

# SIG aplicados a la evaluación de la influencia de los cambios en las coberturas vegetales sobre los procesos erosivos en las cuencas de los Arroyos de la Rocina y del Partido (Huelva-España)

REVISTA **MAPPING**  
Vol. 28, 195, 44-52  
mayo-junio 2019  
ISSN: 1131-9100

*GIS applied to the evaluation of the influence of changes in vegetable coverage on the erosive processes in the basins of the Rocina and Partido streams (Huelva-Spain)*

Fabián Romero Pichardo

## Resumen

El grado de erosión producida por el agua de lluvia sobre el suelo depende directamente de la cubierta vegetal que lo protege. La importancia de estos procesos erosivos dependerá de una amplia variedad de factores, los cuales han sido estandarizados con modelos teóricos que permiten su cuantificación y aplicación generalizada. Sin duda el más extendido y aceptado de estos modelos es la USLE (Universal soil loss equation) en el que se relacionan factores que, experimentalmente se ha demostrado, contribuyen de una manera cuantificable al arranque de material del suelo y por ello al desarrollo de los procesos erosivos. Los SIG (Sistemas de Información Geográfica) ayudan al análisis, interpretación y representación de la información de partida y de sus resultados.

## Abstract

The degree of erosion by rainwater on the ground directly depends on vegetation cover to cover you. The importance of these erosive processes depend on a wide variety of factors, which have been standardized with theoretical models allowing their quantification and widespread application. Without doubt the most widely used and accepted in these models is USLE (Universal soil loss equation) which are related factors, it has been shown experimentally, contribute to a quantifiable manner soil material removal and hence the development of erosion. GIS (Geographic Information Systems) help the analysis, interpretation and presentation of information starting and results.

**Palabras clave:** Arroyos del Partido y la Rocina, erosión hídrica, USLE, Sistemas de Información Geográfica, Usos del suelo y coberturas vegetales de Andalucía..

**Keywords:** Rocina y Partido streams, erosion, USLE, GIS, land use and land cover types of Andalusya.

Ayuntamiento de Almonte  
[fabian.romero@aytoalmonte.es](mailto:fabian.romero@aytoalmonte.es)

Recepción 05/11/2018  
Aprobación 24/03/2019

## 1. INTRODUCCIÓN

Procesos erosivos y sedimentación son algunos de los más importantes problemas ambientales que afectan a Doñana y su entorno ya que la colmatación de la marisma, uno de los elementos fundamentales del conjunto, condiciona en gran medida la dinámica global de este espacio natural.

Las transformaciones agrarias, con la sustitución de usos tradicionales por otros intensivos y la desaparición de superficies forestales en beneficio de rotaciones agrícolas, han ido provocando modificaciones en la dinámica hídrica del entorno. Dichas alteraciones están directamente relacionadas con la actividad agrícola que ordena y modifica el territorio con el fin de obtener los mayores rendimientos, y por otro lado con las políticas públicas que proyectan infraestructuras que posteriormente se demuestran irracionales no ya solo en el sentido ambiental sino también en el económico (originan costosas medidas correctoras que reviertan la situación).

La problemática de los procesos erosivos no solo es notable en los lugares en los que se produce el arranque de materiales por los efectos de la dinámica hídrica, sino que también afectará a zonas aguas abajo donde los sedimentos llevados por la escorrentía pueden también causar daños a las infraestructuras hidráulicas, canales de riego, por la sedimentación y contaminación asociada a los depósitos.

Existe por lo tanto una necesidad de estimar la erosión de suelos y sedimentación a una escala subregional pero debe tenerse presente sin embargo que existe una limitación de los datos disponibles así como su resolución espacial no adecuada a la dimensión espacial del entorno que nos ocupa.

Recientes avances en los SIG, así como en la disponibilidad y calidad de la información permiten la implementación de complejas funciones espaciales estimulando el uso de modelos.

En el caso especial del Espacio Natural de Doñana; en su génesis geológica se observa que todo lo que actualmente es Doñana se encontraba ocupado por el mar. Durante miles de años ha ido evolucionando hasta el sistema de marismas actual con la formación de una serie de cauces que drenan hacia ellas. El río Guadalquivir, que contacta lateralmente con Doñana, la inundaba con sus desbordamientos, mientras que una serie de arroyos como el Partido y la Rocina por la zona occidental, además del río Guadiamar por el norte les aportaban caudal directamente.

Tras las transformaciones relacionadas con el Plan Almonte-Marismas la mitad de los cauces dejan de es-

tar conectados con la Marisma, especialmente el Guadiamar, mientras que los únicos cauces que continúan vertiendo sus aguas a ellas son el Partido y La Rocina, a la altura ambos de la aldea de El Rocío

El único objetivo de estas transformaciones es un ansiado desarrollo económico para los habitantes del entorno entendido como compensación por las limitaciones que la gestión que este espacio protegido les imponía. Una intensa intervención pública en gran medida centrada en la articulación y transformación territorial que buscaba el control los recursos hídricos (subterráneos y superficiales) a través de determinadas infraestructuras, provocó, más allá de los discutibles logros de este modelo, importantes alteraciones hidrológicas y ecológicas sobre este frágil entorno.

Una vez con posterioridad se toma conciencia de la problemática de Doñana y se analiza la intensamente la situación, se plantea imprescindible la restauración a medio largo plazo de los cauces que vierten la marisma garantizando así el normal funcionamiento hídrico del conjunto.

El objetivo de nuestro estudio es la cuantificación de las variaciones observadas en las cubiertas vegetales y usos del suelo en las zonas correspondientes a las cuencas vertientes de los arroyos que vierten su caudal por la zona occidental de las marismas de Doñana, más concretamente el arroyo de la Rocina y el arroyo del Partido.

La determinación de los cambios ofrecerá una clarificación de la evolución del proceso de colmatación que se viene observando en la marisma durante los últimos años por el aporte de sedimentos realizado por los arroyos que a ella vierten. Ayudará en nuestro trabajo tener clara la relación del Espacio Natural de Doñana más allá de sus límites administrativos y considerado como un conjunto interrelacionado en el cuya evolución participa todo lo que ocurre en un espacio territorial mucho más extenso. Por ello para cuantificar la relación entre cambio de uso y relleno de la marisma con aportes sedimentarios, deberemos tener en cuenta toda la extensión de las cuencas vertientes de los arroyos del Partido y de la Rocina, por muy alejadas que nos parezcan que estén de las marismas de Doñana, pues en toda su extensión se producirán los procesos erosivos que determinan la erosión, transporte y sedimentación de materiales.

## 2. ESTADO DE LA CUESTIÓN

El Espacio Natural de Doñana está constituido por el Parque Nacional de Doñana, de 54.251 Has y

el Parque Natural de Doñana, de 68236 Has. Tradicionalmente ha sido escenario de la convivencia (unas veces más armoniosa que otras) entre naturaleza y su conservación, y el hombre y el aprovechamiento de los recursos del espacio sobre el que se asienta. Unos de los efectos de esta interacción ha sido el mantenimiento de unos ecosistemas y unidades ambientales únicas, pero también el sometimiento a un estrés al límite que hace peligrar la coexistencia ancestral entre ambos.

Dada su importancia a nivel mundial, todos los sucesos y fenómeno que inciden sobre Doñana son ampliamente estudiados, siendo el tema que nos ocupa un buen ejemplo de ello.

El ecosistemas de marismas es uno de los integrantes del conjunto de Doñana y los efectos de los procesos de colmatación que viene sufriendo parecen ir dirigidos hacia el final de Doñana tal como ahora lo concebimos. Esta colmatación responde a una dinámica natural, pero no es menos cierto que la mano del hombre no hace más que acelerarla determinadamente con alteraciones sobre los pocos aportes de agua que persisten sobre las marismas modificando su dinámica hídrica.

La problemática de las cuencas vertientes a Doñana ha sido un recurso muy estudiado y paralelamente han sido numerosos los investigadores que se han centrado en la evolución de la colmatación de origen antrópico en la desembocadura del arroyo del Partido en las marismas de Doñana en las cercanías de la aldea de El Rocío. Algunas de estas investigaciones han ido encaminadas a comprender el problema desde el punto de vista de la ordenación y las políticas del agua: Ojeda Rivera, J.F., Del Moral Ituarte, L. (2004), mientras que otras muchas se centran en el análisis de las cuencas de las cuencas vertientes a Doñana, entre las que se encuentra el Partido: SAURA, J. (1999), o en restauración hidrológica: Mantegui Aguirre, J.A.; (2005), en la evolución de los procesos de sedimentación: Rodríguez Ramírez, A., Yáñez Camacho, C., Gascó, C., Clemente Salas, L., Antón, M<sup>a</sup>. P. (2005), la dinámica del caudal y transporte de sedimentos: Sendra Arce, P., Mantegui Aguirre, J.M., Robredo Sánchez, J.C. (2002).

La disponibilidad regular de *ortofotos* y MDE (*modelos digitales de elevación*), cada vez de mayor calidad y precisión, y de libre distribución por parte de las instituciones y entidades que los elaboran han hecho posible el uso de los SIG y la aplicación de técnicas como la *fotointerpretación* y la teledetección para el análisis de la evolución y realización de modelos predictivos en entornos de macada complejidad morfométrica, como es la zona de marismas que nos ocupa, muy pla-

nas y donde las oscilaciones de nivel métrico son muy raras. Aquí incluso puede ser inapropiado el uso de los MDE debiéndose recurrir a información más detallada como son las imágenes LIDAR, las cuales ofrecen un mayor nivel de precisión.

Pero más allá del análisis espacial los SIG posibilitan complejos cálculos a partir de los datos asociados a las entidades geográficas, extrayendo complejas variables estadísticas e incluso realizar representaciones y predicciones muy fiables.

### 3. ÁREA DE ESTUDIO

El Espacio Natural de Doñana se sitúa en la margen derecha del río Guadalquivir a su paso por el sur de las provincias de Huelva y Sevilla, y su principal característica y por ello la principal singularidad que lo sitúa entre los más importantes de Europa y como referencia de conservación en todo el mundo, es que está conformado por un mosaico de ecosistemas (marismas, sistemas de dunas vivas y arenas estabilizadas o «*cotos*») que albergan una biodiversidad única en Europa.

Aunque como veremos más adelante el actual Espacio Natural de Doñana se asienta sobre un territorio geológicamente reciente, por él han pasado diversas civilizaciones como la fenicia, la griega y muy posiblemente aquí se localizara la capital del pueblo *tartessico*. Según excavaciones arqueológicas realizadas en el paraje llamado «*Cerro del Trigo*» se identifican asentamientos que pueden datar de entre el siglo II *a.C* y el II *d.C*, hasta el siglo V *d.C*. Lo que parece una certeza es que la localización inicial de estos primeros asentamientos relacionados con la actividad pesquera y de salazón fue en las conocidas como Marismas del Guadalquivir.

En 1969 se creó por decreto el Parque Nacional de Doñana y diez años después se amplió el espacio protegido y se creó el llamado «*Preparque de Doñana*». En 1980 la Unesco clasificó el Parque Nacional de Doñana como Reserva de la Biosfera basándose en la importancia de su variedad de ecosistemas que alberga y el alto número de especies que representa. En 1982 fue incluido en la lista de humedales del Convenio de Ramsar. En 1989 la Junta de Andalucía convirtió el *Preparque* en Parque Natural de Doñana. En 1994 fue catalogado por la Unesco como Patrimonio de la Humanidad, lo que permitió que mejoraran las posibilidades de conservación de la zona. Cuatro años después, en 1998 se produjo el Desastre de Aznalcóllar, una riada de lodos tóxicos provenientes de una mina

de la empresa Boliden-Apirsa que afectó al río Guadimar y parte de las aguas del parque.

En 2.000 el Ministerio de Medio Ambiente, tras la catástrofe de Aznalcóllar, promovió el programa «Doñana 2005», cuyo fin era la regeneración hídrica de las marismas. En 2006 las competencias de cuidado del parque se transfieren íntegramente a la Junta de Andalucía mediante el Real Decreto 712/2006, de 9 de junio, por el que se ampliaron las funciones y servicios de la Administración del Estado traspasados a la Comunidad Autónoma de Andalucía, en materia de Conservación de la Naturaleza. El Parque Nacional de Doñana y el Parque Natural se convirtieron en el [Espacio Natural](#) de Doñana, un único territorio dividido en áreas con diferente grado de protección ambiental.

La característica principal de los arroyos que confluyen en Doñana es el paso de la torrencialidad en periodos de lluvias concentradas a la casi total o incluso total ausencia de caudal en épocas de sequía. Son estas aportaciones, junto con las precipitaciones, las

que originan la inundación de las marismas, proceso que comienza hacia los meses de octubre-noviembre y se culmina en marzo-abril, momento a partir del cual, con la prácticamente nula presencia de lluvias, comienza su desecación por evaporación o evapotranspiración, cerrando el ciclo hídrico de la zona. Al final del verano solo están inundados los terrenos que son muy activamente manejados por el hombre, es decir, las zonas dedicadas a acuicultura extensiva.

Si realizamos una clasificación de los principales cauces que aportan sobre Doñana distinguimos entre los que alcanzan al Parque por la zona oeste, como son el arroyo de La Rocina, el arroyo del Partido, y los que lo alcanzan por la zona este, como es el complejo sistema del Guadimar.

El Partido es un arroyo con cota máxima en los 121 metros y la mínima en los 5 metros. Sus pendientes son moderadas en su cabecera, alrededor del 5% y se van suavizando a medida que se acerca a su desembocadura donde apenas llega al 0,2% cuando vierte directamente a las marismas de Doñana por el norte a la altura de la Aldea de El Rocío.

Por su ubicación cercana al mar y por estar muy expuesto a la entrada de borrascas procedentes del Atlántico este arroyo se caracteriza por una marcada torrencialidad con episodios especialmente virulentos con cierta frecuencia.

Morfológicamente se corresponde con el modelo de una cuenca torrencial, con su área de recepción, su garganta y su cono de deyección aunque ahora modificado, si bien su escasa pendiente escapa a este modelo. Primitivamente sus avenidas, ante la ausencia de obstáculos a su expansión inundaban extensas zonas antes de llegar a las marismas limitándose su capacidad de arrastre a la vez que se producía la sedimentación de un gran porcentaje de depósitos y la calma de su caudal antes de llegar a su desembocadura en Doñana. Una vez cesaba su torrencialidad las aguas volvían ocupar únicamente el cauce principal que llegaba hasta las marismas casi desprovisto de sedimentos.

Por su parte el Arroyo de la Rocina es uno de los principales aportes que tiene la Marismas de Doñana, aportando desde el oeste sus aguas caracterizadas por su alto nivel ecológico y su calidad ambiental, ya que discurren por una zona de protección en la que, en gran medida, se mantienen



Figura 1.  mbito de Estudio. Elaboración propia

inalterables los hábitats tradicionales de bosque de ribera.

La zona ocupada por las cuencas vertientes de los Arroyos de la Rocina y del Partido tiene una superficie de 793,38 kilómetros cuadrados (tabla 1) distribuidos entre los términos municipales de Almonte, Bollullos par del Condado, Bonares, Hinojos, La Palma del Condado, Lucena del Puerto, Moguer, Niebla, Rociana del Condado y Villarrasa, todos ellos de la provincia de Huelva (Figura 1).

Según la información considerada procedente de las áreas geográficas para la elaboración de estadísticas climáticas, procedente de la REDIAM (*Red de Información Ambiental de Andalucía*) dependiente de la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía, el 75,5% de nuestro área de estudio se encuentra afectado por el área geográfica denominada Litoral Onubense, donde predomina el clima mediterráneo oceánico caracterizado por la influencia suavizadora del océano, que reduce la amplitud térmica anual, con inviernos suaves en los cuales la temperatura media anual se sitúa siempre por encima de 10°, y con veranos que registran temperaturas medias en torno a 25° y en los que sólo en ocasiones excepcionales se superan los 40° de temperatura máxima.

No se registran precipitaciones demasiado abundantes, situándose entre los 500 y los 600 mm anuales, las cuales prácticamente se concentran en los periodos invernales con una sequía estival muy marcada. Otro factor determinante de este clima es la elevada insolación, que en algunos lugares supera las 3000 horas de sol anuales. Las heladas son episodios muy ocasionales y las nevadas inexistentes.

Por otro lado el 24,5% restante correspondiente al área geográfica denominada Bajo Guadalquivir en la que predomina el clima Mediterráneo continental afectado por un alto grado de continentalización. Las precipitaciones están en torno a los 600 mm. y tiene todas las características del clima mediterráneo, pero es más seco y más fresco, pudiendo ser frío, en las temperaturas absolutas. Se caracteriza por la irregularidad térmica y pluviométrica, produciéndose la mayor parte de las precipitaciones en las estaciones medias. Los días de lluvias en el año son escasos pero en ellos el agua cae de forma torrencial aunque no violenta. Las temperaturas son frescas, incluso en verano. Las mínimas se alcanzan en enero, y las máximas en agosto. Las mínimas y las máximas absolutas pueden ser notables. La amplitud térmica es moderada, de unos 15 °C. La continentalidad permite que haya un período de heladas de tres meses.

En cuanto a los tipos de suelo (figura 2) el 40% de la

zona de estudio se encuadra dentro de los arenosoles álbicos, suelos de textura gruesa con una profundidad entre 50 0 100 cm desde la superficie, horizonte en el que tienen a menos del 35% de fragmentos de roca en volumen. Los arenosoles álbicos se constituyen sobre sedimentos arenosos profundos y a veces tienen un nivel freático alto mostrándose evidencias de ello. En nuestra zona se asocian a cambisoles húmicos y Gleysoles dístricos. Su contenido en materia orgánica es relativamente bajo. Excepcionalmente presentan restos de corazas ferruginosas que llevan arenas y gravillas finas rodadas cubiertas por un manto de arenas eólicas o sacados a la superficie por la erosión. Los materiales geológicos son sedimentos arenosos del Pleistoceno.

Le siguen en importancia cuantitativa los planosoles, los cuales están asociados al estancamiento de aguas superficiales por un cambio de textura pronunciado con respecto al horizonte inferior, propiedades que aparecen dentro de algo más de un metro desde la superficie del suelo. Se forman en zonas de suaves pendientes, semiplanas o completamente planas, con arenas, gravas, arcillas y areniscas del Pleistoceno y Plioceno. Se asocian aquí a luvisoles que se forman en terrenos con mayores pendientes pero no suficientemente húmedos para presentar características o propiedades de reducción por aguas superficiales. El tercer grupo de suelos en presencia lo representan los regosoles que son suelos minerales sobre materiales no consolidados de textura media bien drenados. Son suelo muy importante por presencia de procesos erosivos y sedimentarios. Entre ellos se distinguen los calcáreos, eútricos y dístricos. Los dos últimos son los más localizados en la costa onubense sobre sedimentos arenoso pleistocénicos. El resto como los solonchaks, los fluviosoles y cambiosoles también se encuentran en esta zona aunque en un porcentaje mucho más limitado.

Geomorfológicamente (figura 3) la distribución espacial muestra una predominancia de sistemas eólicos como los mantos arrasados y arenas basales, que ocupan más del 25% del total de la cuenca junto con los mantos medio, alto y bajo que constituyen en su conjunto otro 25% del total. Este tipo de suelos están conformados por territorios de fisiografía dunar en sus diferentes tipos (dunas actuales y dunas móviles, dunas estabilizadas y dunas fósiles, depresiones interdunares y corrales) así como diferentes llanuras de acumulación y/o deflación eólica (mantos eólicos y llanuras arenosas), generadas por el arrastre de partículas por el viento, alcanza su máxima amplitud en las costas de Huelva y Cádiz, las más abiertas a los vien-

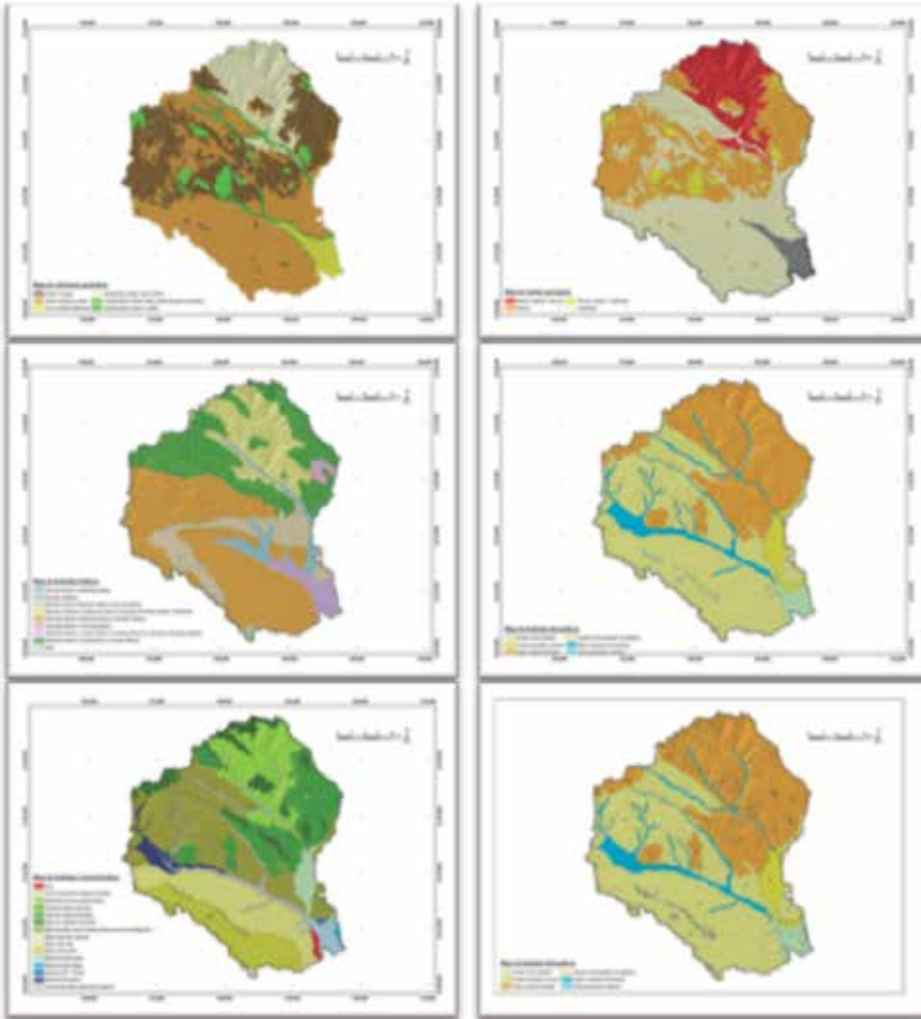


Figura 2. Descripción física del ámbito de estudio. Elaboración propia

tos del Atlántico. Destacan, en este sentido, las dunas del sector de Doñana, así como las extensas llanuras eólicas (mantos eólicos) del Condado onubense, las cuales se extienden hacia el interior del continente

Los galacis, de cobertura sobre todo pero también los desmantelados complementan el paisaje morfológico del área de estudio. Este tipo de unidades se encuadran dentro del sistema gravitacional-dunativo, cuya génesis se vincula a la acumulación de depósitos de gravedad en laderas (modelado de vertientes) o a coberteras detríticas ocasionadas o retocadas por arrastres masivos de materiales en condiciones de gran torrencialidad alternadas durante el Cuaternario con periodos de semiaridez, que dieron lugar a la formación e incisión de las formas denominadas glacis.

Otras unidades de tipo estuarino como la marisma o la vera también aparecen en la distribución aunque su importancia radica, por encima de la porción del territorio que ocupan, por los sistemas ambientales que albergan. Corresponden a formas generadas como

consecuencia de procesos de inundación periódica ocasionados por la acción de las mareas y vinculados, bien a aguas marinas, de forma dominante (fisiografías mareales) bien a aguas continentales (fisiografías fluviomareales). Todas se distribuyen por la fachada atlántica de Andalucía, concentrando la desembocadura del río Guadalquivir, en las marismas de su nombre, las fisiografías fluviomareales.

La distribución de las edades geológicas en el entorno de nuestro estudio presenta un patrón norte sur en el que las más antiguas se localizan más al norte decreciendo en antigüedad hacia el sur, si bien es cierto que entre ellas existen incrustaciones. Las zonas pertenecientes al cuaternario se circunscriben casi exclusivamente en el tercio sur aunque también se localiza una extensión muy importante en la vertiente sur de la cuenca alta del Arroyo del Partido. Le sucede hacia el norte las zonas pertenecientes al periodo de transición entre el cuaternario y

el plioceno superior, las cuales aparecen como incrustaciones rodeadas por zonas pliocenas que configuran gran parte del tercio central de nuestra zona. Ya por último el tercio norte se encuentra predominantemente ocupado por zonas de transición entre el plioceno y el mioceno superior, si bien también se encuentran amplias manchas pliocenas con incrustaciones cuaternarias-pliocenas

## 4. PERIODO DE REFERENCIA

En la elección del periodo de referencia ha jugado un papel fundamental la disponibilidad de las fuentes de información que usamos en nuestro estudio la cual se encuentra prácticamente en su totalidad disponible en la REDIAM donde se integra toda la información ambiental producida en la Comunidad andaluza con independencia del órgano que la promueva o materialice. Dicho esfuerzo de recopilación y coordinación

tiene su origen en 1984 cuando la Consejería de Medio ambiente creó el SINAMBA (*Sistema de Información ambiental de Andalucía*), donde se sientan las bases los criterios básicos del proyecto como son la cooperación de todos los entes productores y homogeneización de la información y sus metadatos asociados, ofreciendo a todo tipo de usuarios un gran volumen de información geográfica normalizada.

En este entorno disponemos de fuentes cartográficas suficientes para realizar análisis comparativos en periodos eficaces y apropiados, como es el caso de las ortofotos y la información de las coberturas vegetales y usos del suelo para múltiples fechas.

Para la comparación reciente se escogen las fechas 1957 y 2007 para las que se cuenta una producción regular de los usos del suelo y coberturas vegetales de Andalucía que permiten un análisis en un periodo de tiempo clave en la materia que nos ocupa.

## 5. MATERIALES

### 5.1. El mapa de usos y coberturas vegetales de Andalucía

El mapa de usos del suelo y coberturas vegetales de Andalucía 1:25000 representa de una forma simplificada y estandarizada los diferentes tipos de ocupación del territorio, mediante el establecimiento de unas características previas estructuradas en diferentes niveles de complejidad y con una actualización periódica para todo el territorio andaluz.

Tiene sus antecedentes en el proyecto *CORINE Landcover* desarrollado por la Unión Europea en 1987 y aplicado en España por el Instituto Geográfico Nacional, siendo su finalidad la obtención de una cartografía continua de los usos del suelo del todo territorio comunitario, con el compromiso además, de su actualización periódica.

Inicialmente puesto en marcha para el año 1987 esta fuente de información ha ido variando en complejidad y precisión de manera que se ha consolidado su actualización cuatrienal desde 1991 y se ha ido perfeccionando su precisión geométrica a la vez que se ha ido aumentando la escala de 1:50000 inicial de 1987 a 1:25000 usado a partir de 1999 y en los periodos sucesivos. Todo ello ofrece una capacidad de análisis y posibilidades de estudios comparativos muy importantes.

Inicialmente las fuentes de información a partir de las cuales se realiza la digitalización de las diferentes categorías fueron las imágenes de satélite a escala 1:50.000 y con una precisión de 30 metros hasta

entonces la referencia básica para la elaboración de cualquier tipo de cartografía temática en Andalucía. A partir de 1999 con la disponibilidad de vuelos fotogramétricos de toda la región, realizados a color y con una precisión de 1 metro más que suficiente para la actualización de la información se pasa a la producción de la misma a escala 1: 25000. Todas estas mejoras de información, de procesos de normalización así como las propias mejoras en actualización provocarán una mejora continua de los mapas de vegetación producidos basados fundamentalmente en su geometría.

Parejo a su actualización periódica este proyecto también se aplicará consentido retroactivo de manera que ya se han realizado las digitalizaciones de los usos del suelo a escala 1:25000 a partir de las ortofotos existentes del año 1956, 1976 y 1984, con lo que se completa el espectro posible de esta información en base a la información de referencia.

### 5.2. Modelo Digital del terreno del Instituto Geográfico Nacional

El MDT (*Modelo digital del terreno*) del IGN (*Instituto Geográfico Nacional*) de la zona que nos ocupa se ha obtenido por estereocorrelación automática de vuelos fotogramétricos del PNOA (*Plan Nacional de Ortofotografía Aérea*) con resolución de 25 a 50cm/píxel, revisada e interpolada con líneas de ruptura donde fuera viable.

## 6. MÉTODOS

### 6.1. Definición de la cuenca hidrográfica

Para el cálculo de la cuenca vertiente teórica de los arroyos que nos ocupan recurriremos a las herramientas del grupo «*Hidrology*» en la extensión «*Spatial Analyst de ArcGis 10.3*».

La información de partida es el MDT del IGN (*MDT05*) del cual extraemos de la zona que nos interesa un archivo tipo ASCII que contiene el valor de la altura para cada una de las celdillas definidas por sus coordenadas x e y referidas al sistema de referencia *ETRS 1989 Zona 29 N*. Dicho fichero con extensión «*.asc*» será transformado con la herramienta «*Importar Fichero GRID XYZ ASCII*», de la aplicación *ERMMapper* a formato *ráster (.ers)*, archivo que posteriormente transformado al formato *ráster* que más nos interese (*Tiff, Img,...*) que procesaremos en *ArcGis* para realizar los cálculos hidrológicos hidrológicos.

A veces, y antes de lanzar los algoritmos que permitirán a nuestro SIG forzar los encauzamientos en la determinación de la red hidrográfica y de la cuenca

y subcuencas correspondientes, hemos de comprobar la coherencia de los datos, ya que en el proceso de digitalización de la superficie puede que se hayan cometido errores que alterarían la efectividad de nuestro modelo.

En este sentido hemos de prever la posibilidad de «sinks» o conjunto de celdas del MDE que no presentan orientación, convirtiéndose en depresiones o celdas en las que confluyen todas las celdas circundantes y no encuentran salida.

Con la función «Fill Sinks» se realiza un proceso de filtrado que suaviza el relieve y elimina estas celdas atípicas. El conocimiento del área de estudio nos permitirá en todo caso determinar aquellas situaciones en las que estas pozas existen en la realidad sobre el terreno y considerar la manera en que su suavización modificaría el resultado del modelo.

Una vez pasado este filtro disponemos de un modelo de elevaciones teóricamente «correcto» a partir del que realizaremos las posteriores operaciones. La primera de ellas consiste en determinar la dirección del flujo teórico superficial para toda la extensión de nuestro modelos, para lo cual usaremos la función «Flow direction» de la que obtendremos el siguiente modelo derivado

Este modelo teórico nos va a permitir calcular la red asociada a los procesos de acumulación de los caudales procedentes de las direcciones de flujo obtenidas anteriormente. Así obtenemos, mediante la función «Flow accumulation» diferentes redes que pueden variar en su grado de complejidad (desde los cauces principales hasta los más minúsculos que constituyan el conjunto de la red) dependiendo de los valores que introduzcamos en los procesos de reclasificación del ráster que obtenemos. Teniendo en cuenta que el rango de valores de acumulación del ráster obtenido de la aplicación de la función antes descrita, está entre 0 y 7964096, podremos adecuar las redes teóricas que

obtenemos a las necesidades de nuestro estudio. Como ejemplo de alguna de ellas mostramos las obtenidas con los valores de paso 1000, 10000 y 100000.

La que se adecua más al propósito de nuestro estudio es la red hidrográfica teórica obtenida por la reclasificación con el umbral en el valor 10000 y para simplificar nuestros cálculos nos vamos a quedar con la superficie ocupada por la cuenca vertiente de los arroyos que aportan a Doñana por el Oeste, exportando el ráster con las cuencas a formato vectorial, para extraer posteriormente la entidad poligonal correspondiente a dicha cuenca.

Con esa entidad poligonal realizaremos una selección de la cuenca hidrográfica teórica obtenida en pasos anteriores, mediante una función de selección por localización geográfica en la que impondremos la condición con la que seleccionaremos aquella red hidrográfica que esté totalmente contenida dentro de nuestra cuenca hidrológica; obtenemos la siguiente información:

## 6.2. La U.S.L.E.

Este modelo cuantifica las pérdidas de suelo por efecto de la erosión a partir de unas pocas variables como son la erosividad de la lluvia, la erosionabilidad del suelo, la topografía del terreno, la cobertura vegetal y las prácticas de cultivo. La clara representación gráfica sobre el territorio que presentan las variables que contempla, posibilitan el uso de los SIG.

Este modelo presenta ciertas desventajas basadas en una excesiva generalización de los datos así en que no cuantifica la deposición y acumulación de sedimentos, si bien es cierto que no es este el objetivo de nuestro estudio.

Mediante el método USLE se calcularán las pérdidas de suelo mediante la aplicación de la fórmula:

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

siendo *A* la cantidad de suelo perdido, medido en *Tm/ha/año*, *R* el índice de erosión pluvial, *K* el factor de erosionabilidad del suelo, *L* el factor de longitud de pendiente o ladera de máxima pendiente, *S* el factor pendiente, *P*

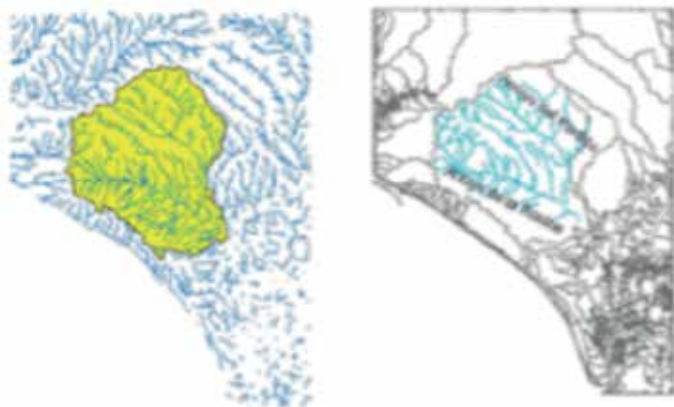


Figura 3. Delimitación de la cuenca. Elaboración propia.



el factor prácticas de cultivos y *C* el factor cultivo.

El Factor *C* es adimensional y se define como el cociente entre la tasa de erosión de una parcela con una determinada cubierta vegetal, y la tasa de erosión de esa misma parcela con las mismas condiciones de clima (*R*), suelo (*K*), relieve (*LS*) pero en barbecho continuo (*en que e = 1*) y laboreada según las líneas de máxima pendiente (*P = 1*).

Este factor indica pues la protección que la cobertura vegetal ofrece a las gotas de lluvia impidiendo o limitando su efecto erosivo sobre el suelo. Su valor es una relación entre las pérdidas de suelo fértil con la cobertura vegetal actual y las que tendría si estuviese en barbecho continuo.

El factor *C* puede tomar valores que, en función de las cubiertas vegetales y la calidad de las mismas, estarán entre 0,001 para las cubiertas forestales más densas (un suelo con vegetación natural bien desarrollada apenas presentará erosión por muy abrupto que sea el paisaje) y 1 para los suelos descubiertos, teniendo por tanto una repercusión que puede modificar el valor final de erosión en mil veces. Es pues, un factor decisivo.

Un hecho que se ha de tener a la hora de hacer los cálculos si queremos que los resultados sean precisos, es que la variabilidad del factor *C* se ve igualmente afectada por sus fases de desarrollo, es decir, las zonas de vegetación natural mantienen unos valores relativamente constante durante todo el año, pero en las áreas cultivadas es más difícil obtener valores acertados, puesto que dependerán de los diferentes niveles de protección de los cultivos, de las diferentes fases de desarrollo de éstos así como de su distribución a lo largo del año (RODRÍGUEZ SURIAN et al, 1995).

En nuestro modelo hemos introducido este factor como determinante en el flujo de retención del suelo, y la relación entre las cubiertas vegetales y los valores del factor *C* teniendo en cuenta otra variable como es la pendiente. Así en CAMACHO, 2001 se propone una matriz de protección del suelo por la vegetación que podemos ver en la tabla 2.

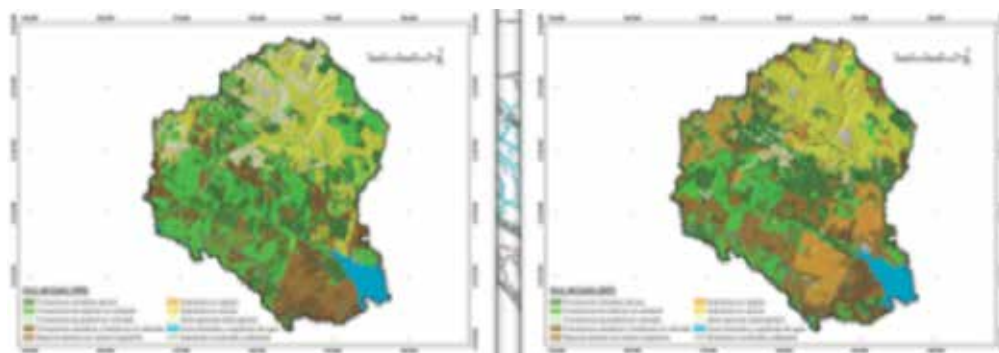


Figura 4. Distribución de las cubiertas vegetales en 1956 y 2007. Elaboración propia.

## 7. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

### 7.1. Evolución de los usos del suelo y las coberturas vegetales en el área de estudio

La principal característica de los usos del suelo en nuestro entorno de estudio (Figura 4) (Tabla 1), al inicio del intervalo temporal que nos ocupa, es la clara predominancia de espacios naturales y forestales, los cuales ocupan más del 68% de la extensión territorial. Cabe decir a este respecto que esta zona tradicionalmente ha carecido de un valor económico, centrando su interés en el valor de uso que tenía para sus habitantes, los cuales recurrían a él en busca de recursos que completasen las limitadas rentas de los hogares (pastoreo, leña,...), OJEDA, J (1987). A ello hay que unir que desde hacía décadas se habían promovido iniciativas estatales que venían a modificar el modelo económico con la promoción de grandes superficies forestales que viniesen a satisfacer las necesidades de la época (*Patrimonio Forestal del Estado*). Con todo ello se observan como usos mayoritarios las formaciones arboladas bien sean densas o acompañadas en su dispersión por matorral natural, las cuales en su conjunto conforman el 42,79% del total. Atendiendo a este escaso valor económico destaca igualmente la gran extensión existente de espacios abiertos con escasa vegetación u ocupadas por asociaciones arbustivas o herbáceas (casi un cuarto del total de la superficie).

Completan la distribución espacial de los usos la ocupación generalizada del tercio norte de nuestro área de estudio por los cultivos de secano asociados a la trilogía mediterránea olivo-vid-cereal, la masa húmeda conformada por las Marismas de Doñana y los encharcamientos previos de la zona de la Rocina aledaña a las mismas. Es inapreciable la extensión dedicada al cultivo de regadío que no representa ni un 0,5%, pero es necesario mencionarlo ante la gran relevancia que presentará a lo largo de nuestro periodo de referencia no solo por el incremento exponencial que sufrirá superficialmente sino por el carácter condicionador de este tipo de cultivo en cuanto a las iniciativas estatales de desarrollo del entorno. Las zonas urbanas o alteradas corresponden exclusivamente a los núcleos de población

Evolución usos	1.956		2007		Evolución	
	Superficie	%	Superficie	%	Superficie	%
Formaciones de matorral con arbolado	19.816	24,88	15.244	19,14	-4.572	-5,74
Formaciones arboladas densas	14.267	17,91	12.020	15,09	-2.246	-2,82
Superficies en seco	13.469	16,91	9.665	12,14	-3.803	-4,78
Espacios abiertos con escasa vegetación	9.980	12,53	11.427	14,35	1.447	1,82
Formaciones arbustivas y herbáceas sin arbolado	9.458	11,88	6.193	7,78	-3.264	-4,10
Áreas agrícolas heterogéneas	8.159	10,25	7.289	9,15	-870	-1,09
Zonas húmedas y superficies de agua	2.970	3,73	3.129	3,93	159	0,20
Formaciones de pastizal con arbolado	861	1,08	3.454	4,34	2.592	3,25
Superficies en regadío	350	0,44	9.650	12,12	9.300	11,68
Superficies construidas y alteradas	306	0,38	1.565	1,97	1.259	1,58

Tabla 1. Evolución de las cubiertas vegetales entre 1956 y 2007. Elaboración propia.

aun poco evolucionados en esta época.

Según los datos existentes para el año 2007 hay que destacar el gran incremento registrado en la superficie de suelo destinado al regadío, pasando del 0,44% del inicio del periodo a las más de 9000 hectáreas que superan el 12% del total. Este incremento ha dejado una huella en el territorio que además ha conllevado el desarrollo de modificaciones de cauces, sobre todo en el entorno del Arroyo del Partido, habiéndose realizado encauzamientos de aguas fluviales con el fin de evitar inundaciones. Ello se ha reflejado en procesos de colmatación de las Marismas de Doñana frente a lo que el Ministerio de Medio Ambiente, a

través de El Proyecto Doñana 2005, revirtió la situación retornando los espacios cercanos al cauce a su estado natural, recuperando zonas de inundación que redujeran el encauzamiento, la velocidad del flujo y la capacidad de arrastre de materiales que culminaban con su depósito en el espacio marismeno.

No son alarmantes las alternancias en los usos naturales los cuales responden a cambios de modelo de desarrollo en los que se incentivaba la eliminación de espacios forestales, destinando esas superficies a restauración de espacios originales de bosques compuestos con matorral mediterráneo más abiertos y con cubiertas vegetales. Por otro lado grandes zonas de este tipo de uso son alteradas para su puesta en regadío, siendo junto con los espacios de seco los principales reservorios de donde se originan las transformaciones a regadíos

Por otro lado se aprecia un incremento lógico en las superficies urbanas o alteradas producto normal de la expansión de las zonas urbanas y vías de comunicación.

### 7.2. Evolución Factor C

Aplicado la matriz de protección del suelo por la vegetación (CAMACHO, 2001) consideramos la variación que se ha producido en nuestro periodo de referencia (Figura 5), concluyendo que las principales zonas de pérdida de protección se localizan principalmente en:

- Las zonas de transformación de regadíos en el Plan Almonte-Marismas.

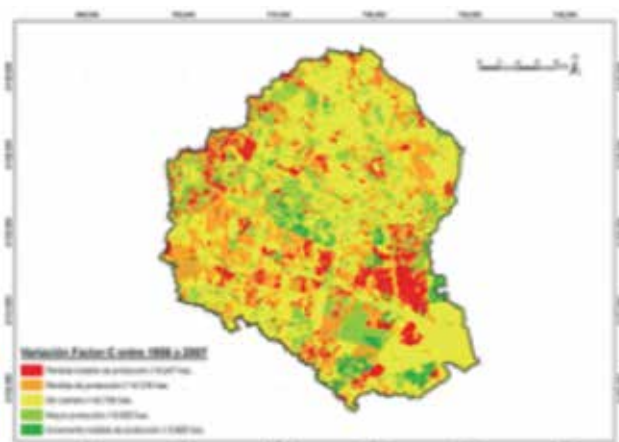


Figura 5. Evolución del factor de protección C entre 1956 y 2007. Elaboración propia

- Áreas de desarrollo de cultivos intensivo bajo plástico en los municipios más occidentales (Lucena del Puerto, Bonares,...)
- Desarrollo urbano en los núcleos del entorno.
- Deforestaciones producidas por la política de eliminación de eucaliptares y recuperación de bosque mediterráneo, mucho más abierto en cuanto a la cubierta forestal que lo conforma. En este punto cabe destacar como dichas transformaciones se han producido fundamentalmente en el interior del Espacio Natural de Doñana.

Por otro lado el crecimiento de la protección se produce en espacios de reforestación de pinar realizada sobre espacios antes improductivos, de pastos o escasa vegetación. Destacando la reversión de un amplio espacio en la zona sur, inicialmente afectado por el Plan Almonte Marismas que posteriormente ha revertido a su restauración como espacio cubierto por vegetación natural.

## 8. CONCLUSIONES

Más allá de ser un problema puntual se debe considerar el problema como un elemento territorialmente más extenso que englobe a las cuencas vertientes de los arroyos que aportan a la marisma desde sus cabeceras mucho más allá de los límites del propio Espacio Natural. Se pone de manifiesto que la pérdida de protección del suelo por la cubierta vegetal que lo cubre no se debe a un solo facto y hay que evaluar detenidamente el ámbito más concreto en el que se produce. Es por ello que se pueden identificar una tipología concreta en nuestra zona de estudio, con deforestación planificada (sustitución de zonas de arbolado frondoso y más concretamente eucaliptar, por espacios naturales más abiertos), iniciativas de desarrollo económico inducido por políticas gubernamentales (zonas de cultivo intensivo bajo plástico) y por último desarrollo de zonas no planificadas en las que se deforesta para instalar cultivos de regadío.

## REFERENCIAS

- Bayán Jardín, B.J. (2001). «*La restauración de Doñana: Actuaciones del Proyecto Doñana 2005*». 2ª Reunión Internacional de Expertos sobre la Regeneración Hídrica de Doñana. p.17- 27. Huelva.
- Camacho Olmedo, M. T. (2001). «*Delimitación y caracterización de los paisajes erosivos de una montaña mediterránea: Sierra de la Contraviesa, provincias de Granada y Almería*». Cuadernos geográficos de la Universidad de Granada nº 21-22 pp. 37-52.
- Mantegui Aguirre, J. A.; (2005). «*Arroyo del Partido, un ejemplo de los desafíos que plantea la restauración hidrológica. Doñana*». Agua y Biosfera. Ministerio de Medio Ambiente.
- Ojeda Rivera, J.F. (1987). Organización del territorio en Doñana y su entorno próximo. (Almonte). Siglos XVIII-XX. Mº de Agricultura - ICONA. (Monografías, 49). Madrid. 456 pgs.
- Ojeda Rivera, J.F.; Del Moral Ituarte, L. (2004). «*Percepciones del agua y modelos de su gestión en las distintas fases de la configuración de Doñana*». Investigaciones geográficas. Instituto Universitario de Geografía. Universidad de Alicante, nº 35 (sept-dic), pp.25-44.
- Rodríguez Ramírez, A.; Yáñez Camacho, C.; Gascó, C.; Clemente Salas, L; Antón, Mª. P. (2005). «*Colmatación natural y antrópica de las marismas del Parque Nacional de Doñana: Implicaciones para su manejo y conservación*». Revista Cuaternario y Geomorfología, nº 19 (3-4) p.37-48.
- Saura, J. (1999). «*Situación y problemática de las cuencas vertientes a Doñana*». 1ª Reunión de Expertos sobre la Regeneración hídrica de Doñana. p. 207-210.
- Sendra Arce, P; Mintegui Aguirre, J.M.; Robredo Sánchez, J.C. (2002). «*El Arroyo del Partido: Un torrente dormido*». Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía.

### Sobre el autor

#### Fabián Romero Pichardo

Licenciado en Geografía e Historia, especialidad de Geografía, por la Universidad de Sevilla.

Máster en Sistema de Información Geográfica: Planificación, Ordenación del Territorio y Medio Ambiente de la Universidad de Sevilla (Departamento de Geografía Física y Análisis Geográfico Regional, y Lenguajes y Sistemas Informáticos). Certificado del Período de Docencia del Tercer Ciclo (Doctorado), para el Programa «Cambios Ambientales y Riesgos Naturales» tutorado por el Dr. Fernando Díaz del Olmo en la Facultad de Geografía e Historia de la Universidad de Sevilla.

Técnico de Sistemas de Información Geográfica del Ayuntamiento de Almonte. Encargado de organizar y coordinar todas las iniciativas y proyectos municipales integrables en el SIG municipal, así como de poner en marcha nuevos procesos de implantación, actualización de la información.