



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Facultad de Ciencias Experimentales

Trabajo Fin de Grado

**Análisis espacio-temporal de
la erosión en cárcavas en el
olivar.**

**Aplicación de técnicas
microgeodésicas.**

Alumno: Pedro Díaz Martínez

Junio, 2017

Agradecimientos:

Este trabajo ha sido financiado en su integridad por el Centro de Estudios Avanzados en Ciencias de la Tierra (CEACTierra) de la Universidad de Jaén, a través del Proyecto “Avances en el análisis espacio-temporal de la erosión en el olivar: una aproximación integral”. Por esta razón, me gustaría agradecer sinceramente la inestimable ayuda en la obtención y procesamiento de datos que los investigadores participantes en este Proyecto me han prestado en todo momento; especialmente a la Dra. Maria Isabel Ramos Galán, profesora del Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría, investigadora principal del Proyecto, y a D. Manuel Avilés Moreno, técnico contratado del CEACTIONTierra. Así mismo, me gustaría agradecer a Theo Guerra Dug, alumno de doctorado del Departamento de Geología, su amable colaboración en todo el trabajo de campo y en la realización de las medidas microgeodésicas.

Dar las gracias a mis dos tutores Julio Calero Gonzalez y Victor Aranda Sanjuan.

Agradecer por último a mis padres que han hecho lo posible y lo imposible para que yo pudiera terminar mis estudios. Gracias.

Contenido

RESUMEN	4
ABSTRACT	4
1. INTRODUCCIÓN	5
1.1 El problema de la erosión en el olivar.	5
1.2 Tipos de procesos de erosión en olivares.	9
1.3 Fundamentos metodológicos para la estimación de la erosión.	13
2. OBJETIVOS	21
3. MATERIAL Y METODOS	22
3.1 MATERIAL	22
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	27
4.1 Erosión laminar (RUSLE)	27
4.2. Erosión en la cárcava estimada con microgeodesia.....	32
4.3 Propiedades físico-químicas del suelo	33
4.4 Caracterización geomecánica.....	38
5. CONCLUSIONES	42
6. REFERENCIAS	43

Figuras

Figura 1 Erosión remontante (Suarez 1992)	12
Figura 2 Proceso general formación cárcava	12
Figura 3 Modelos de formación de cárcavas (Suarez 1992)	13
Figura 4 Constelación NAVSTAR.....	18
Figura 5 Esquema posicionamiento GPS.....	18
Figura 6 Esquema de posicionamiento estático relativo	20
Figura 7 Localización del Terreno (PNOA).....	22
Figura 8 Terreno de estudio (Google maps).....	23
Figura 9 Acotamiento de la cárcava (google maps)	23
Figura 10 Acotamiento del terreno con líneas de nivel (PNOA)	24
Figura 11 Características Geológicas	25
Figura 12 Muestreo del terreno	26
Figura 13 Zona de estudio.....	28

Figura 14 Zona de ladera A (pendiente) ; 1:10.000 cotas 10m	28
Figura 15 Zona de ladera B (Llana) ; 1:10.000 cotas 10m	29
Figura 16 Modelo Digital del Terreno (MDT) del perfil de la cárcava	33
Figura 17 Periodo 2005-2007.....	35
Figura 18 Periodo 2009-2001.....	36
Figura 19 Periodo 2013-2015.....	36
Figura 20 Final del proceso de acarcavamiento.....	37
Figura 21 Susceptibilidad al inicio del proceso de acarcavamiento en los puntos de muestreo	39
Figura 22 Resistencia al ensanchamiento de la cárcava por desprendimiento de los taludes	41

RESUMEN

La erosión hídrica es el principal proceso de degradación que afecta a olivares, y puede provocar la total pérdida de productividad de los cultivos. Existen dos formas de erosión hídrica: laminar y en cárcavas. La erosión laminar se estima mediante la conocida ecuación RUSLE, pero se ha avanzado poco en cuantificación de la erosión en cárcavas de olivares. En este trabajo se han aplicado por primera vez técnicas de microgeodesia en una cárcava de olivar, obteniendo una pérdida de 82,7 Mg / ha año. Esta pérdida supuso ocho veces la erosión calculada en base a RUSLE (10,3 Mg / ha año). Medidas en campo indicaron, además, que el principal mecanismo de crecimiento fue el ensanchamiento de la cárcava, debido al colapso gravitacional de sus taludes. Se concluye la necesidad urgente de seguir avanzando en el estudio de las cárcavas, debido a la gravedad que este proceso supone.

ABSTRACT

Water erosion is the main degradation process affecting olive groves. It can cause the total loss of productivity of crops. Two forms of water erosion are defined: laminar and gully erosion. Laminar erosion is estimated using the well-known RUSLE equation, but little progress has been made in quantifying gully erosion. In this work, micro-geodesy techniques were applied for the first time to a gully in olive groves. We obtained a soil loss of 82.7 Mg / ha year. This was eight times the erosion calculated with RUSLE (10.3 Mg / ha year). Moreover, field measures of soil strength also indicated the main growth mechanism in the gully was the widening, due to the gravitational collapse of its slopes. Due to the significance of this erosion process, the urgent need for further progress in the study of gullies in olive groves has been concluded.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 El problema de la erosión en el olivar.

La erosión hídrica del suelo es uno de los problemas más importantes del cultivo de olivo en España. Estos terrenos son en donde las pérdidas de suelo son mayores, mucho mayores a las observadas en cultivos de cereal/girasol o en zonas de pastizal o matorral. “Más de 80 toneladas de suelo por hectárea se pierden anualmente en los cultivos leñosos en Andalucía, pérdidas que son aún mayores en los suelos de olivar con fuertes pendientes” (Laguna, 1989).

Los factores que condicionan de forma esencial la pérdida de suelo en los cultivos del olivar son; cultivo en suelo en pendiente, suelos arcillosos con baja capacidad de infiltración además de marcadamente hidrófobos con las primeras lluvias en otoño. Un clima mediterráneo con periodos de sequía y lluvias de gran intensidad en un corto periodo de tiempo, además de una escasa cobertura vegetal en el suelo en el cultivo.

Prácticas agrícolas, como el laboreo, han influido decisivamente en la aceleración del proceso erosivo. Debemos ser conscientes de que el laboreo no es una forma natural de mantenimiento de un suelo en un olivar, ya que al desagregar las partículas y al destruir la cubierta natural, es el sistema de cultivo que genera las mayores pérdidas de suelo. Sistemas alternativos como el no-laboreo, mínimo laboreo o el cultivo con cubierta vegetal pueden contribuir a reducir globalmente las pérdidas de suelo.

En la mayoría de los olivares de secano las disponibilidades de agua para el cultivo dependen fundamentalmente de la fracción de agua de lluvia infiltrada y almacenada en el suelo, y de las cantidades de agua perdidas por evaporación desde el suelo, cantidades que en zonas áridas y cálidas como la nuestra son cuantiosas y nunca despreciables (Fischer y Turner, 1978).

Los sistemas de manejo del suelo modifican sustancialmente la infiltración y a la evaporación de agua desde el suelo. Las modificaciones en las propiedades físicas de los suelos como consecuencia del cambio sistema de cultivo, lo que finalmente se traducirá en diferencias en las disponibilidades finales de agua.

Esto tiene una gran importancia, ya que en zonas áridas y en cultivo de secano, pequeñas variaciones en las cantidades de agua disponibles para el cultivo pueden afectar significativamente a su crecimiento y producción.

En regiones como Andalucía donde el proceso de ocupación del espacio posee una historia milenaria gran parte de los suelos con potencial agrícola están ya en producción, e incluso ciertas partes del territorio, no pequeñas en nuestro caso, han sido abandonadas agrícolamente tras haber sufrido un uso inapropiado.

El olivar en Andalucía ocupa 1,5 millones de hectáreas, de las cuales el 78% son de secano y el 84% están situadas en laderas con pendientes superiores al 5% (Consejería de Agricultura y Pesca, 2006). Esto ayuda a entender los graves problemas de erosión de suelo asociados al olivar (Gómez et al., 2003). Aunque minoritario aún, en los últimos años se ha producido una notable expansión del olivar ecológico además de mantener cubierta vegetal en olivares convencionales, principalmente en la provincia de Córdoba. Esta transición desde convencional a ecológico ha sido acompañada por un cambio en el manejo del suelo (Milgroom *et al.*, 2007), con una tendencia al aumento del uso de cubiertas vegetales y, obviamente, al abandono del uso de herbicidas.

Por otra parte, la gran importancia de la superficie agraria de Andalucía, hace que la conservación del recurso natural primario que es el suelo sea algo trascendental, debido a que la estabilidad de la productividad agrícola descansa sobre el mantenimiento de la calidad de dichos suelos y no en la puesta en cultivo de nuevas tierras.

Por tanto, la erosión del suelo constituye uno de los grandes problemas ambientales a los que se enfrenta la humanidad del siglo XXI, con importantes repercusiones en los planos social y económico. La erosión forma parte del conjunto de procesos que causan la degradación del suelo y que conducen, en tierras áridas y semiáridas, hacia la desertificación del territorio. Así se ha vuelto a poner de manifiesto recientemente mediante la conferencia celebrada el 17 de junio de 2016 en la que el secretario general de la ONU Ban Ki-moon afirmaba: “Sin una solución a largo plazo, la desertificación y la degradación de

las tierras no solo afectarán el suministro de alimentos, también propiciarán un aumento de las migraciones y pondrán en peligro la estabilidad de muchas naciones y regiones. Por esta razón, los dirigentes mundiales decidieron que lograr la neutralización de la degradación de las tierras sería una de las metas de los Objetivos de Desarrollo Sostenible”.

Si se tiene en cuenta que la erosión potencial, determinada por factores climáticos, fisiográficos y geoedáficos, es aún mucho mayor que la que actualmente se está produciendo, que además las condiciones climáticas no favorecen una rápida regeneración natural de la cubierta vegetal cuando ésta se pierde de forma accidental o intencionada, se entiende la importancia que debe concederse a las actuaciones de protección, conservación, defensa contra incendios, plagas y enfermedades, restauración y gestión sostenible de los ecosistemas forestales, que no está reñida (todo lo contrario) con el aprovechamiento y disfrute ordenado de los bienes y servicios que los montes proporcionan a la sociedad.

Además, para centrar aún más la magnitud del problema, debe tenerse en cuenta el estado de buena parte de los suelos de la provincia: suelos esqueléticos, degradados, probablemente sometidos a intensa erosión en el pasado y suelos frágiles, muy vulnerables frente a la erosión, que puede arrebatarles su exigua capa fértil a un ritmo mucho mayor del que la naturaleza es capaz de crearla.

1.1.1. Implicaciones económicas

De todos los fenómenos de degradación del medio ambiente, la erosión es uno de los más importantes (Kaiser *et al.*, 2004). 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 1640 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).

Tan significativo como el coste ambiental es el coste económico de la erosión. Así, en USA se ha perdido más de 44 mil millones \$ al año, en daños a tierras de cultivo, infraestructuras y salud humana (Pimentel *et al.*, 1995), mientras que en Europa este coste no está aun suficientemente valorado (Boardman, 2006).

1.1.2.Marco legislativo

Las administraciones, tanto a nivel nacional como europeo han tomado conciencia de este problema (Finn *et al.*, 2009; Louwagie, 2011). Así, en los próximos años el uso sostenible del suelo y el control de la erosión será uno de los pilares fundamentales de la Política Agraria Común (PAC) (EC, 2011), tal como se recoge en los Reglamentos No. 2183/2005 de la Comisión europea (EC, 2005), el marco legislativo del RD 486/2009 de 3 de abril en su Anexo II (BOE, 2009) y la Ley 5/2011 Andaluza del Olivar, en su artículo 22 (LAO, 2011).

1.1.3.Erosión en el olivar dentro de la provincia de Jaén:

La provincia de Jaén es la zona con mayor producción de aceite de oliva del mundo (3.227.991 toneladas previstas para campaña 2013/14; casi un 20% de la producción mundial). El cultivo ocupa una superficie de **6000 km²**, que supone el 41% de la superficie total de la provincia (Gómez-Limón y Riesgo, 2010). La mayor parte de las explotaciones son de olivar convencional, siendo sólo el 2% de las explotaciones son de Olivar Ecológico (CAAE, 2000).

La superficie afectada por erosión de la provincia de Jaén es la mayor de Andalucía y una de las mayores de España. Las tasas de erosión en la provincia arrojan un valor medio de 32 Mg ha⁻¹yr⁻¹, con más de 1000 km² con tasas extremas superiores a los 100 Mg ha⁻¹yr⁻¹ (INES, 2004). Más allá de los factores geo-ecológicos (litología, topografía, clima), estas tasas de erosión responden a cambios en el uso del suelo y cobertura vegetal (García-Ruiz, 2010).

La extensión del olivar hacia áreas naturales u ocupadas por otros cultivos ha sido el cambio de uso del suelo más importante en la Provincia de Jaén en los últimos 250 años (Garrido-González, 2005). Este incremento puede estimarse

en un 92%, hasta ocupar la superficie actual de 6000 km² (frente a los apenas 480 km² que este autor estima hacia 1750).

Así mismo, a la extensión del cultivo de olivar hay que añadir la aceleración en las tasas de erosión por parcela durante el mismo periodo, debido a la intensificación de la agricultura. Vanwallegghem et al. (2011) cifran este incremento en un 50%, desde 30 Mg ha⁻¹yr⁻¹ en 1750, hasta más de 60 Mg ha⁻¹yr⁻¹ en 2011. Esta tasa de erosión en olivar es consistente con las estimadas por otros autores, como Gómez et al. (2003) y Álvarez et al. (2007). Estos datos pueden implicar pérdidas de espesor del suelo que, en casos particulares de litología sensibles como las margas, pueden llegar a 0.52 cm con picos ocasionales de más de un metro y medio (Vanwallegghem et al., 2011). En base a estos datos, el Inventario Nacional de Erosión de Suelos estima que más de un tercio de los suelos de Jaén se les pronostica una vida media inferior a 25 años (INES, 2004), pasados los cuales dejarán de ser productivos y habrán de abandonarse.

1.2 Tipos de procesos de erosión en olivares.

Podemos definir erosión de suelo como la pérdida y arrastre de los horizontes edáficos superiores, lo que produce una disminución de las propiedades físicas de este y su estructura. El principal agente de erosión y en el que centraremos nuestro estudio, es la erosión hídrica del suelo. Este proceso es el causante primordial de la pérdida de suelo en Jaén, donde los suelos cada vez son más esqueléticos favoreciendo un proceso de desertización acelerado por el hombre.

Los sistemas de manejo tecnológico y de apropiación del suelo para las actividades agrícolas han ido muchas veces en detrimento de este recurso, ocasionando una mínima posibilidad de sostenibilidad de tales actividades en el tiempo. El proceso comienza con la ruptura de un equilibrio que se ha dado a través de una interacción ininterrumpida entre el medio físico y el medio biótico, con la remoción de la vegetación del suelo para dar entrada a otras formas vegetales, orientadas hacia la producción; luego se deterioran las propiedades físicas de la superficie de los terrenos y se somete el suelo a un laboreo periódico con elementos de labranza, apareciendo el fenómeno erosivo.

Es indiscutible la importancia de aquel generado por la utilización tradicional de la tierra a efectos de la implementación de cultivos y sistemas de pastoreo, lo cual se soporta por una parte en la extensión a nivel mundial de tales prácticas productivas, y por otra, derivada de la anterior, en la dependencia económica a diferentes niveles. Con respecto a la primera, puede anotarse que de las tierras de uso agropecuario, aproximadamente una tercera parte se dedica a cultivos y las partes restantes a pastos, y que de ellas cerca de un 80% sufre niveles moderados y severos de erosión, y un 10% erosión leve (Müller y Castillo, 1997).

La erosión hídrica favorece la pérdida de material fino del suelo debido a la ruptura de los agregados por impacto de las gotas de lluvia sobre un suelo desnudo. Dichas partículas son arrastradas vertiente abajo por las aguas de escorrentía. Dentro de este tipo de erosión encontramos dos formas diferentes de actuación del agente erosivo “agua”: la erosión hídrica laminar y la erosión concentrada en surcos y cárcavas.

1.2.1. Erosión hídrica laminar:

Es una forma de erosión superficial que se produce por acción del escurrimiento, perdiéndose una fina y uniforme capa de toda la superficie del suelo en forma de lámina. Algunos autores denominan sheet erosion a la combinación de erosión por salpicadura y erosión laminar (Troeh *et al.*, 1991), mientras que otros denominan a esta combinación como interrill erosion (Fangmeier *et al.*, 2006).

Este proceso produce una mayor pérdida neta de suelo que la erosión por salpicadura siendo el tamaño de partículas más afectado el que se desprende debido a la energía de la lluvia. Algunos autores postulan que el flujo laminar no existe, y que en realidad son flujos turbulentos poco perceptibles, que van organizándose e incrementando su potencial erosivo a medida que se incrementa la velocidad del escurrimiento (Morgan, 1995).

Es un tipo de erosión poco perceptible por el productor, no obstante, es una importante vía de pérdida de suelo en condiciones de baja pendiente y suelos con infiltración disminuida.

1.2.2. Erosión hídrica concentrada: la erosión en cárcavas.

La erosión en cárcava consiste en el vaciado de las partículas del suelo o sustrato por un flujo concentrado que da lugar a estrechas incisiones, de mayor tamaño y profundidad que un reguero, y que generalmente llevan agua sólo durante e inmediatamente después de fuertes precipitaciones (Osterkamp, 2008).

El crecimiento de una cárcava puede producirse a través de tres mecanismos principales; el crecimiento aguas abajo de su cabecera, el ensanchamiento del cauce y su profundización. Cuando el flujo salva el escarpe de la cabecera, se produce un continuo remolino sobre la base del mismo que da lugar a su socavación.

El término "erosión remontante" o "regresiva" describe el proceso de expansión de una cuenca hidrográfica, relacionado con el progreso gradual hacia la cabecera de la cuenca, mediante la incisión fluvial en la parte alta de los ríos como consecuencia directa de la caída del nivel base por causas climáticas y/o tectónicas (Chen and Chen, 2006). Este desarrollo de cárcavas pone en riesgo a la red viaria, especialmente cuando la erosión remontante alcanza las calzadas o cuando los deslizamientos laterales de grandes incisiones desestabilizan amplios tramos de viales. Este riesgo es más acusado en redes comarcales y locales, que en años lluviosos pueden verse seriamente comprometidas a lo largo de múltiples sectores (Fernández del Castillo et al., 2016, Carpena *et al.*, en prensa), ocasionando grandes pérdidas directas e indirectas. De igual forma, los nuevos trazados y rehabilitación de las carreteras suponen la concentración de los caudales de pequeñas cuencas a través de las cunetas, (Nyssen *et al.*, 2002; Katz *et al.*, 2014) lo que intensifica la erosión a la salida de las alcantarillas de desagüe, creando un ciclo de retroalimentación entre la erosión por cárcavas y los daños en carreteras.

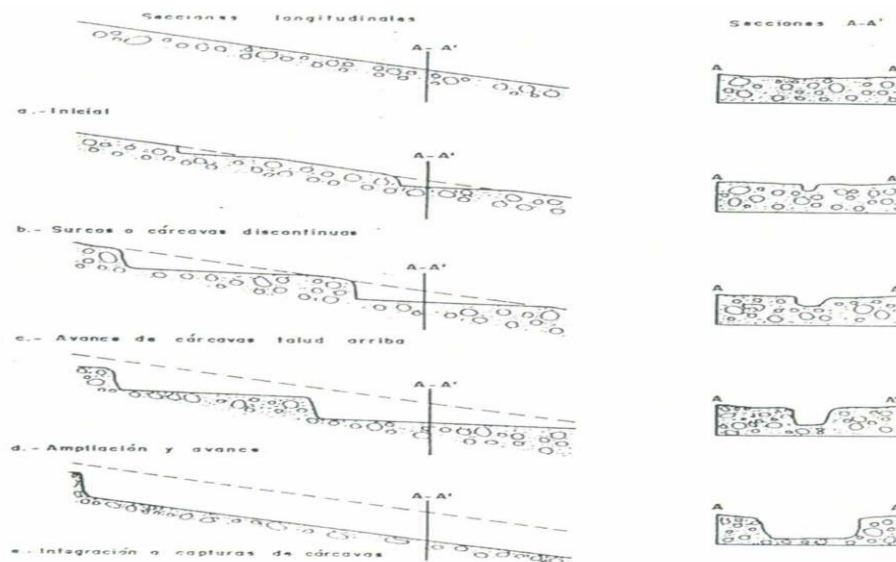


Figura 1 Erosión remontante (Suarez 1992)

Por ensanchamiento del cauce. Al profundizarse el fondo de la cárcava esta se amplía por la inestabilidad geotécnica de los taludes laterales (Bache y Macaskill, 1984).

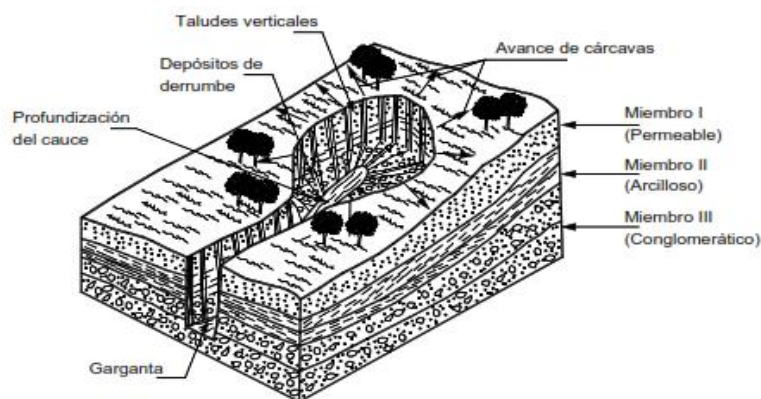


Figura 2 Proceso general formación cárcava

La erosión en túnel, subfusión, se produce en los suelos propicios para la formación de conductos subterráneos. A menudo se trata de suelos que contienen capas de arcillosas que se contraen o expanden en función de la humedad, o capas que se dispersan espontáneamente con el agua durante las lluvias.

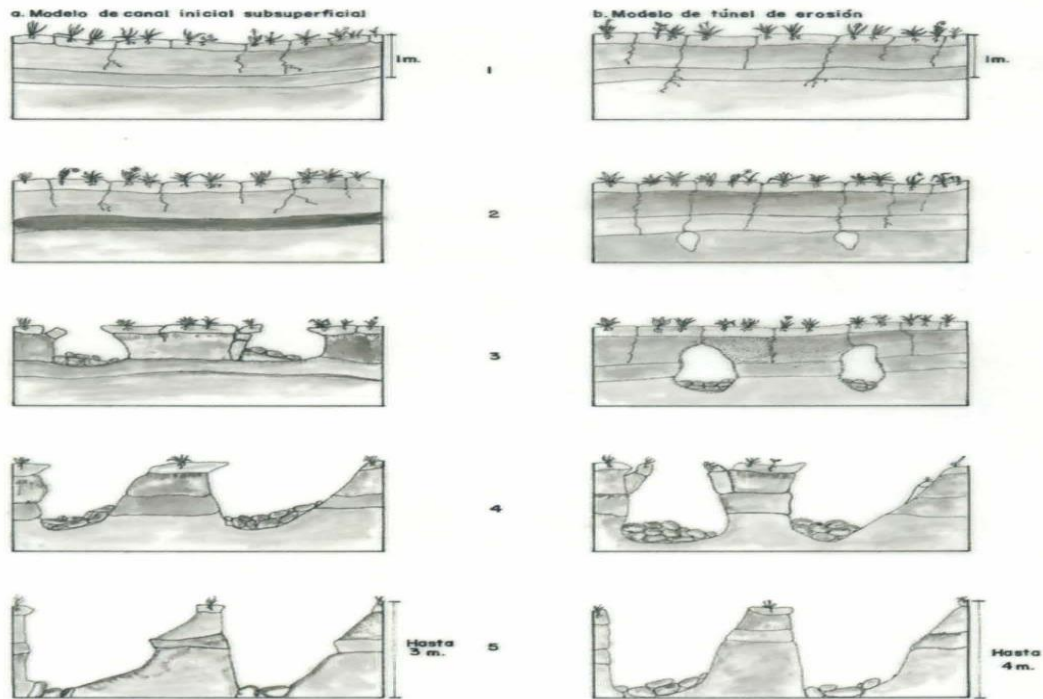


Figura 3 Modelos de formación de cárcavas (Suarez 1992)

La erosión en cárcavas es el proceso más destructivo de suelo y uno de los más presentes en nuestra región. Nuestro estudio está basado en el cálculo de material perdido por dicho proceso medido en **Tm/ha/año**

1.3 Fundamentos metodológicos para la estimación de la erosión.

1.3.1 Estimaciones paramétricas: modelo RUSLE.

En un principio fue denominada USLE (Universal Soil Loss Equation) pero esta fue revisada en el año 1997, pasando se a llamar RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) (Renard *et al.*, 1997).

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (RUSLE) es el modelo matemático más utilizado para predecir las pérdidas del suelo debidas a la erosión superficial. Durante muchos años, la USLE ha sido utilizada en terrenos agrícolas (desde 1957), y desde 1972 en adelante también en pastizales y terrenos forestales.

El modelo es paramétrico y para predecir la erosión potencial se toma en consideración los siguientes factores:

$$A = R \times K \times LS \times C \times P$$

PÉRDIDA DE SUELO (A): Pérdida de suelo por unidad de superficie. Se obtiene por el producto del resto de los factores. Se expresa en Toneladas (Mg)/hectárea/año.

FACTOR EROSIVIDAD DE LA LLUVIA (R): Factor lluvia. El número de unidades del índice de erosión (EI_{30} de Wischmeier: energía cinética de un aguacero por su máxima intensidad en 30 minutos, dividido por 100; para poder calcular la energía cinética total se divide la precipitación en períodos de aproximadamente la misma intensidad) en el período considerado.

El índice de erosión es una medida de la fuerza erosiva de una lluvia determinada. Se requieren pluviómetros de registro automático. Una alternativa de aproximación para expresar su valor es empleando la siguiente ecuación (índice de Fournier modificado):

$$R = \sum \frac{p^2}{P}$$

Donde; p= precipitación mensual; P= Precipitación anual.

FACTOR EROSIONABILIDAD (K): Expresa la susceptibilidad del suelo a erosionarse. Es función de la textura, estructura, contenido de materia orgánica, permeabilidad, entre otras características edáficas. El factor K expresa la pérdida anual media de suelo por unidad del factor R, para unas condiciones tipo de suelo desnudo, labrado recientemente según la dirección de la pendiente, sin prácticas de conservación, en las condiciones normalizadas para las parcelas establecidas por Wischmeier, y en las que los demás factores adquieren el valor unidad.

Para el cálculo de K, Wischmeier & Smith se basaron en aquellas propiedades del epipedón más relacionadas con la susceptibilidad del suelo a la erosión: Limo USDA + arena muy fina (%); Arena fina a muy gruesa (%); Materia orgánica (%); Tipo de estructura; Permeabilidad del suelo. Wischmeier & Smith (1978) realizaron un nomograma para el cálculo del factor K y de su equivalente en fórmula

FACTOR LONGITUD-INCLINACIÓN DE PENDIENTE (LS): Recoge los efectos combinados debidos a las características fisiográficas de la ladera. Al basarse el desarrollo de la USLE en una longitud de las parcelas normalizada en 22.13 metros, el factor LS se define y calcula como a continuación se expresa. El factor longitud de pendiente (L) sería:

$$L = \left(\frac{X}{22.13}\right)^m$$

Donde; X = longitud de la ladera, distancia desde el inicio de la escorrentía superficial al inicio del depósito de sedimentos.

m = constante que depende de la pendiente (s), que a su vez se calcula:

S (%)	m
0-1	0.2
2-3	0.3
4-5	0.4
>5	0.5

El factor inclinación (S) sería:

$$S = \frac{0.43 + 0.3s + 0.043s^2}{6.613}$$

Donde s = pendiente expresada en %

Factor cubierta y manejo (C): Se trata de 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 barbecho continuo.

Factor de práctica de conservación del suelo (P): Indica la relación que existe entre las pérdidas de un suelo con cultivo a nivel, en franjas, en terrazas, en bancales o con drenaje superficial, y las pérdidas de suelo correspondientes a la labor en línea de máxima pendiente.

1.3.2. Medición y control de la erosión en cárcavas.

El control de erosión por cárcavas, a pesar de la existencia de algunos buenos ejemplos aislados de control, sigue siendo una asignatura pendiente, que se

realiza con una disparidad de criterios, algunos no siempre acertados. En los últimos años se han desarrollado materiales para un mejor diseño de su control (e.g. Gómez et al. 2011b, EUTROMED 2015) pero en numerosas ocasiones no se previene su aparición, su control se aborda cuando la cárcava ha alcanzado dimensiones muy grandes, o se realiza con fallos de diseño que ocasiona el colapso de las medidas de control en las siguientes tormentas importantes (e.g. Taguas et al. 2012). Su elevado coste, en relación a la capacidad de inversión de las explotaciones, es otro obstáculo en el que se debe seguir avanzando en reducir. Existe un uso poco desarrollado de las barreras vegetales, que podrían ser muy útiles para reforzar el efecto de las cubiertas vegetales en las zonas perimetrales de cauces, caminos y explotaciones. Existen algunos ejemplos, por ejemplo el proyecto INSPIA (2015) que incluye márgenes multifuncionales y buffers alrededor de cauces, pero no se ha encontrado información publicada sobre su extensión en el sector ni sobre su efectividad real en el control de erosión. La situación general con respecto a la efectividad de las barreras vegetales (buffers) en países donde ha sido evaluada (e.g. Jiang y Piza, 2015) indica que esta es normalmente menor que la obtenida en estudios experimentales debido, especialmente, a la dificultad de obtener una barrera vegetal bien implantada. Dada la importancia que estas barreras podrían tener parece apropiado intensificar los esfuerzos en desarrollar materiales y metodologías para su implantación y mantenimiento, así como una evaluación rigurosa de su efectividad en nuestras condiciones. Para esta evaluación, y también para reducir la incertidumbre en las predicciones de modelos y en la optimización de las técnicas de control de erosión, es previsible que jueguen un papel relevante las técnicas de trazado de sedimento: marcando suelo con algún trazador fácilmente identificable; o de huella de sedimento, “fingerprinting” (e.g. Walling, 2013), en la que se comparan las propiedades del sedimento con las del suelo de las zonas potenciales de origen discriminando la fracción que viene de cada zona. Guzmán et al. (2013) usando un trazador magnético a escala de ladera fueron capaces de identificar distintas intensidades de erosión dentro de las parcelas experimentales de olivar. Es previsible que la combinación de propiedades físico-químicas tradicionales con otras más novedosas pueda permitir identificar las zonas prioritarias de emisión de sedimento a escala de cuencas de varias decenas o centenares de hectáreas.

Esto abriría nuevas puertas desde el punto de vista de investigación y también posiblemente desde el punto de vista regulatorio.

Hasta el momento, no se ha empleado la microgeodesia como método de estimación 3D en campo. Se abordará el estudio de la erosión en cárcavas, estimando la pérdida real de suelo en la cárcava mediante un MDE de alta precisión. Se pretende comprobar la aplicabilidad y fiabilidad de esta metodología al caso de la erosión en cárcavas en el olivar. De este modo se podría disponer de una herramienta de gran eficacia y precisión para evaluar correctamente un problema agroambiental de gran dimensión a escala local y regional, facilitando la implantación de una agricultura de precisión más sostenible

Se trata de comparar la pérdida de suelo en un mismo terreno calculada por una parte mediante el método de USLE con el cálculo de los sistemas globales de Navegación por Satélites (GNSS)

En la última década los sistemas GNSS (Global Navigation Satellite Systems) han revolucionado las metodologías de captura de datos sobre el terreno. Dichos sistemas engloban el uso de satélites, estaciones en tierra e instrumentación con el fin de determinar posiciones alrededor de la Tierra. De entre ellos el GPS ha sido el más desarrollado a partir del sistema militar Norteamericano TRANSIT, utiliza la constelación de satélites artificiales NAVSTAR formada por 24 satélites, de tal forma que en cualquier momento y en cualquier punto, habrá más de 4 satélites de la constelación en el horizonte. Este es el menor número de satélites necesario para realizar observaciones reales con cierta precisión.



Figura 4 Constelación NAVSTAR

Existen otros sistemas GNSS operativos como GLONASS, propiedad de la Federación de Rusia, pero hay otros muchos que se están desarrollando, como el sistema Galileo, por parte de la Unión Europea, o el sistema Beidou, por parte de la República Popular de China.

En todos los GNSS la situación del punto donde está el usuario se obtiene como resultado de la intersección de las esferas concentradas en cada uno de los satélites que se observan y cuyos radios son las distancias al punto en el que se sitúa el sensor o receptor GNSS.

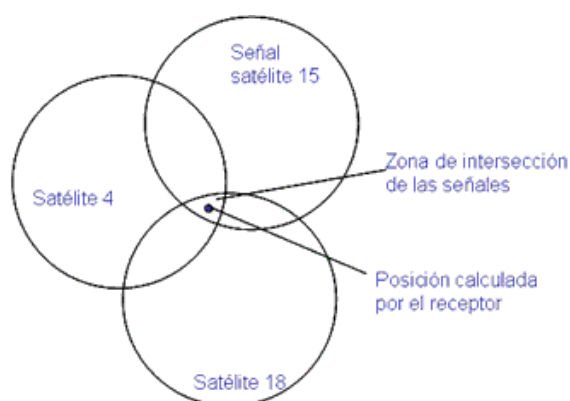


Figura 5 Esquema posicionamiento GPS

El cálculo de estas distancias se puede ver afectado por el filtrado que realiza la cubierta vegetal, o por la presencia de objetos que afectan el campo radioeléctrico, etc. Todos ellos son indeseables pues introducen error en la determinación de la posición. Otro aspecto importante en la toma de datos GNSS es la geometría de la observación, es decir, las posiciones que poseen

los satélites a partir de los que se calcula la posición. Este aspecto geométrico se registra como parámetro de calidad por medio del índice GDOP (Geometric Dilution of Precision).

Existen múltiples formas de trabajo con estos equipos. Se habla de posicionamiento absoluto si las coordenadas se determinan con un único receptor y los satélites; y de posicionamiento relativo cuando las coordenadas se determinan aprovechando observaciones simultáneas en un segundo receptor que se sitúa en una posición previamente conocida. Esta última situación permite corregir ciertos errores del sistema y alcanzar mayores precisiones posicionales. En la actualidad el posicionamiento relativo está muy facilitado por la existencia de redes activas de posicionamiento que ponen, en muchos casos de manera gratuita, a disposición del público los datos de esas estaciones de posiciones conocidas para poder realizar los cálculos con correcciones diferenciales. Las correcciones pueden ser accedidas en tiempo real por Internet, Telefonía o vía Radio. Esto se denomina RTK (Real Time Kinematic) cuando el dispositivo es móvil.

En función del movimiento del receptor se distingue entre posicionamiento cinemático (en movimiento) y estático (parado). El sistema más utilizado en Geodesia y Topografía es el posicionamiento estático relativo. Con el que se consiguen las mayores precisiones posibles, tanto para la observación de las redes geodésicas como para la densificación de las redes locales en los levantamientos topográficos y de ingeniería.

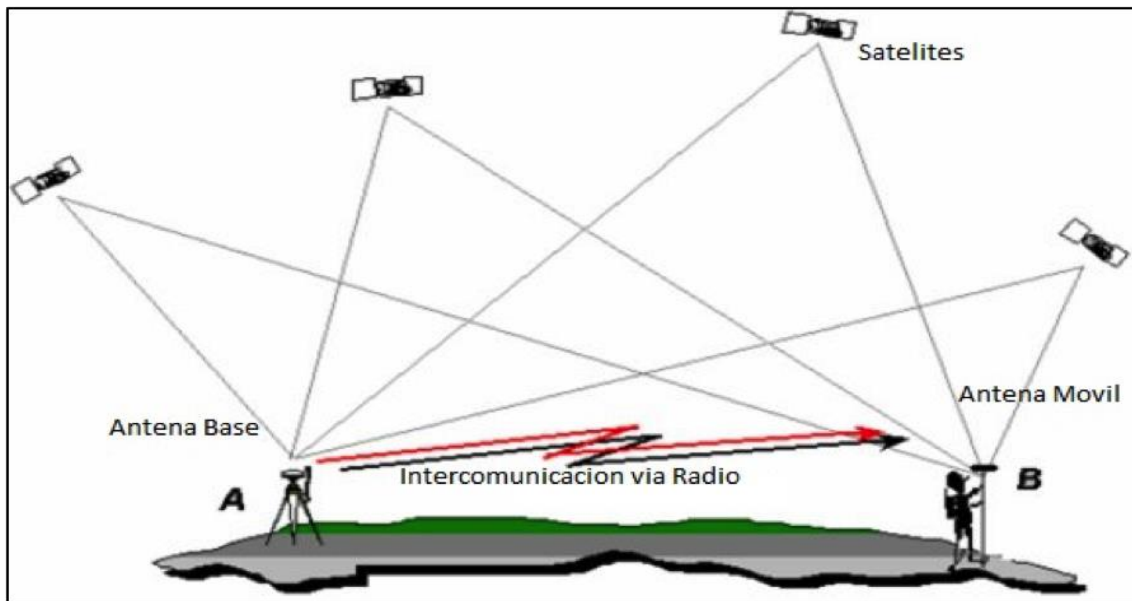


Figura 6 Esquema de posicionamiento estático relativo

A partir del mensaje de navegación que recibe el satélite en la onda portadora, el receptor puede conocer parte del código PRN que recibe de un satélite en concreto. El receptor genera simultáneamente una réplica de este código PRN. El tiempo que tarda la señal en viajar desde el satélite hasta el receptor puede derivar haciendo coincidir la señal del satélite que llega de este con la réplica generada en el receptor. Esto proporciona un retraso de la señal (signal delay), la cual se convierte en tiempo de viaje. A partir del tiempo de viaje, y de la velocidad de la señal se puede calcular la distancia al satélite.

$$D = c \cdot \Delta t$$

Donde: ***D*** : distancia al satélite ; ***c*** : velocidad de la onda; ***t*** : tiempo

Las evoluciones de las metodologías de trabajo con GPS permiten el empleo de métodos de evaluación más rápidos, eficientes y precisos, compatibilizando la captura masiva de datos con gran nivel de detalle tanto en zonas pequeñas como en aquellas de mayor extensión (Ramos et al., 2011). La integración de las Redes de Estaciones Permanentes GNSS, y en el caso de Andalucía, la Red de Posicionamiento Andaluza (RAP) supone un salto cualitativo en el registro de datos de precisión en campo. Esto unido al análisis tridimensional de los Modelos Digitales de Elevaciones (MDE) a partir de software 3D avanzados, han conseguido dar un salto cualitativo y cuantitativo muy importante en el conocimiento preciso de la erosión.

2. OBJETIVOS

Con el presente trabajo se pretende plantear de forma piloto, y de un modo preliminar, la evaluación de la erosión laminar mediante USLE y compararla con la erosión en cárcavas para ver la verdadera magnitud de esta última. Mediante dicha comparación sabremos si la erosión en cárcavas es menor, igual o mayor que la erosión laminar. De este modo, se inicia una investigación cuya tarea y objetivo básico y último, a largo plazo, es cuantificar y modelizar año tras año este tipo de erosión para así permitir el desarrollo de nuevos sistemas de control de la misma.

Hasta el momento, no se ha empleado la microgeodesia como método de estimación 3D en campo. Se abordará el estudio de la erosión en cárcavas, estimando la pérdida real de suelo en la cárcava mediante un MDE de alta precisión. Se pretende comprobar la aplicabilidad y fiabilidad de esta metodología al caso de la erosión en cárcavas en el olivar. De este modo se podría disponer de una herramienta de gran eficacia y precisión para evaluar correctamente un problema agroambiental de gran dimensión a escala local y regional, facilitando la implantación de una agricultura de precisión más sostenible.

En síntesis, en nuestro estudio hemos utilizado las herramientas que nos proporciona la microgeodesia para poder entrar a valorar los siguientes objetivos:

1. Estudio microgeodésico para valorar la pérdida de suelo (Tm/ha año) debido a la erosión en cárcavas.
2. Valoración de la erosión hídrica mediante la RUSLE (que no incluye la pérdida de suelo en cárcavas).
3. Valoración de la sensibilidad del suelo a la formación de cárcavas:
 - a. Sensibilidad al crecimiento por erosión remontante y profundización (estudiados en campo con cizallómetro)
 - b. Sensibilidad al crecimiento por ensanchamiento (estudiados en campo con penetrómetro).

4. Relación de la morfología de la cárcava con los parámetros de sensibilidad al crecimiento.
5. Comparación de la erosión en cárcavas con la erosión hídrica laminar y en surcos (RUSLE)

3. MATERIAL Y METODOS

3.1 MATERIAL

3.1.1 Localización geográfica

El estudio se realizó en el término municipal de Torredelcampo (Jaén). Concretamente en la finca con titularidad de “Empresa Hnos. Castro-Eslava” (37°55' N; 3°53' O) (Figuras 7 y 8). Empleando las herramientas del visor IBERPIX del PNOA se procedió a acotar espacialmente el área de estudio, que consistió en una microcuenca de 9.11 ha (Figura 9).

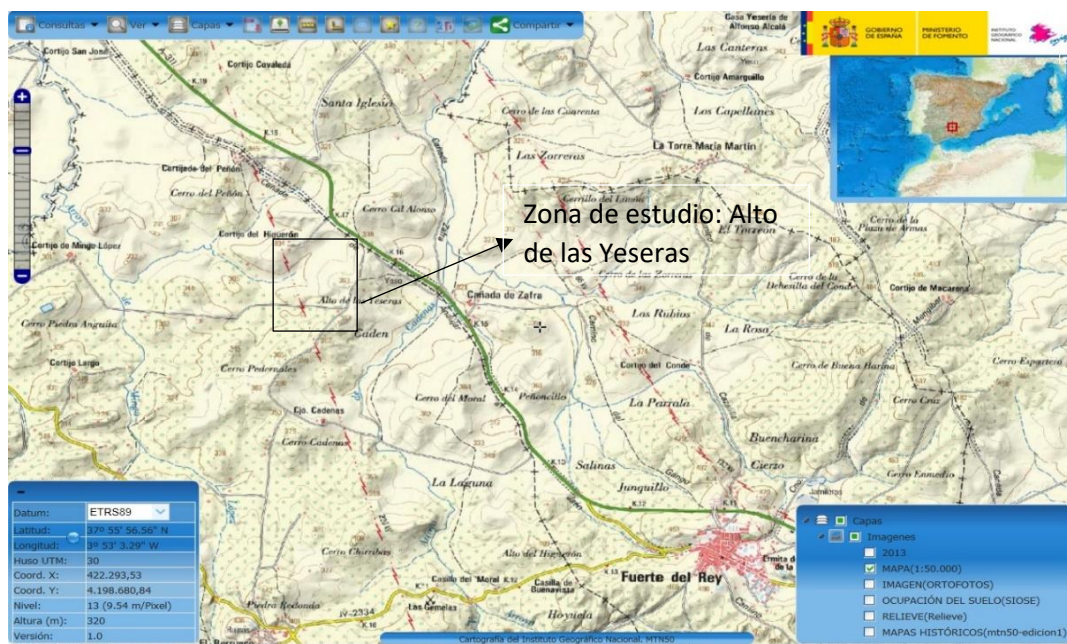


Figura 7 Localización del Terreno (PNOA)



Figura 8 Terreno de estudio (Google maps)

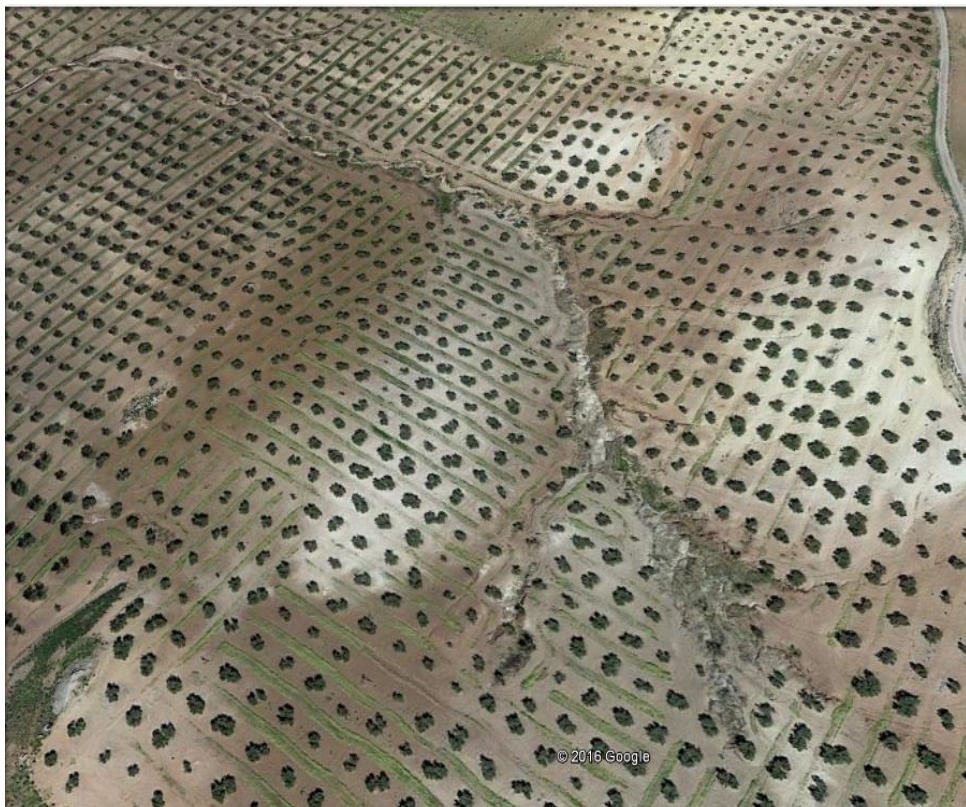


Figura 9 Acotamiento de la cárcava (google maps)

ACOTAMIENTO ESPACIAL: MICROCUENCA DE LA CÁRCAVA



Figura 10 Acotamiento del terreno con líneas de nivel (PNOA)

3.1.2. Contexto geológico del área de estudio

La zona de estudio se situó en el Alto de las Yeseras (Figura 11), perteneciente a la unidad olistostrómica de la depresión del Guadalquivir. Litológicamente se compone de materiales blandos como arcillas y margas de edad Triásica y Cretácica, con bloques dolomíticos y alta concentración en algunas zonas de

A topographic map of the study area in the Sierra de Guadalupe. The map shows contour lines, rivers, and various geographical features. A black circle highlights a specific location, and an arrow points to it with the label "Zona de estudio". The map includes labels for "Cerro Pedernales", "Corrida de Colada", and "Corrida de Mingo Lopez". The area is characterized by orange-brown terrain with blue lines representing water bodies and red lines representing roads or trails.

3.1.3. Características agronómicas del olivar.

3.1.4 Muestreo y toma de datos en campo

Se tomaron muestras de cada una de las subzonas para su análisis gravimétrico y una parte de estas fueron llevadas al laboratorio para su análisis físico-químico.

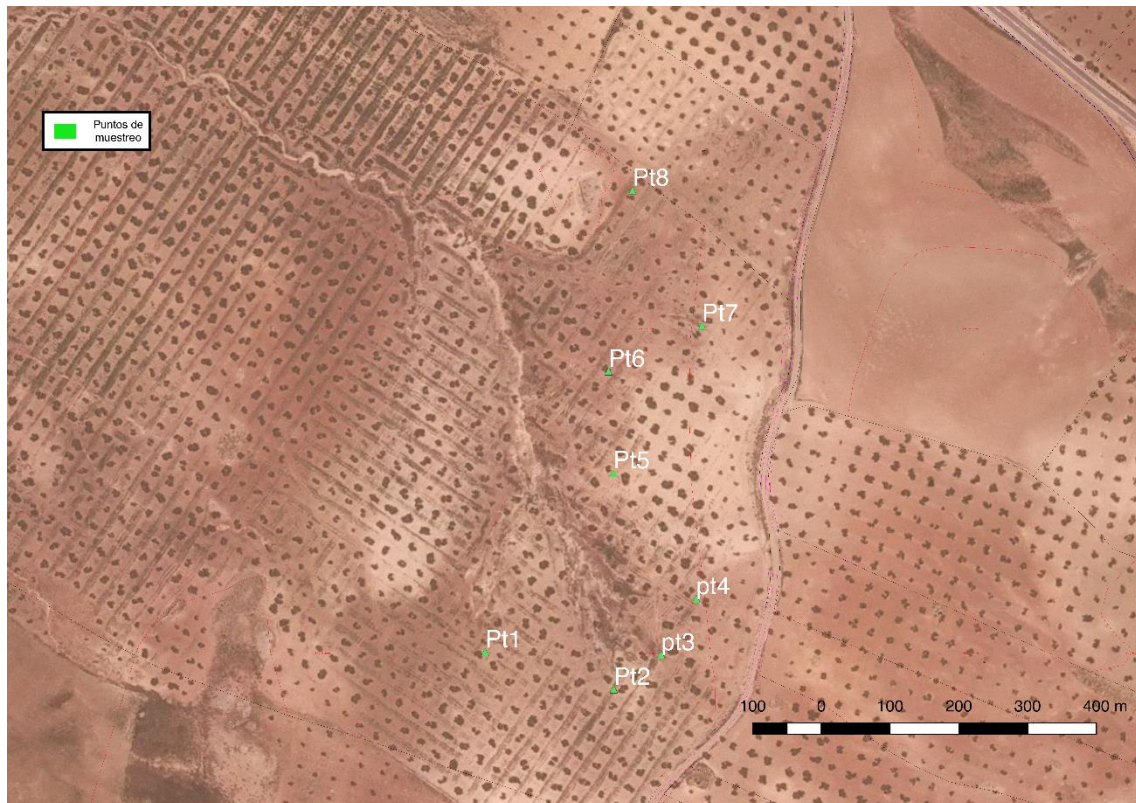


Figura 12 Muestreo del terreno

El material muestreado fue tamizado en una cota de malla $<2\text{mm}$ y los fragmentos gruesos fueron secados en horno a 105° durante 24 horas.

Mediante el cilindro kopecky de $(5 \times 5\text{cm})$ se calculó la densidad aparente de cada una de las muestras recogidas en la cabecera de la cárcava principal, fueron analizadas 8 muestras.

Mediante un penetrómetro de bolsillo se estimaron en campo los parámetros de resistencia del suelo: cohesión (c) y ángulo de rozamiento interno (θ), mediante la aplicación de las ecuaciones de Terzhagi. Con esto se calculó la estabilidad de los taludes de la cárcava, cuyos desprendimientos o colapsos suponen la principal forma de ensanchamiento de la cárcava. El ensayo consiste en la introducción en el terreno de dicho artificio para el cálculo de la resistencia a la penetración del horizonte. Además se utilizó un cizallómetro (Torvane test) para el cálculo de la resistencia al corte de terrenos cohesivos y no drenados asimismo como medir también la sensibilidad del suelo de la finca a los mecanismos lineales de crecimiento de la cárcava: la erosión remontante

(crecimiento hacia arriba) y la profundización (crecimiento hacia abajo). En los dos casos, con cada uno de los aparatos se realizaron 15 medidas por parcela.

Por otro lado, se determinaron las siguientes propiedades físicas en el laboratorio:

- Textura, mediante el método de Bouyoucos (densímetro), calculando los % de arena muy fina (50-100 μm) necesarios para el cálculo USLE.
- Densidad aparente del suelo. La muestra contenida en el cilindro kopecky, de volumen conocido (98,17 cm^3) se depositó sobre una cápsula previamente tarada y se secó en la estufa a 105°C durante 48 horas. La densidad aparente del suelo se calculó como el peso de la muestra seco en la estufa dividido entre el volumen del cilindro tomado en campo.
- La medida de permeabilidad se realiza a través de la conductividad hidráulica saturada (K_s , en cm h^{-1}) es la medida estándar de la capacidad del suelo para transmitir agua (infiltración), y fue llevada a cabo en laboratorio mediante un infiltrómetro de carga constante (Eijkelkamp Agrisearch Equipment, Giesbeek, NL).

Y las siguientes propiedades químicas:

- pH. mediante el método potenciométrico, en una suspensión suelo:agua 1:1 (p/p)
- Carbono orgánico, mediante el método de oxidación con dicromato potásico y valoración con sal de Morh (método de Tyuring). La materia orgánica se obtiene de multiplicar el carbono orgánico medido mediante Tyuring por el factor de van Bemmelen (1,724)

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Erosión laminar (RUSLE)

A continuación, se indica el procedimiento y los cálculos realizados para la estimación en Tm/ha año de la erosión hídrica laminar de la microcuenca de estudio, empleando la metodología RUSLE (Figuras 13, 14 y 15).

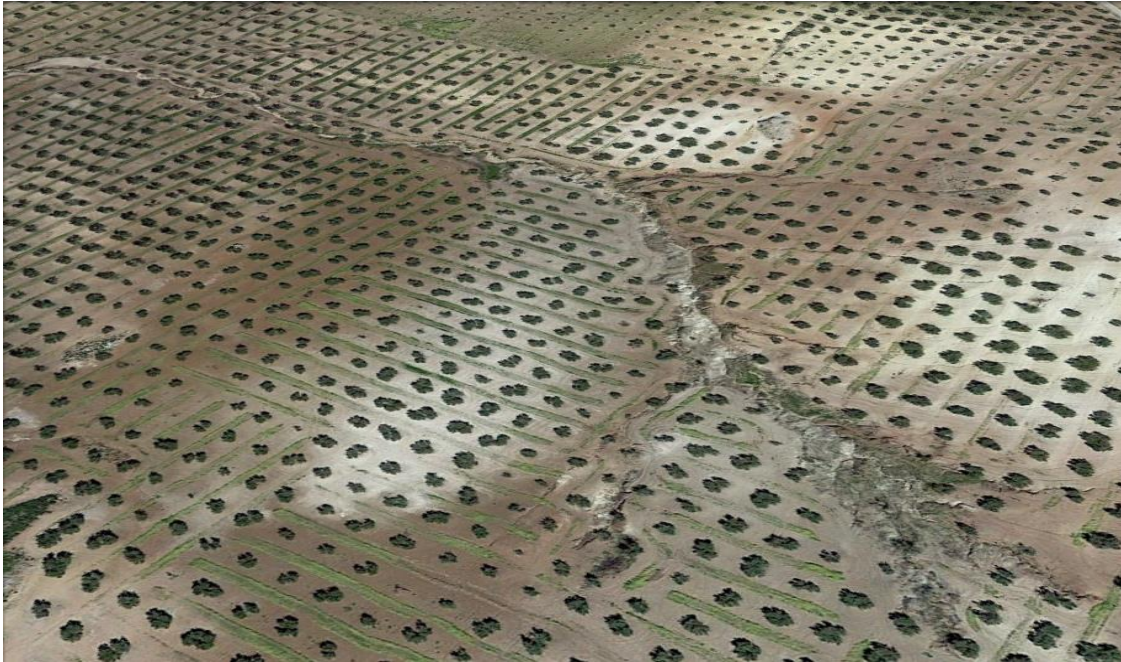


Figura 13 Zona de estudio

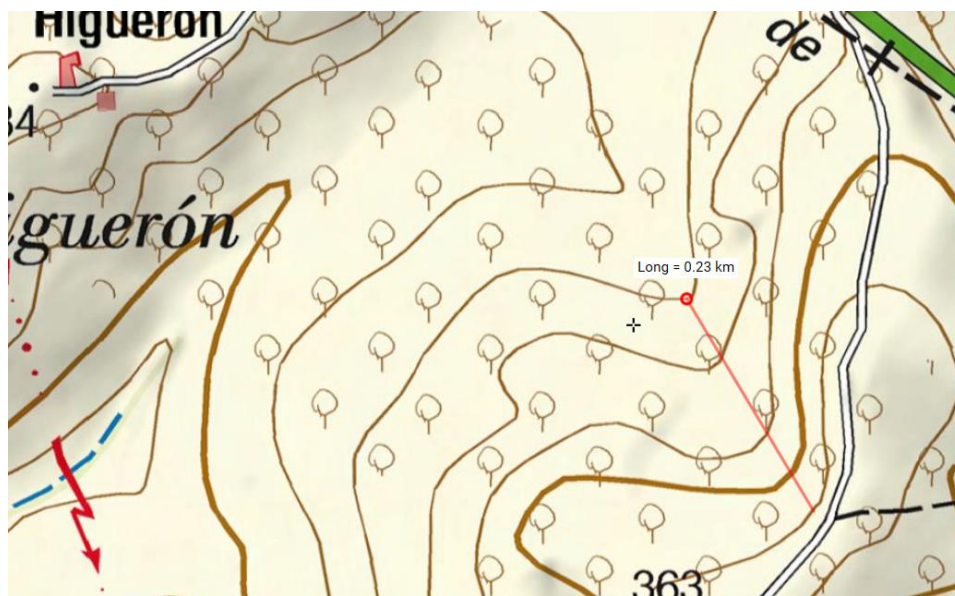


Figura 14 Zona de ladera A (pendiente) ; 1:10.000 cotas 10m

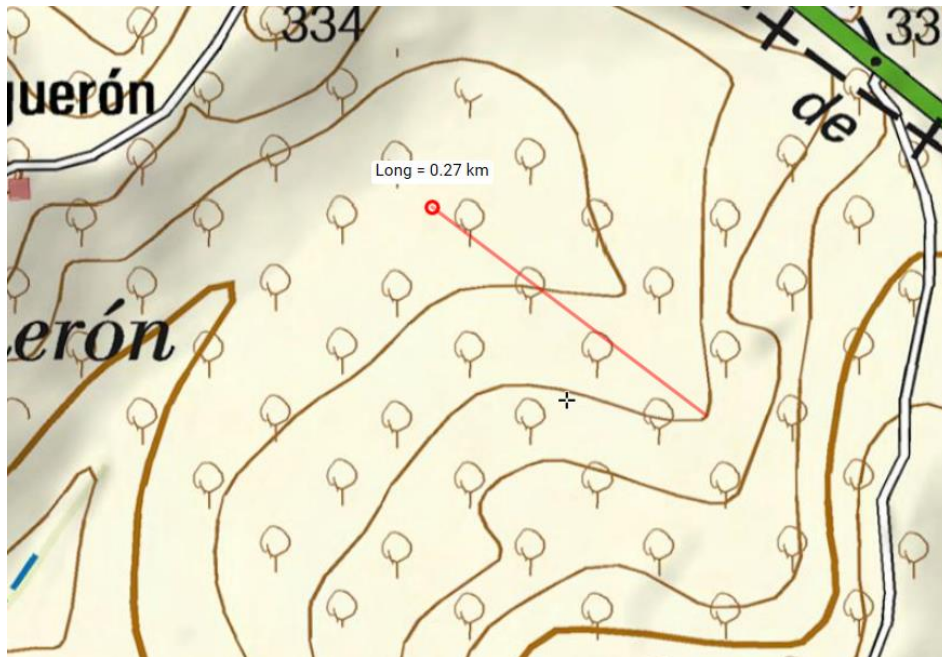


Figura 15 Zona de ladera B (Llana) ; 1:10.000 cotas 10m

Cálculo del factor LS:

- Zona ladera A (pendiente):
 - Diferencia de cotas 40 m
 - Longitud (proyectada) = 230 m

$$s(\%) = \frac{A}{B} \times 100 = \frac{40}{230} \times 100 = 17.4 \%$$

$$X(m) = \sqrt{A^2 + B^2} = \sqrt{40^2 + 230^2} = 233 \text{ m}$$

$$S = \frac{0.43 + 0.3s + 0.043s^2}{6.613} = 2.77$$

$$L = \sqrt{\left(\frac{233}{2.77}\right)} = 3.24$$

$$LS = 3.24 \times 2.77 = 9.0$$

s (%)	m
0-1	0.2
2-3	0.3
4-5	0.4
> 5	0.5

- Zona B (llana):
 - Diferencia de cotas 10 m
 - Longitud (proyectada) = 270 m

s (%)	m
0-1	0.2
2-3	0.3
4-5	0.4
> 5	0.5

$$s(\%) = \frac{A}{B} \times 100 = \frac{10}{270} \times 100 = 3.7\%$$

$$X(m) = \sqrt{A^2 + B^2} = \sqrt{10^2 + 270^2} = 270$$

$$L = \sqrt{\left(\frac{270}{22.13}\right)} = 2.12$$

$$LS = 2.12 \times 0.32 = 0.67$$

Cálculo promedio del factor LS para las zonas A y B:

$$LS = \frac{(0.67 + 9)}{2} = 4.84$$

Cálculo factor erosionabilidad de la lluvia (R)

Sabiendo que la precipitación media anual es de 578,3 litros y la precipitación mensual es la facilitada en la tabla siguiente, hallamos la USLE.

Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
71.5	75.5	78.5	54.9	41.5	20.2	4.3	7.0	27.1	53.3	64.6	79.9

$$R = \Sigma \frac{Pm^2}{Pa} = 62.8 J/ha$$

Siendo Pm : Precipitación mensual ; Pa: Precipitación anual.

Cálculo factor cubierta y manejo (C):**Tabla 1 Cálculo factor C**

<i>Tipo de cubierta vegetal y altura de la misma</i>		<i>Porcentaje de tierra cubierta por gramíneas</i>					
	<i>Porcentaje de recubrimiento</i>	<i>0</i>	<i>20</i>	<i>40</i>	<i>60</i>	<i>80</i>	<i>95</i>
<i>Cubierta alta no apreciable</i>	-	0.45	0.20	0.10	0.042	0.013	0.003
<i>Hierbas altas o matorral con una altura de caída de gota de unos 45 cm.</i>	25	0.36	0.17	0.09	0.038	0.013	0.003
	50	0.26	0.13	0.07	0.035	0.012	0.003
	75	0.17	0.10	0.06	0.032	0.011	0.003
<i>Matorral con una altura de caída de gota de unos 165 cm</i>	25	0.40	0.18	0.09	0.040	0.013	0.003
	50	0.34	0.16	0.08	0.038	0.012	0.003
	75	0.28	0.14	0.08	0.036	0.012	0.003
<i>Árboles sin vegetación baja apreciable. Altura de caída de 3.30 m</i>	25	0.42	0.19	0.10	0.041	0.013	0.003
	50	0.39	0.18	0.09	0.040	0.013	0.003
	75	0.36	0.17	0.09	0.039	0.012	0.003

Cálculo de prácticas de conservación del suelo (P):**Tabla 2 Cálculo factor P**

pendiente (%)	valor de P		
	Cultivo a nivel	Cultivos en fajas	Cultivo en terrazas
1-2	0.60	0.30	0.12
3-5	0.50	0.25	0.10
6-8	0.50	0.25	0.10
9-12	0.60	0.30	0.12
13-16	0.70	0.35	0.14
17-20	0.80	0.40	0.16
21-25	0.90	0.45	0.18

Cálculo factor erosionabilidad del suelo (K):

En la tabla 3 se indican los parámetros físicos y químicos del suelo necesarios para el cálculo del parámetro K.

Tabla 3 Factor K

Parcela	Textura	M.O (%)	Permeabilidad (mm/h)	Factor K
1	Arcillosa	0,87	0.09 (clase 6)	0.20
2	Arcillosa	1,01	0.11 (clase 6)	0.20
3	Arcillosa	1,14	0.16 (clase 6)	0.20
4	Franco arcillo arenosa	0,77	0.27(clase 6)	0.16
5	Arcillosa	0,91	0.11 (clase 6)	0.22
6	Arcillosa	0,91	0.36 (clase 6)	0.18
7	Franco arcillo arenosa	1,31	0.87 (clase 5)	0.20
8	Franco arcillo arenosa	0,81	0.13 (clase 6)	0.22

****** Clase de permeabilidad de FAO: 6,muy lenta, 5 lenta.

Promedio de K = 0.20

Una vez que hemos calculado los factores, pasamos al cálculo de la erosión potencial hídrica laminar y en pequeños surcos (factor A) a través de la relación que nos facilita la ecuación de la perdida de suelo (USLE).

$$A = R \times K \times LS \times C \times P$$

$$A = 62.8 \times 0.2 \times 4.84 \times 0.34 \times 0.5 = 10.3 \frac{Mg}{ha \text{ año}}$$

Los resultados de erosión laminar obtenidos son inferiores a la media establecida por INES (2006) para la provincia de Jaén, 32,21 Mg/ha año, lo que se explica por que la zona de estudio presenta una parte completamente llana (zona A), con una pendiente menor del 5% y un factor S muy pequeño (0.67).

4.2. Erosión en la cárcava estimada con microgeodesia.

El volumen de la cárcava estimado mediante la medida microgedésica es de $7964m^3$. En la Figura 16 se observa el modelo digital del terreno (MDT) obtenido, superpuesto a la fotografía aérea de Google Earth. La resolución del modelo fue de 20 cm, lo que significa que las pequeñas curcas del nivel que aparecen en el MDT (en color naranja) equidistan 20 cm.

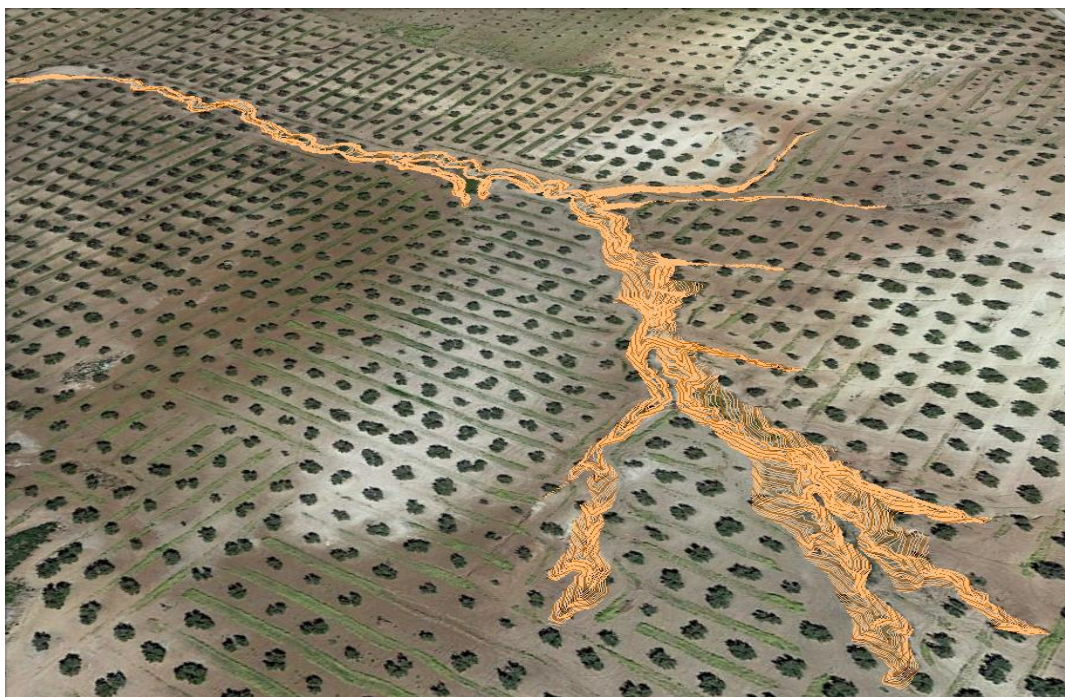


Figura 16 Modelo Digital del Terreno (MDT) del perfil de la cárcava

4.3 Propiedades físico-químicas del suelo

Por otro lado, pasamos a analizar las propiedades físicas (Tabla 4) y químicas (Tabla 5) del terreno en el que hemos desarrollado el estudio. Cada una de las parcelas en las tablas corresponde a los puntos de muestreo indicados en la Figura 12.

Tabla 4 Propiedades físicas del suelo

Parcela	F.G (%)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Textura	D.A (g cm ⁻³)
1	17	40	10	50	Arcillosa	1.05 ± 0.1
2	22	50	8	42	Arcillosa	1.26 ± 0.1
3	18	40	10	50	Arcillosa	1.21 ± 0.1
4	20	68	7	25	Franco arcillo arenosa	1.21 ± 0.1
5	29	50	7	43	Arcillosa	1.33 ± 0.1
6	16	65	5	30	Franco arcillo arenosa	1.15 ± 0.1
7	20	68	6	26	Franco arcillo arenosa	1.11 ± 0.1
8	33	58	10	32	Franco arcillo arenosa	1.19 ± 0.1

CF: fragmentos gruesos; OC: carbono orgánico total; Fe CDB: hierro citrato-ditionito-bicarbonato; CEC: capacidad de intercambio catiónico; * ASI: índice de estabilidad del agregado = A / B x 100. A: peso de macroagregados estables en el suelo ($\geq 0,25$ mm). Cribado húmedo resistente; B: peso de macroagregados inestables del suelo ($\geq 0,25$ mm). Pasando por la rejilla de 0,25 mm.

Tabla 5 Propiedades químicas del suelo

Parcela	OC (%)	Total N (%)	pH	CaCO _{3 eq} (%)	CEC (cmol ₊ Kg ⁻¹)
1	0.87	0.05	8.07	34	40
2	1.01	0.05	8.04	35	38
3	1.14	0.05	7.57	30	52
4	0.77	0.06	7.59	20	50
5	0.91	0.05	7.6	41	44
6	0.91	0.05	7.51	24	50
7	1.31	0.09	7.62	35	51
8	0.81	0.08	7.64	25	48

CF: fragmentos gruesos; OC: carbono orgánico total; Fe CDB: hierro citrato-ditionito-bicarbonato; CEC: capacidad de intercambio catiónico; * ASI: índice de estabilidad del agregado = A / B x 100. A: peso de macroagregados estables en el suelo (≥ 0,25 mm). Cribado húmedo resistente; B: peso de macroagregados inestables del suelo (≥ 0,25 mm). Pasando por la rejilla de 0,25 mm

Como apreciamos, se nota una cierta variabilidad entre las densidades aparentes de los distintos lugares de muestreo. Esto se debe al afloramiento de distintos materiales: las muestras más arcillosas serían los paquetes de arcillas y margas de edad Triásica y Cretácica, mientras las zonas franco-arcillo-arenosas coincidirían mejor con los paquetes calizos y dolomíticos.

Utilizaremos la media de los distintos valores obtenidos en el laboratorio sobre la densidad aparente de la zona de estudio:

$$Da_m = 1.04 \text{ (5 cm)}$$

Pasamos ahora a calcular la pérdida de suelo a través de los datos facilitados por el departamento de microgeodesia.

Volumen (microgeodesia) = 7964m³ multiplicamos por la densidad aparente calculada anteriormente para hallar la cantidad de suelo total extraviado en la cárcava de nuestra zona de estudio.

$$7964m^3 \times 1.04 \frac{Mg}{m^3} = 8283 Mg$$

En las Figuras 17 a 20 se observa el desarrollo de la cárcava en la zona de estudio. Las 8283 toneladas de suelo se habrían perdido durante el periodo transcurrido entre los años 2005 (no se ha iniciado el proceso de acaravamiento) y 2016 (actual) un total de 11 años, tal como demuestran las imágenes . En la imagen de 2005 se observa cómo la finca sólo se ve

atravesada por una zanja de drenaje, labor habitual que los agricultores de la zona realizan para evitar el encharcamiento en las vaguadas. Así mismo, se observa cómo el crecimiento más importante se produce entre 2009 y 2011, coincidiendo con el invierno extremadamente lluvioso de 2010 (850 mm de precipitación).

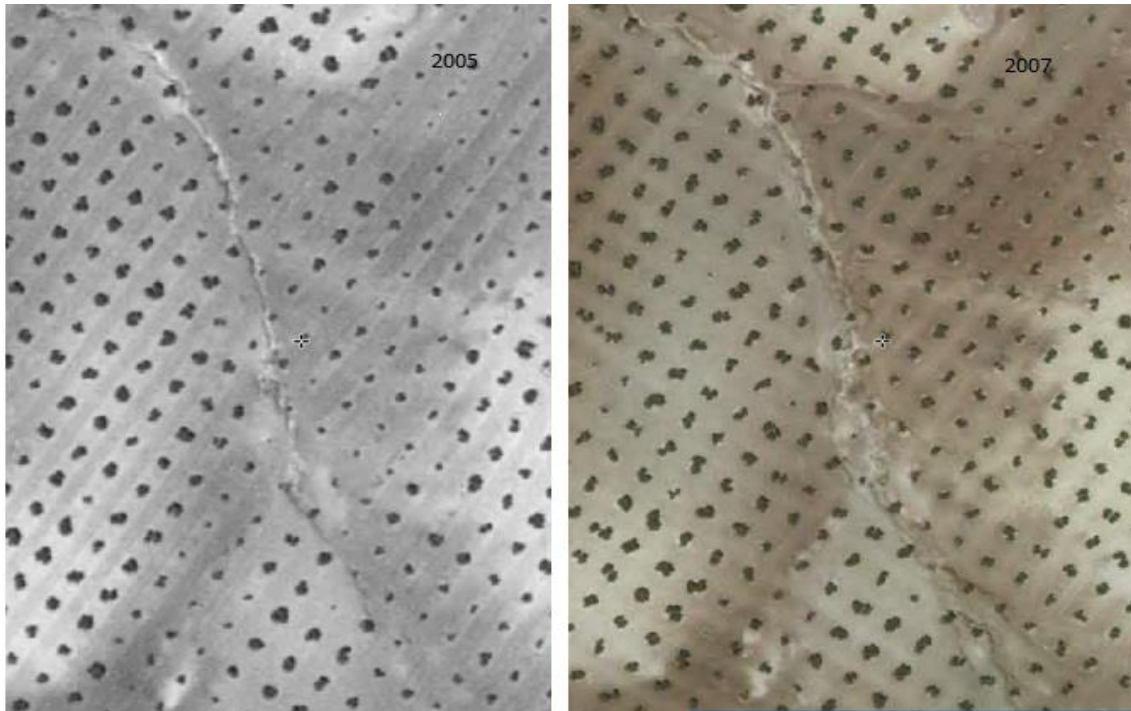


Figura 17 Periodo 2005-2007



Figura 18 Período 2009-2011

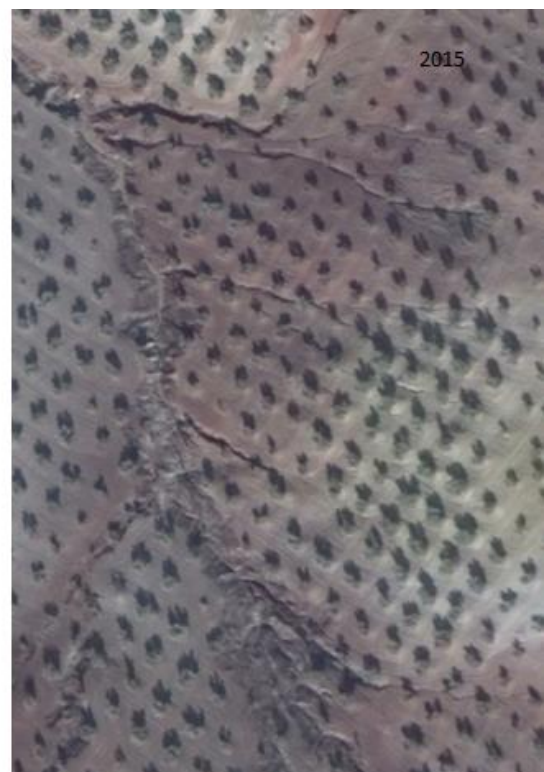


Figura 19 Período 2013-2015



Figura 20 Final del proceso de acaravamiento

$$\frac{8283Mg}{11 \text{ años}} = 753 \frac{Mg}{\text{año}}$$

Teniendo en cuenta, además la superficie de la Cuenca (9,11 ha) pasamos a calcular la pérdida de suelo por hectárea y año.

$$753 \frac{Mg}{\text{año}} \times \frac{1}{9.11ha} = \boxed{82.7 \frac{Mg}{ha \text{ año}}}$$

Por tanto, si tenemos en cuenta el valor de erosión laminar estimado con RUSLE (10 T/ha año), y lo comparamos con el valor medido en la cárcava (83 T/ha año), podemos concluir que el proceso de erosión en cárcavas multiplica por ocho la intensidad de la erosión laminar

Hasta la fecha, existen pocas estimaciones sobre las pérdidas ha y año de suelo en cárcavas, en el cultivo de olivar. En un trabajo muy reciente, Hayas et al. (2017) estiman magnitudes similares o incluso superiores a la que nosotros hemos dado: en olivares de Córdoba se habrían producido pérdidas medias de 11 Mg/ha año en el periodo 1956-2009, mientras que en los años 2009-2011 la

erosión se habría disparado a 570 Mg/ha año. Aunque son muy superiores a las estimadas por nosotros, este trabajo apoya que la erosión por cárcavas es superior, al menos en un orden de magnitud, a la erosión laminar estimada con RUSLE.

4.4 Caracterización geomecánica

Mediante la caracterización de las propiedades geomecánicas del suelo se ha pretendido, una vez calculado el volumen y el peso de suelo perdido en la cárcava, realizar una aproximación a su dinámica de crecimiento. Para ello, tenemos en cuenta los dos principales procesos de crecimiento son el corte del terreno por el flujo de agua (erosión remontante y profundización aguas abajo) y el ensanchamiento por retracción de los taludes. Para el primero de los mecanismos, se ha estimado el umbral crítico de corte τ_c , es decir, la resistencia máxima que presenta el suelo antes de comenzar a generar regueros por el flujo hidráulico y, por otra parte, los parámetros de resistencia de los taludes (cohesión, ángulo de rozamiento interno) frente al colapso por la gravedad.

4.4.1. Sensibilidad del suelo a la iniciación de la cárcava

En la tabla 7 se indican los resultados del ensayo de corte directo en campo realizado con el cizallómetro (Torvane test). Se trata de un ensayo rápido, realizado en 20-30 segundos en condiciones de no consolidación del terreno, por lo que se obtiene una medida de resistencia al corte sin que haya dado tiempo al drenaje del suelo, S_u (kPa). Esta medida se ha transformado, de acuerdo a la ecuación de regresión simple de Leonard y Richards (2003), en el umbral crítico cortante del suelo τ_c , o resistencia máxima que un suelo puede presentar al flujo de agua antes de que se inicie la erosión concentrada.

Tabla 6 la susceptibilidad del suelo a la iniciación barranco en función de la tensión de corte crítica (τ_c).

Plot	S_u^* (kPa)	τ_c (Pa)	Susceptibilidad**
1	9.38 (+-)	2.44	Alto
2	16.01	4.16	Alto
3	20.45	5.32	Medio

4	41.23	10.72	Muy bajo
5	28.29	7.36	Bajo
6	43.71	11.36	Muy bajo
7	47.82	12.43	Muy bajo
8	30.31	7.88	Bajo

* Ensayo de corte directo sin drenaje en campo con el aparato de Torvane.(cizallometro)

** De acuerdo a Leonard & Richards (2003)

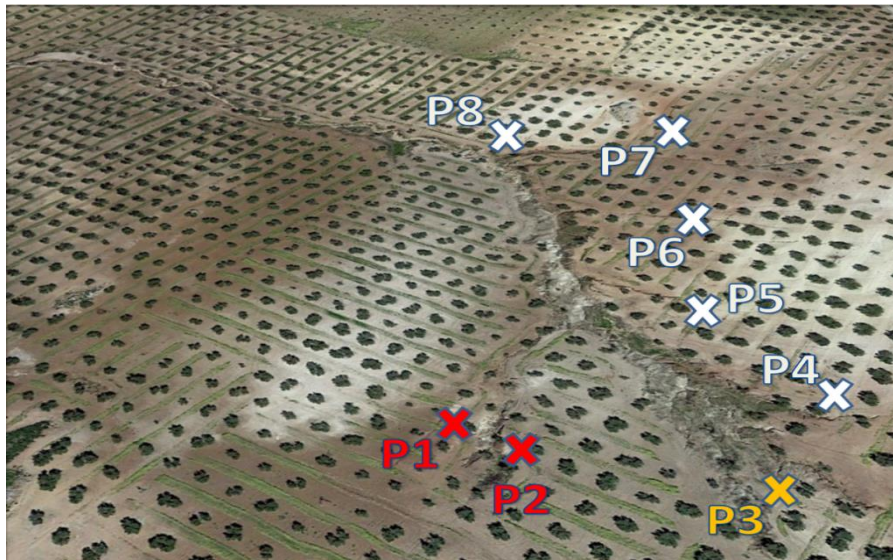


Figura 21 Susceptibilidad al inicio del proceso de acaravamiento en los puntos de muestreo

Mediante los datos obtenidos sobre las propiedades geomecánicas del terreno apreciamos una diferencia significativa de la sensibilidad del suelo a la iniciación de la cárcava. En la ilustración anterior hacemos un resumen aludiendo a cada una de las zonas de muestreo (estas coinciden con las cabeceras de las cárcavas, como mencionamos anteriormente).

Los puntos señalados en rojo tienen una alta sensibilidad al acaravamiento. En amarillo encontramos un punto con sensibilidad media y los demás puntos (puntos del 4 al 8) tienen poca sensibilidad al acaravamiento (señalados en blanco).

La diferencia de sensibilidad viene determinada por τ_c (umbral crítico cortante) que depende del material: inferior en arcilla, más elevado en zonas con paquetes de yesos. Por lo tanto y como hemos visto en puntos anteriores, los afloramientos de materiales de yeso son de una gran importancia en nuestro estudio en cuanto dos parámetros muy importantes:

1. La capacidad de infiltración del agua de lluvia ya que si esta no es absorbida por el material aumentará su velocidad y capacidad de erosión en zonas inferiores.
2. El alto umbral de corte crítico que presenta la mayor parte de la vertiente oriental de la cárcava. Esto en cierta manera, impide el afloramiento o el crecimiento de la ladera de nuevas cabeceras, lo que aumentarían de forma significativa la pérdida de suelo en la zona estudiada.

4.4.2 Resistencia del suelo al ensanchamiento de la cárcava por deslizamientos de los taludes (Bank Retreat)

Por último, se calcularon los parámetros de resistencia del suelo a los desprendimientos, como una estimación de la probabilidad de los taludes de la cárcava que, una vez producido el corte en el terreno por el flujo de agua, colapsen produciendo un ensanchamiento de la misma. En la Tabla 7 se muestran las cohesiones y los ángulos de rozamiento interno del material en superficie. Respecto a los suelos arcillosos, se ha considerado éste último como despreciable, ya que el rozamiento interno se debe a la fricción de los granos de arena y grava entre sí.

Tabla 7 Parámetros de resistencia del suelo (cohesión c' y ángulo de rozamiento, ϕ').

Parcela	Textura	c'^* (kPa)	ϕ' (°)	Resistencia del suelo**
1	Arcilla	8.33†	0	Muy blanda
2	Arcilla	7.33†	0	Muy blanda
3	Arcilla	12.44†	0	Muy blanda
4	Franco-arcillo-arenoso	30.23	26	Blanda
5	Arcilla	64.07	0	Rígida
6	Franco-arcillo-arenoso	13.10†	27	Blanda
7	Franco-arcillo-arenoso	22.27	27	Blanda
8	Franco-arcillo-arenoso	6.39	26	Muy blanda

* Ensayo de corte directo sin drenaje en campo con el aparato de Torvane.

** De acuerdo a IGME (1980)

† (Simulación para suelos arcillosos, con $\phi = 0$)

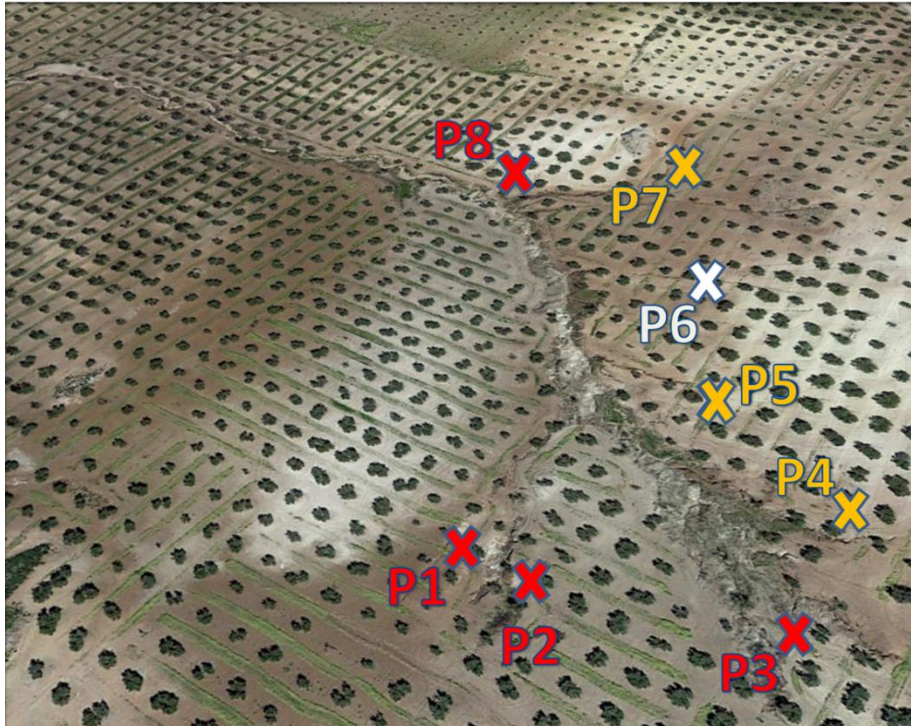


Figura 22 Resistencia al ensanchamiento de la cárcava por desprendimiento de los taludes

A través de las tablas volvemos a realizar un esquema gráfico con las distintas zonas de estudio y su resistencia al ensanchamiento de la cárcava. Los puntos que aparecen en color rojo tienen una muy baja resistencia y los amarillos presentan una baja resistencia.

Como puede observarse los materiales, en superficie, presentan una resistencia en general baja, lo que predispone al ensanchamiento de la cárcava por desprendimientos en taludes. Precisamente este es el proceso que mejor se observa y se produce en los últimos años (figuras 19 y 20)

Para concluir este apartado, por tanto, podríamos resaltar que, de forma cualitativa, la morfología y evolución temporal de la cárcava responde a la mecánica del suelo. Dado que los suelos son relativamente resistentes al corte por el flujo, el proceso de erosión remontante de la cárcava a partir de la vaquada se ha producido principalmente en el año de pluviometría extremadamente elevada (2010), cuando los flujos hubieron de ser realmente intensos. El resto del tiempo, y hasta obtener la configuración actual de la cárcava, esta ha crecido principalmente por ensanchamiento, al ser los taludes

poco resistentes al colapso gravitacional. Desde el punto de vista del control de la cárcava, la dinámica descrita es decisiva, ya que los mecanismos de control son distintos según se trate de evitar la erosión remontante (uso de cubiertas, desviadores de escorrentía, etc.) o el ensanchamiento (diques, etc.).

5. CONCLUSIONES

1. En lo que respecta al conocimiento del autor, se han aplicado por primera vez las técnicas microgeodésicas para estimar pérdidas de suelo en cárcavas, obteniendo un valor de 82,7 Mg/ ha año en la zona de estudio.
2. La pérdida de suelo en cárcavas, según el presente estudio, ha sido muy superior a la erosión laminar estimada mediante RUSLE, que fue de 10,3 Mg/ha año. Se ha confirmado, pues, lo indicado en la reciente (y escasa) bibliografía sobre cárcavas en olivar: la erosión en éstas es aproximadamente de entre uno y dos órdenes de magnitud superior a la erosión laminar.
3. Los parámetros geomecánicos del suelo, medidos de forma rápida en campo, permiten explicar cualitativamente la morfología y la evolución de la cárcava.
4. Los suelos de la zona de estudio son poco sensibles a la erosión remontante y a la extensión lineal de la cárcava, dado su relativamente elevado umbral crítico de corte (τ_c). Esto explica que, como se observa en las fotos aéreas, este tipo de crecimiento se haya producido principalmente en el año 2010, de muy alta pluviometría en la zona.
5. Sin embargo, la baja resistencia de los taludes de la cárcava al colapso gravitacional (baja cohesión y ángulo de rozamiento interno), ha provocado con mayor asiduidad procesos de ensanchamiento, que han incrementado en volumen de la cárcava incluso en años muy secos.
6. Debido a que, hasta el momento, en la planificación del territorio se ha tenido en cuenta principalmente lo predicho por los modelos RUSLE, y estos podrían

subestimar gravemente la erosión total, se hace urgente seguir investigando en el campo de la modelización y caracterización de la erosión en cárcavas.

6. REFERENCIAS

Bache, D.H. and MacAskill, L.A (1984). Vegetation in Civil and Landscape Engineering. Granada Technical Books: London, UK.

Barranco D. , Fernandez-Escobar R., Rallo L. (2008): El Cultivo del olivo. Junta de Andalucía. Consejería de Agricultura y Pesca.

Boardman, J. (2006). Soil erosion science: Reflections on the limitations of current approaches. Catena, 68(2), 73-86.

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

BOE, 2009. RD 486/2009 de 3 de abril en su Anexo II. <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2009-6414> (visitada el 24 de mayo de 2016)

Castro, J. E. Ferná'ndez-Ondon, C. Rodríguez , A.M. Lallena, M. Sierra, J. Aguilar. 2008. Effects of different olive-grove management systems on the organic carbon and nitrogen content of the soil in Jaén (Spain) . SOIL & TILLAGE RESEARCH. Pp. 56:67

Cisneros J., Carmen C., Cantero A., González J , Reynero M , Diez A., Bergesio L., Cantero J., Nuñez C., Amuchástegui A y Degioanni A.: Erosión hídrica. Principios y técnicas de manejo. - 1a ed. - Río Cuarto : UniRío Editora. , 2012.

EC, European Commission, 2010. Summary Report on the Work Carried Out by European Climate Change Programme (ECCP) Expert Group on Climate Policy for Land Use, Land Use Change and Forestry (LULUCF). European Commission, Brussels.

EC, European Commission. 2005. Commission Regulation (EC) No. 2183/2005 of 22 December 2005 amending Council Regulation (EC) No. 1782/2003 establishing common rules for direct support schemes under the common agricultural policy and establishing certain support schemes for farmers and amending Regulation (EC) No. 795/2004 laying down detailed rules for the implementation of the single payment scheme provided for in Council Regulation (EC) No. 1782/2003.

EC, European Commission. 2011. Commission document COM(2011) 625/2, corrigendum Annule et remplace le document COM(2011) 625, establishing rules for direct payments to farmers under support schemes within the framework of the common agricultural policy (CAP).

EUTROMED, Proyecto LIFE. Informe Laymen en su página web en <http://eutromed.org/>. Fecha de último acceso 28 de agosto de 2015.

FANGMEIER, D.D., W.J. ELLIOT, S.R. WORKMAN, R.L. HUFFMAN, AND G.O. SCHWAB. 2006. Soil and water conservation engineering, 5th ed. Thomson Delmar Learning, Clifton Park, NY. 502 p

Fernández-Coppel, I. A. (2001). Las coordenadas geográficas y la proyección UTM. Universidad de Valladolid. <http://www.elagrimensor.com.ar/elearning/lecturas/Las%20coordenadas%20geograficas.pdf>.

Finn, J., Bartolini. F., Bourkea, D., Kurza, I. and Viaggi, D. 2009. Ex post environmental evaluation of agri-environment schemes using experts' judgements and multicriteria analysis. Journal of Environmental Planning and Management, 52, 717-737.

Fischer, R.A. y N.C. Turner. 1978. Plant productivity in the arid and semiarid zones. *Ann. Rev. Pl. Physiol.*

García-Ruiz, J.M., 2010. The effects of land uses on soil erosion in Spain: a review. *Catena* 81, 1–11

Gómez J., Instituto de Agricultura Sostenible-CSIC. Córdoba (España). Procesos erosivos en olivar en Andalucía a diferentes escalas: entendimiento, magnitud, implicaciones e intentos de control .

Gomez, R., Burns, G. L., Walsh, J. A., & Moura, M. A. de (2003). A multitrait–multisource confirmatory factor analytic approach to the construct validity of ADHD rating scales. *Psychological Assessment*, 15, 3-16

Gomez, S. M. ; Kalamani, A., 2003. Butterfly Pea (*Clitoria ternatea*): A nutritive multipurpose forage legume for the tropics - An overview. *Pakistan J. Nutr.*, 2 (6): 374-379

González, L. G. (2007). El olivar de Jaén en los s. XIX y XX: una trayectoria de éxito.

Guzmán, G., Vanderlinden, K., Giráldez, J.V., Gómez, J.A. 2013. Assessment of Spatial Variability in Water Erosion Rates in an Olive Orchard at Plot Scale using a Magnetic Iron Oxide Tracer. *Soil Science Society of America Journal* 77: 350 –360

Hayas, A., Vanwalleghe, T., Laguna, A., Peña A., Giráldez, J.V. 2016. Reconstructing long-term gully dynamics in Mediterranean agricultural areas.

INSPIA. European Index for Sustainable Productive Agriculture. 2015. Página web: <http://www.inspia-europe.eu/> Fecha de último 24 de septiembre de 2015

Inventario Nacional de Erosión de Suelos 2002-2012

Jiang, Y, Piza, H. 2015. A Review of Applicability and Effectiveness of Low Impact Development/Green Infrastructure Practices in Arid/Semi-Arid United States. *Environments* (in press). doi:10.3390/environments20x000x

Kaiser M, Groll M, Siciliano C, Assfalg-Machleidt I, Weyher E, Kohno J, Milbradt AG, Renner C, Huber R, Moroder L: Binding mode of TMC-95A analogues to eukaryotic 20S proteasome. *Chembiochem* 5(9):1256-66

Laguna A. 1989. Análisis cuantitativo de la erosión del suelo. PhD Thesis University of Cordoba.

Lal R. 1998. Soil erosion impact on agronomic productivity and environment quality. Critical Review in Plant Sciences

LAO, 2011. Ley 5/2011 Andaluza del Olivar, en su artículo 22. <http://www.parlamentodeandalucia.es/webdinamica/portal-web-parlamento/pdf.do?tipodoc=coleccion&id=62833&clej=5> (última visita 5 de mayo de 2016)

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

López-Cuervo, S. (1990). La erosión en los suelos agrícolas y forestales de Andalucía. Colección Congresos y Jornadas Nº .17/1990. 11-16. Junta de Andalucía. Consejería de Agricultura y Pesca.

Louwagie G, Gay SH, Sammeth F, Ratinger T. 2011. The potential of European Union policies to address soil degradation in agriculture. Land Degradation & Development 22, 5-17.

M. Pastor, J. Castro, M. D. Humanes y J. Muñoz C.I.F.A “Alameda del Obispo”. Córdoba.. Consejería de Agricultura y Pesca. Junta de Andalucía. Conferencia del V Congreso Nacional de Suelos (Baeza, 2000): SISTEMAS DE MANEJO DEL SUELO EN OLIVAR DE ANDALUCIA

M.F. and Rhind, D.W. (Eds.) Geographical Information Systems: Principles and Applications. John Wiley & sons pp. 135-146 (www.wiley.co.uk/wileychi/gis/resources.html)

Maling,D.H. (1991) “Coordinate systems and map projections for GIS” en Maguire, D.J.; Goodchild,

Melendez-Pastor, I., Córdoba Sola, P., Navarro-Pedreño, J., & Gómez, I. (2010). Assessment of soil vulnerability to erosion by a fuzzy logic model. Revista de Ciências Agrárias 33(1), 171-181.

Morgan, R. P. C. (2009). Soil erosion and conservation. John Wiley & Sons.

Müller, K., and J. Castillo. "Labranza mínima, una tecnología para las laderas de Colombia." (1997): 4-6.

OSTERKAMP, W.R., 2008. Annotated Definitions of Selected Geomorphic Terms and Related Terms of Hydrology, Sedimentology, Soil Science and Ecology, USGS Open file Report 2008-1217, Reston, Virginia.

Pimentel D. , Harvey C. , Resosudarmo P. , Sinclair K. Kurz D. , McNair M. , . Crist S. , Shpritz L. ,. Fitton L; R. Saffouri; Blair R.: Evironmental and Economic Costs of Soil Erosion and Conservation Benefits. (Feb. 24, 1995)

S. Álvarez, M. A. Soriano, J.A. Gómez: EVALUACIÓN DEL ESTADO DEL SUELO EN OLIVARES ECOLÓGICOS DE MONTAÑA EN SIERRA MORENA

Taguas, E.V., Giráldez, J.V., Ayuso, J.L., Pérez, R., Castillo, C., Gómez, J.A. 2012a. Preliminary assessment and cost analysis of incentives for gully control in agricultural areas of Andalusia (Southern Spain). Geophysical Research Abstracts Vol. 13: EGU20114693

Troeh, F.R., Hobbs, J.A. and Donahue, R.L. (1991) "Chapter Six: Predicting Soil Loss" Soil and Water Conservation, 2nd ed. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA. Gómez Calero, José Alfonso, Taguas, E. V., Vanwallegghem, Tom, Giráldez, Juan Vicente, Sánchez, F., Ayuso, J. L., Lora, A., Mora, J. 2011b.

V. H. DUR´AN ZUAZO, C. R. RODR´IGUEZ PLEGUEZUELO, L. ARROYO PANADERO, A. MART´INEZ RAYA, J. R. FRANCIA MART´INEZ and B. C´ARCELES RODR´IGUEZ: Soil Conservation Measures in Rainfed Olive Orchards in South-Eastern Spain: Impacts of Plant Strips on Soil Water Dynamics

Vanwallegghem, T., Stockmann, U., Minasny, B., & McBratney, A. B. (2013). A quantitative model for integrating landscape evolution and soil formation. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 331-347.

Walling, D.E. 2013. The evolution of sediment source fingerprinting investigations in fluvial systems. Journal of Soils Sediments 13:1658–1675