



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Centro de Estudios de Postgrado

Trabajo Fin de Máster

PREVENCIÓN Y RESTAURACIÓN DE CÁRCAVAS ASOCIADAS A INFRAESTRUCTURAS VIARIAS EN LA PROVINCIA DE JAÉN MEDIANTE ACTUACIONES DE SOFT-ENGINEERING

Alumna: Domínguez Carmona, Ana

Tutor: Prof. D. Julio Antonio Calero González

Dpto: Geología

Marzo, 2021



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Centro de Estudios de Postgrado

Trabajo Fin de Máster

PREVENCIÓN Y RESTAURACIÓN DE CÁRCAVAS ASOCIADAS A INFRAESTRUCTURAS VIARIAS EN LA PROVINCIA DE JAÉN MEDIANTE ACTUACIONES DE *SOFT-ENGINEERING*

	
Fdo.: Ana Domínguez Carmona	Fdo.: Julio Antonio Calero González

Jaén, marzo 2021

ÍNDICE

RESUMEN	3
ABSTRACT.....	4
1. INTRODUCCIÓN	5
1.1. El suelo y su degradación por erosión.....	5
1.2. Erosión en cárcavas	7
1.3. Erosión en cárcavas vinculada a infraestructuras viarias.....	11
1.4. Actuaciones de prevención y restauración de cárcavas	16
1.5. Tipos de disipadores de energía.....	18
2. OBJETIVOS.....	24
3. MATERIAL Y MÉTODOS	25
3.1. Zonas de estudio	25
3.2. Factores ambientales	28
3.2.1. <i>Clima</i>	28
3.2.2. <i>Geología</i>	29
3.2.3. <i>Edafología y Usos del Suelo</i>	29
3.3. Determinación de las características de las cuencas hidrográficas	29
3.4. Cálculo de los caudales de diseño	31
3.4.1. <i>Número de curva</i>	31
3.4.2. <i>Escorrentía</i>	33
3.4.3. <i>Tiempo de viaje y tiempo de concentración</i>	34
3.4.4. <i>Caudal de diseño</i>	37
3.5. Diseño de medidas de prevención y control de cárcavas	38
3.5.1. <i>Riprap</i>	39
3.5.2. <i>Bajante escalonada</i>	44
4. RESULTADOS	47
4.1. Características de las cuencas hidrográficas.....	47
4.2. Cálculo de los caudales de diseño	50
4.3. Medidas de prevención y control de cárcavas	55

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	57
6. CONCLUSIONES	61
7. BIBLIOGRAFÍA	62
8. ANEXOS.....	69
8.1. Resumen de las asignaturas del Máster.....	69

RESUMEN

La erosión es un problema que afecta gravemente a la provincia de Jaén, provocando una amenaza para la sostenibilidad de sus suelos. La erosión en cárcavas ocasiona grandes daños y su origen puede estar ligado a infraestructuras viarias, siendo este el eje central del presente trabajo. Al ser cada vez más frecuentes, las cárcavas precisan medidas que lleven a cabo su prevención y restauración. Este trabajo está centrado en dos zonas de estudio bien diferenciadas, la primera está en el municipio de Bedmar y Garcíez, donde no se han desarrollado aun cárcavas ligadas a la carretera JV-3222; la segunda zona de estudio está en el término municipal de Linares y aquí ya hay una cárcava formada por la acción erosiva de los flujos de drenaje de la carretera J-9007. A partir de la determinación de las características de las cuencas hidrográficas con el software ArcGis, se calculan los caudales de diseño mediante el método del Número de Curva, realizando también los cálculos para una simulación con cubierta herbácea en los suelos. Una vez que se obtienen los datos, se proponen unas actuaciones de *soft-engineering* (disipadores de energía), para reducir la energía del agua a la salida de las obras de drenaje transversal de las carreteras. El disipador planteado para la primera zona de estudio es un disipador tipo riprap, para evitar la formación de cárcavas; en la segunda zona, se recomienda una bajante escalonada, con el fin de impedir el avance de la cárcava ya formada.

Palabras clave: erosión hídrica, drenaje de carreteras, Número de Curva, riprap, bajante escalonada.

ABSTRACT

Erosion is a problem that seriously affects the province of Jaén, causing a threat to the sustainability of its soils. Gully erosion causes great damage and its origin may be linked to road infrastructures, this being the central axis of this work. Being more and more frequent, gullies require measures to carry out their prevention and restoration. This work is focused on two well differentiated study areas, the first is in the municipality of Bedmar and Garcíez, where gullies linked to the JV-3222 highway have not yet developed; the second study area is in the municipality of Linares and here there is already a gully formed by the erosive action of the drainage flows from the J-9007 highway. Based on the determination of the characteristics of the hydrographic basins with the ArcGis software, the peak discharges are calculated using the Curve Number method, also carrying out the calculations for a simulation with herbaceous cover on the soils. Once the data are obtained, some actions of soft-engineering (energy dissipators) are proposed, to reduce the energy of the water at the exit of the culvert outlets of the roads. The dissipator proposed for the first study area is a riprap, to avoid the formation of gullies; in the second zone, a stepped structure is recommended, in order to prevent the advance of the gully already formed.

Keywords: water erosion, roadside drainage, Curve Number, riprap, stepped structure.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. El suelo y su degradación por erosión

El suelo es la capa superior de la corteza terrestre, constituida por partículas minerales, materia orgánica, agua, aire y organismos vivos (CEC, 2006). Es un recurso no renovable y un componente esencial de los ecosistemas terrestres, tanto naturales como productivos.

Los suelos, al formar parte de los ecosistemas y de los agroecosistemas, ofrecen una serie de funciones o servicios que los mantienen y que apoyan las actividades sociales y económicas de las personas. Según Karlen et al., (2003) y Burbano (2016), entre estas funciones destacan:

- Producción de alimentos y biomasa
- Escenario para los ciclos biogeoquímicos
- Almacenamiento o fijación de carbono
- Almacenamiento y filtración de agua
- Soporte de las actividades humanas y fuente de materias primas
- Reserva de biodiversidad
- Depósito del patrimonio geológico y arqueológico
- Entorno físico y cultural para la humanidad

Para preservar todas las funciones que presentan, es necesario realizar una gestión sostenible de los mismos, mediante la que se mantienen o mejoran los servicios de apoyo, suministro, regulación y cultivo que proporcionan los suelos sin afectar significativamente a las funciones que hacen posibles esos servicios ni a la biodiversidad (FAO, 2015).

Sin embargo, hoy en día existe un problema global de degradación de los suelos mediante la pérdida de estos debido a la erosión, lo cual reduce su capacidad para llevar a cabo todas las funciones y servicios ecosistémicos que afectan tanto a los recursos naturales como a los sistemas agrícolas (Borrelli et al., 2017).

La erosión es un proceso natural en el que se produce una pérdida de suelo. Dicha pérdida puede ser causada por el desgaste de la superficie terrestre mediante la acción del agua (erosión hídrica) y del aire (erosión eólica) que arrancan y transportan las partículas de los suelos, así como por movimientos en masa debidos a desequilibrios gravitacionales (erosión en masa) (Almorox et al., 2010). Sin intervención humana, es un proceso que tiene lugar de manera lenta, provocando que se consiga la regeneración del suelo de forma natural mediante los procesos físicos, biológicos y químicos (Milgroom et al., 2006; García-Ruiz et al., 2015).

Cuando si existe una intervención humana en el medio, la acción de los agentes erosivos se ve incrementada, produciéndose lo que se denomina erosión acelerada o antrópica. Esta erosión es la que produce la pérdida no sostenible del suelo, reduciendo así su fertilidad y productividad biológica y alterando los ciclos biogeoquímicos del suelo (De Alba *et al.*, 2011; Da Costa, 2018). Estas consecuencias derivadas de la erosión antrópica resaltan la importancia de conservar los suelos, ya que la degradación de los mismos puede llegar a ser irreversible y provocar la desertificación de un territorio.

La erosión del suelo es uno de los principales problemas ambientales a nivel global a los que se enfrenta la humanidad, debido a que además de los efectos que tiene sobre el medio ambiente, también presenta grandes repercusiones tanto en el ámbito social como en el económico.

En el trabajo de Calero *et al.* (2019) se muestra que el tipo de erosión que afecta en mayor medida a los suelos de la provincia de Jaén es la erosión hídrica. Esto puede deberse a diferentes aspectos, como la existencia de eventos de precipitaciones intensas y concentradas, la presencia de pendientes medias elevadas y la escasa cobertura de la superficie del suelo por vegetación, etc.

“La erosión hídrica es una pérdida de material fino del suelo debido a la ruptura de los agregados por el impacto de las gotas de lluvia sobre un suelo desnudo, transportadas vertiente abajo por las aguas de escorrentía” (Chesworth, 2008).

Diversos autores (Giráldez *et al.*, 2015; Ffolliott *et al.*, 2013; Perales, 2019) señalan que los principales factores que determinan la erosión hídrica son:

- **Clima:** presenta un papel importante en la erosión hídrica, ya que esta depende en gran medida de la frecuencia, intensidad y duración de las precipitaciones.
- **Características del suelo:** la textura, así como la estructura y la permeabilidad, entre otras, afectan a la erosionabilidad de un suelo.
- **Cubierta vegetal:** la presencia o ausencia de cubierta vegetal en un suelo es determinante para la cantidad de suelo que se va a eliminar mediante erosión. Mantener una cubierta vegetal en la superficie del suelo lo va a proteger del impacto de las gotas de lluvia, reduciendo así la erosión superficial. Su presencia también influye mejorando la capacidad de infiltración del suelo y la resistencia del mismo al corte por la acción de las raíces. Y, por último, también aumenta la rugosidad del suelo, lo que disminuye la velocidad de la escorrentía. Es por todo esto que mantener una cubierta vegetal es el mejor método para controlar la erosión superficial cuando está en sus primeras etapas.

- **Topografía:** la característica topográfica que más impacto provoca es la pendiente.
- **Actividad humana:** afecta en los procesos erosivos mediante los cambios en los usos del suelo, el manejo de los cultivos, etc.

Los estudios de Calero et al. (2019) y De Alba et al. (2011) señalan que dentro de la erosión hídrica se puede diferenciar entre erosión hídrica laminar (flujo en forma de lámina difusa de agua, con una velocidad lenta y baja capacidad erosiva, sin llegar a incidir en el suelo) y erosión hídrica concentrada (flujo con mayor velocidad y, por tanto, mayor capacidad erosiva, llegando a formar canales de distinto tamaño en la superficie del suelo y provocando la mayor parte del transporte de sedimentos).

La erosión hídrica concentrada se divide, a su vez, en erosión en surcos y erosión en cárcavas. Para distinguir entre surco y cárcava, se suele hacer una división en función de su tamaño, pero también considerando las implicaciones desde el punto de vista del manejo agrícola. Los surcos son aquellas incisiones en el suelo de pequeño tamaño (< 20 cm) que pueden eliminarse tras el laboreo. Por otro lado, las cárcavas tienen unas dimensiones mayores (> 20 cm), impiden el paso de la maquinaria y requieren técnicas específicas de corrección (Poesen et al., 2003; Calero et al., 2019).

La erosión en surcos significa el paso de un flujo de tipo laminar a uno concentrado al aumentar su caudal y velocidad, y con dicho aumento se forman esas incisiones en el suelo debido a que el esfuerzo cortante del agua supera a la resistencia a la rotura del suelo (Léonard & Richards, 2004).

Con respecto a las cárcavas, son consideradas el siguiente paso a la erosión en surcos, ya que ocurren cuando el caudal de la escorrentía superficial que causaba surcos, sufre un aumento y, en consecuencia, se produce un incremento en su efecto erosivo, produciendo unas mayores incisiones en el suelo que denominamos cárcavas (Cisneros et al., 2012).

1.2. Erosión en cárcavas

La erosión en cárcavas es hoy en día uno de los procesos de degradación del suelo más importantes a nivel mundial (Castillo y Gómez, 2016), siendo el tipo de erosión hídrica que mayores daños produce a la sostenibilidad de los suelos. Poesen et al. (2003) manifiestan que los procesos de erosión en cárcavas pueden explicar entre el 50% y el 90% de la erosión total a escala de cuenca.

Este tipo de erosión no ha recibido mucha atención hasta hace relativamente pocos años, a pesar de la importancia que presenta en la degradación de los suelos de todo el mundo, debido a la complejidad que presenta su estudio.

En Calero et al. (2019) se observa que la formación de una cárcava puede ocurrir como parte de la evolución de los surcos en las partes medias y bajas de la ladera. Pero, también pueden aparecer de manera súbita, debiéndose a distintos factores. Por ejemplo, en la provincia de Jaén es bastante común hallar cárcavas en los suelos de los olivares asociadas a zonas de drenaje de carreteras. Algunos otros procesos que provocan la formación de cárcavas son los cambios en el uso del suelo, el sobrepastoreo del ganado, socavamiento y saturación de laderas, etc. Es decir, cualquier actividad llevada a cabo sobre un suelo que tenga como consecuencia un aumento de la escorrentía superficial, tiene el potencial de causar cárcavas (Rivera-Posada, 1998; Carey et al., 2015).

Conforme a lo observado en varios estudios (Poesen et al., 2003; Gómez-Gutiérrez et al., 2011; Calero et al., 2019), existen varios tipos de cárcavas:

- **Cárcavas efímeras** (de media ladera): aquellas que aparecen en zonas de pendiente sin relación aparente con ningún curso de agua. En tamaño, se solapan con los surcos, de los que se diferencia más que por el tamaño, por la morfología (presencia de un *knickpoint*), y pueden ser eliminadas por laboreo. Otra característica que diferencia a las cárcavas de los surcos es que suelen presentarse en la misma ubicación de manera repetida. Además, también difieren en que los surcos crecen de manera longitudinal, y estas cárcavas crecen tanto de manera longitudinal como a lo ancho, lo cual dificulta su control.
- **Cárcavas permanentes** (de fondo de valle): son las que coinciden con cursos de agua intermitentes, caracterizadas por los procesos de retracción de taludes. Estas cárcavas son aquellas que no se pueden borrar mediante los procedimientos de laboreo.
- **Cárcavas asociadas a márgenes y taludes** (*bank gullies*): se ocasionan por un abrupto incremento de la pendiente en el terreno.

El crecimiento de las cárcavas se produce debido a varios procesos que pueden ocurrir de manera aislada o simultáneamente. Según Cueva-Alanguía (2018) Díaz-Martínez (2018), estos procesos son:

- **Erosión remontante**: producida por el socavamiento de la base del escarpe y el desprendimiento gravitacional del muro del escarpe. Este es el proceso de crecimiento de las cárcavas más dramático, ya que provoca la expansión de la cuenca hidrográfica.
- **Ensanchamiento del cauce**: causado por el socavamiento de las bases de los taludes y desprendimiento gravitacional de los márgenes de la cárcava al provocar la inestabilidad de los mismos.
- **Profundización del cauce**: originada por la abrasión sobre el fondo.

Diversos autores (Martínez-Menes et al., 2019; Carey et al., 2015; Gómez-Gutiérrez et al., 2011; Castillo & Gómez, 2016) han mostrado los grandes perjuicios que pueden provocar las cárcavas, aumentando su gravedad conforme mayor tamaño tienen y más numerosas son. Entre los principales daños que pueden ocasionar las cárcavas destacan los siguientes:

- Degradación del paisaje
- Reducción en la productividad del suelo, ya que el suelo fértil es arrastrado por la escorrentía
- Empeoramiento general de las condiciones físicas del suelo
- Descenso de la cantidad de materia orgánica y de biomasa del suelo
- Disminución del área útil de cultivo, reduciendo de esta manera los rendimientos por unidad de superficie.
- Limitación de la humedad del suelo aprovechable para los cultivos
- Acumulación de sedimentos en las vías fluviales, drenajes de carreteras, presas, embalses, arroyos, ríos. Todo esto conlleva un aumento del riesgo por inundaciones en las zonas cercanas.
- Problemas de contaminación de cursos de agua debido a que los fertilizantes y pesticidas aplicados se adhieren a las partículas del suelo que son erosionadas y transportadas a los cursos fluviales, aumentando de esta manera las concentraciones de diferentes nutrientes en dichos cursos (mayoritariamente nitrógeno y fósforo), favoreciendo su eutrofización.
- Dificultan el tránsito por las zonas afectadas, ya que no pueden ser atravesadas con la maquinaria agrícola.
- Pueden llegar a amenazar a infraestructuras cercanas a ellas como carreteras, cercas, accesos, edificios, etc.
- Impacto económico (por ejemplo, al colmar embalses o al dañar alguna infraestructura, aumento de los costes en el tratamiento del agua para el consumo humano).

Con las características de las cárcavas ya descritas, podemos decir que son la forma más visible y llamativa de los procesos erosivos (Cisneros et al., 2012), siendo según Castillo (2012) el tipo de erosión uno de los principales procesos que producen la pérdida de suelo en zonas agrícolas.

La provincia de Jaén es el área geográfica con mayor extensión de cultivo de olivar del mundo. Dedicar el 48% de la superficie cultivable de la provincia (MAPAMA, 2016) y representa el 59% de la superficie de olivar en España, el 30% en Europa y el 19% en el mundo

(FAOSTAT data, <http://www.fao.org/faostat>). Es por todo esto que el olivar enlaza la vida económica, cultural y social de la provincia, siendo además su paisaje más emblemático. No obstante, la sostenibilidad del olivar está sujeta a diversas amenazas, sobre todo debido a la intensificación del cultivo, que ha provocado una drástica reducción de la calidad de los suelos en las últimas décadas (Calero et al. 2018), lo que se traslada a una disminución en la capacidad a medio-largo plazo del suelo para sostener la producción agrícola, la protección ambiental y la salud y bienestar humano. Una de las principales amenazas del suelo del olivar es la erosión, destacando la erosión hídrica como ya se ha mencionado anteriormente.

Actualmente, la provincia de Jaén es la zona más afectada por erosión hídrica de Andalucía y España (Sánchez-González, 2019). Así, el 80% del olivar de la provincia presenta unas tasas de erosión superiores a las 10 t/ha*año, presentando un valor medio de 32 t/ha*año (INES, 2006).

Estas elevadas tasas de erosión se deben a los factores locales de litología, topografía, clima, etc., pero los cambios en el sistema de cultivo y el uso del suelo han influido en gran medida a estas tasas de erosión (Gómez & Giráldez, 2009; Fernández et al., 2020). El cambio de uso de suelo que más importancia ha tenido en la provincia en los últimos 250 años ha sido la expansión del olivar hacia áreas naturales u ocupadas por otros cultivos (Garrido-González, 2007). A todo esto, hay que añadir que solo un 20% de los olivares de la provincia de Jaén mantienen una cubierta vegetal permanente (MAGRAMA, 2015), lo cual provoca una aceleración en las tasas de erosión.

El hecho de que los datos de erosión de la provincia de Jaén sean tan altos, nos informa de que se trata de unos valores de pérdidas de suelo muy superiores a la capacidad de regeneración natural del suelo, lo cual es consecuencia de un manejo insostenible de estos cultivos (Gómez et al., 2003).

Para gestionar un territorio desde una perspectiva del desarrollo sostenible, es necesario tener en cuenta conseguir el mayor potencial productivo de los suelos sin comprometer el futuro de los mismos, es decir, asegurando un uso sostenible de las explotaciones agroforestales. Para conseguir este fin, es necesario conocer los límites de pérdida de suelo que estos toleran sin provocar una degradación de los mismos, lo cual quiere decir que la tasa de pérdida de suelo no sea superior a su regeneración natural.

En el trabajo de Ruiz-Sinoga et al. (2011) se considera la tolerancia de pérdida de suelo como el máximo nivel de erosión del suelo que permite un elevado nivel de productividad del cultivo, sostenible y económica e indefinidamente. Las pérdidas tolerables de suelo se encuentran aproximadamente alrededor de un máximo de 11 t/ha*año, pudiendo variar este valor según los tipos de suelos. Conocer la tolerancia que presentan los suelos a las pérdidas

por erosión tiene una gran importancia para saber qué efectos pueden llegar a producir dichas pérdidas.

Toda esta situación tiene una gran repercusión en Jaén, ya que los impactos de la erosión en el cultivo del olivo tienen importantes efectos en la provincia, tanto de manera ambiental como económica.

1.3. Erosión en cárcavas vinculada a infraestructuras viarias

Una de las causas por las que se pueden formar cárcavas es la construcción o modificación de carreteras, siendo este motivo el eje central de este trabajo.

La construcción de infraestructuras viarias está relacionada con la formación de cárcavas (y el crecimiento de algunas ya existentes) debido a la concentración de flujos de escorrentía liberados por el sistema de drenaje de las mismas (Montgomery, 1994). El drenaje superficial es un objetivo prioritario del diseño de cualquier vía, y se consigue a través de sistemas de cunetas perimetrales y obras de drenaje transversal (ODT) (Figura 1).

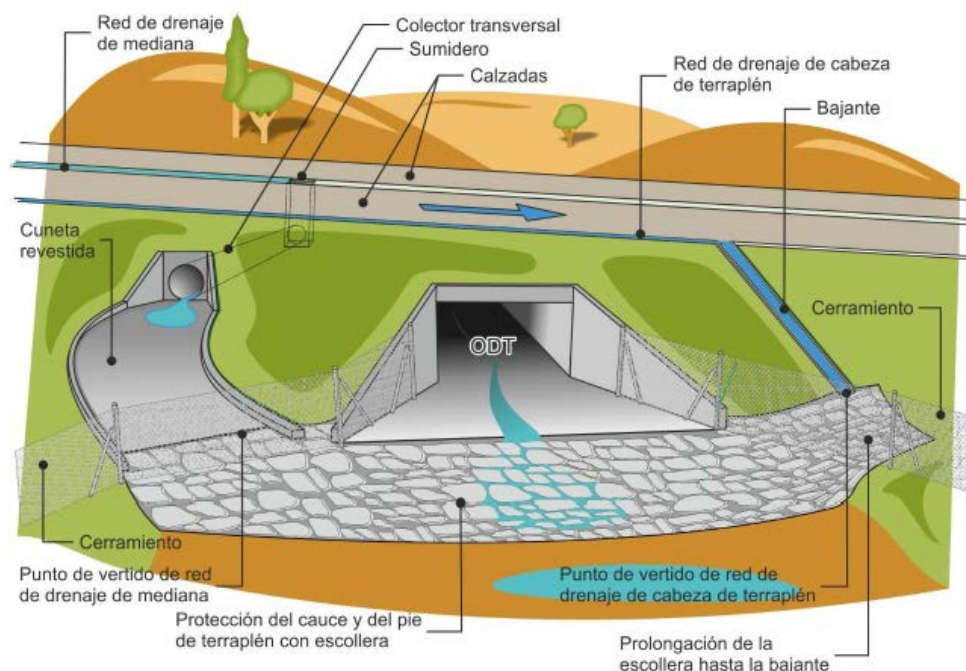


Figura 1: Sistema de drenaje de una carretera. Fuente: Ministerio de Fomento (2016).

Precisamente en base a su eficacia, la concentración de caudales de escorrentía en los puntos de drenaje de las carreteras, sean cunetas (figura 2) u ODTs (figura 3), constituyen focos de máximo riesgo de erosión, debido al elevado caudal y velocidad del flujo de salida, especialmente cuando el desagüe se produce en suelos blandos (Knappen et al., 2008).

Por otra parte, estas estructuras, al interceptar mediante los sistemas de cunetas importantes tramos lineales de las cuencas de drenaje naturales, provocan importantes cambios en la red hidrográfica, lo cual se traduce en una modificación de los tamaños de las cuencas hidrográficas en las que desembocan sus obras de drenaje y, en consecuencia, pueden producir serios problemas de erosión e inundaciones (Nyssen et al., 2002; Katz et al., 2014). Este efecto se ha reafirmado en nuestro entorno de inmediato: Sánchez-González (2019) estimó el aumento de caudal de escorrentía en una ODT de la A-311 a la altura de la población de Fuerte del Rey (Jaén) (figura 3), en más de un 60%, pasando de descargas en la cuenca natural de 0,250 m³/s a más de 700 m³/s, siendo el principal factor responsable de este incremento la expansión de la cuenca natural, de apenas 6 ha, a una cuenca de más de 45 ha generada por el área de drenaje de la carretera. Este fenómeno ha provocado un importante problema de erosión en los olivares colindantes, unas decenas de metros aguas abajo (figura 4).



Figura 2: Drenaje superficial de cuneta perimetral de la carretera JV-3200, Torredelcampo (foto J. Calero, febrero 2017).



Figura 3: ODT de la carretera A-311 a la altura de la desviación con Fuerte del Rey (Jaén)
(foto J. Calero, abril 2016).



Figura 4: Erosión en el olivar adyacente a la ODT de la figura 3. (foto J. Calero, abril 2016).

Además, las cárcavas cuya formación está relacionada con las infraestructuras viarias ocasionan un problema ambiental serio, pero si no se realiza un control de las mismas, también pueden suponer un riesgo para la propia estabilidad de la carretera, que van desde el agrietamiento del pavimento, debido a grietas de retracción ocasionadas por la desestabilización de las cunetas (Abdulfatai et al., 2014), hasta la rotura completa de la

carretera debido a la retracción de la cabecera de la cárcava en el punto de drenaje (Jungerius et al., 2002).

De nuevo, los trabajos de nuestro grupo de investigación (Calero et al. 2019; Saá-Yáñez, 2019; Romero-Coronas, 2019; García-Jiménez, 2020; Fernández et al., 2020), indican que en la provincia de Jaén existe una importante interacción negativa entre los drenajes de las infraestructuras viarias mal diseñadas y la formación de cárcavas en el olivar (figuras 5, 6 y 7).



Figura 5: ODT en el km. 4 de la carretera JV-2312 (finca Rentillas Bajas) a punto de colapsar por la erosión de su embocadura (foto J. Calero, marzo 2018).



Figura 6: Rotura de una ODT debido al socavamiento provocado por la erosión en la embocadura (Lahiguera, Jaén). Fuente: Consejería de Fomento y Vivienda (2014).



Figura 7: Tramo de la carretera JV-2312 colapsado a su paso por la finca Rentillas Bajas a la altura de una antigua ODT de aspecto similar a la de la figura 5 (foto J. Calero, mayo 2017).

Esta coyuntura revela la importancia de tener en cuenta en el diseño de cualquier proyecto de construcción de carreteras una serie de medidas para el control de la erosión derivada de estos trabajos durante y después de dicha construcción (Engineering Policy Guide, 2019).

Para limitar los riesgos, se debe realizar un diseño de las carreteras con el objetivo de que la interceptación, concentración y desviación de la escorrentía sea mínima. Deben emplearse técnicas para esparcir la escorrentía concentrada en el espacio y en el tiempo y para incrementar su infiltración en lugar de dirigirla directamente hacia pendientes desprotegidas (Valentin et al., 2005). Sin embargo, hay ocasiones en las que es inevitable que se produzca erosión debido a la construcción de una carretera, independientemente de que el diseño haya sido muy cuidadoso.

Ffolliott et al. (2013) han definido unos pasos a seguir para reducir los impactos de las carreteras y, más en concreto, de la construcción de carreteras sobre la erosión de la superficie. Entre estos pasos podemos encontrar:

- Evitar áreas susceptibles a la erosión a la hora de buscar ubicación para las carreteras
- Conservar o establecer una cubierta vegetal para proteger los suelos cercanos a las carreteras
- Dimensionar convenientemente las obras de drenaje transversal mediante una separación adecuada y proporcionar su mantenimiento de manera continua para evitar daños en las carreteras

- Evitar pendientes muy pronunciadas, ya que pueden ser más inestables y mantener las carreteras alejadas de los cauces fluviales en la medida de lo posible

El manejo y control de las cárcavas asociadas a infraestructuras viarias es complejo, ya que requiere un estudio muy completo de los picos de descarga asociados a determinados puntos que pueden ser sensibles (Gudino-Elizondo et al., 2018). Es necesario realizar estimaciones cuantitativas de estos caudales, denominados caudales de diseño, para poder llevar a cabo acciones correctoras sobre las cárcavas (Heede, 1975; Romero-Coronas, 2019; García-Jiménez, 2020).

1.4. Actuaciones de prevención y restauración de cárcavas

Debido a la importancia que tienen las cárcavas en la erosión del suelo y las consecuencias que tienen para el medioambiente, es crucial controlar su avance en el tiempo y espacio.

Según Díaz et al. (2012), a la hora de realizar un control de cárcavas, podemos señalar una serie de principios a seguir:

- a) Determinar las causas
- b) Determinar los impactos y efectos más significativos en su entorno
- c) Diseñar y adoptar medidas proporcionales a los impactos o perturbaciones a corregir
- d) Restaurar un balance hidráulico adaptado a las nuevas condiciones
- e) Proteger la zona donde vayan a aplicarse las medidas de recuperación y control
- f) Establecer un seguimiento periódico para estudiar la evolución adecuada del sistema e impedir su regeneración

La presencia de cárcavas refleja la degradación de la cuenca o un manejo hidrológico deficiente de la misma. Para poder realizar actuaciones efectivas con el fin de controlarlas es necesario conocer los orígenes de estas cárcavas. Así, primeramente, es preciso realizar una prevención o evitar que se produzcan estas formaciones, o una vez formadas, evitar su crecimiento, realizando así un control parcial de las mismas, considerándolas partes del paisaje.

En el trabajo de Cueva-Alanguía (2018) se muestra que llevar a cabo acciones para conseguir el control de las cárcavas puede ser un proceso relativamente sencillo cuando se actúa en las primeras etapas de formación de las mismas, ya que sería suficiente con borrarlas mediante el laboreo, evitando de esta manera su crecimiento. Pero, cuando las cárcavas crecen y alcanzan mayores dimensiones, hacen necesaria la realización de obras y prácticas más complejas para su control.

Por todo esto, es importante primero prevenir la formación de cárcavas mediante el empleo de prácticas agrícolas sostenibles, ya que de esta manera se van a reducir los costes y esfuerzos dedicados al control de estas formaciones erosivas y los daños serán menores. Estas técnicas dedicadas a la conservación del suelo se deberán implementar sobre todo en aquellos lugares que presenten una mayor vulnerabilidad debido a sus características climáticas, edáficas, topográficas, etc. Dentro de las prácticas agrícolas sostenibles, podemos hacer hincapié en el tipo de manejo que se emplea en los cultivos, ya que dicho manejo puede impactar de manera positiva o negativa al proceso erosivo. Por ejemplo, mediante el mantenimiento de una agricultura de conservación en lugar de un manejo convencional, se van a llevar a cabo acciones que controlen la escorrentía, las cuales van a producir una reducción de la erosión. De este conjunto de acciones destaca el mantenimiento y cuidado de cubiertas vegetales en los olivares, cuya presencia tiene numerosos beneficios, como la mejora de la estructura del suelo, incremento de la materia orgánica, fijación de carbono atmosférico, mejora de la fertilidad y aumento del contenido de agua (Rodríguez-Lizana et al., 2007; Valentin et al., 2005).

Por otro lado, en aquellos lugares en los que las cárcavas ya se han formado, es necesario realizar un control de las mismas. Por control de cárcavas se entiende el conjunto de actuaciones dirigidas a minimizar los procesos erosivos en las mismas, alcanzando niveles de mayor estabilidad en los canales (Gómez et al., 2019). El proceso de restauración consiste en alterar un lugar que ha sido degradado, dañado o destruido con el fin de reestablecer la estructura, funcionamiento, diversidad y dinámica del ecosistema inicial. (Mongil et al., 2015)

Para Martínez-Menes et al. (2009) Existen varias etapas a la hora de desarrollar trabajos enfocados en el control de las cárcavas, que son:

- Prevención y detención de la erosión remontante, para impedir el crecimiento de la cárcava aguas arriba.
- La reducción, dentro de lo posible, de la erosión de los taludes y del fondo de la cárcava.
- Rehabilitación y estabilización final de la cárcava, con diversas estructuras y estableciendo vegetación nativa adaptada al lugar.

Los trabajos de Stockes et al. (2004), Coppin & Richards (2007) o Gómez et al. (2019) ponen de manifiesto que, para poder conseguir la estabilidad de una cárcava, normalmente es necesario combinar medidas de ingeniería civil tradicional (muros, diques, etc.) y bioingeniería. Las primeras tienen la finalidad de estabilizar inicialmente la cárcava mediante la reducción de la energía del agua (medidas a corto plazo), mejorando las condiciones para así favorecer la implantación de la cubierta vegetal. Por otro lado, las medidas de bioingeniería

provocan la estabilización a largo plazo de la vaguada (Guerra et al., 2015), además, el control de la cárcava provoca su naturalización y aumenta su biodiversidad. De esta manera, las acciones de control obtienen diversos beneficios, como la protección de las zonas productivas, la recuperación de la funcionalidad de drenaje de las vaguadas y la diversificación del paisaje.

Estas técnicas que combinan el material de construcción con material biológico reciben el nombre de bioingeniería (*soft engineering*), siendo una de sus aplicaciones más importantes el control de la erosión y la estabilización de laderas (Norris et al., 2008).

Con todo esto, podemos concluir que el principal objetivo que tiene el control de cárcavas es establecer una vaguada estable con capacidad suficiente de evacuar los caudales que llegan a ella de manera segura (Gómez et al., 2019).

Existen diferentes formas, materiales y estrategias de manejo a seguir para llevar a cabo el control de las cárcavas, pero principalmente se centran en atacar los dos principales procesos mediante los que crecen las cárcavas: erosión remontante y ensanchamiento del cauce. Los métodos y materiales a emplear van a depender de los recursos disponibles y de las características específicas de las cárcavas. Entre los más empleados, destacan el desvío de la escorrentía de la cabecera de la cárcava, la transformación de las pendientes de la cabecera y márgenes, los disipadores de energía, la revegetación de la cuenca y del canal, la instalación de diques, etc. (Gómez-Gutiérrez et al., 2011). Generalmente se elige el tipo de estrategia que consiga la protección necesaria al menor coste.

Todas estas técnicas son complejas a la hora de planificarlas y ponerlas en práctica, puesto que estas estructuras pueden fallar, ya sea por un error en su construcción o mantenimiento o debido a la presencia de flujos que superen los niveles de escorrentía esperados. Esto pone de manifiesto la importancia de realizar un buen cálculo de los caudales de diseño para las cuencas en las que se va a realizar un control de la erosión, reduciendo de esta manera la probabilidad de que surjan errores.

1.5. Tipos de disipadores de energía

Una de las actuaciones más adecuadas para prevenir la erosión relacionada con las infraestructuras viarias son los disipadores de energía. Este tipo de erosión es causada por las salidas de flujos de agua de las obras de drenaje transversal (ODT) de dichas infraestructuras. Las ODT son elementos necesarios en la construcción de cualquier carretera, debido a que reestablecen la continuidad de la red de drenaje natural del terreno una vez se ha llevado a cabo la construcción de dicha carretera, permitiendo el paso de los flujos de agua a través de las mismas (Ministerio de Fomento, 2015).

Un dissipador de energía es una estructura hidráulica diseñada para reducir la energía (velocidad) de un flujo de agua, convirtiendo un flujo de régimen supercrítico en uno de régimen subcrítico. Este tipo de medida es muy adecuada a la hora de prevenir problemas de erosión o socavación en las salidas de las ODT de las carreteras, debido a que presenta una fácil instalación y bajo coste en relación con otras actuaciones de control de cárcavas (Villamarín, 2013; Carey et al., 2015). Lamentablemente, a nivel de la normativa vigente respecto al drenaje de infraestructuras viarias (la mencionada Norma 5.2 IC de 2016), no se recoge la obligación de instalar este tipo de dispositivos, a pesar de las claras evidencias del enorme impacto que, no ya a nivel ambiental, si no a nivel funcional y económico, suponen los procesos erosivos asociados. Así, en un informe sobre patologías estructurales de ODTs realizado por la Conserjería de Fomento y Vivienda (2014), se comunica que más del 50% de las carreteras de la red autonómica analizadas están afectadas por este problema (como dato anecdótico, la Norma sobre drenaje de carreteras de 1990, derogada por la de 2016, si recogía la obligación de introducir dissipadores de energía, MOPU, 1990, página 66).

Antes de comenzar a hablar sobre los diferentes tipos de dissipadores que pueden establecerse, es necesario distinguir entre tres diferentes tipos de flujos (Ffolliott et al., 2013) según el número de Froude (Fr) que presenten (parámetro adimensional relacionado directamente con la velocidad del flujo, nos informa sobre la fuerza erosiva del agua sobre el canal):

- Cuando Fr es mayor que 1 ($Fr > 1$), el flujo se denomina supercrítico
- Cuando Fr es igual a 1 ($Fr = 1$), el flujo se denomina crítico
- Cuando Fr es menor que 1 ($Fr < 1$), el flujo se denomina subcrítico

Los flujos subcríticos son flujos tranquilos, lentos, con bajo poder erosivo, mientras que los flujos supercríticos tienen una gran energía, provocando un aumento de su poder erosivo y, de esta manera, mayores daños en los canales por los que fluye.

Según Thompson y Kilgore (2006), existen diferentes tipos de dissipadores:

- **Dissipadores de salto hidráulico (*chutes*)**

Este tipo de dissipadores (*chutes* en inglés, toboganes en español) se instalan en la salida de la ODT o cuneta y consisten en un desnivel seguido de un cuenco de inundación en el que se genera un salto hidráulico. El salto hidráulico es un fenómeno natural que ocurre cuando el flujo supercrítico se ve forzado a convertirse en flujo subcrítico. Esta repentina modificación va acompañada de una considerable turbulencia y pérdida de energía (figura 8).

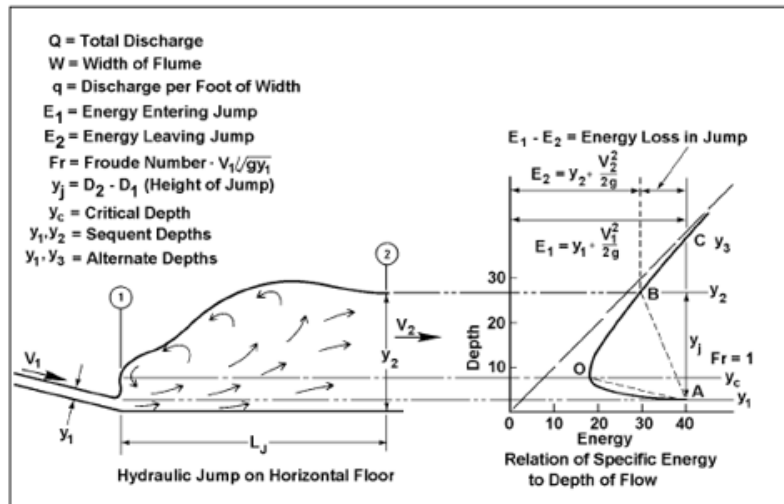


Figura 8: Salto hidráulico. Fuente: Thompson y Kilgore (2006).

- **Disipadores internos**

En aquellas situaciones en las que el espacio a la salida de la ODT es reducido para la instalación de un disipador de energía, los disipadores internos pueden ser una alternativa muy factible. Estos disipadores consisten en la incorporación de elementos internos que aumenten la rugosidad, pudiendo encontrarse a lo largo de toda la ODT, o, como es más común, solo en la parte que se encuentra justo antes de la salida.

Dentro de los disipadores internos, podemos poner de relieve la plataforma con deflectores USBR tipo IX. Como aparece en la figura 9, estas plataformas están diseñadas con unos componentes que aumentan la rugosidad del fondo de la ODT. Estos elementos que incrementan la rugosidad se denominan deflectores o bloques, y provocan una alteración en el flujo de agua, ralentizándolo a medida que se acerca a cada deflector. Con el uso de los deflectores se evita que el flujo de agua alcance una gran velocidad a la hora de salir de la ODT.

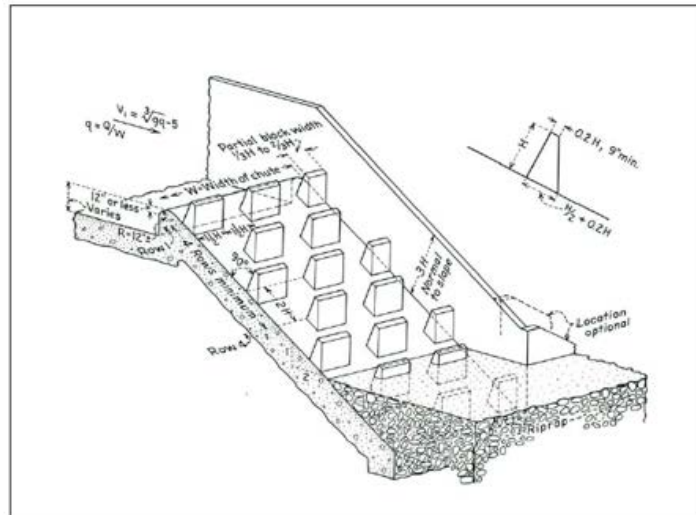


Figura 9: Plataforma con deflectores USBR tipo IX. Fuente: Thompson y Kilgore (2006).

- **Cuencos amortiguadores**

Los cuencos amortiguadores son disipadores de energía externos que se colocan en la salida de la ODT como una evolución de los disipadores de salto hidráulico. Sus cuencos de disipación se caracterizan por la combinación de varios elementos, como los bloques, bloques deflectores y un pretil final diseñados para crear un salto. Dependiendo de las características que se implemente en el diseño, hay varios tipos de cuencos amortiguadores, dentro de los cuales podemos destacar:

- Cuenco amortiguador USBR tipo III. Este cuenco utiliza bloques, bloques deflectores y un pretil final, como se muestra en la figura 10. Este disipador está recomendado para descargas máximas de $18.6 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ y número de Froude comprendido entre 4.5 y 17.

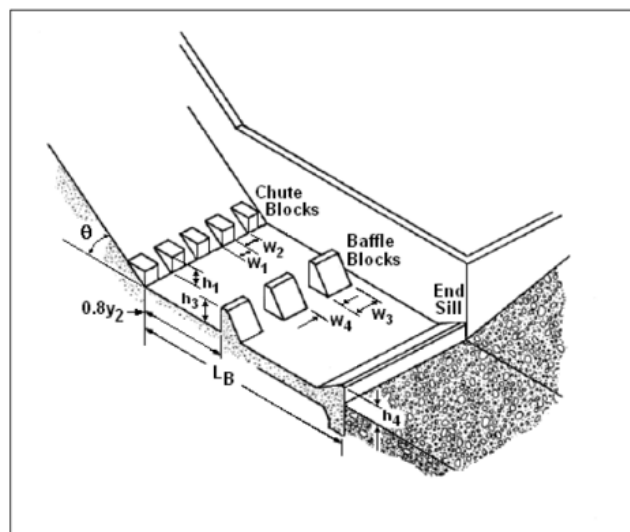


Figura 10: Cuenco amortiguador USBR tipo III. Fuente: Thompson y Kilgore (2006).

- Cuenco amortiguador USBR tipo IV. Este cuenco está diseñado para utilizarse cuando el número de Froude está comprendido entre 2.5 y 4.5. En este rango de números de Froude, se genera una onda que es difícil de atenuar y este cuenco se emplea para eliminarla. El cuenco, como se muestra en la figura 11, utiliza bloques y un pretil.

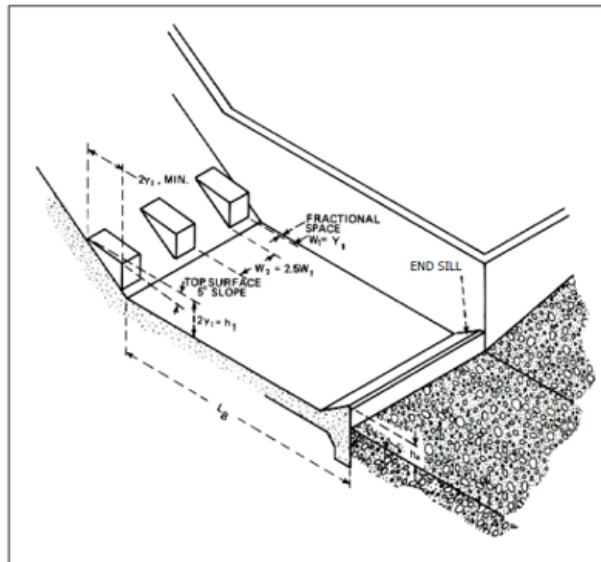


Figura 11: Cuenco amortiguador USBR tipo IV. Fuente: Thompson y Kilgore (2006).

- **Cuencas y plataformas riprap**

El uso de disipadores tipo riprap es bastante común para prevenir la erosión provocada por las obras de drenaje transversal en carreteras, siendo probablemente la alternativa más barata y la única realmente factible para carreteras de escasas dimensiones (locales, municipales). A grandes rasgos, estos disipadores consisten en lechos de grava, anclados o no al sustrato, que generan turbulencia y pérdidas de energía de los flujos por rozamiento con los bloques de grava, así como disminución de los caudales por infiltración en el sustrato. Las plataformas y cuencas riprap se pueden emplear tanto a salida de la ODT como a la salida de otro disipador ya establecido, para proteger contra la erosión aguas abajo. En la figura 12 podemos apreciar un diseño recomendado para una cuenca de riprap.

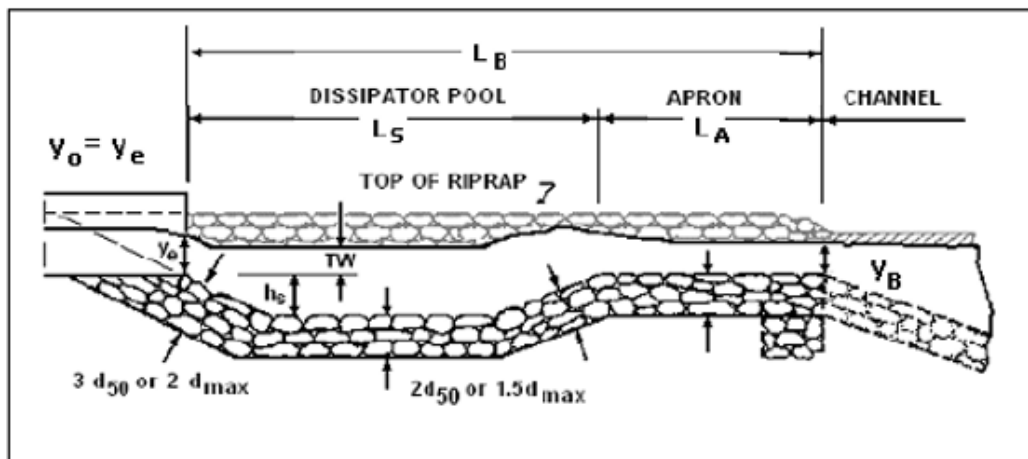


Figura 12: Perfil de una cuenca riprap. Fuente: Thompson y Kilgore (2006).

- **Bajante escalonada**

Es muy común el uso de las estructuras de caída vertical para el control del flujo y la disipación de energía. Las estructuras de caída producen modificaciones en la pendiente del canal, pasando de pendientes empinadas a suaves (figura 13). Estas construcciones consiguen que las velocidades altas y con gran potencial erosivo no lleguen a formarse. La energía cinética o velocidad ganada por el flujo de agua al caer se disipa mediante plataformas específicas o mediante cuencas amortiguadoras. Todo esto se consigue mediante la combinación sucesiva de estas estructuras, formando una bajante escalonada. Para que las caídas verticales sean eficaces, es necesario que el flujo de agua quede sumergido en las cuencas.

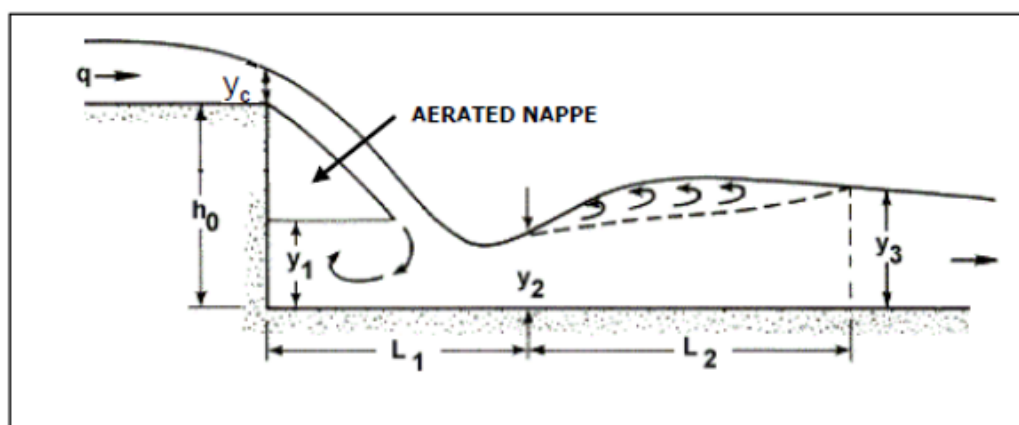


Figura 13: Cuenco amortiguador de caída vertical o bajante escalonada. Fuente: Thompson y Kilgore (2006).

2. OBJETIVOS

El objetivo general de este trabajo es establecer medidas de actuación adecuadas para prevenir y controlar la erosión en cárcavas provocada por los drenajes de infraestructuras viarias en cuencas de olivar. Con este fin, se va a realizar el estudio de dos zonas de la provincia de Jaén, siendo en una de ellas ya visibles los efectos de erosión, mientras que en la otra aún no se han formado cárcavas, pero es necesario hacer una actuación de prevención para impedir que se formen en el futuro. Para conseguir esto, los objetivos específicos del trabajo son:

- Determinación de las características de las cuencas en las que se producen los desagües de las carreteras mediante el uso de sistemas de información geográfica (SIG), incluyendo el estudio de la modificación del relieve y la hidrografía debido a la infraestructura.
- Cálculo de los caudales de diseño mediante el método del Número de Curva en las cuencas actuales.
- Estudio de medidas de prevención y control de cárcavas, que consistirán en: i) medidas preventivas a nivel de cuenca, teniendo en cuenta la instalación de cubiertas vegetales con el objetivo de disminuir la escorrentía, y ii) medidas estructurales, diseño de disipadores de energía tipo riprap y bajante escalonada para evitar o reducir la formación de cárcavas.

3. MATERIAL Y MÉTODOS

3.1. Zonas de estudio

El presente trabajo se centra en dos zonas en las que se produce el drenaje de dos carreteras mediante obras tipo cuneta perimetral y ODT. Ambas zonas están ubicadas dentro de la provincia de Jaén, una de ellas se encuentra dentro del término municipal de Bedmar y Garcéz (a partir de ahora zona de estudio 1) y la otra pertenece al municipio de Linares (a partir de ahora zona de estudio 2).

a) Zona de estudio 1

La zona de estudio 1 está ubicada a las afueras del pueblo de Bedmar y corresponde con el área donde desembocan las dos primeras nuevas obras de drenaje transversal del proyecto de Ensanche y Mejora de la JV-3222 Bedmar a Santuario de Cuadros (figuras 14 y 15).



Figura 14: Zona de estudio 1, con las ODT objeto de estudio señaladas. Fuente: Centro de Descargas del CNIG.



Figura 15: Obras de drenaje transversal en la zona de estudio 1, en el tramo de la carretera aún no inaugurado (foto J. Calero, octubre 2020).

En esta localización no se ha producido todavía el desarrollo de cárcavas en las salidas de agua de la carretera, debido a que la carretera proyectada es de nuevo trazado, pero es importante realizar una actuación para prevenir que eso suceda en el futuro. El estudio hidráulico del proyecto de Ensanche y Mejora (inédito) se realizó, de forma muy conservadora, teniendo en cuenta periodos de retorno de 500 años, lo que arrojaba caudales de diseño sobredimensionados ($15 \text{ m}^3/\text{s}$), razón por la cual es muy probable que los diámetros de tubo de las ODT de la zona 1 sean superiores a los necesarios (esto, sin embargo, añade un margen de seguridad que se estima conveniente en zonas de elevados gradientes de pendiente, como es el caso de esta zona de estudio).

b) Zona de estudio 2

La zona de estudio 2 está localizada junto al núcleo de población de Miraelrío, en el Cortijo del Arroyo, donde ya se ha desarrollado una cárcava por el desagüe de cunetas y obras de drenaje transversal de las modificaciones de la J-9007 (figuras 17 y 18). Esta carretera, que une las localidades de Estación Linares-Baeza y Miraelrío, se ha visto afectada en el pasado por múltiples problemas de inundaciones (figura 16), lo que llevó a la Diputación Provincial de Jaén a plantear un proyecto de acondicionamiento que incluía, entre otras actuaciones, el ensanche de los carriles y la mejora de los sistemas de drenaje, incluyendo la construcción de nuevas cunetas perimetrales.



Figura 16: Inundaciones de la J-9007, diciembre 2019. Fuente: [\(https://lacontradejaen.com/temporal-lluvia-viento-jaen/\)](https://lacontradejaen.com/temporal-lluvia-viento-jaen/)

En esta zona se va a hacer una comparación entre los caudales de diseño que había antes de hacer las citadas modificaciones y los que existen actualmente, siguiendo una metodología similar a la empleada por Sánchez-González (2019), que consistirá en la modificación del MDT de 2014 (anterior a la actuación) para incorporar la nueva cuneta construida, y valorar así la alteración de la cuenca hidrográfica que la expansión de los sistemas de drenaje provoca a nivel de los picos de descarga. En este trabajo la modificación del MDT se llevará a cabo con la herramienta Arc Hydro de ARCGIS, en lugar de a través de la herramienta GRASS de QGIS, como utilizó Sánchez-González (2019).

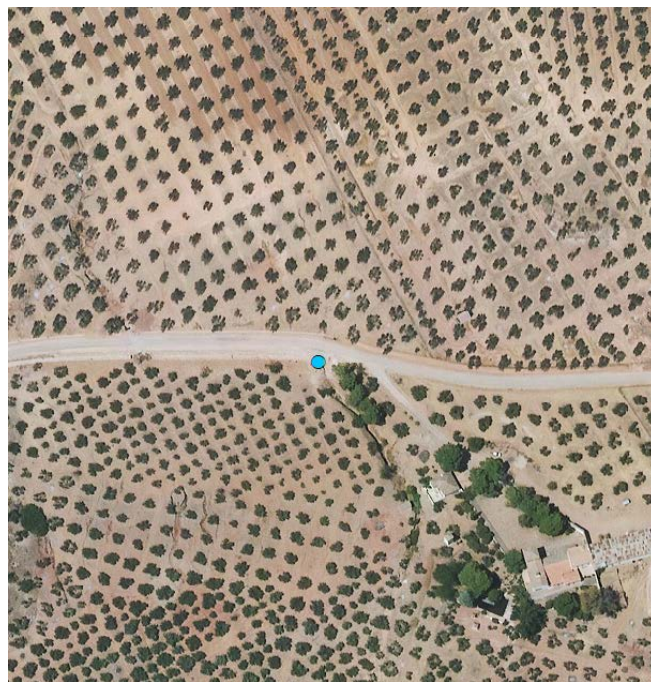


Figura 17: Zona de estudio 2, con la ODT señalada. Fuente: Centro de Descargas del CNIG.



Figura 18: Zona de estudio 2. a) Nuevo tramo de cuneta construido en el margen izquierdo de la carretera; b) Desagüe de la cuneta sobre el olivar adyacente; c) cárcava generada por el drenaje de la cuneta.

3.2. Factores ambientales

3.2.1. Clima

El clima que presenta la provincia de Jaén es de tipo mediterráneo, presentando periodos de sequía combinados con precipitaciones de gran intensidad en periodos cortos de tiempo.

Según la información disponible en la Red de Información Ambiental de Andalucía (REDIAM) sobre el periodo de referencia 1971-2000, la temperatura media anual de ese periodo se posicionó en el intervalo de 18-19 °C. Por otro lado, la precipitación media anual se encuentra entre los 450-500 mm para el periodo de tiempo dado.

3.2.2. Geología

Conforme a lo establecido en la REDIAM, en la zona de estudio 1 predominan materiales del Cretácico (margas y calizas), mientras que en la zona de estudio 2, los materiales presentes son del Cuaternario (arenas, arcillas, calcarenitas).

3.2.3. Edafología y Usos del Suelo

Nuevamente, obteniendo la información a partir de la REDIAM, podemos diferenciar los tipos de suelos predominantes en cada una de las zonas de estudio: cambisoles vérticos y cálcicos y regosoles calcáreos (zona de estudio 1); fluvisoles calcáreos, luvisoles cálcicos y cambisoles cálcicos (zona de estudio 2).

En ambas zonas, el uso del suelo que se hace es exclusivamente de olivar, sin presentar dichas áreas cubierta herbácea. En este estudio se va a llevar a cabo una simulación con cubierta herbácea, para así comparar los resultados obtenidos sin cubierta y con cubierta.

3.3. Determinación de las características de las cuencas hidrográficas

Para poder realizar correctamente el diseño de las medidas de prevención y control de cárcavas, es imprescindible hacer una delimitación de las microcuencas de las zonas de estudio. Este proceso se ha llevado a cabo mediante la ejecución del software ArcMap de ArcGis 10.5, empleando material cartográfico del Instituto Geográfico Nacional de España (IGN). Esta información geográfica se consigue del Centro de Descargas del CNIG. Para realizar las siguientes operaciones, es necesario saber cuáles son las cartas que confluyen con las zonas de estudio y descargarlas. En este estudio, las hojas requeridas son la 948 (para la zona 1) y la 905 (para la zona 2). Los archivos empleados son:

- Ortofo PNOA Máxima Actualidad a escala 1:50000 en formato ECW. Hojas 948 y 905.
- Mapa Topográfico Nacional a escala 1:25000 (MTN25) en formato ECW. Hojas 948-1 y 905-2.
- Modelo Digital de Elevación del Terreno 1:50000 (MDT05, tamaño de pixel 5 m) en formato ASCII. Hojas 948 (zona de estudio 1).
- Modelo Digital de Elevación del Terreno LiDAR, primera cobertura (junio 2014), de tamaño de pixel 1 m. Hoja 905 (zona de estudio 2)

Para llevar a cabo las estimaciones sobre las cuencas hidrográficas es necesario descargar la extensión Arc Hydro Tools dentro del software ArcMap. Lo primero que se va a hacer para comenzar el proceso es cargar las capas anteriormente mencionadas. Tanto la ortofoto como el mapa topográfico nos sirven para situarnos y localizar nuestras zonas de estudio. Es a partir de los MDT (MDT05 en la zona 1 y LiDAR en la zona 2) desde los que se

va a realizar la caracterización de las microcuencas, mediante una serie de comandos del software. Los pasos a seguir para realizar las estimaciones son los siguientes (ESRI, 2011):

1. Fill Sinks. Corrección de sumideros y posibles errores que tenga el MDT.
2. Flow Direction. Sobre la capa ráster corregida se realiza el cálculo de la dirección del flujo de agua.
3. Flow Accumulation. A partir de la capa anterior se obtiene otro ráster de acumulación de flujo, logrando la red de drenaje.
4. Stream Definition. Con base en la capa de flujos acumulados, se determinan los cauces de la zona de estudio. Este cálculo se realiza a partir de la definición de una serie de umbrales que indican la cantidad de agua que se concentra en dichos cauces.
5. Stream Segmentation. Este paso genera una capa muy parecida a la anterior, pero distingue entre las diferentes intersecciones que hay en la red de drenaje.
6. Drainage Line Processing. Mediante el uso de este comando se consigue la conversión de la capa anterior de ráster a vectorial (formato shapefile), ya que así las capas son más fáciles de trabajar.
7. Catchment Grid Delineation. A partir de la capa que presenta los cauces segmentados (paso 5) y la capa que presenta la dirección de los flujos de agua (paso 2) se obtiene una capa ráster en la que se agrupan todas las cuencas presentes en las zonas de estudio.
8. Catchment Polygon Processing. Con este paso se consigue la conversión de la capa ráster de cuencas a vectorial.
9. Batch Point Generation. En este paso se va a definir el punto de salida de la cuenca.
10. Batch (Sub)Watershed Delineation. A partir de las capas obtenidas en los pasos 2, 5, 8 y 9 se obtiene mediante este comando la cuenca de drenaje de nuestra zona de estudio.
11. Longest Flow Path. Por medio de la capa de la cuenca de drenaje, junto con la capa de la dirección del flujo se obtiene esta capa, que representa la longitud hidrológicamente más alejada.
12. LFP interpolado. Este paso consiste en interpolar la última capa obtenida con los datos de los MDT.

Todos estos pasos a seguir se llevan a cabo en las dos zonas de estudio, pero en el caso de la zona de estudio 2 es necesario hacer una actuación más. Puesto que se quiere hacer una comparación entre los picos de descarga obtenidos por la carretera antigua y los obtenidos una vez que se ha realizado la modificación de la misma, los cálculos deben hacerse para ambas situaciones. El MDT de la zona disponible en el Centro de Descargas del CNIG tiene las características de la carretera antigua, por lo que hay que hacer una modificación del modelo para poder realizar la estimación de los caudales de la carretera nueva. Para ejecutar dicho cambio, hay que realizar los siguientes pasos en ArcMap (ESRI, 2011):

- i. Editor, Start Editing. Edición de la capa vectorial de líneas de drenaje, de manera que se indique el nuevo tramo de cuneta construido (figura 18a) a través de la introducción de una polilínea.
- ii. Conversion Tool, To Raster. La capa vectorial modificada obtenida en el paso anterior hay que convertirla en formato ráster para que sea compatible con el siguiente paso a aplicar.
- iii. DEM Reconditioning from Stream Grid. Mediante este comando se graba la nueva línea de drenaje sobre el MDT, obteniendo como resultado el MDT modificado de acuerdo a las nuevas características hidrológicas. Con esta nueva capa se vuelve a proceder como en los pasos descritos con anterioridad para determinar sus características morfológicas.

3.4. Cálculo de los caudales de diseño

3.4.1. Número de curva

Para poder hacer una selección lo más apropiada posible sobre qué medidas de prevención y control de cárcavas son más adecuadas para nuestras zonas de estudio, es necesario saber cuáles son los máximos caudales que van a tener que evacuar.

El método del Número de Curva (NC) fue desarrollado por el Servicio de Conservación de Recursos Naturales de EE.UU. (Natural Resources Conservation Service, NRCS) y es un modelo que permite estimar el caudal máximo o de diseño en el punto de salida de la cuenca. El número de curva es un parámetro hidrológico que permite caracterizar el potencial de la esorrentía en una cuenca hidrográfica y los principales factores que lo determinan son el grupo hidrológico del suelo, el tipo de cobertura y la condición hidrológica (USDA, 1986). Su valor se encuentra entre 0 y 100 y se ha empleado en numerosas ocasiones en olivares, permitiendo una eficaz prevención y control de la erosión en estos cultivos debido a su

capacidad de simular los caudales de escorrentía en función del sistema de manejo y el empleo de cubiertas (Romero et al., 2007).

Para las dos zonas de estudio, tanto el tipo de cobertura como la condición hidrológica van a ser las mismas, ya que en ambas se trata de cultivos de olivar sin cubierta. Además, se va a realizar una simulación con cubierta para las dos áreas, para poder comparar los resultados que tendría este tipo de manejo en el suelo.

A la hora de determinar el grupo hidrológico de los suelos de los dos territorios, se ha realizado una estimación diferente para cada uno de ellos. En la zona de estudio 1 se ha determinado el grupo hidrológico del suelo mediante el empleo del mapa de suelos de infiltración (Ks) de Europa (1:1000000). Mientras que en la zona de estudio 2, se ha obtenido a partir del mapa de texturas de Europa (1:1000000). Los diferentes grupos hidrológicos que presentan los suelos son:

En (USDA, 1986) se muestran los diferentes grupos hidrológicos que pueden presentar los suelos:

- Grupo A: suelos con bajo potencial de escorrentía y altas tasas de infiltración, incluso cuando están completamente húmedos. Consisten principalmente en arena o grava profunda y presentan una alta tasa de transmisión de agua (mayor de 0.30 in/h). Textura del suelo: arena, arena franca o franco arenosa.
- Grupo B: suelos con tasas de infiltración moderadas cuando están completamente húmedos y son principalmente suelos de moderadamente profundos a profundos, con texturas moderadamente finas a moderadamente gruesas. Estos suelos tienen una tasa moderada de transmisión de agua (0,15-0,30 in/h). Textura del suelo: franco limosa o franca.
- Grupo C: suelos con bajas tasas de infiltración cuando están completamente húmedos y son principalmente suelos con una capa que impide el movimiento descendente del agua y presentan texturas moderadamente finas. Estos suelos tienen una baja tasa de transmisión de agua (0.05-0.15 in/h). Textura del suelo: Franco arcilloso arenosa.
- Grupo D: suelos con un alto potencial de escorrentía. Tienen tasas de infiltración muy bajas cuando están completamente húmedos y son principalmente suelos arcillosos con un alto potencial de expansión. Estos suelos tienen una tasa de transmisión de agua muy baja (0-0,05 in/h). Textura del suelo: franco arcillosa, franco arcillo limosa, arcillo arenosa, arcillo limosa o arcilla.

Mediante la tabla 1 podemos estimar el número de curva de cada una de las cuencas de estudio, ya que en ella se relacionan todos los factores que afectan al desarrollo de este método.

Tabla 1: Números de curva para zonas agrícolas. Fuente: (USDA, 1986).

Cover description		Curve numbers for hydrologic soil group			
Cover type	Hydrologic condition	A	B	C	D
Pasture, grassland, or range—continuous forage for grazing. ^{2/}	Poor	68	79	86	89
	Fair	49	69	79	84
	Good	39	61	74	80
Meadow—continuous grass, protected from grazing and generally mowed for hay.	—	30	58	71	78
Brush—brush-weed-grass mixture with brush the major element. ^{2/}	Poor	48	67	77	83
	Fair	35	56	70	77
	Good	30 ^{4/}	48	65	73
Woods—grass combination (orchard or tree farm). ^{2/}	Poor	57	73	82	86
	Fair	43	65	76	82
	Good	32	58	72	79
Woods. ^{2/}	Poor	45	66	77	83
	Fair	36	60	73	79
	Good	30 ^{4/}	55	70	77
Farmsteads—buildings, lanes, driveways, and surrounding lots.	—	59	74	82	86

Poor: <50%) ground cover or heavily grazed with no mulch.

Fair: 50 to 75% ground cover and not heavily grazed.

Good: > 75% ground cover and lightly or only occasionally grazed.

3.4.2. Escorrentía

La ecuación del método del Número de Curva mediante la que se puede determinar el caudal de escorrentía de una cuenca, es la siguiente (USDA, 1986):

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S}$$

Donde:

Q = Escorrentía (mm)

P = Precipitación (mm). Se toman valores máximos en 24 horas, con periodos de retorno de 10, 25 o 50 años. En nuestro caso, serán periodos de retorno de 10 años.

I_a = Pérdida inicial (mm)

S = Retención máxima (mm)

La pérdida inicial (I_a) abarca todas las pérdidas antes de que comience la escorrentía. Incluye el agua retenida en depresiones superficiales, el agua interceptada por la vegetación, evaporación e infiltración. Es por todo esto que I_a es muy variable. A través de diversos estudios de muchas cuencas agrícolas pequeñas, se concluyó que I_a se aproxima mediante la siguiente ecuación empírica:

$$I_a = 0.2S$$

Al eliminar I_a como parámetro independiente, la escorrentía se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{(P + 0.8S)}$$

S es una variable que está relacionada con las condiciones del suelo y la cobertura de la cuenca a través del número de curva (CN). Mediante la siguiente fórmula se expresa dicha relación:

$$S = \frac{(25000)}{CN} - 254$$

3.4.3. Tiempo de viaje y tiempo de concentración

Después de haber estimado la escorrentía, se requiere calcular los tiempos de viaje y los tiempos de concentración para poder realizar finalmente el cálculo del caudal de diseño.

El tiempo de viaje (T_t) es el tiempo que tarda el agua en viajar de un lugar a otro en una cuenca. T_t es un componente del tiempo de concentración (T_c), que es el tiempo que tarda la escorrentía en viajar desde el punto hidrológicamente más lejano de la cuenca hasta un punto de interés dentro de la misma. T_c se estima mediante la suma de todos los tiempos de viaje.

A través de una cuenca hidrográfica el agua puede moverse como flujo laminar (*sheet flow*) o flujo superficial concentrado (*shallow concentrated flow*). Según el tipo de flujo que sea, la escorrentía va a fluir a una velocidad diferente, dependiendo fundamentalmente de la pendiente, la rugosidad de la superficie y la forma del canal.

En (USDA, 1986) se muestra que a partir de una distancia máxima de 300 pies (aproximadamente unos 100 metros) se produce el cambio de la escorrentía de flujo laminar a flujo concentrado. Esto se traduce en que la escorrentía va a fluir por los primeros 100 metros del trazado de la longitud hidrológicamente más alejada (LFP) mediante un flujo de

tipo laminar. El tiempo de viaje para este tipo de flujos se puede calcular mediante la ecuación cinemática de Manning simplificada:

$$T_t = \frac{0.007 (nL)^{0.8}}{(P_2)^{0.5} S^{0.4}}$$

Donde:

T_t = Tiempo de viaje (h)

n = Coeficiente de rugosidad de Manning

L = Longitud del flujo (100 metros)

P_2 = 2 años, 24 horas de lluvia (mm)

S = Pendiente del terreno (m/m)

El coeficiente de rugosidad de Manning es un coeficiente que se puede estimar para diferentes tipos de cubiertas mediante la tabla 2:

Tabla 2: Coeficiente de rugosidad de Manning. Fuente: (USDA, 1986).

Surface description	n ^{1/}
Smooth surfaces (concrete, asphalt, gravel, or bare soil)	0.011
Fallow (no residue)	0.05
Cultivated soils:	
Residue cover $\leq 20\%$	0.06
Residue cover $> 20\%$	0.17
Grass:	
Short grass prairie	0.15
Dense grasses ^{2/}	0.24
Bermudagrass	0.41
Range (natural)	0.13
Woods: ^{3/}	
Light underbrush	0.40
Dense underbrush	0.80

En este trabajo, las dos zonas de estudio presentan los primeros 100 metros a la salida de las ODT de las carreteras en terrenos con olivares que presentan un manejo en el que la cubierta herbácea no existe. Con esta información se puede establecer un coeficiente de

Manning de 0.06 (residue cover $\leq 20\%$). Para la simulación con cubierta que se lleva a cabo en ambas zonas, el coeficiente de Manning es de 0.17 (residue cover $>20\%$)

La pendiente del terreno se determina a partir del gráfico de perfil obtenido del LFP (Longest Flow Path).

$$s = \frac{\text{desnivel}}{L} 100$$

Una vez que ya se han recorrido los primeros 100 metros, el flujo de agua entra en la zona de flujo superficial concentrado y la ecuación aplicada a este tipo de flujo es:

$$T_t = \frac{L}{3600 V}$$

Donde:

T_t = Tiempo de viaje (h)

L = Longitud del flujo (m). Esta es la longitud resultante de la resta entre la longitud del LFP y la longitud de la zona de flujo laminar (100 metros).

V = velocidad media (m/s), estimada mediante la figura 19.

3600 = factor de conversión de segundos a horas

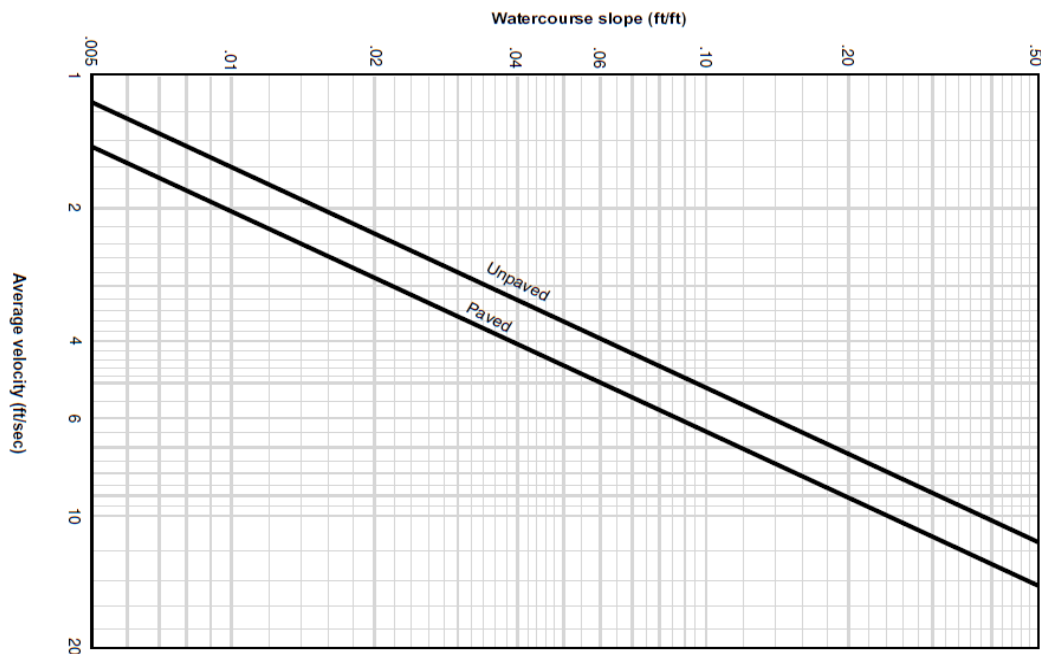


Figura 19: Velocidad media según la pendiente de la longitud del flujo. Fuente: (USDA, 1986).

Una vez que los tiempos de viaje han sido calculados, el tiempo de concentración (T_c) se puede estimar mediante la suma de los valores de todos los tiempos de viaje:

$$T_c = T_{t1} + T_{t2} + \dots + T_{tm}$$

Donde:

T_c = Tiempo de concentración (h)

m = número de segmentos de flujo

3.4.4. Caudal de diseño

Finalmente, se va a determinar el máximo caudal de descarga de las cuencas. El pico de descarga se puede calcular mediante la siguiente ecuación (USDA, 1986):

$$q_p = q_u A_m Q F_p$$

Donde:

q_p = Pico de descarga (cfs)

q_u = Pico de descarga unitario (csm/in)

A_m = Área de drenaje (mi²)

Q = Escorrentía (in)

F_p = Factor de agua embalsada (no procede)

Para poder calcular el pico de descarga, es necesario estimar el pico de descarga unitario (q_u). A partir del cálculo I_a/P (coeficiente de pérdida) y el T_c , se puede obtener el q_u , por medio de la figura 20.

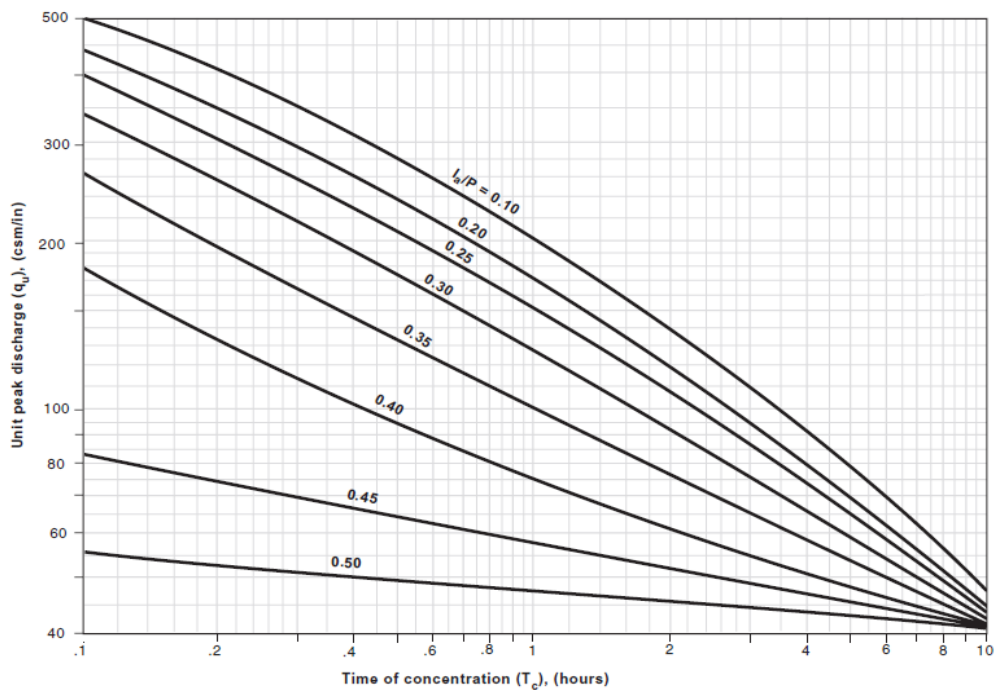


Figura 20: Pico de descarga unitario (q_u). Fuente: (USDA, 1986).

3.5. Diseño de medidas de prevención y control de cárcavas

En aquellos lugares en los que exista un problema de formación y desarrollo de cárcavas o en aquellos en los que la probabilidad de que se creen dichas formaciones es alta, es necesario llevar a cabo acciones con el objetivo de minimizar todo lo posible los daños ocasionados.

Se van a plantear dos tipos de medidas: preventivas y estructurales. Las medidas preventivas son aquellas que se instauran a nivel de cuenca hidrográfica con el objetivo de reducir las escorrentías generadas y, por tanto, el agua afluente al sistema de drenaje de la carretera. Con ello se pretenden reducir los picos de descarga y, por tanto, el impacto potencial de la erosión. La medida preventiva primaria que se simulará será el establecimiento de una cubierta vegetal en las cuencas vertientes, que en ambos casos están compuestas 100% de olivar tradicional sin cubierta.

Por otro lado, las medidas estructurales consisten en la instalación de estructuras, como los disipadores de energía, que reduzcan o anulen el poder de corte del flujo de agua saliente y eviten la formación o incremento de las cárcavas. Obviamente, ambas medidas coadyuvan positivamente, puesto que el dimensionamiento de las estructuras disipativas será más fácil si se reducen los caudales de diseño de las mismas.

En este trabajo, las medidas estructurales seleccionadas para las dos zonas son disipadores de energía, debido a los beneficios que presentan al reducir la energía de la escorrentía a la salida de las ODT, como ya han sido mencionados con anterioridad. Para conseguir dichos beneficios, se van a establecer las siguientes estructuras:

- Zona de estudio 1. Disipador de energía tipo riprap.
- Zona de estudio 2. Bajante escalonada.

3.5.1. Riprap

Los disipadores tipo riprap, también conocidos como revestimiento de roca (*rock lining*), forman cubiertas de rocas con el objetivo de reducir la erosión que pueda producir el flujo de agua en el lecho (figura 21).



Figura 21: Ejemplo de un disipador tipo riprap en campo. Fuente: <https://i.pinimg.com/originals/c4/e3/36/c4e33655596219e013b56a0b4f35048e.jpg>

Los elementos clave en el diseño de un riprap son (DEC, 2005; Michigan Government, 1997):

- **Longitud:** la longitud adecuada del canal en el que se debe colocar el riprap debe ser al menos toda la zona potencialmente erosionable, hasta que el flujo saliente de la ODT pierde la suficiente velocidad como para reducir su Froude por debajo de la unidad (flujo subcrítico). Su estimación se puede llevar a cabo a partir de la siguiente fórmula:

$$L_a = \frac{1.7 Q}{D_0^{3/2}} + 8D_0$$

Donde:

L_a = longitud mínima del riprap (ft)

Q = Caudal de diseño (cfs).

D_0 = Anchura máxima (ft) en la salida del drenaje o entrada en el dissipador, que puede coincidir con la salida de las aletas de hormigón de la ODT o con el diámetro del tubo, en el caso de no llevar aletas. En nuestro caso, tal como se puede observar en la figura 15, la embocadura del dissipador puede hacerse coincidir justo con la salida del tubo, luego D_0 coincidiría con su diámetro, en lugar de con $3 D_0$ (la anchura de la aleta en su parte exterior puede ser 3 veces el diámetro del tubo).

El valor de L_a puede obtenerse de los nomogramas de las figuras 23 y 24, que implementan la fórmula anterior, modificándola en función de las condiciones de calado (*tailwater*) de la ODT (figura 22), considerándose dos condiciones: i) el calado máximo previsto es inferior a $\frac{1}{2}$ de diámetro del tubo, o ii) el calado es superior a $\frac{1}{2}$ del diámetro del tubo.

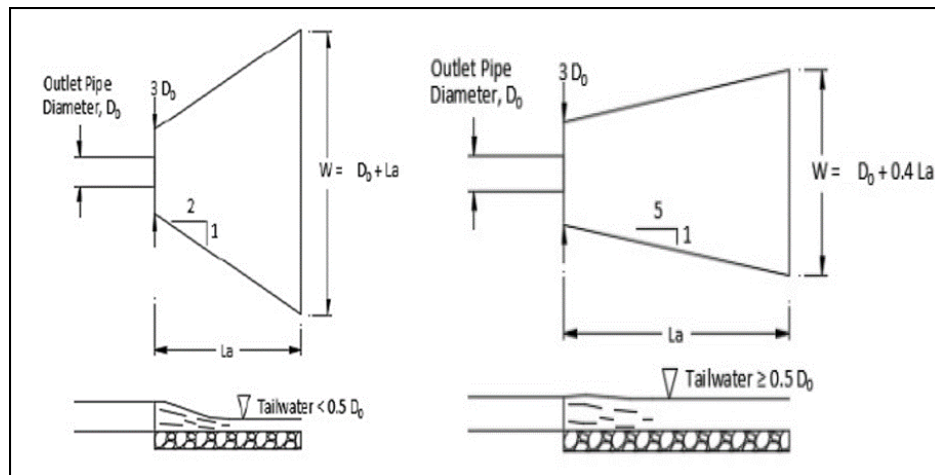


Figura 22: Condiciones de mínimo (izquierda) y máximo (derecha) calado (*tailwater*). En nuestro caso, la anchura a la entrada del dissipador coincidiría con D_0 , al no llevar aletas las ODTs. Fuente: (Michigan Department of Environment, Great Lakes and Energy, 2012).

De esta manera, la anchura máxima en la desembocadura del riprap (parámetro W , figuras 23 y 24) debe calcularse en función de las condiciones de calado mínimo y máximo de la ODT. En el primer caso, la anchura se calcula mediante la fórmula:

$$W = D_0 + L_a$$

Mientras que en el segundo caso:

$$W = D_0 + 0.4L_a$$

Para ello, hay que considerar tanto la longitud como el diámetro del tubo de la ODT (en nuestro caso, ambas ODT presentan un diámetro de 1 metro, 40 pulgadas-inches-). En nuestra zona de estudio, como se comentó más arriba, dado que los diámetros de las ODTs se realizaron de acuerdo a periodos de retorno de 500 años y los caudales están sobreestimados, se ha considerado conveniente considerar las condiciones de mínimo calado, por lo que se empleará el ábaco de la figura 23.

- **Tamaño de los bloques.** Los bloques deben ser lo suficientemente grandes para que no sean arrastrados por el flujo, dado que el riprap proyectado no se fija al suelo, pero no demasiado grandes para poder llevar a cabo un manejo fácil de los mismos. El riprap debe estar formado por una mezcla bien graduada de tamaño de piedra, de manera que el 50 por ciento de las rocas, en peso, sean mayores que el tamaño d_{50} . Una mezcla bien graduada es aquella que está compuesta principalmente de tamaños de roca más grandes, pero con una mezcla suficiente de otros tamaños para ocupar los huecos más pequeños entre ellas. El diámetro del tamaño de piedra más grande en esta mezcla ($d_{máx}$) será como máximo 1,5 veces el tamaño d_{50} . La roca empleada como riprap debe ser dura y angular, ya que superficies angulares aumentan el rozamiento y la disipación de energía, y además resistente a todos los procesos ambientales a los que se va a ver expuesta. El tamaño d_{50} se estima también a partir de los nomogramas de las figuras 23 y 24 (utilizando en este trabajo, como ya se ha mencionado anteriormente, la figura 23).

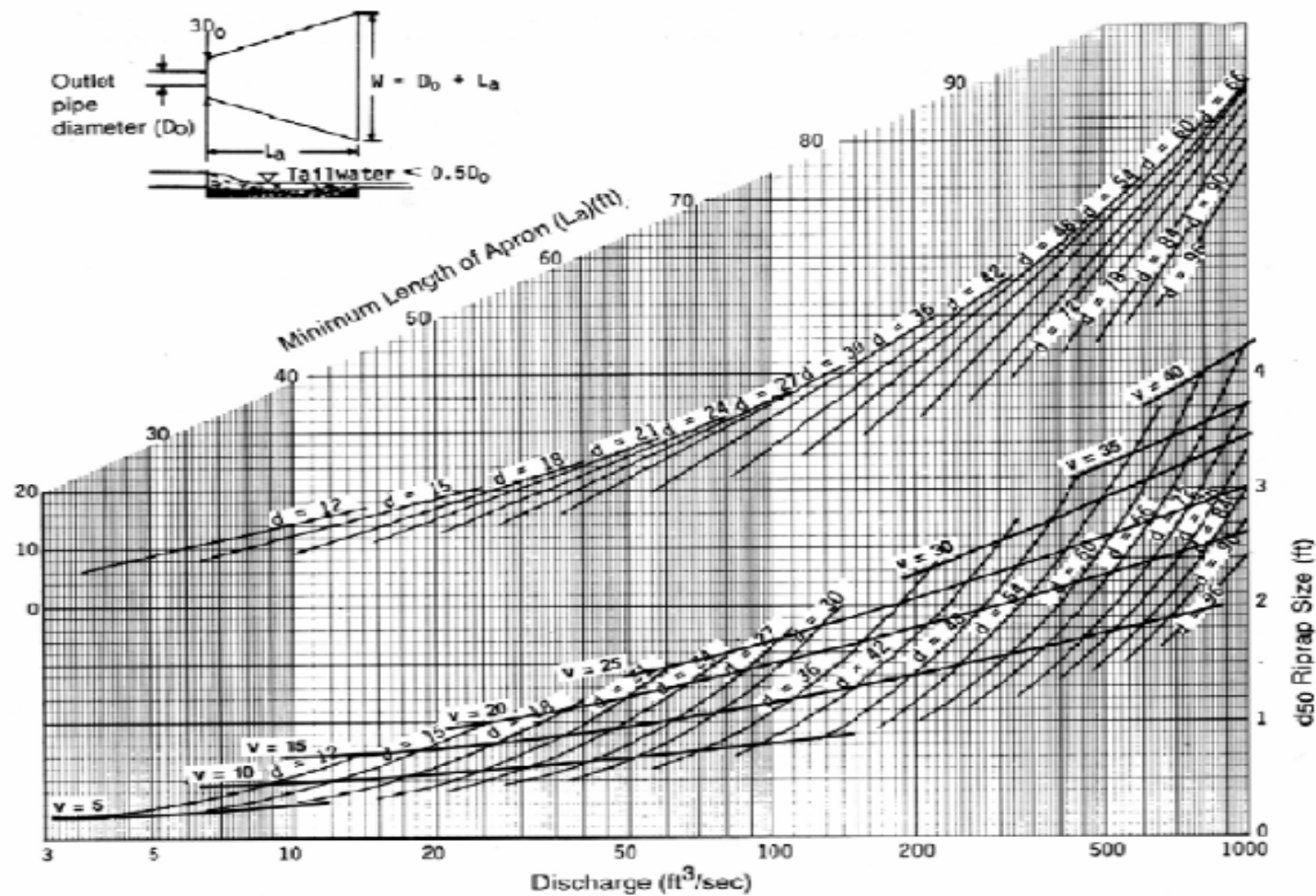


Figura 23: Ábaco para el cálculo del tamaño d_{50} de los bloques y la longitud L_a , a partir del caudal de diseño, en condiciones de mínimo calado.

Fuente: (Michigan Department of Environment, Great Lakes and Energy, 2012).

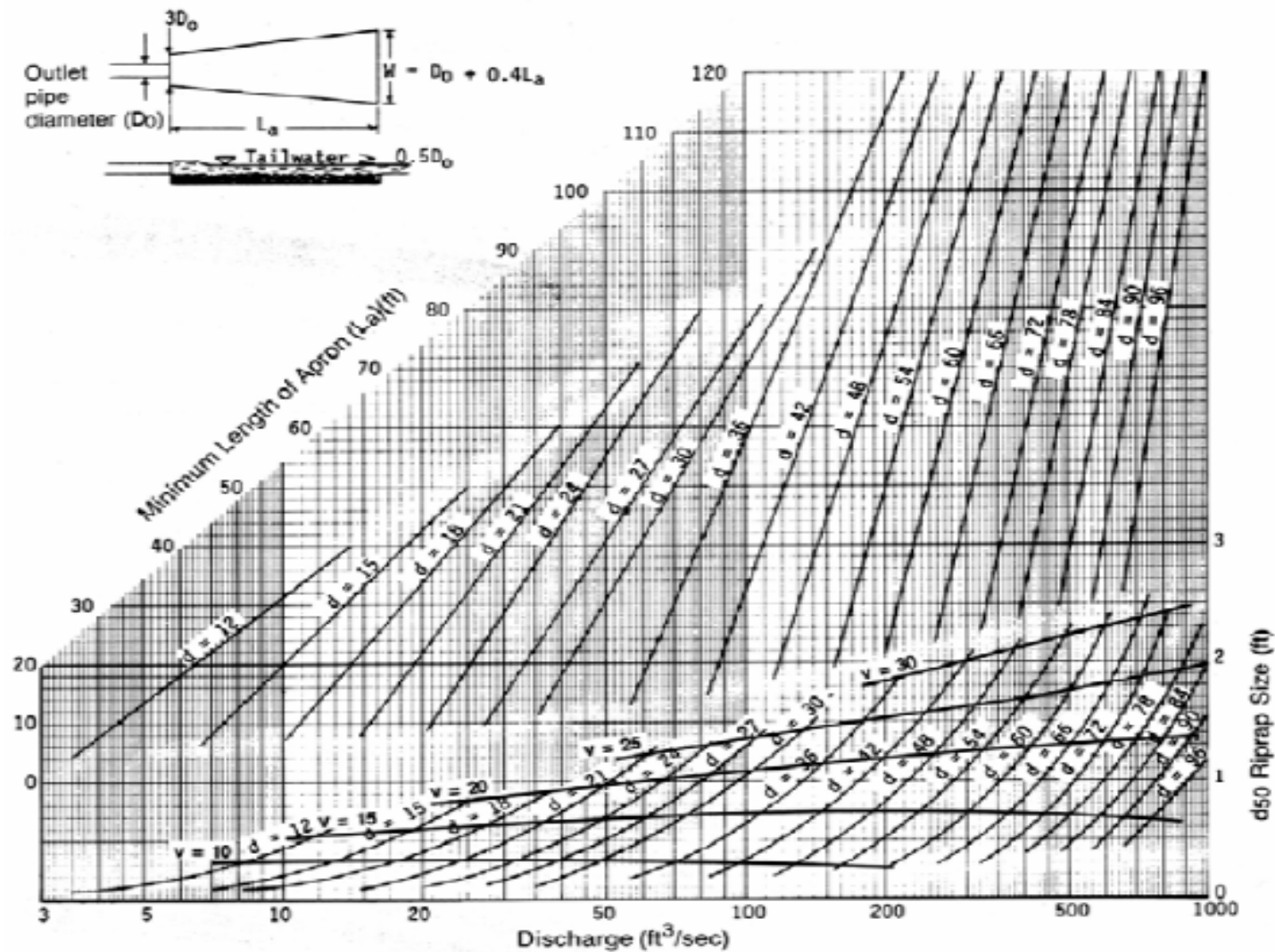


Figura 24: Ábaco para el cálculo del tamaño d_{50} de los bloques y la longitud L_a , a partir del caudal de diseño, en condiciones de máximo calado. Fuente: (Michigan Department of Environment, Great Lakes and Energy, 2012).

- **Espesor.** Esta variable se estima a partir del tamaño d_{50} , según la tabla 3.

Tabla 3: Tabla para la estimación del espesor. Fuente: Michigan Department of Environment, Great Lakes and Energy (2012).

d_{50} (in)	d_{max} (in)	Minimum Blanket Thickness (in)
4	6	9
6	9	14
9	14	20
12	18	27
15	22	32
18	27	32
21	32	38
24	36	43

- **Anchura.** Normalmente, tal como se ha especificado previamente, la anchura a la entrada del riprap (parámetro D_o) es menor que a la salida (parámetro W), ya que este se extiende para provocar una pérdida de energía del flujo. Si ya existiese un canal o cárcava previa, la anchura tendría que adaptarse a dicho canal, o procederse a un movimiento de tierras.
- **Ángulo del talud del dissipador.** Se pretende que sea menor o igual a 45%. Si en alguna parte de la longitud del dissipador se supera puntualmente esta inclinación, el terreno debe nivelarse mediante desmonte y/o relleno.

El mantenimiento necesario de un riprap una vez que ya ha sido instalado es muy bajo. Debe realizarse un control después de eventos de lluvias intensos, para comprobar que no se haya producido erosión alrededor o debajo de la escollera o que algunas piedras se hayan desprendido. En caso de que se haya producido algún daño, debe repararse de inmediato para evitar daños mayores.

3.5.2. Bajante escalonada

A partir de diversas adaptaciones de los dissipadores de caída vertical de la USBR, se han obtenido las bajantes escalonadas, las cuales son útiles para que un flujo pueda superar un desnivel considerado de manera controlada (figura 25).

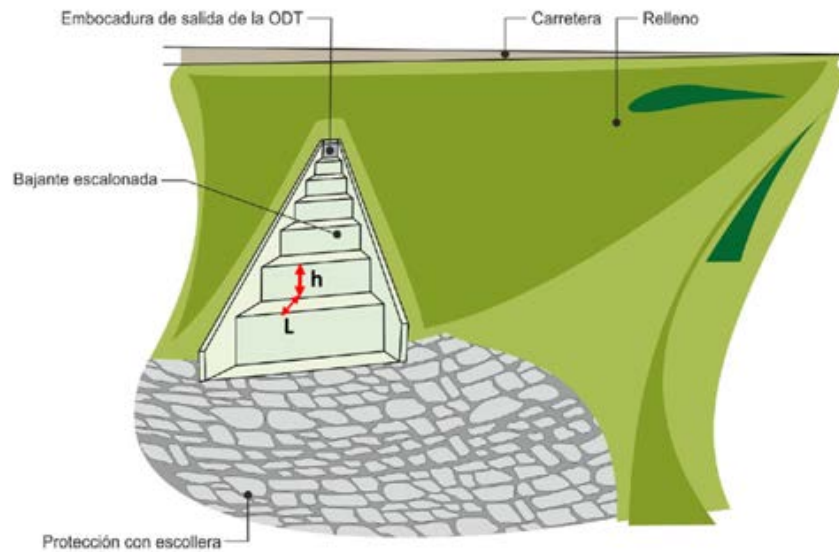


Figura 25: Esquema de bajante escalonado. h = altura del escalón; L = longitud del cuenco.

A la hora de llevar a cabo el dimensionamiento de las bajantes escalonadas se emplean las especificaciones que aparecen en las normas BAT (Normas Técnicas para Carreteras de Bizkaia).

Para realizar la estimación de las características de cada uno de los escalones, se emplea la siguiente expresión (García-Jiménez, 2020):

$$L = 0,85 \cdot \left[2,5 + 1,1 \cdot \frac{h_c}{h} + 0,7 \cdot \left(\frac{h_c}{h} \right)^3 \right] \cdot \sqrt{h \cdot h_c}$$

Donde:

L = Longitud mínima del cuenco (m)

h_c = Calado crítico aguas arriba (m)

h = Altura del escalón (m). En estas estructuras, la altura del salto agua está limitada a unos 2,40 m, aunque es recomendable no superar los 1,80 m de altura, con el objetivo de permitir la absorción de la caída por parte del lecho de hormigón. En nuestro caso, el desnivel es de 1,90 m (figura 26), por lo que entra dentro del margen de seguridad de altura para un diseño con un único escalón.

El objetivo del cálculo es estimar qué longitud de huella se necesita en cada uno de los escalones para que el resalto se mantenga dentro del mismo.

El calado crítico es una variable importante que depende de otros factores. Este parámetro se puede definir a partir de la siguiente ecuación:

$$h_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}$$

Donde:

g = Aceleración de la gravedad ($9,8 \text{ m/s}^2$)

q = Caudal específico (m^2/s), el cual se puede estimar mediante esta relación:

$$q = \frac{Q}{b}$$

Siendo Q (m^3/s) el caudal de diseño y b (m) la anchura de la bajante. Además, es necesario tener en cuenta la pendiente del talud, T (m/m), donde se va a establecer la bajante, ya que la huella y contrahuella de bajante se encuentran relacionadas directamente con éste, mediante la expresión:

$$T = \frac{L}{h}$$

Los muros laterales o altura del resguardo tendrán una altura mínima en el punto más bajo, al menos igual a la altura del muro frontal más un 20% del calado crítico.

Una vez que es fijada la pendiente del talud, en función de la topografía del terreno (100% en nuestro caso, figura 26) y ciertos parámetros de la bajante ($h = 1,90 \text{ m}$, valor máximo de saltos sobre lechos de hormigón, y $b = 1,10 \text{ m}$, que es la anchura a la salida de la cuneta que conecta con la bajante), se pueden estimar el resto de parámetros del diseño de la bajante a través de un proceso de aproximación numérica.

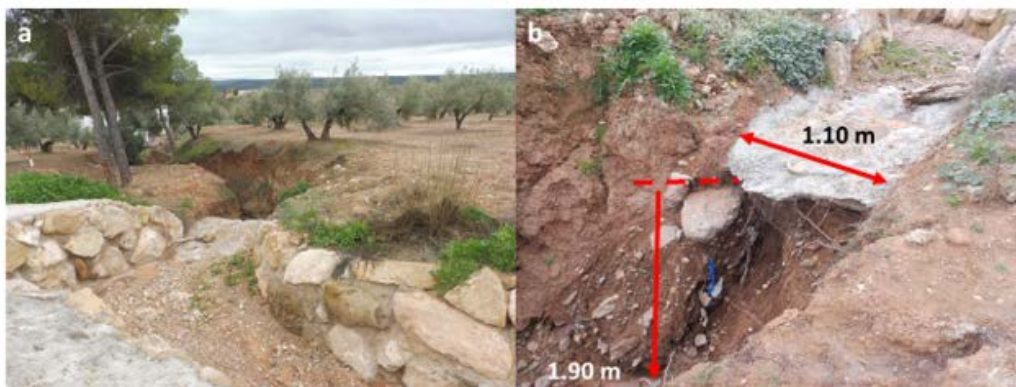


Figura 26: Desembocadura de la nueva cuneta donde será instalada la bajante escalonada.

a) Aspecto general del punto de desembocadura de la cuneta, pudiendo apreciar la relación con la cárcava. b) Altura (h) y anchura (b) del escalón (la pendiente es del 100%, dado que está en extraplomo).

4. RESULTADOS

4.1. Características de las cuencas hidrográficas

El área de las cuencas hidrográficas de cada una de las zonas de estudio se detalla en la tabla 4 y las figuras 27, 28 y 29:

Tabla 4: Área de las cuencas de drenaje.

Zona de estudio 1	Zona de estudio 2	
	Carretera antigua	Carretera nueva
44 ha	7 ha	25 ha



Figura 27: Cuenca hidrográfica zona de estudio 1.

En el caso de la zona de estudio 2, en la figura 28 se observa como se ha modificado el MDT mediante el comando “DEM Reconditioning from Stream Grid” de Arc Hydro, para unir mediante la nueva cuneta construida (b) la línea de drenaje A, anteriormente desconectada de la cárcava, con la línea de drenaje B (cuenca original de la cárcava en la carretera antigua, figura 29, rojo), generando la cuenca más extensa de la carretera nueva (figura 29, amarillo).

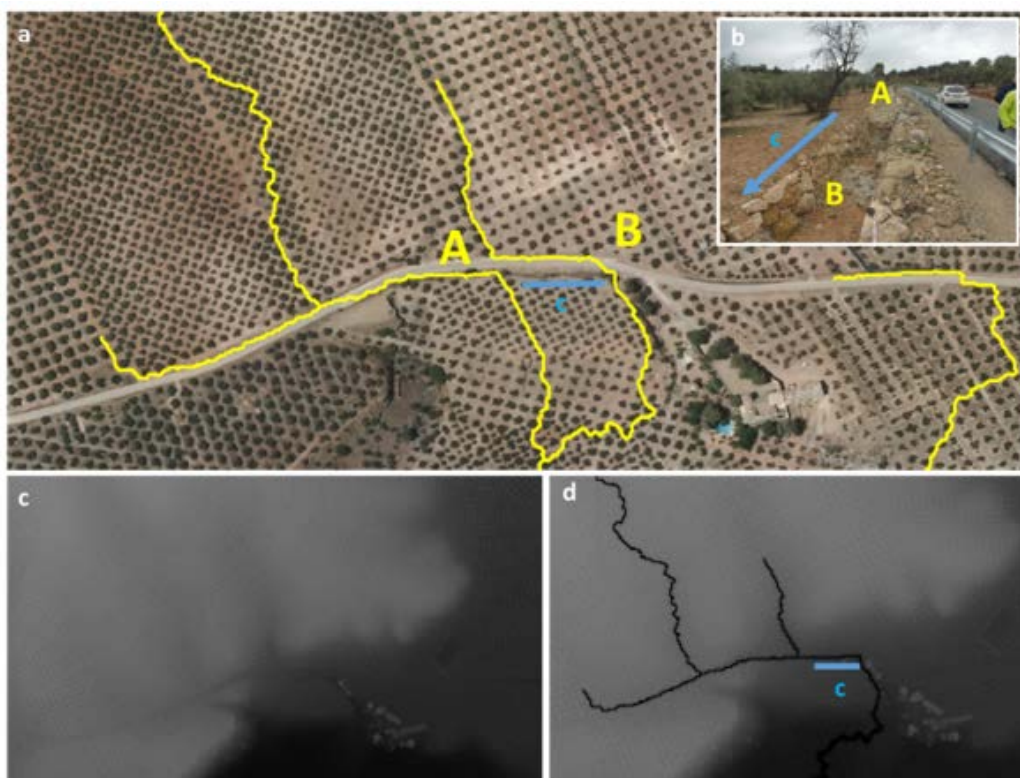


Figura 28: Modificación del MDT para incluir el efecto de la nueva cuneta c. a) líneas de drenaje de la carretera antigua, con dos salidas diferentes A y B (B es la cuenca original que crea la cárcava), indicando el nuevo tramo de cuneta que une A y B. b) trazado de la nueva cuneta, c, que une A y B. c) MDT original de 2014. d) MDT modificado para incluir el tramo de la cuneta de la nueva carretera.

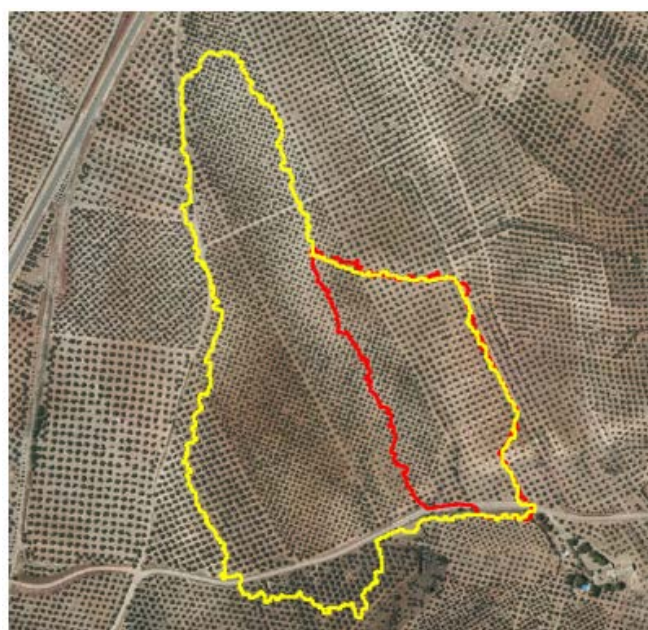


Figura 29: Cuencas hidrográficas zona de estudio 2. En rojo: cuenca de la carretera antigua (7 ha). En amarillo: cuenca de la carretera nueva (25 ha).

En las siguientes figuras se pueden apreciar las características que presentan las cuencas. Estas figuras son los gráficos de perfil de la longitud hidrológicamente más alejada en cada una de las cuencas estudiadas.

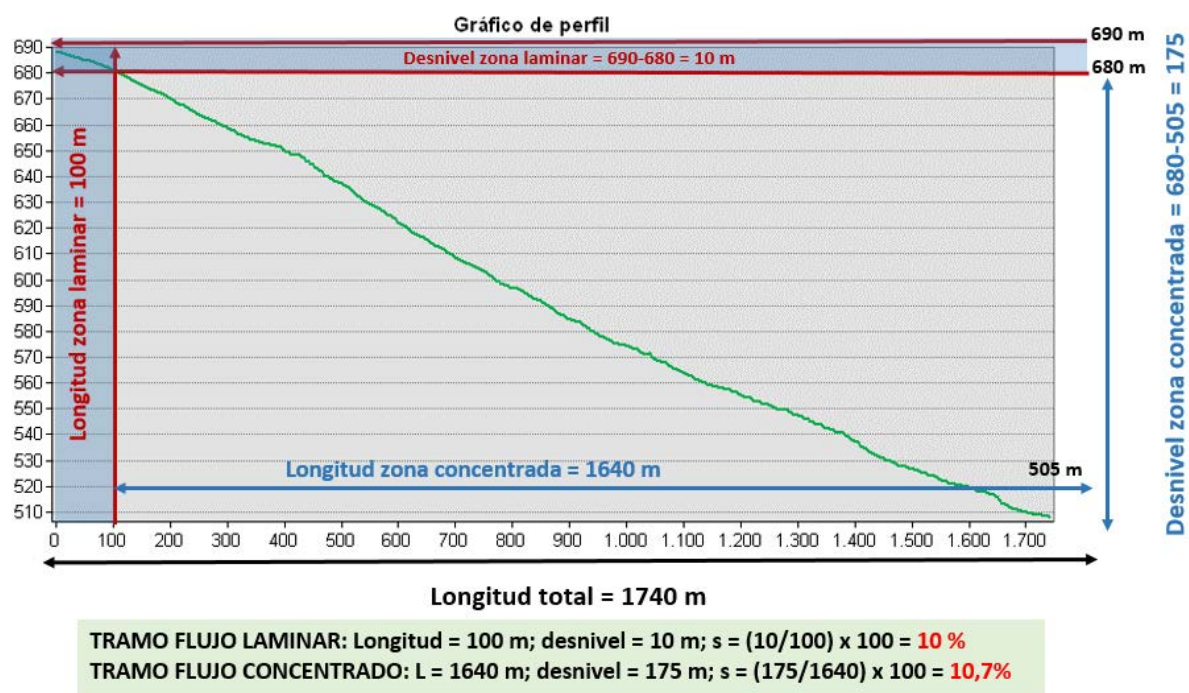


Figura 30: Gráfico de perfil de la zona de estudio 1.

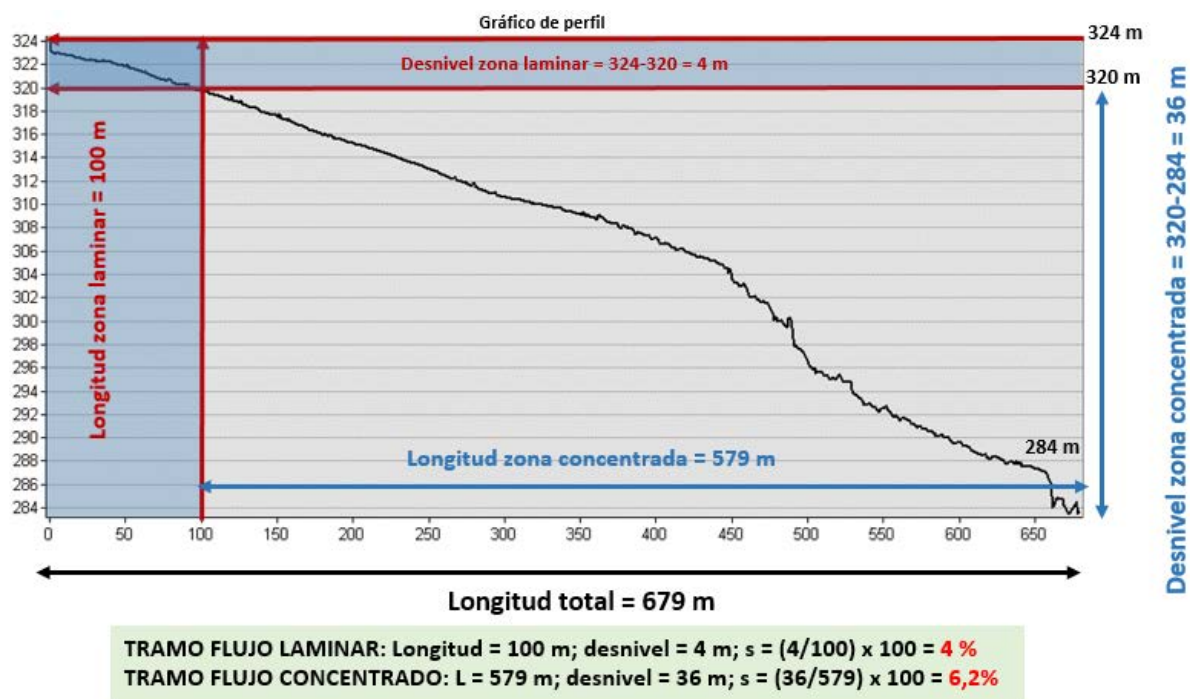


Figura 31: Gráfico de perfil de la zona de estudio 2 (carretera antigua).

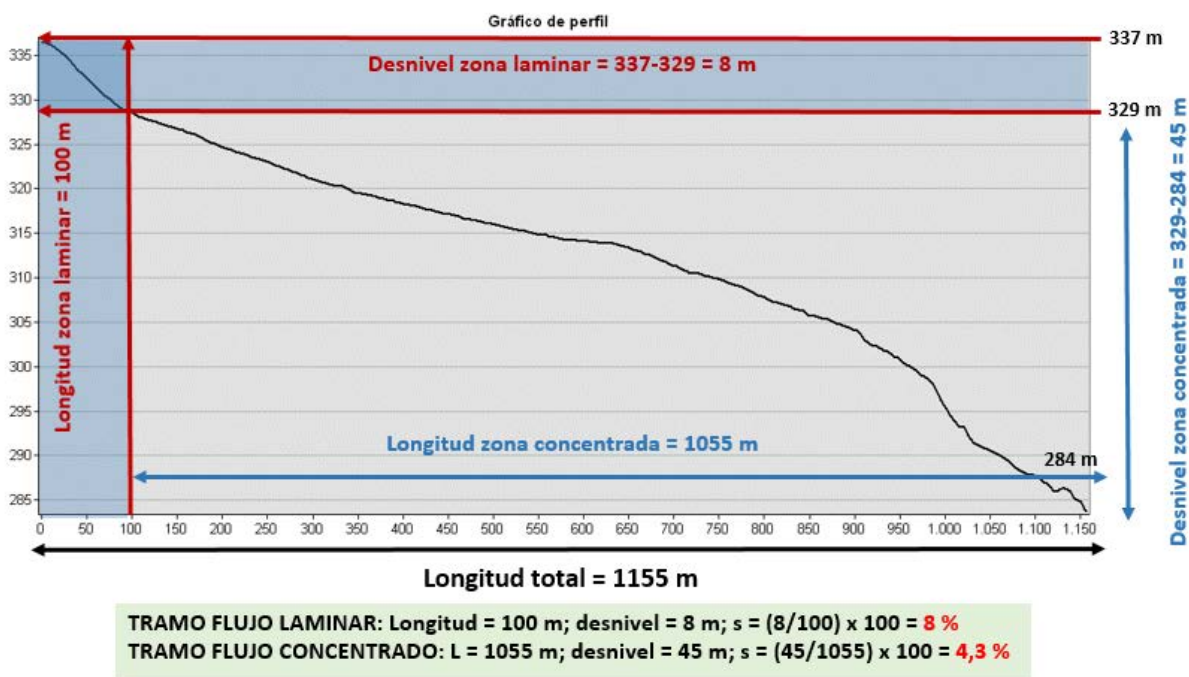


Figura 32: Gráfico de perfil de la zona de estudio 2 (carretera nueva).

4.2. Cálculo de los caudales de diseño

En las siguientes tablas (5 a 9) aparecen los números de curva asignados a cada una de las zonas de estudio, en función de las características presentes en ellas.

Tabla 5: Valores del número de curva para la zona de estudio 1.

ZONA DE ESTUDIO 1		
FACTORES	OLIVAR SIN CUBIERTA	OLIVAR CON CUBIERTA
Tipo de cobertura	Olivar	Olivar
Condición hidrológica	Poor (< 50%)	Fair (50-75 %)
Ks, tasa de infiltración (in/h)	0,13	0,13
Grupo hidrológico del suelo	C	C
CN Cuenca	82	76

Tabla 6: Valores del número de curva para la zona de estudio 2.

ZONA DE ESTUDIO 2		
FACTORES	OLIVAR SIN CUBIERTA	OLIVAR CON CUBIERTA
Tipo de cobertura	Olivar	Olivar
Condición hidrológica	Poor (< 50%)	Fair (50-75 %)
Textura del suelo	Franco arcillosa	Franco arcillosa
Grupo hidrológico del suelo	D	D
CN Cuenca	86	82

Los valores de las variables implicadas en el cálculo de los caudales de diseño se muestran en las siguientes tablas:

Tabla 7: Valores de los caudales de diseño, así como de las variables implicadas en su estimación (zona de estudio 1), en el escenario actual (olivar sin cubierta) y simulando la instalación de una cubierta herbácea (olivar con cubierta).

PROCESOS	VARIABLES	ZONA DE ESTUDIO 1	
		OLIVAR SIN CUBIERTA	OLIVAR CON CUBIERTA
CÁLCULO DE LA ESCORRENTÍA	P (mm)	75	75
	S (mm)	50,88	74,95
	CN	82	76
	Q (mm)	36,32	26,68
CÁLCULO DEL TIEMPO DE VIAJE Y TIEMPO DE CONCENTRACIÓN	Longitud LFP (m)	1740	1740
	n	0,06	0,17
	P ₂ (mm)	37,5	37,5
	L, flujo laminar (m)	100	100
	Desnivel, flujo laminar (m)	10	10
	S, flujo laminar (m/m)	0,1	0,1
	T _t , flujo laminar (h)	0,01	0,03
	L, flujo concentrado (m)	1640	1640
	Desnivel, flujo concentrado (m)	175	175
	S, flujo concentrado (m/m)	0,107	0,107
	V (ft/s)	5,2	5,2
	V (m/s)	1,58	1,58
	T _t , flujo concentrado (h)	0,29	0,29
	T _c (h)	0,30	0,32
CÁLCULO DEL CAUDAL DE DISEÑO	I _a (mm)	10,18	14,99
	I _a /P	0,14	0,20
	q _u (csm/in)	340	290
	A _m (mi ²)	0,17	0,17
	Q (in)	1,43	1,05
	q _p (cfs)	82,59	51,76
	q _p (m ³ /s)	2,339	1,466

Tabla 8: Valores de los caudales de diseño, así como de las variables implicadas en su estimación (zona de estudio 2, carretera antigua), en el escenario actual (olivar sin cubierta) y simulando la instalación de una cubierta herbácea (olivar con cubierta).

PROCESOS	VARIABLES	ZONA DE ESTUDIO 2 (CARRETERA ANTIGUA)	
		OLIVAR SIN CUBIERTA	OLIVAR CON CUBIERTA
CÁLCULO DE LA ESCORRENTÍA	P (mm)	75	75
	S (mm)	36,7	50,9
	CN	86	82
	Q (mm)	43,9	36,3
CÁLCULO DEL TIEMPO DE VIAJE Y TIEMPO DE CONCENTRACIÓN	Longitud LFP (m)	679	679
	n	0,06	0,17
	P ₂ (mm)	37,5	37,5
	L, flujo laminar (m)	100	100
	Desnivel, flujo laminar (m)	4	4
	S, flujo laminar (m/m)	0,01	0,01
	T _t , flujo laminar (h)	0,02	0,04
	L, flujo concentrado (m)	579	579
	Desnivel, flujo concentrado (m)	36	36
	S, flujo concentrado (m/m)	0,062	0,062
	V (ft/s)	4	4
	V (m/s)	1,22	1,22
	T _t , flujo concentrado (h)	0,13	0,13
	T _c (h)	0,15	0,17
CÁLCULO DEL CAUDAL DE DISEÑO	I _a (mm)	7,34	10,18
	I _a /P	0,1	0,14
	q _u (csm/in)	450	400
	A _m (mi ²)	0,03	0,03
	Q (in)	1,73	1,43
	q _p (cfs)	21,01	15,46
	q _p (m ³ /s)	0,595	0,438

Tabla 9: Valores de los caudales de diseño, así como de las variables implicadas en su estimación (zona de estudio 2, carretera nueva), en el escenario actual (olivar sin cubierta) y simulando la instalación de una cubierta herbácea (olivar con cubierta).

PROCESOS	VARIABLES	ZONA DE ESTUDIO 2 (CARRETERA NUEVA)	
		OLIVAR SIN CUBIERTA	OLIVAR CON CUBIERTA
CÁLCULO DE LA ESCORRENTÍA	P (mm)	75	75
	S (mm)	36,7	50,9
	CN	86	82
	Q (mm)	43,9	36,3
CÁLCULO DEL TIEMPO DE VIAJE Y TIEMPO DE CONCENTRACIÓN	Longitud LFP (m)	1155	1155
	n	0,06	0,17
	P ₂ (mm)	37,5	37,5
	L, flujo laminar (m)	100	100
	Desnivel, flujo laminar (m)	8	8
	S, flujo laminar (m/m)	0,08	0,08
	T _t , flujo laminar (h)	0,01	0,03
	L, flujo concentrado (m)	1055	1055
	Desnivel, flujo concentrado (m)	45	45
	S, flujo concentrado (m/m)	0,043	0,043
	V (ft/s)	3,2	3,2
	V (m/s)	0,98	0,98
	T _t , flujo concentrado (h)	0,3	0,3
	T _c (h)	0,31	0,33
CÁLCULO DEL CAUDAL DE DISEÑO	I _a (mm)	7,34	10,18
	I _a /P	0,1	0,14
	q _u (csm/in)	350	310
	A _m (mi ²)	0,10	0,10
	Q (in)	1,73	1,43
	q _p (cfs)	58,35	42,79
	q _p (m ³ /s)	1,650	1,212

4.3. Medidas de prevención y control de cárcavas

En las siguientes tablas (10 y 11) aparecen los valores correspondientes a los disipadores de energía diseñados en cada una de las zonas de estudio.

Tabla 10: Valores de las variables implicadas en el diseño del disipador tipo riprap para un caudal de diseño de 2,339 m³/s (82,59 cfs), escenario actual (carretera nueva sin instalación de cubierta vegetal en el olivar de la cuenca vertiente).

PROCESO	PARÁMETRO/FACTOR	VALORES
DIMENSIONAMIENTO DISIPADOR RIPRAP	Caudal de diseño, Q (cfs)	82,59
	Anchura máxima en la entrada del disipador, D ₀ (m)	1
	Anchura máxima en la entrada del disipador, D ₀ (ft)	3,28
	Anchura máxima en la salida del disipador, W (m)	8,92
	Anchura máxima en la salida del disipador, W (ft)	29,27
	Longitud mínima, L _a (ft)	25
	Longitud mínima, L _a (m)	7,62
	Diámetro d ₅₀ (ft)	0,80
	Diámetro d ₅₀ (cm)	24,4
	Diámetro d _{máx} (ft)	1,2
	Diámetro d _{máx} (cm)	36,6
	Espesor mínimo de la capa (ft)	1,66
	Espesor mínimo de la capa (cm)	50,8

Tabla 11: Valores de las variables implicadas en el diseño de la bajante escalonada, para un caudal de diseño de 1,652 m³/s (58,35 cfs), en el escenario actual (carretera modificada sin instalación de cubierta vegetal en el olivar de la cuenca vertiente).

PROCESO	PARÁMETRO	VALORES
DIMENSIONAMIENTO BAJANTE ESCALONADA	Q, caudal de diseño (m ³ /s)	1,650
	b, anchura (m)	1,10
	q, caudal específico (m ² /s)	1,500
	h _c , calado crítico (m)	0,37
	h, altura del escalón (m)	1,90
	L, longitud mínima del escalón (m)	1,93
	Altura del resguardo (m)	0,44
	T (m/m)	1

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Mediante el uso del software ArcGis y de la herramienta Arc Hydro, se han obtenido las cuencas de drenaje de las zonas objeto de estudio y sus características principales. Para llevar a cabo estas estimaciones, es necesario realizar una serie de operaciones, como aparece en el trabajo de Saá-Yáñez (2019). En el caso de la zona de estudio 1, la cuenca hidrográfica presenta una superficie de 44 ha, con una longitud hidrológicamente más alejada de unos 1740 metros. En esta zona no hay cárcavas ya formadas, pero es una zona potencialmente erosionable debido a la presencia de las salidas de drenaje de la carretera. Por otro lado, en la zona de estudio 2 (donde ya hay una cárcava formada), se ha realizado una comparación entre las características que presentaba la zona antes de la modificación de la carretera (carretera antigua) y las características que presenta en la actualidad (carretera nueva). Para la carretera antigua, la cuenca hidrográfica tenía una superficie de 7 ha y una longitud hidrológicamente más alejada de 679 metros, mientras que, a partir de la carretera nueva, la cuenca hidrográfica ha aumentado hasta las 25 ha y los 1155 metros de longitud hidrológicamente más alejada. En ambas zonas el uso del suelo es exclusivamente de olivar convencional, sin presencia de cubiertas herbáceas.

Díaz y Mercado (2017) utilizan en su estudio el método del Número de Curva y señalan los factores implicados en su estimación. Esta investigación presenta unos resultados de número de curva variables, debido a las diferencias existentes en los tipos de coberturas y grupos hidrológicos del suelo de su área de estudio, obteniendo, para grupos hidrológicos C y D, números de curva desde 70 a 89. En el presente trabajo se han obtenido, a partir de esta metodología, valores de grupo hidrológico del suelo de tipo C para la zona de estudio 1 y de tipo D para la zona de estudio 2. Con estos datos, junto con el tipo de cobertura y la condición hidrológica de las dos áreas, se determina el número de curva para cada una de ellas. Además, se ha llevado a cabo una estimación del número de curva mediante una simulación en la que en las zonas de estudio existiera una buena cubierta herbácea, con el fin de realizar una comparación entre todos los datos obtenidos. Para la zona de estudio 1, el NC para el olivar sin cubierta es de 82, y el valor para el olivar con cubierta es de 76. Por otra parte, en la zona de estudio 2, el olivar sin cubierta tiene un NC de 86, y la simulación de olivar con cubierta presenta un NC de 82. Para ambas localizaciones, la presencia de cubiertas herbáceas provoca una disminución del número de curva, lo cual va a suponer una menor escorrentía.

Una vez que se ha realizado la estimación de los números de curva, el siguiente paso es el cálculo de los caudales de diseño, determinando una serie de variables primero (escorrentía, tiempos de viaje y concentración). En el trabajo de Sánchez-González (2019), que estudia la alteración del área de drenaje provocada por la carretera J-2312, se emplea el

método del Número de Curva para la estimación de los caudales de diseño, obteniendo un pico de descarga de 6,930 m³/s para una de sus cuencas de estudio y, para la simulación de esa cuenca sin la existencia de una carretera cercana, el caudal tiene un valor de 6,258 m³/s, poniendo de relieve las modificaciones que realiza la carretera en las cuencas hidrográficas. La importancia de la exploración de los efectos que la creación o modificación de una infraestructura viaria genera a nivel de cuenca de drenaje, antes de que se produzca erosión, ha sido resaltada en zonas urbanas de Tijuana (México) por Gudino-Elizondo et al. (2018). En esta investigación también se lleva a cabo una comparación de los caudales resultantes en función de distintos usos del suelo, obteniendo valores menores en aquellos suelos que presentan una buena cubierta vegetal.

En el actual trabajo, los datos de caudales de diseño para la zona de estudio 1 son de 2,339 m³/s para el olivar sin cubierta y 1,466 m³/s para la simulación de olivar con cubierta (disminución del 37%). En la zona de estudio 2, los valores conseguidos son de 0,595 m³/s y 0,438 m³/s, para olivar sin cubierta y con cubierta, respectivamente, en el caso de la carretera antigua. Con las características de la carretera nueva, los caudales de diseño son de 1,650 m³/s para olivar sin cubierta y 1,212 m³/s para olivar con cubierta (disminución del 27%). Además, los aumentos de los caudales de diseño por efecto exclusivo de la modificación de la carretera ascienden al 63% (de 0,595 a 1,650 m³/s, escenarios sin cubierta), lo que indica claramente la necesidad de prever de forma cuantitativa el efecto de alteración del relieve antes de acometer la obra. Con estos datos estimados, se puede decir que, al igual que en el trabajo de Sánchez-González (2019), los caudales de diseño en todas las cuencas de estudio son menores cuando hay una presencia de cubiertas herbáceas en los suelos, y esto es debido a las ventajas que presentan con respecto a la erosión, como la protección del suelo frente a la acción del agua, el aumento de la infiltración de agua del suelo, lo cual radica en unas menores pérdidas de suelo (Milgroom et al., 2006). Las disminuciones de los caudales de diseño, ya sea por la instauración de cubiertas o por la realización de un trazado cuidadosamente planificado en función de la alteración del relieve, implicarían un redimensionamiento a la baja de las estructuras disipadoras, lo cual siempre es interesante (y en algunos casos, imprescindible).

Para prevenir la formación de cárcavas en la zona de estudio en la que aún no se han desarrollado y controlar el aumento de la cárcava ya formada, es necesario implementar una serie de medidas que tengan como objetivo reducir la erosión, la cual es provocada por los flujos de agua de las salidas de drenaje transversal de las carreteras (ODT) presentes en las zonas objeto de estudio.

En el presente trabajo, las medidas seleccionadas son disipadores de energía a la salida de las ODT, ya que presentan un bajo coste (en comparación con otras medidas de control de cárcavas) y una fácil instalación en el campo. En cada una de las zonas de estudio se ha determinado la instalación de un disipador diferente, debido a las diferencias existentes en cuanto a las formaciones erosivas de cada una de las áreas.

En la zona de estudio 1, el disipador propuesto es un disipador tipo riprap, el cual consiste en un revestimiento de roca formando una cubierta en el suelo que reduce el daño provocado por los flujos de agua. Tal como indican Thompson y Kilgore (2006), los disipadores tipo riprap no son adecuados cuando el nivel del terreno es significativamente inferior al de la salida del drenaje, lo cual lo hace adecuado para la zona 1, donde aún no se han formado cárcavas. En la investigación de García-Jiménez (2020) se emplea este tipo de disipador como medida de control de cárcavas. En una de las cárcavas de estudio de este trabajo, el caudal de diseño estimado es de 9,11 m³/s. Para este pico de descarga, la longitud necesaria del riprap es de 103,25 metros, 12,83 metros de ancho y tamaño d₅₀ de las rocas de 2,16 centímetros, siendo de dimensiones (y costes) muy superiores a los calculados por nosotros.

En la cuenca hidrográfica presente en la zona de estudio 1 de este trabajo, el disipador se va a establecer tras la embocadura de la salida de la obra de drenaje transversal de la carretera, con una longitud mínima de 7,62 metros, una anchura de 8,92 a la salida del disipador y un tamaño d₅₀ de 24,4 centímetros. Sobre el terreno, estas medidas del disipador son viables, lo que hay que tener en cuenta dado que la carretera linda directamente con un olivar productivo privado y la instalación del disipador supone necesariamente que el propietario del mismo de permiso para ello. Si acaso, la anchura máxima en la salida del disipador podría ser un problema, ya que podría implicar tener que arrancar algún olivo (el marco de plantación es 10 x 10 m, por lo que estaríamos en el límite en el que el disipador podría ocupar la calle del olivar). En este caso, podría disminuirse la anchura del disipador ya que, como se comentó arriba, hemos tomado las condiciones de calado más conservadoras (mínimo calado) y, con toda probabilidad, tendríamos un cierto margen de seguridad en cuanto al dimensionamiento del disipador. En cualquier caso, las dimensiones de los disipadores son mucho menores que los estimados por García-Jiménez y, por tanto, más fácilmente ejecutables en el terreno, ya que los caudales de diseño en la zona 1 son más reducidos. Sea como sea, el empleo de cubiertas siempre es recomendable porque, al reducir los caudales de diseño, se disminuyen las dimensiones de las infraestructuras (sean disipadores o bajantes escalonadas) necesarias para la restauración, haciendo más sencilla su colocación. En este sentido, Saá-Yáñez (2019) concluye en el estudio de su cuenca que, probablemente, no sería posible un diseño adecuado de medidas estructurales para

corrección de cárcavas (en este caso diques de contención) si las escorrentías actuales en olivares tradicionales sin cubierta se mantienen.

En la zona de estudio 2, la estructura correctora recomendada es una bajante escalonada, la cual es una adaptación de los disipadores de caída vertical que se ha producido por la existencia previa de la cárcava (el agujero de *scouring*, similar al que podemos observar en la figura 5). Aquí se pone de manifiesto la importancia de prevenir estas alteraciones en los sistemas de drenaje antes de que ocurra la erosión, y la necesidad de instalar los disipadores de forma paralela a la construcción de la carretera (y no como acción correctora *a posteriori*). El trabajo de Falcón (2015) muestra el estudio de la utilización de bajantes escalonadas como disipadores de energía en las salidas de obras de drenaje de carreteras. Para ello, realiza una estimación de todas las variables implicadas en el diseño de las mismas. Este autor, a partir de un caudal de diseño de 11,316 m³/s, obtiene una bajante escalonada con una longitud de 2,80 metros, una anchura de 5,5 metros y una altura de escalón de 1,40 metros. En la cárcava de estudio de este trabajo, las dimensiones calculadas para la instalación de este disipador (también justo a la salida de la ODT) son 1,93 metros de longitud, 1,10 metros de ancho y 1,90 metros de altura del escalón. Estas dimensiones son relativamente fáciles de implementar en la cárcava sobre la que se quiere actuar.

Con la adopción de estas medidas de control de cárcavas se pretende conseguir una reducción de los daños producidos por la erosión de los flujos de agua de las ODT, tratando de prevenir la formación de cárcavas en la zona de estudio 1 y controlando el avance y desarrollo de la cárcava ya existente en la zona de estudio 2. Todas estas medidas tienen una gran relevancia, dada la abundante literatura que indica la estrecha y preocupante relación entre los drenajes de infraestructuras viarias y procesos de degradación del suelo en diversas partes del mundo: República Democrática del Congo (Imwanga et al., 2015), Kenia (Jungerius et al., 2002), Etiopía (Nyssen et al., 2002), Sudáfrica (Seutloali et al., 2016), Brasil (Guerra et al., 2015), México (Gudino-Elizondo et al., 2018) o Australia (Croke et al., 2001), por citar solo algunos ejemplos.

Como última consideración, destacar que este estudio ha despertado interés en la Diputación Provincial de Jaén (Departamento de Obras Públicas). Los procedimientos administrativos hacen complicado establecer la bajante escalonada en la carretera de Miraelrío, dado que la obra de mejora de la J-9007 ya ha concluido. Sin embargo, la obra de Ensanche y Mejora de la carretera del Santuario de la Virgen de Cuadros está aún en desarrollo, lo que hace posible (y así se va a proceder) la instalación de los disipadores tipo riprap a cargo del propio presupuesto de la obra (siendo el coste, aunque no concretado, francamente asumible para una actuación de más de 2 millones de euros). Sería deseable

poder disponer, en los próximos meses, de un dissipador de energía en condiciones de campo que nos sirva para evaluar su eficacia en la prevención de la erosión a medio plazo, aspecto que está poco estudiado en España, especialmente a nivel de carreteras de escasa entidad.

6. CONCLUSIONES

Las principales conclusiones a las que se ha llegado en este trabajo son las siguientes:

- Los efectos de la construcción o modificación de una carretera tienen gran relevancia, ya que los daños ocasionados por erosión en cárcavas ligadas al drenaje de la misma pueden llegar a ser importantes. Por ello, que es necesario tener en cuenta medidas de control ligadas a las infraestructuras viarias, tanto durante la construcción como después.
- El tipo de manejo de los suelos en las cuencas de drenaje de las carreteras es un aspecto que también tiene una considerable importancia, puesto que, en base a nuestra simulación, la ausencia de cubierta vegetal en los suelos produce aumentos en los caudales de diseño que rondan el 30%, con lo que la probabilidad de formación de cárcavas también se ve aumentada en gran medida.
- La cuantificación del efecto que la obra produce sobre las cuencas hidrológicas y los caudales de diseño, mediante la modificación de MDT, podría ayudar a diseñar trazados y sistemas de drenaje de menor impacto. En nuestro caso, se ha comprobado como el establecimiento de una nueva cuneta aumentó hasta un 63% los caudales de diseño.
- El diseño de dissipadores de energía en las salidas de las obras de drenaje de carreteras locales y regionales es factible y relativamente fácil de emprender, pudiendo conllevar su instalación una prevención y control efectivo de la erosión por cárcavas

7. BIBLIOGRAFÍA

Abdulfatai, I.A., Okunlola, I.A., Akande, W.G., Momoh, L.O., & Ibrahim, K.O. (2014). Review of gully erosion in Nigeria: Causes, Impacts and Possible Solution. *Journal of Geoscience and Geomatics*, 3, 125-129. <https://doi.org/10.12691/jgg-2-3-8>

Almorox, A.J., López-Bermúdez, F., & Rafaelli, S. (2010). *La degradación de los suelos por erosión hídrica. Métodos de estimación*. Universidad de Murcia.

Borrelli, P., Robinson, D.A., Fleischer, L.R., Lugato, E., Ballabio, C., Alewell, C., ... & Panagos, P. (2017). An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. *Nature communications*, 8. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02142-7>

Burbano, H. (2016). The soil and its relationship with ecosystem services and food security. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 33(2), 117-124. <https://doi.org/10.22267/rcia.163302.58>

Calero, J., Aranda, V. Montejo-Ráez, A., & Martín-García, J.M., (2018). A new soil quality index based on morpho-pedological indicators as a sitespecific web service applied to olive groves in the Province of Jaen (South Spain). *Computers and Electronics in Agriculture*, 146, 66-76. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.01.016>

Calero, J., Sánchez-Gómez, M., Fernández, T., Tovar, J., & García-Ruiz, R. (2019). Panorama de la erosión del olivar de Jaén: procesos, metodologías y significación económica y ambiental. *Interempresa.net*. Disponible en: (<http://www.interempresas.net/Grandes-cultivos/Articulos/240818-Panoramaerosion-olivar-Jaen-procesos-metodologias-significacion-economicaambiental.html>)

Carey, B., Stone, B., Shilton, P., & Norman, P. (2015). Chapter 13 Gully erosion and its control. In: *Soil Conservation Guidelines for Queensland*, 3rd Edition. Queensland Department of Science, Information Technology and Innovation. www.publications.qld.gov.au/dataset/soil-conservation-guidelines

Castillo, C. & Gómez, J.A. (2016). A century of gully erosion research: Urgency, complexity and study approaches. *Earth-Science Reviews*, 160, 300-319. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.07.009>

Castillo-Rodríguez, C. (2012). *Metodología de medida de la erosión por cárcavas y modelado de su control mediante diques de retención*. Tesis Doctoral. Universidad de Córdoba, Córdoba (España).

CEC, Commission of the European Communities (2006). Communication from the Commission to the Council, the European Parliament, the European Economic and Social

Committee and the Committee of the Regions. *Thematic Strategy for Soil Protection*. COM 231 Final, Brussels.

Chesworth, W. (2008). *Encyclopedia of soil science*. Springer, Dordrecht, The Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-3995-9>

Cisneros, J., Cholaky, C., Cantero-Gutiérrez, A., González, J., Reynero, M., Diez, A., & Bergesio, L. (2012). *Erosión hídrica. Principios y técnicas de manejo*. Universidad Nacional de Río Cuarto, Córdoba, Argentina.

Consejería de Fomento y Vivienda (2014). Informe sobre patologías de obras de drenaje transversal; inventario y metodología. Agencia de Obra Pública de la Junta de Andalucía, 43 pp.

Coppin, N.J., & Richards, I.G. (2007). *Use of Vegetation in Civil Engineering*, 2nd Edition. CIRIA. 298 pp.

Croke, J., & Mockler, S. (2001). Gully initiation and road-to-stream linkage in a forested catchment, Southeastern Australia. *Earth Surf. Process. Landforms*, 26, 205-217. [https://doi.org/10.1002/1096-9837\(200102\)26:2<205::AID-ESP168>3.0.CO;2-G](https://doi.org/10.1002/1096-9837(200102)26:2<205::AID-ESP168>3.0.CO;2-G)

Cueva-Alanguía, P.E. (2018). *Propuesta de estructura de disipación de energía para el control de la pérdida de suelo por erosión hídrica en cárcava en la microcuenca Sonocco Juli – Puno*. Tesis de grado. Universidad Nacional del Altiplano, Perú.

Da Costa, A. (2018). *Análisis de erosión hídrica de suelos: avance de cárcavas en olivares*. Máster en Análisis, Conservación y Restauración de Componentes Físicos y Bióticos de los Hábitats. Centro de Estudios de Postgrado. Universidad de Jaén.

De Alba, S., Alcázar, M., Cermeño, F.I., & Barbero, F. (2011). Erosión y manejo del suelo. Importancia del laboreo ante los procesos erosivos naturales y antrópicos. *Agricultura Ecológica*, 1, 13-38. http://digital.csic.es/bitstream/10261/60833/1/Capitulo13_38.pdf

DEC, Department of Environmental Conservation (2005). New York Standards and Specifications for Erosion and Sediment Control.

Díaz, A., & Mercado, T. (2017). Determinación del número de curva en la subcuenca de Betancí (Córdoba, Colombia) mediante teledetección y SIG. *Ingeniería y Desarrollo*, 35(2), 452-470. <https://doi.org/10.14482/inde.35.2.10171>

Díaz, V., Mongil, J., Navarro, J., & Ramos, I. (2012). Erosión en cárcavas: una revisión de los efectos de los diques forestales. Congreso Nacional de Medio Ambiente (CONAMA 11).

Díaz-Martínez, P. (2018). *Análisis espacio-temporal de la erosión en cárcavas en el olivar. Aplicación de técnicas microgeodésicas*. Grado en Ciencias Ambientales. Facultad de Ciencias Experimentales. Universidad de Jaén.

Engineering Policy Guide (2019). 750.6 Erosion Control and Energy Dissipation. Retrieved 11:19, November 8, 2020 from https://epg.modot.org/index.php?title=750.6_Erosion_Control_and_Energy_Dissipation&oldid=46970

ESRI, Environmental Systems Research Institute (2011). Arc Hydro Tools Tutorial v. 2.0.

FAO (2015). World Soil Charter (also available at <http://www.fao.org/3/a-mn442e.pdf>)

FAOSTAT Data. Available online: <http://www.fao.org/faostat>

Fernández, T., Pérez-García, J. L., Gómez-López, J. M., Cardenal, J., Calero, J., Sánchez-Gómez, M., ... & Tovar-Pescador, J. (2020). Multitemporal analysis of gully erosion in olive groves by means of digital elevation models obtained with aerial photogrammetric and LiDAR data. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(4), 260-290. <https://doi.org/10.3390/ijgi9040260>

Ffolliott, P. F., Brooks, K. N., Neary, D. G., Tapia, R. P., & Garcia-Chevesich, P. (2013). *Soil erosion and sediment production on watershed landscapes: processes and control*. UNESCO Regional Office for Science for Latin America and the Caribbean. 73 p.

García-Jiménez, P.S. (2020). *Diseño técnico de medidas de control de cárcavas aplicado a una finca de olivar de la provincia de Jaén*. Máster Universitario en Olivar y Aceite de Oliva. Centro de Estudios de Postgrado. Universidad de Jaén.

García-Ruiz, J.M., Beguería, S., Nadal-Romero, E., González-Hidalgo, J.C., Lana-Renault, N., & Sanjuán, Y.A. (2015). A meta-analysis of soil erosion rates accross the world. *Geomorphology*, 239, 160-173. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.03.008>

Garrido-González, L. (2007). Difusión del olivar y consolidación de una cultura del aceite en la Provincia de Jaén (1750-1880). *Boletín del Inst. Estud. Giennenses*, 195, 415-442.

Giráldez, J. V., Madrid, R., Rodríguez, A., Contreras, V., Landa, B., Taguas, E. V., ... & Gómez Calero, J. A. (2015). *Manual de técnicas de estabilización biotécnica en taludes de infraestructuras de obra civil*. Agencia de Obra Pública de la Junta de Andalucía. Consejería Fomento y Vivienda. Junta de Andalucía. España.

Gómez, J. A., Battany, M., Renschler, C. S., & Fereres, E. (2003). Evaluating the impact of soil management on soil loss in olive orchards. *Soil use and management*, 19(2), 127-134. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2003.tb00292.x>

Gómez, J. A., Castillo, C., Mora, J., Lora, A., Taguas, E. V., Ayuso, J. L., ... & Tortosa, F.S. (2019). Criterios técnicos para el diseño y evaluación de cárcavas, revegetación para diversificación del paisaje, muros de contención, mejora ambiental de fuentes y abrevaderos y construcción de charcas artificiales. Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo Sostenible. Junta de Andalucía.

Gómez, J.A., & Giráldez, J.V. (2009). Erosión y degradación de suelos. En: *Sostenibilidad de la Producción de Olivar en Andalucía*. Consejería Agricultura y Pesca. Junta de Andalucía.

Gómez-Gutiérrez, A., Schnabel, S., & Lavado, 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.

Gudino-Elizondo, N., Biggs, T.W., Bigner, R.L., Yuan, Y., Langendoen, E.J., Taniguchi, K.T., ... & Liden, D. (2018). Modelling Ephemeral Gully Erosion from Unpaved Urban Roads: Equifinality and Implications for Scenario Analysis. *Geosciences*, 8, 137-154. <https://doi.org/10.3390/geosciences8040137>

Guerra, A.J.T., Bezerra, J.F.R., Fullen, M.A., Mendonça, J.K.S., & Jorge, M.C.O. (2015). The effects of biological geotextile on gully stabilization in Sao Luis, Brazil. *Nat. Hazards*, 75, 2625-2636. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1449-0>

Heede, B.H. (1975). Gully development and Control. USDA Forest Service, RM-169. USA, Colorado.

Imwanga, F.M., Vandecasteele, I., Trefois, P., Ozer, P., & Moeyersons, J. (2015). The origin and control of mega-gullies in Kinshasa (DR Congo). *Catena*, 125, 38-49. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.09.019>

INES, Inventario Nacional de Erosión de Suelos (2006). Provincial de Jaén, escala 1:250.000. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Madrid, 398 pp.

Jungerius P.D., Matundura, J., & Van de Ancker, J.A.M. (2002). Road construction and gully erosion in West Pokot, Kenya. *Earth Surf. Process. Landforms*, 27, 1237-1247. <https://doi.org/10.1002/esp.423>

Karlen, D.L., Ditzler, C.A., & Andrews, S.S. (2003). Soil quality: why and how? *Geoderma*, 114, 145-156. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00039-9](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00039-9)

Katz, H.A., Daniels, J.M., & Ryan, S. (2014). Slope-area threshold of road-induced gully erosion and consequent hillslope-channel interactions. *Earth Surf. Process. Landforms*, 39, 285-295. <https://doi.org/10.1002/esp.3443>

Knappen, A., Poesen, J., Govers, G., & De Baets, S. (2008). The effect of conservation tillage on runoff erosivity and soil erodibility during concentrated flow. *Hydrol. Process.* 22, 1497-1507. <https://doi.org/10.1002/hyp.6702>

Léonard, J., & Richards, G. (2004). Estimation of runoff critical shear stress for soil erosion from soil shear strength. *Catena*, 57, 233-249. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2003.11.007>

MAGRAMA (2015). Encuesta sobre superficies y rendimientos de los cultivos. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Madrid, España.

MAPAMA (2016). Estadísticas 2015. Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio ambiente. Madrid, España.

Martínez-Menes, M. R., Rubio-Granados, E., Oropeza, J. L., & Palacios-Espinosa, C. (2009). Control de cárcavas. *Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación*.

Michigan Department of Environment, Great Lakes and Energy (2012). *Best Management Practices Manual. Riprap-Stabilized Outlet (v2012.12.5)*.

Michigan Government (1997). BMP-Riprap description. https://www.michigan.gov/documents/deq/deq-wb-nps-rip_250895_7.pdf

Milgroom, J., Garrido, J.M., Soriano, M.A., Gómez, J.A. y Fereres, E. (2006). *Erosión en olivar ecológico. Manual de campo. Diagnóstico y recomendaciones*. (2ª. ed.). Sevilla: Conserjería de Agricultura y Pesca de la Junta de Andalucía.

Ministerio de Fomento (2016). Norma 5.2-IC Drenaje Superficial de la Instrucción de Carreteras. Madrid, 182 pp.

Mongil, J., Navarro, J., & Díaz, V. (2015). Esquema ecológico aplicado a una restauración forestal en cárcavas de la Sierra de Ávila (centro de España). *Madera y bosques*, 21(1), 11-19. <https://doi.org/10.21829/myb.2015.211429>

Montgomery, D.R. (1994). Road surface drainage, channel initiation, and slope instability. *Water Resources Research*, 30, 1925-1932. <https://doi.org/10.1029/94WR00538>

MOPU, Ministerio de Obras Públicas (1990). Instrucción 5.2. IC de Drenaje superficial – derogada. Madrid, 79 pp.

Norris, J. E., Stokes, A., Mickovski, S. B., Cammeraat, E., Van Beek, R., Nicoll, B. C., & Achim, A. (2008). *Slope stability and erosion control: ecotechnological solutions*. Springer, Dordrecht.

NRCS, Natural Resources Conservation Service (2012). Rock Outlet Protection. United States Department of Agriculture. Available online at <http://websoilsurvey.nrcs.usda.gov/>

NRCS, Natural Resources Conservation Service (2018). Riprap-lined outlet protection. https://efotg.sc.egov.usda.gov/references/public/WV/WVENG_DN_RLOP_0818f.pdf

Nyssen, J., Poessen, J., Moeyersons, J., Luyten, E., Veyret, M., Deckers, J., ... & Govers, G. (2002). Impact of Road Building on Gully Erosion Risk: A case study from the northern Ethiopian Highlands. *Earth Surf. Process. Landforms*, 27, 1267-1283. <https://doi.org/10.1002/esp.404>

Perales, A. F. (2019). *Pérdida de suelo por erosión hídrica aplicando el modelo Rusle en la cuenca del río Supte Grande, provincia Leoncio Prado-Huánuco*. Universidad Nacional Agraria de la Selva, Tingo María (Perú).

Poesen, J., Nachtergaele, J., Verstraeten, G., & Valentin, C. (2003). Gully erosion and environmental change: importance and research needs. *Catena*, 50(2-4), 91-133. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(02\)00143-1](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(02)00143-1)

Rivera-Posada, J. H. (1998). Control de cárcavas remontantes en zonas de ladera mediante tratamientos biológicos. *Avances Técnicos Cenicafé*, 256(8).

Romero, P., Castro, G., Gómez, J. A., y Fereres, E. (2007). Curve Number Values for Olive Orchards under Different Soil Management. *Soil Science Society of America Journal*, 71, 1758–1769. <https://doi.org/10.2136/sssaj2007.0034>

Romero-Coronas, F. (2019). *Restauración de cuencas de olivar afectadas por erosión en Cárcavas*. Trabajo Fin de Máster, Universidad de Jaén.

Rodríguez-Lizana, A., Ordóñez, R., & Gil, J. (2007). Cubiertas vegetales en olivar. *Consejería de Agricultura y Pesca, Junta de Andalucía*. Recuperado de: https://www.juntadeandalucia.es/export/drupalajda/1337161293CUBIERTAS_VEGETALES_9-07_mod_por_JMD.pdf

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

Saá-Yáñez, L. M. (2019). *Erosión por cárcavas en olivar: proyecto de restauración de la cuenca del Arroyo Ibros (Ibros, Jaén)*. Máster en Análisis, Conservación y Restauración de Componentes Físicos y Bióticos de los Hábitats. Centro de Estudios de Postgrado. Universidad de Jaén.

Sánchez-González, M. J. (2019). *Aplicación de modelos hidrológicos al análisis de erosión por cárcavas en el olivar*. Trabajo fin de grado. Universidad de Jaén, España.

Seutloali, K.E., Beckedahl, H.R., Dube, T., & Sibanda, M. (2016). An assessment of gully erosion along major armoured roads in south-eastern región of South Africa: a remote sensing and GIS approach. *Geocarto International*, 31, 225-239. <https://doi.org/10.1080/10106049.2015.1047412>

Stokes, A., Spanos, I., Norris, J.E., & Cammeraat, E. (2004). *Eco and Ground Bio-Engineering: The Use of Vegetation to Improve Slope Stability*. Springer, Dordrech, 420 pp.

Thompson, P. L., & Kilgore, R. T. (2006). *Hydraulic Design of Energy Dissipators for Culverts and Channels: Hydraulic Engineering Circular Number 14*, Third Edition. Federal Highway Administration, Washington, D.C.

USDA, United States Department of Agriculture (1986). Urban hydrology for small watersheds, *Technical Release, 55*, Natural Resources Conservation Service, Washington, D.C. Recuperado de https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb1044171.pdf

Valentin, C., Poesen, J., & Li, Y. (2005). Gully erosion: Impacts, factors and control. *Catena*, 63(2-3), 132-153. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.06.001>

Villamarín, S. (2013). Manual básico de diseño de estructuras de disipación de energía hidráulica. *Trabajo de fin de grado, Escuela Politécnica del Ejército*.

Zúñiga, J. (2011). *Diseño de obras de conservación de suelos para el manejo de aguas superficiales y control de cárcavas en el cultivo de piña*. Trabajo de grado. Instituto Tecnológico de Costa Rica.

8. ANEXOS

8.1. Resumen de las asignaturas del Máster

- **Técnicas geomáticas aplicadas al medio natural (GIS, teledetección y cartografía geoambiental).** Estudio y uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para la gestión de los recursos naturales. Esta asignatura comprende: técnicas geomáticas de captura de datos, georreferenciación, análisis de imágenes, desarrollo de modelos digitales de superficies y del terreno. Destaca la importancia del uso de softwares informáticos, como ArcGis y QGIS.
- **Recursos hídricos y ecosistemas acuáticos.** En esta asignatura hemos aprendido fundamentalmente a realizar un balance hídrico, características del agua y las técnicas para su análisis, los posibles problemas en estos sistemas y planes de restauración. También se ha tratado la gestión hidrogeológica de los acuíferos kársticos, detríticos y humedales. Otros temas atendidos en la asignatura: uso de indicadores físico-químicos de la calidad de las aguas subterráneas, principios generales de sostenibilidad en los ecosistemas acuáticos y su problemática ambiental.
- **Métodos avanzados de análisis de datos ambientales.** El análisis avanzado de los datos ambientales se ha llevado a cabo mediante el empleo de diversas herramientas, como Rstudio, Past, Spss, Surfer y RapidMiner, con el objetivo de interpretar los resultados ambientales obtenidos. La importancia de realizar un buen diseño experimental es señalada y se lleva a cabo una introducción en la estadística multivariante.
- **Caracterización de los componentes físicos del hábitat.** En esta materia se realiza una introducción al material e interpretación de los resultados obtenidos a partir de las diferentes técnicas analíticas, como son las técnicas espectroscópicas, análisis geoquímico de muestra total, técnicas para la caracterización de la materia orgánica y técnicas de microscopía electrónica.
- **Conservación y restauración de sistemas terrestres.** Aprendizaje sobre diferentes medidas y estrategias a seguir para producir una reducción en los impactos negativos sobre los sistemas terrestres. También se estudia cómo llevar a cabo una explotación sostenible de los recursos geológicos. Otro de los temas tratados en esta asignatura es la erosión del suelo, los tipos de erosión existentes, medidas de estabilización de taludes y conservación de laderas, estrategias de restauración de los terrenos en los que existe una degradación.
- **Caracterización de los elementos bióticos del hábitat.** En esta materia se lleva a cabo un análisis de los métodos de muestreo, medida y estimación de poblaciones de

seres vivos. Proporciona información general de los ecosistemas, como algunas técnicas de gestión, cartografía y leyes (Red Natura 2000; Directiva Hábitat).

- **Modelización de la distribución potencial de especies y hábitats.** Se tratan temas relacionados con la dinámica de las especies y se estudia la elaboración e interpretación de modelos geográficos de distribución de especies a partir de softwares estadísticos (Rstudio). Con el software Rstudio, junto con la herramienta GBIF, se generan modelos de distribución de diferentes tipos (Domain, GLM, Bioclim, Mahalanobis, etc.).
- **Explotación sostenible de suelos y agroecosistemas.** En esta asignatura se aborda la identificación de agroecosistemas y los síntomas que presentan ocasionados por la sobreexplotación. Aprendizaje sobre métodos para mejorar la sostenibilidad de los agroecosistemas, análisis sobre las necesidades o problemas presentes en un suelo y búsqueda de las mejores soluciones para cada tipo de suelo.
- **Geomorfología fluvial y análisis de inundaciones.** En esta materia se aborda la dinámica fluvial de manera general, llevando a cabo un estudio sobre la morfodinámica, la sedimentología y la geomorfología fluvial. Mediante el uso del software Iber se elaboran análisis estadísticos de inundaciones y simulaciones para poder prevenir inundaciones futuras.
- **Invasiones biológicas.** Estudio sobre especies exóticas invasoras y la amenaza que representan para la biodiversidad. Análisis sobre las especies invasoras contenidas en el Catálogo Nacional de Especies Invasoras, situación actual, problemática y medidas de control.
- **Técnicas de conservación de flora amenazada.** El objetivo de esta asignatura es familiarizarnos con las especies vegetales de los principales ecosistemas, además de conocer sus principales riesgos y las especies consideradas como amenazadas o en riesgo. También se aborda la gestión sostenible de estas especies y medidas de conservación dependiendo del tipo de especie.
- **Técnicas de conservación de fauna amenazada.** En esta materia se tratan las amenazas reales y potenciales que pueden afectar a diferentes grupos de animales que están en peligro de extinción, al igual que las amenazas específicas de cada especie y la erradicación o solución de las consecuencias de estas amenazas.

8.2. Curriculum Vitae

FORMACIÓN ACADÉMICA

GRADO: Ciencias Ambientales

CENTRO: Facultad de Ciencias Experimentales-Universidad de Jaén

ACTIVIDADES ANTERIORES DE CARÁCTER CIENTÍFICO O PROFESIONAL

- Posición: Becas Ícaro
Institución: TORREDONJIMENO SDAD. COOP. AND.
Curso: 2017/2018
- Posición: Becas Ícaro
Institución: TORREDONJIMENO SDAD. COOP. AND.
Curso: 2018/2019

ESTANCIAS EN OTROS CENTROS DE FORMACIÓN

- Estancia de 6 meses de duración en la Universidad de Évora (Portugal)

FORMACIÓN COMPLEMENTARIA

- CURSO EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA: ANÁLISIS TERRITORIAL CON QGIS
Organizado por la Spin-Off de la UGR GIS4tech, con una duración de 50 horas (12 horas presenciales, 12 horas online y 26 horas de trabajo autónomo) y realizado en Granada entre Marzo y Mayo de 2020
- CURSO EN CONSTRUCCIÓN Y FABRICACIÓN SOSTENIBLE. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA
- ACREDITACIÓN DE NIVEL DE INGLES: A través de Aptis nivel B2
- PROGRAMA SMALL WORLD INITIATIVE
Para el descubrimiento de nuevas cepas microbianas productoras de antibióticos y la difusión del uso racional de antimicrobianos.
- CURSO DE FORMACIÓN EDUCACIÓN Y VOLUNTARIADO AMBIENTAL (UNIVERSIDAD DE JAÉN)
- CURSO DE FORMACIÓN "RECAPACICLA" (UNIVERSIDAD DE JAÉN)