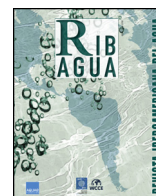




RIBAGUA

www.elsevier.es/ribagua



Jornadas de Puertos y Costas 2015

El sistema dunar de Valdevaqueros: evolución histórica y alternativas de gestión

F.J. Bello-Millán^{a,*}, M. Somoano^b, M. Clavero^a, G. Gómez-Pina^c y M.A. Losada^a^a Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales (GDFA), Instituto Interuniversitario de Investigación del Sistema Tierra en Andalucía, Granada, España^b Departament d'Enginyeria Mecànica, Universitat Rovira i Virgili (URV), Tarragona, España^c Demarcación de Costas en Andalucía-Atlántico, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, Cádiz, España

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Historia del artículo:

Recibido el 11 de enero de 2016

Aceptado el 6 de julio de 2016

On-line el 8 de agosto de 2016

Palabras clave:

Duna de Valdevaqueros

Gestión integral de zonas costeras

Transporte de sedimentos

Morfodinámica costera

Evolución del sistema dunar

R E S U M E N

La duna de Valdevaqueros, situada al sur de España, presenta elevadas tasas de migración asociadas a los fuertes vientos de levante que soplan en el estrecho de Gibraltar. Ubicada en una zona de elevada presión humana, su dinámica ha entrado en conflicto con los usos del suelo, provocando una notable repercusión desde los puntos de vista científico y técnico, pero también desde una perspectiva mediática y social. Este trabajo se centra en el análisis de la evolución histórica del sistema dunar desde principios del siglo xx mediante el estudio del material cartográfico y fotográfico disponible, analizando los diferentes estadios que se han sucedido, los mecanismos y agentes naturales que gobiernan su comportamiento, así como las repercusiones derivadas de las diferentes actuaciones en la zona. La intervención sobre el corredor dunar iniciada a principios de 1940 ha condicionado los procesos y la evolución de toda la unidad fisiográfica. La morfodinámica dunar actual se explica por el balance neto de sedimentos. El sistema recibe arena disponible en la zona sumergida transportada por el oleaje de poniente que se acumula en la playa y ensancha la playa seca. El viento de levante erosiona el sedimento en la playa seca y lo transporta hacia la duna. Se estima que en los últimos 50 años la playa seca (*fetch*) ha crecido, en promedio, más de 150 m, y que el sistema almacena arena suficiente para mantener estos mecanismos de transporte durante las próximas décadas. A partir de estos resultados, se plantean y analizan diferentes vías de actuación para la gestión integral de la zona.

© 2016 IAHR y WCCE. Publicado por Elsevier España, S.L.U. Este es un artículo Open Access bajo la licencia CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Valdevaqueros dune system: Historical evolution and alternatives for management

A B S T R A C T

Valdevaqueros dune, in the south of Spain, exhibits high migration rates associated with strong easterly winds in the Strait of Gibraltar. The system is located in an area of high human pressure and its dynamic has collided with land use causing a significant impact from scientific and technical points of view but also from a media and social perspective. This paper focuses on the historical evolution of the dune system since the beginning of the 20th century by studying the available cartographic and photographic material, analyzing the different phases, the mechanisms and natural agents governing the dune behaviour and the implications arising from the activities in the area. The intervention on the dune corridor started in the early 1940s and has conditioned the evolution of all the processes in the physiographic region. The current dune morphodynamics is explained by the sediment budget. The system receives sand from the submerged zone, which is transported by westerly wind waves. This material accumulates and widens the dry beach. The easterly winds erode the sediment in the dry beach and transports it to the dune. In the last fifty years, the dry beach (*fetch*) has grown, on average, over 150 m and the system stores enough sand to sustain these transport mechanisms for decades. From these results, we discuss different alternatives for the integrated management of the area.

© 2016 IAHR y WCCE. Published by Elsevier España, S.L.U. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Keywords:

Valdevaqueros dune

Integrated coastal zone management

Sediment transport

Coastal morphodynamics

Dune system evolution

* Autor para correspondencia.

Correo electrónico: fbellom@ugr.es (F.J. Bello-Millán).

1. Introducción

El sistema dunar de Valdevaqueros se localiza en la ensenada del mismo nombre y forma parte del Parque Natural del Estrecho, en la parte occidental de Tarifa (al sur de España; fig. 1). Con una orientación media NE-SW, el sistema está formado por acumulaciones de arena que migran ladera arriba desde la playa, impulsadas por los intensos vientos de levante [1]. Su frente de avance, casi alineado con la carretera complementaria de la Red Autonómica de Carreteras de Andalucía A-2325, es de unos 700–800 m de longitud; la anchura media del sistema, desde la playa hasta el frente de avance, es de unos 300–400 m. En las zonas de mayor acumulación la altura del frente dunar excede los 10 m sobre la rasante del terreno. La arena es de tamaño medio, con un D_{50} de 0,29 mm y una desviación estándar de 0,05 mm (según datos de la Dirección General de Costas).

Esta duna invade periódicamente la carretera A-2325, único acceso al poblado de Paloma Baja (fig. 2). Por tanto, en aras de mantener el tráfico rodado, resulta necesario realizar labores de conservación y limpieza de manera casi permanente. Durante las últimas décadas las administraciones están gestionando la duna con diversas técnicas, como la construcción de barreras y pantallas, la plantación de especies areníferas o incluso la extracción periódica de material, con la finalidad de controlar la invasión de arena en la carretera. A pesar de los esfuerzos de las administraciones

afectadas por la situación, el desarrollo, el crecimiento y la evolución espacial y temporal del sistema dunar no están bajo control. De hecho, en el año 2004 se produjo el primer alcance, en 2005 quedó afectado un cable telefónico y en 2009 tuvo lugar el primer corte de la carretera. Esta problemática constituye un elemento de importante interés científico y técnico y ha sido objeto de diferentes publicaciones en revistas y congresos [1–8].

El principal objetivo de este trabajo consiste en establecer las bases de la discusión, desde una perspectiva integral, sobre la gestión de la unidad fisiográfica litoral: sistema Valdevaqueros-Los Lances-Tarifa. A partir de fuentes cartográficas y fotográficas, se analiza la evolución del sistema desde principios del siglo pasado, definiendo los mecanismos que gobiernan la dinámica litoral y que nutren de material a la duna. Se consideran asimismo las consecuencias derivadas de las actuaciones sobre la zona, principalmente extracciones de arena y ocupación de suelo con infraestructuras y urbanizaciones. A la luz de la información que se describe, la unidad fisiográfica se encontraba inicialmente en equilibrio hasta que la acción humana desencadenó su desestabilización. Puesto que el sistema cuenta con material suficiente, los procesos actuales se mantendrán en el tiempo si no se toman medidas correctoras.

Este documento se estructura como se describe a continuación. En el apartado 2 se estudia la evolución de la morfodinámica litoral y del sistema dunar mediante el análisis de mapas topográficos y fotografías aéreas. El apartado 3 se destina a la discusión de las



Figura 1. Situación de la duna de Valdevaqueros (a partir de Navarro et al. [1]).



Figura 2. Carretera A-2325 el 7 de diciembre de 2012. El pavimento de la vía se encuentra cubierto de arena procedente de la duna, que ha sepultado señales de tráfico y vegetación arbórea.

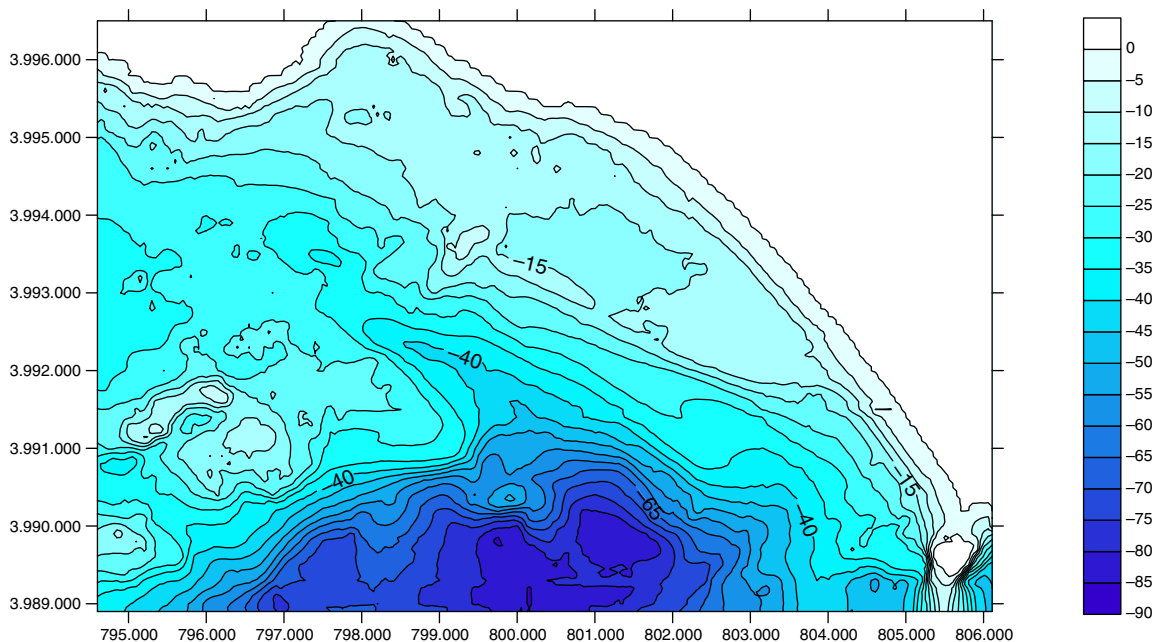


Figura 3. Batimetría de la zona.

implicaciones morfológicas más importantes que se derivan de la dinámica litoral, así como de su gestión histórica, y se analizan posibles vías de actuación.

2. Evolución de la morfodinámica litoral

La batimetría disponible (fig. 3) sugiere que los 2 ríos principales, del Valle (Valdevaqueros) y de la Jara (Los Lances), se unían antes de descargar por el valle sumergido hasta alcanzar profundidades cercanas a los 100 m, en donde debían de encontrarse con el mar. En [9] se llevó a cabo una campaña batimétrica y geofísica, así como el correspondiente análisis de las muestras granulométricas tomadas, que evidencian que el antiguo valle fluvial y actual plataforma continental interior está colmada de sedimentos del mismo origen. Alcanzado el equilibrio climático hace unos 6.000 años, los procesos litorales y la evolución de la costa han estado condicionados por el volumen de sedimentos disponibles en la plataforma continental y los que pudieran transportar los estados de oleaje dominantes del oeste y las descargas de los ríos del Valle y de la Jara.

Los mapas topográficos Tarifa hoja 1077 de 1917 y 1955 del Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía son el punto de partida para la descripción morfológica de la unidad fisiográfica y de la evolución del sistema dunar y las playas de Valdevaqueros, Los Lances y Tarifa. Entre ambas ediciones se producen el asentamiento militar en las faldas del Cerro de San Bartolomé, la Segunda Guerra Mundial y la construcción de trincheras de arena en el borde litoral, es decir, la primera intervención humana a gran escala conocida en la duna de Valdevaqueros. El siguiente hito temporal se sitúa en 1988, cuando se aprueba la Ley 22/1988 de Costas y se establece, entre otros aspectos, la prohibición de las extracciones de arena por particulares y la gestión del sistema pasa a ser competencia de la Dirección General de Costas.

2.1. El mapa topográfico de 1917

En el mapa de 1917 (fig. 4) se puede identificar la ubicación y la extensión del camino que bordea la costa entre Zahara y las Palomas (1), las dunas de Valdevaqueros y Bolonia (2), la desembocadura del río del Valle y sus riberas (3), el arenal occidental entre la punta de la Macotilla y el río del Valle, y el oriental entre este y el arroyo de

la Candila (4), la costa acantilada a un lado y otro de la punta de la Peña (5), la playa de los Lances cortada por las desembocaduras de los ríos de la Jara y de la Vega (6), el perímetro dunar en regresión (7) y la playa de Tarifa (8), de pequeña extensión, apoyada en el espigón de acceso a la isla de Tarifa.

La alineación de los 2 arenales a un lado y otro del río del Valle forma un ángulo de unos 110° aproximadamente, indicando qué dirección del oleaje domina la morfología local: el oleaje de levante en la ribera oeste y el oleaje de poniente en la ribera este. El río desemboca entre 2 riberas de arena que tienen aproximadamente la misma alineación. Desde la línea de playa hasta la ubicación de los molinos harineros hay unos 900 m de un canal convergente típico de un estuario dominado por el flujo mareal con una anchura en la desembocadura de alrededor de 125 m. Si se adopta un valor de 2,5 m de carrera de marea, el prisma de marea del estuario debía ser en aquel entonces de entre $300.000\text{--}500.000\text{ m}^3$, volumen insuficiente para mantener expedito el canal de descarga que, posiblemente, se pudiera vadear en bajamar.

La alineación del corredor dunar coincide aproximadamente con la dirección del viento dominante de levante, y su anchura es aproximadamente igual a la anchura de la playa entre la desembocadura del río del Valle y la punta de la Macotilla, siguiendo la línea de máxima pendiente de la ladera, que cruza los caminos de Zahara a las Palomas y Tarifa y de aquellas a Belín. En planta, este sistema ocupa una superficie aproximada de $3 \cdot 10^6\text{ m}^2$. La altura del campo no debía de ser uniforme y su valor no es fácil de precisar. Si los caminos identificados en el mapa eran transitables y se tiene en cuenta que no hay casas de labor ni poblados en el corredor de dunas, se puede argüir que la altura de las dunas debía de ser suficientemente baja para no bloquear los caminos (o, en todo caso, ser moderadamente trabajoso retirar parte de la arena para recuperar su funcionalidad), pero lo suficientemente alta para llegar a enterrar un poblado o una vivienda que se asentase en él. Tomando como una primera estimación de la altura media de la duna 2-4 m entre el camino de la costa y el camino de las Palomas a Belín (zona ocupada posteriormente por el campamento militar), se podrían haber almacenado en el corredor entre $3\text{--}5 \cdot 10^6\text{ m}^3$ de arena. En la zona comprendida desde el camino a la costa, la cantidad de arena acumulada debió de ser del mismo orden de magnitud o superior. En definitiva, en 1917 el sistema dunar debía de tener acumulados

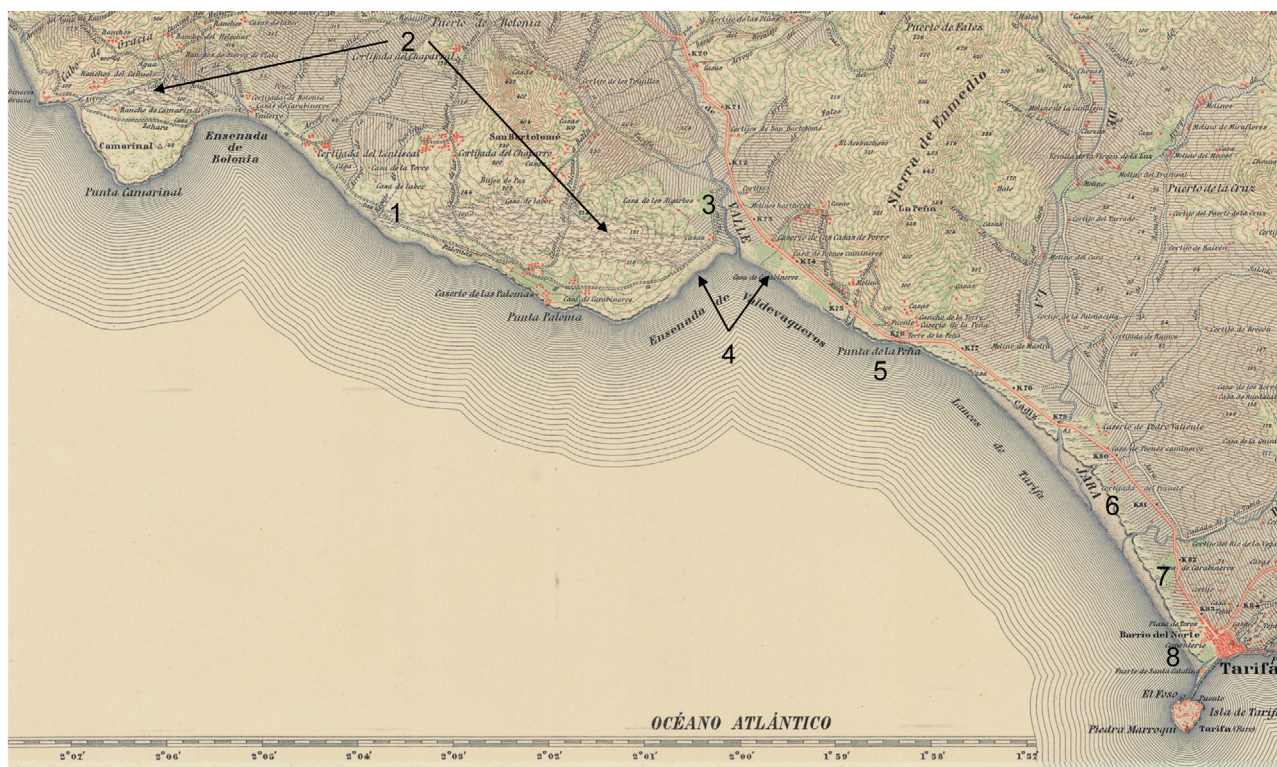


Figura 4. Mapa topográfico de 1917. Los elementos descritos en el texto se referencian en el mapa mediante la numeración correspondiente.

de costa a costa entre $6\text{-}10\text{-}10^6\text{ m}^3$ de arena, que entraron por la playa entre la desembocadura del río del Valle y la punta de la Macotilla.

Si se admite que este sistema se ha estado alimentando desde la estabilización climática (con nivel medio del mar constante y clima análogo al actual con oscilaciones milenarias), hace unos 6.000 años aproximadamente, la tasa media de transporte de arena a la entrada del sistema dunar (la playa) necesaria para movilizar dicho volumen de arena debe ser de $1.000\text{ m}^3/\text{año}$, es decir, de $1\text{ m}^3/\text{año}$ por cada metro lineal de frente de playa. Si el número de milenios que se necesitaron para generar el corredor dunar fue menor, por ejemplo 2.000 o 3.000 años, la tasa de transporte requerida aumenta a $3\text{-}6\text{ m}^3/\text{año}$ por metro lineal de frente de playa. En cualquier caso, estos valores son inferiores en un orden de magnitud a las tasas actuales de extracción de arena en el frente dunar a la altura de la carretera (apartado 2.4) y, por tanto, inferiores a la tasa actual del flujo de sedimentos al pie de la duna. La causa principal de esta diferencia hay que buscarla en: a) las dimensiones de la superficie activa de la playa a la acción del viento, y b) el nivel de saturación del transporte de sedimentos, que depende, además, de la distancia recorrida por la acción del viento (*fetch*), del grado de humedad de la arena (zona de marea), de la capacidad del suelo de armarse y de la pendiente del sistema playa y duna.

2.2. El mapa topográfico de 1955

El mapa topográfico de 1955 (fig. 5) presenta algunas diferencias significativas con respecto al de 1917, entre las que cabe destacar las siguientes:

a) No se identifica el corredor dunar, aunque entre Paloma Alta y Paloma Baja se identifica la zona de arenales. La topografía de la zona es irregular y hay algunas correcciones en la altitud de los cerros y otras cotas.

- El camino entre la carretera de Cádiz a Gibraltar y Paloma Baja se indica como asfaltado, cruzando pequeños regatos que drenan la ladera.
- La Macotilla emerge en el mar como un cabo y una zona de acantilado rocoso en el que se apoya la playa.
- La forma en planta de la playa, antes rectilínea con pequeñas ondulaciones, ahora es parabólica. Su encuentro con la desembocadura del río del Valle forma un puntal-barrera ubicado unos 100 m hacia el mar con respecto a la posición de la playa-barrera de 1917. Entre los 2 puntales (1917 y 1955) descarga un regato.
- En la margen izquierda se ha formado una punta de arena que sobrepasa el puntal-barrera, estrecha el cauce y da apoyo suficiente para que haya un incremento significativo de la anchura de la playa hasta el arroyo de la Candila, protegiendo el pie del acantilado-duna.
- La playa de los Lances en su zona central ha aumentado. Los 3 ríos (Jara, Salado y de la Vega) juntan su potencial de descarga para poder cruzar la playa. A un lado y otro del punto de descarga se han formado 2 cordones-barrera.
- No se observan cambios significativos en la anchura de la playa al este de la punta de la Peña ni en la playa de Tarifa.

2.3. El periodo 1956-1988

Las fotografías de 1956 y 1974 (fig. 6) ratifican lo observado en el mapa topográfico de 1955, en particular la ausencia de arena en el corredor dunar, el cambio de la forma en planta de la playa en el entorno de la desembocadura, la unión de la playa de la Macotilla con la playa de Valdevaqueros, con un incremento muy notable de su anchura, y el cierre de la descarga del río del Valle y el acceso de la marea astronómica. La conexión de las playas que cierra el cauce del río del Valle no aparece recogida en el mapa de 1955. Por causas naturales o de la mano del hombre, se cambió la forma en planta y la ubicación de la playa y se hizo accesible la arena del corredor a las dinámicas del oleaje y del viento. De esta forma se implementaron

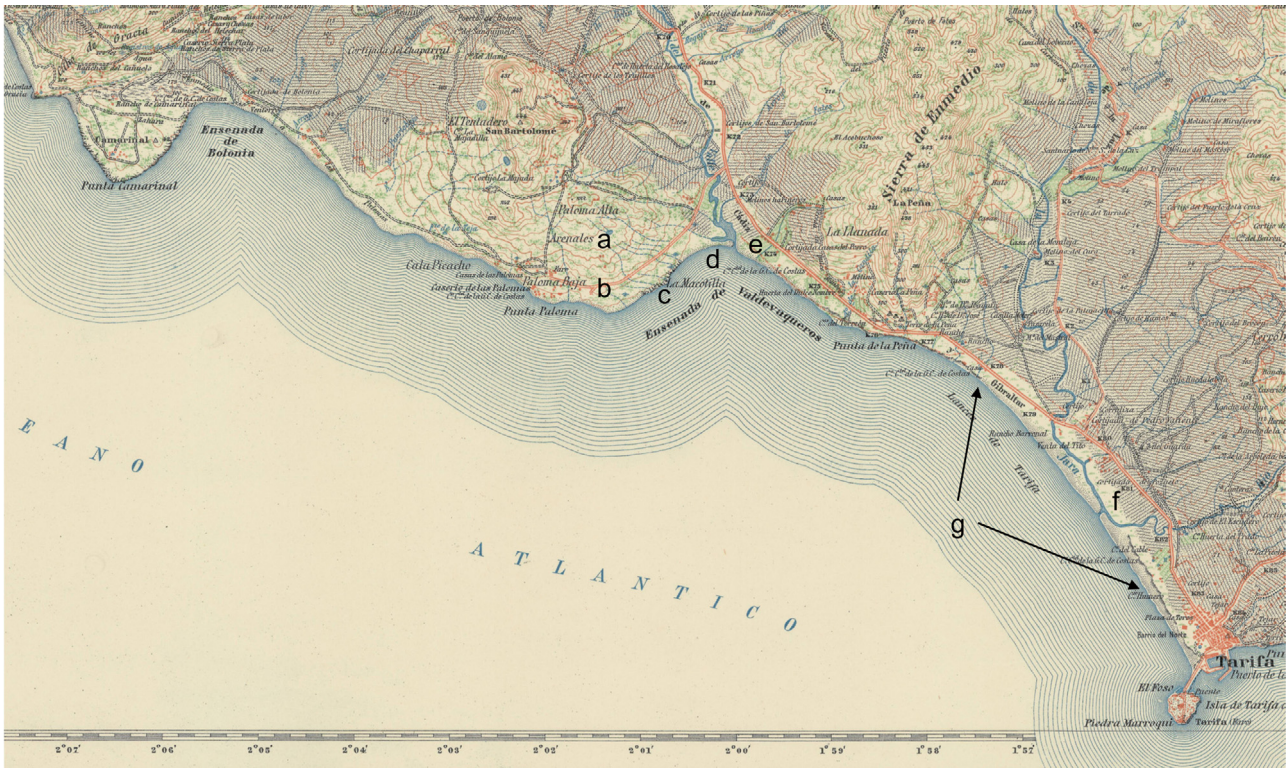


Figura 5. Mapa topográfico de 1955. Las apreciaciones descritas en el texto se incluyen en el mapa mediante la numeración correspondiente.

las condiciones necesarias y suficientes para iniciar los procesos litorales y la evolución de costas que sustentan la dinámica actual de la playa y las dunas de la unidad fisiográfica Valdevaqueros-Los Lances-Tarifa.

La fotografía de la figura 7 está tomada en 1987. El sistema dunar se extiende a lo largo de la línea de costa, entre la desembocadura del río del Valle y el acantilado de punta Paloma, en 2 frentes interrumpidos por la punta de la Macotilla. Aproximadamente $0,75-1,2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ de arena están almacenados en él (en torno a $1.000-1.500 \text{ m}^3/\text{m}$ lineal de duna). En la playa se identifica la línea de pleamar, que alcanza el pie del sistema dunar por un pequeño escarpe de su erosión. A sotavento del sistema dunar se observa el pinar de repoblación, establecido para tratar de controlar el avance de las arenas.

A barlomar del puntal-barrera surgido en la década de los cincuenta del siglo pasado, a unos 60-80 m de distancia, hay otro cordón que, con forma en planta parabólica, cierra la desembocadura del río. Este cordón está unido solidariamente a la playa

de Valdevaqueros formando una playa continua, tanto en su parte sumergida como en su playa seca y la incipiente zona dunar. En estas condiciones, la rotura de las olas de los estados de oleaje de poniente y levante genera un sistema circulatorio en la zona de rompientes, con potencial para transportar sedimentos, paralela y transversalmente a la costa. Merced a la disponibilidad de arena y a la capacidad de erosionar y transportar del sistema circulatorio marítimo (y posiblemente con la colaboración del vertido directo al mar durante la gestión de la duna), a finales de la década de los ochenta del siglo pasado la línea de costa avanza hacia el mar con respecto a su posición en 1955, unos 80-100 m en la zona de un aparcamiento construido sobre el puntal-barrera y unos 40-60 m en el entorno del arroyo de la Candila, en las proximidades de la punta de la Peña. Los estados de oleaje de poniente tienen mayor altura y periodo que los estados de oleaje de levante, generados por el viento regional o local. La oblicuidad de estos es mayor que la de aquellos, pero la anchura de la zona de rompientes es menor con el oleaje de levante. Por otra parte, la acumulación de sedimentos en

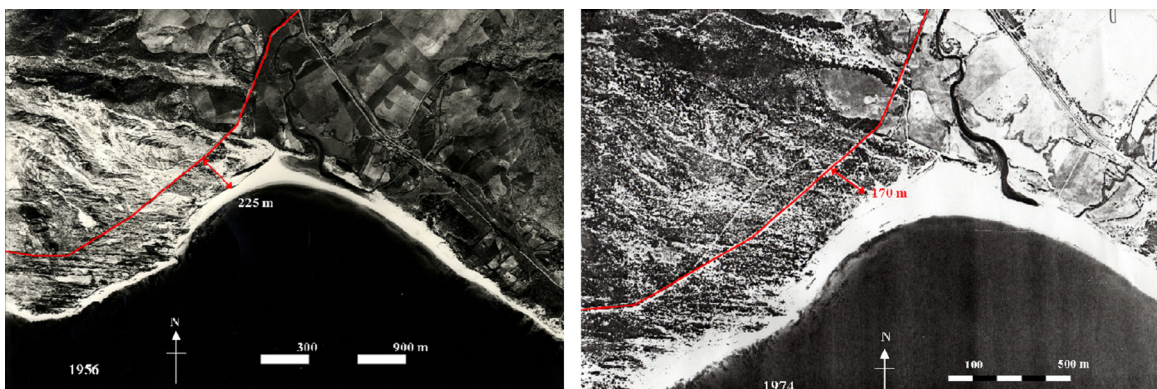


Figura 6. Ortofotografías de 1956 (izquierda) y 1974 (derecha). En rojo se marca la carretera A-2325 y la distancia de la misma al frente de avance de la duna [7].



Figura 7. Duna de Valdevaqueros en 1987.

la playa está controlada por las olas de peralte pequeño, mientras que la erosión se activa con las olas de mayor peralte, reforzada por la contribución de las ondas vinculadas de largo periodo (*surf beat*). La magnitud y la profundidad activa de la erosión y de la acumulación de los estados de oleaje de poniente dominan significativamente sobre las de los estados de levante. La resultante neta, año a año, de ambos procesos solo depende de su frecuencia de presentación relativa. El crecimiento de la playa de Valdevaqueros hasta la punta de la Peña es un buen indicador de que el oleaje de poniente, a escala de década, determina el saldo neto de transporte longitudinal de sedimentos en esta subunidad fisiográfica.

La capacidad de movilizar y transportar sedimento de los vientos del este y del oeste que soplan sobre la playa seca del nuevo sistema litoral se incrementó significativamente por el aumento de la superficie transversal de exposición, su longitud y horizontalidad, y por las condiciones de humedad y ausencia de vegetación u obstáculos para satisfacer las condiciones de flujo saturado de sedimento, es decir, minimizando los efectos desfavorables en el *fetch*. La nueva orientación de la playa coincide sensiblemente con el sentido de acción del viento de levante, pero es oblicua al sentido de acción del viento de poniente. A igualdad de velocidad, el primero es más eficiente transportando sedimentos que el segundo. La necesidad de extraer a lo largo de 2 décadas un promedio anual de casi 35.000 m³ de arena (apartado 2.4) para controlar el avance del sistema dunar es un buen indicador de que el transporte de sedimentos en el sistema por la acción del agente viento está dominado, a escala de década, por el viento de levante.

La sierra de Enmedio y su prolongación en el mar separa la ensenada de Valdevaqueros de la playa de los Lances. Al este, apoyada en la Peña de Enmedio y al abrigo de roquedos y bajíos, se formó la playa de los Lances, que posiblemente se inició como un cordón-barrera litoral (oleaje casi perpendicular a la costa) aislando el estuario del río de la Jara de la dinámica marina. Apoyada la playa de Valdevaqueros en la Peña de forma permanente, se conectaron los sistemas de transporte de ambas playas sobre el fondo rocoso tapizado de arena. Desde entonces, a mediados de la década de los setenta del siglo pasado hay un *by-pass* natural de arena, discontinuo en el tiempo y de pequeña magnitud.

2.4. El periodo 1988-2013

El seguimiento y la evolución de la duna en este periodo se pueden observar y caracterizar gracias a la fotografía aérea disponible

Tabla 1
Resumen de extracciones de arena

Año	Total (m ³)
1991	76.700
1994	174.500
1995	12.000
1996	15.000
1999	85.407
2000	156.033
2002	94.787
2003	3.600
2004	7.000
2005	52.031
2006	30.000
2008	24.300
2009	42.500
2010	33.440
2011	46.784
2012	1.000
Total periodo	769.760

Durante el periodo 1991-2012 se movilizaron, en promedio, casi 35.000 m³ de material al año.

Fuente: Demarcación de Costas Andalucía Atlántico.

(fig. 8), y al seguimiento y el control de los volúmenes de arena extraídos (tabla 1). A la entrada en vigor de la Ley de Costas de 1988 la dinámica del sistema Valdevaqueros-Los Lances-Tarifa ya estaba organizada: de un lado, el oleaje de poniente, suministrando el sedimento necesario para mantener en equilibrio (e incluso incrementar su anchura) de la playa La Macotilla-Valdevaqueros, y el viento de levante, erosionando y transportando la arena sobre la playa seca hasta alcanzar la base de la duna y prolongando el transporte ladera arriba; del otro, las descargas del río del Valle retenidas del lado de tierra y el flujo mareal bloqueado del lado del mar por la nueva playa. La anchura de playa seca es suficiente para impedir que un temporal de poniente o una avenida consigan abrir una brecha que permita, al menos durante unas pocas semanas o meses, la circulación de agua entre el mar y el interior del estuario. Tan solo en situaciones excepcionales y de duración limitada el río es capaz de abrirse paso a través de la playa y establecer una discontinuidad en el transporte eólico de sedimento (fig. 9). Cuando esto ocurre, se reduce de manera drástica el suministro de material a la duna, lo que a su vez mengua su crecimiento y avance. Sin embargo, el arenal actúa por lo general como una presa de tierras de un embalse que recibe escasas aportaciones procedentes de la escorrentía, propiciando una superficie de arena de extensión considerable y exenta de obstáculos a la acción del viento de levante. En las 3 últimas décadas ha continuado la alteración de la ensenada de Valdevaqueros iniciada con la limpieza del corredor dunar y el apilamiento en 2 amplios frentes dunares junto al perímetro costero.

2.5. El sistema al este de la playa de Valdevaqueros

La continuidad del transporte de sedimentos en la Peña de Enmedio tiene efectos relevantes en la morfodinámica de la playa Los Lances-Tarifa. Durante siglos, el transporte longitudinal de sedimentos entre la playa de los Lances y Tarifa estuvo controlado por las descargas fluviales y el flujo mareal. En la actualidad este mecanismo de control actúa con cierta regularidad solo en los años de alta pluviometría. En estas condiciones, la tendencia del sistema en los próximos años es: a) cambiar su orientación; b) aumentar la sedimentación sobre el roquedal de la isla de Tarifa, eventualmente rodeando la isla y afectando al canal de navegación del puerto; c) incrementar las aportaciones de arena al sistema dunar en Tarifa; d) taponar de forma permanente las descargas fluviales, potenciando la pérdida de calidad del agua y afectando a los ecosistemas acuáticos, y e) el retroceso intermitente del arranque de la

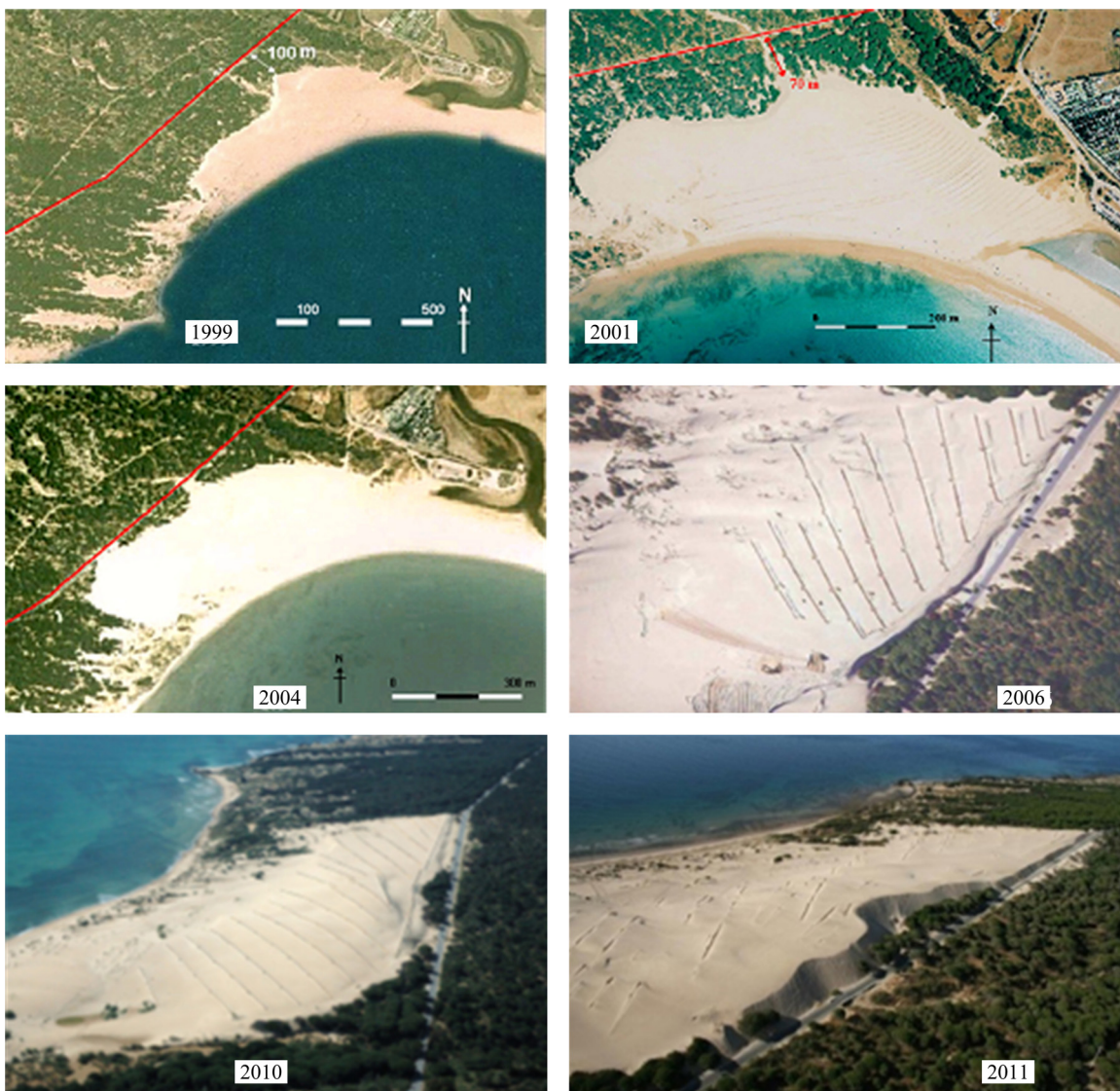


Figura 8. Secuencia de fotografías de la duna de Valdevaqueros en el periodo 1999-2011. En la imagen relativa a 1999 (arriba a la izquierda) se aprecia el aparcamiento construido en la zona del puntal-barrera.



Figura 9. Fotografías de la desembocadura del río del Valle el 9 de marzo de 2014 (izquierda y centro) y el 7 de diciembre de 2012 (derecha).

playa de los Lances junto a la peña de Enmedio. La paradoja es que el *by-pass* intermitente de arena desde la playa de Valdevaqueros, favorecido por el manejo histórico de la duna, reduce la erosión en el arranque de los Lances pero aviva los efectos negativos en el resto del litoral.

3. Morfodinámica del sistema playa-duna: Conclusiones y alternativas de actuación

En el pasado reciente, hace menos de un siglo, los procesos morfodinámicos de la ensenada de Valdevaqueros y la playa de Los

Lances y Tarifa eran independientes y mantenían un balance sedimentario equilibrado a corto y medio plazo. Según se recoge en [10], el Estado Mayor de Franco planeó el sistema defensivo contemporáneo del Campo de Gibraltar previamente al estallido de la Segunda Guerra Mundial. Su construcción, instigada por el temor a una invasión anglo-francesa procedente de Gibraltar, comenzó en mayo de 1939, se desarrolló durante el conflicto y está constituida por más de 500 fortines de hormigón. Entre ellos se encuentran las baterías del litoral al oeste de Tarifa que desencadenaron las modificaciones observadas en el mapa topográfico de 1955 (fig. 5). La alteración profunda y completa del sistema dunar en su ladera este desencadenó una serie de procesos que han producido:

- a) El crecimiento y avance de la duna, con una invasión permanente de la carretera autonómica y del pinar adyacente de difícil y costoso control; y de la playa de Valdevaqueros, tanto en su zona seca como en la sumergida, hasta alcanzar el límite de llenado establecido por su apoyo en la peña de Enmedio.
- b) El *by-pass* de arena entre las playas de Valdevaqueros y los Lances; el cambio de orientación de la playa de Los Lances y Tarifa, con la acumulación de arenas en la playa y la duna de Tarifa y la erosión intermitente en el tramo oeste de la playa de los Lances, al pie de la peña de Enmedio; y la progresión del arenal alrededor de la isla de Tarifa, afectando los ecosistemas del roquedo.
- c) El represamiento de las aguas en la desembocadura del río del Valle, repercutiendo en su calidad y en la sostenibilidad de sus ecosistemas; y el bloqueo de las descargas de los ríos Jara y de la Vega, y de la propagación de la onda de marea, afectando su calidad, la sostenibilidad de sus ecosistemas y el control del transporte longitudinal en la playa.

La acción del viento de levante sobre la playa seca de la playa de Valdevaqueros erosiona los sedimentos y, con su capacidad de transporte saturada, los lleva hasta el pie de la duna. Esta salida de sedimentos de la playa se compensa con el transporte paralelo y transversal a la misma debido a la acción del oleaje y a la disponibilidad de sedimento en cantidad suficiente. En consecuencia, la acción del viento, la anchura de la playa seca y el transporte restaurador del sedimento por el oleaje forman un circuito compensado que mantiene alimentado el sistema dunar. El sistema dispone de arena suficiente (del orden de millones de metros cúbicos) para satisfacer la demanda actual (del orden de medio millón de metros cúbicos por década) durante varias décadas. Una vez que el sedimento alcanza el pie de la duna, la distribución espacial del viento, junto con la forma y la rugosidad del campo dunar, establecen los caminos preferenciales de transporte y, a su vez, la forma y la rugosidad del campo dunar. En la actualidad, la convergencia del flujo de viento, por efecto de la topografía, en una determinada zona está provocando los mayores avances y acumulaciones del sistema dunar donde se han concentrado los principales esfuerzos de control y gestión, principalmente mediante extracciones intermitentes. El método de extracción y su intensidad están favoreciendo el crecimiento asimétrico de la duna.

Es previsible que en las próximas décadas no se modifiquen significativamente la secuencia, la magnitud y la frecuencia de los estados de viento y de oleaje en la zona que, en todo caso, se intensificarán. Por tanto, la construcción de barreras y pantallas en la superficie del campo dunar de pequeño porte no es suficiente para controlar y regular su progreso anual. Mientras que no se detenga el mecanismo de transporte de arena hacia la duna será necesario realizar labores de control del corredor dunar, bien para mantener el tráfico rodado, bien para controlar su dispersión y avance ladera arriba. Asimismo, mientras no se controle el crecimiento espacial de las playas de Valdevaqueros y Los Lances-Tarifa, continuarán los problemas derivados del deterioro ambiental.

3.1. Alternativa 0. No hacer nada

Si se adopta esta alternativa, la carretera quedará sepultada bajo la arena en unos pocos meses; la duna progresará ladera arriba, irá tapando la masa forestal y, previsiblemente, se extenderá por todo el entorno de Paloma Alta. Continuará el crecimiento desordenado de las playas de Valdevaqueros, Los Lances y Tarifa y el deterioro medioambiental del entorno, especialmente en los años secos. En los muy húmedos se producirán inundaciones debidas al taponamiento de las descargas fluviales y las arroyadas por los arenales.

3.2. Alternativa I. Sistematización de los trabajos de conservación

Se concreta en realizar los trabajos de limpieza intermitentes en el tiempo y considerar de forma independiente los desajustes morfológicos en las playas y la pérdida de calidad de agua. La estrategia de gestión se puede mejorar notablemente con pequeño coste adicional implementando un plan de seguimiento, control e intervención que incluya: 1) profesionalización del seguimiento de la duna; 2) realización de previsiones a corto plazo del comportamiento dunar y, en función de ellas, 3) tomar decisiones de cuándo, dónde, cuánto y cómo se extrae; 4) mejorar los métodos de extracción, e incluso 5) reperfilear el pie y algunas zonas de la superficie dunar para reducir los efectos topográficos e incrementar la dispersión angular del flujo sedimentario.

3.3. Alternativa II. Reforma del campo dunar

Se concreta en dar forma al campo dunar con 2 enfoques posibles, si bien ninguno de los cuales mejora los problemas ambientales y morfológicos de las playas de Valdevaqueros, los Lances y Tarifa descritos anteriormente.

- *Alternativa II.1.* Se intensifican los trabajos sobre la forma, la altura y la orientación del campo dunar que en la alternativa I eran solo de corrección. En este caso, el objetivo de la reforma es crear formas dunares de perfil parabólico que minimicen su avance, tal y como se ha observado en otros campos dunares y bajo experimentación en túnel de viento [11]. Su implementación inicial requiere una mayor y mejor definición de la actuación y su coste inicial es superior que el de la alternativa I. Su coste de conservación es claramente menor, sin embargo, y se puede diseñar una zona de trabajo que no interfiera con el tráfico rodado y optimice el sistema de extracción. Para alcanzar este objetivo es necesario implementar un plan de seguimiento, control e intervención.
- *Alternativa II.2.* La reforma del campo dunar es más amplia, ya que el objetivo es crear formas dunares de perfil triangular con altura suficiente para minimizar el avance y la movilidad de la arena. Básicamente consiste en seguir el modelo de las trincheras iniciado por razones militares, desarrollado y optimizado por el Instituto para la Conservación de la Naturaleza (ICONA) en la década de los setenta del siglo pasado. Su implementación inicial requiere una mayor y mejor definición de la actuación y tiene un coste inicial superior que el de las alternativas I y II.1, ya que se mueve un mayor volumen de arena, del orden de un millón de metros cúbicos, posiblemente en 2 frentes dunares próximos a la línea de costa, pero alejados de ella para que la acción del oleaje no retroalimente la corriente longitudinal en la zona de rompientes. Es conveniente revegetar las 2 dunas y es posible recuperar el pinar sepultado en la actualidad con la correspondiente mejora del ecosistema boscoso del parque. Su coste de conservación es claramente menor que el de las 2 alternativas anteriores y los trabajos se realizan alejados de la carretera. Para alcanzar todos los

objetivos de esta alternativa es necesario implementar un plan de seguimiento, control e intervención.

3.4. Alternativa III. Construcción de infraestructuras

Estas alternativas han sido propuestas en otros estudios [4]. Se propone la construcción de un falso túnel (alternativa III.1) o de un nuevo trazado de la carretera actual (alternativa III.2). Las 2 resuelven el problema del tráfico rodado a lo largo del año. Se supone que, una vez implementada alguna de estas alternativas, son innecesarios los trabajos actuales de extracción y control. Desde el punto de vista de avance y destrucción del paisaje boscoso, el resultado es el mismo que el de la alternativa de no hacer nada. Ninguna de las 2 alternativas mejora los problemas ambientales y morfológicos de las playas de Valdevaqueros, los Lances y Tarifa descritos anteriormente.

- **Alternativa III.1.** La extensión del falso túnel debe determinarse adecuadamente (como mínimo, 1.200 m); de lo contrario, el resultado sería trasladar la situación actual al lugar donde se encuentren las 2 bocas del túnel. El coste de construcción de esta infraestructura no será menor al de otras alternativas y tendrá, además, importantes costes de conservación por la necesidad de cumplir con la exigente normativa en materia de la seguridad vial.
- **Alternativa III.2.** La construcción de un nuevo trazado de la carretera tiene un coste elevado, tanto por la distancia a recorrer como por la topografía y el terreno sobre el que se debe ejecutar. En cualquier caso, para evitar que en un futuro se repita la situación actual, debe alejarse de la ladera este, debiendo considerarse bordear por el oeste el cerro de San Bartolomé, buscando una topografía más favorable.

3.5. Alternativa IV. Sobre las fuentes y transporte de sedimentos

Identificadas las fuentes principales de sedimentos y los mecanismos de transporte relevantes en la unidad y cada subunidad, es posible actuar sobre los resultados finales de forma dirigida para mitigar —e incluso invertir— las tendencias de acumulación observadas. Estas alternativas y otras similares, además de controlar el flujo de sedimento hacia la duna, consiguen otros objetivos. Entre ellos, cierta restauración ambiental del entorno, la adecuación del sistema al calentamiento global y la puesta en práctica de un desarrollo territorial y una restauración que generan economía sostenible y a largo plazo.

- **Alternativa IV.1.** La playa seca de Valdevaqueros es la fuente de sedimentos que alimenta y mantiene el avance de la duna. Es posible desarrollar alternativas que fomenten zonas reforestadas para controlar la alimentación del flujo de transporte, incrementen la distancia mínima necesaria para la saturación del flujo y/o desarrollen campos de dunas oblicuos que lleven el sedimento hacia el mar o hacia tierra. Estas alternativas, además de reducir la tasa de transporte (se reduce la superficie activa), también ofrecen áreas de confort a los usuarios. Su implementación requiere una cuidadosa puesta a punto y se deben programar medidas de mantenimiento, sobre todo después de un temporal de poniente que haya inundado la zona. Pueden ser muy eficaces, ya que si se reduce a la mitad la superficie activa de alimentación, la tasa de entrada de sedimento a la duna se reduce a la mitad. No obstante, para alcanzar este resultado la anchura protegida se debe extender a todo el *fetch* de alimentación (a lo largo de toda la playa), con módulos separados entre sí una distancia que impida la acción del viento sobre la playa. La altura de la protección del suelo desempeña un papel relevante a la hora de fijar la separación entre estos módulos de intervención.

- **Alternativa IV.2.** Otra opción es favorecer y potenciar la circulación de agua a través de la playa entre el mar y el cauce del río Valle y, en su caso, del Jara: a) limpiar caños y arroyadas y mejorar las condiciones hidráulicas del cauce fluvial, y/o b) dragar el cauce del río en las proximidades de la desembocadura y mantenerlo con pequeñas actuaciones. Es posible crear una circulación continua de agua entre el mar y el estuario que, además de renovar el agua, es una barrera al proceso de alimentación y transporte de sedimentos. La velocidad del agua debe ser suficiente para que la corriente pueda transportar el sedimento que le llegue.

3.6. Alternativa V. Recuperación y restauración ambiental de la unidad fisiográfica

El objetivo principal de las alternativas I a IV es controlar la invasión de la carretera complementaria de la Red Autonómica de Carreteras de Andalucía A-2325 por la arena procedente de la duna de Valdevaqueros, aunque en algunas de ellas las actuaciones formuladas incorporan posibles mejoras del entorno ambiental. No obstante, ninguna de ellas impide que el viento de levante transporte arena desde la playa de Valdevaqueros hasta el pie de la duna. Por tanto, es necesario insistir en que todas ellas requieren labores de conservación del sistema dunar, cuya intensidad y coste asociado dependen de cada alternativa. Sin embargo, las alternativas IV se formulan con la voluntad de controlar la alimentación del flujo de sedimentos y su eventual transporte, considerando la revegetación de la playa seca y favoreciendo la circulación de agua tierra-mar. Esta es una formulación más ambiciosa que incluye los problemas ambientales que existen en la unidad fisiográfica, los cuales, lejos de disminuir, irán creciendo en el tiempo a medida que aumente la demanda y la presión urbanística de este paraje singular y único de Andalucía. Por todo ello, se considera necesario incluir una alternativa V que se debe formular a partir de una visión global de la ordenación del territorio, en la que se incluya con prioridad la invasión de la carretera por la arena de la duna. Esta alternativa debe analizar de forma integral los elementos citados en las alternativas I a IV, conjuntamente con otros de ordenación territorial, como por ejemplo el suministro y la depuración de las aguas, el tráfico rodado, el control de las aguas subterráneas, la restauración ambiental, etc. Solo así se minimizarán otros problemas, similares a los de la invasión de la carretera, que irán surgiendo en el futuro inmediato debidos a los procesos litorales y la evolución de costas desencadenados hace más de 70 años, y a un uso y disfrute desacoplados de aquellos.

Financiación

Este trabajo ha sido financiado por la Dirección General de Infraestructuras de la Consejería de Fomento y Vivienda de la Junta de Andalucía.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer la información aportada por Juan José Muñoz-Pérez y Marina Navarro-Pons, cuyas contribuciones han sido de gran valor para el desarrollo de este estudio. Asimismo, el primer autor quiere agradecer el apoyo de Abengoa Research en el contexto del Acuerdo Marco de Colaboración entre dicha compañía y el Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales de la Universidad de Granada.

Bibliografía

- [1] Navarro M, Muñoz-Pérez JJ, Román-Sierra J, Tsoar H, Rodríguez I, Gómez-Pina G. Assessment of highly active dune mobility in the medium, short and very short term. *Geomorphol* 2011;129:14–28.

- [2] Gómez-Pina G, Muñoz-Pérez JJ, Ramírez JL, Ley C. Sand dune management problems and techniques, Spain. *J Coast Res* 2002;36:325–32.
- [3] Román-Sierra J, Navarro-Pons M, Muñoz-Pérez JJ, Gómez-Pina G, Fages-Antiñolo L. Ecosistemas dunares en la provincia de Cádiz. Estabilizaciones en Bolonia y Valdevaqueros, T.M. Tarifa. *Rev de Obras Públicas* 2004;151:65–76.
- [4] Fages L, Gómez-Pina G, Navarro M, Román-Sierra J, Giménez-Cuenca M, Ruiz JA et al. Coastal Management Activities in Valdevaqueros Dune Area (Tarifa, SW Spain). En: *Proceedings of the International Conference on Management and Restoration of Coastal Dunes*. Santander, Spain; 2007.
- [5] Navarro M, Muñoz-Pérez JJ, Román Sierra J, Tejedor B, Rodríguez I, Gómez Pina G. Morphological evolution in the migrating dune of Valdevaqueros (SW Spain) during an eleven-year period. En: *Proceedings of the International Conference on Management and Restoration of Coastal Dunes*. Santander, Spain; 2007.
- [6] Muñoz-Pérez JJ, Navarro M, Román-Sierra J, Tejedor B, Rodríguez I, Gómez-Pina G. Long-term evolution of a transgressive migrating dune using reconstruction of the EOF method. *Geomorphol* 2009;112:167–77.
- [7] Navarro M. Modelización de la evolución morfodinámica de la duna de Valdevaqueros (T.M. Tarifa) mediante la aplicación de Funciones Empíricas Ortogonales a corto, medio y largo plazo [tesis doctoral]. Cádiz: Universidad de Cádiz; 2011.
- [8] Navarro M, Muñoz-Pérez JJ, Román-Sierra J. Mobility evolution of a highly active coastal dune (SW Spain) in several terms. *Aeolian Process Conf* 2011; 34.
- [9] Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales. Asistencia técnica para la realización del estudio de la evolución de la duna de Valdevaqueros. Informe técnico, Universidad de Granada, 2014.
- [10] Sáez Rodríguez AJ. España ante la II Guerra Mundial. El sistema defensivo contemporáneo del Campo de Gibraltar. *Historia Actual Online* 2011;24:29–38.
- [11] Bello Millán FJ, Mäkelä T, Somoano Rodríguez M, Clavero Gilabert M, Losada Rodríguez MA. Estudio experimental de la acción del viento sobre estructuras de acumulación. En: *Jornadas Españolas de Costas y Puertos*. Cartagena, España; 2013.