

EL EFECTO ACUMULADO DE LOS IMPACTOS CLIMÁTICOS Y ANTROPOGÉNICOS SOBRE LOS HUMEDALES DEL SUROESTE DE ESPAÑA

Arturo SOUSA¹, Leoncio GARCÍA-BARRÓN², Mark VETTER³, Mónica AGUILAR⁴,

Pablo GARCÍA-MURILLO¹ y Julia MORALES¹

¹*Department of Plant Biology and Ecology, University of Seville, Seville, Spain*

²*Department of Applied Physics II, University of Seville, Seville, Spain*

³*Department of Geography, University of Munich, München, Germany*

⁴*Department of Physical Geography, University of Seville, Seville, Spain*

asousa@us.es, leoncio@us.es, mark.vetter@lmu.de, malba@us.es, pgarcia@us.es, jmorales@us.es

RESUMEN

Habitualmente los impactos antropogénicos son mucho más conspicuos que los climáticos. Por ello pueden contribuir a que los efectos del cambio climático pasen desapercibidos. Este estudio plantea la posibilidad de detectar si ambos tipos de impactos han afectado de forma sinérgica a los humedales del suroeste de España. Para ello hemos cuantificado, los cambios en estos humedales y en los usos del suelo entre 1956 y 1987. Los resultados ponen de manifiesto intensos cambios en los usos del suelo (entre 1936 y 1972 más del 90% del área de estudio fue reforestada). Aparentemente estos cambios contribuyeron a desecar las lagunas en un 61 % de su superficie y al retroceso de los arroyos en un 48%. Sin embargo al analizar las tendencias climáticas, para este mismo período, también encontramos un incremento en la irregularidad y en la erosividad de la precipitación. Este incremento tiene lugar justo con el inicio de la implantación de los monocultivos forestales (precisamente cuando el suelo está casi desnudo). Como consecuencia de ello, la suma de los impactos antropogénicos y climáticos, durante un período climáticamente más irregular, ha contribuido de forma sinérgica a la colmatación y retroceso de las lagunas y arroyos.

Palabras clave: Irregularidad, Erosividad, Impactos climáticos, Humedales, Impactos antropogénicos.

ABSTRACT

Usually, anthropogenic impact is far more conspicuous than the climate impact. Consequently, the former can contribute to climate changes going by unnoticed. This study poses the possibility of detecting whether both types of impact have affected the wetlands of Southwest Spain synergically. For such purpose, we have quantified the changes occurred in these wetlands and in land use between 1956 and 1957. The results evidence intensive changes in land use (between 1936 and 1972 more than 90% of the area under study was reforested). Apparently, these changes contributed to the desiccation of lagoons in 60% of their surface and to a regression of 48% of the creeks. However, when the climatic trends are analysed for the same period, we do also find an increase in the irregularity of rainfall, as well as an increase in erosion caused by rainfall. This increase takes place simultaneously with the start of the implantation of forestal single-crops (precisely when the soil was practically bare). As a result of the above, the addition of anthropogenic and climatic impacts during a climatically more irregular period has contributed, synergically, to silting and to a regression in lagoons and creeks.

Key words: Irregularity, Erosivity, Climatic impacts, Wetlands, Anthropogenic impacts.

1. INTRODUCCIÓN

Aunque el clima ha sido la principal causa que a escala geológica ha afectado en el pasado a los humedales, los cambios que genera son relativamente lentos (Álvarez-Cobelas *et al.*, 2001). En estudios previos hemos evidenciado los efectos de los cambios climáticos pasados (como la Pequeña Edad del Hielo) en los humedales del suroeste de España. Así se reconocen retrocesos desde el S. XVII hasta el XX en las lagunas temporales (Sousa *et al.*, 2010a), lagunas turbosas (Sousa y García-Murillo, 2003), lagunas peridunares (Sousa *et al.*, 2009) y en los pequeños arroyos costeros (Sousa *et al.*, 2010b). En los períodos más recientes –S. XX-XXI– es más complicado evidenciar el efecto de los impactos climáticos en los humedales frente a impactos antropogénicos, ya que estos últimos son más rápidos en el tiempo (Álvarez-Cobelas *et al.*, 2001), generalmente más intensos y, por ello, más conspicuos (Sousa *et al.*, 2010a). Esto hace que los cambios en los usos del suelo puedan conducir a sinergias sutiles que acentúen o incluso enmascaren las respuestas de los ecosistemas al cambio climático (Parmesan *et al.*, 2011).

En este estudio se pretende cuantificar, durante un período corto de tiempo, los cambios en los humedales del suroeste de la Península Ibérica, para analizar posteriormente su vinculación a impactos antropogénicos y/o climáticos. En el caso de que ambos tipos de impactos estuvieran presentes se pretende discutir cómo interactúan entre sí. Por ello, este trabajo, plantea la posibilidad de detectar si los impactos antropogénicos y climáticos han afectado de forma sinérgica a los humedales del suroeste de España. Para ello es necesario seleccionar un período de tiempo concreto donde se puedan estudiar detalladamente, no sólo los cambios en los humedales, sino también los impactos antropogénicos y climáticos. Los humedales del SW de España constituyen una zona de estudio muy adecuada, ya que no sólo presenta diferentes tipos de humedales, sino que también han sido alterados por el hombre en un período de tiempo relativamente reciente. Además existe constancia de que, en el pasado, se han visto afectados por las fases secas y húmedas de la Pequeña Edad del Hielo en Andalucía (Sousa y García-Murillo, 2003) de acuerdo a las reconstrucciones de la climatología histórica para Andalucía (Rodrigo *et al.*, 1999). Por ello se han seleccionado como objeto de estudio los humedales del Parque Natural de Doñana (sector Abalarío) para el período 1956-1987.

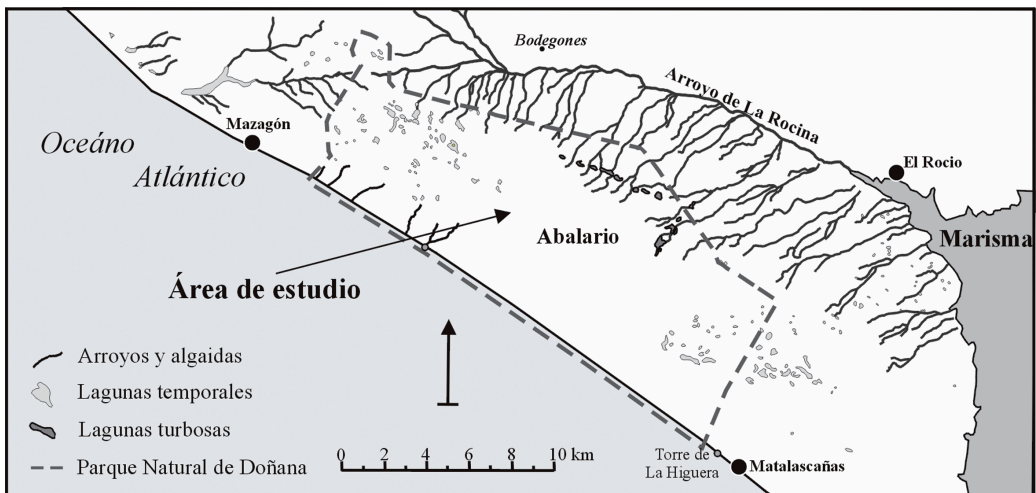


FIG. 1: Localización del área de estudio en el suroeste de la Península Ibérica, dentro de los límites del Parque Natural de Doñana.

Tomando en consideración todo lo anterior los tres objetivos principales de este estudio son:

- (1) Cuantificar los cambios en los humedales del área de estudio durante el período 1956-1987
- (2) Estudiar los impactos antropogénicos y climáticos que han afectado, durante este período, a los

humedales estudiados (3) Analizar el posible efecto combinado de los impactos antropogénicos y climáticos sobre estos humedales.

Para alcanzar estos objetivos en primer lugar se va a reconstruir cartográficamente la superficie ocupada por los humedales de la zona de estudio, se van analizar los cambios en los usos del suelo y finalmente se estudiarán las principales tendencias climáticas que pueden afectar más directamente a estos humedales.

2. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se ubica dentro de los límites del Parque Natural de Doñana (Huelva), en el suroeste de la Península Ibérica (aproximadamente 37° 10' latitud N y 6° 45' longitud W). Esta zona ocupa aproximadamente unas 25.000 ha de un manto eólico litoral cuaternario entre los núcleos litorales de Matalascañas y Mazagón. En esta área se localizan un vasto conjunto de lagunas temporales y turbosas, así como diferentes tipos de matorral higrofitico y pequeños arroyos litorales. Todas estas formaciones, de un gran valor desde el punto de vista de la conservación y recogidas en la Figura 1, serán el objeto de este estudio.

Esta zona, por su posición geográfica presenta un clima mediterráneo, aunque suavizado por el efecto oceánico debido a su proximidad a la costa atlántica. Esta influencia atlántica proporciona inviernos templados y veranos más suaves que el entorno. De acuerdo a los datos del observatorio de Bodegones (ver Figura 1), para el período 1951-1980 la temperatura media anual fue de 16.3 °C y la precipitación media anual de 678.4 mm.

3. FUENTES DE DATOS Y METODOLOGÍA

Para reconstruir cartográficamente la situación de las lagunas (turbosas y temporales), el matorral higrofitico y los arroyos se ha cartografiado a escala 1:25.000 su situación en 1987, y posteriormente, su situación en 1956. Además se ha cuantificado la superficie que ocupan cada uno de los polígonos cartografiados y la longitud del talweg de los arroyos empleando un planímetro *Planix 5000*.

Más concretamente se han empleado los vuelos en B/N fechados en 1987 (E. 1:20.000) y 1956 (E. 1:33.000), junto con las imágenes de satélite LANSAT-TM (1986 y 1990) y SPOT (1989). Este trabajo de fotointerpretación se combina con trabajo de campo, así como con estudios florísticos de la vegetación higrofitica existente. Este análisis permite asociar diferentes comunidades vegetales a cada uno de los humedales estudiados.

Para estudiar los cambios en los usos del suelo se han empleado diferentes fuentes. En 1851-1852 las tierras comunales sin cultivar que formaban el área de estudio se dividen en 10 cotos que pasan a manos privadas. A partir de entonces, y sobre todo durante el período 1932-1978, se elaboran un total de 49 informes forestales de compra, venta y valoración de estos cotos por diferentes entidades como la V-División Hidrológico Forestal, Patrimonio Forestal del Estado, ICONA e INIA (Espina y Estévez, 1993). Estos informes -la lista completa se puede consultar en Sousa *et al.*, 2010a)- se han empleado para cuantificar los cambios en los usos del suelo. Los resultados obtenidos han sido completados y corroborados con los mapas forestales y de usos del suelo (1956 y 1987) elaborados para la zona de estudio sobre la base de los dos vuelos anteriormente mencionados. Los datos de la población de los poblados forestales proceden de los censos municipales 1945-1986 obtenidos por Espina y Estévez (1992). Las infraestructuras forestales se han cartografiado en base a la fotointerpretación del vuelo de 1956, el Mapa Topográfico Nacional escala 1:50.000 (1951) y Espina y Estévez (1993). Una síntesis de las fuentes de datos empleadas para estudiar los cambios en los usos del suelo y en los humedales se recoge en la Tabla 1.

Fuentes de datos empleadas para la cartografía de los humedales	Lagunas temporales	Lagunas turbosas	Monte Negro hidrofitico	Arroyos atlánticos	Cambio en los usos del suelo
Trabajo de campo	X	X	X	X	X
Fotografía aérea (1956/1987)	X	X	X	X	X
Imágenes de satélite	-	-	-	X	X
Archivos forestales	-	X	-	-	X

TABLA 1: Principales fuentes de datos empleadas para cartografiar los humedales y los usos del suelo.

Para estudiar las tendencias climáticas, y especialmente la erosividad y la disparidad de la precipitación, se ha empleado la serie facilitada directamente por el Real Observatorio de la Armada en San Fernando (Cádiz) para el período 1890-2000. Podemos considerar que la serie elegida refleja el comportamiento pluviométrico del área analizada. Esta serie no presenta lagunas. Algunos autores (Almarza *et al.*, 1996) han detectado una posible inhomogeneidad relativa de los registros en relación con Gibraltar o Cádiz con anterioridad a 1880, por lo que no afectaría al periodo objeto del presente estudio. La distribución e intensidad de la precipitación (y no sólo su cantidad) influye sobre los procesos erosivos y, por tanto, en la movilización de sedimentos y su posterior depósito en áreas topográficas más deprimidas (como pequeñas cubetas lagunares o el fondo de los talweg de los arroyos). De ahí el interés de conocer su evolución: para calcular la erosividad pluvial anual se ha empleado el índice modificado de erosión potencial de Fournier (Arnoldus, 1980):

$$I_{MF} = (p_i^2)/P$$

en que p_i es la precipitación mensual de cada uno de los meses ($i = 1, 2, \dots, 12$), y P la precipitación total anual correspondiente. Para la misma precipitación total, el índice modificado se ve afectado por la irregularidad de la distribución intranual de la precipitación.

Por otro lado, un incremento en la irregularidad de la precipitación puede favorecer e intensificar los procesos erosivos. Esta irregularidad se ha incrementado a lo largo del S. XX en algunas áreas de la Península Ibérica durante el último tercio del S. XX (García-Barrón *et al.*, 2011). Más concretamente la secuencia continua de años secos y años húmedos puede favorecer también la movilización de sedimentos. Ya que, después de los años secos, la cobertura de la vegetación capaz de interceptar la precipitación disminuye. Por ello las precipitaciones intensas, sobre los suelos arenosos del área de estudio, favorecen los procesos de erosión y sedimentación hacia zonas más deprimidas. Esta movilización superficial, de la fracción arenosa de los sedimentos, ya ha sido estudiada en el área de Doñana para los períodos climáticos secos de siglos pasados, y se conoce como “dunización secundaria” (Granados *et al.*, 1988; Merino *et al.*, 1990). Para analizar la evolución de la disparidad durante el período 1890-2000 hemos empleado el Índice Específico de Disparidad (I_{di}) recientemente desarrollado por García-Barrón *et al.* (2011). Este índice cuantifica la alternancia consecutiva de años secos y húmedos. Para calcularlo se ha empleado la siguiente ecuación:

$$I_{di} = [((p_i - p_{i+1})^2 + (p_i - p_{i-1})^2) / 2]^{1/2} / \mu_i$$

donde p_i es el total de la precipitación en un año i , p_{i+1} and p_{i-1} es la precipitación del año anterior y posterior respectivamente y μ_i es el promedio de los tres valores anteriores.

Otros aspectos relativos a los cambios en las tendencias climáticas en el área de estudio (como la desviación relativa acumulada de la precipitación media anual, tendencias de la temperatura media de las máximas y tendencias de la temperatura media de las máximas) han sido abordados en publicaciones previas por García-Barrón (2002), García-Barrón y Pita (2004) y Sousa *et al.* (2010a).

4. RESULTADOS

4.1. Cambios en los humedales y su vegetación asociada entre 1956 y 1987

En la Tabla 2 se presentan los resultados correspondientes a la cartografía de los humedales (sensu lato), así como de las comunidades vegetales y especies indicadoras en la zona de estudio entre 1956 y 1987:

Unidad	Comunidad	Especies indicadoras	Número de polígonos		Área (ha) o longitud total (km)	
			1956	1987	1956	1987
Lagunas temporales	<i>Preslio-Eryngium corniculati</i> , <i>Ludwigio palustris-Cyperetum michelianus</i> , entre otras	Carófitos y pastizal oligotrofo	99	114	575.2	626.2
Lagunas turbosas	<i>Erico ciliaris-Ulicetum (minoris) lusitanicus</i>	<i>Erica ciliaris</i> y <i>Ulex minor</i>	178	30	1533.0	180.5
Monte Negro higrofitico	<i>Erico scopariae-Ulicetum australis</i>	<i>Erica scoparia</i> y <i>Ulex australis</i>	55	198	154.1	907.5
Arroyos Atlánticos	Restos del bosque ripario oligotrofo <i>Ficario ranunculoidis-Fraxinetum angustifloiae</i> , <i>Viti vinifera-Salicetum atrocinereae</i> acompañado de trepadoras (<i>Lonicero hispanicae-Rubetum ulmifolii</i>)	<i>Salix atrocinerea</i> , <i>Rubus ulmifolius</i>	-	-	25.9	12.5

TABLA 2: Evolución de los humedales y su vegetación asociada entre 1956 y 1987 (ampliado a partir de Sousa y García-Murillo, 2003).

En la Tabla 2 aparecen cambios significativos en los humedales estudiados desde 1956 hasta 1987. En conjunto la superficie total de lagunas ha disminuido en 1301.5 ha (61.7%). Aunque lo que más destaca es la reducción de las lagunas turbosas en un 88.2% de la superficie que ocupaban en 1956. También los arroyos atlánticos se han reducido en 13.4 km (51.7% de su longitud en 1956). Las lagunas temporales no han tenido grandes cambios ni en superficie ni en número de polígonos. Por el contrario, el aumento más significativo se da en el matorral higrofitico de *Erica scoparia* y *Ulex Australis* (denominado localmente Monte Negro; Ramírez Díaz *et al.*, 1977), que se ha incrementado en 753.4 ha respecto a 1956.

Si comparamos el incremento del número de polígonos de Monte Negro Higrofitico (143) se puede apreciar que es similar al número de polígonos que han desaparecido de lagunas turbosas (148). Para establecer más claramente si existe alguna relación entre ambos procesos se puede comparar la cartografía de estos cambios durante el período de estudio, como se puede ver en la Figura 2:

La Figura 2 pone en evidencia que los polígonos que desaparecen de lagunas turbosas se corresponden con área en las que el Monte Negro se ha expandido. Este cambio indica un gradual proceso de desecación o de aridización de la mayor parte de las turberas de *Erica ciliaris* y *Ulex minor*. Estas turberas pasan a ser ocupadas por un matorral higrofitico (dominado por *Erica scoparia* y *Ulex Australis*), que soporta mejor la estacionalidad del encharcamiento (Ramírez Díaz *et al.*, 1977;

Sousa y García-Murillo, 2003). Puesto que estas lagunas turbosas tienen una alimentación hipogea este cambio supone una profunda alteración en la disponibilidad hídrica, a nivel edáfico, y una bajada de los niveles isopiezométricos.

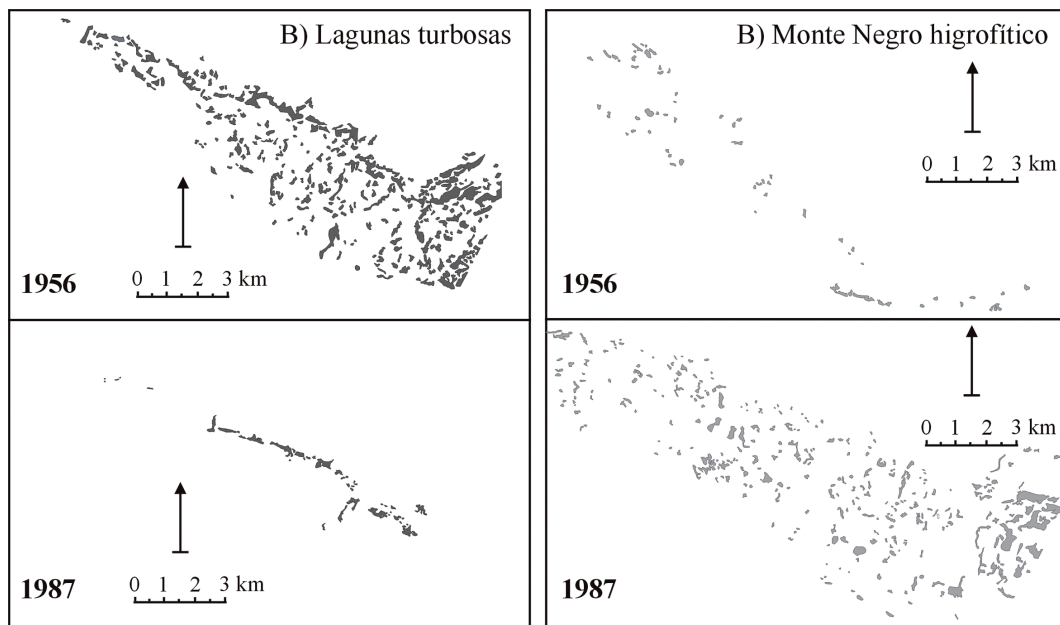


FIG. 2: Cambios en la distribución de las lagunas turbosas y del incremento del Monte Negro higrofitico entre 1956 y 1987 en el área de estudio.

4.2. Cambios en los usos del suelo entre 1956 y 1987

En 1941 se declara el Interés Nacional de la repoblación forestal de los terrenos situados en la Comarca Forestal del Sureste de Huelva (Espina y Estévez, 1993), donde se incluye la zona de estudio. Esto conduce a un ambicioso proceso de reforestación con especies de crecimiento rápido (*Pinus pinea*, *Eucalyptus camaldulensis* y *Eucalyptus globulus*, fundamentalmente; Sousa y García-Murillo, 2003). Además cerca del 10 % del territorio (2468.2 ha) fue puesto bajo cultivos de regadío. En particular la zona que ocupaban originalmente las lagunas turbosas fue sustituida progresivamente por monocultivos de eucaliptos.

Como se puede apreciar claramente en las fotografías del vuelo de 1956, durante las primeras décadas este proceso de reforestación implica la eliminación de casi toda la cobertura vegetal. Esto supone que durante un cierto período (que varía según la zona concreta del área de estudio), el suelo arenoso está primero totalmente desnudo, y posteriormente ocupado sólo por las pequeñas plántulas de las especies forestales. Esta implantación supone también una relativa suavización del relieve (especialmente de algunas de las paleodunas existentes). La Figura 3 recoge este incremento de la superficie dedicada a los cultivos forestales, y en ella se puede apreciar que conlleva también un aumento de la población local. Esta población se distribuía sobre todo en los pequeños poblados forestales que se generaron durante estas décadas y que acabarían por desaparecer a finales del S. XX.

Como señalan los estudios hidrogeológicos (Trick y Custodio, 2004; Custodio *et al.*, 2009) la alta evaporación de los monocultivos de eucaliptos supuso una disminución de la altura del nivel freático. Sin embargo, como se ha comentado en la introducción de este trabajo, en el pasado los cambios climáticos han influido también sobre la distribución y superficie ocupada por estos humedales. Por otro lado tampoco parece suficiente estos impactos antropogénicos para justificar

por sí solos la reducción en la longitud de los arroyos atlánticos (Sousa *et al.*, 2010b). Por todo ello nos planteamos analizar otros posibles factores que hayan intervenido también en estos cambios.

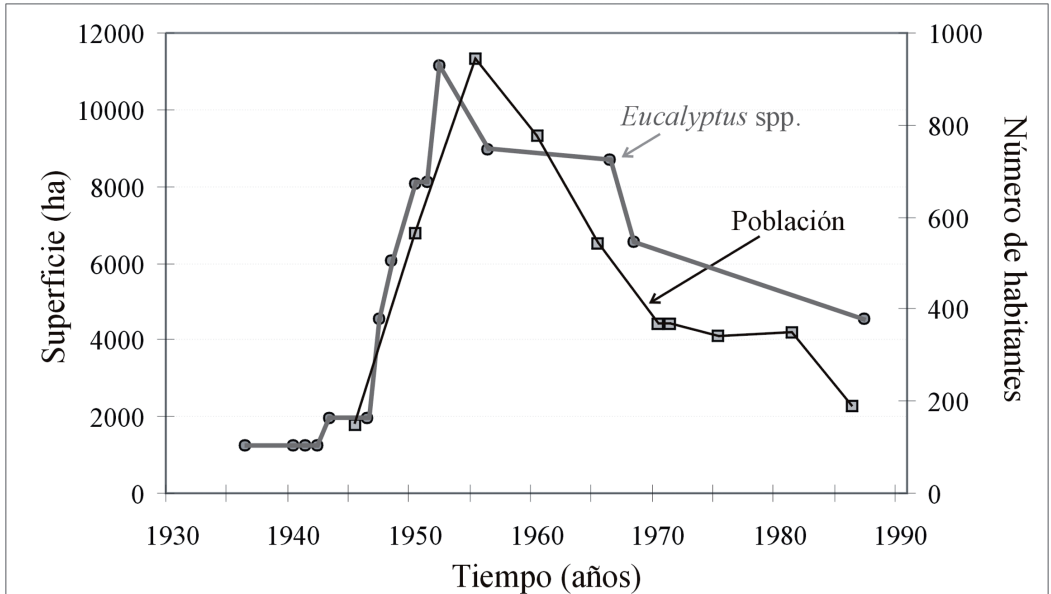


FIG. 3: Evolución de la superficie ocupada por los monocultivos de eucaliptos y el número de habitantes en la zona de estudio.

4.3. Cambios en las variables climáticas. Disparidad y erosividad de la precipitación

En la Figura 4 se representa la evolución del Índice Específico de Disparidad y del Índice acumulado de erosividad potencial durante el período 1890-2000. En ella se marca también el período de mayor actividad forestal de acuerdo a los resultados de la Figura 3.

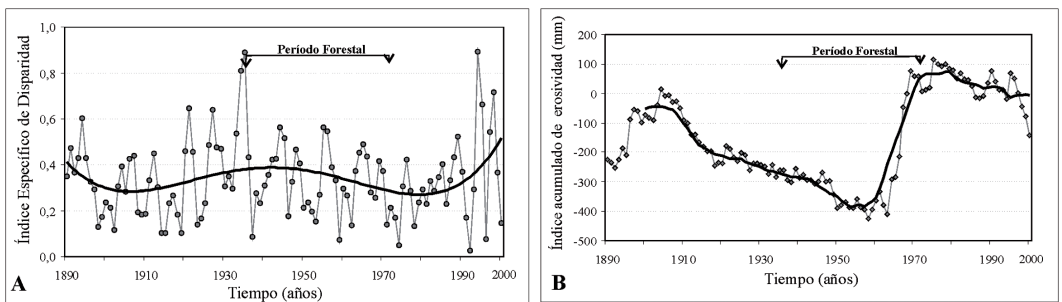


FIG. 4: Evolución del Índice Específico de Disparidad y del Índice acumulado de erosividad de la precipitación en el observatorio de San Fernando en el periodo 1890-2000.

La Figura 4a muestra un suave incremento de la disparidad entre los años 30 y 60 del S. XX (con un pico máximo en 1935), y sobre todo destaca el incremento en el último tercio del S. XX. Como señalan estudios previos (Sousa *et al.*, 2010b) este incremento de la disparidad, junto con el incremento térmico, pueden ayudar a comprender porqué, una vez cesada la reforestación, el talweg de los arroyos sigue retrocediendo. Por otro lado es necesario destacar que el incremento de la disparidad, después del primer tercio del S. XX, coincide con el inicio de la actividad forestal.

La Figura 4b representa la evolución del índice acumulado de erosividad potencial de la precipitación para el período 1890-2000. Los tramos ascendentes continuados indican períodos de alta erosividad de la precipitación, en cambios los tramos descendentes continuados indican períodos de baja erosividad. En esta figura se pueden reconocer dos períodos de mayor erosividad: aproximadamente 1893-1904 y 1958-1969. Este segundo período coincide parcialmente con la reforestación de especies de crecimiento rápido en la zona de estudio.

5. DISCUSIÓN

Entre 1956 y 1987 ha tenido lugar una desecación generalizada en los humedales del Parque Natural de Doñana. Esto ha supuesto que, desde 1956, se ha desecado el 88.2% de la superficie ocupada por las lagunas turbosas (tasa media anual de retroceso de 43.6 ha/año) y el 51.7% de la longitud ocupada por los arroyos atlánticos (tasa media anual de retroceso 432.2 m/año). El principal factor que ha conducido este proceso ha sido la bajada de los niveles isopiezométricos durante el período de estudio. Esta disminución está ligada a la implantación de extensos monocultivos de especies de crecimiento rápido y, en algunas áreas, regadíos.

Sin embargo este impacto antropogénico no parece suficiente para explicar por sí solo estas elevadas tasas de retroceso de las lagunas turbosas y de los arroyos atlánticos. Paralelamente al cambio en los usos del suelo hay, además de un incremento térmico, un incremento de la disparidad (en los primeros años de reforestación), y sobre todo en la erosividad de la precipitación (ver Figura 4). Estos cambios en las tendencias de la precipitación coinciden, en gran medida, con el desmonte de la cubierta vegetal y por tanto cuando el suelo está más desprotegido. Así los efectos erosivos y de sedimentación, derivados de los impactos antropogénicos, se han visto intensificados por los impactos de una mayor agresividad en el régimen de precipitación. Por tanto el solapamiento de ambos tipos de impactos supone un efecto sinérgico, que explica las elevadas tasas de desecación.

La intensidad de los impactos derivados de los cambios en los usos del suelo dificulta y enmascara los efectos más sutiles derivados de los cambios en las tendencias climáticas en el área de estudio. De ahí la dificultad de separar los impactos climáticos y antropogénicos que señalan algunos autores. Por ello, para mejorar las estimaciones sobre los futuros impactos sobre los sistemas biológicos es necesario profundizar en la investigación de los factores antrópicos que pueden intensificar los impactos del cambio climático (Parmesan *et al.*, 2011). En el caso de los humedales andaluces se considera que la mayor parte de los efectos esperados del cambio climático no serán sino una intensificación de las pautas ya existentes debidas a los impactos humanos, no directamente asociados al cambio climático (Álvarez-Cobelas, 2007).

Los resultados de este estudio deberán ser ampliados a otras áreas de clima mediterráneo y a períodos de tiempo pluriseculares. Esto seguramente permitirá conocer mejor las sinergias entre los impactos del cambio climático y los de origen antrópico. En este sentido Grove (2001), estudiando los efectos de la Pequeña Edad del Hielo en la Europa mediterránea, afirma que las mismas condiciones climáticas que indujeron el avance de glaciares durante la Pequeña Edad del Hielo, fueron también responsables de un incremento de la frecuencia de las inundaciones y en la sedimentación. Todo ello es consistente con estudios realizados en los humedales de Doñana y su entorno para finales del S. XIX (Sousa *et al.*, 2009, 2010a) y también con los resultados de Diodato *et al.* (2011) para el mediterráneo occidental y central. Al respecto, estos últimos autores, han detectado una frecuencia cada vez mayor de las lluvias extremas en intervalos de tiempo más cortos, acompañados por largos períodos de sequía. Esto puede representar una combinación potencialmente peligrosa para la erosión del suelo y los impactos que de ella se puedan derivar.

Agradecimientos

Este estudio ha sido financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia a través del proyecto CGL2009-10683 y parcialmente por el proyecto 158-2010 (Organismo Autónomo Parques Nacionales).

REFERENCIAS

- Almarza, C., López, J.A. y Flores C. (1996). *Homogeneidad y variabilidad de los registros históricos de precipitación en España*. Instituto Nacional de Meteorología, Madrid.
- Álvarez-Cobelas, M., Cirujano, S. y Sánchez-Carrillo, S. (2001). "Hydrological and botanical man-made changes in the Spanish wetland of Las Tablas de Daimiel". *Biological Conservation*, 97, pp. 89-98.
- Álvarez-Cobelas, M. (2007). Cambios climáticos y ecosistemas acuáticos continentales en Andalucía. En: Sousa A, García-Barrón L. y Jurado V. (Coords.). *El Cambio Climático en Andalucía: evolución y consecuencias medioambientales*. Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía, pp. 143-152.
- Arnoldus, H.M.J. (1980). An approximation of the rainfall factor in the universal soil loss equation. En: De Boodt, M. y Gabriels, D. (Eds.). *Assessment of Erosion*. Wiley, pp. 127-132.
- Custodio, E., Manzano, M. y Montes, C. (2009). *Las aguas subterráneas en Doñana: aspectos ecológicos y sociales*. Agencia Andaluza del Agua, Sevilla.
- Diodato, N., Bellocchi, G., Romano, N., y Chirico, G.B. (2011). "How the aggressiveness of rainfalls in the Mediterranean lands is enhanced by climate change". *Climatic Change*, 108, pp. 591-599.
- Espina, J. y Estévez, A. (1992). Programa de recuperación del Patrimonio del P. N. Doñana, Vol. III Abalario. Instituto nacional de Empleo, Sevilla.
- Espina, J. y Estévez, A. (1993). El espacio de repoblación forestal de Cabezudos-Abalario. En: Granados, M. y Ojeda, J.F. (Eds.). *Intervenciones Públicas en el Litoral Atlántico andaluz. Efectos territoriales*. Agencia de Medio Ambiente, pp. 95-107.
- García Barrón, L. (2002). "Un modèle pour l'analyse de la sécheresse dans les climats méditerranéens". *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, 14, pp. 67-73.
- García-Barrón, L. y Pita, M.F. (2004). "Stochastic analysis of time series of temperature in the south-west of the Iberian Peninsula". *Atmosfera*, 17, pp. 225-244.
- García-Barrón, L.; Aguilar, M. y Sousa, A. (2011). "Evolution of annual rainfall irregularity in the southwest of the Iberian Peninsula". *Theoretical and Applied Climatology*, 103, pp. 13-26.
- Granados, M., Martín, A. y García Novo, F. (1988). "Long-term vegetation changes on the stabilized dunes of Doñana National Park (SW Spain)". *Vegetatio*, 75, pp. 73-80.
- Grove, A.T. (2001). "The "Little Ice Age" and its geomorphological consequences in Mediterranean Europe". *Climatic Change*, 48, pp. 121-136.
- Merino, J., Martín, A., Granados, M., y Merino, O. (1990). "Desertification of coastal sands of south-west Spain". *Agriculture Ecosystems & Environment* 33, pp. 171-180.
- Parmesan, C., Duarte, C., Poloczanska, E., Richarsson, A.J. y Singer, M.C. (2011). "Overstretching attribution". *Nature Climate Change* 1, pp. 2-4.
- Ramírez Díaz, L., García Novo, F., Merino, J. y González Bernáldez, F. (1977). Sistemas de dunas y arenas estabilizadas de la reserva Biológica de Doñana. En: García Novo, F. Merino, J., Ramírez Díaz, L., Ródenas, M., Sancho Royo, F., Torres, A., González Bernáldez, F., Díaz Pineda, F., Allier, C., Bresset, V. y Lacoste, A. (Eds.). *Doñana. Prospección e inventario de Ecosistemas*. Instituto Nacional para la Conservación de la Naturaleza, pp. 159-193.
- Rodrigo, F.S.; Esteban-Parra, M.J.; Pozo-Vázquez, D. y Castro-Díez, Y. (1999). "A 500 year precipitation record in Southern Spain". *International Journal of Climatology*, 19, pp. 1233-1253.
- Sousa, A. y García-Murillo, P. (2003). "Changes in the Wetlands of Andalusia (Doñana Natural Park, SW Spain) at the end of the Little Ice Age". *Climatic Change*, 58, pp. 193-217.
- Sousa, A., García-Murillo, P., Morales, J. y García-Barrón, L. (2009). "Anthropogenic and natural effects on the coastal lagoons in the southwest of Spain (Doñana National Park)". *ICES Journal of Marine Science* 66, pp. 1508-1514.
- Sousa, A.; García-Murillo, P.; Sahin, S.; Morales, J. y García-Barrón, L. (2010a). "Wetland place names as indicators of manifestations of recent climate change in SW Spain (Doñana Natural Park)". *Climatic Change* 100, pp. 525-557.
- Sousa, A., Morales, J., García-Murillo, P. y García-Barrón, L. (2010b). Los arroyos costeros del SW de España (Manto Eólico Litoral Onubense) como indicadores de cambios en las tendencias de precipitación. En: Fernández García, F., Galán, E. y Cañada, R. (Eds.). *Clima, Ciudad y Ecosistemas*. Asociación Española de Climatología, pp. 283-293.
- Trick, T. y Custodio, E. (2004). "Hydrodynamic characteristics of the western Doñana Region (area of El Abalario), Huelva, Spain". *Hydrogeology Journal* 12, pp. 321-335.

