



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Centro de Estudios de Postgrado

Trabajo Fin de Máster

ANÁLISIS DE EROSIÓN HÍDRICA DE SUELOS: AVANCE DE CÁRCAVAS EN OLIVARES

Alumno/a: Da Costa Ribeiro, Aline

Tutor/a: Prof. D. Julio Antonio Calero González

Dpto: Geología

UNIVERSIDAD DE JAÉN
Centro de Estudios de Postgrado
Facultad de Ciencias Experimentales

Trabajo de Fin de Máster para la obtención del título de Máster en Análisis,
Conservación y Restauración de Componentes Físicos y Bióticos de los Hábitat

Título

ANÁLISIS DE EROSIÓN HÍDRICA DE SUELOS: AVANCE DE CÁRCAVAS EN OLIVARES

Alumno

Aline Da Costa Ribeiro

Tutor

Julio Antonio Calero González

Integrantes del tribunal

Fecha de aprobación

Dedicatoria

A mi luz.

Soy grata a ti por todo el amor y los ensañamientos.
Abuela Alvina, te quiero y echo de menos por toda la eternidad.

Agradecimientos

A Dios, por las bendiciones. Gracias por la fe que me lleva a acreditar que hay un propósito para todo lo que acontece en la vida.

A mi familia por el amor que siempre acoge y por la motivación para superar los desafíos. No hay palabras suficientes para agradecer todo lo que ustedes hicieron y hagan por mí.

A la Universidad de Jaén por la oportunidad de estudiar el Máster y por la concesión de la Beca de Atracción de Talento.

A la coordinación y los profesores del Máster no sólo por la dedicación en transmitir conocimientos, cómo también por la disponibilidad en ayudar y solucionar problemas.

Al tutor Julio Calero y al profesor Tomás Fernández del Castillo por las orientaciones al largo de la elaboración de ese trabajo.

A María del Carmen Vico Zafra y Theo Guerra Dug por las instrucciones en el grupo de investigación y toda la ayuda en las actividades de campo de ese trabajo, respectivamente.

A Victoria Vera, Vanessa Cury, Pollyanna Belchior, Iasmine Melo y Durce Coelho que fueron, al largo del curso académico, ángeles con sus palabras y abrazos en los momentos alegres y tristes. Gracias por la amistad que llevo para la vida.

Contenidos

Resumen.....	6
<i>Abstract</i>	6
1. INTRODUCCIÓN	7
1.1 Concepto e interés ambiental del suelo	7
1.2 Formación y composición del suelo	7
1.3. Erosión del Suelo.....	8
1.4 Erosión hídrica del suelo	10
1.5 Erosión en Cárcavas.....	12
2. ANTECEDENTES	14
2.1 Uso agrícola (Olivar) y erosión de suelos	14
2.2. Métodos de Estimación de Erosión Hídrica de Suelos	18
2.3 Hipótesis del Trabajo	25
3. OBJETIVOS	26
4. MATERIALES Y MÉTODOS	26
4.1 Área de estudio	26
4.2. Metodología	27
4.2.1 Densidades lineales	27
4.2.2 Estimación de la pérdida de suelo en cárcavas	28
4.2.3 Parámetros de resistencia y esfuerzo crítico cortante del suelo	30
4.2.4 Tasa de pérdida de suelo por método USLE	32
5. RESULTADO Y DISCUSION	34
5.1 Densidades lineales de cárcavas.....	34
5.2. Estimación de pérdida de suelo en cárcavas con método de distanciometría a láser.....	38
5.3 Pérdida de suelo estimada con el método USLE	47
5.3 El control de cárcavas.....	49
6. CONCLUSIONES	51
7. REFERENCIAS	52
8. APÉNDICE	61
8.1 Apéndice I (Tablas).....	61
8.1 Apéndice II (Figura)	64
9. ANEXOS	65
9.1 Anexo I (Resumen de las asignaturas)	65
9.2. Anexo II (<i>Curriculum Vitae</i>)	67

Resumen

La erosión hídrica acelerada puede provocar incisiones en el suelo que no son eliminadas por laboreo, las cárcavas. La topografía, la erosividad de la lluvia, las características naturales del suelo y el uso del paisaje influyen en la formación y en el avance de las cárcavas.

La evaluación de la pérdida de suelo puede ser realizada por métodos cualitativos y cuantitativos. Ese trabajo comprobó un crecimiento de la erosión en longitud tras el evento pluviométrico atípico en invierno severo. Con el uso de ortofotos de sitios con cultivo de Olivar fueron determinadas las densidades lineales de cárcavas en el software libre QGIS. Además, fueron cuantificadas la pérdida de suelos por erosión, en $t\ ha^{-1}\ año^{-1}$, mediante distancimetría láser y USLE y analizados parámetros de resistencia y esfuerzo crítico cortante del suelo. Tras determinar las densidades lineales, el incremento en la red de cárcavas fue de 44,69 % y 195,04%. En tres cárcavas estudiadas, las pérdidas de suelos estimadas por distancimetría láser son mayores que estimadas en USLE. La pérdida de suelo por cárcavas puede producir daños ambientales y socioeconómicos.

Palabras claves: Cárcavas, densidades lineales, distancimetría láser, USLE.

Abstract

The accelerated water erosion can cause incisions in the soil that aren't eliminated by tillage, the Gullies. The topography, the rainfall erosivity, the natural characteristics of the soil and the use of the landscape influence in the formation and the advancement of the Gullies. The evaluation of soil loss can be carried out by qualitative and quantitative methods. This work verified a growth of the length eroded after the atypical rainfall event in the severe winter. With the use of orthophotos of sites with olive cultivation groves were determined the linear densities of gullies in the free software QGIS. In addition, erosion soil loss was quantified in $t\ ha^{-1}\ año^{-1}$, by means of the distance laser meter and USLE and analysed parameters of resistance and cutting critical effort of the soil. After determine the linear densities, the increase in the gullies network was 44.69% and 195.04%. In three gullies studied the losses of soils estimated by means of the Laser Distancemeter are higher than estimated in USLE. Soil loss by gullies can cause environmental and socioeconomic damage.

Keywords: Gully, linear densities, Laser Distancemeter, USLE.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Concepto e interés ambiental del suelo

Las ideas sobre las tierras o suelos que existían en el siglo XVIII fueron sustituidas por principios de mayor consistencia científica, destacando el impulso definitivo para constituir el estudio del suelo en un cuerpo de doctrina autónomo en Rusia a finales del XIX y principios del XX por Dokychaev y sus discípulos, que fijaron las bases científicas sobre las que se apoyaría el futuro desarrollo de la edafología (Visqueira, 2011).

Un suelo puede ser considerado como un producto biogeoquímico natural modificado por meteorización (concepto geológico), y como un hábitat para el desarrollo de las plantas (concepto edafológico), o sea, el suelo es cuerpo natural compuesto de material mineral y orgánico que se forma como respuesta a diversos factores ambientales y procesos que actúan y cambian el suelo permanentemente (Gisbert y Ibáñez, 2002).

El objetivo principal de la investigación en la ciencia del suelo es la comprensión de la naturaleza, propiedades, dinámicas y funciones del suelo como parte del paisaje y los ecosistemas (FAO, 2009).

Los suelos, como parte de los ecosistemas y de los agroecosistemas, prestan importantes funciones o servicios que mantienen a estos y que apoyan las actividades sociales y económicas de las personas, cómo: la 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 y entorno físico y cultural para la humanidad (Orjuela, 2016).

En ese sentido, investigaciones en suelos deben diagnosticar y estimular la conservación del paisaje. El conocimiento de las características del suelo es oportuno para subsidiar el pensamiento que busca mitigar procesos de degradación, como la erosión.

1.2. Formación y composición del suelo

El material parental se refiere a la masa no consolidada a partir de la cual el suelo se desarrolla. En general, el material de origen de los suelos puede agruparse en cuatro clases: i) las que se forman en lugar de la desintegración y descomposición de rocas duras., ii) aquellos formados en lugar de rocas blandas o no consolidadas., iii) aquellos que han sido transportados desde el lugar de origen y depositados antes de someterse a modificaciones importantes por fuerzas de construcción del suelo o durante tales procesos de modificación, y iv) depósitos orgánicos (U.S Department of Agriculture, 2002).

La roca, principal material de origen, es descompuesta por la acción del clima (lluvia, viento y temperatura, principalmente) con ayuda de los organismos vivos (hongos, líquenes, bacterias, el propio hombre, y otros), promoviendo adiciones, pérdidas, transportes y transformaciones de materia mineral y orgánica a lo largo de su formación, originando los suelos en el paisaje en diversas formas de relieve (Coelho *et al.*, 2013).

En la mayoría de los suelos, las partículas sólidas consisten principalmente en materia mineral, con aproximadamente 1 a 10 % de materia orgánica. La disposición de partículas se llama matriz sólida, entre la que se sitúa los espacios de poros. Aproximadamente la mitad del volumen del suelo es material sólido y la otra mitad es espacio poroso, siendo ésta una buena proporción para el crecimiento de la planta (Plaster, 2014).

La composición mineral del suelo influencia en sus propiedades. Los agregados compuestos de partículas fina (arcillas y limos) tienden a desmenuzarse y a cerrar los poros del suelo, impidiendo así el movimiento de agua incluso en la superficie del suelo. Caso contrario sucede con las arenas, estas conservan su tamaño y estabilidad en sus poros, teniéndose así tasas altas de infiltración durante tiempos prolongados (Ramírez, 2016).

La materia orgánica de suelo (MOS) está formada por carbono (52 - 58%), oxígeno (34 - 39%) y nitrógeno (3,7 - 4,1%) y en menor proporción por S, P, B, K, Ca, Mg, Fe, Mo y otros. En la evolución de la MOS caben distinguir los procesos de fragmentación, descomposición, mineralización y humificación (Porta *et al.*, 2014).

La materia orgánica participa en numerosos procesos geoquímicos que inciden en la productividad y preservación de los ecosistemas terrestres, y particularmente estabiliza el suelo frente a la erosión y mediatiza la ecodinámica de contaminantes orgánicos e inorgánicos (Dávila, 2006).

1.3. Erosión del Suelo

La erosión es el desgaste de la superficie terrestre ocasionado por el agua (erosión hídrica) y el aire (erosión eólica) que arrancan y transportan las partículas de suelos, así como por movimientos de la masa del suelo provocados por desequilibrios gravitacionales (erosión en masa). En la erosión natural suele ocurrir que la velocidad de formación del suelo compensa las pérdidas sufridas por arrastre. Este equilibrio se rompe cuando el hombre destruye zonas de vegetación natural y trata inadecuadamente a los suelos cultivados, con lo cual se incrementa la acción erosiva del agua y del aire, llegando a provocar en ocasiones la desaparición del suelo. Este tipo de erosión originada por el hombre se llama erosión acelerada (Yangué, 2002).

Esta erosión acelerada o antrópica es la que desencadena la pérdida no sostenible del suelo, lo que reduce la fertilidad edáfica y altera sus funciones como regulador del ciclo hidrológico, del ciclo del nitrógeno, del carbono o del reciclaje de la materia mineral. La erosión de los suelos también afecta a zonas alejadas de las zonas de remoción, ya que allí donde se produce el transporte hay cambios evidentes en las formas (incisión o agradación) (Cerdá y Bodí, 2008).

Los factores responsables de la erosión son de tipo climático, topográfico y antrópico. La escasez de precipitaciones y su distribución irregular en el espacio y en el tiempo dificultan el desarrollo de una cubierta vegetal que proteja el suelo. También la topografía del terreno condiciona los efectos de los agentes erosivos. En los suelos desarrollados en pendiente, estos efectos suelen aparecer con mayor rapidez e intensidad que en los de zonas llanas (Aranda, 2006).

La erosión del suelo es universalmente reconocida como una amenaza seria a los recursos de la tierra. Tiene impactos geomorfológicos, pedológicos, ecológicos, sociales y económicos. El suelo es un recurso natural no renovable, mientras que la erosión del suelo es una de las principales causas de su degradación (Nabi *et al*, 2008). A nivel global, es uno de los fenómenos de degradación ambientales más preocupantes (Boardman y Poesen, 2006). Supone una pérdida de entre 3 y 11 millones de toneladas de tierra fértil al año (entre 2 y 10 veces la tasa natural). El porcentaje de la superficie arable degradada a nivel mundial por la erosión se estima en 1.640 millones de hectáreas (17% de la superficie emergida). Eso supone un 39% del total de las tierras potencialmente aptas para la agricultura en el mundo. El porcentaje de tierra afectada por erosión aumentó un 40% desde 1970 hasta 2000 y una de cada seis hectáreas afectadas por la erosión ha perdido ya completamente la capacidad de soportar cultivos (Lal, 1998).

Una extensa superficie de España cuenta con suelos muy vulnerables a los procesos de erosión por la combinación de factores naturales (frecuencia de eventos meteorológicos extremos, relieves con fuerte pendiente, suelos con débil estructura, bajo contenido en materia orgánica y alta erosionabilidad, acumulación de sales en sus horizontes superficiales y baja actividad biológica), y humanos (una larga historia de perturbaciones y presiones sobre los sistemas naturales) que han favorecido que el riesgo de erosión potencial sea elevado y que las tasas actuales de pérdida de suelo estén frecuentemente muy por encima de la tasa de regeneración (Bermúdez y Ruiz, 2008).

En ese sentido, en condiciones naturales, los procesos responsables de la formación de los suelos y aquellos responsables de su destrucción por erosión, alcanzan un equilibrio tal que asegura el mantenimiento de una capa superficial de suelo capaz de soportar una cubierta

vegetal estable. La ruptura del equilibrio suelo-vegetación-clima, debido a las actividades humanas puede llegar a desencadenar la degradación irreversible del suelo y limitar tanto su potencial productivo agro-forestal como su capacidad de regeneración y soporte de ecosistemas naturales (Alonso, 2002).

El mapa de niveles erosivos elaborado por el Gobierno de España en 2017 (Figura 1) representa las clases de erosión que fueron definidas con valores obtenidos, con método de la ecuación revisada de pérdida de suelo (RUSLE), en las parcelas de muestreo para los factores cultivo, pendiente, litofacies-erosionabilidad y agresividad de la lluvia. La región que concentra más territorios con pérdidas de suelos en la clase $>200 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ está al sur de la península, en la Andalucía.

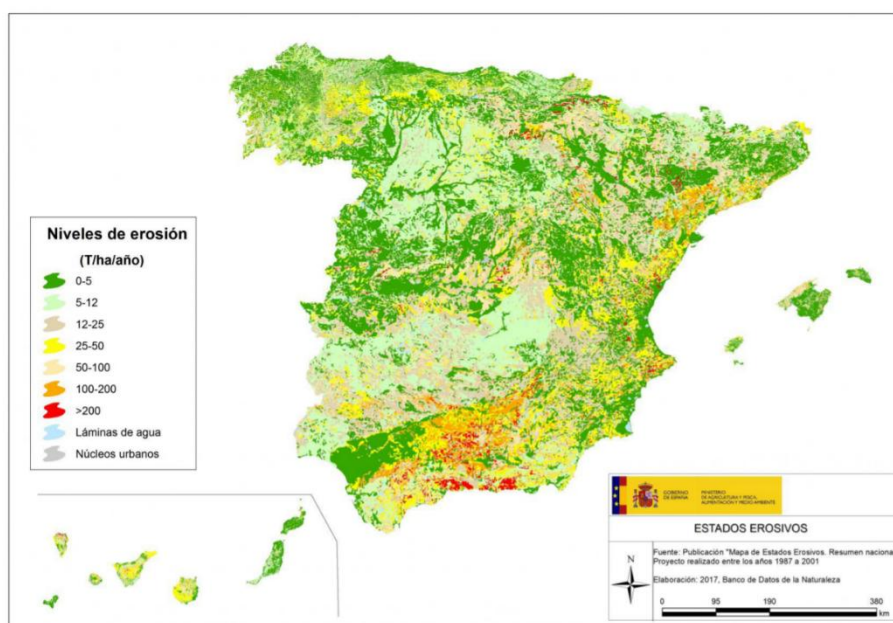


Figura 1. Mapa de Estados Erosivos Península y Baleares (Gobierno de España, 2017)

1.4 Erosión hídrica del suelo.

La erosión hídrica ocurre cuando el agua de lluvia desprende las partículas de los agregados en la superficie del suelo y estos son arrastrados por la escorrentía superficial. Conforme aumenta la carga hidráulica del flujo sobre la superficie, se ejercen fuerzas mayores y la erosión del suelo puede ocurrir aún en pendientes suaves, estas condiciones son comúnmente encontradas en las zonas secas y semiáridas (Osti *et al.*, 2007).

Porta *et al.* (2003), Yangué (2002), Tánago (1991), Florenzano (2008), Silva (1995) y García-Fayos (2004) describen factores que condicionan la erosión hídrica del suelo: la naturaleza del suelo, la helada, la lluvia, la pendiente del terreno y la cubierta vegetal.

Las características de la lluvia, permiten explicar su efectividad potencial en la erosión del suelo. La distribución de tamaños de gotas afecta a la erosividad de la lluvia, ya que junto con la velocidad de caída determina la energía cinética de la lluvia (Porta *et al.*, 2003).

Además, las mismas condiciones de erosividad de las lluvias pueden producir erosiones diferentes según las características del suelo sobre el que actúan. Así se reconocen una serie de características del propio suelo que determinan su erosionabilidad o vulnerabilidad a la erosión, relacionadas con su textura, estructura, contenido de materia orgánica y permeabilidad (Tánago, 1991).

La arena fina y el limo son arrastrados con facilidad. Los suelos arcillosos se disgregan con dificultad, por lo que resultan poco erosionables. En los suelos con buena estructura la disgregación provocada por el impacto de las gotas de lluvia es mucho menos intensa que en los suelos con mala estructura. En los suelos compactados la velocidad de infiltración es escasa, lo que incrementa la escorrentía y el riesgo de erosión. Otro aspecto está relacionado con el agua al helarse, que deshace los agregados en partículas más pequeñas y pueden ser arrastradas con mayor facilidad (Yangue, 2002).

La pendiente, orientación y extensión de la vertiente son las principales variables morfológicas que condicionan el tipo y la intensidad de los procesos erosivos. En las vertientes con forma rectilínea, el predominio del tipo de erosión dependerá de la extensión y de la declividad, mientras que los sectores cóncavos tienden a concentrar el flujo superficial que favorecen la erosión en surcos y las vertientes convexas dispersan el flujo superficial, promoviendo la erosión laminar (Florenzano, 2008). La pendiente del terreno influencia positivamente en la velocidad y en el volumen de la escorrentía, intensificando la erosión (Silva, 1995).

La vegetación influye en la erosión hídrica por promover la interceptación en las hojas de la lluvia, la redistribución de las precipitaciones en el suelo por traslocación, escorrentía cortical y por infiltración. Es posible ocurrir la erosión por salpicadura. Además, la vegetación incorpora los restos orgánicos al suelo durante la edafogénesis, fijan el suelo con sus raíces y contribuyen a la formación de agregados estructurales del suelo. Cuanto mayor sea la proporción de partículas del suelo que estén agregadas, menores serán las pérdidas por erosión y cuanto más fuerte sea la unión entre los distintos agregados y entre los componentes de los agregados, menor será su susceptibilidad a ser rotos por el impacto de las gotas o a ser arrastrados por el agua de escorrentía (García-Fayos, 2004).

Cuando el proceso erosivo se realiza por arrollada superficial puede ocurrir erosión laminar, surcos, regueros, cárcavas y barrancos.

- Laminar o entre-regueros (entre surcos): es debida al impacto de la lluvia y al posterior transporte del suelo, disgregado por un flujo superficial poco profundo y homogéneo.,
- Regueros o surcos: el flujo suelo-agua escurre concentrado en microcorrientes capaces de abrir pequeños surcos. La concentración de las aguas al escurrir por la superficie obedece, fundamentalmente, a las irregularidades y rugosidades del terreno, así la presencia de un obstáculo en medio del flujo de agua motiva una concentración de los microregueros de agua y forma un remolino aguas abajo del obstáculo que provoca la excavación en su base y el inicio de un reguero de mayor tamaño.
- Cárcavas y barrancos: son cauces con fuertes pendientes y encajados, con altas tasas de erosión en materiales finos y escasa ratio anchura-profundidad. Suelen originar complejas redes de drenaje.

Merritt *et al.*, (2003)

Las respuestas de los geosistemas y de los suelos a los procesos de erosión hídrica se expresa de múltiples y diversas maneras, además de la pérdida del suelo, puede perder completamente su capacidad productiva, ocurre arrastre y pérdidas de semillas y nutrientes, aumento de la pedregosidad y el afloramiento en superficie de capas más profundas del suelo, incisiones de diversa magnitud en el terreno, hundimientos, socavones y subfusión, creación de costras laminares e impactos fuera del área afectada directamente por incrementar la escorrentías superficiales y con potencial de incrementar sedimentos en humedales (Bermúdez, 2002).

Además de la contaminación de las aguas por sedimentos, Zertuche *et al.*, (2015) describe que en áreas con sistemas agrícolas se produce contaminación de los ríos y lagos debido al uso de químicos que son rociados en la vegetación y conducidos por la escorrentía.

En la vertiente norte como en la sur del Mediterráneo, el paisaje refleja el deterioro de muchos suelos y, en no pocas ocasiones, una degradación irreversible a escala temporal humana: matorrales abiertos, laderas desnudas, áreas de cárcavas, suelos muy pedregosos por exportación de las partículas finas, barranqueras en laderas, conos de deyección funcionales, llanuras aluviales inestables, son algunas de las evidencias de la acción de la lluvia y de la escorrentía superficial (Bermúdez y Ruiz, 2008).

1.5 Erosión en Cárcavas

Diversos autores (Poesen *et al.*, 2003., Valentin *et al.*, 2005) ponen de manifiesto que la erosión en cárcavas podría explicar entre el 50 y el 90% de la erosión total producida a nivel

de cuenca. Se trata, por tanto, de un proceso erosivo altamente relevante, si bien no han recibido tanta atención como otros procesos debido la dificultad de su estudio. La erosión en cárcavas está considerada a día de hoy como uno de los procesos de degradación del suelo más importantes a nivel mundial (Castillo y Gómez, 2016). La erosión de cárcavas no es un proceso limitado a las regiones montañosas y *badlands*, todavía es globalmente una seria causa de degradación de amplia variedad de suelos propensos a la formación de costras y / o túnel (*piping*) (Valentin *et al.*, 2005).

Por cárcava se entiende una incisión en el terreno provocada por el flujo del agua. La distinción entre surco y cárcava se suele basar en una división arbitraria en función de su tamaño. Si considerará surco toda aquella incisión en el terreno de pequeño tamaño (entre 5 y 40 cm de anchura y de profundidad inferior a 20 cm), en ocasiones discontinua y que suele desaparecer con el tiempo debido a las operaciones habituales de cultivo. Una cárcava, por el contrario, es de mayores dimensiones, no desaparece con las operaciones habituales de cultivo y en bastantes ocasiones suele formar una estructura continua (Gómez *et al.*, 2011).

La literatura considera otras nomenclaturas para regueros, como Casalí *et al.*, (1999) utiliza el termo “cárcavas efímeras” como las que son frecuentemente eliminadas o enmascaradas por el laboreo y que tienden a aparecer repetidamente en las mismas posiciones año tras año.

Las cárcavas están, casi siempre, asociadas a una erosión acelerada y, por tanto, a paisajes inestables. En la formación de las cárcavas, inicialmente, pequeñas depresiones en la ladera resultan de un debilitamiento localizado de la cobertura vegetal. El agua se concentra en estas depresiones y las aumenta hasta que varias depresiones se unen y se forma un cauce incipiente. La erosión se concentra en la cabecera de la depresión, donde forma escarpes casi verticales en los que se produce flujo supercrítico. Otro modelo por el que se inicia la formación de cárcavas es donde desplazamientos lineales del suelo dejan profundas cicatrices que pueden ser ocupadas por el agua en movimiento durante las siguientes tormentas (Morgan, 1997).

Los factores físicos que favorecen el crecimiento de las cárcavas son el tamaño y la forma del área de drenaje de la cárcava, la topografía (longitud y grado y forma de la pendiente) y las propiedades físicas de los suelos, especialmente aquellos que forman grietas cuando secos (Menes *et al.*, 2009).

Los estudios realizados por Desmet *et al.*, 1999, sobre la previsión de iniciación y trayectoria de cárcavas, indican que los puntos en el paisaje donde las cárcavas comienzan son más controlados por el gradiente de pendiente, mientras que la presencia de concavidades, o sea, zonas donde el área contribuyente es dominante, controlan la ubicación de los cursos

de las cárcavas. Sin embargo, el gradiente de inclinación no controla realmente la ubicación de las cárcavas efímeras, excepto cuando el gradiente es muy bajo y la deposición de sedimentos prevalece. Además, las cárcavas efímeras que se producen con frecuencia en el mismo lugar no son más fáciles de prever que las cárcavas accidentales. La localización de las cárcavas observadas y que no están previstas son relacionadas con las influencias de los elementos lineales del paisaje (por ejemplo, carreteras, bordes de las parcelas, surcos muertos).

La influencia de los elementos lineales del paisaje está asociada al que afirman Menes *et al.*, (2009), Nyssen *et al.*, (2002) y Katz *et al.*, (2014): el desarrollo de infraestructura para la producción, como caminos mal trazados o sin mantenimiento preventivo, o zonas de drenaje de las cunetas, provocan la formación y crecimientos de las cárcavas cuando los escurrimientos se concentran en las zonas de ruptura.

2. ANTECEDENTES

2.1 Uso agrícola (Olivar) y erosión de suelos

La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) (2015) enfatiza que las tasas de erosión hídrica en tierras agrícolas permanecen muy altas (> de 20 toneladas ha/año).

Las pérdidas de suelo por erosión afectan a las capas más superficiales (que son más fértiles) disminuyendo el contenido en materia orgánica del suelo y con esta disminución decrece tanto la estabilidad del suelo como la capacidad de almacenamiento y de intercambio catiónico. Con la menor capacidad de retención de agua, la menor profundidad de la capa superficial (de mayor fertilidad) y el menor contenido en materia orgánica de los suelos con mayor erosión, se explican la disminución de la producción que se da en ellos (Unasur, 2004).

De Alba *et al.*, (2011) considera que el estudio sobre la pérdida de suelo en la España, realizado por el ICONA, puso en manifiesto la importancia de la degradación del suelo en los campos agrícolas, ya que el 73% de las pérdidas totales de suelo tiene lugar en los campos de agricultura extensiva de cultivos arbóreos, viñedos y herbáceos de secano, y hasta el 11% en terrenos de erial o con matorral y arbolado disperso.

El Olivar es un cultivo con capacidad para desarrollarse en suelos de poca calidad y su resistencia frente a la sequía le permite ocupar aquellos terrenos no aptos para muchos otros cultivos. Está presente en laderas con fuerte pendiente en donde la erosión ha eliminado la parte más fértil del suelo (De la Rosa *et al.*, 2010).

Todavía, el suelo adecuado para el olivo se define como aquel con profundidad efectiva superior a 0,8 m, donde el crecimiento de raíces no sea impedido por alguna capa de consistencia pétrea o nivel freático. Los suelos mullidos, de texturas franco a franco arenosas y con un contenido de materia orgánica superior al 2%, son los que representan una máxima potencialidad productiva de la especie. El rango de pH para el crecimiento del olivo es 5,5 al 8,5, con preferencia a pH superior a 7,5. El Olivo posee elevada tolerancia a la salinidad, aunque su rendimiento potencial disminuye proporcionalmente al incremento de la salinidad por encima de 4dS/m (Tapia *et al.*, 2003).

De manera simplificada se habla de cuatro grandes tipologías de olivar: tradicional de secano en fuertes pendientes (superiores al 15%), tradicional de secano, tradicional de riego y moderno de riego (más intensificado) (Gómez, 2015). El olivar en secano representa más del 77% de la superficie total destinada al cultivo del olivo en el mundo. España es el fiel reflejo de la anterior afirmación ya que, en el año 2012, el 72% de su superficie de olivar se desarrollaba en condiciones de secano (Farré, 2017).

Los olivos cultivados en España determinan de manera decisiva la disponibilidad anual de aceite y el precio del mismo a nivel global (Farré, 2017). Según la Junta de Andalucía (2002), para responder al aumento de la demanda de aceite de oliva, ocurrió la roturación de los suelos forestales y su substitución por olivar, o sea, una expansión de la superficie olivarera en suelos con cada vez mayor pendiente y más frágiles. Además, la incorporación de maquinaria y el empleo generalizado del laboreo evidenció la intensidad y amplitud de la erosión en estos olivares.

El olivar en Andalucía, aunque se trata de un conjunto heterogéneo, según Gómez (2008), presenta unas características comunes: i) gran parte del mismo está en pendiente., y ii) muchos de los suelos de olivar se clasifican con algún tipo de limitación a la producción como el aspecto poco espesor, los bajos contenidos en nutrientes o la poca capacidad de retención de agua. La densidad de plantación del Olivo es de 200 a 250 olivos/ha, con un solo pie por olivo oscilando de 70 a 80 olivos/ha plantados con 3 pies por olivo (Junta de Andalucía, 2002). El sistema de cultivo en la región es de 31% tradicional de secano en fuertes pendientes, 40% tradicional de secano, 22% tradicional de riego y 7% moderno de riego (Gómez, 2015).

Todavía, considerando las clases agrológicas de los suelos, se destaca que las provincias de Córdoba y Jaén presentan altos porcentaje, 43,9 y 48,8% respectivamente, de suelos óptimos para cultivo (clases sin restricciones y clase con restricciones factible de aplicar sistemas de laboreo) dedicados a olivar, lo que evidencia la importancia socioeconómica de este cultivo en dichas provincias andaluzas (Junta de Andalucía, 2002).

En conformidad con esa propiedad agroecología de los suelos, conforme datos de la Junta de Andalucía, las provincias de Jaén y Córdoba producirán en 2016, respectivamente, 2.402.700 t y 1.424,638 t, de aceitunas almazara (Figura 2). Además, 46% de las aceitunas de almazara, que son destinadas para la producción de aceite, producidas en la región de Andalucía en el año de 2016 fue de los olivares de Jaén (Figura 3).

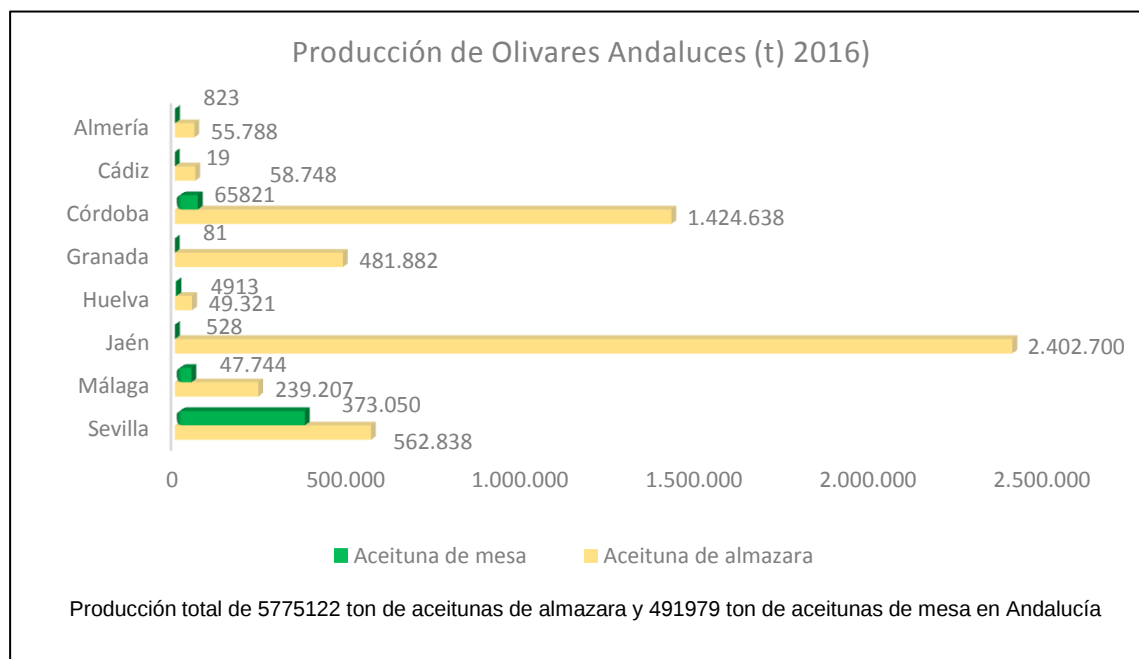


Figura 2. Producción de los Olivares de Andalucía y por provincia del año 2016. Elaborado con datos de Consejería de Agricultura, Pesca y Desarrollo Rural y disponibles por la Consejería de Economía y Conocimiento de la Junta de Andalucía

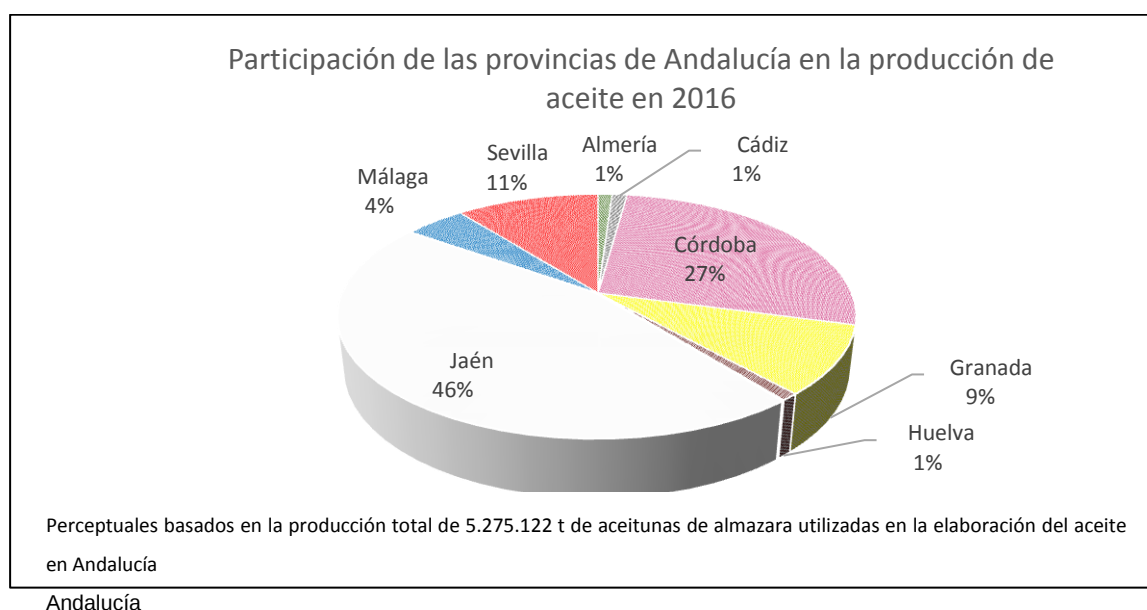


Figura 3. Producción perceptual, por provincia, de aceitunas almazara para elaboración del aceite en la Andalucía en el año de 2016. Elaborado con datos de Consejería de Agricultura, Pesca y Desarrollo Rural y disponibles por la Consejería de Economía y Conocimiento de la Junta de Andalucía

Miró y Lara (2003), elaboraran el coste agrícola por hectárea y el umbral de rentabilidad para los olivares de Jaén. Se ha calculado el umbral de rentabilidad mediante el número de kilos de producto que, teniendo en cuenta sus precios venta, cubren los costos estrictamente directos (Tabla 1). Esas informaciones, aun que cambien con el tiempo, son indicativas del potencial económico del sistema agrícola olivar.

Tabla 1. Costes total y umbral de rentabilidad de olivares de la provincia de Jaén

Cultivo	Coste total/ha	Umbral de rentabilidad	Jornales/ha ¹
Olivar campiña regadío laboreo 100 árboles/ha	1031,30	2644,35	18,03
Olivar campiña regadío laboreo 200 árboles/ha	1100,75	2822,43	15,69
Olivar campiña regadío no laboreo 100 árboles/ha	988,03	2533,41	17,73
Olivar campiña regadío no laboreo 200 árboles/ha	1037,48	2660,20	15,34
Olivar campiña secano laboreo 100 árboles/ha	1009,70	2588,97	14,5
Olivar campiña secano no laboreo 100 árboles/ha	967,34	2480,35	14,15
Olivar sierra regadío no laboreo	1167,47	2993,51	18,84
Olivar sierra secano no laboreo	919,74	2358,30	16,65

Adaptado de Miró y Lara (2003). Los costes consideran el precio de la semilla de 0,39 €.

¹ Jornales por hectárea es igual al número de horas de trabajo anuales, dividido por 6,5, duración de la jornada de trabajo según el convenio colectivo.

Diversos factores han hecho que la erosión de una cuestión muy importante para el olivar: el cultivo en zonas de elevada pendiente, la tipología del clima mediterráneo en el que alternan periodos de sequía con lluvias en gran intensidad en cortos periodos de tiempo: suelos arcillosos con baja velocidad de infiltración y otros. Junto a estos factores intrínsecos del medio natural, determinadas prácticas agrícolas, especialmente el laboreo, han influido en la aceleración del proceso erosivo. Así pues, la erosión del suelo en el Olivar debe ser considerada como uno de los problemas más importantes en la olivicultura (Unasur, 2004). La mayoría de los estudios de erosión hídrica en olivar se han efectuado mediante medidas empíricas a escala de parcela (Gómez *et al.*, 2004, 2009,) o a escala de ladera, aplicando distintas modificaciones y calibraciones del modelo USLE (Gómez *et al.*, 2003; Álvarez *et al.*, 2007, Vanwallegghem *et al.*, 2011) o similares (Licciardello *et al.*; 2013). Las tasas medias de erosión en olivar arrojadas por los citados estudios oscilan entre los 6 t ha⁻¹ año⁻¹ (Gómez *et*

al., 2009) y los 35.5 t ha⁻¹ año⁻¹ (Álvarez *et al.*, 2007). A estas escalas espaciales adquieren predominancia los procesos físicos de erosión laminar y en surcos, relacionados más con los umbrales de resistencia al corte del suelo que con los procesos hidrológicos de movilización y transporte de sedimento a nivel de la cuenca de drenaje (Merritt *et al.*, 2003). Por estas razones, la erosión en cárcavas de los suelos de olivar, cuya estimación completa sólo puede valorarse a nivel de cuenca, no ha sido considerada hasta tiempos recientes (Gómez, 2015).

La disminución de la productividad agrícola y forestal puede ser evaluada desde dos puntos de vistas o con una conjunción de ambos: i) reducción de la producción por empeoramiento de la calidad de la tierra., ii) incremento del coste de la producción al precisar de medidas de conservación, o de tecnologías o insumos adicionales. La erosión constituye un grave déficit medioambiental en Andalucía y el valor medio de los beneficios derivados de la prevención de la erosión, con relación al valor añadido agrario sería de un 7,3% (Martínez, 1991).

2.2 Métodos de Estimación de Erosión Hídrica de Suelos

Roselló (1996) relata que muchos son los métodos de análisis de la erosión, todavía cada uno de ellos está orientado preferentemente: i) al estudio del funcionamiento interno del proceso erosivo o ii) orientado a la localización espacial de los efectos de la erosión. La autora explica que los métodos orientados a comprender como funciona el proceso de erosión poseen carácter cuantitativo y la información es extraída, normalmente, con trabajo de campo, mediante medición directa o con instrumentación de parcelas experimentales. Sin embargo, los métodos orientados a localización espacial de los efectos, poseen en su mayoría carácter cualitativo, suelen utilizar fuentes indirectas, elaboradas previamente. La tabla 2 compara los métodos mencionados.

En la elaboración de una propuesta de modelo de estimación de erosión hídrica, Pizarro *et al.*, (2009) presenta métodos cualitativos y clasifica los métodos cuantitativos (Figura 4). Los métodos cuantitativos pueden ser de evaluación indirecta (modelos con base física, conceptuales y paramétricos) o directa.

Bermúdez (2002) describe que los métodos de evaluación cualitativo se basan en el análisis de las formas de erosión (surcos, regueros, cárcavas, barrancos y otros), en las formas de deposición y en la identificación de estados o grados de erosión para clasificar las pérdidas de suelo registradas en el territorio y su posterior cartografía. Las herramientas más utilizadas son la fotografía aérea, la teledetección por imágenes de satélites y el método de erosión-deposición. Sobre los métodos cuantitativos, el autor relata que esos cuantifican la pérdida de suelo en distintas escalas, desde el nivel de *pedón o pedión* (de 1 a 10m²), al de ladera (decenas de m² a centenares) y cuenca fluvial (hectáreas a miles de km²).

Tabla 2. Características de los métodos de estimación de erosión - Adaptado de Roselló (1996)

	Métodos orientados al funcionamiento del proceso erosivo	Métodos orientados a localización espacial de los efectos de la erosión
Objeto de estudio	¿Cómo funciona el proceso de erosión?	¿Dónde es más grave el problema erosivo?
Enfoque	Definición estadística del fenómeno erosivo y sus pautas de comportamiento	Distribución espacial de fenómeno erosivo
Objetivo	Modelización para posterior definición de estrategias de actuación	Actuación para corrección
Escala	Alta, detalle	Baja y media. Poco detallada
Carácter	Cuantitativo	Cualitativo
Fuentes	Directas (trabajo de campo, parcelas experimentales y otros)	Indirectas (elaboradas por otros especialistas, en ocasiones para otros objetivos)
Información	Discreta	Continua
Herramientas	Instrumentalización	Recopilación de información de especialistas
Instrumentos	Trabajo de campo	Análisis estadístico,
Métodos	Medición directa., Análisis estadístico (cartografía)	Cartografía automática y SIGs,
Unidad	Parcela experimental, cuencas de pequeño orden, laderas y puntos de muestreos	Derivadas de las fuentes., a nivel de cuencas., Son unidades homogéneas
Ritmo	Lento, por dependencia de la generación de información en series temporales de duración suficiente	Rápido

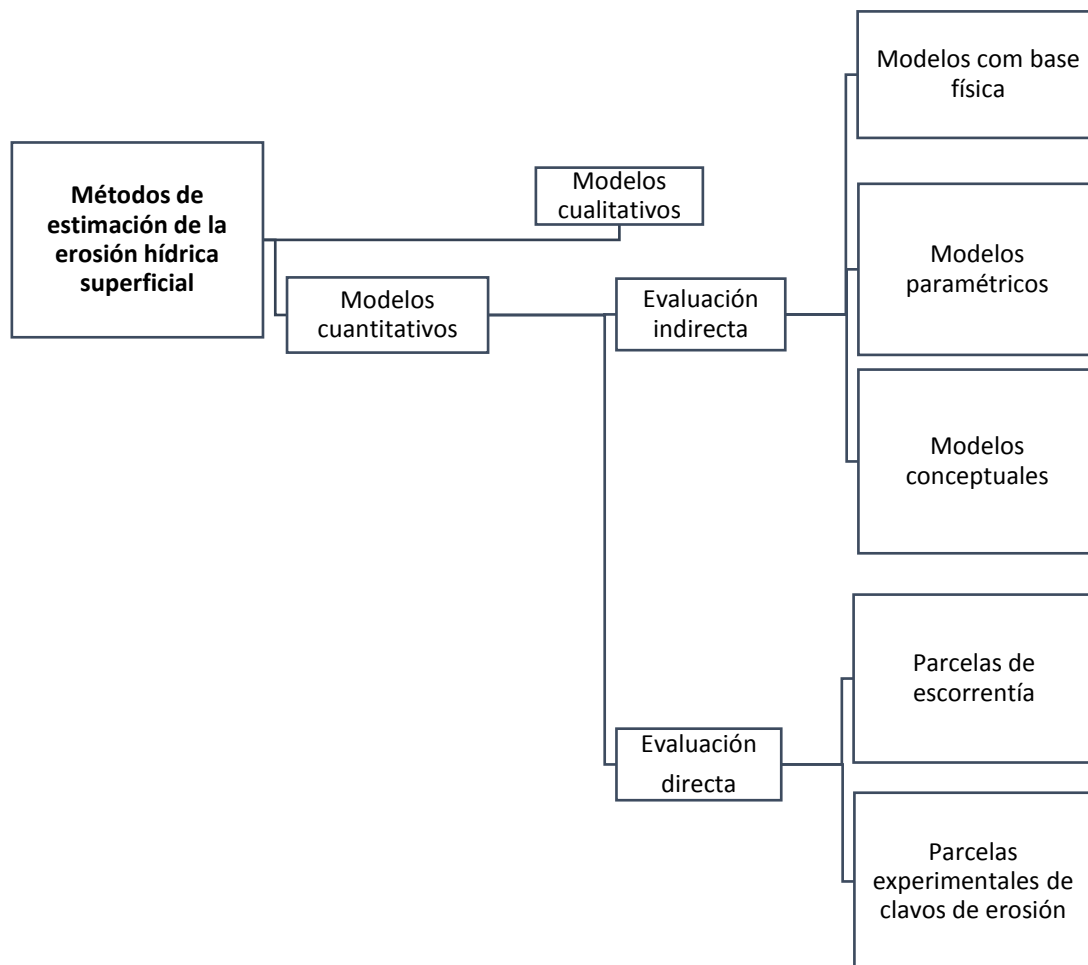


Figura 4. Clasificación de los métodos de estimación de erosión hídrica superficial. Elaborado con informaciones de *Pizarro et al.*, (2009)

El Apéndice 1 contiene la tabla I con informaciones síntesis sobre las herramientas y métodos de la evaluación de erosión hídrica de los suelos por métodos cualitativos (fotografía aérea, teledetección por imágenes de satélites, métodos de erosión-deposición), métodos cuantitativo directo (parcelas de erosión, cuencas y microcuencas, lluvia simulada, mediciones volumétricas, Cs^{137}), y métodos de evaluación cuantitativo indirecto (modelos estadísticos, modelos paramétricos y modelos físicos).

En la evaluación de la erosión, el modelo debe ajustarse a los datos disponibles y responder a un objetivo, pero también debe responder a la necesidad del usuario. La utilización de un tipo de modelo u otro dependerá por tanto de la finalidad perseguida (Alonso *et al.*, 1994). El autor presenta la relación entre el tipo de modelo y el objetivo de la investigación (Tabla 3).

Tabla 3. Métodos de estimación en función de los objetivos. Adaptado de Alonso *et al.*, 1994

Objetivo	Tipo de modelo			
	Físico	Paramétrico	Estadístico	Cualitativo
Revisar los mecanismos de la erosión y estimar sus efectos	X			
Detectar los lugares con erosión más intensa para su corrección		x		X
Definir la erosión potencial		x		
Construcción de embalses (vida probable)			X	
Construcción de embalses (localización de áreas para efectuar las medidas de corrección)		x		X
Evaluar la superficie afectada por el proceso erosivo		x		X
Ordenar y seleccionar los cultivos más adecuados		x		X
Seleccionar las medidas de conservación de suelos		x		
Elegir las zonas de retirada de cultivos, forestación u otro cambio de uso				X
Proteger el recurso agua	X	x		

Con datos disponibles y obtenidos con trabajo de campo y remoto, Conoscenti *et al.*, (2013) desarrolló estudios comparativos de modelos que asociaban la distribución de cárcavas a una multiples variables. Tres variables seleccionadas se relacionaban con la erodibilidad (litología de fundición (LTL), textura del suelo (TXT) y uso de la tierra) y nueve variables con la erosividad. Sus análisis evidenciaron que preparar y validar modelos con una variable podría ser usado como una herramienta para seleccionar aquellas que deben ser combinadas para preparar los modelos multivariables de mejor desempeño. Analizando el desempeño de los modelos para el área estudia, evidenció un fuerte control de la topografía sobre los fenómenos de erosión de cárcava.

De Alba (1997) apunta como diferentes técnicas volumétricas para la cuantificación de la pérdida de suelos el uso de varillas de erosión, perfiladores microtopográficos, cartografía y cubicación de regueros y cárcavas mediante mediciones directas en campo o por fotogrametría y levantamientos topográficos.

Los métodos de medición volumétrica directa son especialmente empleados en áreas abarrancadas, áreas muy erosionadas o con cultivos arbóreos en fuertes pendientes en los que el proceso erosivo es de rápida evolución (Alonso *et al.*, 2010).

Castillo *et al.*, (2012) hicieron comparaciones las precisiones de técnicas convencionales y de teledetección (LiDAR terrestre, foto-reconstrucción 3D, estación total, *láser* y *pole*) para la determinación de erosión de cárcavas y evaluar los principales factores que afectan a precisión de las mediciones de volumen. Los datos del *láser profilemeter* muestran una clara tendencia de subestimar áreas transversales. Ese método tuvo error promedio de -9,9%, con una aproximación máxima del -15% en la primera sesión. Aunque la forma general de las secciones transversales se ajusta bien a los resultados del LiDAR, Además, las simulaciones demostraron que la precisión de los métodos 2D para la estimación del volumen depende en gran medida de la morfología del barranco y densidad de medición.

El límite entre los modelos de evaluación de la erosión hídrica con objetivo de cuantificación y cualificación de la erosión no es nítido. En ocasiones para la estimación de la gradación del proceso erosivo por medio de un modelo cualitativo es necesario la aplicación de un modelo cuantitativo, así al tratar los modelos cualitativos tendremos que hacer referencia, ineludiblemente, al modelo cuantitativo paramétrico de mayor aplicación: la USLE (Alonso *et al.*, 1994).

Los sistemas de información geográfica (GIS) y teledetección son herramientas eficientes y oportunas para evaluar los riesgos de erosión, extensión de erosión de suelos relacionadas a carreteras y las diversas alternativas de las medidas de conservación (Nabi *et al*, 2008) (Seutloali *et al* 2016).

La teledetección permite el empleo de la USLE (*Universal Soil Loss Equation*). El modelo USLE, a pesar de algunas limitaciones cuantitativas, sigue siendo el modelo de erosión más utilizado en todo el mundo, proporcionando información útil en la planificación conservacionista del suelo y el agua (Rodrigues *et al.*, 2011).

La USLE, modelo paramétrico de evaluación de la erosión, es basado en los datos proporcionados por más de 10.000 parcelas repartidas por un gran número de localidades de los Estados Unidos, en terrenos agrícolas con distintas características de clima, suelo, relieve y cultivo. Las dimensiones de las parcelas eran reducidas y estaban sometidas,

exclusivamente, a procesos de erosión hídrica laminar y en regueros, no considera cárcavas, barrancos, erosiones en masa y en cauces, y no estima el transporte de sedimentos a través de la red fluvial (Bermúdez, 2002).

El modelo se ha probado y se ha verificado en penillanuras y en lugares ondulados con pendientes entre 1% y 20%, y excluye las montañas jóvenes, sobre todo en taludes inclinados por encima del 40%, en donde la escorrentía provee mayor energía que la lluvia para la ocurrencia de erosión y en donde ocurren significativos movimientos en masa (Calle, 2003).

La USLE, es empleado por la administración y el único admitido en los informes oficiales. Asimismo, permite comparar los resultados procedentes de distintas zonas, realizar extensas cartografías e informar a nivel regional del problema de la erosión (Cerdá, Bodí., 2008).

En USLE, la pérdida de suelo (A) es determina por el factor de erosividad de la lluvia (R), el factor de erosionabilidad del suelo (K), la longitud de la ladera (L), la pendiente de la ladera (S), la cubierta vegetal y el uso del suelo (C) y las prácticas de conservación para control de erosión (P). La ecuación de pérdida de suelo A se calcula por unidad de área, expresada en las unidades seleccionadas para K y para el período seleccionado para R (Wischmeir y Smith, 1978). Es habitual que la determinación de A en la unidad de $t\ ha^{-1}\ año^{-1}$.

La ecuación USLE, modelo RUSLE, para la estimación de las pérdidas medias de suelo como consecuencia de la erosión hídrica laminar y en regueros, es la siguiente:

$$A=R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$$

donde:

A: pérdidas de suelo por unidad de superficie para el periodo de tiempo considerado. Se obtiene por el producto de los factores siguientes:

R: Factor lluvia (índice de erosión pluvial). El índice de erosión es una medida de la fuerza erosiva de una precipitación determinada.

K: Factor erosionabilidad del suelo. Es el valor de las pérdidas de suelo por unidades del índice de erosión pluvial, para un suelo determinado en barbecho continuo, con una pendiente del 9% y una longitud de ladera de 22,1 m.

L: Factor longitud de ladera. Es la relación entre la pérdida de suelo para una longitud de ladera determinada y la pérdida para una longitud de 22,1 m del mismo tipo de suelo y vegetación o uso.

S: Factor pendiente. Es la relación entre las pérdidas para una pendiente determinada y las pérdidas para una pendiente del 9% del mismo tipo de suelo y vegetación o uso.

C: Factor cubierta y manejo. Es la relación entre las pérdidas de suelo en un terreno cultivado en condiciones específicas o con determinada vegetación natural y las pérdidas correspondientes de un suelo en barbecho continuo.

P: Factor de prácticas de conservación del suelo. Es la relación entre las pérdidas de suelo con cultivo a nivel, en fajas, en terrazas, en bancales o con drenaje subsuperficial, y las pérdidas de suelo correspondientes a labor en línea de máxima pendiente.

Adaptado del Ministerio de Medio Ambiente (2006)

La erosividad de la lluvia (R) es la capacidad potencial de la lluvia provocar erosión, estando esta dicha capacidad en función de las características físicas de la lluvia. Considerar el número de días medio anual con precipitación mayores de 30 mm como definitorio de la capacidad erosiva de la lluvia, ha pretendido relacionar un parámetro climático de muy fácil obtención con el índice de erosividad R de más difícil elaboración (Madueño, 1991).

La erosionabilidad (K) representa la respuesta del suelo a una determinada fuerza o mecanismo erosivo: esfuerzo cortante e impacto directo de la gota de lluvia, esto es, la susceptibilidad del suelo a ser erosionado. La textura es uno de los factores que más influyen en la erosionabilidad de un suelo. Junto a la textural, la estabilidad de los agregados es otra propiedad importante en la determinación de la erosionabilidad (Alonso *et al.*, 2010).

El efecto de la longitud (L) y el grado de la pendiente (S) así exigido asume laderas esencialmente uniformes, es decir, no tiene en cuenta si son cóncavas o convexas, ya que sus efectos sobre las pérdidas por erosión no son bien evaluados. Sin embargo, datos limitados indican que el uso del gradiente medio de una longitud de ladera puede subestimar las pérdidas de suelo de pendientes convexas y sobrestimar los de pendientes cóncavas. Cuando la parte final de una vertiente presenta una pendiente más inclinada que la parte superior, el gradiente debe ser usado para representar la pendiente de toda la longitud de la vertiente en el cálculo del factor LS (Roffe *et al.*, 2015)

El factor C se asigna con el objeto de reflejar el efecto de la vegetación y las prácticas de manejo en las tasas de erosión. Se trata del factor usado con más frecuencia para comparar el efecto relativo de diferentes opciones de manejo en un plan de conservación. Dicho factor indica cómo el plan de conservación afectará la tasa promedio anual de erosión, y cómo la pérdida potencial de suelo se distribuirá en el tiempo durante las actividades de construcción, rotación de cultivos u otros esquemas de manejo, así como los cambios en el

uso de suelo. A medida que la cobertura vegetal sea mayor, el valor de C es cada vez menor, por lo que el rango para este parámetro va de 0 (correspondiente a un terreno totalmente protegido) a 1.0 (para terrenos sin ninguna protección) (Montes-León *et al.*, 2011)

Madueño (1991) describe que el factor de prácticas de conservación (P) entraría a forma parte de la USLE como una reducción de la erosión esperada, como el establecimiento de terrazas (bien para el cultivos y repoblaciones forestales). En sus investigaciones en la cuenca hidrográfica del Guadalquivir, ha abstraído ese factor y considerado el territorio sólo alterado por los niveles de manejo y alternativas de usos existentes porque los cultivos de contorno y franjas están pocos extendidos en Andalucía.

Para la evaluación de pérdida de suelo con USLE, Arévalo (2016) ha utilizado en el factor P los datos tabulados por Wischmeir y Smith (1978) para terrazas en áreas donde fue observado medidas de conservación en campo. Cuando las medidas de conservación estaban alteradas o han perdido su efectividad, utilizó las tasas con ligeras modificaciones, pero ligeramente aumentado (de 0,14 a 0,19 para terrazas en deterioro). En el terreno que no ha observado medidas de conservación fuera utilizado el valor 1, o sea, sin reducción del efecto de la erosión.

En ese sentido, la erosión potencial es la que considera la fuerza erosiva de la lluvia, la erosionabilidad del suelo, la topografía del terreno y el suelo desnudo, con $C=1$ y $P=1$. Por su vez, la erosión efectiva considera la cobertura vegetal y las prácticas de conservación existentes en el área.

2.3 Hipótesis del Trabajo

Valentin *et al.*, (2005) relatan que es necesario crear una red global de investigación para evaluar el estado global de la erosión de las cárcavas y supervisar a largo plazo los lugares de referencia seleccionados.

Durante los últimos años, la preocupación en España sobre la erosión por cárcavas ha sido creciente y se han desarrollado trabajos sobre la temática. Se puede observar tanto la variabilidad de las pérdidas como la proliferación de mediciones a partir de diversas metodologías, desde agujas de erosión hasta técnicas fotogramétricas, pasando por mediciones de perfiles transversales con cintas y perfiladores de todo tipo (Gutiérrez *et al.*, 2011; Castillo *et al.*, 2014). En cualquier caso, la dificultad de estimar con precisión la erosión por cárcavas y el elevado coste en tiempo y recursos de algunos métodos empleados (como el Lidar Terrestre), reclama seguir investigando en metodologías de bajo coste, como la distanciometría láser.

Nuestra hipótesis de trabajo va en la línea de algunos artículos recientes (i.e. Hayas *et al.*, 2017), que destacan la importancia de la pérdida de suelo producida en cárcavas, respecto a la determinada tradicionalmente mediante la aplicación de USLE y modelos afines. Se trata, por tanto, de confirmar la gravedad ambiental que los procesos de erosión concentrada suponen sobre el olivar, con el objetivo de ayudar a una correcta planificación del territorio y restauración ambiental.

3. OBJETIVOS

El objetivo general de ese trabajo es el de conocer la evolución de los procesos erosivos por cárcavas en áreas sensibles de olivar de la provincia de Jaén, mediante la estimación de su desarrollo longitudinal y los volúmenes de suelo evacuados por la red. Para eso, el estudio consideró los objetivos específicos de:

- I) Determinar y analizar las densidades lineales de cárcavas, y el crecimiento interanual de las mismas, en suelos con usos agrícola de olivar mediante uso de ortofotografía y sistema de información geográfica (SIG);
- II) Cuantificar y analizar las tasas de pérdida de suelos en cárcavas, a través de la cubicación de volúmenes en campo mediante distanciometría láser.
- III) Comparar las pérdidas de suelo estimadas por distanciometría a láser con los resultados obtenidos con el método de la Ecuación universal de pérdida de suelo (USLE), tomando como unidad de referencia la microcuenca.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Área de estudio

Jaén es una provincia que tiene precipitaciones medias anuales de 667,4 mm, obteniéndose las máximas precipitaciones mensuales de diciembre al marzo, siendo los meses más secos julio y agosto, con 4,3 y 4,4 mm. La distribución de la superficie provincial oscila entre 28,8% para el estrato entre el 3% - 10% de pendiente y 7,7% para el estrato pendiente >50%. Además, dada la influencia de este factor en el laboreo mecanizado, que no debe superar el 20% de pendiente del suelo, se puede decir que el 67,8% de los suelos están capacitados para el mismo, estando otro 32,2% destinado a otros aprovechamientos que no necesiten labrarse (forestal, natural). La red de drenaje provincial pertenece casi en su totalidad a la cuenca del Guadalquivir. Los principales afluentes son el río Guadalmina, río Jándula y Guadiana Menor (Mancilla *et al.*, 1999).

Respecto a los suelos, Trueba *et al.* (1999) registran en la provincia de Jaén, la presencia de distintos grupos de suelos: Cambisoles, Fluvisoles, Luvisoles, Kastanozems, Phaeozems, Regosoles, Rendzinas, Arenosoles, Vertisoles y Solonchaks. Sin embargo, en las zonas

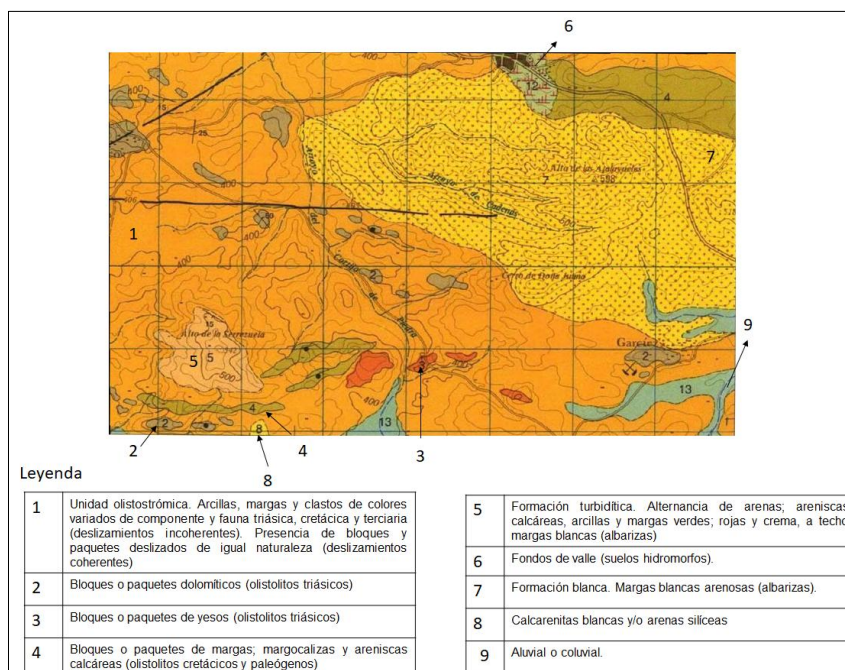
olivareras de la Provincia, situadas preferentemente sobre materiales blandos y carbonatados (margas, margocalizas), se da un amplio predominio de Cambisoles cálcicos y Regosoles calcáreos, siendo estos suelos los más afectados por la erosión hídrica.

4.2 Metodología

4.2.1 Densidades lineales

Las ortofotos del año 2009 y 2011 de las hojas de Linares (905), Mengíbar (926) y Porcuna (925.4) del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) fueran obtenidas en el Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG)¹ en la escala 1:50.000. Se eligió este periodo para el estudio de incremento de la densidad lineal de la red de cárcavas (km km^{-2}) debido a la ocurrencia de un evento pluviométrico atípico y muy intenso ocurrido en la región en el invierno de 2009 a 2010 (Hayas *et al.*, 2017). Fueron definidas dos áreas de estudio para analizar las densidades lineales:

- Territorio I: polígono de 47,47 km^2 cerca de Torredelcampo y Fuerte del Rey, marcadas con la presencia de arcillas y margas deformadas de las Unidades alóctonas del Guadalquivir. Uso de ortofoto de la hoja 925.4 (Figura 5).
- Territorio II: polígono de 79,77 km^2 , cerca de Bailén y Jabalquinto, marcados con la presencia de conglomerados, arenas y limos pliocuaternarios de terrazas fluviales. Uso de ortofotos 905 y 926 (Figura 6).



¹ (CNIG) - <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp>

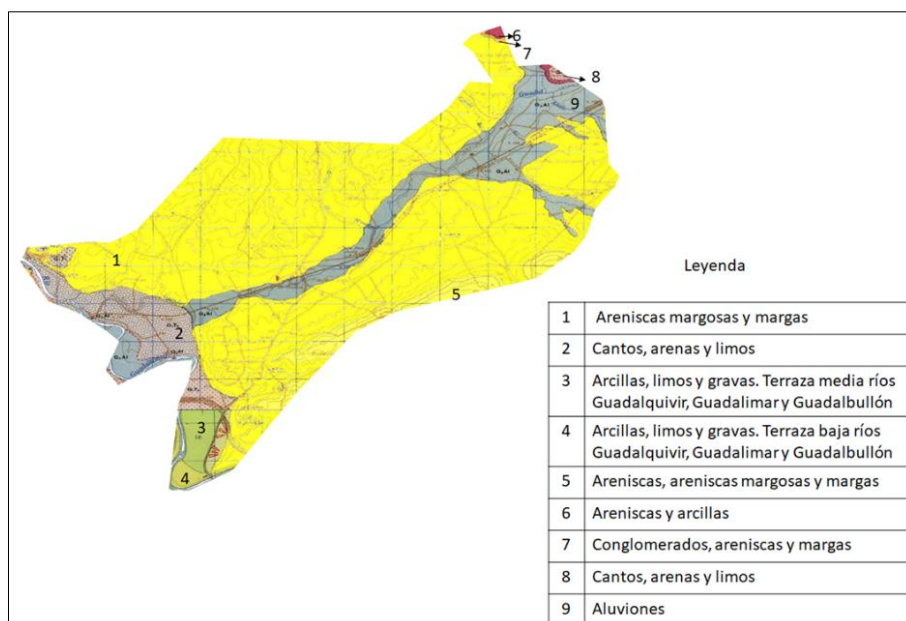


Figura 6. Geología del área de estudio cerca de Bailén y Jabalquinto.

Elaborado con Mapa Geológico de España en escala 1:50000. Adaptación de las hojas 905 Linares y 926 Mengíbar.

Las imágenes georreferenciadas de mapas topográficos, en escala 1:25.000, disponibles en Centro Nacional de Información Geográfica, fueron utilizadas para diferenciar los regueros y cárcavas de los cursos de agua, carreteras, caminos y otros elementos del paisaje, además para observar las curvas de niveles y microcuencas.

Con el software libre de SIG QGIS v.2.18, fueron delineados sobre las ortofotos los márgenes de las cárcavas detectadas en el área de estudio. En las cárcavas con ancho mayor que 1,5 m, se marcaron los márgenes derecho e izquierdo, mientras que aquellas con ancho inferior a ese valor se trazaron como una línea simple. La densidad lineal fue definida por la razón entre el sumatorio de los promedios de la longitud (km) de ambos márgenes de las cárcavas -o de su longitud linear en caso de las menores de 1.5 m- sobre el área del polígono en que están ubicadas (km²).

4.2.2. Estimación de la pérdida de suelo en cárcavas

Mediante un estudio detallado de las ortofotografías de las hojas de Linares, Mengíbar y Porcuna, fueron preseleccionadas distintas cárcavas con la finalidad de determinar en el campo el volumen y, posteriormente, la tasa de pérdida de suelo perdido (t ha⁻¹ año⁻¹), empleando el método de distancimetría láser. En este punto, interesaron las cárcavas iniciadas en 2009, es decir, no se tuvieron en cuenta aquellas que aparecían también en las ortofotos de 2007. Muchas de las cárcavas preseleccionadas no pudieron ser caracterizadas

en campo, debido a que habían sido rellenadas con rocas, restos de poda y otros objetos. Las características de las cárcavas finalmente estudiadas se muestran en la Tabla 4:

Tabla 4. Descripción de las cárcavas caracterizadas mediante método de distancimetría láser

Cárcava	Hoja*	Nomenclatura**	Coordenadas	Geología ¹
1	925.4 Porcuna	Torre Olvidada	37°50'19.7"N 3°53'36.0"W	Arcillas, margas y clastos de colores variados.,
2	925.4 Porcuna	Berrueco	37°52'17.8"N 3°56'09.1"W	Arcillas, margas y clastos de colores variados.,
3	905 Linares	Bailén I (margen de la carretera N- 323a)	38°03'49.8"N 3°46'28.6"W	Areniscas margosas y margas
4	905 Linares	Bailén II (margen de las carreteras A-44 e E- 902)	38°04'44.4"N 3°44'10.2"W	Areniscas margosas y margas

*: Nombre de la hoja como presentado por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) en el Mapa Geológico de España a escala 1:50.000 (<http://info.igme.es/cartografiadigital/geologica/Magna50.aspx>);

** Nomenclatura de la cárcava utilizada en ese trabajo con base en la ubicación (hoja topográfica

¹ Basado en el Mapa geológico da España

La estimación del volumen (m³) se realizó mediante medidas de secciones transversales con el distanciómetro LEICA DistoTM D8 (alcance 300 m, precisión ± 1 cm). De acuerdo a Castillo *et al.*, (2014), con el objetivo de asegurar la mayor precisión en la estimación, la máxima distancia entre las secciones transversales fue de 20 m.

Los puntos obtenidos con el distanciómetro fueron conectados para determinar las secciones transversales en m² con el software *SketchupPro* (Figura 7).

En el modelo presentado por De Alba (1997) para la determinación del volumen de cárcavas y regueros, las secciones de los canales se asimilan a polígonos irregulares. Cómo se conocen las distancias entre las secciones (L1 y L1'), la cubicación del volumen ocupado por el reguero se realiza mediante:

$$V \text{ total} = \sum [(S_i + S_{(i+1)})/2] \cdot [(L1 + L1')/2] \quad (\text{De Alba, 1997})$$

Si y S_(i+1)): áreas de las secciones transversal en sucesión.,

L1 y L1': distancias derecha y izquierda entre las secciones transversales

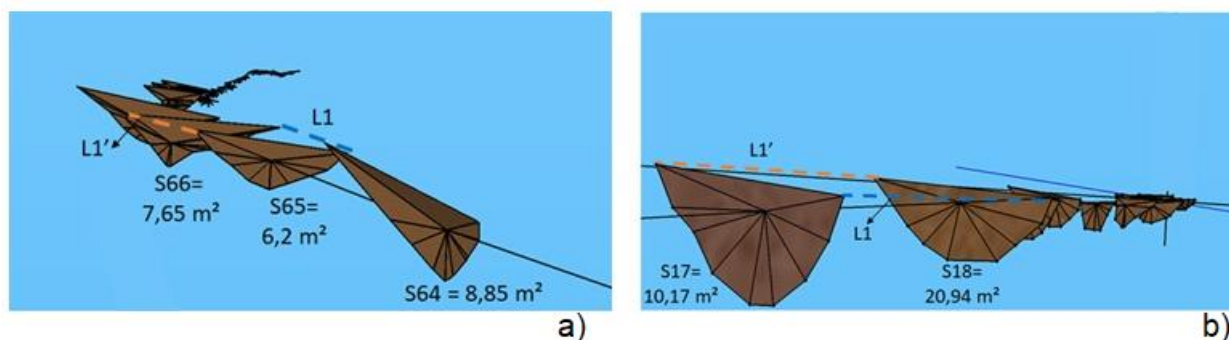


Figura 7. Área de las secciones “S” y identificación de las distancias L1 (derecha) y L1’ (izquierda) en cárcavas estudiadas de Berrueco (a) y Bailén II (b).

La determinación de la pérdida de suelo (t) a partir de los volúmenes se llevó a cabo a través de la densidad aparente del material (g/cm^3 o t/m^3). Para ello se tomaron tres muestras de suelo con cilindro Kopecky en el curso de cada cárcava a la altura del tramo alto (cabecera), medio y bajo (desembocadura), respectivamente. Las muestras fueron sometidas a $110^\circ C$ por 48h y después pesadas. El resultado en gramos fue dividido por el volumen del cilindro de $98,17\text{ cm}^3$, calculándose el valor promedio de las tres muestras por cárcava. La densidad aparente obtenida, en t/m^3 , se empleó para determinar la masa de suelo perdido en t (equivalente al producto del volumen total en m^3 y la densidad aparente en t/m^3).

Con el objetivo de hacer comparables la pérdida de suelo arrojada por la ecuación USLE ($t\text{ ha}^{-1}\text{año}^{-1}$) con la masa de suelo pérdida en la cárcava, este valor fue dividido por el área de la microcuenca de la cárcava en hectáreas y el número de años desde la formación de la cárcava. Se obtuvo así la pérdida de suelo en $t\text{ ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ para el período de 2009 (año de inicio de la cárcava) a 2018 (año de estimación del volumen). Las microcuencas en que se desarrollaron las cuatro cárcavas fueron delimitadas de forma automática con uso del DEM SRTM con Resolución Espacial de 30 metros, disponible en el sitio del U.S. Geological Survey (USGS)², mapa topográfico 1:25.000 georreferenciado del Centro de Descargas del CNIG y con análisis en el software QGIS, ajustando manualmente el límite de la microcuenca en caso necesario.

4.2.3. Parámetros de resistencia y esfuerzo crítico cortante del suelo.

Paralelamente a la tomas de muestras en cilindro Kopecky (utilizadas para la determinación de las densidades aparentes) se realizaron ensayos de resistencia de suelo con penetrómetro de bolsillo y ensayo de cizalla mediante *Shear Vane test*. Esos procedimientos

² (USGS) <https://earthexplorer.usgs.gov/>

fueron repetidos en 3 puntos al largo de cada cárcava estudiada (tramos alto, medio y bajo). El objetivo de los ensayos con penetrómetro y cizallómetro fue comprobar si la resistencia del suelo condicionaba un mayor o menor desarrollo de la cárcava. En general, la resistencia mecánica del suelo, expresada como su cohesión y ángulo de fricción interna, nos indican la estabilidad de los taludes de la cárcava y, por tanto, la facilidad con que esta se ensancha por desprendimientos laterales (en caso de baja resistencia), mientras que el umbral crítico cortante nos indica la facilidad con que el flujo laminar inicia el crecimiento de un reguero sobre un suelo aún no disectado por el flujo.

a) Parámetros de resistencia del suelo

El ensayo de resistencia del suelo se llevó a cabo con el penetrómetro de bolsillo Geotester ST-308, empleando puntas de 10 mm y 20 mm de diámetro. En ese estudio fueran tomadas 10 medidas con punta de 10 mm y 10 medidas con punta de 20 mm, por punto de cada cárcava estudiada.

Los análisis de textura de las muestras de suelo, realizados con el Método de Bouyocos (Soil Conservation Service, 1972), permitieron modelizar la resistencia del suelo en función de las medidas realizadas.

En suelos con textura fina se utilizaron los datos obtenidos con la punta de 10 mm para determinar la cohesión (C, kPa) y para suelos con textura gruesa, los datos con la punta de 20 mm determinaron el ángulo de fricción interna (ϕ , °). El valor de la cohesión y ángulo de fricción es determinado con base en la tabla del manual del aparato utilizado (Apéndice I – Tabla II).

Para suelos con textura media, con alta cohesión y alta fricción interna, son apuntados la fuerza en kg de cada punta de 10 y 20 mm (q_1 y q_2) y determinado el ángulo de fricción interna con la tabla de Terzaghi. Para determinar la cohesión son utilizada la siguiente formula (Terzaghi *et al.*, 1996):

$$N\gamma = (q_1 - q_2) / 0,6\gamma (R_1 - R_2)$$

$$C = (q_2 - 0,6 \cdot \gamma \cdot R_2 \cdot N\gamma) / 1,3 \cdot N_c$$

γ = densidad aparente del suelo., Cohesión., $N\gamma$ y N_c determinado con la carta Terzaghi.

b) Esfuerzo crítico cortante del suelo

Para estimar la sensibilidad del suelo a la formación de cárcavas fue calculado el esfuerzo crítico cortante del suelo (τ_c , Pa). Fueron tomados con cizallómetro cinco valores en cada punto de la cárcava, quince en total. La relación entre los valores de lectura del cizallómetro

y la sensibilidad del suelo al acaravamiento sigue la relación propuesta por Leonard y Richard (2004) (Tabla 5):

$$\tau_c = \beta \sigma_s \quad (\text{Leonard y Richard, 2004})$$

τ_c = Esfuerzo crítico cortante del suelo en Pa., $\beta = 0,00026$, σ_s = Valor de cizalla en Pa

Tabla 5. Relación del esfuerzo crítico cortante del suelo y la sensibilidad del suelo al acaravamiento (Leonard y Richard, 2004)

Sensibilidad del suelo al acaravamiento	τ_c (Pa)
Muy alta	0-2
Alta	2-4
Moderada	4-6
Baja	6-8
Muy baja	8-> 10

Todos los datos mecánicos, tanto de resistencia como de esfuerzo crítico cortante, se determinaron en condiciones de saturación del suelo.

4.2.4 Tasa de pérdida de suelo por método USLE.

El método USLE se aplicó a las mismas microcuencas donde previamente se ha calculado el volumen perdido por erosión en las cárcavas. El objetivo es comparar la intensidad prevista de la erosión laminar y en surcos, dada por la USLE, con la erosión producida en las cárcavas.

Para calcular el factor R, de erosividad de la lluvia, fueron utilizadas datos de pluviometría de las estaciones meteorológicas de Jaén, para las cárcavas de Fuerte del Rey, y de la estación de Linares para las cárcavas de Bailén, en función de la proximidad con las áreas de estudio. Fueron calculadas la pluviometría mensual y anual de 2001 al año de 2018 para estación de Jaén y 2000 a 2018 de Linares, en función de la disponibilidad de datos de las mismas.

El Factor R fue determinado con el Índice Modificado de Fournier (IFM). El índice modificado de Fournier (IFM) caracteriza la agresividad de la precipitación y se calcula para cada año y luego se calcula el promedio (Velascos y Cortés, 2009). El IFM relaciona la pluviometría mensual (p_i) y anual (P).

$$\text{IFM} = \sum \frac{p_i^2}{P}$$

p_i = precipitación mensual., P = precipitación anual

Los análisis de textura determinada con el método de Boyoucos y de materia orgánica por el método Walkley y Black (Soil Conservation Service, 1972), realizados sobre los materiales muestreados en los tres puntos de la cárcava (alto, medio y bajo), permitieron la determinación de la permeabilidad (Ks) a través de la ecuación de pedotransferencia de Julià *et al.*, (2004):

$$Ks = 1.522 + 0.537s - 0.284c - 0.296om$$

Con $R^2 = 0,705$ y aplicable en suelo Regosol Calcáreo, como las cárcavas de Fuerte del Rey

$$Ks = 1.043e^{0.0452s}$$

Con $R^2 = 0,521$ y aplicable en suelo Cambisol Calcico, como las cárcavas de Bailén

s = arena., c = arcilla., om = materia orgánica, todos en porcentaje.

Con el resultado de textura, materia orgánica y permeabilidad fue determinado factor K, de cada tramo de la cárcava, con la tabla de nomografía presentada en Wischmeier y Smith (1978). El promedio del valor K fue utilizado en la ecuación USLE.

En factor LS fue determinado con el mapa topográfico 1:25000, trigonometría y con las ecuaciones:

$$L = (\lambda/22,13)^m$$

McCool *et al.*, 1997., Renard *et al.*, 1997., McCool *et al.*, 1987 citados en Mengitsu, Bewket y Rattan Lal 2015).

λ = longitud de declive = ((diferencia de cotas²) * (longitud proyectada en el mapa²)^{0,5}).

m = coeficiente empírico según el gradiente % de declive

Gradiente de pendiente%	M
0 – 1	0,2
2 – 3	0,3
4 – 5	0,4
> 5	0,5

gradiente % de declive: ((diferencia de cotas/longitud proyectada en el mapa)*100)).

$$S = 65,41\text{sen}^2\theta + 4,56 \text{sen}\theta + 0,065$$

Wischmeier y Smith (1978)

θ = ángulo de declive

Los factores C y P fueron determinados en base al reconocimiento de cobertura y manejo del suelo en campo y a partir del análisis de la ortofotografía y utilizando las tablas Wischmeier y Smith (1978) para esos factores (Apéndice I – tabla II y III).

5. RESULTADO Y DISCUSION

5.1 Densidades lineares de cárcavas

Con análisis de las ortofotos de 2009 y 2011, fue posible delinear en el territorio de Fuerte del Rey y Torredelcampo el equivalente de 77,602 km y 229,021 km de cárcavas, respectivamente. En el territorio de Bailén, la longitud total de cárcavas es de 36,041 km en 2009 y 52,210 km en 2011 (Tabla 6).

Tabla 6.. Longitud de cárcavas en territorios de la provincia de Jaén

	Longitud de cárcavas en 2009	Longitud de cárcavas en 2011
Territorio I (Fuerte del Rey y Torredelcampo)	77,602 km	229,021 km
Territorio II (Bailén y Jabalquinto)	36,041 km	52,210 km

La densidad linear en el año de 2009 en el área de estudio cerca de Bailén y Jabalquinto, de una superficie de 79,774 km², fue equivalente a 0,452 km km⁻². En 2011, la densidad es de 0,654 km km⁻² (Figura 8 y 10). Estos datos indican que se produjo un incremento en la red de cárcavas del 44,69 % en este periodo. Para el área cerca de Fuerte del Rey y Torredelcampo, con 47,470 km² de superficie, el incremento de kilómetros de cárcava es de 195,04 %, puesto que en 2009 fue identificada la densidad linear de 1,635 km km⁻² y en el año de 2011, 4,824 km km⁻² (Figura 8 y 9).

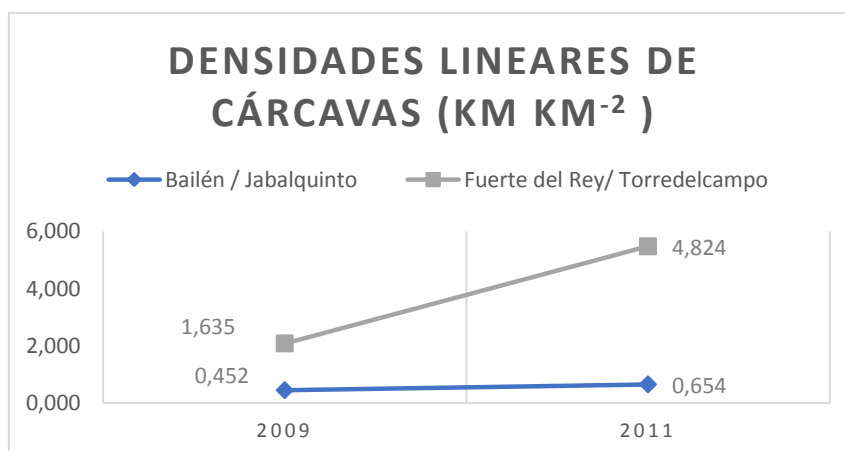


Figura 8. Avance de las densidades lineares de cárcavas en km/km² en áreas de estudio de Bailén/Jabalquinto y Fuerte del Rey/ Torredelcampo en 2009 y 2011.



a)



b)

Figura 9. Área de estudio, cerca de Fuerte del Rey y Torredelcampo, con 47,470 km². Cárcavas delineadas en ortofotos PNOA del año de 2009 y 2011. a) Densidad lineal en 2009 de 1,635 km km⁻² y b) 4,824 km km⁻² en 2011.

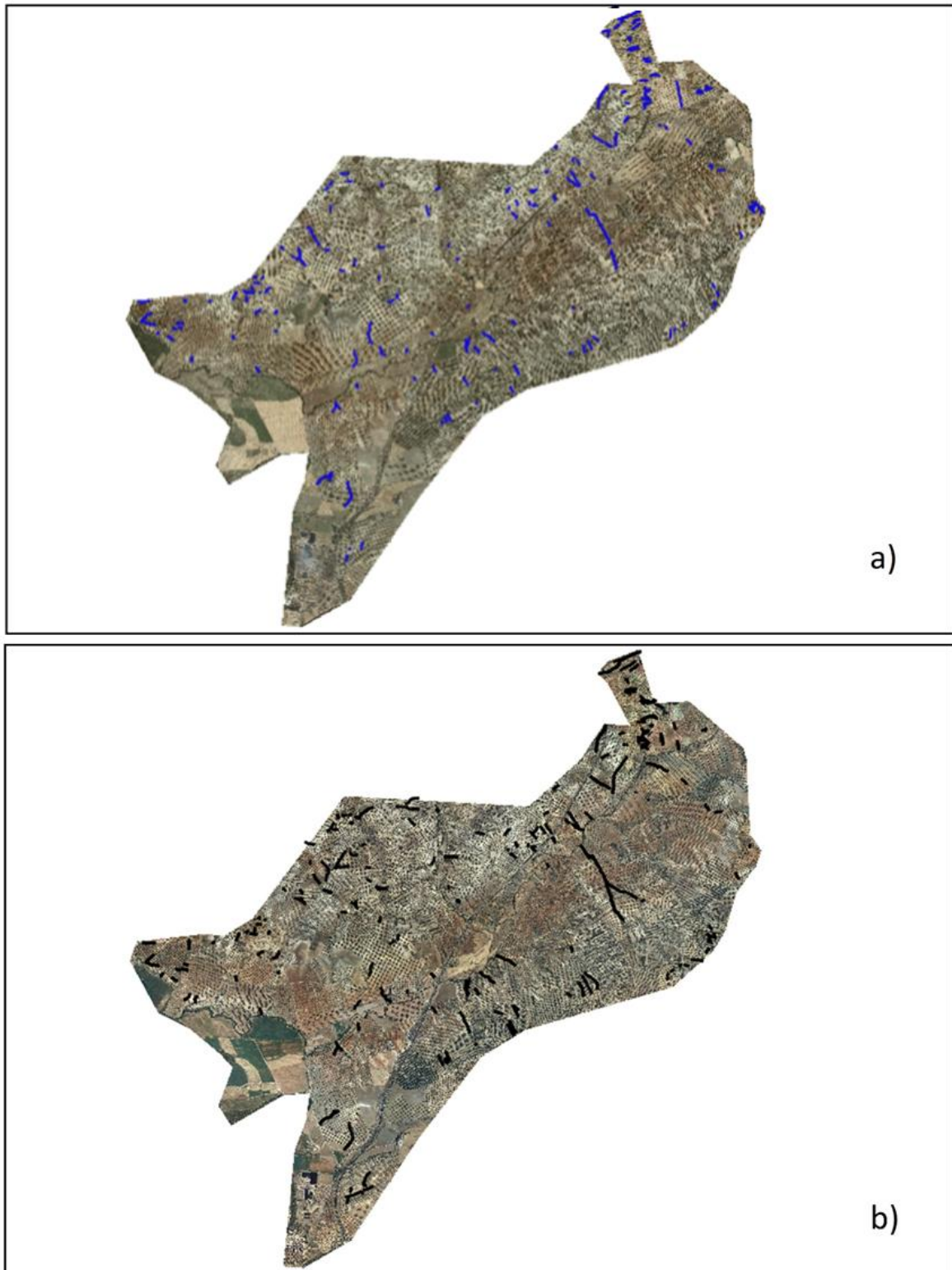


Figura 10. Área de estudio, cerca Bailén y Jabalquinto, con de 79,774 km². Cárcavas delineadas en ortofotos PNOA del año de 2009 y 2011. a) Densidad lineal en 2009 de 0,452 km km⁻² y b) 0,654 km km⁻² en 2011.

Las densidades de cárcavas en la zona II (Bailen y Jabalquinto) coinciden con las obtenidas por Gómez (2015), que reconoce valores medios para la comarca de en torno a 0,600 km/km². Por otra parte, la densidad de cárcavas en la zona I para el año 2009 es ligeramente superior a los valores dados este autor (1,600 km/km²), disparándose notablemente en 2011. De hecho, el valor obtenido en este trabajo es mayor que los mayores valores de densidad lineal obtenidos para toda Andalucía por Vanwallenghen *et al.*, (2014) (3,700 km/km²). Esto indica un desarrollo extraordinario del sistema de cárcavas en este periodo.

En el territorio de Forte del Rey, la erosión hídrica en cárcavas presenta distribución por todo el polígono y formaciones litológicas (Figura 11). Las dos mayores unidades geológicas del territorio cerca de Forte del Rey y Jabalquinto presentan suelos con texturas diferentes, con mayor tendencia al transporte de partículas de suelo y erosión en las formaciones de margas blancas arenosas. Sin embargo, la formación que más está presente en el territorio estudiado es de arcillas, margas y clastos, donde el proceso erosivo permanece ampliamente distribuido en función de la inclinación del terreno.

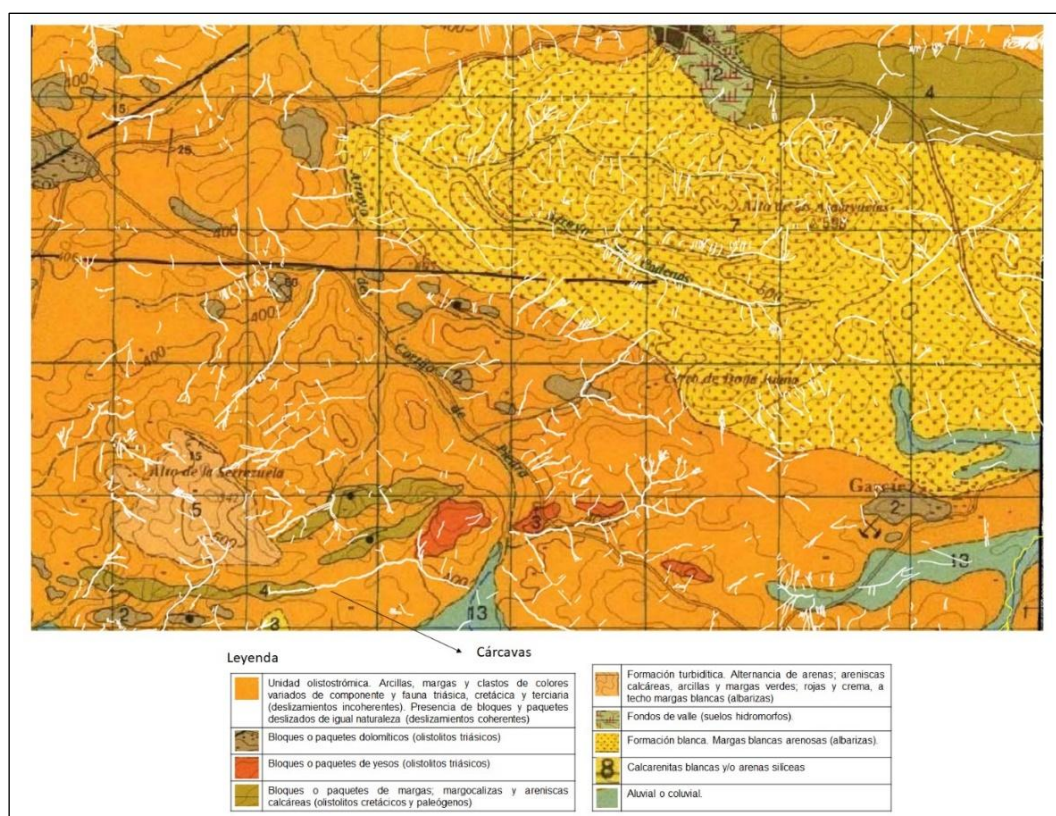


Figura 11. Disposición de cárcavas, del año de 2011, por unidades geológicas en el territorio cerca de Forte del Rey y Torredelcampo. Elaborado con Mapa Geológico de España en escala 1:50000. Adaptación de la hoja 925 - Porcuna.

En el territorio con menor densidad lineal de cárcavas, de Bailén a Jabalquinto, el proceso erosivo por cárcavas es más acentuado en la litología de areniscas, margosas y margas, habiendo pocas cárcavas en la porción central que es caracterizada por formación litológica de aluviones, y pocas cárcavas en unidades geológicas con arcillas (Figura 12).

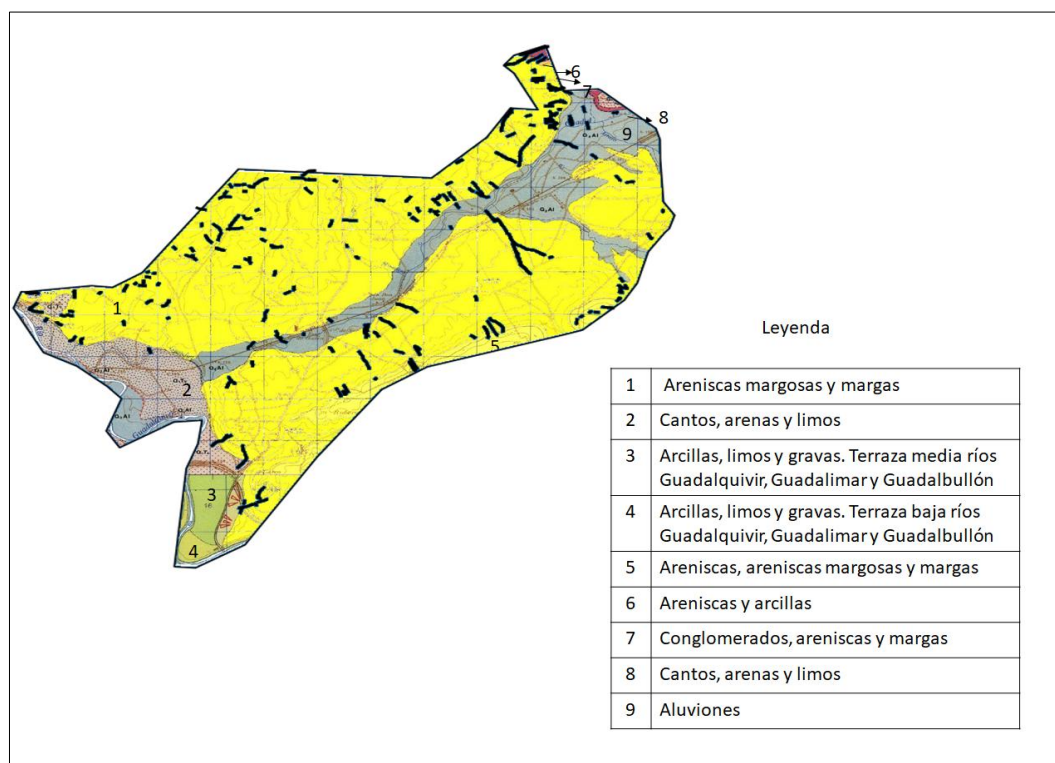


Figura 12. Disposición de cárcavas, del año de 2011, por unidades geológicas en el territorio cerca de Fuerte del Rey y Torredelcampo. Elaborado con Mapa Geológico de España en escala 1:50000. Adaptación de la hoja 925 - Porcuna.

5.2 Estimación de pérdida de suelo en cárcavas con método de distanciometría a láser

Con el objetivo de determinar la pérdida de suelo en $t\ ha^{-1}\ año^{-1}$, fueron estimadas la densidad aparente en las cuatro cárcavas estudiadas, cuyos los promedios fueron de $1,18\ g/cm^3$ en cárcava de Torre Olvidada, $1,21\ g/cm^3$ en cárcava de Berrueco, $1,44\ g/cm^3$ en Bailén I y $1,33\ g/cm^3$ en Bailén II (Tabla 8).

Tras la determinación de las secciones transversales en las cárcavas, las distancias entre las secciones y el promedio de la densidad aparente de suelo para la cada cárcava, fue determinada la pérdida de suelo considerando el área de las microcuencas y el avance de las cárcavas de 2009 a 2018. Los datos equivalen a $2,83\ t\ ha^{-1}\ año^{-1}$ en la cárcava de Torre Olvidada, $28,98\ t\ ha^{-1}\ año^{-1}$ en la cárcava de Berrueco, $11,59\ t\ ha^{-1}\ año^{-1}$ en Bailén I y $69,67\ t\ ha^{-1}\ año^{-1}$ en Bailén II (Tabla 8).

Tabla 5. Densidades aparentes, volúmenes y masa de pérdidas de suelos de las cárcavas entre 2009 y 2018

Cárcava	Densidades aparentes (g/cm ³)	Densidad aparente (promedio)	Volumen de pérdida de suelo (m ³)	Toneladas de suelo	Área de la microcuenca (hectáreas)	Pendiente media de la microcuenca	tha ⁻¹ año ⁻¹ *
Torre Olvidada	1,29., 1,14., 1,12.,	1,18	148,390	175,850	6,8994	3,46 ° (6,04%)	2,830
Berrueco	1,09., 1,33., 1,19.,	1,21	1179,720	1422,020	5,4517	8,80 ° (15,36%)	28,980
Bailén I	1,41., 1,52., 1,41.,	1,44	636,430	918,420	8,8040	3,88 ° (6,78%)	11,590
Bailén II	1,24., 1,39., 1,35.,	1,33	3979,030	5282,670	8,4250	1,06 ° (1,85%)	69,670

* Considerando los años 9 años de 2009 (año de origen de las cárcavas) al 2018 (año del estudio)

La estimativa de la pérdida de suelo en la cárcava de Torredelcampo presenta valor subestimado de 2,83 t ha⁻¹ año⁻¹ debido a la intervención que fue realizada con la intención de contener el proceso erosivo. Esta intervención consistió en el relleno de la cárcava y en el trazado de vados de cemento. En algunos tramos de esa cárcava no fue posible delimitar las secciones transversales, incluso en sus segmentos con mayor anchura, por haber sido rellenada de materiales, principalmente podas de olivos, que inviabilizaban el acceso y la toma de datos con el láser (Figura 13). El valor de 2,83 en t ha⁻¹ año⁻¹ se trata, por tanto, de una estimación de pérdida mínima de suelos en esa cárcava. El avance del proceso erosivo puede ser visualizado en las ortofotos del año de 2009 a 2016 (Figura 14 a), y principalmente entre 2009 al 2011. Según la Junta de Andalucía (2011), durante el año 2010 las precipitaciones han sido abundantes, incluso muy superiores a las registradas en 2009.



Figura 13. Cárcavas de a) Torredelcampo llena de podas y otros materiales., b) Berrueco con olivo con riesgo de caída en el talud., c) Bailén I con sistema de irrigación expuesto por el proceso erosivo., d) Bailén II con cabecera en la salida de drenaje de la carretera.

En la cárcava de Berrueco, en que el suelo arcilloso presenta grietas de expansión, el valor $28,18 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ pérdida de suelo tiene la tendencia de está muy asociado a la pendiente media del terreno de $8,80^\circ$.

Las cárcavas de Bailén I y II, con respectivas pérdidas de $11,59$ y $69,67 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ están en terrenos con menor pendiente que la cárcava de Berrueco, con la característica de que ambas se sitúan cerca de salidas de drenajes de la carretera.

El Inventario Nacional de Erosión de Suelos (INES, 2006) del Gobierno de la España de 2016 ha estimado la pérdida de suelo en la Provincia de Jaén por erosión en cárcavas y barrancos en $7,21 \text{ (t ha}^{-1} \text{ año}^{-1})$, o sea, las cárcavas de Berrueco, Bailén I y Bailén II superan ese valor. Los valores que nosotros obtenemos (excepto para el caso de Torre Olvidada) son bastante superiores a los indicados por Taguas *et al.*, (2012) para su estudio de pérdida de suelo en cárcavas de olivar (valores máximos de $4 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) para el periodo 2005-2007, en una microcuenca de extensión similar a las nuestras (6 ha). Sin embargo, Hayas *et al.*, (2017) encuentran pérdidas en olivares mucho más importantes, con picos de hasta 591

t ha⁻¹ año⁻¹ en una cuenca mayor (20 km²) y para el periodo 2009 – 2011. Estos datos muestran la amplia variabilidad de la erosión en cárcavas y de su dependencia tanto espacial (amplitud de cuenca) como temporal (periodo analizado). En cualquier caso, la restricción a dos años de nuestro periodo de estudio (nueve años), arrojaría valores 4,5 veces mayores de pérdida de suelo, lo que en el caso de la cárcava de Bailén II, los aproximaría a los valores extremos dados por Hayas *et al.*, (2017).

Por otra parte, dada la dependencia espacial y temporal comentada, es complicado hacer una valoración precisa de la metodología de distanciometría laser frente a las que emplean Hayas *et al.*, (2017) -reconstrucción 3D a partir de fotos aéreas- o Taguas *et al.*, (2012) -recolección de sedimentos a la salida de la cuenca y modelado con AGNPS-. Castillo *et al.*, (2012) atribuyen a la técnica de distanciometría laser un error del -13% respecto al método de referencia, el Lidar terrestre, lo que constituye una subestimación de los volúmenes calculados de relativa importancia. Sin embargo, estos mismos autores afirman que el distanciómetro laser es el método con mejor relación costo/esfuerzo (después de la cinta métrica, con mucho mayor error), con un coste de 1,4 € por metro medido en el campo.

Con los análisis de textura del suelo del entorno de las cárcavas fue posible la clasificación en: i) suelos arcillosos y suelo arcillo arenoso en la cárcava de Torre Olvidada; ii) arcilloso en Berrueco; iii) franco-arcillo-arenoso y arcilloso en Bailén 1; iv) franco-arcillo arenoso, franco-arcilloso y arcillo arenoso en la cárcava de Bailén 2 (Tabla 9). Las cárcavas estudiadas se han desarrollado, por tanto, en suelos de texturas finas o medias.

La cárcava de Torre Olvidada presenta en la cabecera, probable punto de rotura, el suelo de textura media arcillo-arenoso con media resistencia frente al esfuerzo de penetración. En la mitad y final de la cárcava los suelos son arcillosos, con textura fina y muy baja y baja resistencia, respectivamente. Con relación al acaravamiento, el suelo presenta sensibilidad muy alta en la cabecera ($\tau_c = 1,924$ Pa) y en la mitad ($\tau_c = 1,69$ Pa) y alta ($\tau_c = 2,704$ Pa) sensibilidad en el punto de final de la cárcava por presentar valores bajos para el esfuerzo crítico cortante del suelo (Tabla 9).

La otra cárcava estudiada cerca de Fuerte del Rey, cárcava de Berrueco, presenta suelo arcilloso de textura fina en toda su extensión. Analizando la resistencia de los suelos, fue evidenciado que presenta muy baja resistencia en el punto de cabecera de la cárcava (cohesión de 20,4 kPa) y baja resistencia, o sea, arcilla blanda, en la mitad y final de la cárcava. El ensayo con cizallómetro revela que de la cabecera al final de la cárcava hay alta sensibilidad al acaravamiento (2,34 Pa, 2,75 Pa y 2,652 Pa) (Tabla 9). Estos datos indican que los suelos de las cárcavas de Fuerte del Rey y Torredelcampo, de texturas finas, presentan una alta predisposición a la erosión concentrada, sea al inicio de la formación de cárcavas como a su crecimiento una vez generadas. Esto es compatible con la gran densidad lineal de cárcavas halladas en la región.

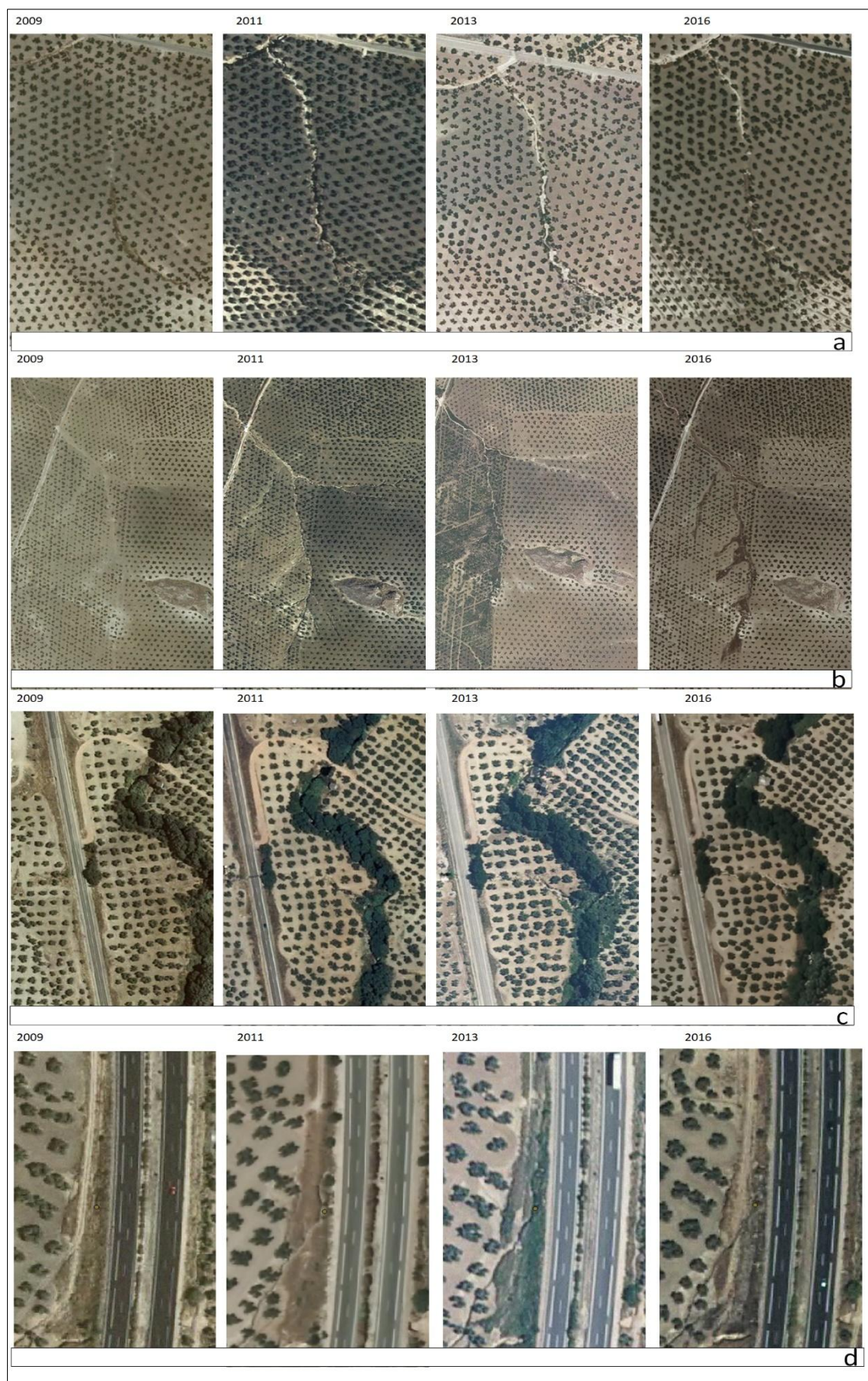


Figura 14. Desarrollo de 2009 al 2011 de las cárcavas de a) Torredelcampo., b) Berrueco., c) Bailén I., d) Bailén II – Ortofotos PNOA

En el área de Bailén, la cárcava de Bailén I que está cerca de la carretera N- 323^a (Figura 14 b), presenta en el punto de origen de la cárcava suelo arcilloso de textura fina. En los puntos analizados en la mitad y final de la cárcava, las muestras de suelo fueran caracterizadas como franco-arcillo-arenoso, o sea, de textura media. La cabecera de la cárcava presenta media resistencia (64,38 kPa), mientras que los otros tramos indican una alta resistencia del suelo. A pesar de ello, estos suelos presentan alta sensibilidad al acaravamiento en los puntos al largo de la cárcava analizados.

La segunda cárcava estudiada en Bailén, cárcava Bailén II que está cerca de las carreteras A-44 e E-902 (Figura 15 c), presenta en la cabecera de la cárcava suelo de textura media franco-arcillo-arenoso, punto en la mitad con textura fina (suelo franco-arcilloso) y suelo de textura media también en el final de la cárcava (suelo arcillo arenoso). Para toda a cárcava fue registrada media resistencia en relación a la penetración en el horizonte y alta sensibilidad al acaravamiento, destacando que el mismo valor (= 2,808 kPa) relacionado a sensibilidad al acaravamiento del ensayo con cizallómetro fue identificado en la cabecera y en la mitad de la cárcava, que presenta suelo argiloso de textura fina y media resistencia. En general, por tanto, los suelos de Bailen parecen ser más refractarios al crecimiento por desprendimientos laterales de los taludes que los de la otra área analizada, aunque son igual de sensibles a la iniciación de cárcavas.

Analizando el parámetro de resistencia del suelo, ese parece ser un buen indicador para el desarrollo de la cárcava, mientras la sensibilidad al acaravamiento no explica bien la diferencia entre el desarrollo de cárcavas en las distintas zonas, ya que presenta clasificación muy alta o alta para todo el tramo de las cárcavas estudiadas, independientemente del desarrollo que luego estas parecen alcanzar. En cualquier caso, se destaca que una sensibilidad alta o muy alta señala para el punto en que inicia la cárcava, relación que existe en la en la cabecera de las cárcavas estudiadas (Tabla 9).

Al sobreponer las márgenes delineadas de las cárcavas en las ortofotos del año 2011 al 2016 observase en la cárcava de Torre Olvidada longitudes y anchura muy cerca en ese intervalo de tiempo. Hay un incremento en anchura muy acentuado en la cárcava de Berrueco, que es muy indicativa de que la baja resistencia del suelo en todo el tramo de la cárcava puede condicionar un ensanchamiento importante de la cárcava. En esa cárcava, surcos que aparecen en el imagen de 2011 son incorporados a cárcava central de la red representada en 2016 Para la cárcava de Bailén I el incremento es mayor en longitud y para Bailén II, en anchura (Figura 15).

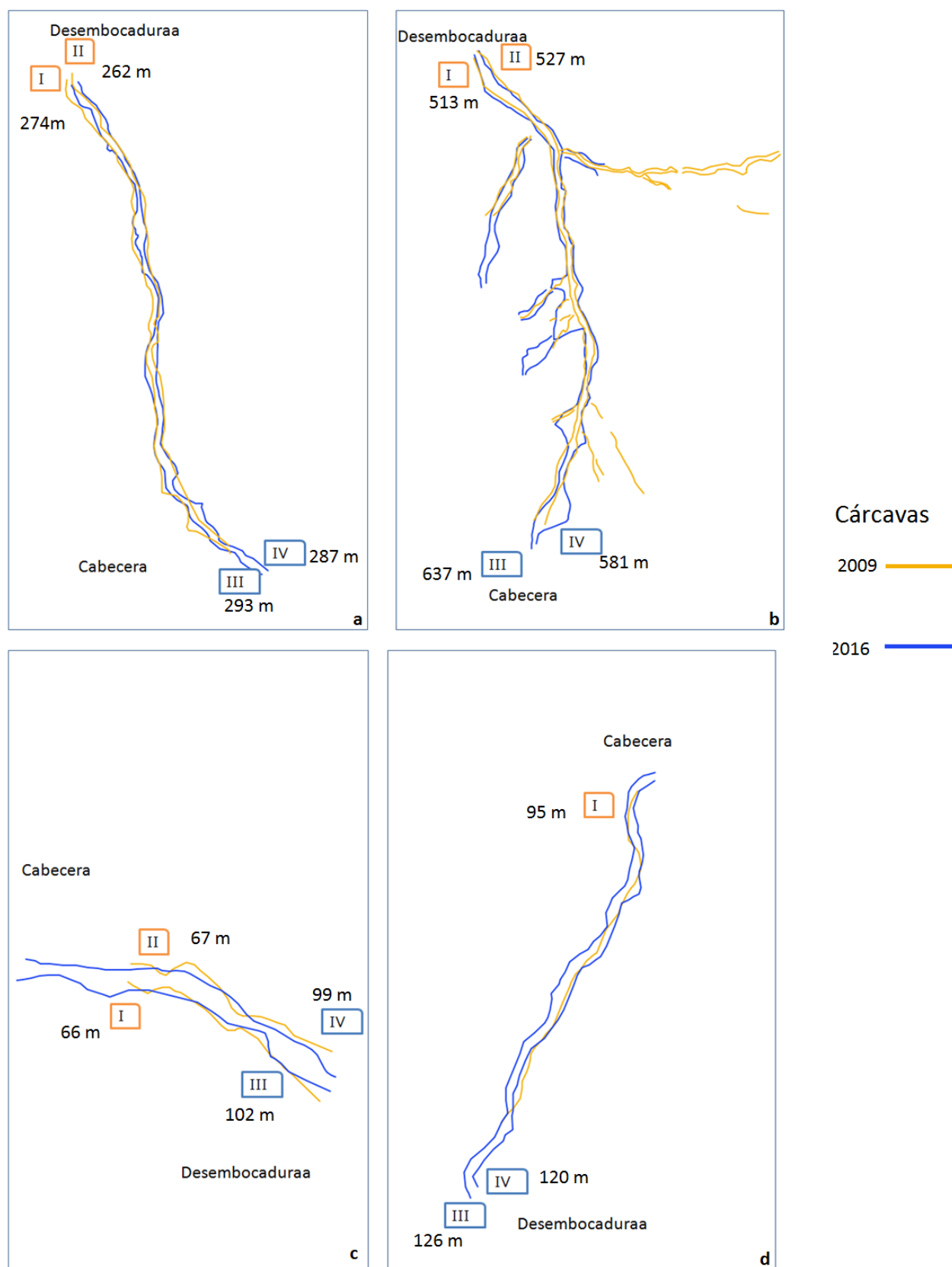


Figura 15. Desarrollo de las márgenes de las cárcavas de a) Torre Olvidada, b) Berrueco, c) Bailén I y d) Bailén II delineadas en ortofotos de 2011 y 2016

Tabla 6. Descripción del suelo y parámetro mecánicos en las cárcavas estudiadas

Cárcava	Tramo de la cárcava	Tipo de suelo	Textura	Cohesión (kPa)	Resistencia del suelo ¹	Esfuerzo de cizalla (kPa)	Sensibilidad al acarreamiento ²
Torre Olvidada	Cabecera	Arcilloso-arenoso	Media	20,72	Media (Suelos de textura media con cohesión entre 10–30kPa)	1,924	Muy alta
	Medio	Arcilloso	Fina	19,89	Muy Baja (Suelos de textura fina con cohesión <25 kPa)	1,69	Muy alta
	Desembocadura	Arcilloso	Fina	46,14	Baja (Suelo de textura fina con cohesión entre 25 - 50 kPa)	2,704	Alta
Berrueco	Cabecera	Arcilloso	Fina	20,4	Muy baja (Suelos de textura fina con cohesión <25 kPa)	2,34	Alta
	Medio	Arcilloso	Fina	32,81	Baja (Suelo de textura fina con cohesión entre 25-50 kPa)	2,756	Alta
	Desembocadura	Arcilloso	Fina	26,86	Baja (Suelo de textura fina con cohesión entre 25-50 kPa)	2,652	Alta
Bailén I	Cabecera	Arcilloso	Fina	64,38	Media (Suelo de textura fina con cohesión entre 50-100 kPa)	3,692	Alta
	Medio	Franco-arcillo-arenoso	Media	41,08	Densa/alta (Suelo de textura media con cohesión >30 kPa)	2,912	Alta

	Desembocadura	Franco-arcillo-arenoso	Media	35,34	Densa/alta (Suelo de textura media con cohesión >30 kPa)	2,496	Alta
Bailén II	Cabecera	Franco-arcillo-arenoso	Media	26,29	Media (Suelo de textura media con cohesión entre 10-30 kPa)	2,808	Alta
	Medio	Franco-arcilloso	Fina	60,01	Media (Suelo de textura fina con cohesión entre 50 - 100)	2,808	Alta
	Desembocadura	Arcillo-arenoso	Media	26,15	Media (Suelo de textura media con cohesión entre 10-30 kPa)	3,588	Alta
Cárcava	Tramo de la cárcava	Tipo de suelo	Textura	Cohesión (kPa)	Resistencia del suelo ¹	Esfuerzo de cizalla (kPa)	Sensibilidad al acarcavamiento ²

¹ Clasificación de la resistencia del suelo con textura fina según Terzaghi *et al.*, (1996) y de suelos con textura media según Karol (1960) apud Rogers (2006)

² Clasificación de la sensibilidad al acarcavamiento según Leonard y Richard (2004)

5.3 Pérdida de suelo estimada con el método USLE

La estimativa de pérdida de suelo por erosión laminar y en surcos con el método de la USLE, determinó los siguientes factores para las microcuencas de las cárcavas estudiadas (Tabla 10):

Tabla 7. Estimativa de factores de la USLE y razón de la pérdida de suelo por distanciometría láser y USLE

	R	K	LS	C	P	$t\ h^{-1}\ año^{-1}$ USLE	$t\ h^{-1}\ año^{-1}$ - Distanc. láser
Torre Olvidada	74,18	0,19	2,24	0,34	0,50	5,26	2,83
Berrueco	74,18	0,15	7,16	0,34	0,70	19,37	28,98
Bailén I	78,16	0,26	2,65	0,34	0,50	9,14	11,59
Bailén II	78,16	0,27	0,33	0,34	0,60	1,42	69,67

El factor R, calculados con datos de las estaciones meteorológicas de Jaén y Linares fueron aproximados, todavía, el potencial de erosividad de la lluvia es mayor para las cárcavas cerca de la estación de Linares, como Bailén I y II.

Para las cárcavas de Torre Olvidada y Berrueco con mismo factor R de $74,18\ MJ\cdot ha^{-1}\cdot mm\cdot h^{-1}\ año^{-1}$, la erodibilidad del suelo es menor para la cárcava de Berrueco en función de las muestras de suelos de esa cárcava tuvieron resultados de textura fina, con suelo esencialmente arcilloso, mientras, en la cabecera de la cárcava de Torre Olvidada hay suelos con textura media, cuyo valor % de arena acreció el potencial de pérdida de ese suelo. Los suelos de las cárcavas de Bailén I y II, cuyas muestras fueron caracterizadas en textura media en dos tramos y fina para uno tramo de la cárcava, presentan factor K más similar.

Considerando las microcuencas de las cuatro cárcavas estudiadas, el factor topográfico LS es lo que presenta mayor intervalo, de 0,33 a 7,15. En función de la longitud de la rampa en que hay escorrentía superficial en las microcuencas, se evidencia que el factor L posee desviación estándar de 0,8775, impulsado el valor de 1,89 para la cárcava de Bailén II. Además, la declividad del terreno, considerada por el factor S, presenta desviación estándar de 0,9183, donde, además del valor de la cárcava de Bailén II, la cárcava de Berrueco presenta valores de declividad alejadas de las otras, para menor declividad y mayor, respectivamente (Figura 16).

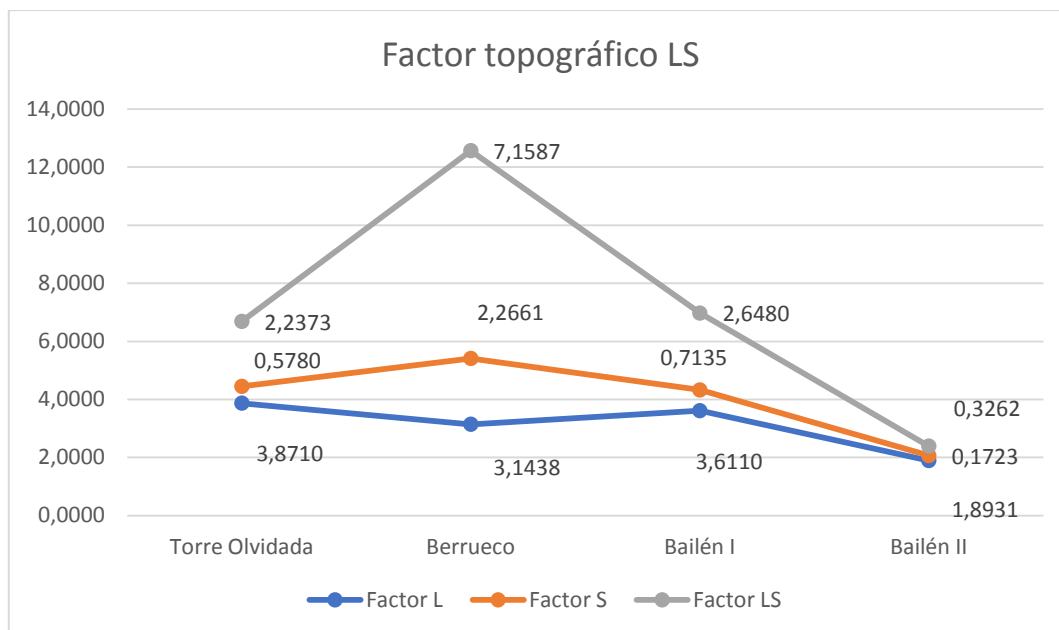


Figura 16. Factores L, S y factor topográfico LS

El factor C que considera el uso del suelo y manejo es 0,34 porque en las áreas estudiadas, la matriz del paisaje en que están inseridas las cárcavas es monocultivo de Olivar y con similares manejos, o sea, matorral con una altura de caída de gota de aproximadamente 1,65 m. El factor P que refleja las prácticas conservacionistas presenta valores de 0,5 y 0,6 en función del % pendiente, una vez que el cultivo es nivel en las áreas estudiadas.

Considerando los factores R, K, LS, C y P, las pérdidas de suelos estimadas con la USLE son de $5,27 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para cárcava de Torre Olvidada, $19,37 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en Berrueco, $9,15 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para Bailén I y $1,43 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para Bailén II. Son generalmente valores ligeramente inferiores a los establecidos por INES (2006) mediante similar metodología para los municipios de Fuerte del Rey y Torredelcampo (32 y $29 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, respectivamente) y Bailen ($12 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$). En Torre Olvidada, el valor de pérdida de suelo estimado por la USLE es mayor que el estimado con distancimetría láser, lo que probablemente se deba, tal como se ha apuntado antes, a que el valor de pérdida de suelo en la cárcava está subestimado.

Las estimaciones de pérdida de suelo con el método USLE son significativamente menores que el valor de pérdida de suelo para las cárcavas de Berrueco, Bailén I y Bailén II. Para la cárcava de Bailén II en que la USLE ha estimado menor valor entre las cárcavas estudiadas, es la que presenta mayor valor de $\text{t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ estimado con uso de distanciómetraria laser, representado una diferencia de 48,88 veces.

Gaspari *et al.*, (2007) presentan la clasificación cualitativa de la pérdida de suelo de muy bajo al muy alto (Tabla 11). Para la cárcava de Torredelcampo, las pérdidas de suelos son muy bajas con distanciometría láser y bajas en USLE.

Para cárcavas de Berrueco, la pérdida de USLE es media y con distanciometría láser es una pérdida alta. Esa categorización en un nivel arriba con distanciometría láser también ocurre en la cárcava de Bailén I, que pasa de bajo en USLE a medio en la cárcava. Como ya elucidado, el mayor contraste de resultados está en Bailén II, donde de pérdida muy baja en USLE pasa a pérdida muy alta en la cárcava (Tabla 12).

Tabla 8. Categorías de pérdida de suelo por Gaspari *et al.*, (2007)

	t ha ⁻¹ año ⁻¹
Muy bajo	<5
Bajo	5 – 10
Medio	10 – 25
Alto	25 -50
Muy alto	> 50

Tabla 9. Clasificación de las estimativas pérdida de suelos según Gaspari *et al.*, (2007)

Distanciometría Láser			USLE	
	t ha ⁻¹ año ⁻¹	Clasificación	t ha ⁻¹ año ⁻¹	Clasificación
Torre Olvidada	2,831	Muy bajo	5,27	Bajo
Berrueco	28,982	Alto	19,37	Medio
Bailén I	11,59	Medio	9,15	Bajo
Bailén II	69,669	Muy alto	1,43	Muy bajo

Todos estos datos, por tanto, apuntan en la hipótesis que señalábamos al principio: la pérdida de suelo en cárcavas multiplica la pérdida de suelo debido a erosión laminar y en surcos en factores que, en nuestro caso (y salvando la cárcava de Torre Olvidada) van de 1,3 a 49 veces. Esto da cuenta de la importancia de prevenir y restaurar adecuadamente estas estructuras erosivas si se quiere mantener una buena salud ambiental en nuestros olivares.

5.4 El control de cárcavas

Hay una necesidad creciente para la toma de decisión política y acciones en varias regiones geográficas y múltiples escalas. La sociedad enfrenta desafío de desarrollar estrategias que reducen el impacto ambiental negativo del uso de la tierra mientras mantiene los beneficios sociales y económicos (Foley *et al.*, 2003). Algunas particularidades y métodos potenciales del control de proceso de erosión hídrica intensivo que son aplicables a áreas con cárcavas son presentadas.

Nabi *et al.*, (2009) afirma que es importante minimizar la erosión del suelo mediante diferentes medidas de conservación y que la planificación de la conservación del suelo

puede parecer difícil para áreas más grandes, particularmente las áreas montañosas, que son inaccesibles en la mayoría de los casos.

Otra especificidad, es que la erosión tiende a concentrarse en el tiempo y que, por tanto, los eventos de lluvia de elevada intensidad y escasa recurrencia juegan un papel clave para entender la dinámica de la erosión de los suelos mediterráneos y del paisaje. Por tanto, la ejecución de actuaciones sobre la vegetación y el suelo que resulten necesarias, hay que preverla en función de las probabilidades de ocurrencia de eventos extraordinarios (García-Fayos, 2004).

Las prácticas conservacionistas evitan el impacto del agua de la lluvia y su flujo superficial. Las técnicas de conservar el suelo son clasificados por prácticas de carácter edáfico, mecánico y vegetativo (Lepsch, 2010).

Son principios básicos de control de cárcavas: i) mejorar las condiciones de la zona desde donde vierte el agua a la cárcava para reducir la escorrentía (por ejemplo, aumentando la cobertura por vegetación), ii) desviar, si fuera necesario, toda o parte de la escorrentía que entra en la cárcava., iii) estabilizar la cárcava mediante medidas estructurales (casi siempre por diques de retención) y si fuera necesario revegetación (Gómez *et al.*, 2011).

Para Castillo y Gómez (2016) las prácticas agrícolas sostenibles deben implementarse efectivamente desde las primeras etapas de la erosión de cárcavas, especialmente en zonas vulnerables áreas debido a la erosión de la lluvia, litologías blandas, suelos erosionables.

En estudios de Gaspari *et al.*, (2007) con la simulación de pérdida de suelo, fue generada una importante disminución de las pérdidas de suelo por erosión hídrica potencial estimada donde se introdujo el manejo del uso del suelo y la pendiente con prácticas de conservación, como fajas y prácticas silvícolas sobre la masa forestal.

Mendoza (2011) destaca el revestimiento para el control de la erosión ECB y el manto de refuerzo de la vegetación TRM. Los revestimientos ECB están formados por varias fibras orgánicas/sintéticas degradables tejidas, pegadas o estructuralmente adheridas con mallas. Los más utilizados están hechos de paja, virutas de madera, coco, polipropileno, o una combinación de estos, cosidos o pegados dentro o entre las mallas procesadas con orientación biaxial o en mallas de fibra natural tejida. Los TRM se usan habitualmente en aplicaciones hidráulicas, como canales de alto flujo, pendientes empinadas, diques y costas, donde las fuerzas erosivas pueden exceder los límites de la vegetación natural no reforzada o donde se prevén limitaciones para el establecimiento de la vegetación. Los TRM generalmente produce un refuerzo de la raíz de la vegetación ya que el proceso natural de

sedimentación rellena la manta y crecen sucesivas capas de vegetación dentro y a través de la estructura de aquella (Mendoza, 2011).

Aunque las restricciones naturales no pueden ser influenciadas, pero sólo pueden ser compensadas, los procesos de degradación pueden a veces ser revertidos por medio de intervenciones técnicas e innovaciones de investigación. Por ejemplo, las redes de carreteras y la expansión urbana deben ser controladas y gestionadas en función del potencial inducido por erosión e inundaciones (Tarolli y Sofia, 2016).

A medida que en el ámbito de las actividades económicas se considere al medio ambiente, el bienestar ambiental tenderá a repercutir en una mayor y mejor productividad, propiciando que el bienestar económico se mantenga creciente, o al menos constante en el mediano y largo plazo (Zamudio y Méndez, 2011).

6. CONCLUSIONES

1) Si bien las densidades lineales (km km^{-2}) de cárcavas obtenidas para el año 2009 se sitúan en los rangos establecidos por otros autores para las comarcas estudiadas, se disparan de forma muy significativa en 2011, con tasas de crecimiento del 45% y el 195% para la zona de Bailen y Fuerte del Rey/ Torredelcampo, respectivamente. El valor alcanzado en esta última zona en 2011, $4,824 \text{ km km}^{-2}$, es superior al expuesto en cualquiera de los trabajos de erosión en olivar consultados, lo que indica la gran trascendencia de este proceso.

2) Parece existir una relación entre la litología de la zona y la densidad de cárcavas a nivel regional. Así, la unidades aluviales de la zona de Bailen presentan baja densidad y poca tasa de crecimiento entre 2009 y 2011. Aunque se necesitarían posteriores estudios para confirmarlo, el parámetro mecánico que podría explicar mejor esta asociación es la resistencia estimada con penetrómetro de bolsillo, ya que arroja valores bajos y muy bajos en la zona con mayor densidad y tasa de crecimiento (Fuerte del Rey/ Torredelcampo), pero medios y altos en la de menor desarrollo del proceso (Bailén).

3) A nivel puntual, los valores de pérdida en cárcavas oscilaron entre las 3 y $70 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, que corresponden a pérdidas de suelo desde muy bajas (la referida Torre Olvidada) a muy altas (cárcava Bailen II). En el caso de la cárcava de Torre Olvidada, los valores tan bajos pueden estar relacionados con la actuación de restauración llevada a cabo, consistente en relleno de piedras y restos de poda, y en cementación de parte del cauce. Por otra parte, los elevados valores de la cárcava de Bailen II no parecen explicarse bien por su pendiente (8°) ni por la resistencia del material (tipo medio), y podrían estar relacionados principalmente

con la salida del drenaje de la carretera E-902. La erosión en cárcavas mostró pues gran heterogeneidad espacial, lo que indica su complejidad y dificulta su comparación, en términos absolutos, con otros trabajos de la bibliografía.

4) Por la razón expuesta en el punto anterior, ha sido complicado realizar una valoración precisa, en términos de beneficio/coste, de la técnica de distanciometría laser respecto a otras técnicas de cubicación empleadas en olivar. Más allá de los posibles errores de la técnica, la pérdida de suelo obtenida en nuestras cárcavas es perfectamente verosímil y se ha conseguido con un esfuerzo en coste económico y tiempo aceptables.

5) Excepto en una de las localizaciones analizadas (Torre Olvidada), se obtuvieron pérdidas de suelo en cárcavas superiores a los estimados mediante USLE para la erosión hídrica laminar y en surcos en las mismas microcuencas. Los valores USLE estuvieron comprendidos entre las 5 y 19 t ha⁻¹ año⁻¹, lo que suponen tasas de erosión de muy bajas a medias.

6) Exceptuando la cárcava de Torre Olvidada, pues, la erosión en cárcavas ha supuesto una pérdida de suelo comprendida entre 1,2 (cárcava de Torre Olvidada) y casi 50 veces (cárcava Bailen II) la erosión laminar y en surcos, lo que apoya la tesis de la gran relevancia de los procesos de flujo concentrado en la erosión en olivar, así como la necesidad de su control y restauración.

7) Finalmente, como futuros retos sobre los que habría de seguir investigando en este campo, podríamos citar: i) extender el estudio de variabilidad interanual de la densidad lineal a todo el periodo entre 2009 y 2018, no sólo al episodio 2009-2011; ii) estudios cuantitativos mediante GIS del grado de asociación entre litologías (u otras capas como tipo de suelo, pendientes, cobertura, etc.) y cárcavas, lo que podría dar mapas de susceptibilidad del terreno a la formación de cárcavas; iii) aplicación de esta metodología a cárcavas caracterizadas con otras técnicas, que permitiesen la valoración precisa de la misma; y iv) investigación del papel de las infraestructuras humanas, como las carreteras, en el nacimiento y desarrollo de cárcavas, así como en tecnologías de control y restauración.

7. REFERENCIAS

- Alonso, J.A., Bermúdez, F.L., Rafaelli, S. (2010). *La degradación de los suelos por erosión hídrica: métodos de estimación*. Murcia: Universidad de Murcia. 385 p.
- Alonso, J.A., García, R.A., Requejo, A.S., Alvarez, M.C.D., Montes, J.M.G. (1994). *Métodos de estimación de la erosión hídrica*. Madrid: Agrícola. 152 p.

Alonso, S.A. (2002). Erosión Hídrica en Campos de Agricultura Extensiva. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*. 13: 183-190p.

Álvarez, S., Soriano, M. A., Landa, B. B. and Gómez, J.A. (2007). Soil properties in organic olive groves compared with that in natural areas in a mountainous landscape in southern Spain. *Soil Use and Management*, 23, 404–416 p.

Aranda, S.M. (2006). Desarrollo metodológico para la evaluación del riesgo de erosión hídrica en el área mediterránea utilizando técnicas de teledetección y Gis. *Universidad Complutense de Madrid*: Tesis de doctoral. 236p.

Bermúdez, F.L. (2002). Erosión y desertificación: heridas de la tierra. Tres Cantos: Nivola. 190p.

Bermúdez, F.L., Ruiz, J.M.G (2008). La Degradación del Suelo por Erosión Hídrica en España. In: *Erosión y Degradacion del Suelo Agrícola en España*. València: Cátedra Divulgación de la Ciència. Universitat de València. 11 - 50p.

Boardman, J., Poesen, J., (2006). Soil erosion in Europe: major processes, causes and consequences. in *Soil Erosion in Europe* (eds J. Boardman and J. Poesen), John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK

Calle, O.C. (2003). Modelo dinámico para calificación de la amenaza pluvial y evaluación de la posibilidad de erosión en la sectorización geotécnica de oleoductos y su aplicación en la planeación y toma de decisiones. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. 320 p.

Casalí, J., López, J.J., Giráldez, J.V. (1999). Erosión por cárcavas efímeras en el sur de Navarra (España): descripción y cuantificación. *Ingeniería del Agua*, 6(3): 251-258p.

Castillo, C., Gómez, J.A. (2016). A century of gully erosion research: Urgency, complexity and study approaches. *Earth-Science Reviews* 160 (2016) 300–319p.

Castillo, R.P., James, M.R., Quinton, J.N., Taguas, E.V., Gómez, J.A (2012). Comparing the Accuracy of Several Field Methods for Measuring Gully Erosion. *Soil Science Society of America Journal* 1319 - 1332p.

Castillo C., Tagua, E.V., Zarco-Tejada, P., James, M.R., Gómez, J.A., (2014). The normalized topographic method: an automated procedure for gully mapping using GIS. *Earth Surf. Process. Landforms*, 39, 2002-2015p.

Cerdá, A., Bodí, M.B (2008). Erosión hídrica del suelo en el territorio valenciano. In: *Erosión y Degradacion del Suelo Agrícola en España*. València: Cátedra Divulgación de la Ciència. Universitat de València. 11 - 50p.

Cisneros, J.M., Cholaky, C.G., Gutierrez, A.C., Gonzales, J.G., Reynero, M.A., Diez, A., Bergesio, L. (2012). *Erosión hídrica: principios y técnicas de manejo*. Río Cuarto: UniRío Editora. 287 p.

Coelho, M.R., Fidalgo, E.C., Santos, H.G., Brefin, M.L., M.S., Pérez, D.V. (2013). Solos: tipos, suas funções no ambiente, como se formam e sua relação com o crescimento das plantas. In F.N.S. Moreira, J.E. Cares, B. R. Zanetti & S.L. Sturner (Eds.), *O Ecossistema Solo: componentes, relações ecológicas e efeitos na produção vegetal*. Lavras: Editora UFLA. 351p.

Conoscenti, C., Agnesi, V., Angileri, S., Cappadonia, C., Rotigliano, E., Märker, M. (2013). A GIS-based approach for gully erosion susceptibility modelling: a test in Sicily, Italy. *Environmental Earth Sciences*. N. 70. 1179–1195p.

Dávila, B. S. (2006). Caracterización de la materia orgánica de suelos representativos de ecosistemas amazónicos del Perú, Departamento de Ucayali, e influencia de su uso y manejo en el secuestro del carbono. Tesis Doctoral. *Universidad de Sevilla*. pp. 162.

De Alba, S. (1997). Metodología para el estudio de la erosión en parcelas experimentales: relaciones erosión-desertificación a escala de detalle. In *El paisaje mediterráneo a través del espacio y del tiempo: implicaciones en la desertificación*. Ibáñez, Valero Garcés y Machado. Geoforma Ediciones: Logroño. 259-294 p.

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. En: *Agricultura ecológica en secano: soluciones sostenibles en ambientes mediterráneos*. Ministerio De Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. p. 13-38.

De la Rosa, J.L.M., Herrera, B.J., Coletto, F.R., Zamorano, F.G., Caballero F.L., Rodríguez, E.S. (2010). *Agronomía y poda del olivar*. Sevilla: Consejería de Agricultura y pesca. 67p.

Desmet, P.J.J. Poesen, J. Govers, G. Vandaele, K. (1999). Importance of slope gradient and contributing area for optimal prediction of the initiation and trajectory of ephemeral gullies. *Revista Catena* 37. 377–392p.

FAO (2009). *Guía para la descripción de suelos*. Rome: FAO. 111p.

FAO (2015). *Status of the World's Soil Resources*. Rome: FAO. 650p.

Farré, J.M.R (2017). El cultivo del olivo en secano en alta densidad. Nuevas técnicas de cultivo. *Agricultura: Revista agropecuaria*, ISSN 0002-1334, Nº 1010, 2017, págs. 784-788

Florenzano, T.G. (2008). *Geomorfología: conceptos e tecnologías atuais*. São Paulo: Oficina de Textos. 320p.

Foley, J.A., Defries, R., Asner, G.P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S.R., Chapin, F.S., Coe, M.T., Daily, G.C., Gibbs, H.K., Helkowski, J.H., Holloway, T., Howard, E.A., Kucharik, C.J., Monfreda, C., Patz, J.A., Prentice, I.C., Ramankutty, N., Snyder, P.K. (2005). Global Consequences of Land Use. *Science* v. 309, 570 - 574p.

García-Fayos, P. (2004). Interacciones entre la vegetación y la erosión hídrica. En: Valladares, F. 2004. *Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante*. Páginas 309-334. Ministerio de Medio Ambiente, EGRAF, S. A., Madrid.

Gaspari, F.J., Delgado, M.I., Denegri, G.A (2009). Estimación Espacial, Temporal y Económica de la Pérdida de Suelo por Erosión Hídrica Superficial. *Revista Terra Latinoamericana*. Vol. 27. Número. 43-51p.

Gisbert, J.M., Ibáñez, S. (2002). *Génesis de suelos*. Valencia: Editorial de la UPV, D.L. 222 p.

Gobierno de España (2017). Mapa de Estados Erosivos. Disponible en <http://www.mapama.gob.es/es/biodiversidad/servicios/banco-datos-naturaleza/informacion-disponible/mapas_estados_erosivos.aspx>. Acceso en jun 2018.

Gómez, J.A. (2015). Procesos erosivos en olivar en Andalucía a diferentes escalas: entendimiento, magnitud, implicaciones e intentos de control. Actas de las *IV Jornadas de Ingeniería del Agua*. 14 p.

Gómez, J.A (2008). Erosión en el olivar andaluz. En Artemi Cerdà. *Erosión y Degradación del Suelo Agrícola en España*. 183- 208p.

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. J. Andalucía

Gómez, J.A. Battany, M., Renschler, C.S. and Fereres, E. (2003). Evaluating the impact of soil management on soil loss in olive orchards. *Soil Use and Management* 19, 127-134.p

Gómez, J.A., Romero, P., Giráldez, E., Fereres, E. (2004). Experimental assessment of runoff and soil erosion in an olive grove on a Vertic soil in southern Spain as affected by soil management. *Soil Use and Management*. V. 20. N .4. 426-431p.

Gómez, J.A., Sobrinho, T.A., Giráldez, J.V. and Fereres, E.(2009). Soil management effects on runoff, erosion and soil properties in an olive grove of Southern Spain. *Soil & Tillage Research* 102, 5–13 p.

Gómez, J.A., Taguas, E.V., Vanwalleghem, T., Giráldez, J.V., Sánchez, F., Ayusa, J.L., Lora, A. (2011). *Criterios técnicos para el control de cárcavas, diseño de muros de retención y revegetación de paisajes agrarios*. Manual del operador en inversiones no productivas. Sevilla: Junta de Andalucía. 58p.

Gómez, J.A., Infante-Amate, J., González de Molina, M., Vanwalleghem, T., Taguas, E.V., Lorite, I. (2014). Olive Cultivation, its Impact on Soil Erosion and its Progression into Yield Impacts in Southern Spain in the Past as a Key to a Future of Increasing Climate Uncertainty. *Agriculture*: 170-198p.

Gutiérrez, A.G., Schnabel, S., Contador, F.L. (2011). Procesos, factores y consecuencias de la erosión por cárcavas: trabajos desarrollados en la Península Ibérica. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*. n. 55. 59 -80p.

Hayas, A., Vanwalleghem, T., Laguna, A., Peña A., Giráldez, J.V. (2016) Reconstructing long-term gully dynamics in Mediterranean agricultural áreas. *Earth Syst. Sci.*. 235-249p.

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.

Julià, F.M., Monreal, T.E., Jiménez, A.S.C., Meléndez, E.G. (2004). Constructing a saturated hydraulic conductivity map of Spain using pedotransfer functions and spatial prediction. *Geoderma*. nº 123. 257–277 p.

Junta de Andalucía (2011). *Medio Ambiente en Andalucía. Informe 2010*. Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía. 513p.

Junta de Andalucía (2002). *El Olivar Andaluz*. Consejería de Agricultura y Pesca. 134 p.

Katz, H.A., Daniels, J.M., Daniels, Ryan S., (2014). Slope-area threshold of road-induced gully erosion and consequent hillslope-channel interactions. *Earth Surf. Process. Landform*. V. 39, 285-295p.

Lal, R. 1998. Soil erosion impact on agronomic productivity and environment quality. *Critical Reviews in Plant Sciences* 17, 319-464 p.

Leonard, J, Richard, G. 2004. *Estimation of runoff critical shear stress for soil erosion from soil shear strength*. *Catena* 57, 233-249 p.

Lepsch, I.F. (2010). *Formação e Conservação de Solos*. São Paulo: Oficina de textos. 2 ed. 216p.

Licciardello, F., Govers, G., Cerdan, O., Kirkby, M. J., Vacca, A., Kwaad, F. J. P. M., (2009). Evaluation of the PESERA model in two contrasting environments. *Earth Surface Processes and Landforms*. V. 34. N.5, 629–64p.

Madueño, J.M.M. (1991). *Capacidad de uso y erosión de suelos : una aproximación a la evaluación de tierras en Andalucía*. Agencia de Medio Ambiente: Sevilla. 446p.

Mancilla, N.F., García, R.C., Rodríguez, J.C.R. (1999). *Clasificación del suelo de la provincia de Jaén desde el punto de vista agrario: clases agrológicas*. Junta de Andalucía. 67p.

Martínez, A.M. (1991). Informe anual del sector agrario en Andalucía: . Málaga: Unicaja, D.L.

Mendoza, C.D. (2011). Alternativas para el control de la erosión mediante el uso de coberturas convencionales, no convencionales y revegetalización. *Ingeniería e Investigación* V.31. N.3 80-90p.

Menes, M.R.M., Granados, E.R., Mota, J.L.O., Espinosa, C.P., (2009). *Control de Cárcavas*. Secretaría De Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Gobierno del México. 1-9p.

Mengistu, D., Bewket, W., Lal, R.(2015). Soil erosion hazard under the current and potential climate change induced loss of soil organic matter in the Upper Blue Nile (Abay) River Basin, Ethiopia. *Sustainable Intensification to Advance Food Security and Enhance Climate Resilience in Africa*. Springer. 137- 164p.

Merritt, W.S., Letcher, R.A., Jakeman A.J., (2003). A review of erosion and sediment transport models. *Environmental Modelling & Software*, 18, 761–799p.

Ministerio de Medio Ambiente (2006). Inventario Nacional de Erosión de Suelos 2002-2012: Jaén. Andalucía. 213p.

Ministerio de Meio Ambiente (2016). *Inventario Nacional de Erosión de Suelos*. Disponible en <<https://www.mapa.gob.es/es/desarrollo-rural/temas/politica-forestal/inventario-cartografia/inventario-nacional-erosion-suelos/default.aspx>>. Acceso en septiembre. 2018.

Ministerio de Medio Ambiente (2006). *Inventario Nacional de Erosión de Suelos 2002-2012: Jaén. Andalucía*. Comunidad Autónoma de Andalucía. 213p.

Miró, J.L., Lara, S.M. (2003). Costes agrícolas por hectárea. In Lozano, J.M.M., Hernández, P.P.P., Martín, M. C. L. *I anuario agrario de la provincia de Jaén*. 400p.

Monfreda, C., Patz, J.A., Prentice, I.C., Ramankutty, N., Snyder, P.K. (2005). Global Consequences of Land Use. *Science* v. 309, 570 - 574p

Montes-León, M.A.L.M., Uribe-Alcántara, E.M. García-Celis. (2011). Mapa Nacional de Erosión Potencial. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. *Tecnología y Ciencias del Agua*, V. II, N. 1, 5-17p.

Morgan, R.P.C. (1997). *Erosión y conservación del suelo*. Madrid: Mundi PrDEMensa. 355p.

Moeyersons, J. (2003). The topographic thresholds of hillslope incisions in southwestern Rwanda. *Revista Catena*. N. 50. 381– 400p.

Nabi, G. Latif, M. Ashan, M. Anwar, S. (2008) Soil erosion estimation of Soan river catchment using remote sensing and geographic information system. *Revista Soil & Soil & Environment*. Vol. 27(1): 36-42.

Nyssen, J., Poessen, J., Moeyersons, J., Luyten, E., Veyret-Picot, M., Deckers, J., Haile, M., Govers, G., (2002). Impact of Road Building on Gully Erosion Risk: A case study from the northern Ethiopian Highlands. *Earth Surf. Process. Landforms*. V. 27, 1267-1283 p.

Orjuela, H.B (2016). El suelo y su relación con los servicios ecosistémicos y la seguridad alimentaria. *Revista de Ciencias Agrícolas*. Volumen 33(2):117-124p

Osti, C.L., López, S.B., Sánchez, F.M., Domínguez, M.C (2007). *Riesgo a la erosión hídrica y proyección de acciones de manejo y conservación del suelo en 32 microcuencas de San Luis Potosí*. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias: México. Libro Técnico n. 3. 215 p.

Pizzaro, R., Morales, C., Vega, L., Olivares, C., Valdés, R., Balocchi, F. (2009). *Propuesta de un modelo de estimación de erosión hídrica para la región de Coquimbo, Chile*. UNESCO - Programa Hidrológico Internacional. 92p.

Plaster. E.J (2014). *Soil Science & Management*. New York: Delmar Cengage Learning. 6º ed. 520 p.

Poesen, J., Nachtergaele, J., Verstraeten, G., Valentin, C. (2003). Gully erosion and environmental change: importance and research needs. *Catena*, Vol 50, 91– 133p.

Porta, J., López-Acevedo, M., Poch, R.M. (2014). *Edafología: uso y protección de suelos*. Madrid: Ediciones Mundi- Prensa. 3º ed. 607 p.

Porta, J., López-Acevezo, M., Roquero, C. (2003). *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa. 3ª Ed.930p.

Ramírez, V.M.V. (2016). *Caracterización de las propiedades hidrofísicas de los suelos del Centro Agropecuario Marengo CAM y su incidencia en su capacidad productiva*. Tesis de Magister. Universidad Nacional de Colombia. 126p.

Rodrigues, D.B.B., Sobrinho. T.A., Oliveira, P.T.S., Panchuki, E. (2011). Nova Abordagem sobre o modelo brasileiro de serviços ambientais. *Revista Brasileira de Ciências de Solo*, 35:1037-1045, 2011

Roffe, T. G., Crosta, A. P. ., Perez Filho, A. (2015). Análisis del factor-LS en diferentes modelos de predicción de la erosión hídrica del suelo. In: *XV Encuentro de Geógrafos de América Latina (EGAL), 2015, La Habana*. La Habana: Palacios de las Convenciones, La Habana, v. 1. 16p.

Rogers, J.D. (2006). Subsurface Exploration Using the Standard Penetration Test and the Cone Penetrometer Test. *Environmental & Engineering Geoscience*, Vol. XII, No. 2, 161–179p.

Roselló, M.J.P (1996). *Problemas en torno a la erosión hídrica: conceptos y métodos de análisis*. Málaga: Servicio de Publicaciones e Intercambio Científico de la Universidad de Málaga, D.L. 104p.

Seutloali, K.E., Beckedahl, H.R., Dube, T., Sibanda, M. (2016). An assessment of gully erosion along major armoured roads in south-eastern region of South Africa: a remote sensing and GIS approach. *Geocarto International*. v. 31, N. 2, 225–239p.

Silva, M.S.L. (1995). *Estudos da erosão*. Embrapa: Petrolina. 22p.

Soil Conservation Service, (1972). *Soil Survey laboratory methods and procedures for collecting soil samples*. U.S. Department of Agriculture, Washington.

Taguas, E.V., Yuan, Y., Bingner, R.L., Gómez, J.A., (2012). Modeling the contribution of ephemeral gully erosion under different soil managements: a case study in an olive orchard microcatchment using the AnnAGNPS model. *Catena* 98, 1–16 p.

Tánago, M.G. (1991). La ecuación Universal de Pérdidas de Suelo. Pasado, presente y futuro. Madrid: *Revista Ecología* n.5. 13-50 p

- Tapia, F., Ibacache, A., Astorga, M. (2003). *Requerimientos de clima y suelo (Manual del cultivo del Olivo)*. Instituto de Investigaciones Agropecuarias la Serena (Chile). Boletín INIA N° 101. 127p.
- Tarolli P, Sofia G. (2016). Human topographic signatures and derived geomorphic processes across landscapes. *Geomorphology* 255: 140–161 p.
- Terzaghi, K., Peck, R.B., Mesri, G. (1996). *Soil Mechanics in Engineering Practice*. 3ª ed. New York: Wiley-interscience publication. 592p.
- Trueba, C., Millán, R., Lago, C., Roquero, C., Magister, M. (1995). *Base de Datos de Propiedades Edafológicas de los Suelos Españoles. Volumen VI Andalucía(a): Jaén, Córdoba, Sevilla y Huelva*. Informes Técnicos Ciemat. 236p.
- Unasur - Unión de organizaciones de productores de aceitunas (2004). *Manual de Buenas Prácticas Agrícolas para el Olivar - Jaén*. Baeza: Unasur D.L. 240p.
- United States Department of Agriculture (2003). *Soil Survey Manual*. University Press of the Pacific: Honolulu. 503p.
- Valentin, C., Poesen, J., Li, Y. (2005). Gully erosion: Impacts, factors and control. *Revista Catena* n. 63 132 – 153p.
- Vanwalleghe, T., Infante Amate, J., González de Molina, M. (2011). Quantifying the effect of historical soil management on soil erosion rates in Mediterranean olive orchards. *Agriculture Ecosystems & Environment*. 142: 3-4: 341-351.
- Vanwalleghe, T., Hayas, A., Román, A., Hervás, C., Laguna, A., Peña, A., Giráldez, J.V. (2014). Evaluating long-term gully dynamics by data fusion from field measurements, photogrammetry and modelling. *Geoph Res Abs*, 16: EGU2014-15366.
- Velasco, I., Cortés, G. (2009). Índices de Fournier modificado y de concentración de la precipitación, como estimadores del factor de riesgo de la erosión, en Sinaloa, México. In *Avances en estudios sobre desertificación*. Murcia, 2009. 427-430p.
- Visqueira, F.D.F. (2011). *La ciencia del suelo: historia, concepto y método*. Santiago de Compostela: Universidade, Servizo de Publicacións e Intercambio Científico. 196 p.
- Wischmeier, W. H., Smith, D.D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning*. U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook No. 537. 67p.
- Yangue, J.L.F (2002). Manual práctico sobre utilización de Suelo y Fertilizantes. Madrid: Mundi-Prensa Libros. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. 1ª ed. 120 p.

Zamudio, V., Méndez, E. (2011). La vulnerabilidad de erosión de suelos agrícolas en la región centro-sur del estado de Nayarit, México. Bogotá: *Revista Ambiente y Desarrollo*. Volumen XV N. 28, enero-junio de 2011. 11-40 p.

Zertuche, J.I.V., Badii, A., Guillen., Zepeda, M.S.A. (2015). Causas e Impactos Socio-Económico y Ambientales de la Erosión. *Daena: International Journal of Good Conscience*. Vol. 10. n.1. 76-87p.

7. APÉNDICE

7.1 Apéndice I (Tablas)

Apéndice I – Tabla I. Descripción de las herramientas y técnicas de evaluación de la erosión hídrica de suelos. Adaptado de Bermúdez (2002), Hernández (2013) y Alonso *et al.*, (1994).

HERRAMIENTAS Y TÉCNICAS DE EVALUACIÓN DE EROSIÓN HÍDRICA DE SUELOS		
Métodos de evaluación cualitativos	Fotografía aérea	Es fuente de información de los efectos de la erosión y de los elementos del paisaje. La comparación de fotogramas aéreos de una misma área, obtenidos durante una serie de años, combinado con obtención de la información en campo, permite obtener resultados satisfactorios de la erosión hídrica.
	Teledetección por imágenes de satélites	Las imágenes de satélite y el análisis de los datos en SIG permiten evaluar la erosión del suelo en escalas temporales e y territorios diversos.
	Método de erosión-deposición	Método aplicado a suelos cultivados en pendiente. Considera que laderas cultivadas en pendientes registran pérdida de suelo en el tramo medio superior y acumulación de sedimentos en la base. En los pedestales de erosión, las diferencias entre niveles topográficos de superficies desnuda y protegidas permiten estimar tasas de erosión. Los rasgos erosivos no son permanentes, pues la labor se anulan los efectos de la erosión arroyada impidiendo la formación de regueros y cárcavas. El laboreo va mezclando los horizontes (superficial y profundo) y el proceso erosivo se traduce en remoción superficial uniforme asimilable a erosión laminar.
Métodos de evaluación cuantitativo (directo)	Parcelas de erosión	Las parcelas pueden ser abiertas (como Gerlach) o cerradas (ejemplo, Wischmeir). Aportan tasas de erosión en laderas. El colector Gerlach es un canalón que recogen las escorrentías y sedimentos producidos en una ladera por una tormenta. Las parcelas cerradas las superficies controladas varían entre los 16 y los 1200 m ² .

	Cuencas y microcuencas	Los sedimentos transportados pueden determinarse a través de una sección de control, que puede coincidir o no con la salida de la cuenca. En las cuencas y microcuencas se estudian los procesos erosivos, la emisión de sedimentos en suspensión y los arrastres por la corriente.
	Lluvia simulada	El experimento con lluvia simulada es aplicable en áreas con condiciones climáticas áridas. El método presenta algunas condiciones que en el medio real no ocurren, la como intensidad en mm/hora constante.
	Mediciones volumétricas	El cálculo del volumen erosionado puede realizarse mediante instrumentos como perfiladores topográficos, microtopográficos, piquetas, varillas, estacas, clavos y agujas de erosión. Son aplicadas en áreas de rápida evolución, como áreas abarrancadas en laderas con cultivos arbóreos y arbustivos de secano.
	¹³⁷ Cs	La técnica nuclear usa el ¹³⁷ Cs como radiotrazador para estudiar los movimientos físicos del suelo. Es un método dinámico que permite cuantificar de forma retrospectiva las pérdidas de suelo.
Métodos de evaluación cuantitativo (indirecto)	Modelos estadísticos	Son métodos estadísticos para evaluación específica en una cuenca hidrográfica. Ejemplo: Índice de agresividad de Fournier (1960), que establece como parámetros el clima y el relieve. Djorovic (1974), Jasen y Painter (1974), Dendy y Bolton (1976) y Das y Agarwal (1990).
	Modelos paramétricos	Son formulaciones empíricas que relacionan factores ambientales con la pérdida de suelo y producción de sedimentos. Además, intentan relacionar variables y parámetros (cantidad temporalmente invariables que caracterizan el sistema). Ejemplo: USLE (Universal Soil Loss Equation), SLEMSA (Soil Loss Estimator for Southern Africa)
	Modelos físicos	Se validan con mediciones y datos del sistema natural y se simula la respuesta del sistema (la erosión) a modificaciones en los factores que lo controlan. Ejemplos: ANSWERS-Areal, CREAMS, WEPP, EUROSEM Y LISEM.

Apéndice I - Tabla II. Relación de la fuerza (Kg) y la cohesión o ángulo de fricción -
Adaptado del manual del penetrómetro Geotester ST-308

<i>Suelos con textura fina</i>		<i>Suelos con textura gruesa</i>	
Fuerza (Kg)	Cohesión para la punta de 10mm de diámetro	Fuerza (Kg)	Ángulo de fricción para la punta de 20mm de diámetro
1	0,17	0,25	37°
2	0,34	0,5	38°
3	0,52	0,75	41°
4	0,69	1	42°
5	0,86	1,5	44°
6	1,03	2,5	46°
7	1,2	3,5	47°
8	1,38	5	48°
9	1,54	8	49°
10	1,72		

Apéndice I - Tabla III. Factor C - Adaptado de Wischmeier y Smith (1978)

Factor C							
		% Cubierta de gramíneas					
% Cubierta vegetal de Matorral *							
		0	20	40	60	80	95
25		0,4	0,18	0,09	0,04	0,013	0,003
50		0,34	0,16	0,08	0,038	0,012	0,003
70		0,28	0,14	0,08	0,036	0,012	0,003

* Matorral con altura de caída de gota de unos 1,65 m

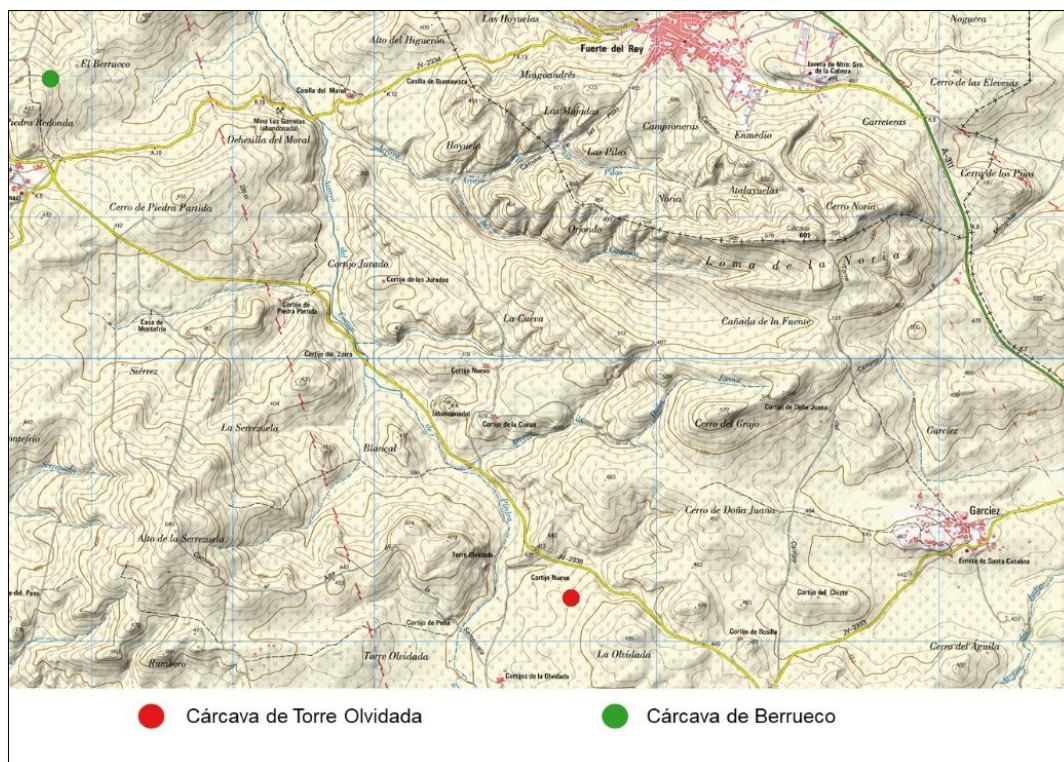
Apéndice I - Tabla IV. Factor P - Adaptado de Wischmeier y Smith (1978)

% Pendiente del terreno	P *
1 - 2	0,6
3 - 8	0,5
9 - 12	0,6
13- 16	0,7
17 - 20	0,8
21 - 25	0,9

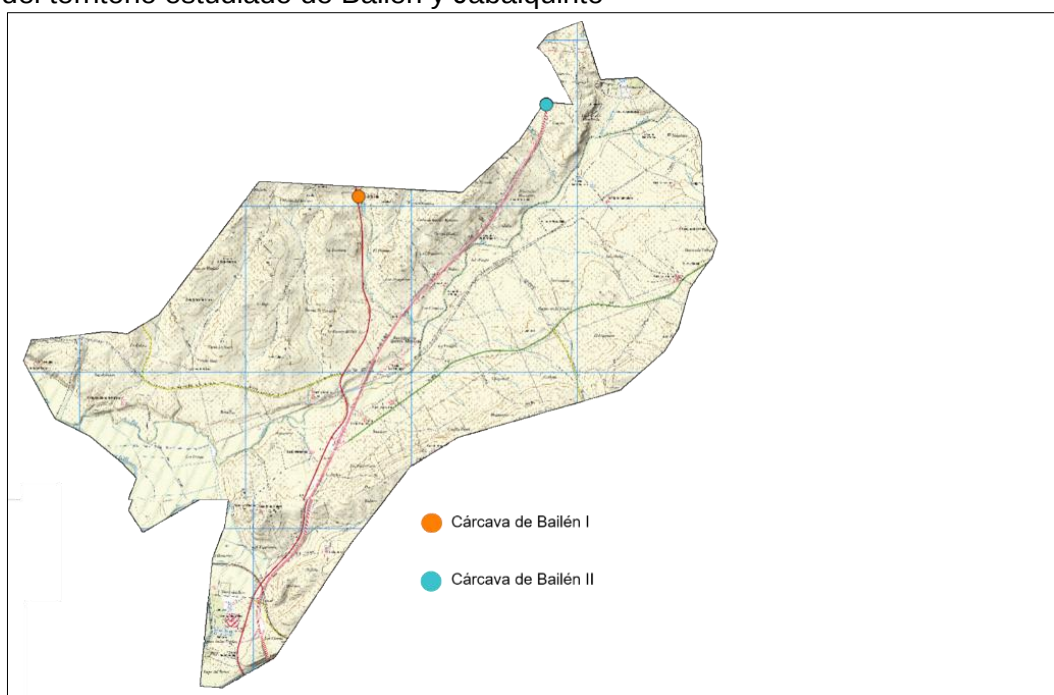
* Valor de P para cultivos em contorno

7.2 Apéndice I (Figuras)

Apéndice II – Figura I. Ubicación de las cárcavas en la carta topográfica del territorio estudiado de Fuerte del Rey y Torredelcampo



Apéndice II – Figura II – Ubicación de las cárcavas en recorte de la carta topográfica del territorio estudiado de Bailén y Jabalquinto



8. ANEXO

8.1 Resumen de las asignaturas

Asignaturas matriculadas en el Máster in Análisis, Conservación y Restauración de Componentes Físicos y Bióticos de los Hábitats:

- I. Técnicas geomáticas aplicadas al medio natural (GIS, teledetección y cartografía geoambiental: contempla el contenido introductorio de Geomática y sus técnicas y las aplicaciones de los Sistemas de Informaciones Geográficas. Presenta herramientas para obtención de informaciones del ambiente, como el UAV, y permite desarrollar la habilidad de elaboración de productos de la cartografía ambiental con software SIG y con datos disponibles en sitios del gobierno, cómo ortofotos e imágenes de satélites.
- II. Métodos avanzados de análisis de datos ambientales: además de los contenidos teóricos, presenta las técnicas para análisis estadísticas de datos obtenidos en investigaciones, con contenido específico para generación de informaciones ambientales. Presenta herramientas que pueden ser elegidos para procesar datos en función de la especificidad y objetivo del estudio.
- III. Caracterización de los componentes físicos del hábitat: incluye contenidos teóricos y prácticos sobre las técnicas para análisis de geoquímicas de muestra total, técnicas espectroscópicas, técnicas y normativas para caracterización de la materia orgánica y técnicas microanalíticas en microscopia electrónica. Las técnicas son presentadas de modo a permitir elegir para analizar determinado material y en función del objetivo de la investigación.
- IV. Caracterización de elementos bióticos del hábitat: posee contenido sobre clasificación y caracterización de los hábitats, estimativas de abundancias de poblaciones, métodos para evolución del estado de conservación de hábitats terrestres y técnicas para muestreo en medio terrestre y acuático. Presenta requisitos para elaboración del plan de manejo y gestión, además de explícalos.
- V. Recursos hídricos y ecosistemas acuáticos: presenta características de acuíferos y métodos empleados en investigaciones de los mismos. Contempla la caracterización de los hábitats relacionados al medio acuático y los principios para la conservación, gestión y uso sustentable dos los humedales.
- VI. Conservación y restauración de sistemas terrestres: tiene cómo introducción la dinámica de los recursos geológicos y la gestión de recursos no renovables. Caracteriza problemas ambientales como la erosión de suelos acelerada, movimientos gravitaciones, desertificación, salinización y sodificación. Ejemplifica técnicas para la conservación y restauración de suelos y métodos para la evaluación de pérdida de suelos. Presenta los requisitos para elaboración de proyectos de restauración ambiental.

- VII. Explotación sostenible de suelos y agroecosistemas: presenta métodos para análisis y evaluación de la calidad de los suelos, técnicas para el cultivo agrícola sostenible y el control de plagas. Describe técnicas remediación de suelos contaminados y restauración de cubiertas vegetales. Ejemplifica los resultados de mejora de la propiedad de los suelos con la implementación decurrentes del manejo sostenible en agroecosistemas.
- VIII. Modelización de la distribución potencial de especies y hábitats: presenta el contenido sobre la distribución de especies y su relación con los planos para la conservación. Considerando esa relevante relación, expone, de modo práctico, la elaboración de SDM, desde la obtención de datos hasta la interpretación de los resultados generados y cómo él puede auxiliar en la definición de acciones favorables a la conservación de especies y hábitats.
- IX. Técnicas de conservación de flora amenazada: presenta contenidos relacionados a evaluación de las amenazas a flora, la clasificación IUCN y como conocimientos de la genética poblacional y la biología reproductiva pueden contribuir con la conservación de plantas. Presentan también los métodos empleados en estudios demográficos de plantas y las técnicas utilizadas con la finalidad de conservación (*in situ* y *ex situ*) y requisitos de los planes de conservación y restauración de especies de plantas amenazadas.
- X. Invasiones biológicas: describe las características de las especies exóticas invasoras y sus impactos en los ecosistemas. Presenta especies exóticas invasoras da fauna y flora y técnicas para el control, en contexto mundial.
- XI. Geomorfología fluvial y análisis de inundaciones: presenta la teoría relacionada a la geomorfología, morfodinámica fluvial y sedimentología fluvial. Presenta contenido y actividades prácticas con el software *Iber* para análisis de la dinámica fluvial de inundaciones
- XII. Restauración de impactos asociados a la explotación de recursos geológicos: presenta definiciones sobre yacimientos de menas metálicas y las sustancias que se explotan, los fundamentos geológicos y las características ambientales de los yacimientos, bien como su potencial contaminante. Presenta los métodos de explotación de yacimientos y sus impactos ambientales y técnicas para la restauración del medio en que ocurrió la explotación.
- XIII. Prácticas externas: permite la aproximación del estudiante de máster con empresas, instituciones de educación y órganos del gobierno para la realización de práctica.
- XIV. Trabajo de Fin de Máster: orienta para la realización de investigaciones de temas relacionados al máster y culmina con la elaboración y exposición de un trabajo de disertación.

8.2 Curriculum Vitae

Aline da Costa Ribeiro

Rua Sargento Juvêncio 130, Ap 301 C. Cep: 50920-420. Recife – PE, Brasil

+5581997963399

alinecr2@hotmail.com., adr00022@red.ujaen.es

Nacionalidad: brasileña., Fecha de Nacimiento: 20/03/1991

FORMACIÓN ACADÉMICA

- Máster en Análisis, Conservación y Restauración de Componentes Físicos y Bióticos de los Hábitats.
Universidad de Jaén (2017/2018)
- Especialidad en Educación Ambiental
Faculdade Campos Elíseos (2016)
- Licenciatura en Ingeniería forestal
Universidade Federal Rural de Pernambuco (2015)
- Licenciatura en Gestión Ambiental
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco (2012)

EXPERIENCIA LABORAL

- Asistente técnico – Medio Ambiente
Prefeitura de Jaboatão dos Guararapes, PE, Brasil, (Ayuntamiento)
Enero a octubre de 2017
- Agente Ambiental
Prefeitura de Jaboatão dos Guararapes, PE, Brasil (Ayuntamiento)
Octubre de 2014 a diciembre de 2016
- Prácticas
Parque Estadual Dois Irmãos, Recife, Pernambuco – Brasil
Mayo a junio de 2014

- Práticas
Laboratório de Fertilidad de Suelos, Recife, Pernambuco – Brasil (*Grupo de Química Ambiental de Solos – UFRPE*)
Noviembre de 2012 a enero de 2014

FORMACIÓN COMPLEMENTARIA

- *Elaboração de inventário de gases de efeito estufa*
CDP e ICLEI (2017)
- *Sistemas de Cultivo na silvicultura e projetos florestais*
SENAR (2017)
- *Desenvolvimento sustentável*
SESI (2015)
- *Assistente ambiental*
SESI (2015)
- *Recuperação de Áreas Degradadas*
SESI (2014)
- *Manejo florestal para técnicos*
Associação Plantas do Nordeste (APNE) – (2014)
- *Supervisão Ambiental em Obras*
Universidade Federal Rural de Pernambuco (2013)
- *Solos e meio ambiente*
Universidade Federal Rural de Pernambuco (2011)
- *Avaliação da qualidade da água: Ferramentas Físico-Químicas, Biológicas e Toxicológicas*
Universidade Federal Rural de Pernambuco (2011)
- *Técnicas de monitoramento de qualidade da água*
Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia de Pernambuco (2011)
- *Planejamento e gestão ambiental*
Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia de Pernambuco (2010)