

# El rol de las tormentas en la evolución morfodinámica del Delta del río Vélez: Costa del Sol, Málaga.

## *Storms influence in the morphodynamic evolution of the Velez River Delta, Málaga.*

E. Guisado-Pintado<sup>1</sup> y G. Malvárez<sup>2</sup>

1: Coastal Environments Research Group. Área de Geografía Física. Universidad Pablo de Olavide, de Sevilla. CP 41013; [esguipin@upo.es](mailto:esguipin@upo.es)

1: Área de Geografía Física. Universidad Pablo de Olavide, de Sevilla. CP 41013; [gcmalgar@upo.es](mailto:gcmalgar@upo.es)

**Resumen:** El delta del río Vélez, situado en la costa oriental de Málaga, se caracteriza por un alto dinamismo evidente a escalas temporales que van desde semanas a décadas. Su localización en una de las zonas turísticas más importantes de la costa mediterránea andaluza ha dado lugar a una acusada transformación, tanto de la cuenca, con la construcción de embalses y represas, como de los flancos de su frente litoral, con la construcción del Puerto de Vélez, y las escolleras de la playa de Torre del Mar, entre otras. El resultado es que morfosedimentariamente el Vélez, como cualquier delta que genéticamente debe su origen al dominio de los procesos fluviales, actualmente depende de los procesos costeros derivados de la acción del oleaje y las tormentas. Estas últimas, a pesar de no ser frecuentes en el Mediterráneo, se caracterizan por presentar alta energía y cierta capacidad para modificar las geoformas litorales, sobre todo cuando se registran de forma concatenada y con alta cadencia. En este trabajo se presenta un estudio preliminar sobre la influencia de las tormentas y los procesos morfodinámicos asociados con la morfología, dinámica y evolución del delta en los últimos 50 años. Mediante el análisis de los patrones de disipación de energía del oleaje y la evolución temporal de la línea de costa a través del estudio de ortofotografía y herramientas SIG se ha establecido un modelo espacio-temporal de evolución del delta.

**Palabras clave:** morfodinámica, tormentas, ortofotografía, SIG, delta del Vélez.

**Abstract:** *Velez River Delta, located in the eastern coast of Málaga, is a highly dynamic system that changes at timescales from weeks to decades. Its localisation in one of the most touristic areas of the Andalusian Mediterranean coast has resulted in a patent transformation, both of the watershed that supports the river with the construction of reservoirs and dams, and the coastline with the construction of a Marina, and the seawall at Torre del Mar beach, among others. The result is a delta highly influenced by the contributions of the river and functionally dependents on coastal processes resulting from wave action and storms. The latter, although not common in the Mediterranean Sea, are characterized by high energy and some ability to modify the coastal landforms, especially when recorded on a concatenated and high cadence. In this paper a preliminary study on the influence of storms and morphodynamic processes associated with the morphology, dynamics and evolution of the delta in the past 50 years is presented. Through the analysis of wave dissipation patterns and the temporal evolution of the coastline using orthophotography and GIS tools, a model for the morphodynamic evolution of the delta is outlined.*

**Key words:** *morphodynamics, storms, orthophotography, GIS, Velez River Delta.*

## INTRODUCCIÓN

Los sistemas costeros mediterráneos han evolucionado en las últimas décadas, fuertemente condicionados por un agresivo desarrollo turístico y un acelerado cambio en los usos del suelo. Particularmente, en la Costa del Sol el modelo urbanístico ha supuesto la intensificación y/o abandono de las actividades agrícolas y el desarrollo de las ciudades costeras, siendo el turismo de sol y playa el principal incentivo de la economía. La artificialización de la costa y la intensa construcción de infraestructuras (carreteras, puertos, embalses, entre otras) han derivado en un cambio en los sistemas de playas, cuyo mantenimiento a través de obras de ingeniería son la única salida frente a la explotación turística que condiciona altamente la dinámica natural. A

pesar de que el Mediterráneo no está en la zona de grandes tormentas ni ciclones por latitud y exposición, el Mar de Alborán presenta una fuerte actividad tormentosa en invierno y primavera. Esta actividad se debe a la acción de frentes atlánticos que alcanzan la costa con dirección O-SO y los temporales de componente este con origen en la cuenca oeste Mediterránea. Estos eventos juegan un papel importante en la morfodinámica de la costa cuya evolución depende prácticamente de la energía de las olas y las corrientes, al ser el aporte de los ríos bajo o inexistente. Esta situación es especialmente evidente durante los eventos de alta energía y duración (tormentas), siendo en muchos casos los responsables de los cambios morfológicos de la costa. En los sistemas litorales el transporte de sedimentos en dirección hacia el mar (*offshore*) durante las tormentas, y el lento regreso durante condiciones climáticas suaves, está bien

documentado, así como la influencia que la morfología de la costa, la orientación, las condiciones pre-tormentas y el impacto acumulativo de las mismas (Jaffe et al., 1997; Lee et al., 1998) en la respuesta de la playa emergida y en la zona submareal (*nearshore*).

El origen del delta de Vélez se sitúa en el S. XV, a consecuencia de los cambios que se produjeron por actividad agrícola y las variaciones climáticas, que colmataron el estuario existente (Hoffman, 1988). Sin embargo, los recientes cambios en el modelo agrícola, la regulación de la cuenca del río (incluyendo la construcción de diversas presas en 1988 y 1995) y la intensificación del turismo han inducido cambios en la morfología del delta, incluyendo episodios de erosión y translación de la desembocadura principal del delta (Malvárez y Cooper, 2000) y de los sistemas costeros adyacentes. En este sentido, el delta se presenta como un sistema inmaduro, cambiante y fuertemente influenciado por las actividades antrópicas y los agentes costeros que lo mantienen en equilibrio dinámico. En este escenario, se pretende conocer las causas que intervienen en la evolución morfológica del delta del Vélez y su entorno en los últimos años. La metodología se basa en el análisis de ortofotografías aéreas, el cálculo de tasas de erosión y la caracterización de los fenómenos climáticos (temporales marinos) que han gobernado los procesos.

## ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio comprende aproximadamente 7 km<sup>2</sup> del delta emergido del río Vélez que se extiende hasta Torre del Mar en el O y Playa Almayate al E, en total unos 4 km lineales de costa. El río Vélez, con un curso principal de 43 km de recorrido desemboca en la costa mediterránea, al E de Málaga. Se trata de una zona subtropical con una precipitación media anual de 629 mm, donde las lluvias son esporádicas y ocurren sobre todo en invierno y otoño, y la descarga media anual es altamente variable (Senciales y Malvárez, 2003). El Mar de Alborán, dominio en el que se encuentra el delta, se caracteriza por un régimen de oleaje suave y un rango micromareal (0,5 m de marea astronómica), siendo por tanto el oleaje el agente que domina los procesos marinos. El régimen de oleaje en la zona se caracteriza por largos periodos de calmas (77% del año), en los cuales el oleaje medio raramente alcanzan el metro de altura y los periodos son cortos (T: 4-5 segundos), lo cual se corresponde con oleaje tipo *sea* (mar de viento) originado por vientos locales y limitados por el *fetch* (500 km). La orientación de los vientos se caracteriza por una alternancia casi del 50% de vientos de este y del oeste. En condiciones de tormenta, la deriva litoral y el transporte son de gran importancia ya que toda la energía se concentra en una banda muy estrecha cercana a la costa (Malvárez y Cooper, 2000), dada la fuerte pendiente general de la plataforma continental y la limitada longitud de onda del oleaje. La morfología del delta es altamente dinámica, con intensas variaciones en extensión y forma. La zona sumergida tiene al E zonas de fuertes pendientes,

mientras que hacia el O parece una zona de depósito dominado por pendientes suaves (Senciales y Malvárez, 2003).

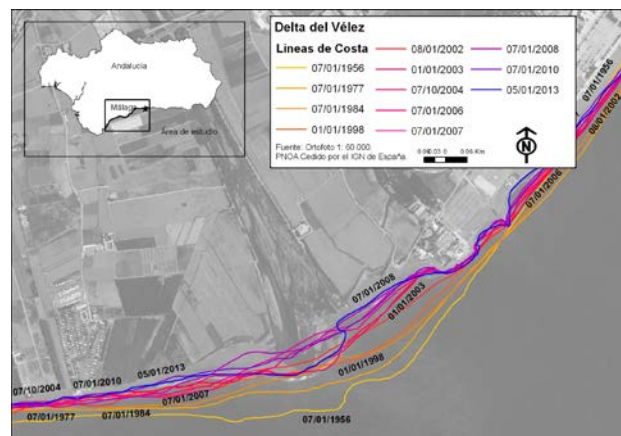


FIGURA 1. Área de estudio y evolución de la línea de costa entre 1956 y 2013 (Mes/Día/Año) del delta del Río Vélez.

## METODOLOGÍA

### Tasas de erosión del Delta

A partir de las ortofotografías del verano de 1956 (Junta de Andalucía, 1:33.000), verano de 1977 (vuelo interministerial, 1:18.000), verano de 1984 (Junta de Andalucía, 1: 33.000), invierno de 1998; verano de 2004; verano de 2007 (Junta de Andalucía, 1: 60.000), verano de 2002; verano de 2008; verano de 2010 (Junta de Andalucía, PNOA 1: 20.000), invierno de 2003 (Junta de Andalucía, 1: 5.000), verano de 2006 (PNOA 1: 20.000) y primavera de 2013 (IGN PNOA 1: 60.000), se digitalizaron las líneas de costa a escala 1:2.500, usando un criterio geomorfológico (última marca húmeda de la marea en formaciones litorales sedimentarias expuestas a mar abierto). Mediante el Digital Shoreline Analysis System-DSAS (Thieler et al., 2010) se calcularon las tasas de erosión del delta (SCE Shoreline Change Envelope; NSM Net Shoreline Change; EPR End Point Rate) para dichas fechas, así como la evolución total de los últimos 55 años, utilizando transectos cada 25 m, con objeto de analizar la evolución temporal y morfológica del delta emergido.

### Análisis de eventos extremos

En el Mediterráneo una tormenta queda definida con una altura mayor de 2 m y duración igual o mayor a 5 horas (CMA, 2003). Dicho evento solo comienza cuando se superan o igualan la altura significativa de ola de 2,0 m, añadiéndose los valores siguientes siempre y cuando la media de dicho valor y de los siguientes cuatro superen el umbral anterior. Se analizaron las series temporales 1958-2013 (frecuencia de 3 horas) del punto SIMAR 2035080 que se complementa con el WANA 2015013 para el periodo 2000-2004 (datos pertenecientes a Puertos del Estado, M° de Fomento, España). Se aislaron tormentas para cada año en base a su dirección, energía y duración, y se agruparon los eventos en función de la fecha de toma de la ortofotografía.

### Simulación hidrodinámica de tormentas

Dos condiciones opuestas de oleaje, tormentas de Levante ocurridas el 10/12/2010 (Hs: 3m, T: 6 s y Dir: 115°) y de Poniente (Hs: 3m, T: 6 s y Dir: 230°) del 09/11/2010 se modelaron usando SWAN (Booij et al., 1996) y datos batimétricos medios de 2010, con el objetivo de analizar la forma y cantidad de disipación de energía, y la dirección potencial de transporte asociado al vector de radiación (*wave-induced radiation stress*) bajo diferentes condiciones.

## RESULTADOS

### Evolución espacio-temporal del Delta

Los cambios en la morfología a lo largo de 55 años muestran un delta muy dinámico, y altamente influenciado por las actividades y procesos del entorno. En el 1956, año de la primera imagen, el delta se correspondía como una morfología bien desarrollada en la que el prodelta se adentraba en el mar hasta 250 m con respecto a la costa adyacente, y a partir de este momento comienza un retroceso (erosión) hasta el 2013 (128 m), hallándose situaciones intermedias de progradación en los años 2003 y 2004 (incluso en 2013) y de fuerte retroceso en los años 2006 y 2008, donde alcanza el mínimo en superficie (60 m de variación media con respecto a la costa base). Atendiendo a los resultados del modelo DSAS, el cálculo del EPR indica el movimiento de la línea de costa en el tiempo total transcurrido, 56,8 años, (1956 al 2013) y por tanto la tasa de erosión total del periodo, con -3,68 m/año en la zona central del delta, y +1,49 m/año en Torre del Mar.

En términos de distancia (NSM), el movimiento neto de la línea de costa para dicho periodo ha sido de entre -120 y -209,61 m en la zona central del delta, -50 y -100 m en la playa de Almayate y hasta de +80 m en Torre del Mar. Atendiendo al NSC, es en el centro del delta donde se ha producido un cambio mayor (210,47 m).

### Eventos de alta energía en el delta

Se aislaron y caracterizaron un total de 278 eventos de tormentas para el frente costero del río Vélez durante el periodo 1958-2013, lo que corresponde a un total de 7705,50 horas (aproximadamente 323 días). La altura media de ola alcanzada fue de 2.21 metros y la dirección media del E (112,50 grados); siendo solo 51 tormentas del O (18,3% del total). De éstas, hasta el 2007 se registraron 15 eventos (29,4%) identificándose grandes periodos (1974-1986) en los que no se registran tormentas de componente oeste, mientras que los 44 eventos de tormentas restantes (71,6 %) tienen lugar entre el 2008-2013, siendo además los años con más eventos proporcionalmente (80 tormentas). A pesar de la dominancia de las tormentas de levante en toda la serie registrada, a la luz de los resultados el incremento en los últimos años de los eventos del O parecen ser los responsables de importantes cambios en la morfología del delta, aparentemente adaptado al oleaje del E.

### Modelo morfodinámico de evolución del delta

El análisis de las tasas de erosión basado en los periodos estudiados y el número de tormentas ocurridas en dicho periodo muestran como la morfología y dinámica del delta, responde a la energía y dinámica del oleaje. Los resultados muestran una disminución progresiva de la superficie del delta desde 1956 hasta el periodo 2003-2004 (Tabla 1), periodo en el que progresa ligeramente en la desembocadura (zona central y O) produciéndose una inundación del camping que allí opera por una fuerte crecida del río, a partir de este momento existe un periodo de fuerte erosión comprendido entre el 2005-2007, y un cuarto y último periodo de avance del delta (sobre todo del Centro y E del delta) entre el 2008 y el 2013.

Los resultados de modelización muestran como en condiciones de levante las corrientes potenciales perpendiculares a la costa (*cross-shore*) dominan la zona E del delta; al O las olas sufren una importante refracción lo que origina una corriente paralela a la costa. Con oleaje del O, la situación es diferente; al O del delta las olas llegan con cierta refracción que genera una deriva litoral en el sentido O-E, particularmente patente en la zona central, mientras que en la zona E domina la corriente desde el mar a la costa (*offshore-onshore*).

## DISCUSIÓN

La evolución reciente del delta del Vélez es fruto de numerosos procesos (fluviales y marinos, naturales y antrópicos) que conjugados han propiciado una dinámica compleja cuyo resultado es un delta en un equilibrio inestable y altamente variable. En los últimos 50 años, además, el hecho de que las descargas fluviales sean prácticamente nulas debido a la construcción de presas (embalse de la Viñuela en 1988 y construcción de 7 presas en 1995), y al control de la descarga aguas arriba, parece indicar que el oleaje y las corrientes, especialmente durante eventos de alta energía, son los máximos responsables de la evolución morfología del delta. La influencia que la orientación de la línea de costa tiene en la magnitud y tipología de los impactos derivados de las tormentas ha sido ampliamente documentado (e.g. Hill et al., 2004). La peculiar disposición del delta del Vélez con una orientación NO-SE en la cara de levante y SE-NO en la cara de poniente parece ser el principal responsable de los cambios en la respuesta morfológica y dinámica del delta emergido en los últimos 50 años. Tal y como apuntaba Backstrom et al., 2008, durante los temporales de levante, los más frecuentes, las olas llegan aproximadamente paralelas al E del delta, en una zona de alta pendiente y estrecha zona de rompiente (*surf*), lo que resulta en un transporte *cross-shore* y baja tasas de erosión/deposición; el área O del delta presenta una orientación E-O por lo que el oleaje del E sufre gran refracción lo que se traduce en una fuerte deriva litoral e importante erosión; mientras que la propia desembocadura se encuentra en una zona de transición entre ambos tipos de corrientes lo que se traduce en

Periodo	Tasas EPR (m/a) / SCE (m)			Tormentas
	Oeste	Centro	Este	(Nº eventos y Dirección)
1958-77	-3,6/50-76	-2,6/25-40	-2 (+2,57)/40-55	1958-75: 73 (6 O); 1976: 2 E
1977-84	-7/15-30	-8/30-60	-1 y +3/15-30	77-83:28 E; 1984: 4 (4 O)
1998	-3,5/15-50	-1 y +1/7-18	-2,75/20-38	1990-96: 31 (2 O)
1998-02	-5,5 y +5/ 20	-14/ 30-50	-5 (-14)/ 30-50	1998-01: 18 (3 O); 2002: 3 (1 O)
2002-03	-23/ 12-25	+26/ 25	-40 y -20/ 47	2002: 3 (1 O)
2003-04	-12/10-20	+13/ 15	-4/ 7	2003: 3 ; 2004: 3 (1 O)
2004-06	+10 y 28/15-35	-60 (-30)/ 20-76	-7/ 9	2004-05:7 (4 O); 2006: 3 (1 O)
2006-07	-10 y -1 / 7	-20/ 15-20	-10/ 10	2006: 3 E; 2007: 2 (2 O)
2007-08	-15 (-40)/ 30-40	-10 y +15/ 15	-20 /20	2007: 4 E; 2008:7 (3 O)
2008-10	-16 y +20/ 15-40	+11/ 20	+4 y -3/ 2-15	2008-09: 25 (13 O) ; 2010: 12 (1 O)
2010-13	+7/ 5-20	+19/ 30-50	-9 / 25-30	2010-12: 40 (14 O); 2013: 11 (7 O)

TABLA I. Fases y características de las tormentas y la erosión entre 1958 y 2013. Nota: m/a (metros al año), m (metros). Periodo definido hasta la toma de la ortofoto.

deposición y erosión a partes iguales; lo que propicia que el delta reduzca progresivamente su extensión en un escenario de escasez de aportes por parte del río. Las corrientes generadas con tormentas de poniente (importantes en el periodo 2008-2013) parecen favorecer el aporte de sedimentos hacia la costa (*onshore*) al O del delta, y particularmente el crecimiento del ápice del delta ya que generan un transporte O-E. En este sentido, la zona O y central del delta tienden a progradar, generándose incluso una flecha en el periodo 2010-13 mientras que la zona E se encuentra al abrigo de dicho oleaje lo que resulta en bajas tasas de erosión/ deposición.

El hecho de que el delta sumergido se extienda al O de la desembocadura parece ser el responsable del aporte de sedimento que deriva O-E durante temporales de poniente, mientras que los sucesivos espigones al E de la desembocadura, y la orientación del delta, podrían actuar como barrera al crecimiento del delta bajo condiciones de levante. De esta forma, la morfología del delta parece estar en continuo ajuste, con periodos en los que domina la erosión y dominan los temporales de levante y otros, más recientes, en los que el delta desarrolla una morfología típica de ambientes sedimentarios. El aumento del número de tormentas en los últimos años, y especialmente con componente O (55% del O entre 2008-2013 frente a 7,5% en 1958-2007) parece jugar un papel importante en la evolución morfosedimentaria del delta a medio plazo y especialmente en la recuperación parcial de la superficie emergida.

## REFERENCIAS

Backstrom, J.T., Jackson, D.W.T., Cooper, J.A.G., y Malvárez, G.C. (2008): Storm-Driven Shoreface

- Morphodynamics on a Low-Wave Energy Delta. *Journal of Coastal Research*, 24 (6): 1379-1387.
- Booij, N., Holthuijsen, L., y Ris, R. (1996): The SWAN wave model for shallow water. En: *25th International Conference on Coastal Engineering*; 668-676.
- Consejería de Medio Ambiente (CMA) (2003): *Informe de Medio Ambiente de Andalucía*. Junta de Andalucía, 495 pp.
- Hill, H., Kelley, J.T., Belknap, D.F., y Dickson, S.M. (2004): The effects of storms and storm-generated currents on the sand beaches in southern Maine. *Marine Geology*, 210: 149-168.
- Hoffman, G. (1988): *Holoanstratigraphie und Küstenlinienverlagerungen der Andalusischen Mittelmeerküste*. Report from the Fachbereich Geowissenschaften der Universität Bremen, 177p.
- Jaffe, B.E., List, J.H. y Sallenger, A.H. (1997): Massive sediment bypassing on the lower shoreface offshore of a wide tidal inlet-Cat Island Pass, Louisiana. *Marine Geology*, 136: 131-149.
- Lee, G., Nicholls, R.J. y Birkemeier, W.A. (1998): Storm-driven variability of the beach-nearshore profile at Duck, North Carolina, USA, 1981-1991. *Marine Geology*, 148: 163-177.
- Malvárez, G.C. y Cooper, J.A.G. (2000): A whole surf zone modelling approach as an aid to investigation of nearshore and coastal morphodynamics. *Journal of Coastal Research*, 16(3): 800-815.
- Senciales, J.M. y Malvárez, G.C. (2003): La desembocadura del río Vélez. Evolución reciente de un delta de comportamiento mediterráneo. *Cuaternario y Geomorfología*, 17 (1-2): 47-61.
- Thieler, E.R., Himmelstoss, E.A., Zichichi, J.L., y Miller, T.L. (2005): *Digital Shoreline Analysis System (DSAS)*. U.S. Geological Survey Open-File Report 2005: 1304 p.