimentos convertidos en unidades de volumen permite estimar que la fracción sólida relacionada con este proceso constituye el 18 % del caudal (ver valor final de la cuenca en PC4 de la Subcuenca 0, Tabla 4).

No obstante de los aparentemente elevados resultados de sólidos, en marzo del año 2004 se produjo sobre la cuenca un evento tormentoso con una precipitación en 24 horas muy próxima al periodo de retorno de 500 años usado en este trabajo, y considerando los daños causados y los informes realizados tras dicho evento (TYPESA, 2004; Yus Ramos et al., 2004; Asistencias Técnicas Clave, 2004; Junta de Andalucía, 2004; Pereda 4, 2004) no resulta incoherente

suponer que los valores estimados se ajusten a los volúmenes reales de residuos sólidos movilizados.

El factor fundamental que ha llevado a cifras tan elevadas ha sido el desarrollo urbanístico del sector de planeamiento Parque Victoria, en la cuenca alta. Estas obras han originado grandes extensiones de superficie en situación transitoria de movimiento de tierras y acondicionamiento del terreno, dando lugar a suelos poco atemperados y muy susceptibles a la degradación por erosión y a la aportación de grandes volúmenes de sólidos a las avenidas. Estos derrubios contribuyen a la formación de una dinámica hidráulica de elevada potencialidad catastrófica, con flujos hiper-concentrados muy agresivos con las riberas y márgenes, lo que a su vez genera retroalimentación del proceso.

Considerando ahora el proceso metodológico, para el testeo del porcentaje de sólidos en el flujo atendiendo a datos empíricos, se ha revisado la bibliografía de diversos autores que han evaluado la presencia de sedimentos en suspensión mediante muestreos en cursos fluviales (Nghuyen, 2013; Eyrolle, 2012; Ollivier, 2011; Liquete, 2008, 2005; Meybeck, 2003), resultando especialmente interesante el trabajo realizado por Meybeck et al. (2003), que realiza una recopilación de 64 cursos fluviales de diversos continentes y ámbitos geográficos. No obstante, tanto en la información recopilada por este autor, como en los otros autores citados, se exponen datos de cuencas de mayor tamaño, a partir de 64 km², y de ambientes normalmente no torrenciales. Además, y es la principal diferencia a salvar, se trata de valores medios diarios, que poca relación tienen con la casuística de arrastre de sedimentos propia de un evento tormentoso extraordinario. Así, tal como es de esperar, los datos empíricos son en todo caso inferiores a los resultantes en la modelización, dado que una comparativa real requeriría del muestreo de sedimentos el mismo día del evento extraordinario.

Siguiendo en relación a la producción de sólidos por erosión hídrica, cabe destacar el hecho de que la generación de sedimentos de una cuenca no resulte proporcional a su tamaño, o incluso podría llegar a confirmarse lo ya adelantado por Senciales (1999), de que la tasa de producción de estos es inversamente proporcional a la superficie, significando con ello que las cuencas pequeñas, como las que caracterizan el litoral mediterráneo, generan un proporción de sedimentos significativamente mayor que cuencas de mayor extensión. La razón más inmediata podría encontrarse en el hecho de que exista una menor tasa de decantación dentro de la propia cuenca, tanto por el tamaño, como, en el caso que nos ocupa, por las características del relieve. Resulta de especial relevancia este aspecto, pues más interesante que conocer la

producción absoluta de sedimentos en un aguacero y cuenca determinados, es conocer la producción relativa en función de las canalizaciones, tuberías o puentes proyectados en esa cuenca, y que atienden al criterio de caudal generado, en el que sí conserva una clara proporcionalidad con la superficie.

De otro lado, cabe incluir aquí también la discusión sobre algunos aspectos técnicos tales como la decisión de considerar la incorporación total o parcial de los sedimentos generados por la erosión hídrica, o el propio proceso de análisis cartográfico. En relación a lo primero, ha sido necesario decidir entre la incorporación total o parcial al flujo de inundación de los sedimentos generados por la erosión de suelos, así como su decantación o no durante el transporte fluvial. Los modelos existentes para evaluar esta tasa de incorporación y transporte varían desde formulaciones de cierta complejidad hasta simples factores de proporción de desplazamiento en función de la superficie de drenaje (García, 2013; Batalla, 2013; Linares et al., 2009). Se ha optado por la primera opción, ya que con ello se maneja, tal como se viene manteniendo en el resto del proceso, la hipótesis de máximo riesgo, estando del lado de la seguridad y evitando posibles subestimaciones de la peligrosidad en variables y modelizaciones donde no deja de existir cierta incertidumbre (Gallegos & Perles, 2015). De igual modo, las características propias de las cuencas mediterráneas se orientan todas a que el porcentaje de erosión arrastrado hasta el cauce sea muy próximo al 100 %. Esto es: aguaceros intensos, elevadas pendientes, cuencas de pequeña superficie, escasa vegetación o normal ausencia de llanuras de sedimentación. Y en relación al transporte, siguiendo a Mintegui & Robredo (1993), para cuencas torrenciales o de pendiente acusada es posible admitir el valor de salida de sedimentos igual al volumen total aportado por cada unidad hidrológica, al predominar los flujos turbulentos, con alta competencia y velocidad.

4.2 Incorporación de elementos sólidos al caudal de inundación provenientes de los movimientos gravitacionales

En relación a la cantidad de terreno movilizable y susceptible de ser incorporado al caudal en movimientos gravitatorios en laderas anexas a los cauces, este se recoge en la Tabla 5, con un valor absoluto total de 8800 m³, lo que supone un aporte de sólidos que representa el 3 % frente al volumen total escurrido.

Tabla 5. Volumen de terreno susceptible de ser incorporado al flujo de inundación a causa de movimientos gravitatorios de las laderas anexas a los cauces, y porcentaje que representa dicho volumen respecto al caudal

| Subcuenca | Punto de caudal | Volumen de terreno movilizable (m ³) | m ³ de sedimentos por m ³ de caudal (PR 500 años) | % sedimentos en el flujo |
|-----------------|-----------------|--|---|--------------------------|
| 1 (afluente) | PC 1 | 0 | 0,000 | 0,0 |
| 2 (afluente) | PC 1 | 0 | 0,000 | 0,0 |
| 3 (afluente) | PC 1 | 800 | 0,044 | 4,4 |
| 0 (cauce ppal.) | PC 1 | 6400 | 0,040 | 4,0 |
| | PC 2 | 6400 | 0,033 | 3,3 |
| | PC 3 | 8000 | 0,035 | 3,5 |
| | PC 4 | 8800 | 0,030 | 3,0 |

Fuente: elaboración propia

Se ha observado que las zonas de mayor susceptibilidad se localizan en el entorno de los nuevos viales, donde existen numerosos descalces de taludes, y allá donde se han generado neo-relieves artificiales para la construcción residencial (rellenos antrópicos para salvar el abrupto relieve), fácilmente movilizables (ver Figura 7). Otras zonas de alta susceptibilidad se localizan en las pendientes más acentuadas, sobre las que se sitúan, además, coluviones y piedemonte sin costra calcárea, susceptibles igualmente de movilización.

Figura 7. En la imagen de la izquierda puede observarse un importante deslizamiento de ladera que coincide con una zona de relleno para construcción de vial en el área de estudio. En la imagen de la derecha, evidencias de erosión lateral del cauce del arroyo Piletas



Fotos: autoras/es

4.3 Cartografía de inundabilidad modificada y comparativa con el modelo convencional.

La incorporación de partículas sólidas al flujo ha dado lugar a caudales instantáneos máximos incrementados con respecto al estudio hidrológico-hidráulico “clásico”, de los que resultan láminas de inundación igualmente modificadas. Pero más allá del incremento de las láminas de inundación, cabe destacar también el cambio que conllevan dichos nuevos caudales en las condiciones hidráulicas del flujo.

Los datos de incremento de caudal y lámina inundable por subcuenca se pueden consultar en la siguiente tabla:

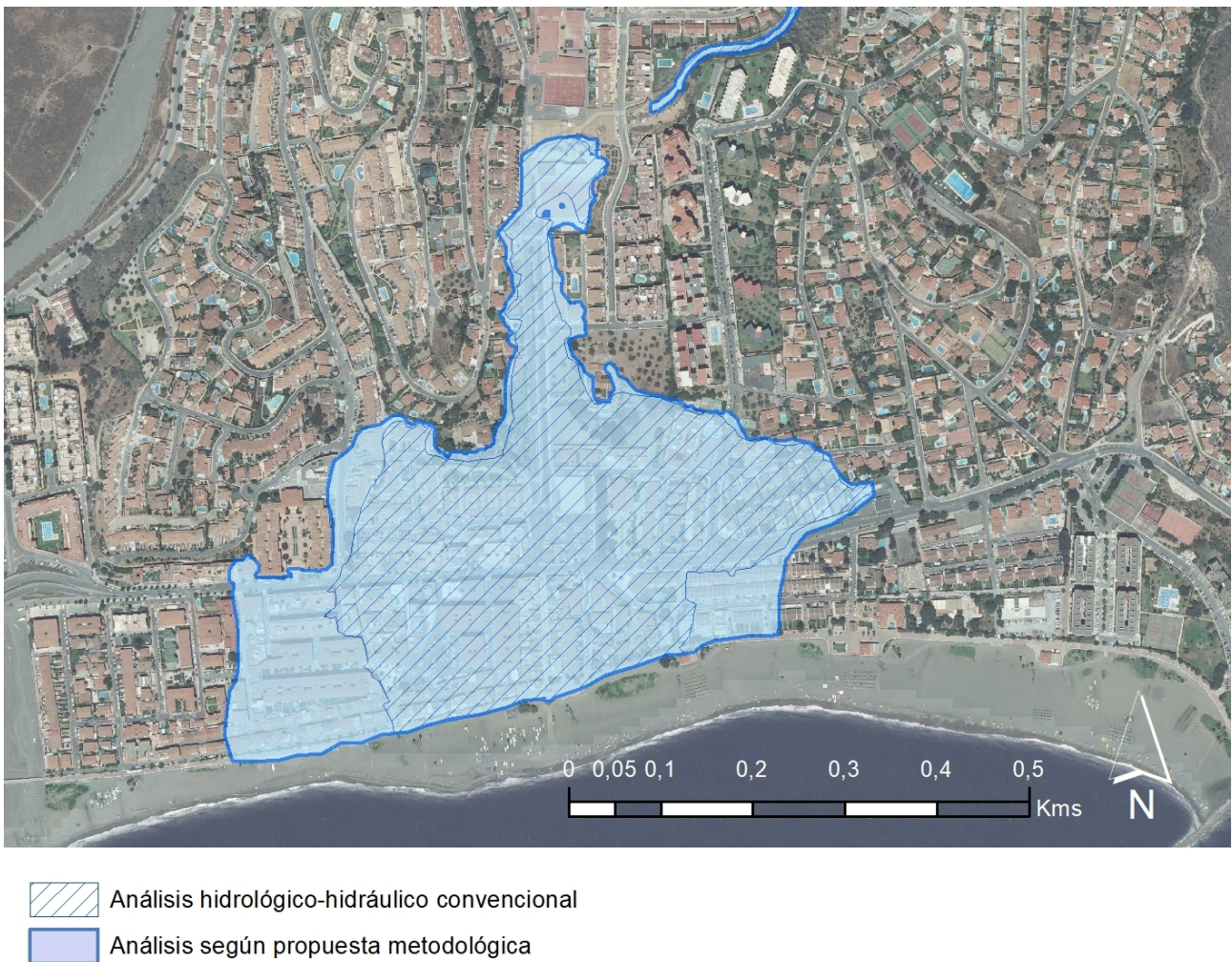
Tabla 6. Caudal instantáneo máximo y superficie inundable modificados según propuesta metodológica de incorporación de elementos sólidos al caudal

| Subcuenca | Punto de caudal | Caudal (m ³ /s) | Volumen total de partículas sólidas (m ³) | Incremento caudal con respecto a estudio hidrológico-hidráulico | Superficie lámina inundable según propuesta metodológica (m ²) | Incremento porcentual de la superficie inundable con respecto al análisis inicial |
|-----------------|-----------------|----------------------------|---|---|--|---|
| 1 (afluente) | PC 1 | 2,63 | 2726 | 112 % | 5674 | 107 % |
| 2 (afluente) | PC 1 | 1,36 | 829 | 107 % | 2898 | 102 % |
| 3 (afluente) | PC 1 | 4,87 | 5243 | 129 % | 2727 | 108 % |
| 0 (cauce ppal.) | PC 1 | 24,66 | 19 438 | 112 % | 33 091 | 106 % |
| | PC 2 | 27,93 | 28 891 | 115 % | 33 091 | 106 % |
| | PC 3 | 31,13 | 42 701 | 119 % | 36 331 | 106 % |
| | PC 4 | 34,41 | 62 314 | 121 % | 233 960 | 129 % |

Fuente: elaboración propia

El incremento del caudal oscila en las subcuencas entre el 12 y el 29 %, con un valor medio del 21 % en la cuenca. En cuanto a la extensión de la lámina inundable, en líneas generales su incremento responde a estos mismos patrones, con un valor medio del 29 % (ver tabla 6). Es destacable, asimismo, que las principales diferencias de aumento de mancha inundable se observan a partir de los últimos pasos subterráneos del caudal antes de su entrada en la zona urbana, donde la adición de peligrosidades estudiadas refleja una incapacidad de evacuación de estos pasos aún mayor de la ya representada en el estudio hidrológico-hidráulico convencional (ver Figura 8).

Figura 8. Detalle de la superposición de las láminas de inundabilidad resultantes del análisis convencional y de la propuesta metodológica en la desembocadura



Fuente: elaboración propia

Para aportar una información más detallada de las diferencias hidráulicas, se incluyen en la tabla 7 otras variables tales como la velocidad del flujo, la elevación de la lámina o la tensión cortante. En atención a ello, se debe destacar que la elevación media de la lámina inundable aumenta un 5 %, la velocidad del flujo un 3 %, la sección mojada en un 9 %, y la tensión cortante un 7 %. En el caso de la anchura inundada de sección, los importantes contrastes geomorfológicos de la cuenca entre los tramos alto y medio con respecto al tramo de llanura litoral dan lugar a anchuras medias bastante superiores, del 181 %.

Tabla 7. Valores medios de los resultados hidráulicos con los datos de caudal modificados según propuesta metodológica, y comparativa con respecto al estudio hidrológico-hidráulico inicial

| Cuenca | Elevación de la lámina de inundación (m) | Velocidad del flujo (m/s) | Área de flujo de la sección transversal (m ²) | Tensión cortante (N/m ²) | Anchura inundada de la sección (m) | Incremento porcentual con respecto a estudio hidrológico-hidráulico inicial (%) | | | | |
|---------------------------|---|------------------------------|--|---|---------------------------------------|---|---------------------|---|------------------|--------------------------------|
| | | | | | | Elevación de la lámina de inundación | Velocidad del flujo | Área de flujo de la sección transversal | Tensión cortante | Anchura inundada de la sección |
| PILETAS (cuenca completa) | 0,61 | 3,68 | 4,27 | 465,11 | 30,67 | 105 | 103 | 109 | 107 | 181 |

Fuente: elaboración propia

Considerando los resultados expuestos y la realidad acaecida en el citado evento tormentoso histórico de marzo de 2004, cabe destacar que la propuesta de mejora del análisis de la peligrosidad permite un mejor ajuste de la lámina de inundación con respecto a la metodología convencional. La comparación de resultados cartográficos y de datos hidráulicos entre el estudio de inundabilidad convencional y la propuesta modificada ponen de manifiesto diferencias sensibles en la distribución de la peligrosidad y en su intensidad. En el análisis estándar existe una clara infravaloración de la extensión del flujo y de otros aspectos como la velocidad o la tensión cortante. En cuanto a la distribución, el reparto de la lámina inundable es más homogéneo, mientras que en la propuesta metodológica existe un mayor contraste entre las cuencas alta y baja, por acumulación de los distintos peligros en los tramos más próximos a la desembocadura.

5 Conclusiones

La principal aportación, atendiendo a los objetivos marcados al inicio del presente trabajo, es la consecución de una propuesta metodológica de cartografía de inundabilidad y peligros asociados adaptada a las particularidades del ámbito geográfico del litoral mediterráneo, mejorando la precisión de los análisis hidrológico-hidráulicos convencionales, que en dicho

ámbito geográfico suelen infravalorar la lámina inundable resultante, lo que termina convirtiéndose en importantes daños económicos o incluso en pérdida de vidas humanas. Esto encaja directamente en el objetivo marcado por la Comisión Europea de desarrollar directrices para el análisis de la peligrosidad y el riesgo en ámbitos regionales concretos, pues según citaba, la disparidad geográfica y de contextos territoriales hace inútil el desarrollo de instrumentos y medidas genéricas de planificación (European Commission, 2007).

El encaje de las distintas cartografías de peligrosidad consideradas se ha salvado mediante la cuantificación volumétrica de los elementos sólidos producidos e incorporables al flujo, que luego se han puesto en relación con el volumen total de escorrentía durante el evento tormentoso, por medio de un porcentaje. Este porcentaje es el que se ha usado para incrementar el caudal usado como dato de entrada por el modelo hidráulico. El proceso ha permitido una homogeneización de factores que facilita avanzar metodológicamente en el análisis de peligrosidades asociadas, confluentes en el tiempo y el espacio, así como acercar los resultados del estudio de inundabilidad a los casos reales. No obstante, aún minusvalora otras variables que también son importantes, como la mayor densidad y daño del flujo por incorporación de sólidos (Gallegos, 2015).

Otro aspecto relacionado con la integración de las peligrosidades asociadas, siempre con la finalidad de acercarlo a la metodología hidráulica, es el uso de los periodos de retorno. La erosión potencial de suelos según formulación MUSLE tiene un encaje bastante adecuado, dado que trabaja con el mismo concepto de periodo de retorno que la inundación. Esto es, tanto el caudal como los elementos sólidos por erosión de suelos se calculan considerando un evento pluviométrico determinado. En el caso, no obstante, de la incorporación de partículas de suelo por movimientos gravitatorios no existía la posibilidad de trabajar de igual manera, y se ha hecho con la hipótesis de máximo riesgo.

Uno más de los objetivos cubiertos ha sido la incorporación de algunos de los nuevos requisitos normativos introducidos por la legislación europea y estatal. Así, los contenidos mínimos de los mapas de peligrosidad establecidos en los artículos 6 de la Directiva 2007/60/CE, y 9 e) del Real Decreto 903/2010, de evaluación y gestión de riesgos de inundación, establecen que deberán cartografiarse las zonas en las que puedan producirse inundaciones con alto contenido de sedimentos transportados y flujos de derrubio. Esta exigencia queda recogida y desarrollada en la presente propuesta metodológica.

El enfoque territorial que justifica todo el proceso consigue acercar de manera efectiva los estudios de peligrosidad por inundación a la planificación urbanística y territorial, uniendo problemas y soluciones en un mismo ámbito conceptual de actuación, dado que la planificación territorial trabaja con áreas territoriales concretas, y no con objetos particulares. Y a ello también se suma la posibilidad que aporta la propuesta metodológica de obtener e incorporar a la ordenación y gestión territorial sendos mapas de porcentajes potenciales de partículas sólidas en el flujo y de áreas susceptibles a deslizamientos en laderas anexas al cauce, así como la cuantificación de partículas sólidas en cada sección de control del estudio hidráulico, lo que resulta de gran utilidad precisamente en las secciones previas a los puentes y entubamientos.

Debe citarse, por último, que la metodología es testada en este trabajo solo como una primera aproximación, pues aunque la región mediterránea se caracteriza por unas particularidades muy perceptibles que la homogeneizan frente a las restantes cuencas hidrográficas españolas, no puede obviarse el hecho de que una pequeña cuenca difícilmente representará la complejidad territorial que se recoge en los más de 182 000 km² de la vertiente mediterránea española. Cabe ahora, por tanto, replicarla en nuevas cuencas hidrográficas que permitan ajustarla y contrastar su utilidad.

Declaración responsable: Las/os autoras/es declaran que no existe ningún conflicto de interés con relación a la publicación de este artículo. Antonio Gallegos Reina ha diseñado, desarrollado y aplicado la metodología, así como ha redactado resultados y conclusiones. María Jesús Perles Roselló ha realizado la búsqueda de antecedentes metodológicos y conceptuales, ha redactado la introducción y ha realizado una revisión crítica, con correcciones y aportaciones sobre resultados y conclusiones.

Bibliografía

Arnaez Vadillo, J. (2014). Los estudios sobre erosión del suelo: aportaciones del profesor José María García Ruiz. In Arnáez Vadillo, J., González Sampériz, P., Lasanta Martínez, T., & Valero Garcés, B. L. (Eds.), *Geoecología, cambio ambiental y paisaje: Homenaje al profesor José María García Ruiz* (pp. 231-248). La Rioja: Instituto Pirenaico de Ecología (CSIC) y Universidad de La Rioja.

Asistencias Técnicas Clave (2004). Análisis sobre las inundaciones en Rincón de la Victoria el 28 de marzo de 2004. Asistencias técnicas clave S.L.

Batalla Camargo, G. (2013). *Efecto del cambio de uso de suelo en el aporte de sedimentos hacia la presa Jalpán (Sierra Gorda Querétaro)* (Doctoral dissertation, Universidad autónoma de Querétaro, Mexico). Retrieved from <http://ri.uaq.mx/handle/123456789/2505>

Bathurst, J.C., Moretti, G., E-Halmes, A. S., Beguería, S., & García Ruíz, J. M. (2007). Modeling the impact of forest loss on shallow landslide sediment yield. Ijuez river catchment. Spanish Pyrenees. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(1), 569-583.

Berti, N., & Simoni, A. (2007). Prediction of debris flow inundation areas using empirical mobility relationships. *Geomorphology*, 90, 144-161.

Berti, N., & Simoni, A. (2014). DFLOWZ: A free program to evaluate the area potentially inundated by a debris flow. *Computers & Geosciences*, 67, 14-23.

Bornaetxea Estela, T., Antigüedad, I., & Ormaetxea, O. (2018). Mapas de susceptibilidad de deslizamientos a partir del modelo de regresión logística en la cuenca del río Oria (Guipuzkoa). Estrategias de tratamiento de variables. *Cuaternario y Geomorfología*, 32(1-2), 7-29.

Bornaetxea Estela, T., Ormaetxea, O., & Antigüedad, I. (2016). Modelo de susceptibilidad de deslizamientos superficiales para la cuenca del río Oria (Guipuzkoa). Aplicación de la regresión logística y comparación de resultados con estudios precedentes. In Durán Valsero, J.J., Montes Santiago, M., Robador Moreno, A., Salazar Rincón, A. (Eds.), *Comprendiendo el relieve: del pasado al futuro. Actas de la XIV Reunión Nacional de Geomorfología* (pp. 97–104). Málaga, Madrid: IGME.

Bornaetxea, T., & Ormaetxea, O. (2019). Modelos de susceptibilidad de procesos de ladera como medida preventiva. Ensayos metodológicos en el territorio histórico de Gipuzkoa. *In Crisis y espacios de oportunidad. Retos para la Geografía. XXVI Congreso de la Asociación Española de Geografía*. Valencia, October 22-25.

Bovolo, C., Parkin, G., & Sophocleous, M. (2009). EDITORIAL: Groundwater resources, climate and vulnerability. *Environmental Research Letters*, 4. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/4/3/035001>

Burrough, P. A., & McDonnell, R. A. (1998). *Principles of Geographical Information Systems*. New York: Oxford University Press.

Camarasa Belmonte, A. M. (2016). Flash floods in Mediterranean ephemeral streams in Valencia Region (Spain). *Journal of Hydrology*, 541, 99-115.

<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.03.019>

Camarasa Belmonte, A.M., & Bescós, A. (2004). Cartografía de áreas inundables: comparación entre mapas de peligros y mapas de inundaciones concretas. In G. Benito & Díez Herrero (Eds.), *Riesgos Naturales y Antrópicos en Geomorfología* (pp. 25-36). Madrid: SEG y SCIC.

Camarasa Belmonte, A.M., Caballero López, M. P., & Iranzo García, E. (2018). Cambios de uso del suelo, producción de escorrentía y pérdida de suelo. Sinergias y compensaciones en una rambla mediterránea (Barranc del Carraixet, 1956–2011). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, (78), 127–153. <http://dx.doi.org/10.21138/2714>

Cannon S., & DeGraff J. (2009) The Increasing Wildfire and Post-Fire Debris-Flow Threat in Western USA, and Implications for Consequences of Climate Change. In K. Sassa & P. Canuti (Eds.), *Landslides – Disaster Risk Reduction* (pp. 177-190). Berlin, Heidelberg: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-69970-5_9

Cantarero Prados, F. (2013). Relaciones entre el patrón territorial y la generación del peligro de inundación. Análisis comparado de casos en Málaga (España) y Motozintla (México) (Doctoral dissertation, Universidad de Málaga, Spain). Retrieved from <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=257203>

Carpignano, A., Golia, E., Dimauro, C., & Bouchon, S. (2009). A methodological approach for the definition of multi-risk maps at regional level: First application. *Journal of Risk Research*, 12, 513-534. <https://doi.org/10.1080/13669870903050269>

Carrasco, R., Pedraza, J., Martín-Duque, J., Mattered, M., Sanz, M., & Bodoque, J. (2003). Hazard zoning for landslides connected to torrential floods in the Jerte Valley (Spain) by using GIS techniques. *Natural Hazards*, 30, 361–381.

Cerdà, A., & Jordán, A., (Coords.) (2010). *Actualización en métodos y técnicas para el estudio de los suelos afectados por incendios forestales*. Valencia: Cátedra de Divulgación de la Ciencia. Universitat de València.

Chacón, J. (2012). Movimientos de ladera: clasificación, descripción y evolución espacial y temporal. *Revista de geología aplicada a la ingeniería y al ambiente*, 28, 73-89.

Christen, M., Bartelt, P., & Gruber, U. (2007). Modelling Avalanches. *GEO: Geoconnexion International*, 6(4), 38-39.

Conesa García, C., & García Lorenzo, R. (2007). Erosión y diques de retención en la Cuenca Mediterránea. Efectividad hidrogeomorfológica de los diques de retención en cuencas torrenciales del Sureste español. Murcia: Fundación Instituto Euromediterráneo del Agua.

Conesa García, C., & García Lorenzo, R. (2013). Evaluating the effectiveness of road-crossing drainage culverts in ephemeral streams. *Hydrological Processes*, 27(12), 1781–1796. <https://doi.org/10.1002/hyp.9335>

Conesa García, C., & García Lorenzo, R. (2014). Flood hazard assessment for bridge crossings over ephemeral channels: A case study of the Murcia Coast (SE Spain). *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 40(1), 117–143.

Conesa García, C., Arana Castillo, R., & García Lorenzo, R. (2009). Variación granulométrica y mineralógica en profundidad de los sedimentos retenidos por diques. Estudio en cauces torrenciales semiáridos del sureste peninsular. *Nimbus*, 23, 61-88.

Conesa García, C., García Lorenzo, R., & Pérez Cutillas, P. (2017). Flood hazards at ford stream crossings on ephemeral channels (south-east coast of Spain). *Hydrological Processes*, 31, 731-749.

Delmonaco, G., Margottini, C., & Spizzino, D. (2006). Report on new methodology for multi-risk assesment and the harmonisation for different natural risk maps. ARMONÍA Proyect: Applied multirisk mapping of Natural Hazards for Impact Assessment. *Deliverable 3.1*. European Community. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/317957266_New_methodology_for_multi-risk_assessment_and_the_harmonisation_of_different_natural_risk_maps

Densmore, A.L., Schuerch, P., Rosser, N.J., & Mcardell, B.W. (2011). Erosion and deposition on a debris-flow fan. *American Geophysical Union, Fall Meeting Abstracts* 1, 08. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/258469243_Erosion_and_deposition_on_a_debris-flow_fan

Díez Herrero, A. (2008). Prevención de inundaciones. In Arnaiz consultores & AcuaTajo, *Manual de gestión medioambiental*. Biblioteca empresarial 5 días. (Ministerio de Medio Ambiente). Retrieved from http://www.andresdiezherrero.es/publicaciones/ponencias_y_varios/diez_2008_inundaciones_cinco_dias.pdf

Díez Herrero, A., Lain Huerta, L., & Llorente Isidro, M. (Eds.) (2008). *Mapas de peligrosidad por avenidas e inundaciones. Guía metodológica para su elaboración*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.

Dunne, T., & Leopold, L. B. (1978). *Water in environmental planning*. San Francisco: Freeman.

Egli, T. (1996). Hochwasserschutz und Raumplanung. Schutz vor Naturgefahren mit Instrumenten der Raumplanung—dargestellt am Beispiel von Hochwasser und Murgängen. vdf Hochschulverlag AG, ETH Zürich, ORL-Bericht 100. Retrieved from <https://www.research-collection.ethz.ch/handle/20.500.11850/142386>

Eshrati, L., Mahmoudzadeh, A., & Taghvaei, M. (2015). Multi hazards risk assessment, a new methodology, *Int. J. Health Syst. Disaster Manage*, 3, 79–88.

European Comision (2007). *ARMONIA, Assesing and mapping multiple risks for spatial planning. Approaches, methodologies and tools in Europe*. A summary of the research undertaken by the ARMONIA research project, funded under the Sixth EU Framework Programme for Research and Tchnological Development. Lancaster Unviersity, Department of Geography, with support of T6 Società Cooperativa.

European Comision (2010). Risk assessment and mapping guidelines for disaster management. Commission staff working paper.

Ewen, J., Parkin, G., & O'Connell, P. (2000). SHETRAN: Distributed River Basin Flow and Transport Modeling System. *Journal of Hydrologic Engineering*, 5. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2000\)5:3\(250\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2000)5:3(250))

Eyrolle, F., Radakovitch, O., Raimbault, P., Charmasson, S., Antonelli, C., Ferrand, E., ... Gurriaran, R. (2012). Consequences of hydrological events on the delivery of suspended

sediment and associated radionuclides from the Rhône River to the Mediterranean Sea. *Journal of Soils and Sediments*, 12, 1479–1495. <https://doi.org/10.1007/s11368-012-0575-0>

Felicísimo, A., Cuartero, A., Remondo, R., & Quirós, E. (2013). Mapping landslide susceptibility with logistic regression, multiple adaptive regression splines, classification and regression trees, and maximum entropy methods: a comparative study. *Landslides*, 10(2), 175–189. <https://doi.org/10.1007/s10346-012-0320-1>

Frolova, N. I., Larionov, V. I., Sushchev, S. P., & Bonnin, J. (2012): Seismic and integrated risk assessment and management with information technology application, In *15th World Conference on Earthquake Engineering*. Lisbon, Portugal, September, 24-28.

Gallegos Reina, A., & Perles Roselló, M.J. (2019). Relaciones entre los cambios en los usos del suelo y el incremento de los riesgos de inundabilidad y erosión: análisis diacrónico en la provincia de Málaga (1957-2007). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, (81). <http://dx.doi.org/10.21138/bage.2740>

Gallegos Reina, A. (2015). Caracterización de cuencas fluviales periurbanas con riesgo de inundación en ámbitos mediterráneos y propuesta de cartografía de peligrosidad adaptada. (Doctoral dissertation, University of Málaga, Spain). Retrieved from <https://riuma.uma.es/xmlui/handle/10630/10576>

Gallegos Reina, A. (2018). *Caracterización y análisis de los riesgos naturales en el planeamiento urbanístico del litoral mediterráneo español*. Málaga: UMA Editorial. Retrieved from https://www.umaeditorial.uma.es/libro/caracterizacion-y-analisis-de-los-riesgos-naturales-en-el-planeamiento-urbanistico-del-litoral-mediterraneo-espanol_2248/

Gallegos Reina, A., & Perles Roselló, M.J. (2015). Erosión hídrica y modificación del caudal de inundación en ambientes mediterráneos. Aproximación metodológica. *Revista científica Monfragüe resiliente*, 4, 153-163.

García García, R. (2013). *Análisis y evaluación del transporte de sedimentos en cuencas mediterráneas* (Doctoral dissertation, Universidad Politécnica de Cartagena. Escuela de Caminos, Canales y Puertos, Country). Retrieved from <https://repositorio.upct.es/handle/10317/2929>

García-Aristizabal, A., & Marzocchi, W. (2013). Scenarios of Cascade Events, ENV.2010.6.1.3.4, *New Methodologies for MultiHazard and Multi-Risk Assessment*. Brussels: European Commission.

- García-Hernández, C., Ruiz-Fernández, J., Oliva, M., & Gallinar, D. (2018). El episodio de movimientos en masa asociado a los temporales de nieve de 1888 en el Macizo Asturiano. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, (76). <https://doi.org/10.21138/bage.2515>
- García-Ruíz, J.M., & Lana-Renault, N. (2011): Hydrological and erosive consequences of farmland abandonment in Europe, with special reference to the Mediterranean region—A review. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 140(3-4), 317-338.
- Gill, J. C. & Malamud, B. D. (2014): Reviewing and visualizing the interactions of natural hazards. *Reviews of Geophysics*, 52, 680–722.
- Gómez Gutiérrez, A., Schnabel, S., & Lavado Contador, J. F. (2011). Procesos, factores y consecuencias de la erosión por cárcavas; trabajos desarrollados en la Península Ibérica. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, (55), 59-80.
- Hueso, P., Ruíz Sinoga, J.D., Martínez Murillo, J. F., & Lavee, H. (2014). Overland flow mechanisms generation affected by topsoil treatment: application to soil conservation. *Geomorphology*, 228, 796–804.
- Ibarra-Montoya, J., & Huerta-Martinez, F. (2016). Modelado espacial de incendios: una herramienta predictiva para el Bosque La Primavera, Jalisco México. *Ambiente y Agua*, 11, 35-49. <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.1536>
- Instituto Geológico y Minero de España (2003). *Mapa Geológico de España a escala 1:50.000* [Map]. 2ª serie (MAGNA).
- IPCC (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.). IPCC, Geneva, Switzerland. Retrieved from <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>
- Junta de Andalucía (2004). *Informe sobre las inundaciones acaecidas en Rincón de la Victoria en marzo de 2004*. Consejería de Obras Públicas Transportes. Junta de Andalucía.
- Junta de Andalucía (2012). Recomendaciones sobre el contenido mínimo en materia de aguas de los planeamientos urbanísticos y de los actos y ordenanzas de las entidades locales. Dirección General de Planificación y Gestión del Dominio Público Hidráulico. Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía.

Junta de Andalucía (2015). Plan de gestión del riesgo de inundación. Demarcación hidrográfica de las Cuencas Mediterráneas Andaluzas. Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio. Retrieved from

http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/portal_web/servicios_generales/normativa/2016/BOJA16-106-00489-9503-01_00092039.pdf

Kappes, M. (2011). *Multi-hazard risk analyses: a concept and its implementation* (Doctoral dissertation, University of Vienna, Austria). Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/260692785_From_Single-to_Multi-Hazard_Risk_analyses_a_concept_addressing_emerging_challenges

Kappes, M. S., Keiler, M., & Glade, T. (2010). From single to multihazard risk analyses: a concept addressing emerging challenges. In J. P. Malet, T. Glade & N. Casgli (Eds.), *Mountain Risks: Bringing Science to Society* (pp. 351–356). Strasbourg: CERG Editions.

Kappes, M., Keiler, M., Elverfeldt, K., & Glade, T. (2012). Challenges of dealing with multi-hazard risk: a review. *Natural Hazards*, 64, 1925-1958. <http://dx.doi.org/10.1007/s11069-012-0294-2>

Lasanta, T., Nadal-Romero, E., Serrano-Muela, P., Vicente-Serrano, S. M., & García-Fuiz, J. M. (2010). Escorrentía y erosión tras el abandono de tierras de cultivo en montaña: resultados de la estación experimental Valle de Aísa, Pirineos. *Revista de Ecología de Montaña*, 165, 115–133. <http://dx.doi.org/10.3989/Pirineos.2010.165006>

León, F.J., Badía Villas. D., & Echeverría Arnedo M.T. (2015). Comparison of different methods to measure soil erosion in the central Ebro valley. *Cuadernos de investigación geográfica*, 41(1), 165-180. <https://doi.org/10.18172/cig.2703>

Ley García, J. (2019). Congruencia espacial entre la exposición y la percepción de peligros múltiples, en Ciudad y sustentabilidad. Riesgos urbanos. Universidad Autónoma de Baja California.

Lima Cueto, F.J., Gómez Moreno, M.L., & Blanco Sepúlveda, R. (2017). El olivar de montaña y la conservación del suelo en la transición de la economía orgánica a la industrial: el caso de Sierra de las Nieves (Málaga), 1940-1975. *Ager. Revista de Estudios sobre Despoblación y Desarrollo Rural*, 23, 97-128. <https://doi.org/10.4422/ager.2017.05>

- Lima-Cueto, F.J. Blanco-Sepúlveda, R., & Gómez-Moreno, M.L. (2018). Soil erosion and environmental regulations in the european agrarian policy for olive groves (*Olea europaea*). *Agrociencia*, 52, 293-308.
- Linares, G., Rojas, A. E., Araujo, R. J., Rivero, O. F., Ortega, O. H., Oviedo, M. A., & Guevara, E. (2009). Parametrización de modelos de erosión hídrica y transporte de sedimentos en parcelas agrícolas ubicadas en la cuenca del río Chirgua (Venezuela). In *Cuarto Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos*. Salta, Argentina.
- Liquete, C., Arnau, P, Canals, M., & Colas, S. (2005). Mediterranean river systems of Andalusia, southern Spain, and associated deltas: A source to sink approach. *Marine Geology*, 222, 471–495.
- Liquete, C., Canals, M., Ludwig, W., & Arnau, P. (2008). Sediment discharge of the rivers of Catalonia, NE Spain, and the influence of human impacts. *Journal of Hydrology*, 366, 76–88.
- Liu, B., Siu, Y. L., & Mitchell, G. (2016): Hazard interaction analysis for multi-hazard risk assessment: a systematic classification based on hazard-forming environment. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16, 629–642. <https://doi.org/10.5194/nhess-16-629-2016>
- Lorente, A., Beguería, S., Bathurts, J. C., & García Ruíz, J. M. (2003). Debris flow characteristics and relationships in the Central Spanish Pyrenees. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3, 1–9.
- Marsh, W. (1978). Environmental analysis for land use and site planning. New York: McGraw-Hill.
- Martínez Murillo, J.F., Remond, R., Hueso González, P., & Ruíz Sinoga, J.D. (2016). Resiliencia de la cubierta vegetal en un área de montaña mediterránea afectada por el fuego: el caso del incendio de Río Verde (Provincia de Málaga, Sur de España). *Pirineos*, 171. <http://dx.doi.org/10.3989/pirineos.2016.171008>
- Martínez Navarro, J. M. (2017). *Gestión territorial del riesgo antrópico de ignición forestal en Castilla-La Mancha* (Doctoral dissertation, Universidad de Castilla-La Mancha, Spain). Retrieved from <https://ruidera.uclm.es/xmlui/handle/10578/16612>
- Martín-Moreno, C., Martín Duque, J. F., Nicolau Ibarra, J. M., Hernando Rodríguez, N., Sanz Santos, M.A., & Sánchez Castillo, L. (2016). Effects of topography and surface soil cover on erosion for mining reclamation: The experimental spoil heap at El Machorro Mine (Central Spain). *Land Degradation & Development*, 27, 145-159. <http://dx.doi.org/10.1002/ldr.2232>

- Marzocchi, W., Garcia-Aristizabal, A., Gasparini, P., Mastellone, M., & Di Ruocco, A. (2012). Basic principles of multi-risk assessment: a case study in Italy. *Natural Hazards*, 62, 551–573.
- Maza, J.A. (1987). *Introduction to River Engineering*. División de Estudios de Postgrado. Facultad de Ingeniería UNAM.
- Menoni, S. (2006). Different Preventive Strategies Require Diversified Risk Assessment Models. In *Environmental Security and Environmental Management: The Role of Risk Assessment* (pp. 211-221). http://dx.doi.org/10.1007/1-4020-3893-3_14
- Meybeck, M., Laroche, L., Dürr, H.H., & Syvitski, J.P. (2003). Global variability of daily total suspended solids and their fluxes in rivers. *Global and Planetary Change*, 39, 65–93.
- Meyenfeld, H. (2008). Modellierungen seismisch ausgelöster gravitativer Massenbewegungen für die Schwäbische Alb und den Raum Bonn und Erstellen von Gefahrenhinweiskarten (Doctoral dissertation, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Germany). Retrieved from <http://hss.ulb.uni-bonn.de/2009/1692/1692.htm>
- Ministerio de Fomento (1999). *Máximas lluvias diarias en la España peninsular*. Madrid: Secretaría de Estado de Infraestructuras y Transporte. Dirección general de carreteras.
- Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (2006). *Guía para la elaboración de estudios del medio físico*. Madrid: Ministerio de Medio Ambiente.
- Mintegui, J.A., & Robredo, J.C. (1993). *Métodos para la estimación de los efectos torrenciales en una cuenca hidrográfica*. Escuela Superior de Ingenieros de Montes. Fundación Conde del Valle de Salazar.
- Moran, A., Wastl, M., Geitner C., & Stötter, J. (2004). A regional scale risk analysis in the community of Ólafsfjodur, Iceland. In *Internationales Symposium—INTERPRAEVENT*, Riva, Trient.
- Navarro, A., Sanchís, C., & Segura, F. (2016). Cambios morfológicos en el cauce del río Serpis tras la construcción del embalse de Beniarrés (Alicante, 1958–2013). In J. J. Durán Valsero, M. Montes Santiago, A. Robador Moreno, A. Salazar Rincón (Eds.), *Comprendiendo el relieve: del pasado al futuro* (pp. 399-406). Actas de la XIV Reunión Nacional de Geomorfología. Málaga, Madrid, IGME.
- Nghuyen, N.H., Delgado, J.M., Güntner, A., Merz, B., Bárdossy, A., & Heiko, A. (2013). Sedimentation in the floodplains of the Mekong Delta, Vietnam. Part I: suspended sediment dynamics. *Hydrological Process*, 28(7), 3132-3144. <https://doi.org/10.1002/hyp.9856>

Ollero Ojeda, A., Ibisate González de Matauco, A., Horacio García, J., Conesa García, C., Álvarez Rogel, Y., Segura Beltran, F., ... Calle Navarro, M., & Sánchez Fabre, M. (2019). Diagnóstico y posibilidades de restauración en cursos de agua efímeros mediterráneos. In *Restaura Rios*, III Congreso Ibérico sobre la restauración fluvial. Murcia.

Ollivier, P., Radakovitch, B., & Hamelin, B. (2011). Major and trace element partition and fluxes in the Rhône River. *Chemical Geology*, 285, 15–31. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2011.02.011>

Pedraza, J., Carrasco, R. M., Bodoque, J.M., Sanz, M.A., Martín-Duque, J.F., González, A., & Díez, A. (2004). The Jubaguerra stream event: analysis of a mass movement connected with a flash flood phenomenon and its application to other areas in the Gredos Mountains (Central Spain). In C. A. Brebbia (Ed.), *Risk Analysis IV* (pp. 345–358). Southampton, United Kingdom: Wessex Institute of Technology (WIT Press).

Pereda 4, Estudio (2004). Urbanización de los sectores URC-1 y URC-2, Parque Victoria, del PGOU de Rincón de la Victoria (Málaga).

Perles Roselló, M.J. (1995). *El concepto de fragilidad erosiva. Propuesta metodológica para su evaluación* (Doctoral dissertation, University of Málaga, Spain). Málaga: ed. Spicum.

Perles Roselló, M.J., & Cantarero Prados, F. (2010). Problemas y retos en el análisis de los riesgos múltiples del territorio. Propuestas metodológicas para la elaboración de cartografías multi-peligros. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, (52), 245-271. Retrieved from <https://bage.age-geografia.es/ojs/index.php/bage/article/view/1171>

Perles Roselló, M.J., Gallegos Reina, A., & Cantarero Prados, F. (2006). Análisis del ajuste del área inundable obtenida mediante una evaluación integrada de la peligrosidad de inundación y peligros asociados. *Baética. Estudios de Arte, Geografía e Historia*, 28, 527-545.

Perles Roselló, M.J., Pardo García, S., Mérida Rodríguez, M., & Olcina Cantos, J. (2019). Metodología para la predicción de puntos de riesgos múltiples en infraestructuras viarias tras episodios torrenciales (road-risk). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, (80), 1–40. <https://doi.org/10.21138/bage.2615>

Puglisi, C. (2001). Processo metodologico per la valutazione della pericolosità delle colate di fango e detrito: applicazione al Bacino del Torrente lafrate (Cervinara). ENEA C.R. Casaccia.

Rickenmann, D. (1999). Empirical relationships for debris flows. *Natural Hazards*, 19, 47-77.

Rickenmann, D., Laigle, D., Mcardell, B.W., & Hubl, J. (2006). Comparison of 2D debrisflow simulation models with field events. *Computer & Geosciences*, 10, 241–264.

Ruíz Sinoga, J. D., Romero, A., & Belmonte, F. (2011). El urbanismo como acelerador de los procesos de degradación del suelo. Colinas del Limonar, Málaga. In XXII Congreso de Geógrafos Españoles (pp. 629–640). Málaga.

Ruiz Villanueva, V., Bladé Castellet, E, Díez-Herrero, A., Bodoque, J.M., & Martí Sánchez-Juny, M. (2013): Two-dimensional modelling of large wood transport during flash floods. *Earth Surface Processes and Landforms*, 39(4), 438-449.

Ruiz Villanueva, V., Bodoque, J. M., Díez-Herrero, A., Eguibar, M. A., & Pardo-Igúzquiza, E. (2012). Reconstruction of a flash flood with large wood transport and its influence on hazard patterns in an ungauged mountain basin. *Hydrological Processes*, 27(24), 3424-3437.

Salazar Galán, S. A. (2013). Metodología para el análisis y la reducción del riesgo de inundaciones: aplicación en la rambla del Poyo (Valencia) usando medidas de retención del agua en el territorio (Doctoral dissertation, Universidad de Valencia, Spain). Retrieved from <https://riunet.upv.es/handle/10251/29329>

Sanchez Martinez, F.J., & Lastra Fernández, J. (Coords.) (2011). *Guía metodológica para el desarrollo del sistema nacional de cartografía de zonas inundables*. Madrid: Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino.

Sanchis-Ibor, C., Segura-Beltrán, F., & Almonacid-Caballer, J. (2017). Channel forms recovery in an ephemeral river after gravel mining (Palancia River, Eastern Spain). *Catena*, 158, 357-370. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.07.012>

Schilling, S.P. (1998). GIS programs for automated mapping of Lahar-laharinundation hazard zones. U.S. Geological Survey Open-File Report.

Segura , F., La Roca, N., Armengot, R., & Giner, J. J. (2002). *Riesgos naturale* (Diploma de especialización profesional universitario en protección civil y gestión de emergencias, Universidad de Valencia, Spain). Retrieved from <http://eraspain.eu/wp-content/uploads/2015/10/Curso-de-Proteccion-Civil-Modulo-2-Riesgos-Naturales.pdf>

Segura-Beltran, F.S. (2014). Sobre la restauració fluvial i la complexitat dels rius efímers: algunes consideracions crítiques. *Cuadernos de Geografía*, 95(96), 101-147.

Senciales González, J.M. (1999). *Redes fluviales. Morfología de análisis*. Universidad de Málaga. Estudios y ensayos.

- Soriano García, J., Sanchis-Ibor, C., & Camarasa Belmonte, A. (2019). Integración de cartografías de inundabilidad en la Comunidad Valenciana (PATRICOVA Y SNCZI). *In Crisis y espacios de oportunidad. Retos para la Geografía*. XXVI Congreso de la Asociación Española de Geografía. Valencia, October 22-25.
- Tarvainen, T., Jarva, J., & Greiving, S. (2006). Spatial pattern of hazards and hazard interactions in Europe. In P. Schmidt-Thomé (Ed.), *Natural and Technological Hazards and Risks Affecting the Spatial Development of European Region* (pp. 83–91). Espoo, Finland: Geological Survey Of Finland.
- Tubbs, D.W. (1975). *Causes, mechanisms and prediction of landsliding in Seattle* (Doctoral dissertation, University of Washington, Seattle, United States). Retrieved from <http://www.tubbs.com/disserta/disserta.htm>
- TYPSA (2004). *Estudio sobre las inundaciones acaecidas en Rincón de la Victoria (Málaga) el día 28-03-2004* (Unpublished).
- Wichmann, V., Heckmann, T., Haas, F., & Becht, M. (2009). A new modelling approach to delineate the spatial extent of alpine sediment cascades. *Geomorphology*, 111, 70–78.
- Yus Ramos, R., Torres Delgado, M.A., & Gámez Martín, J.L. (2004). *28-M: Inundaciones en Rincón de la Victoria. Sus causas y soluciones*. Málaga: Gabinete de Estudios de la Naturaleza de la Axarquía.