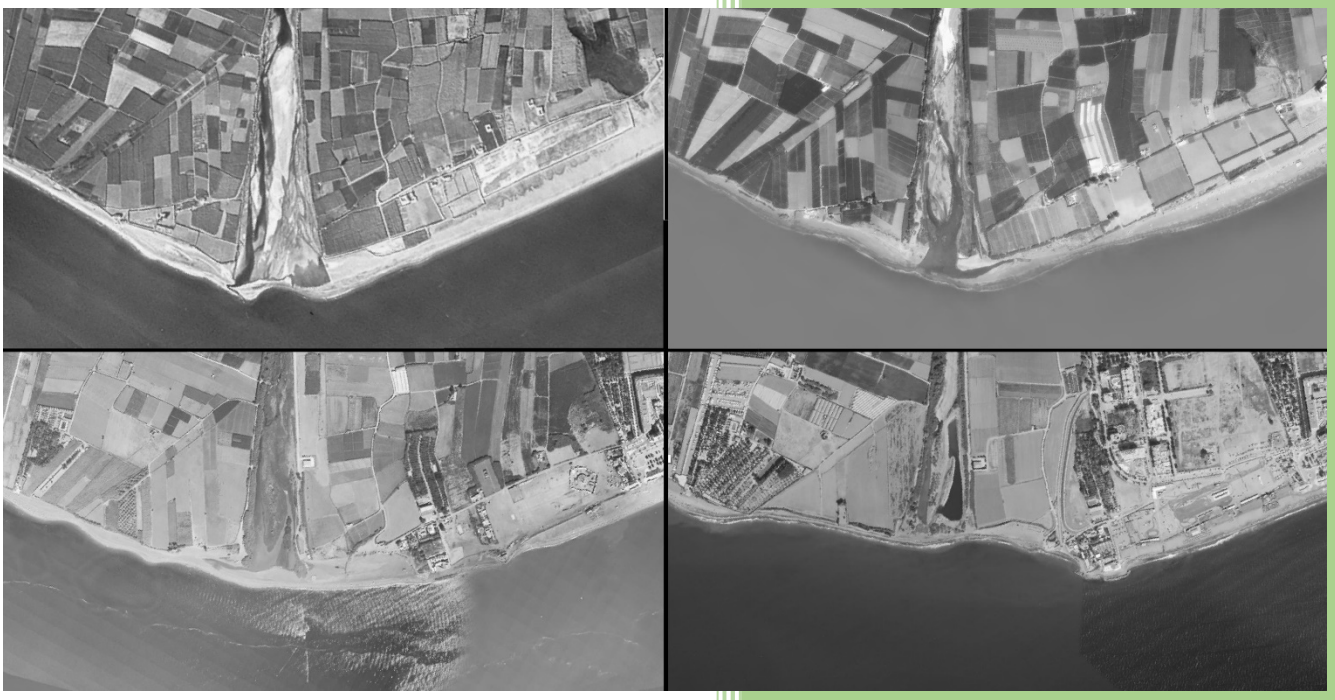
GOBIERNO DE ESPAÑA
VICEPRESIDENCIA TERCERA DEL GOBIERNO
MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOGRÁFICO
SECRETARÍA DE ESTADO DE MEDIO AMBIENTE
DIRECCIÓN GENERAL DE LA COSTA Y EL MAR

Demarcación de Costas Andalucía-Mediterráneo

ESTUDIO SOBRE LA REGRESIÓN DE LA COSTA

Entre el camping Almanat y Torre del Mar (Vélez-Málaga)



Tragsatec
GrupoTragsa

MAYO 2024

ÍNDICE:

1 INTRODUCCIÓN. 1

2 ANTECEDENTES LEGISLATIVOS Y ADMINISTRATIVOS 3

3 RESUMEN DEL ESTUDIO GEOMORFOLÓGICO DE MARZO 1995 PARA LA DETERMINACIÓN DEL DPMT VIGENTE 3

3.1 Justificación del deslinde del DPMT del proyecto de deslinde de 1995 7

4 ESTUDIOS ESPECÍFICOS Y DE DETALLE DE LA COSTA EN SU ESTADO ACTUAL 14

4.1 Estudio geomorfológico general del tramo 14

4.1.1 Distribución de altitudes 14

4.1.2 Distribución de pendientes 14

4.1.3 Contexto geológico 15

4.1.4 Dominios morfogenéticos 17

4.1.5 El Dominio Morfogenético Marino 17

4.1.6 El Dominio Morfogenético Continental 21

4.1.7 El Dominio Morfogenético Antrópico 24

4.1.8 Morfodinámica del delta del río Vélez 25

5 ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA PARA LA DEFINICIÓN DE SU ESTADO FUTURO Y DEL DPMT. 26

5.1 Estudio de la evolución de la costa de la desembocadura del río Vélez mediante ortofotografía histórica 26

5.1.1 Definición de las líneas de costa y límite de referencia interior 28

5.1.1.1 Límite de referencia interior 28

5.1.1.2 Líneas de costa 30

5.1.2 Evolución de la línea de costa 69

5.1.2.1 Análisis cuantitativo y resultados 72

5.1.2.2 Previsión y tendencia del estado futuro de la línea de costa 76

5.2 Estudios topográficos de la línea de costa 89

5.2.1 Levantamientos topográficos 89

5.2.2 Modelos digitales del terrenos (MDT) 93

6 ESTUDIO DEL CÁLCULO DE MÁXIMA ELEVACIÓN DEL MAR EN CONDICIONES DEL AÑO 2024 94

6.1 Descripción general del clima marítimo 95

6.2 Planteamiento justificado de la estimación del nivel máximo que asciende el mar 102

6.3 Obtención de los datos de clima marítimo necesarios para la identificación de los mayores temporales 104

6.4 Cálculo de la cota de inundación asociada a cada evento de temporal estimado 106
6.5 Cálculo del desplazamiento de la ola por la playa seca para cada zona 126
6.6 Estudio de los resultados 134
6.7 Cambio climático: consecuencias económicas, sociales y protección de la costa 143
6.8 Planos 145

7 COTA DE INUNDACIÓN EN ESCENARIOS FUTUROS 148
7.1 Introducción 148
7.2 Estimación de la cota de inundación y el alcance del oleaje en el año 2030 152
7.2.1 Cálculo de la cota de inundación en el año 2030 asociada a cada evento de temporal estimado hasta la actualidad 153
7.2.2 Estimación del desplazamiento de la ola por la playa seca en el año 2030 174
7.2.3 Discusión de los resultados para el año 2030 181
7.3 Estimación de la cota de inundación y el alcance del oleaje en el año 2040 191
7.3.1 Cálculo de la cota de inundación en el año 2040 asociada a cada evento de temporal estimado hasta la actualidad 192
7.3.2 Estimación del desplazamiento de la ola por la playa seca en el año 2040 211
7.3.3 Discusión de los resultados para el año 2040 220
7.4 Estimación de la cota de inundación y el alcance del oleaje en el año 2070 229
7.4.1 Cálculo de la cota de inundación en el año 2070 asociada a cada evento de temporal estimado hasta la actualidad 230
7.4.2 Estimación del desplazamiento de la ola por la playa seca en el año 2070 250
7.4.3 Discusión de los resultados para el año 2070 258
7.5 Planos 267

ANEXO 1 Imágenes de la líneas de costa entre 1957 y 2022 276
ANEXO 2 Procesos de regresión y acreción entre 1957 y 2022 322
ANEXO 3 Planos de deslinde del DPMT vigente 344

1 INTRODUCCIÓN.

En la actualidad, el 8% de la superficie terrestre, a nivel mundial, pertenece a zonas costeras; dos tercios de las grandes ciudades del planeta se sitúan en la costa (Crooks y Turner, 1999) en el que se establece cerca del 70% de la población mundial (Brown y Tompkins, 2012) ya que en el litoral el ser humano ha encontrado múltiples usos, entre los que destacan el residencial, las infraestructuras marítimas e industriales, los recursos naturales y, el mayor transformador que es el turístico y recreativo. Sin embargo, son terrenos con gran importancia medioambiental y de gran fragilidad a los cambios teniendo además para la población humana funciones fundamentales como la protección frente a los efectos atmosféricos y marinos extremos.

A nivel europeo, en las últimas décadas, los efectos negativos de los procesos de antropización de sus costas han generado preocupación por parte de la Comisión Europea. En estudios como el Eurosión (European Communities, 2005) se apunta que el 20% de las costas europeas están en regresión indicando que, si bien en parte se debe a procesos geomorfológicos (procesos naturales), son las actividades humanas las principales causantes del fenómeno erosivo, sobre todo la actividad industrial y la actividad turística.

Ello representa, aparte de poner en peligro la seguridad de más 70 millones de personas en Europa, que viven a menos de 100 metros de la línea de costa, riesgos en la sostenibilidad tanto medioambiental como social y la económica. Al respecto de estas situaciones generadas en las costas, la Comisión Europea indica que se tome conciencia de que «*la política a aplicar en el espacio costero debería ser integrada, intersectorial y multidisciplinar y no una mera colección de políticas verticales sectoriales*» (Comisión de las Comunidades Europeas, 2006:5).

En España el 39,2% de su población censada en 2020 (más de 18,5 millones de personas) vive en la zona costera con una importante densidad de población, 429,4 hab/km^2, indicador de la alta urbanización de la zona costera para dar cabida a tal densidad poblacional. Esta población se ha incrementado en los últimos 30 años un 25%, principalmente en la primera década del siglo. Entre 2011 y 2020 este crecimiento es del 1,6%. Catalunya, Comunitat Valenciana y Andalucía suman el 60% de la población costera de España siendo el 17,5% de la población costera española la residente en Andalucía, es decir, unos 3.250.000 habitantes costeros (un 38,4% de la población total andaluza). (*"Análisis y Prospectiva – Serie Pesca nº5. DEMOGRAFÍA DE LA POBLACIÓN COSTERA EN 2020." Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Feb-2022).*

La actividad turística a nivel internacional ha crecido rápidamente en los últimos 60 años hasta convertirse en uno de los mayores sectores económicos mundiales, con una contribución importante en numerosas economías, tanto nacionales como locales. El turismo costero ha sido uno de los más prósperos en su desarrollo, lo que lleva asociado un desmesurado crecimiento urbanístico en las zonas litorales. Los diversos los usos y actividades asociados al turismo que se desarrolla en la costa y su entorno ha provocado numerosas actuaciones antrópicas que han generado desequilibrios en la zona, por ejemplo, la construcción de puertos (Naik and Kunte, 2016), urbanizaciones, campos de golf, encauzamientos, soterramiento e incluso desvíos de cauces fluviales, espigones, diques y escolleras, etc, produciendo cambios notables en la batimetría y en la textura de los sedimentos depositados en profundidades donde la hidrodinámica del oleaje no le afecta (Aragonés et al., 2016; Zhu et al., 2016), así como la inmovilización de arenas, bloqueos en el transporte eólico y destrucción de depósitos de arenas litorales. Estos desequilibrios generalmente están relacionados con el retroceso de la línea de costa, lo que provoca una vulnerabilidad de todo asentamiento humano ubicado a su alrededor (Newton et al., 2014) lo que supone un riesgo para los millones de personas residentes en el litoral.

Si a todo lo expuesto anteriormente le unimos el cambio climático que predice un aumento de la intensidad y frecuencia de los eventos extremos y un aumento de los niveles del mar (Arnell and Lloyd-Hughes, 2014; Jiménez et al., 2017), además del insuficiente aporte de los ríos (Aragonés et al., 2016) principalmente por la construcción de embalses y azudes así como, en menor

medida, los trabajos hidrológico-forestales para paliar los procesos erosivos continentales, se hace necesario conocer la relación entre los agentes y procesos de cada uno de los campos implicados (marinos, costeros y terrestres) para la toma de decisiones encaminadas a preservar o regenerar las zonas afectadas y, sobre todo, adaptar las infraestructuras artificiales a las circunstancias de cada zona aunque implique el retranqueo de ellas.

Las playas son ambientes sedimentarios con alta capacidad dinámica que se localizan en la zona de transición entre el medio puramente marino y el continental. Poseen una estrecha y compleja interacción con las dunas costeras y la zona de transporte litoral mediante un continuo almacenamiento, transporte e intercambio de sedimentos. Por tanto, el litoral cambia constantemente, tratando de alcanzar y mantener el equilibrio de sus elementos entre las muchas fuerzas que les afectan, no siempre naturales, durante un periodo de tiempo.

El estudio de la posición de la línea costa proporciona información sobre la tendencia histórica de las playas (Riggs et al., 1995) y permite una previsión de la evolución de la misma teniendo en cuenta los mecanismos a los que está sometida la playa, como los ya citados: disminución de aporte de sedimentos por parte de los ríos, ramblas o barrancos; el aumento del nivel del mar o el aumento de la frecuencia e intensidad de los temporales marinos, etc.

El oleaje al incidir en la costa provoca movimientos del material que forma la franja litoral. El transporte longitudinal de sedimentos en una playa obliga a que la cantidad de material entrante en el tramo de playa sea igual a la que sale del mismo para considerarlo en equilibrio estable (durante un periodo determinado de tiempo). De no cumplirse este equilibrio, sucede que la diferencia sea por exceso debido a la acumulación de material en la playa o por defecto debido a la erosión de la misma ocasione desplazamientos de la línea de costa. En el primer supuesto, de balance positivo, la playa se encuentra en estado de acreción mientras que el segundo caso describe el comportamiento de una playa en estado de regresión. El oleaje también mueve los sedimentos en sentido transversal a la orilla, pudiendo emigrar desde el límite superior de la playa seca hasta el límite inferior de la playa sumergida, la profundidad de cierre; afectando este movimiento tanto a las zonas más elevadas como a las más profundas del perfil conforme aumenta la intensidad del oleaje. Por tanto, la afectación del oleaje por el efecto amortiguador de las playas aumenta o disminuye según sea la anchura de los depósitos de arenas, es decir, a mayor erosión (regresión) menor anchura de playas y por lo tanto menor amortiguación del oleaje, lo que implica mayores efectos adversos a causa del oleaje.

El método más utilizado para evaluar la afección de la erosión en las playas ha sido el del empleo de fotografía aérea y topografía clásica. Eran métodos suficientemente válidos para evaluar aquellos factores que eran eminentemente visibles y fácilmente mensurables. En la actualidad el empleo de sistemas de información geográfica (GIS) ha supuesto un gran avance en este campo, al integrar diversas fuentes de datos (cartográficas, ortofotografías, imágenes de satélite) que permiten obtener y comparar la evolución en el tiempo de la línea de costa (Battiau-Queney et al., 2003).

En este trabajo se ha realizado un estudio de la evolución de la playa de arena y del delta del río Vélez en la provincia de Málaga con el fin de conocer sus tendencias de cambio en el pasado, su estado actual y su progresión futura, así como su velocidad de cambio a lo largo del tiempo para prever los efectos sobre la población costera y las infraestructuras litorales para la toma de las decisiones adecuadas.

2 ANTECEDENTES LEGISLATIVOS Y ADMINISTRATIVOS

En julio de 1988 se publica la Ley 22/1988, de Costas, que sustituye la anterior Ley de Costas de 1969 y diversos artículos de la Ley de Puertos de 1928 y de 1880, así como otras Leyes como las Leyes de paseos Marítimos de 1918 y de 1957 o la Ley de Protección de las Costas Españolas de 1980.

En 1989 se aprueba el Reglamento General de Costas que desarrolla la Ley 22/88, de Costas.

En 2013 se aprueba la Ley 2/2013 de protección y uso sostenible del litoral y de modificación de la Ley 22/88, de Costas.

En 2014 se aprueba el Reglamento General de Costas y derogación del anterior.

Con esta legislación se han ido realizando los trabajos y procedimientos necesarios para la determinación de la zona marítimo terrestre en su momento y del dominio público marítimo-terrestre posteriormente.

Así, fue aprobada la zona marítimo terrestre por las OO.MM. de 14 de junio de 1963 y de 22 de septiembre de 1967.

En 1994 se iniciaron los trabajos previos para la delimitación provisional del deslinde del dominio público marítimo terrestre, conforme a las determinaciones de la Ley 22/88, de Costas, autorizándose la incoación del expediente de deslinde el 15-9-1995.

En junio de 1996 se realiza el apeo, remitiéndose el proyecto de deslinde del DPMT en febrero de 1997.

En verano de 1997 se da audiencia a los interesados en el expediente de deslinde.

El 3 de marzo de 2005 se recibe informe favorable de los SS.JJ. del Ministerio de Medio Ambiente, aprobándose por O.M. de 10 de marzo de 2005 el deslinde del DPMT de la desembocadura del Río Vélez.

3 RESUMEN DEL ESTUDIO GEOMORFOLÓGICO DE MARZO 1995 PARA LA DETERMINACIÓN DEL DPMT VIGENTE

Entre octubre y noviembre de 1994 se iniciaron los trabajos necesarios para caracterizar la costa en la desembocadura del río Vélez desde el punto de vista físico de la zona para definir la posible línea interior del DPMT considerando el aspecto geomorfológico de la zona en aquel tiempo.

Los trabajos consistieron en una recopilación de la información sobre la geomorfología y geología costeras de la zona, un estudio fotogeológico mediante observación estereoscópica de las fotografías aéreas del vuelo de Costas de junio de 1989. Además, como trabajos de campo se realizó una toma de muestras de suelo para su estudio sedimentológico y granulométrico en las zonas que ofrecían dudas sobre las características del terreno y un extenso reportaje fotográfico del delta del río Vélez.

La sucesión estratigráfica de aquel trabajo dividió la zona de estudio en ocho zonas según su estratigrafía, describiéndose de la siguiente manera:

1- "Depósitos Silúricos: La litología de la serie más arcaica corresponde a esquistos y cuarcitas de naturaleza filítica, satinadas, de colores azulados, grises o rojizos. Entre estos niveles pueden encontrarse conglomerados deformados e intercalaciones de liditas, entre los cuales es frecuente encontrar diques de diabasas. A techo de estos esquistos de grano fino se sitúa una serie con grauwacas, cuarcitas y algunas intercalaciones de rocas carbonatadas. Esta serie corresponde al Complejo Maláguide y su potencia oscila en torno a los 200 metros y forman probablemente el sustrato bajo los depósitos deltaicos de la desembocadura del río Vélez".

2- "Unidad de Benamocarra. Paleozoico: Estratigráficamente se encuentra bajo los depósitos Silúricos y es considerada un Manto de afinidad Alpujárride (I.G.M.E. 1972). Está formada por una sucesión monótona de micaesquistos y cuarzo-micaesquistos azulados y grises oscuros. Entre los esquistos suelen encajar numerosos diques de rocas máficas. Forman en su mayor parte el sustrato de los depósitos aluviales del río Vélez, excepto en su parte final".

3- "Depósitos Carboníferos y del Permotrías: Pequeño afloramiento situado en la zona occidental del delta del río Vélez. El Carbonífero está caracterizado por grauwacas, pelitas y conglomerados, y el Permotrías por areniscas y limos rojos. Los espesores de este conjunto son de poco desarrollo y se estiman en unas decenas de metros. Pertenecen al Complejo Maláguide".

4- "Esquistos de Lagos. Paleozoico-Triásico: Con una distribución geográfica como se muestra en la figura" (mapa geológico de España. Hoja 1054: detalle de la desembocadura del río Vélez), "están compuestos por micaesquistos y esquistos cuarzo-moscovíticos gris-verdosos entre los que se intercalan cuarcitas. Su potencia se estima en un máximo de 300 metros y pertenecen al Complejo Alpujárride. En el esquema geológico presentan la posición más baja debido a la tectónica de Mantos".

5- "Depósitos Jurásicos: Especialmente asociados a los afloramientos del Permotrías maláguide; aparecen despegadas, mediante contacto mecánico, un conjunto de calizas dolomitizadas y doloesparitas muy recristalizadas, hasta tal punto de considerarlas marmorizadas. Estos sedimentos forman el techo del Complejo Maláguide".

6- "Depósitos Pliocenos: Discordantes sobre las unidades béticas antes mencionadas, se distinguen varias formaciones marinas postorogénicas. Se pueden definir dos términos, los afloramientos más meridionales representados en la figura, corresponde a conglomerados heterométricos de matriz limosa que hacia el techo pasan gradualmente a areniscas amarillentas y arenas con limos; esta serie presenta macrofauna de carácter marino. En el sector occidental y septentrional, el Plioceno está compuesto sobre todo por limos y arcillas limosas; estos materiales pueden suponer un cambio de facies de los términos más altos y más detríticos del conjunto antes descrito. La potencia de estas formaciones se estima entre 30-50m".

7- "Depósitos aluviales y llanura deltaica. Holoceno: sedimentos detríticos ligados a la red hidráulica actual. En la figura" (mapa geológico de España. Hoja 1054: detalle de la desembocadura del río Vélez), "estos materiales tapizan gran parte del esquema geológico y están asociados a los ríos Vélez y Benamargosa, así como a pequeños subsidiarios transversales a dichos cauces. La desembocadura del río Vélez se realiza en forma de delta. Los depósitos terrígenos están formados por gravas, cantos, y arenas sueltas, limos y arcillas".

8- "Depósitos de playa. Holoceno: Representados en la estrecha franja litoral y constituido por arenas con ligeras acumulaciones de gravas y gravas finas. Estos materiales proceden de la erosión de rocas metamórficas por lo que tienen un color oscuro".

Se describió la hidrografía de la zona destacando que la desembocadura del río Vélez es una evolución del "profundo estuario" que fue el Vélez en tiempos históricos, "que se introducía varios kilómetros tierra adentro siendo navegable en todo su recorrido y que se ha ido colmatando en los últimos 25 siglos, pero muy especialmente durante los siglos XVI y XVII hasta alcanzar su configuración actual". El amplio delta es "bastante simétrico y de perfil muy evolucionado", siendo su uso agrícola por la gran productividad del terreno.

En el año de redacción del estudio ya se habla de la influencia negativa del embalse de La Viñuela en el mantenimiento del delta reseñando que la presa retiene "gran parte de los depósitos sólidos que transporta el río en su cuenca alta, que va a suponer una disminución del aporte de

sedimentos al mar, con lo cual no sería de extrañar que el actual delta subárea del río Vélez comenzara a sufrir procesos de erosión y desmantelamiento".

Se hace una visión temporal del proceso de creación del delta plasmándose que el estuario del río Vélez alcanzó hace 10.000 años su máximo desarrollo comenzando desde entonces su proceso de relleno a una tasa de 1-2 metros por milenio hasta la Edad Media.

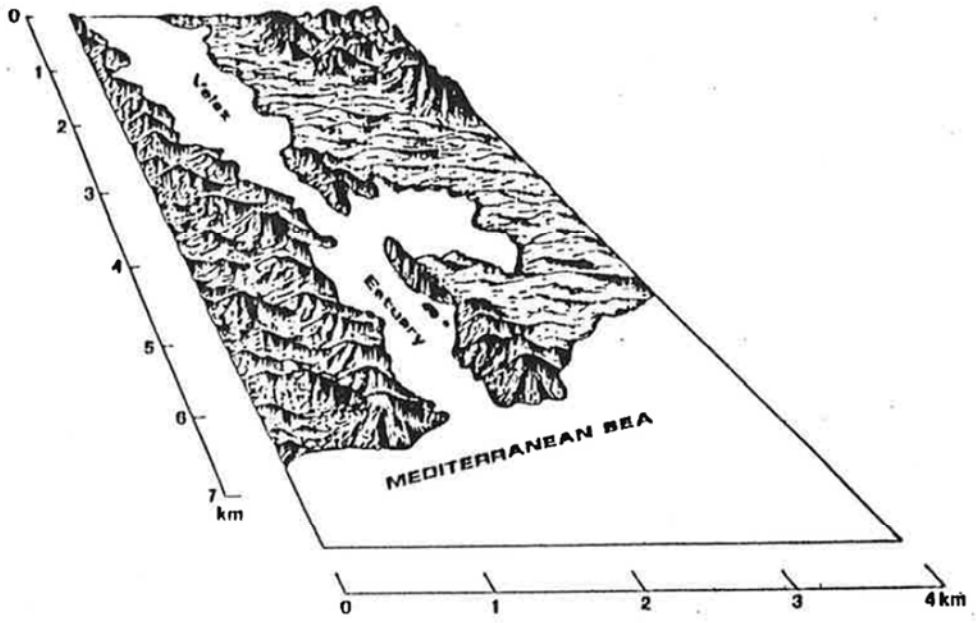


Figura 3. Estuario del río Vélez durante la última transgresión marina post-pleistocena y en tiempos de los primeros asentamientos fenicios (750 A.C.). Excavaciones realizadas 7 metros por debajo del nivel actual del valle han demostrado que estos asentamientos estaban situados en la antigua línea de costa, sobre los relieves rocosos.

"Con esta tasa de colmatación, el valle del Vélez permaneció Marino o Marismal hasta el siglo XV, como prueba el hecho de que los Reyes Católicos penetraran aguas arriba con sus barcos por el estuario para atacar el pueblo de Vélez-Málaga, en poder de los moros (sic)".

"A partir de que toda la región pasa a manos cristianas, se produce un aumento espectacular de la tasa de sedimentación debido a la deforestación generalizada de la región, que produce un aumento enorme de la erosión del terreno y, por consiguiente, de los materiales que se arrastran hacia el estuario".

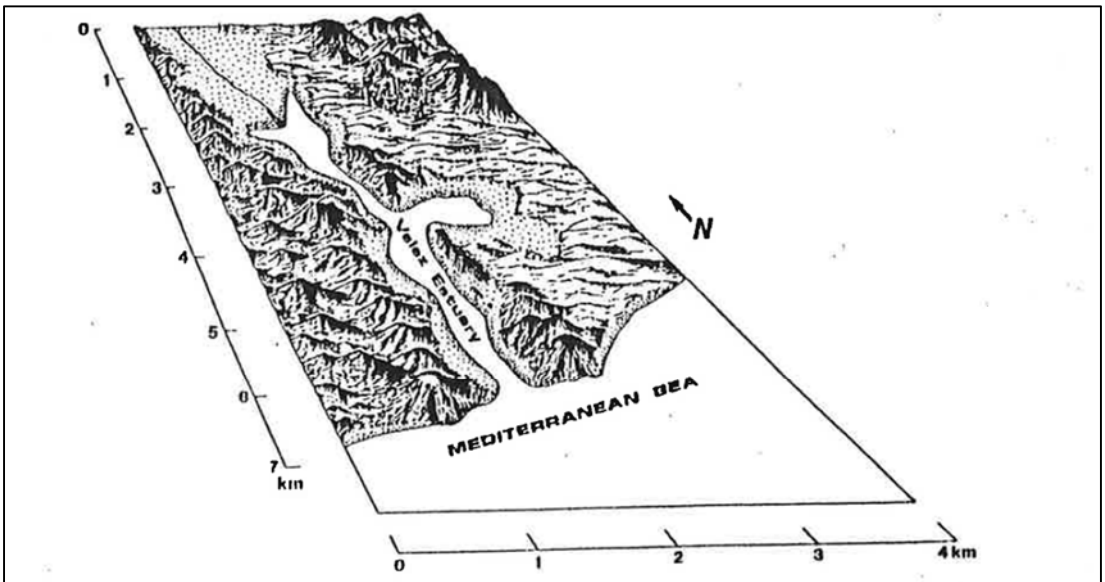


Figura 4. Estuario del río Vélez en el siglo XV, cuando los barcos de los Reyes Católicos remontaron dicho estuario para atacar y conquistar el pueblo de Vélez-Málaga (situado a la altura del delta interior, a unos 5 km. de la línea de costa de entonces y a unos 7 km. de la actual en el punto más distante del delta actual).

"El volumen de los sedimentos que se depositaron entre los siglos XVI y XVII alcanzan su mayor espesor, según los puntos, de entre 15 y 20 m. A partir de esa época, el estuario se rellena por completo de sedimentos provenientes de los relieves cercanos, y el río termina formando un delta parecido a como lo vemos actualmente" (en 1994).

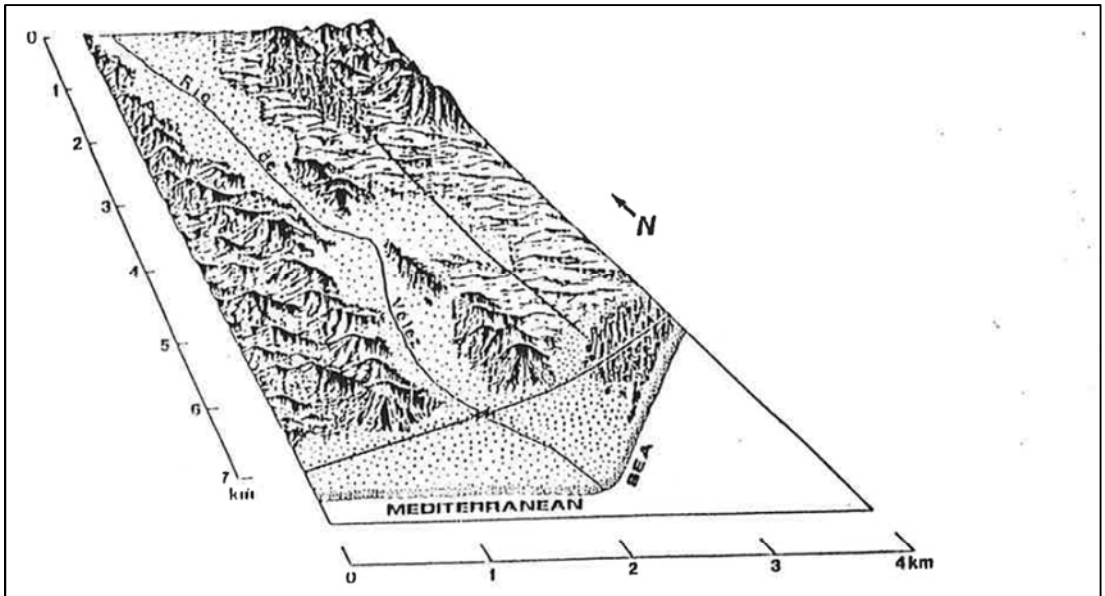


Figura 5. Situación actual del estuario del río Vélez, rellenado ya por completo, formando un valle fluvial costero terminado en un delta simétrico bastante desarrollado. Investigaciones llevaa cabo en los sedimentos del valle y del delta demuestran que la mayor parte de éstos, se depositaron durante los siglos XVI y XVII, debido a la gran deforestación que sufrió la región durante estos doscientos años.

En los últimos 60 años (a descontar desde 1994) se dice que el delta ha variado sustancialmente a la vista de los mapas topográficos editados, mencionando que en el de 1916 el faro de Torre del Mar (en los topográficos posteriores este faro aparece como "ruinas, Faro viejo" era donde

desembocaba el río Vélez, estando esa bocana actualmente colmatada, desaguando el río en la Punta de Vélez-Málaga, más al Este.

También se mencionó la influencia del puerto de La Caleta en la sedimentación del delta ya que "corta transversalmente las corrientes de deriva litoral provenientes del oeste, lo que dificulta también el transporte de materiales sueltos por la franja subacuática litoral". Y también ejerce gran influencia la construcción del embalse de La Viñuela ya que "genera la retención de sólidos transportados por el río", haciendo que los sedimentos que llegan a la costa "disminuyan de forma muy considerable. Estas dos obras antrópicas, actuando conjuntamente durante los últimos años, han producido un desmantelamiento reciente del frete del delta a velocidades vertiginosas, de tal manera que se ha construido una escollera de protección para tratar de impedir la progresiva erosión de la costa."

Se hizo un estudio sedimentológico y granulométrico de 5 muestras tomadas en las zonas que "ofrecían mayores dudas en cuanto a su caracterización geomorfológica"

Se finaliza el estudio con unas conclusiones sobre la "justificación de la línea geomorfológica del dominio público marítimo terrestre" en las que se expone que, en 1994, la franja litoral se caracterizaba por morfologías planas y de escasa pendiente hacia el mar, formando las playas y el "Charcón" interior, así como los depósitos aluviales de la llanura deltaica. Se expone que, además de esta morfología natural, la acción humana ha formado caballones de arena, escolleras y diversas nivelaciones para la defensa ante los temporales y su efecto erosivo en el delta.

Se dice que el deslinde del DPMT desde el punto de vista geomorfológico debe abarcar la parte marina del delta, la playa y la post playa, así como la parte del cauce del río que forma el Charcón por su clara influencia marina, e incluir los caballones y escolleras realizadas por el hombre.

Se reseña como un "aspecto de suma importancia" ya en 1994, la rápida evolución del frente costero y la deriva litoral por "*el estado generalizado de erosión y desmantelamiento que sufre la franja costera, preveyéndose* (sic) *un retroceso de la línea geomorfológica propuesta en función de la deriva litoral (destrucción progresiva del delta)".*

"*Dada la naturaleza, esencialmente continental, del delta se ha optado por situar la línea de deslinde como figura en el plano a escala 1:5000, ahora bien, deberá de tenerse muy presente la dinámica que afecta a dicha unidad morfológica que pudiera, a corto y largo plazo, provocar una invasión tierra adentro del mar. La construcción del puerto de La Caleta de Vélez, provoca un efecto pantalla de los aportes que proviene de la deriva litoral, y esto unido a la retención de sólidos por parte del embalse de La Viñuela, justifican el proceso de desmantelamiento del delta, con lo cual la línea fijada en el plano a escala 1:5000 puede considerarse «provisional» a medio-largo plazo".*

"Ahora bien, el borde de la llanura deltaica está protegida por caballones; interpretando los arts. 3 y 4 de la Ley 22/88, de Costas, referente al límite hasta donde alcanzan las olas durante los mayores temporales, podríamos, en base a los testimonios verbales recogidos durante la ejecución del estudio, adentrar dicho límite tierra adentro si eliminásemos dichas defensas y realizando un seguimiento del efecto mareal en épocas de grandes temporales".

3.1 Justificación del deslinde del DPMT del proyecto de deslinde 1995

El tramo en estudio tenía aprobada una zona marítimo terrestre por las OO.MM. de 22-9-1967 y 14-6-1963 pero no englobaba la totalidad de los terrenos con características de dominio público marítimo terrestre descritas en la Ley de Costas de 1988 por lo que, para incorporarlos al demanio, se inició un procedimiento de deslinde.

Este deslinde se hizo basándose en el estudio geomorfológico realizado entre octubre y noviembre de 1994 y fichado en marzo de 1995, por lo que el límite interior del DPMT se trazó según las características físicas del terreno en aquel momento.

Nuevamente, al igual que en el estudio geomorfológico, se reitera la "notable regresión de la costa en la desembocadura del río Vélez, la cual ha promovido que los deslindes de Z.M.T. antes citados queden ubicados en el mar".

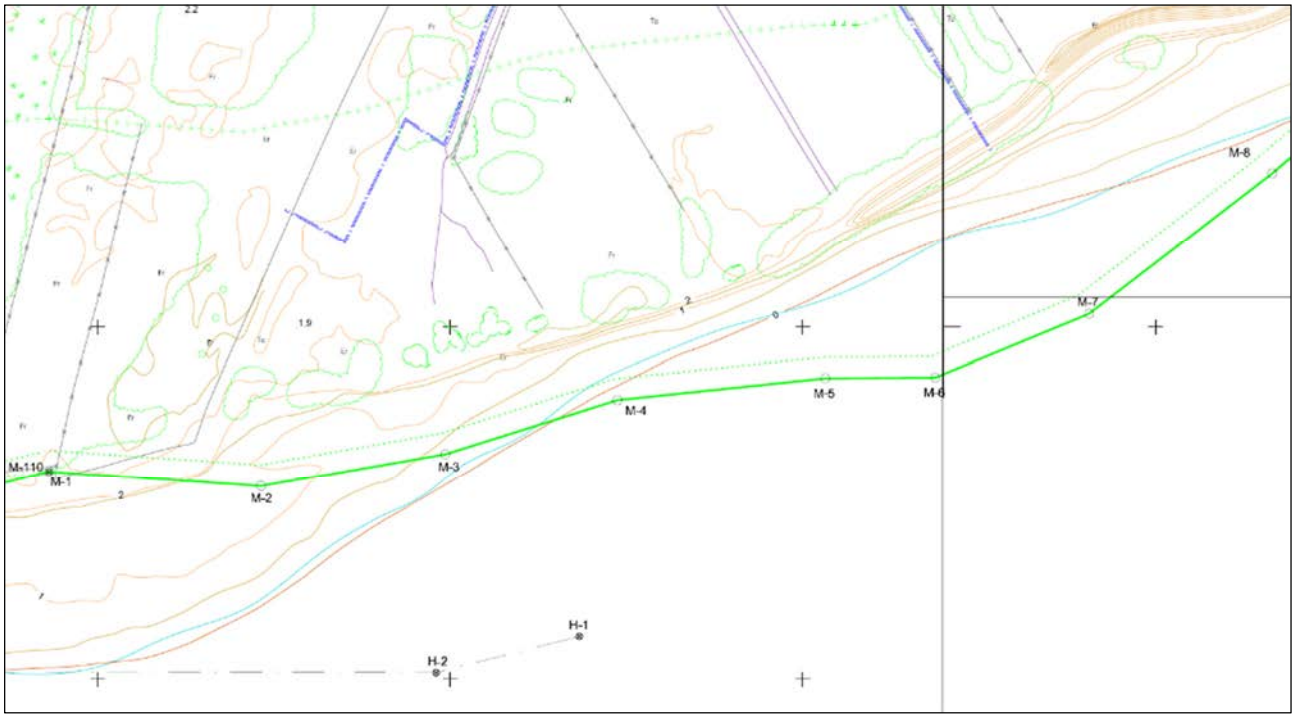
Los criterios que se utilizaron en aquel momento (año 1995) para la delimitación interior del DPMT, así como su descripción, se desarrolla a continuación:

(La numeración de los vértices de deslinde es la misma que la usada en aquel proyecto)

Del M-1 al M-8.

El límite interior del dominio público coincidía con el límite interior de las acumulaciones de arena de las playas y los mantos eólicos arenosos, que avanzan tierra adentro sobre los depósitos deltaicos del río Vélez, configurando un perfil en clara y rápida regresión. Esta regresión, se debe en gran medida a la falta de aporte de arenas fluviales del río Vélez, como consecuencia de la construcción, principalmente del embalse de La Viñuela que retiene los aportes sólidos y sedimentos.

El retroceso de la costa se estaba intentando frenar mediante pantallas vegetales (cañaverales principalmente) y muros de contención realizados con materiales sueltos (arena), que pudieran servir como barrera de fijación del avance de los depósitos de arena y del alcance del oleaje, el límite del dominio público propuesto en 1995. Al ser esta barrera poco estable y de fácil movilidad, se decía en el proyecto que "si no se realizan obras de contención de mayor envergadura, será invadida por las arenas y depósitos regresivos de la playa en un corto espacio de tiempo, lo que obligaría a efectuar en esta zona una nueva delimitación de dominio público marítimo terrestre".

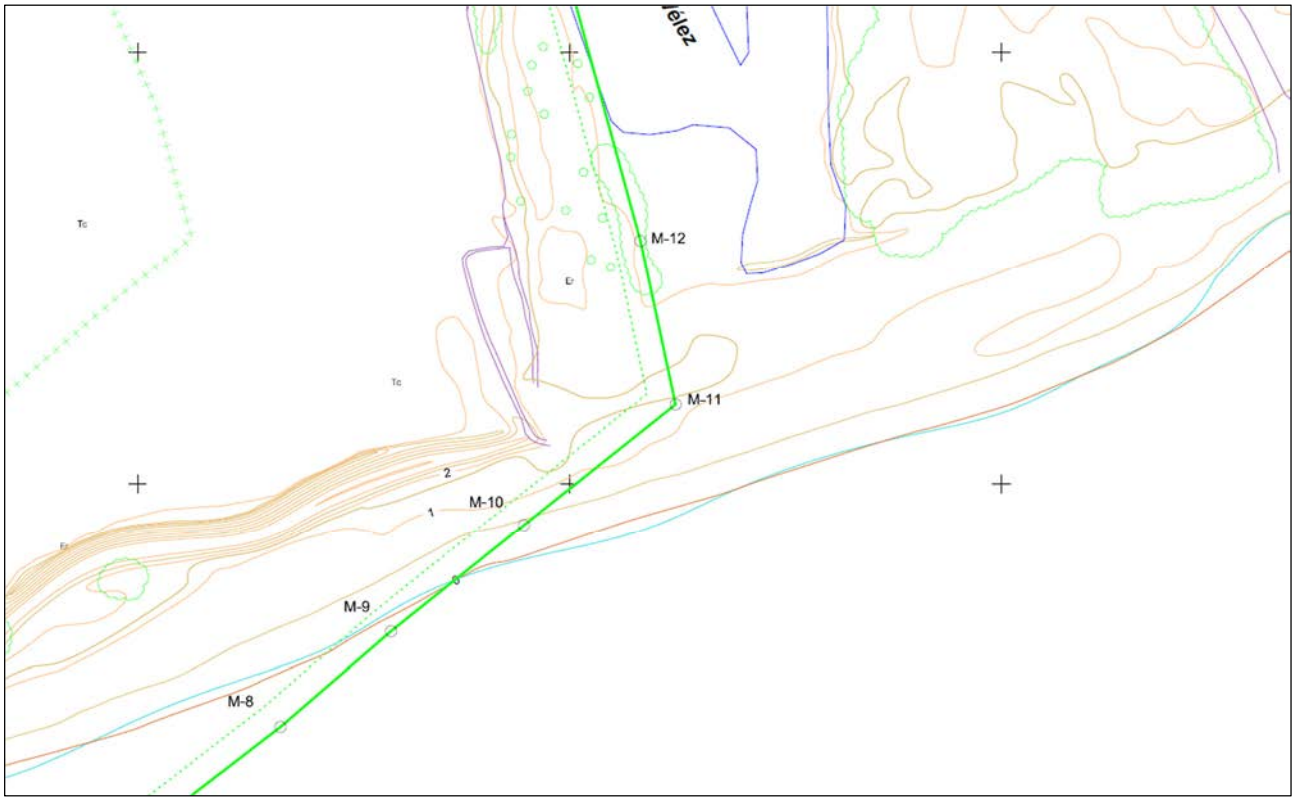


Del M-8 al M-11.

La descripción literal de este tramo de deslinde que se expresa en el proyecto de deslinde dice: "El límite de D.P. coincide con los depósitos de arenas existentes en la fecha de ejecución del deslinde de Z.M.T. de O.M. 22-9-1967 (Expte C-470) hasta el límite de ocupación de los terrenos continentales antropizados, por construcciones, caminos o cultivos agrícolas, habiéndose además determinado terrenos sobrantes (35.156 m2., gran parte de ellos inundados por el mar),

afectados aun a la Dirección General de Costas y por tanto integrados en la delimitación propuesta".

"Estos terrenos, conforme a lo dispuesto en el art. 5º.5 del Reglamento de Ejecución de la Ley 22/88, de Costas, pertenecen así mismo al dominio público marítimo-terrestre estatal".



Del M-11 al M-20.

"El límite del D.P. coincide con ambas márgenes del río Vélez, remontando el curso hasta donde se hace sensible el efecto de las mareas y queda el lecho inundado por el agua del mar en épocas de estío".

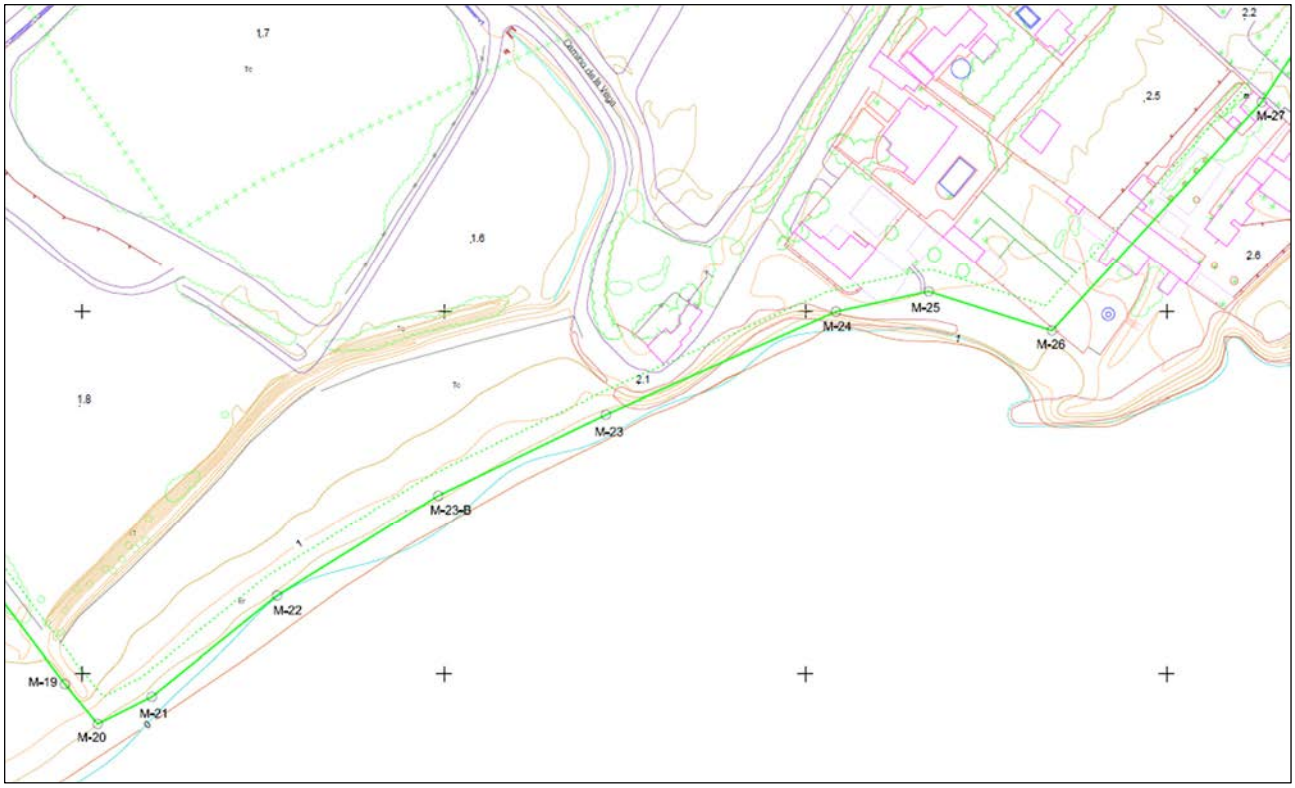


Del M-20 al M-26.

En esta zona se menciona en el proyecto de 1995 que tiene unas características similares al tramo inicial (del M-1 al M-8), considerándose el límite interior del dominio público marítimo-terrestre que se proponía coincide con el límite interior de las acumulaciones de arenas de playa y mantos eólicos arenosos que había en aquel momento, aclarándose una vez más que la zona estaba en una clara regresión.

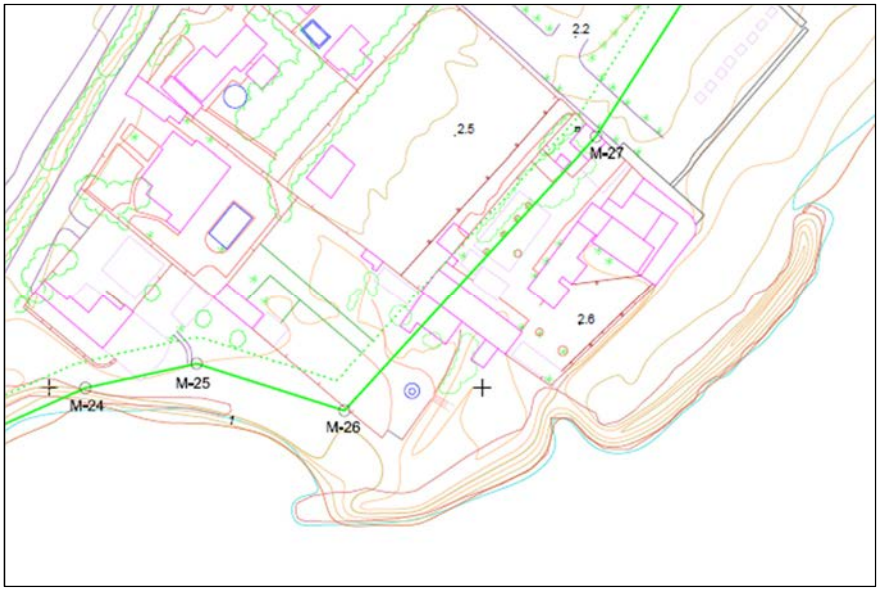
La regresión tenía tal ritmo que la propuesta inicial tuvo que modificarse durante el acto de apeo ya que los terrenos delimitados en un primer momento ya no englobaban todos los terrenos de DPMT porque, debido a la regresión, el mar y los depósitos de arena habían avanzado hacia el interior de manera ostensible. Por ello se pone de relieve que, debido a la velocidad de avance del mar tierra adentro, "*la delimitación actual habrá sido invadida por el agua y los depósitos de origen marino en un futuro inmediato*".

Según se manifiesta en el proyecto de 1995, en este sector ya se estaba intentando frenar mediante pantallas vegetales y muros de contención realizados con materiales sueltos que pudieran servir como barrera de fijación del avance de los depósitos de arena. Al ser esta barrera poco estable y de fácil movilidad debido a su composición se dijo que debían hacerse obras de contención de mayor envergadura ya que, de lo contrario, la zona sería invadida por arenas y depósitos regresivos de la playa en un corto espacio de tempo, lo que obligaría a una nueva delimitación del dominio público marítimo terrestre.



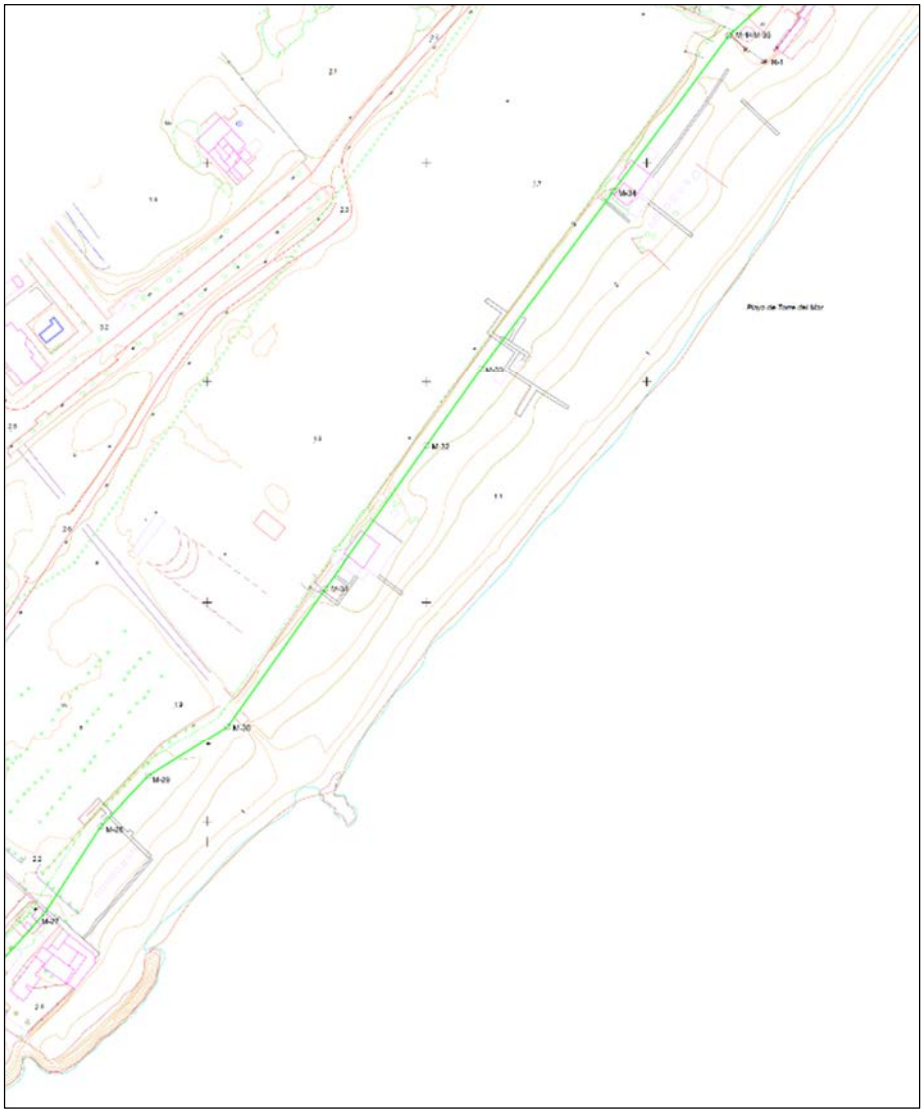
Del M-26 al M-27.

El avance de la regresión de la costa en este sector y la invasión de las arenas de origen marino sobre los terrenos de la formación deltaica fueron contenidos en este pequeño tramo al construirse varias obras de defensa frente al avance del mar. Dado su carácter puntual, las defensas no consiguieron evitar la penetración de agua y arena hacia el interior durante los temporales produciendo acumulaciones de arena alrededor de las edificaciones.



Del M-27 al M-35.

Este tramo, según se indica en el proyecto de deslinde de1995, tenía características similares a los tramos M-1 a M-8 y M-20 a M-26, coincidiendo el límite interior del DPMT propuesto entonces con el límite interior de las acumulaciones de arena de la playa y de los mantos eólicos arenosos que avanzan tierra adentro debido a la regresión de la costa en el delta del río Vélez.



A causa de esta severa regresión de la costa debió modificarse durante el apeo la propuesta provisional inicial del deslinde (delimitada en su momento por el límite interior de la arena, en 1995), retranqueando este límite hasta el límite interior de las arenas a fecha del apeo (1996) entre los vértices M-31 y M-34. Se reitera en este tramo "*las modificaciones del entorno físico en esta zona se están produciendo a tal ritmo que la delimitación actual habrá sido invadida por el agua y los depósitos de origen marino en un futuro inmediato".*

"*Esta regresión se está intentando frenar mediante pantallas y muros de contención realizados con materiales sueltos que puedan servir como barrera de fijación del avance de los depósitos de arena. Sin embargo, a pesar del continuo refuerzo y conservación de las barreras no siempre resisten a los grandes temporales invernales, produciéndose fisuras por las que penetra el agua del mar y las arenas".*

Por tanto, el deslinde aprobado en 2005 se basó principalmente en el artículo 3.1.b) de la Ley de Costas, ya que en la mayor parte de los tramos se consideró la extensión de los depósitos de arena como el límite interior del DPMT. Solo en el tramo M-11 a M-20 se consideró que los terrenos formaban parte del demanio en virtud del artículo 3.1.a) de la Ley 22/88, de Costas debido a la existencia en esa delimitación de agua del mar ya que se corresponde con la desembocadura del cauce del río Vélez.

A modo de resumen se transcribe la justificación recogida en la O.M. de 10-3-2005 de aprobación del deslinde:

"Vértices M-1 a M-11 y M-20 a M-35 corresponden al límite interior de espacios constituidos por arenas, gravas y guijarros, y escarpes, con o sin vegetación de influencia marina, por lo que se corresponden con el concepto de playa tal como lo define el artículo 3.1.b) de la Ley de Costas. Se señala que entre los vértices M-8 a M-11 el deslinde coincide con el aprobado por Orden Ministerioal de 22 de septiembre de 1967, ya que más al interior del mismo no existen terrenos con las características demaniales descritas en la Ley".

"Vértices M-11 a M-20, corresponden a situar la línea de deslinde en el punto más al interior que marca el límite interior del río Vélez, donde se hace sensible la influencia marina, por lo que conforme a lo previsto en el artículo 3.1.a) de la Ley de costas forman parte de la zona marítimo terrestre".

Respecto a la servidumbre de protección, al tener en cuenta la situación urbanística a la entrada en vigor de la Ley de Costas de 1988 y los terrenos no se consideraban urbanos, se aplicó la anchura de servidumbre general de 100 metros medidos desde la ribera del mar (artículo 23 de la Ley de Costas) en todo el tramo. Respecto a la servidumbre de tránsito, su anchura se fijó 6 metros (artículo 27).

Debido a la regresión de la costa este deslinde aprobado por O.M. en el año 2005 ha quedado obsoleto ya que, en gran parte del tramo, la delimitación aprobada entonces queda, actualmente, en el mar como puede apreciarse en la siguiente imagen:



Por lo que se puede considerar que existen terrenos con características de ribera del mar que no están incluidos en el dominio público marítimo-terrestre y, por tanto, se hace necesaria una nueva delimitación para actualizar el DPMT a las características del litoral actual.

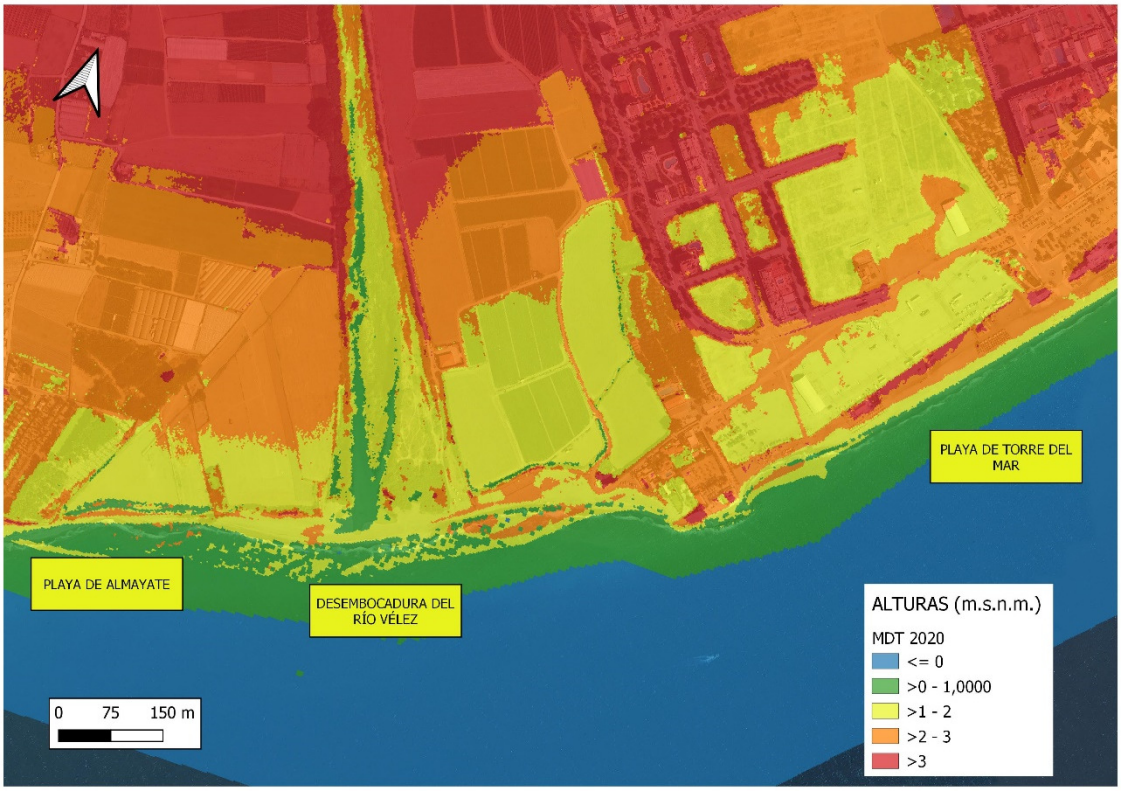
4 ESTUDIOS ESPECÍFICOS Y DE DETALLE DE LA COSTA EN SU ESTADO ACTUAL

4.1 Estudio geomorfológico general del tramo

4.1.1 Distribución de altitudes

El estudio de altitudes y pendientes se realiza en base al modelo digital del terreno (MDT) MDT02 del IGN con resolución de 2m, elaborado desde 2015 hasta la actualidad.

Las características del relieve en el área de estudio concuerdan con el de una morfología típica de playa baja, cuyas altitudes se enmarcan entre las cotas 0 m.s.n.m y 3 m.s.n.m., aumentando progresivamente en franjas paralelas a la costa, donde las mayores elevaciones se encuentran al interior. Se observan variaciones suaves en las cotas, característico de un relieve plano.



Distribución de alturas del relieve en el entorno de la playa de Almayate, desembocadura del río Vélez y playa de Torre del Mar (m.s.n.m.)

En la imagen se pueden observar las dos áreas, a ambos lados del cauce del río Vélez, con distribuciones de altitudes similares, destacando en el lado oriental, los elementos antrópicos (urbanizaciones) que han generado una elevación artificial del terreno mediante rellenos.

Hacia el oeste, el incremento de alturas desde la costa hacia el interior es progresivo y sin irregularidades. Se destaca una formación paralela a la costa con altitudes entre 2 y 3 m.s.n.m., coincidente con formaciones arenosas, que podrían formar parte de estructuras dunares, ya sean de origen natural o antrópico para protección de las tierras de cultivo.

4.1.2 Distribución de pendientes

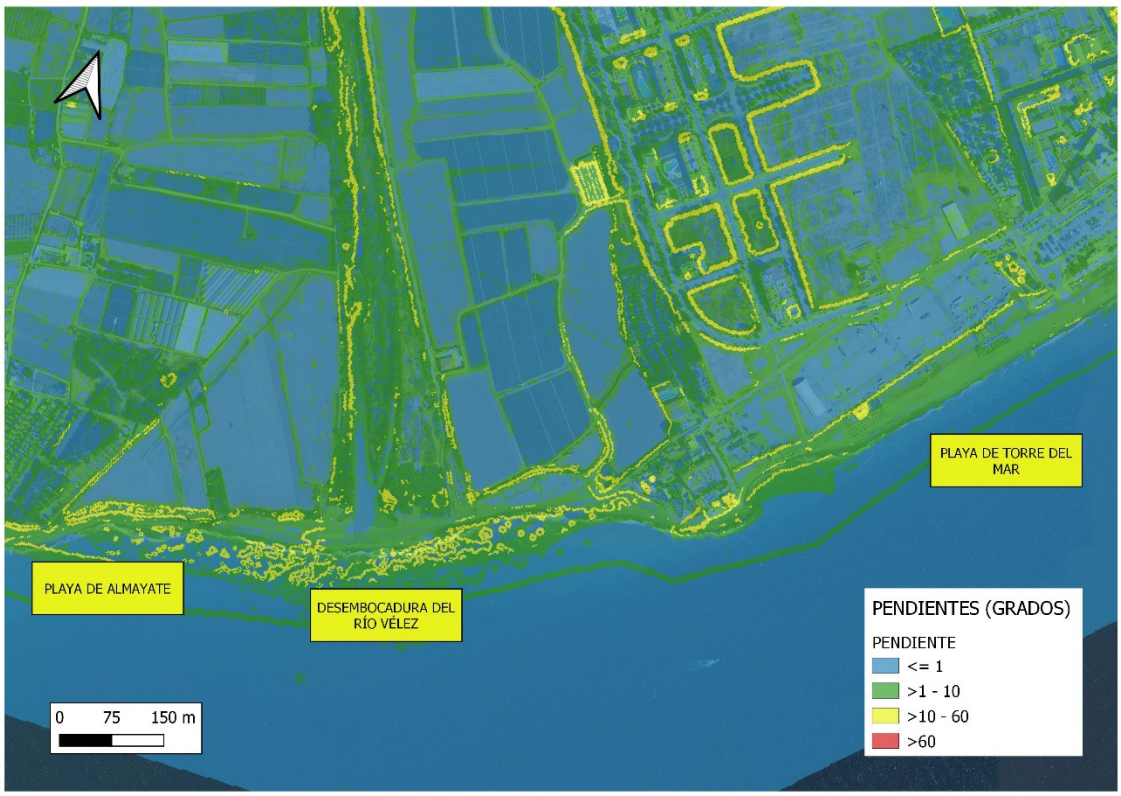
Predominan las pendientes inferiores a 1º, como corresponde a un entorno de playa baja y tramo bajo de una cuenca fluvial (próximo a su desembocadura).

Sólo se observan pendientes superiores de forma puntual o alineadas en estructuras tanto antrópicas (carreteras, parcelas urbanizadas, etc.) como en elementos naturales (cauce del río Vélez: márgenes de cauce y escarpes).

En este entorno, existen estructuras con pendientes mayores, hasta 60º, que se distribuyen paralelas a la línea de costa:

- La primera, más próxima a la línea de costa, coincidente con el escarpe de la playa y con las escolleras.
- La segunda, coincidente con formaciones arenosas al interior.

Entre ambas líneas de mayores pendientes, se extiende la playa con pendientes inferiores a 1º, características de playa baja.



Distribución de pendientes en el entorno de la playa de Almayate, desembocadura del río Vélez y playa de Torre del Mar (en grados sexagesimales).

4.1.3 Contexto geológico

La información geológica ha sido extraída de la hoja 1054, de Vélez-Málaga, del MAGNA 1/50.000 del IGME.

A pesar de que la expansión urbanística hace difícil la observación de las características del área de estudio, podemos observar amplias playas, con bermas variables, aunque en general suaves. En las playas hay arena gruesa y guijarros formados principalmente por sedimentos fluviales procedentes del río Vélez. En la desembocadura, los vientos dominantes de levante favorecen el desarrollo de cordones litorales paralelos a la costa avanzando hacia el W. Se observan formaciones arenosas compatibles con estructuras dunares, hoy día muy poco perceptibles.

Las playas de Almayate y Torre del Mar se localizan en las márgenes derecha e izquierda, respectivamente, de la desembocadura del río Vélez. Las condiciones de aridez y torrencialidad de las lluvias favorecen la formación de playas en el entorno de la desembocadura, compuestas, en su mayor parte, por sedimentos fluviales procedentes del río Vélez. Dichos aportes han ido reduciéndose en las últimas décadas, lo que favorece el proceso de regresión del delta del río

Vélez que, a su vez, propaga dicha variación en la línea de costa, generalizándose las fuertes alteraciones del balance sedimentario de las playas.

Desde 1988, un 19,5% de la cuenca está controlada por un embalse y desde 1995 se han construido siete pequeñas presas que dan lugar a que un 65% de la cuenca del río Vélez tenga algún tipo de control (Senciales, J.Mª. y Malvárez, G. 2003). Así, las cargas sedimentarias quedan retenidas en las presas de forma que, en seis años, dichas presas ya presentaban problemas de mantenimiento, tanto por entarquinamiento como por bloqueo de las tuberías de conexión a embalse.

Los materiales que componen el entorno de la zona de estudio están compuestos por sedimentos Cuaternarios.

- Neógeno y Cuaternario

En toda la zona de estudio predominan los materiales del Holoceno formados principalmente por sedimentos aluviales y arenas de playa, aunque también se han agrupado, dentro del mapa geológico, términos que comprenden algunas acumulaciones de gravas o gravas finas.

Existe una sedimentación marina durante el Plioceno cuyos sedimentos llegan a estar en la actualidad a varias decenas de metros por encima del nivel del mar. En el sector de Vélez-Málaga están formados principalmente por margas y limos.

- Cuaternario marino
  - Playas actuales

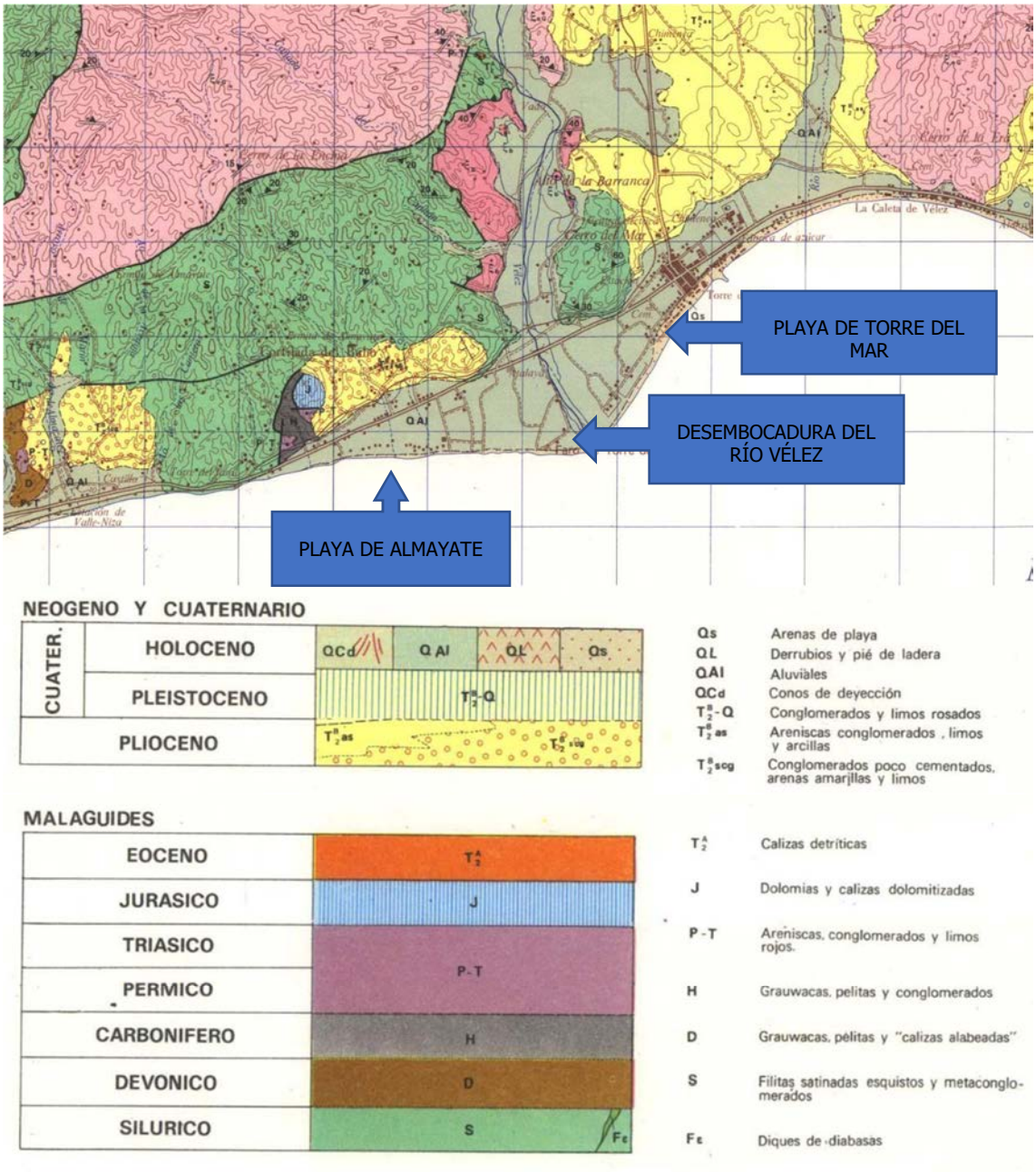
Los depósitos de playas son de escasa anchura. Las granulometrías suelen ser bastas, con litologías de formaciones más o menos próximas, especialmente paleozoicas que son las que afloran en la región con mayor extensión.

  - Dunas costeras

Las dunas costeras que actualmente son visibles con más facilidad se encuentran en las proximidades de la playa de Almayate y delta del río Vélez.

- Cuaternario continental
  - Aluviales

En el delta del río Vélez alcanzan gran extensión y potencia. Se sitúan a pocos metros sobre el cauce actual. En nuestra zona de estudio, se localizan en contacto discordante, ocupando la llanura de inundación del río Vélez, en el área próxima a la playa de Almayate y Torre del Mar. La cuenca del río Vélez ha estado sometida a una intensa erosión, debida a fenómenos como la transformación brusca en el uso del suelo. Esto permitió que, en unos cinco siglos, se desarrollase un extenso aparato deltaico en la desembocadura del río. En este delta se acumulan facies típicas de llanura deltaica, de granulometría más fina.



Información geológica de la hoja nº 1054 de Vélez Málaga, del MAGNA 50 del IGME.

4.1.4 Dominios morfogenéticos

Encontramos en el área de estudio tres Sistemas Morfogenéticos, dos en el Dominio Marino (litoral y eólico), y uno en el Dominio Continental (fluvio-coluvial). El Dominio Antrópico se define por las formas características de la actividad humana como la ocupación del terreno por urbanizaciones y otras actividades como la agricultura o el transporte.

4.1.5 Dominio morfogenético marino

La forma litoral predominante es de tipo acumulativo, que basa su existencia en el balance entre la cantidad de sedimentos que llega a la costa y la capacidad de las distintas corrientes de transportarlas.

La delimitación del Dominio Morfogenético Marino responde a la identificación realizada mediante fotografías aéreas actuales. En ellas se pueden observar actividades antrópicas contiguas a dicho Dominio que la han modificado sustancialmente. En este apartado se describe el área donde se pueden identificar con claridad las unidades morfogenéticas definitorias del Dominio

Morfogenético Marino. Todas las formaciones superficiales, formas geológicas y unidades morfogenéticas, han sido originadas por la acción del mar conjuntamente con la acción de los vientos de procedencia marina. Asimismo, la acción del mar y de los vientos marinos ha podido modificar también depósitos de origen inicialmente continental.

En el entorno del área de estudio predominan las fisiografías de tipo detrítico.



Dominio morfogenético marino entre la playa de Almayate y la playa de Torre del Mar.

- Playa de arenas y/o gravas

La playa de mayor extensión en la zona de estudio y con menor presión urbanística es la playa de Almayate.



Playa de Almayate. Arena fina y gravas en zona intermareal y berma.

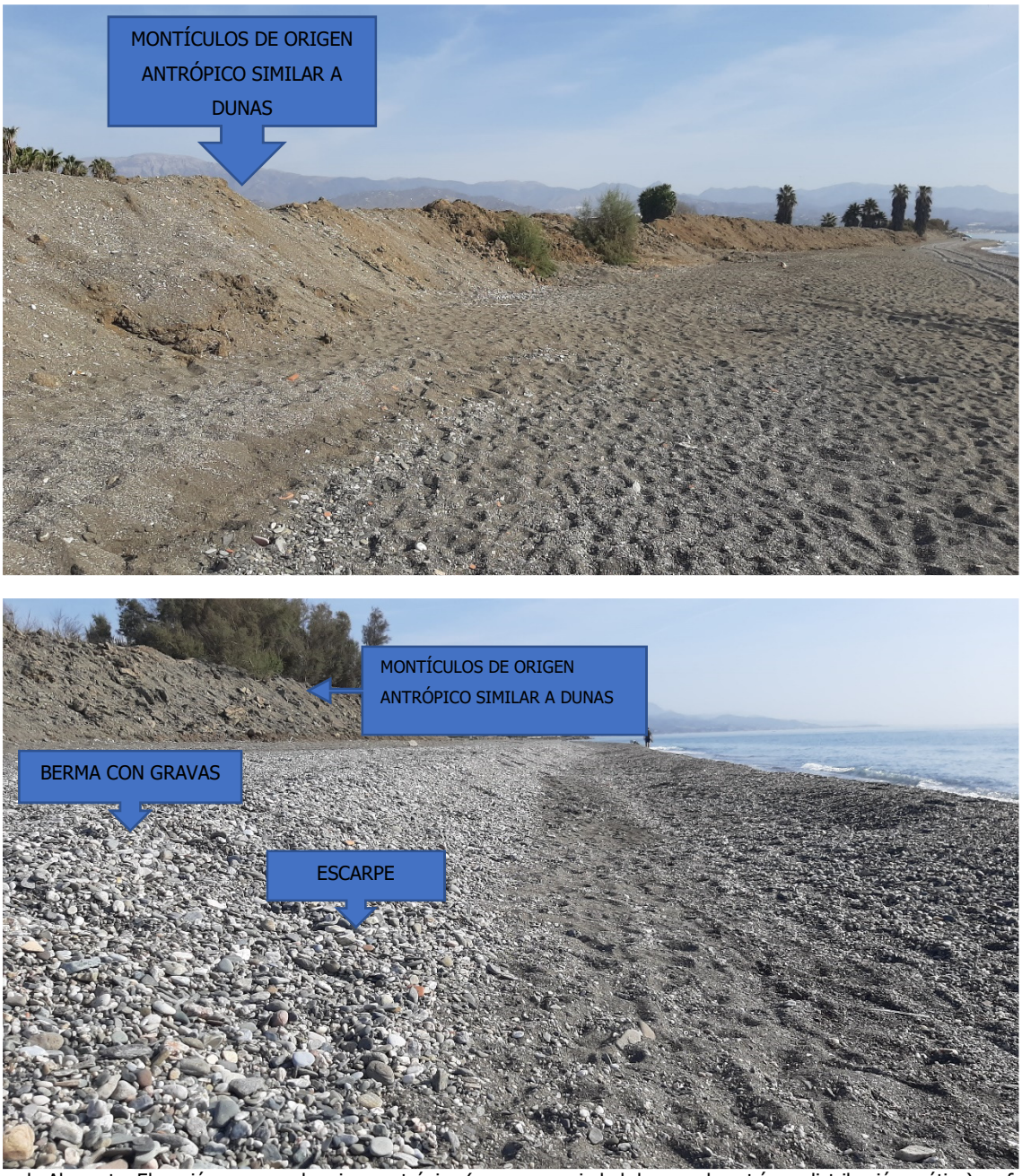
La playa de Torre del Mar ha sido continuamente modificada por construcciones de protección del litoral como escolleras y espigones, habiendo perdido en la actualidad parte de su superficie en comparación con las extensiones registradas en las ortofotos históricas (desde los años 50, aproximadamente).


Escolleras en el extremo occidental de la playa de Torre del mar

Conforma la unidad morfogenética más típica del dominio marino y la predominante en este estudio. La playa tiene un ancho decreciente de oeste a este, con una fácil capacidad de recuperación ante la acción de temporales. Presenta visualmente una arena homogénea de tamaño medio, en torno a un D50 entre 0,5 y 1 milímetro, con zonas o capas superficiales de material granular más grueso sobre la zona intermareal, dependiendo del régimen de temporales incidentes.

- Dunas

Las dunas, como estructuras arenosas que se encuentran alineadas en el frente litoral, tienen un carácter antrópico entorno a la playa de Almayate. Su disposición responde a la necesidad de protección de los cultivos existentes tierra adentro.



Playa de Almayate. Elevación arenosa de origen antrópico (con gran variedad de granulometrías y distribución caótica) en frente litoral para protección de terrenos de cultivo.

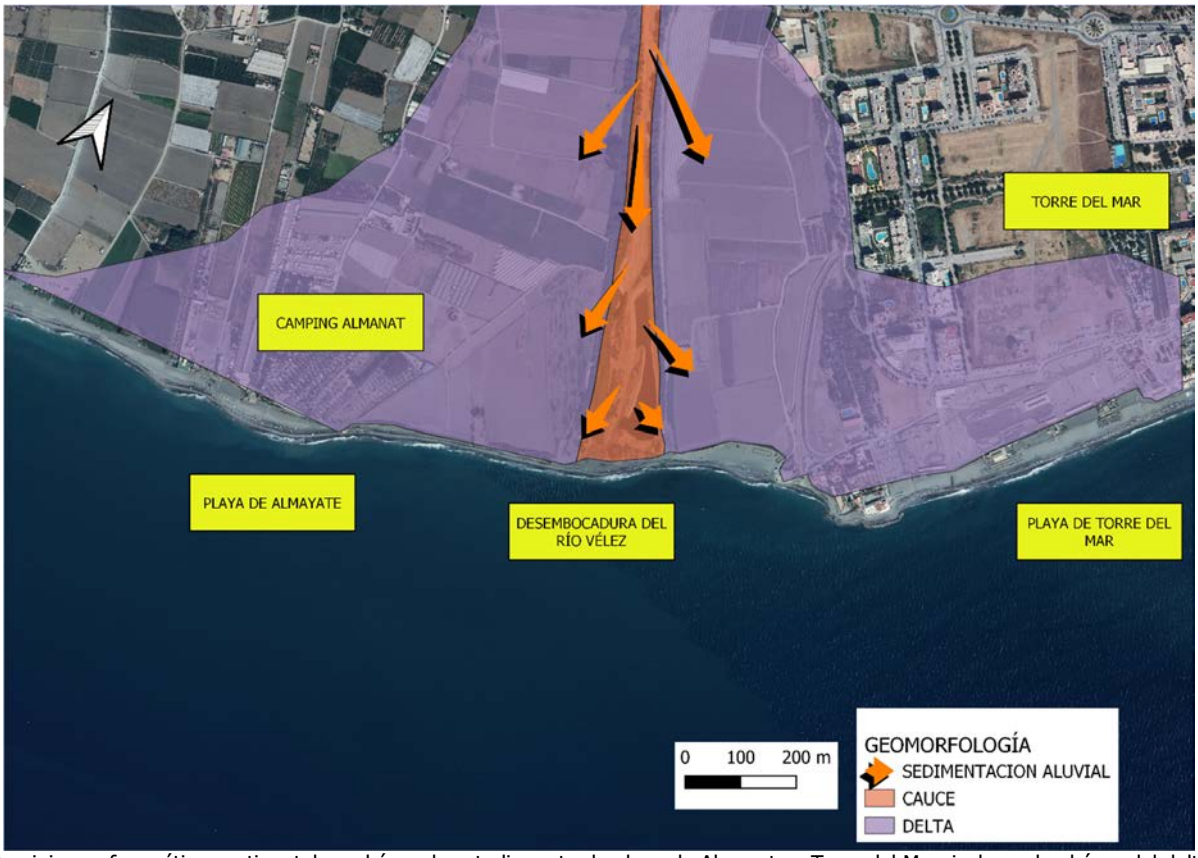
Es necesario el estudio de detalle de esta área con el apoyo del análisis de muestra de sedimentos para poder realizar una delimitación más ajustada del área ocupada por dunas. Los resultados de dichos análisis se muestran en puntos posteriores. No obstante, la zona marcada donde aparecen litologías de arenas sueltas, concordantes, en principio, con dunas, afloran desde la playa de Almayate hasta el delta del río Vélez.



Desembocadura del río Vélez.

4.1.6 Dominio morfogenético continental

En el área próxima a la playa de Torre del Mar, la actividad antrópica, mediante la actividad constructiva, ha modificado las características naturales al interior de la playa y su transición al Dominio Continental, que es inidentificable en este caso por la unión directa entre la zona de playa y el paseo marítimo.



Dominio morfogenético continental en el área de estudio, entre la playa de Almayate y Torre del Mar, incluyendo el área del delta del río Vélez.



Actividad urbanística y turística entorno a la playa de Torre del Mar.

Los elementos principales que se pueden observar son los asociados al sistema morfogenético fluvio-coluvial del río Vélez. Se pueden distinguir las siguientes morfologías vinculadas a este sistema:

- Lechos aluviales actuales
- Cauce del río Vélez
- Llanuras de inundación
- Deltas



Desembocadura del río Vélez.



Cauce del río Vélez en el área donde se desarrolla el delta.

En el extremo occidental de la Playa de Torre del Mar se observa el desagüe de un arroyo que ha sido encauzado, mediante un marco de hormigón, y que procede de la red de drenaje de la llanura de inundación del río Vélez, por encima del área urbana.



Encauzamiento y desembocadura de arroyo en el extremo occidental de la playa de Torre del Mar.

Los cauces han sido modificados, directa o indirectamente, ya sea con actuaciones de encauzamiento o como consecuencia de actuaciones aguas arriba (construcción de embalses y diques), así como el uso intensivo de las márgenes del río por parte de la agricultura, que genera modificaciones en el transporte y erosión de sedimentos y, por tanto, el comportamiento, evolución y desarrollo de la red hidrográfica.

- Delta del río Vélez

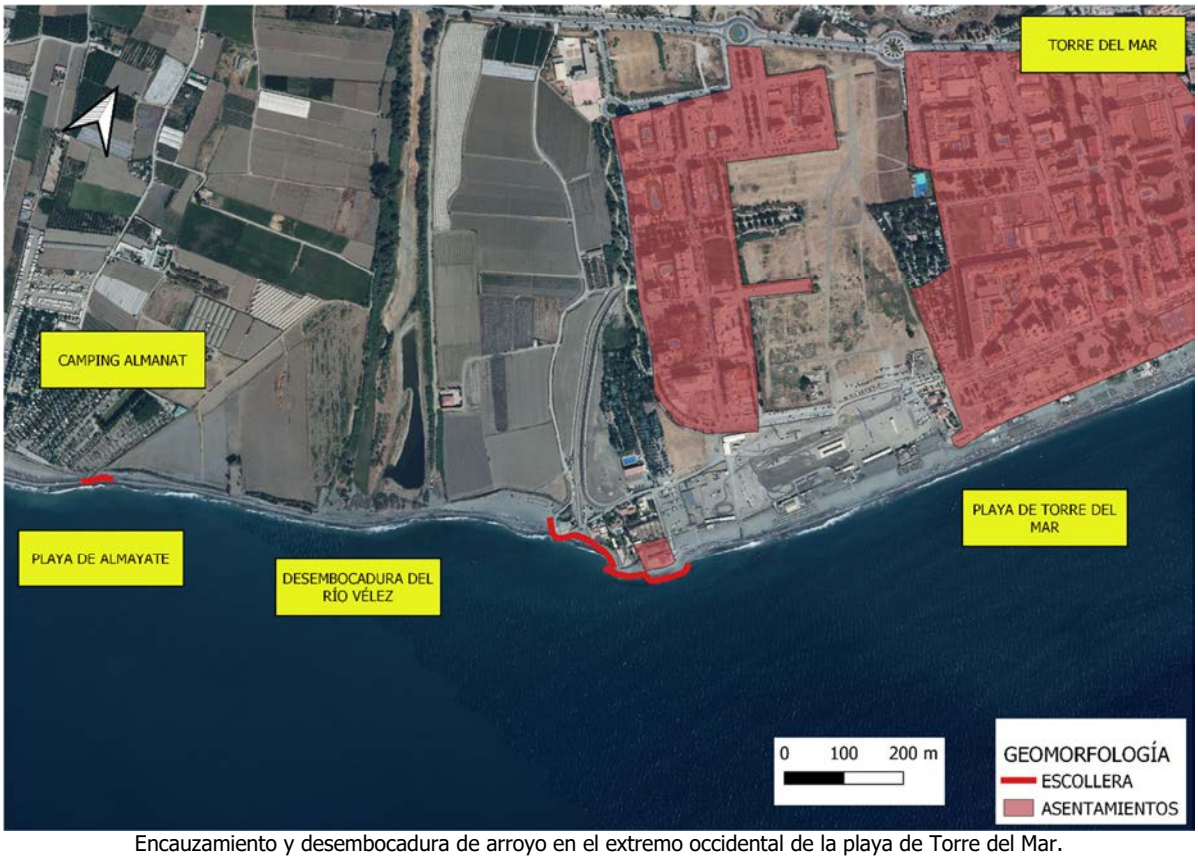
Los procesos de formación deltaica se deben a un predomino de los aportes sedimentarios sobre la capacidad redistributiva del mar.

El delta del río Vélez se forma a partir de los depósitos aluviales que colmatan el antiguo estuario en el periodo Boreal. En la actualidad la llanura de inundación sigue siendo activa, donde el área

del delta presenta dificultades en el drenaje debido a su mayor salinización por intrusiones freáticas marinas por sobreexplotación del acuífero aluvial (García-Aróistegui et al., 1996). Por otra parte, las actuaciones en la cuenca del río Vélez, con sucesivas construcciones de presas y diques, han desviado gran parte de la carga de sólidos, lo que ha afectado a la evolución de la costa en las últimas décadas. Aunque también se observa que la dinámica de degradación del delta ya existía antes de la construcción de dichas presas. Cuando los sedimentos del río son contenidos y encauzados (obras de protección de márgenes), la fluctuación del delta está controlada por las intensidades de la deriva litoral dominada por las direcciones este-oeste, que tienden a mantenerla en equilibrio inestable.

4.1.7 Dominio morfogenético antrópico

Se expone en este apartado aquellas morfologías en cuya formación ha intervenido directamente el ser humano, dando como resultado la modificación del relieve.



Encauzamiento y desembocadura de arroyo en el extremo occidental de la playa de Torre del Mar.

- Acumulaciones

El principal proceso antrópico que se observa en la zona de estudio es el que interviene sobre los esquemas de la refracción del oleaje utilizados como solución a los problemas de erosión de la costa como regeneración de playas y construcción de espigones y escolleras. Estos elementos surgen a partir de la creación de áreas urbanizadas en el extremo occidental de Torre del Mar.

En la desembocadura del delta se observan acumulaciones de escombros mezclados con los materiales deltaicos.

- Asentamientos y ocupación del suelo

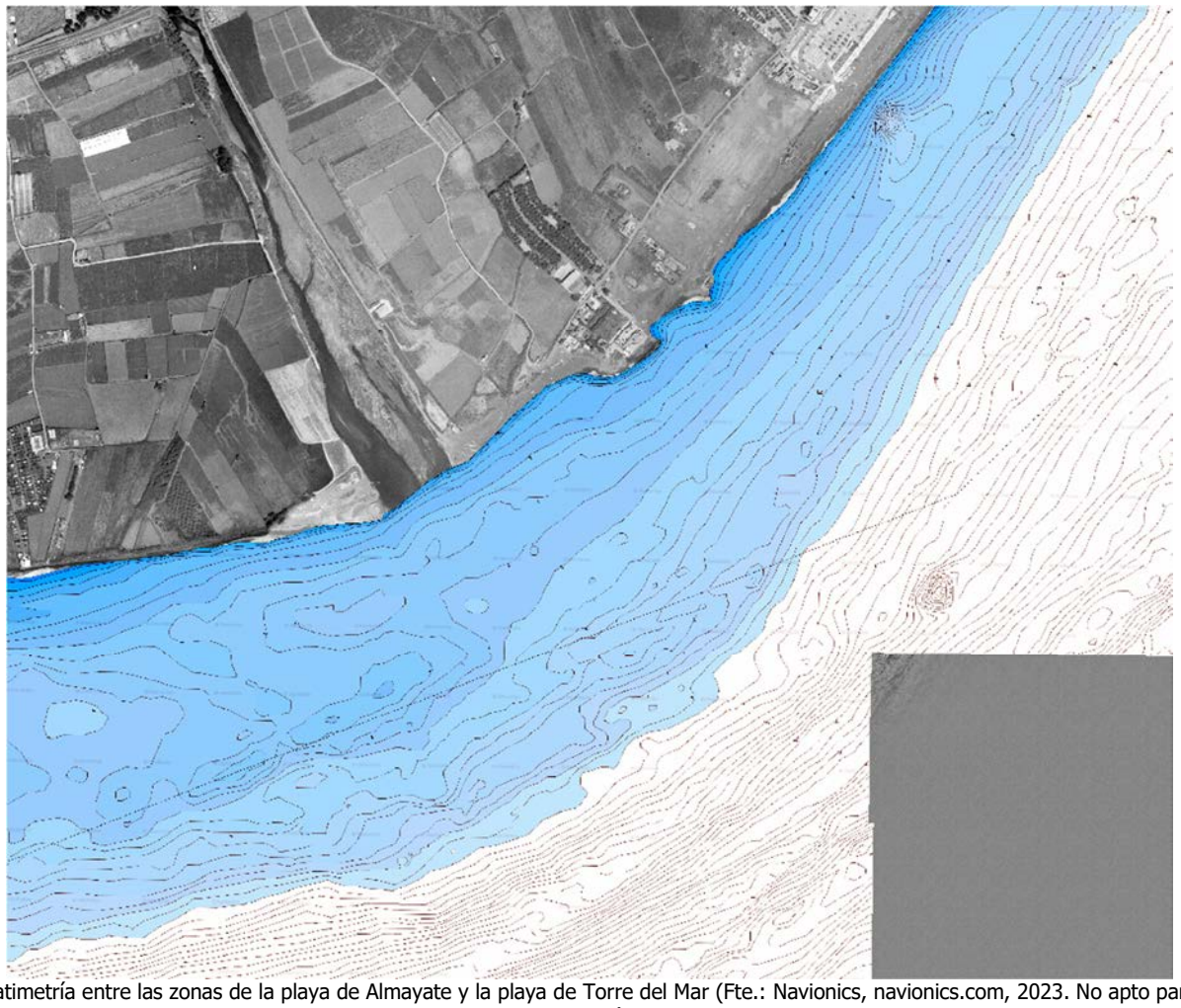
Otra de las actividades antrópicas principales en el área de estudio es la actividad agrícola intensiva, que se desarrolla tras el frente litoral a lo largo de la llanura de inundación del río Vélez. Aunque esta área no se ha trazado en la imagen, el uso agrícola del delta del río Vélez se observa

desde épocas previas al intervalo temporal en el que se enmarca el presente estudio, asentándose dichos elementos en el paisaje tradicional de este entorno. Por otra parte, los asentamientos detectados son principalmente urbanizaciones compactas, que se localizan en Torre del Mar, y que han ido incrementándose en las últimas décadas, acompañándose con otras actividades relacionadas con el sector turístico como el alojamiento (camping) y hostelería.

4.1.8 Morfodinámica del delta del río Vélez

- Batimetría

Nos encontramos en un tramo de costa muy dinámico cuya batimetría nos muestra tres zonas con morfologías bien diferenciadas en las zonas de *nearshore/shoreface*.



Batimetría entre las zonas de la playa de Almayate y la playa de Torre del Mar (Fte.: Navionics, navionics.com, 2023. No apto para navegación).

En la margen izquierda del delta, en la playa de Torre del mar, la orientación de la línea de costa es NE-SW y posee una estrecha zona de surf y una elevada pendiente del nearshore, donde llega a alcanzarse la cota batimétrica 20 m a una distancia de 330 m, aproximadamente, de la línea de costa.

El área frente a la desembocadura del río Vélez es una zona de transición entre una línea de costa con orientación NE-SW hacia una costa (playa de Almayate) con orientación E-W. Se observa una mayor irregularidad batimétrica con ensanchamiento de la zona de nearshore, dando lugar a menores pendientes sin apreciarse de forma clara barras de sedimentos en las proximidades a la desembocadura.

Al oeste del río Vélez, la orientación de la línea de costa es E-W y su batimetría muestra una amplia zona de nearshore con un sistema irregular de doble barra, paralelas a la costa, con un profundo canal intermedio. Se alcanzan profundidades de 20 m a una distancia aproximada de la línea de costa de unos 650 m aproximadamente, lo que demuestra una pendiente menor que en el tramo oriental de la zona de estudio.

- Relación entre la orientación de la línea de costa, morfología de la zona de *nearshore* y su respuesta ante temporales

En los estudios llevados a cabo en el delta del río Vélez sobre la respuesta de la morfología litoral ante temporales, se muestra cómo la orientación de la línea de costa tiene una fuerte influencia sobre el transporte/erosión de sedimentos en el área de *nearshore*.

Los análisis pre-post temporal, teniendo en cuenta el predominio de los temporales de levante que se da en este tramo de costa, dan como resultado que los cambios observados son controlados principalmente por la orientación de la costa y las diferencias morfológicas en el *nearshore* (Backstrom et al. 2008).

En la zona de la playa de Torre del Mar, debido a su orientación NE-SW y con una morfología *nearshore* cóncava con elevada pendiente, permanece estable tras el paso de los temporales de levante, con menor erosión y sedimentación a lo largo de la línea de costa. La desembocadura del río Vélez es un área de transición donde se ensancha la zona de surf que favorece los movimientos de sedimentos. Debido a que la playa de Almayate posee una banda más ancha e irregular de aguas someras, con orientación paralela a los temporales de levante, favorecen un mayor movimiento de sedimentos y erosión entre los 5-8 m de profundidad.

Dado que la zona del delta del río Vélez se encuentra en un área de transición entre una costa con menor tasa de erosión (al E de la zona de estudio) y una mayor tasa de erosión (al W de la zona de estudio), tanto erosión como sedimentación se da a partes iguales como respuesta a los temporales de levante, lo que favorece una reducción del delta en épocas de escasez de aportes por parte del río Vélez (Guisado-Pintado.E, et al. 2015). Por el contrario, los temporales de poniente favorecerían el aporte de sedimentos al W del delta.

5 ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA PARA LA DEFINICIÓN DE SU ESTADO FUTURO Y DEL DPMT.

5.1 Estudio de la evolución de la costa de la desembocadura del río Vélez mediante ortofotografía histórica.

Las ortofotos y vuelos utilizados para el análisis de la evolución de la línea de costa son los que se encuentran disponibles en el Instituto Geográfico Nacional (IGN) y en la Diputación Provincial de Málaga, a través del portal IDEMAP, que cubren la zona de estudio entre la playa de Torre del mar (a levante de la desembocadura del río Vélez) y la playa de Almayate (junto al camping Almanat, a poniente de la desembocadura del río Vélez).

En la tabla siguiente, se detallan las características de las imágenes aplicadas al presente estudio.

NOMBRE	**FECHA**	**RESOLUCION (m) / ESCALA**
PNOA ORTOFOTO PROVISIONAL	AGOSTO-2022	0,25
PNOA MÁXIMA ACTUALIDAD	JULIO-2019	0,25
ORTOFOTO HISTÓRICA PNOA	JUNIO-2016	0,25
ORTOFOTO HISTÓRICA PNOA	MAYO-2013	0,5

NOMBRE	FECHA	RESOLUCION (m) / ESCALA
IDEMAP (DIP. DE MÁLAGA)	2012	0,2
ORTOFOTO HISTÓRICA PNOA	JULIO-2010	0,5
ORTOFOTO HISTÓRICA PNOA	SEPTIEMBRE-2008	0,5
ORTOFOTO HISTÓRICA PNOA	SEPTIEMBRE-2006	0,5
ORTOFOTO HISTÓRICA PNOA	MAYO-2004	0,5
FOTOGRAMA COST260939 VUELO ANDALUCÍA 2001-2003	AGOSTO 2002	1/20000
VUELO QUINQUENAL 1998-2003	AGOSTO-2000	1/40000
FOTOGRAMA 1054024402 VUELO ANDALUCÍA 1998-2001	JUNIO 1999	1/60000
FOTOGRAMA 1054041154 VUELO ANDALUCÍA 1991-1996	FEBRERO 1995	1/20000
FOTOGRAMA 1054046759 VUELO ANDALUCÍA ESCALA 1991-1996	OCTUBRE 1992	1/20000
FOTOGRAMA 1054124644 VUELO ANDALUCÍA 1990	JUNIO 1990	1/25000
FOTOGRAMA 1054026780 VUELO ZONA MOTRIL - MALAGA	MARZO-1988	1/18000
FOTOGRAMA 1054170379 VUELO PERIMETRO COSTERO DE ANDALUCIA	SEPTIEMBRE-1984	1/25000
FOTOGRAMA 1054l_6485 VUELO ANDALUCÍA VUELO NACIONAL IGN AÑO 1984 – 1985	SEPTIEMBRE 1982	1/30000
VUELO INTERMINISTERIAL 1973-1986	JULIO-1977	1/18000
FOTOGRAMA 1054020024 VUELO MOTRIL	ENERO-1965	1/30000
FOTOGRAMA 1054020024 VUELO MOTRIL	1964	1/8000
VUELO AMERICANO (SERIE B) 1956-1957	ENERO-1957	1

Listado de los vuelos y ortofotos aplicados al estudio de evolución de la línea de costa con sus principales características.

El estudio se ha realizado con todas las imágenes disponibles que cubren el área de estudio entre 1957 (vuelo americano Serie "B") y 2022 (PNOA). En este intervalo de tiempo, la producción de imágenes sobre la zona de estudio carece de una regularidad que nos permita crear periodos intermedios homogéneos. Este hecho será un factor a tener en cuenta en la interpretación de los resultados, puesto que no se podrán describir con precisión los posibles fenómenos que hubieran acaecido entre ellos, ya sean de erosión o acumulación de sedimentos en la costa. Por tanto, sólo nos ceñiremos a los resultados obtenidos por las comparativas entre las líneas de costa resultantes de las imágenes expuestas en la tabla anterior.

Para completar este estudio, ha sido necesario establecer una línea interior de referencia, a fin de poder definir una superficie junto con las diferentes líneas de costa resultantes, y así obtener otros valores representativos del estado evolutivo de toda la playa. Dicha línea interior se aplica a modo de referencia, sin pretender establecer el límite de la playa ni del área litoral.

Sin embargo, para esta delimitación nos hemos apoyado en las siguientes cartografías temáticas:

- Mapa de Unidades Fisiográficas del Litoral Andaluz (2003). REDIAM. WMS:

https://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/mapwms/REDIAM_Fisiografia_Litoral_Andaluz

- Mapa Geológico Continuo de España 1/50.000. WMS:

https://mapas.igme.es/gis/services/Cartografia_Geologica/IGME_Geode_50/MapServer/WmsServer

5.1.1 Definición de las líneas de costa y límite de referencia interior

5.1.1.1 *Límite de referencia interior*

La línea de referencia interior del área de estudio se establece en el frente costero que delimita la playa seca, de tal forma, se aplicará como referencia para la medición del desplazamiento interanual de la línea de costa sobre los transectos que se describirán posteriormente. Esta línea de referencia interior se plantea como un límite morfodinámico que, en la práctica, se sitúa en la posición del primero de los siguientes elementos desde la línea de costa hacia tierra, y que se pueden detectar en las fotos aéreas:

- Paseos marítimo o vías de comunicación.
- Frente urbano construido.
- Estructuras de protección costera como muros verticales o escolleras.
- Frente natural vegetado.
- Pie de la duna.

Nos apoyamos, principalmente, en las cartografías mencionadas en el punto anterior para definir el área que se tomará de referencia. Debido a las variaciones interanuales de la línea de costa, se tiene en cuenta los años de edición de dichas cartografías, utilizando de forma conjunta la ortofoto más próxima a dicho año de edición, digitalizando el límite interior como se observa en las imágenes de la página siguiente. Este límite interior se considera una línea de referencia para poder medir, sobre los transectos perpendiculares, los distintos anchos de playa en los años de estudio y poder cuantificar la evolución de la línea de costa.

En el caso del Mapa de Unidades Fisiográficas del Litoral Andaluz (REDIAM, 2003), comparamos las distintas áreas superpuestas sobre la Ortofoto Histórica del PNOA del año 2004, al igual que con el Mapa Geológico Continuo de España 1/50.000, ya que este último comenzó a componerse en el año 2004. Posteriormente comparamos estos límites con las ortofotos más recientes (PNOA, 2022) y constatamos que existen cambios apreciables, por lo que, para poder efectuar los cálculos sobre evolución de la costa, optamos por determinar el límite interior en base a los elementos del territorio que pueden observarse a través de la imagen del PNOA de 2022 que pueden definir el frente litoral.



Trazado de la línea de referencia interior entre la playa de Almayate y playa de Torre del Mar

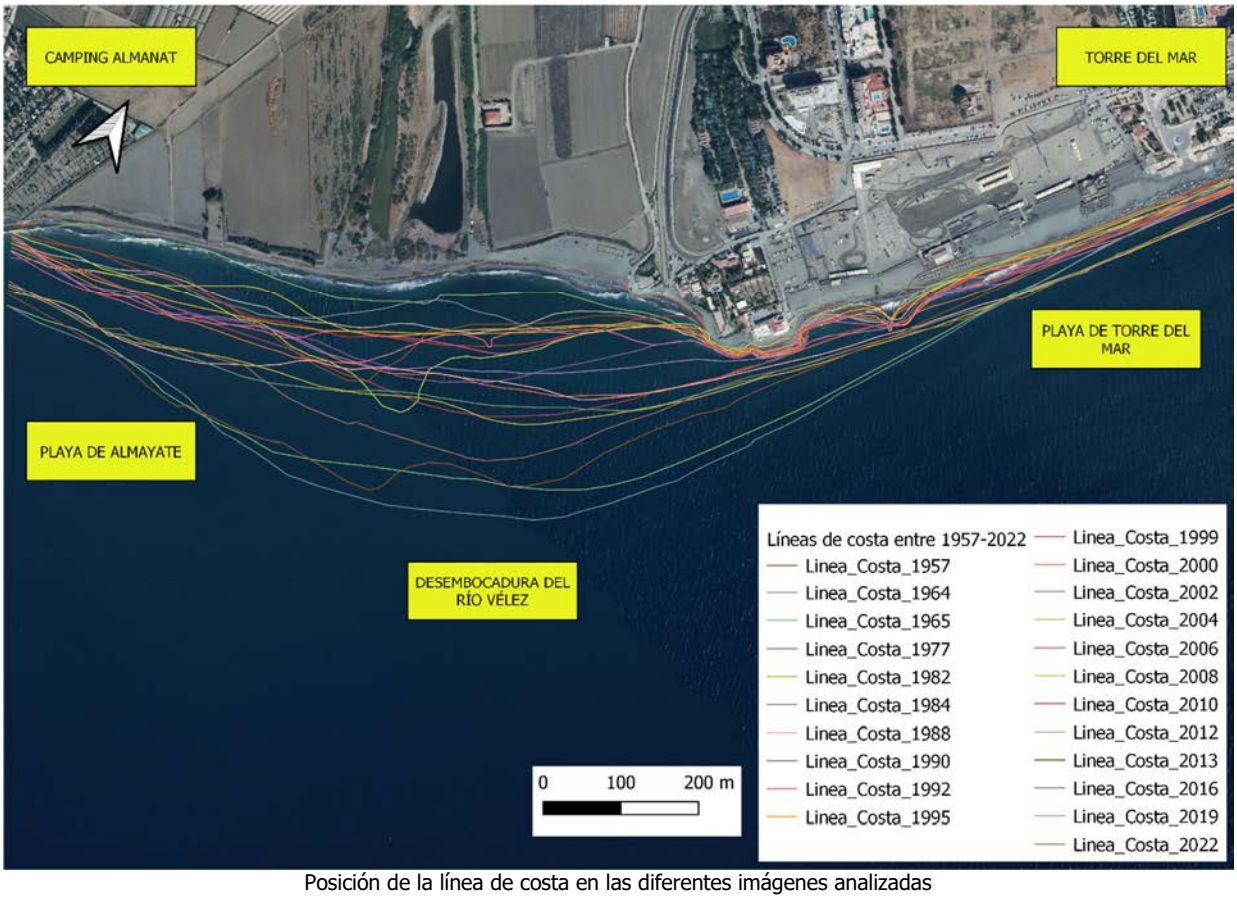


Trazado de la línea de referencia interior entre la playa de Almayate y la playa de Torre del Mar

5.1.1.2 *Líneas de costa*

Como se expone al principio de este capítulo, se han definido 22 líneas de costa, entre el año 1957 y el año 2022, correspondientes, cada una, al año de las distintas ortofotos y vuelos aplicados al presente estudio.

Obtenemos así 22 trazados diferentes que se presentan en las imágenes expuestas en el Anexo 1 del presente estudio.

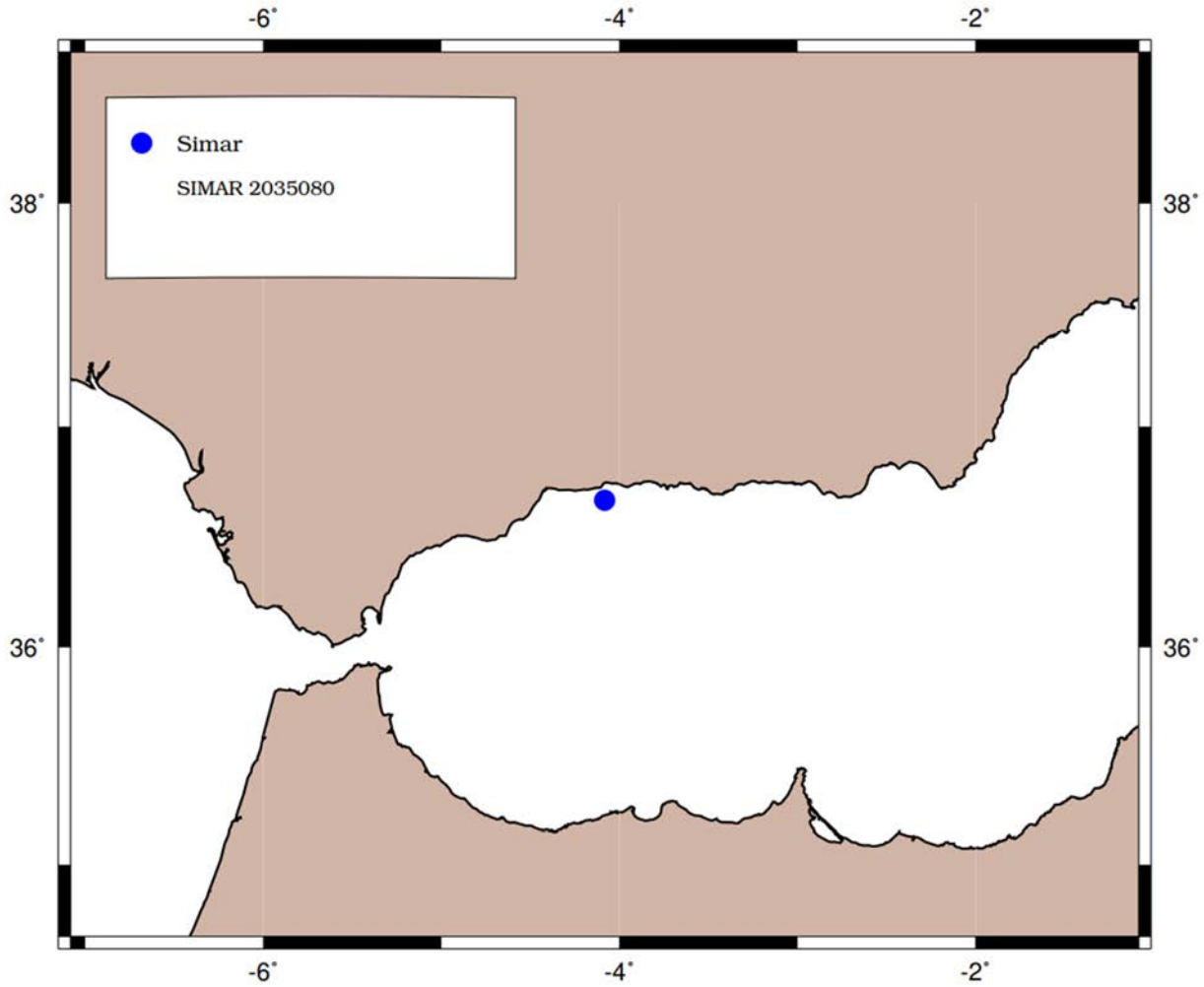


Posición de la línea de costa en las diferentes imágenes analizadas

Pasaremos a describir los cambios en la línea de costa en los periodos establecidos teniendo en cuenta los fenómenos descritos en el punto 4.1.8. del presente estudio y que hacen mención a los trabajos de investigación en el delta del río Vélez de Backstrom *et al*. (2008) y Guisado-Pintado. E *et al*. (2015), para ello, tendremos en cuenta los datos históricos de oleaje proporcionados por el punto SIMAR 2035080 perteneciente a Puertos del Estado y cuya localización es:

Longitud: -4.083 E

Latitud: 36.667 N



Posición del punto SIMAR 203580 (Fte.: Puertos del Estado. 2023)

- Línea de costa de 1957

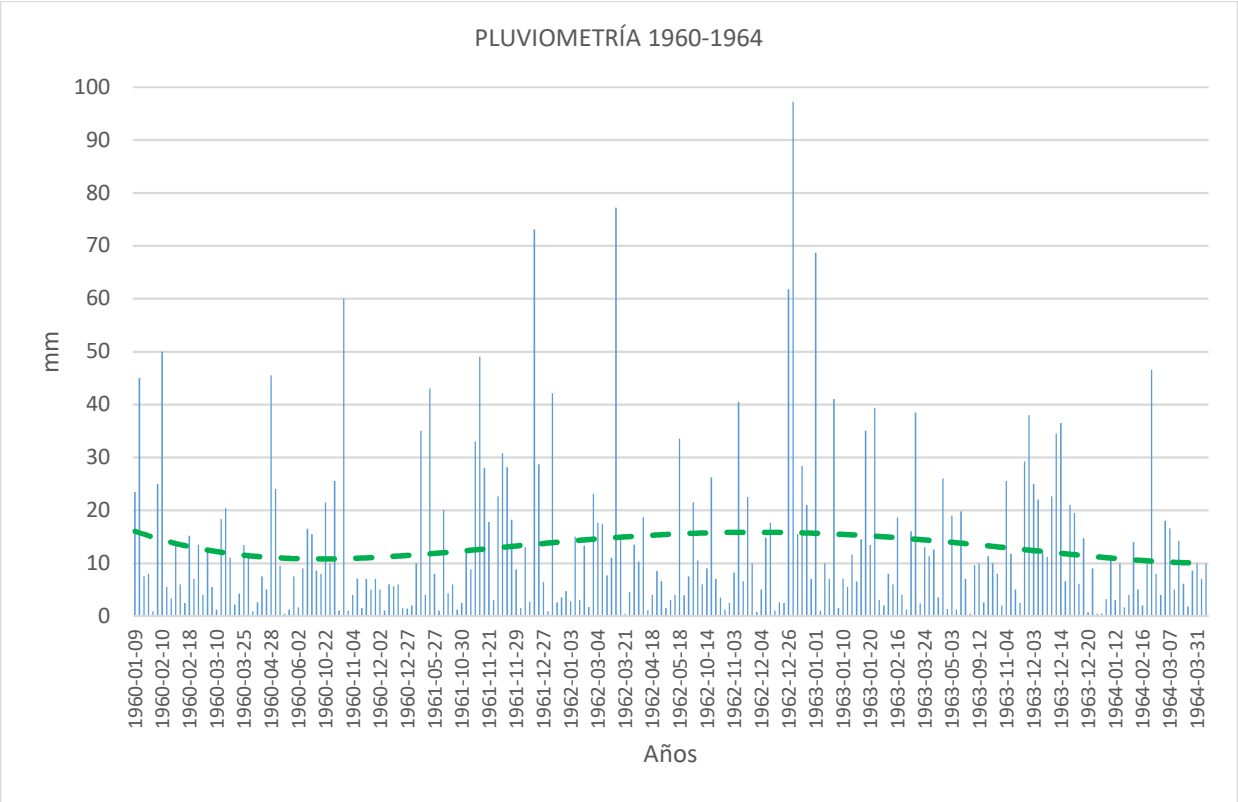
La línea de costa de 1957, trazada sobre el Vuelo Americano Serie "B" (1956-1957), muestra una costa rectilínea, tanto en la playa de Almayate como en la playa de Torre del Mar, con escasos elementos antrópicos que generen rupturas o discontinuidades. Dicha antropización sólo se observa al interior, con pequeñas edificaciones aisladas y ocupaciones agrícolas en ambas márgenes del río Vélez. Se aprecia una morfología bien desarrollada del delta del río Vélez, adentrándose en el mar hasta 250 m con respecto a la costa de Almayate.

- Línea de costa de 1964

La línea de costa de 1964, al igual que en 1957, conserva el trazado rectilíneo tanto en la zona próxima a Almayate como en la playa de Torre del Mar. El delta del río Vélez conserva su superficie y morfología donde los cambios en la línea de costa se deben a la dinámica y balance natural de sedimentos.

Aún no existen grandes obras hidráulicas en la cuenca del río Vélez que condicionen una variación importante del flujo de sedimentos hacia el delta.

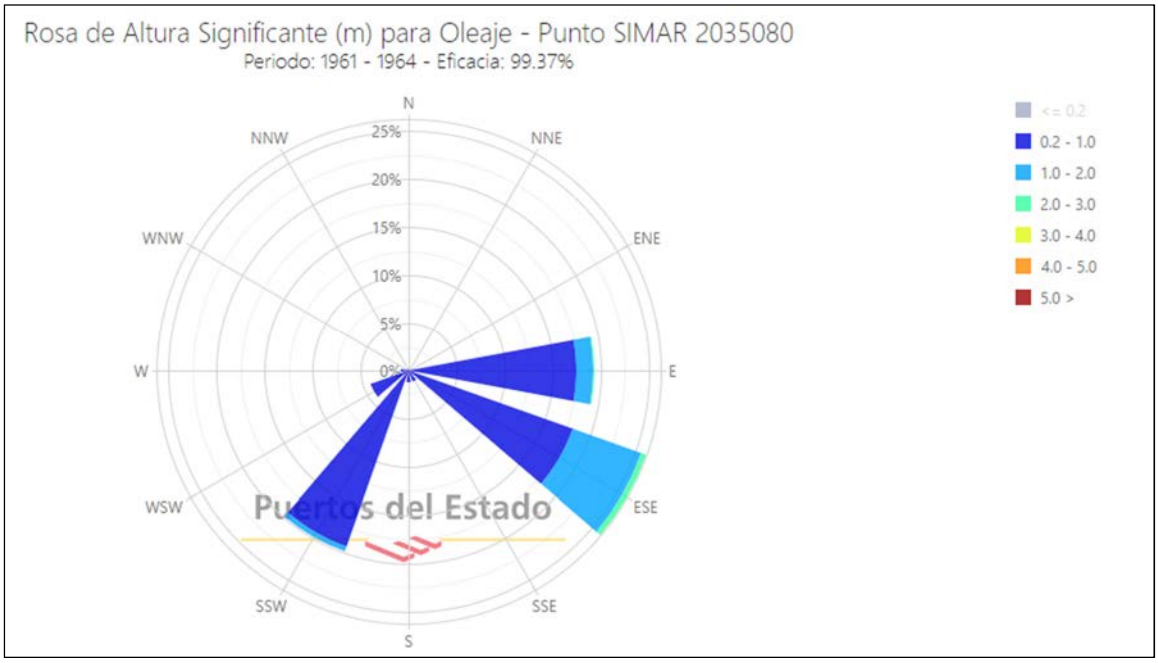
Atendiendo a los datos de precipitaciones en los cuatro años precedentes a 1964 y cuya distribución se observa en la gráfica siguiente, se observa que el perfil de costa del año 1964 se sitúa en un momento en el que finaliza un largo periodo de elevadas precipitaciones como indica la curva que forma la línea de tendencia entre 1961 y 1964.



Intensidad pluviométrica de los años 1960-1964 (Fte.: AEMET. Estación meteorológica Málaga-Aeropuerto. 2023)

Por lo que se deduce un aumento de los aportes de sedimentos fluviales en el entorno de la costa del delta del río Vélez.

El efecto del predominio de los temporales de levante entre esos años, tal y como se observa en la imagen, unido a un aumento de aportes de sedimentos fluviales, y conforme a los descrito en el punto 4.1.8. del presente estudio, dan como resultado un movimiento progresivo en la mitad oriental de la zona de estudio, manteniéndose la línea de costa a poniente del río Vélez en una situación estable con una regresión leve, tal y como se observa en la imagen correspondiente a los procesos regresión/progresión para este periodo.



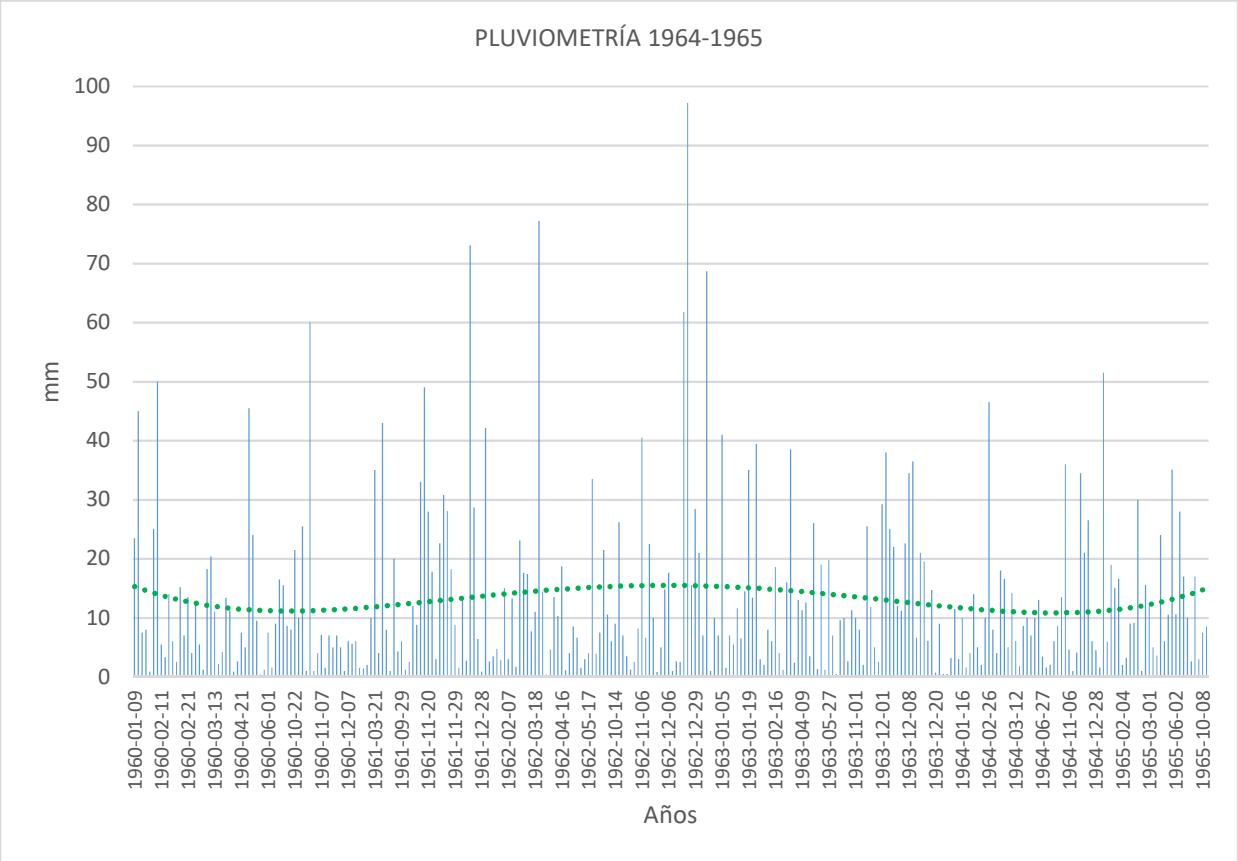
Alturas significantes de oleaje (m). (Fte.: Puertos del Estado. 2023)

- Línea de costa de 1965

La línea de costa de 1965 no aprecia grandes cambios con respecto a 1964. Aún no se aprecian modificaciones en el área litoral que afecten a su dinámica como grandes actuaciones urbanísticas, cambios en los usos de suelo o intervenciones de tipo estructural como espigones o escolleras. Por lo que las formas rectilíneas de la costa y el delta del río Vélez son aún perceptibles y no existen grandes movimientos regresivos.

Al igual que en el periodo anterior, aún no existen grandes obras hidráulicas en la cuenca del río Vélez que condicionen una variación importante del flujo de sedimentos hacia el delta.

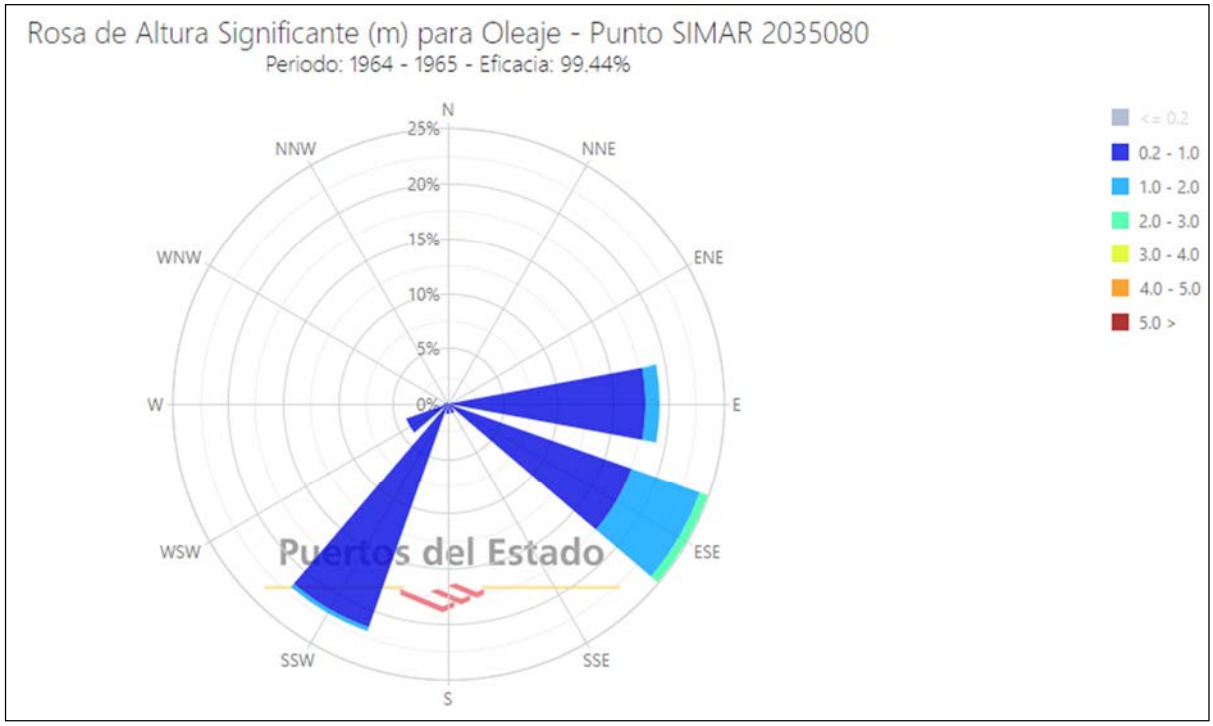
Atendiendo a los datos de precipitaciones entre 1964 Y 1965 y cuya distribución se observa en la gráfica siguiente (se muestra como continuación de la gráfica anterior para poder poner en contexto este último año), se observa que el perfil de costa del año 1965 se sitúa en un periodo de bajas precipitaciones como indica la curva que forma la línea de tendencia entre 1964 y 1965.



Intensidad pluviométrica de los años 1960-1965 (Fte.: AEMET. Estación meteorológica Málaga-Aeropuerto. 2023)

Por lo que se deduce un descenso de los aportes de sedimentos fluviales en el entorno de la costa del delta del río Vélez en comparación con el periodo precedente.

Existe un predominio de los temporales de levante entre esos años (0.9% del oleaje registrado con Hs superior a 2 m), tal y como se observa en la imagen siguiente, sin embargo, la intensidad de estos fenómenos, según ola significante y periodo, es mucho menor que en el periodo anterior. Unido a un descenso de aportes de sedimentos fluviales, y conforme a los descrito en el punto 4.1.8. del presente estudio, dan como resultado un movimiento regresivo generalizado en todo el tramo de estudio.



Alturas significantes de oleaje (m). (Fte.: Puertos del Estado. 2023)

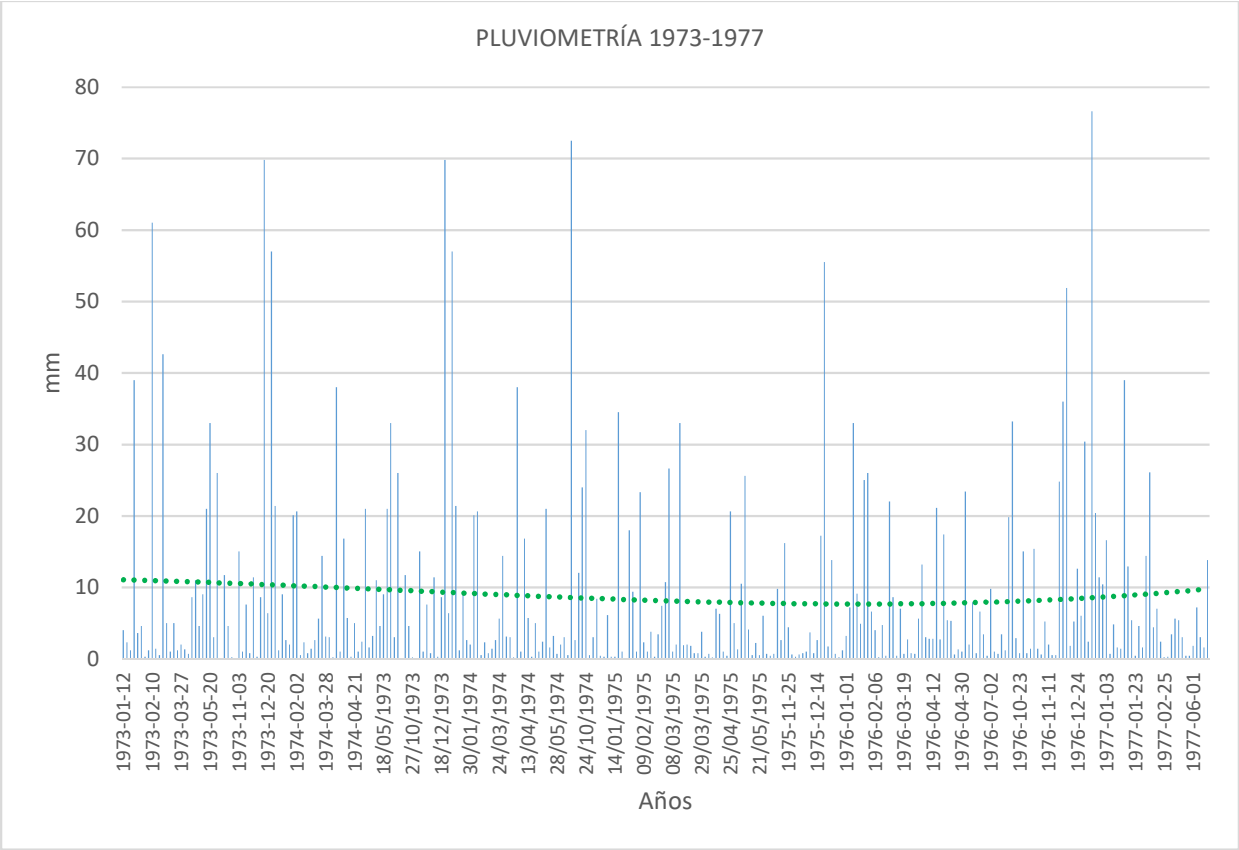
- Línea de costa de 1977

La línea de costa de 1977, trazada sobre el Vuelo Interministerial del año 1977, al igual que en años anteriores, tiene forma rectilínea en su mayor parte. No obstante, se observan grandes cambios en la ubicación de la línea de costa entorno al delta del río Vélez, donde se observa una regresión que ha hecho desaparecer algunas parcelas agrícolas que estaban próximas a la costa en el año 1957.

No se observan otras modificaciones de origen antrópico, al margen de la actividad agrícola preexistente, próxima a la costa o con incidencia directa a ésta.

Al igual que en el periodo anterior, aún no existen grandes obras hidráulicas en la cuenca del río Vélez que condicionen una variación importante del flujo de sedimentos hacia el delta.

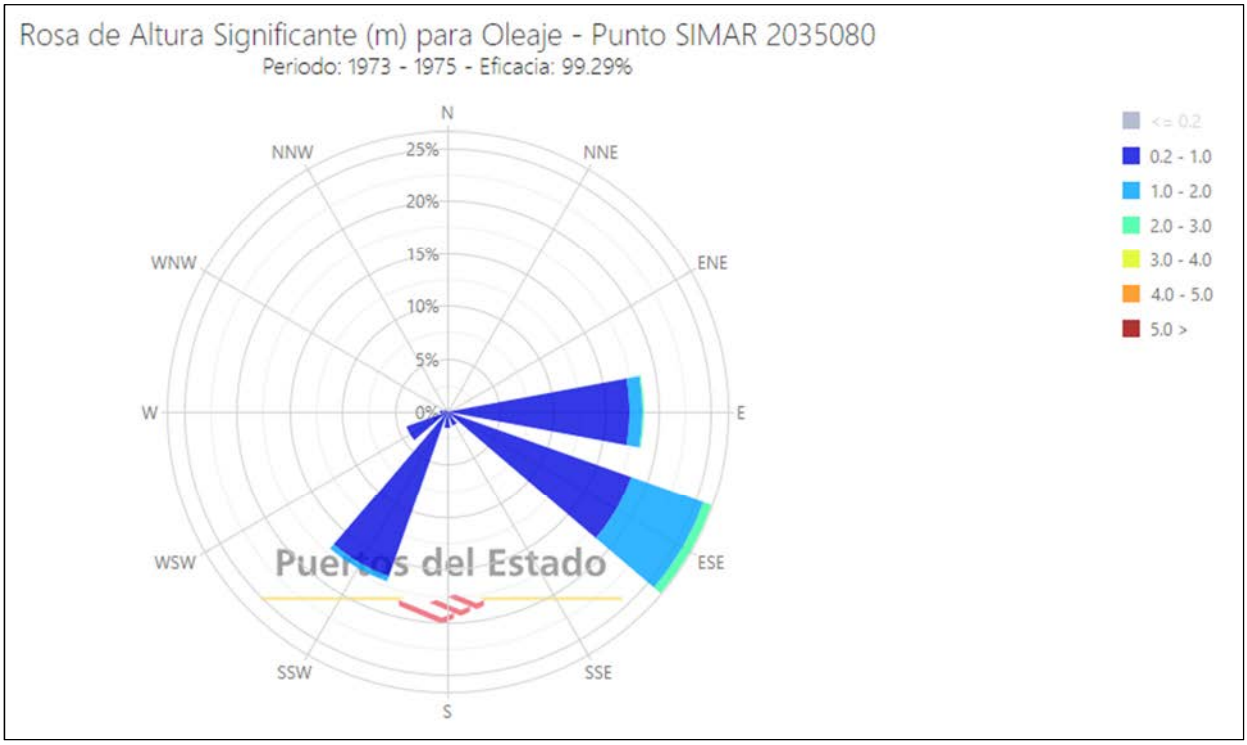
Atendiendo a los datos de precipitaciones de los cuatro años previos a 1977, que pueden condicionar en mayor medida la situación final de la evolución de la línea en este periodo, y cuya distribución se observa en la gráfica siguiente, se observa que el perfil de costa del año 1977 se sitúa al final de un periodo de bajas precipitaciones como indica la curva que forma la línea de tendencia entre 1973 y 1977.



Intensidad pluviométrica de los años 1973-1977 (Fte.: AEMET. Estación meteorológica Málaga-Aeropuerto. 2023)

Por lo que se deduce un descenso de los aportes de sedimentos fluviales en el entorno de la costa del delta del río Vélez en los últimos años de este periodo de estudio.

Existe un predominio de los temporales de levante entre esos años, tal y como se observa en la imagen siguiente, sin embargo, la intensidad de estos fenómenos, según ola significante y periodo, es mucho menor que en el periodo anterior (0.65% del oleaje registrado con Hs superior a 2 m). Unido a un descenso de aportes de sedimentos fluviales, y conforme a los descrito en el punto 4.1.8. del presente estudio, dan como resultado un movimiento regresivo generalizado en todo el tramo de estudio.



Alturas significantes de oleaje (m). (Fte.: Puertos del Estado. 2023)

- Línea de costa de 1982

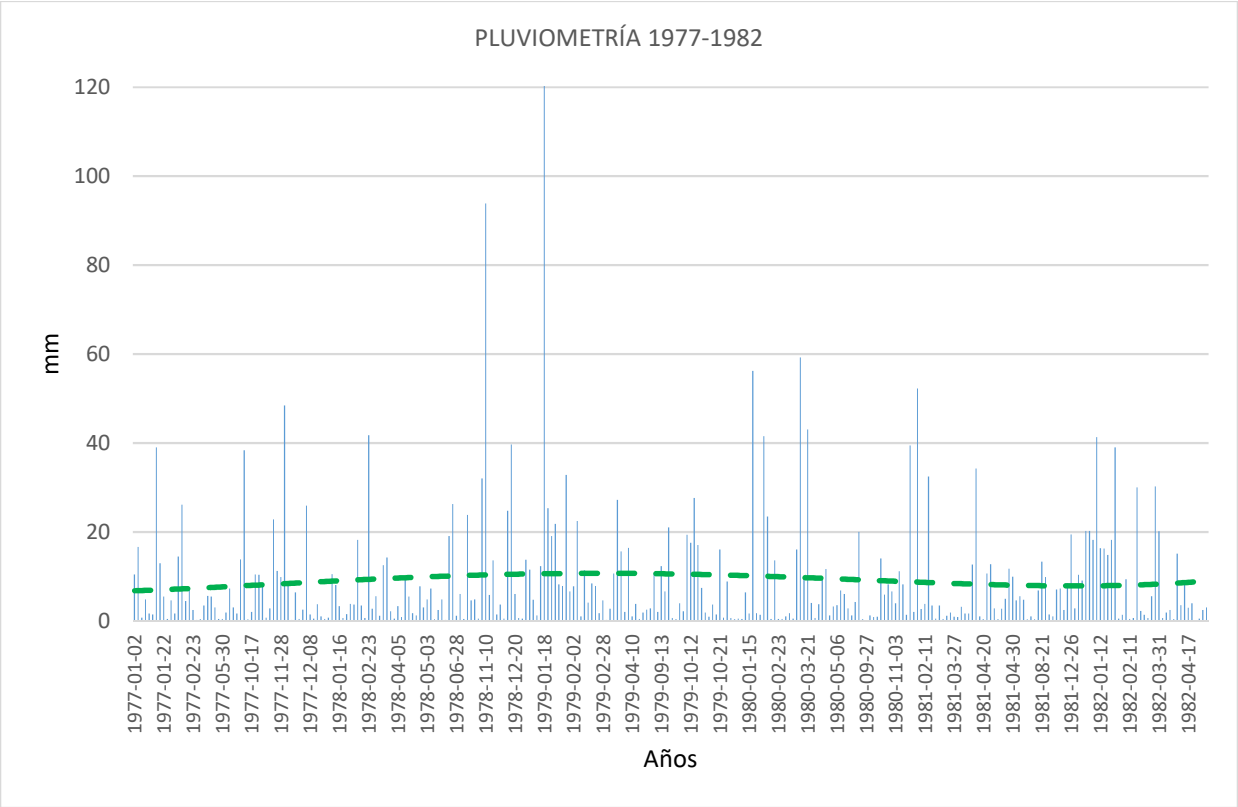
La línea de costa de 1982 muestras grandes cambios con respecto a los años precedentes.

Los movimientos regresivos son generalizados y se mantienen en el tiempo (comparado con 1977) a lo largo de todo el tramo de estudio, dando como resultado una línea más irregular en la playa de Almayate, mientras que en la playa de Torre del Mar se conserva las formas más rectilíneas, principalmente, motivada por un incremento en las labores de restauración del litoral debido a la creciente actividad turística que demanda una playa estable, mejor conservada.

Por otra parte, la regresión en el delta del río Vélez es más pronunciada, habiendo desaparecido de la línea de costa la morfología característica de este tipo de accidente geográfico.

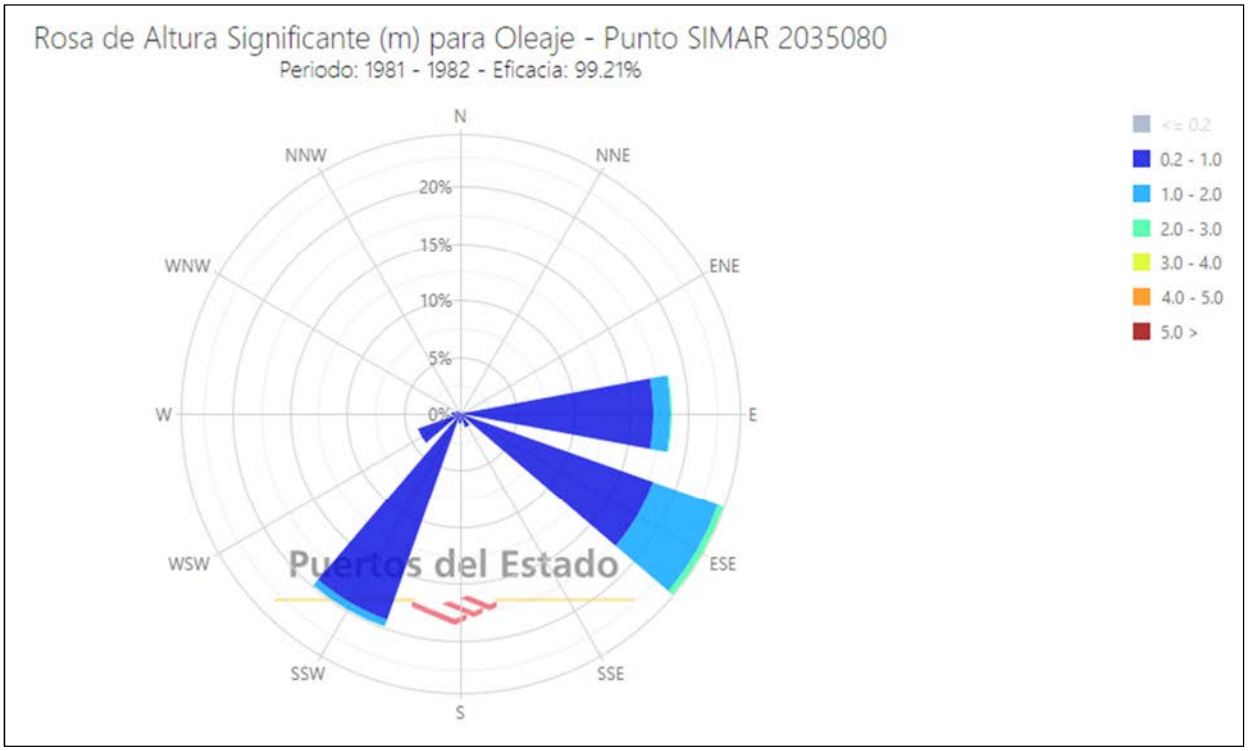
La presa de La Viñuela se sitúa cerca de la desembocadura del río Vélez (a unos 20 km). Comienza su construcción en este año 1982, prolongándose los trabajos hasta finales de 1988.

Según la distribución de las precipitaciones entre 1977 y 1982, se observa un máximo de precipitacines en 1979 y, posteriormente, un descenso paulatino desde 1980, lo que favorece que, en los últimos dos años de este periodo, haya habido un descenso en los aportes de sedimentos del río Vélez a la costa.



Intensidad pluviométrica de los años 1977-1982 (Fte.: AEMET. Estación meteorológica Málaga-Aeropuerto. 2023)

Por otra parte, se observa que continúa el predominio de los temporales de levante en estos años, sin embargo, en el último año, incrementa el oleaje de poniente que reduce la erosión en la playa de Almayate y la incrementa tanto en la desembocadura como al E del río Vélez, hacia la playa de Torre del Mar.

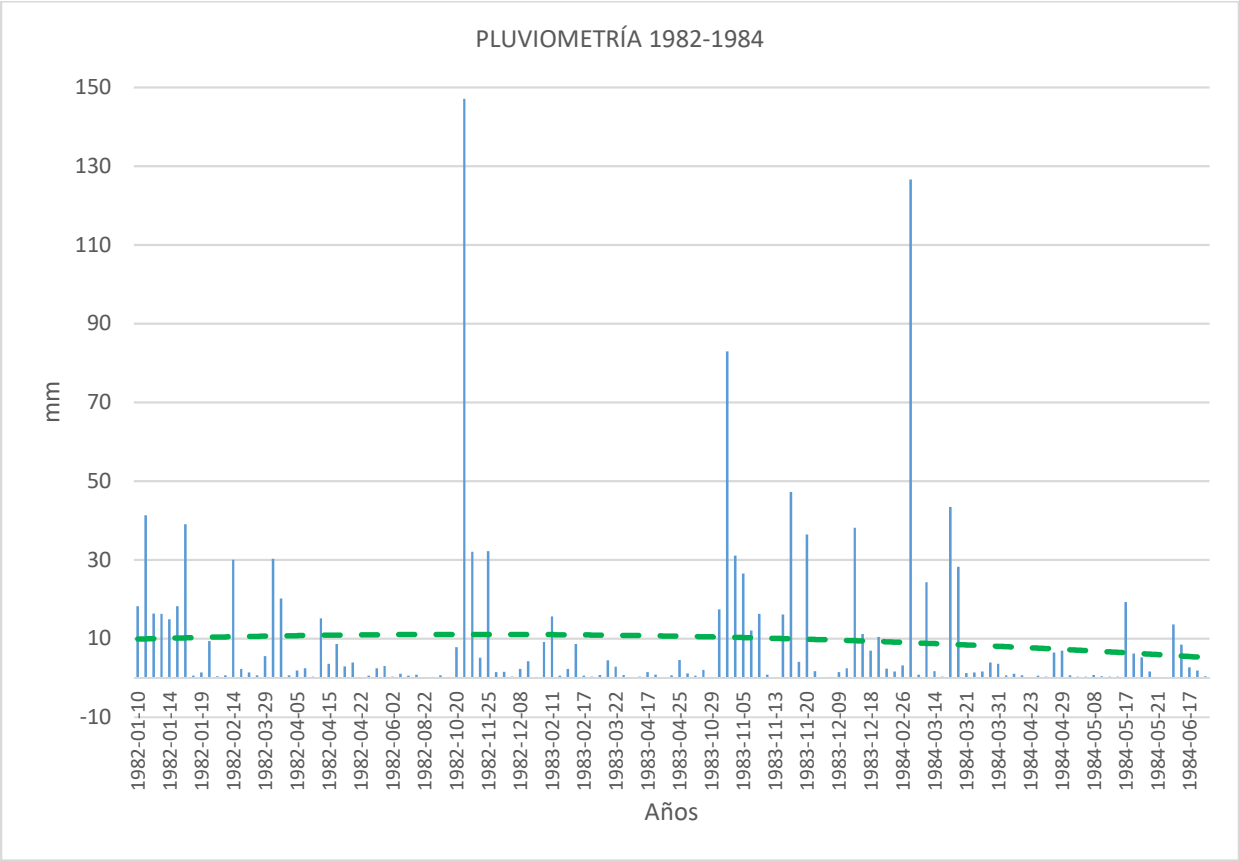


Alturas significantes de oleaje (m). (Fte.: Puertos del Estado. 2023)

- Línea de costa de 1984

La línea de costa de 1984 no tiene grandes cambios con respecto a 1982. Las playas de Almayate y Torre del Mar conserva su forma rectilínea con las irregularidades que comenzaron en 1977 y se confirma la progresiva desaparición del delta del río Vélez con un incremento en la regresión en dicha área.

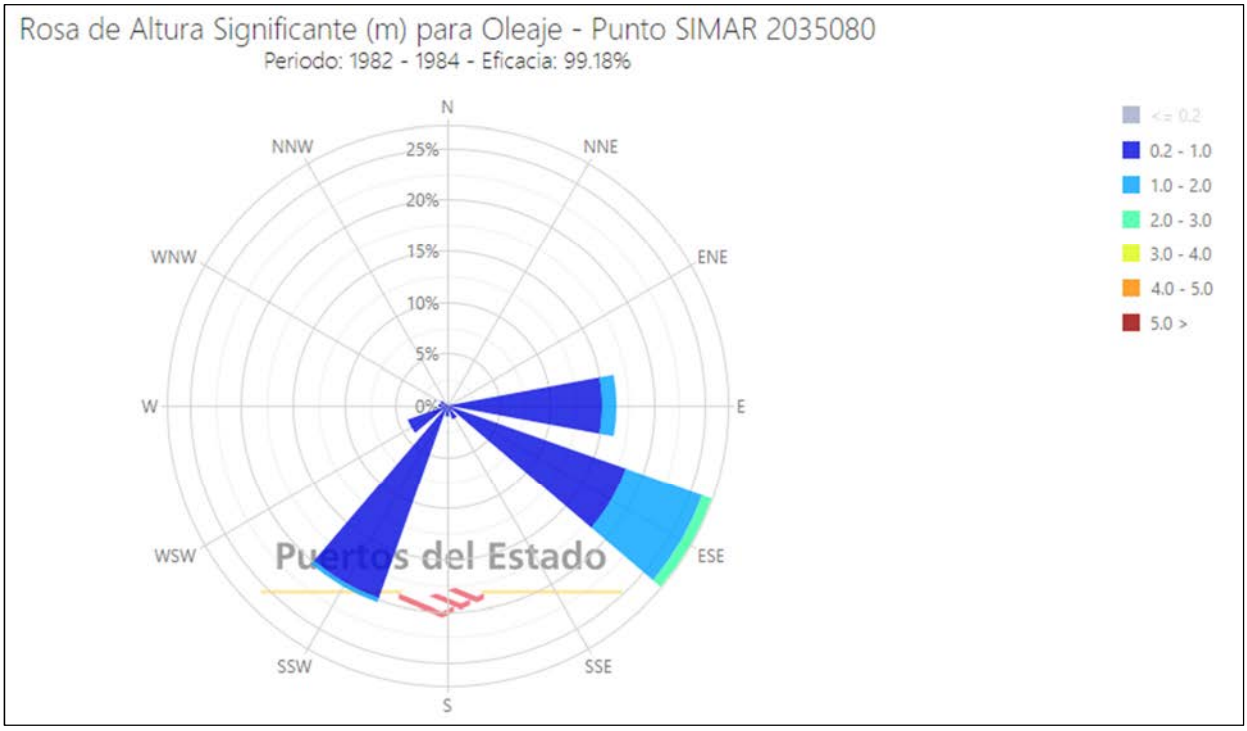
En este periodo se ha dado comienzo a la construcción de la presa de la Viñuela, coincidiendo con dos años que continúan la tendencia decreciente de las precipitaciones que comenzara en el periodo anterior (1977-1982), teniendo un mínimo de precipitaciones en 1983. En 1984, a excepción de las precipitaciones en el mes de febrero, con un fenómeno extremo registrado entorno al día 27 de dicho mes, el resto del año registra escasas precipitaciones.



Intensidad pluviométrica de los años 1982-1984 (Fte.: AEMET. Estación meteorológica Málaga-Aeropuerto. 2023)

En relación a la distribución de temporales, los mayores temporales se registran en abril de 1983, desde entonces, y a lo largo de 1984, se registra una mayor frecuencia de temporales con alturas significantes que apenas superan los 2 m (el periodo 1982-1984 registra un 1.02% de oleaje con Hs superior a 2 m). Continúa el predominio de levante en cuanto a las mayores olas y una distribución del oleaje similar al periodo anterior.

La combinación de esta situación unido a la reducción de aportes de sedimentos por parte del río Vélez genera una línea de costa estable y que, debido a la pérdida de fuerza de los temporales de levante, incluso ha permitido cierta progresión en la playa de Almayate, pero que, en líneas generales, apenas se perciben grandes cambios tal y como se observa en el plano correspondiente a los procesos de erosión/progresión que se muestran más adelante, parta este periodo (1982-1984).



Alturas significantes de oleaje (m). (Fte.: Puertos del Estado. 2023)

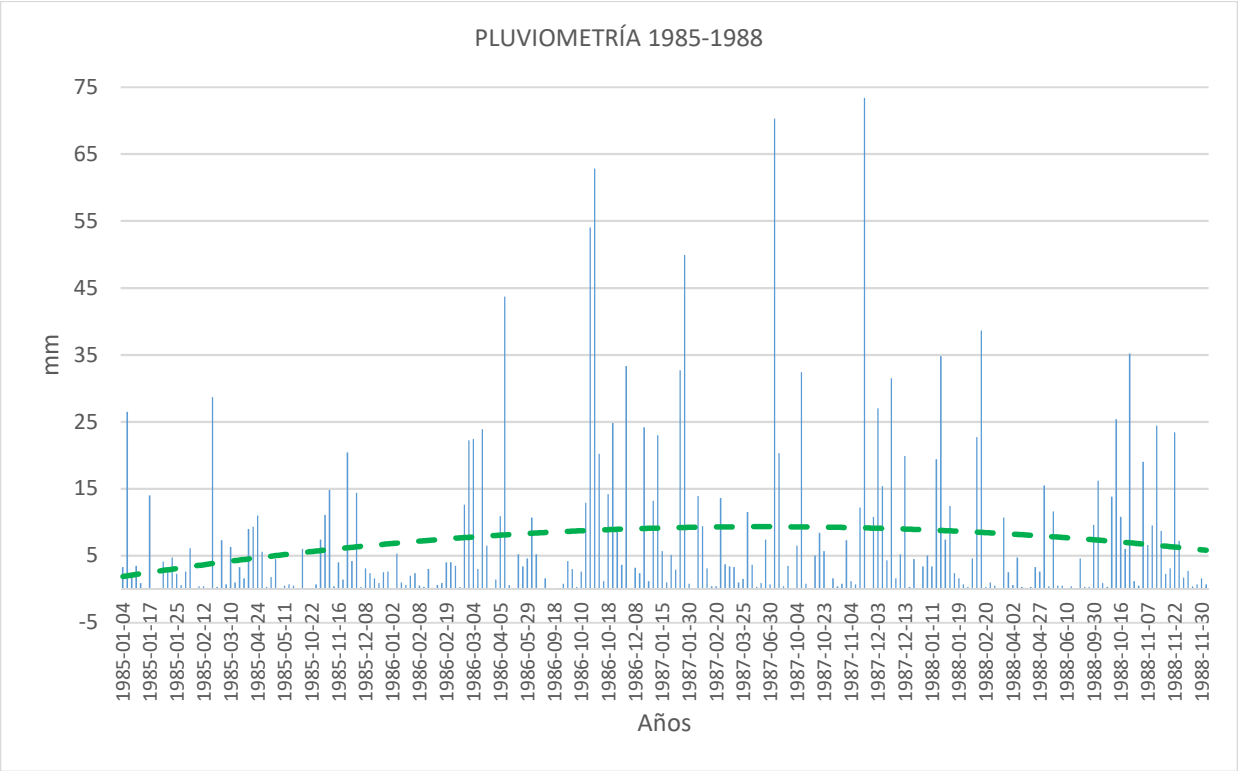
- Línea de costa de 1988

La línea de costa de 1988 muestra un incremento en la regresión del delta del río Vélez. En este caso, tal y como se observa en la delimitación de la línea de costa, el mar comienza a entrar en el cauce mismo del río. De esta forma, la línea de costa comienza a tener un aspecto más irregular que afecta a las parcelas colindantes con la costa y con las márgenes del cauce.

En el tramo de la playa de Torre del Mar, la línea de costa se mantiene rectilínea y sin rastro de movimientos regresivos destacables debido a las labores de conservación y restauración de playas motivado por el fomento de la actividad turística. Dicha actividad ha favorecido, a su vez, el aumento de la ocupación urbanística en el área litoral y las proximidades del delta.

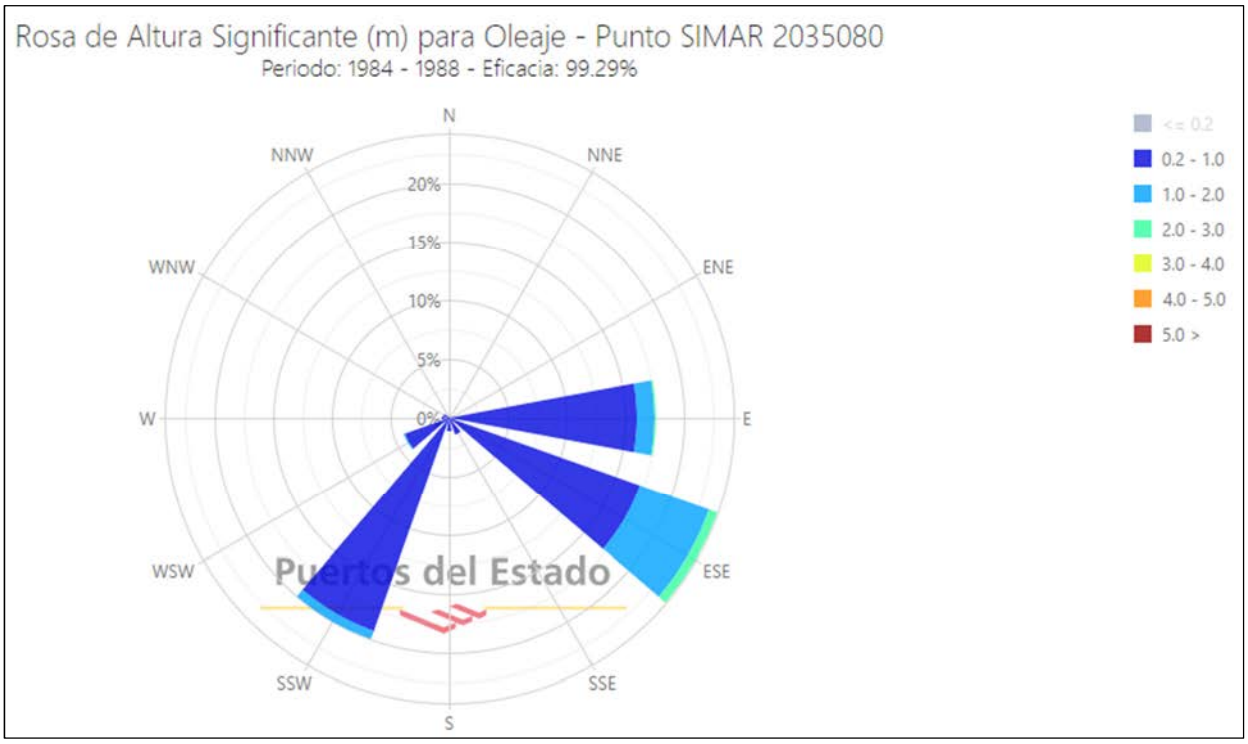
Por otro lado, en este año 1988 termina la construcción del embalse de la Viñuela comenzando su funcionamiento a principios de 1989, es decir, el inicio del llenado del vaso del embalse, con lo que el paso de sedimentos hacia la desembocadura comienza su reducción, tanto por la bajada del caudal aguas abajo de la presa (para el llenado), como por la decantación de los sedimentos que comienza con las aguas retenidas por la presa y que se depositan en su fondo.

Entre 1985 y 1988 hay un incremento de las precipitaciones, con un periodo de máximas precipitaciones (e intensidades) que se da en la segunda mitad de 1987, continuando el año 1988 con una distribución normal de precipitaciones, aunque de mayor intensidad que en periodos anteriores. De este incremento pluviométrico se puede deducir que en estos años hubo un incremento en el transporte de sedimentos fluviales hacia la costa.



Intensidad pluviométrica de los años 1985-1988 (Fte.: AEMET. Estación meteorológica Málaga-Aeropuerto. 2023)

En este periodo se registra un descenso en la frecuencia de temporales que superan una altura significante de 2 m (0.7% de Hs superior a 2 m), registrándose en febrero de 1988 el mayor temporal con Hs de 2.95 m. Al igual que hasta ahora, estos temporales son de levante y la distribución del oleaje responde a la tendencia observada hasta el momento, tal y como se observa en la siguiente imagen.



Alturas significantes de oleaje (m). (Fte.: Puertos del Estado. 2023)

El descenso en la frecuencia de los temporales y su menor intensidad favorecen la estabilidad de la playa de Almayate (menor erosión) mientras que la playa de Torre del Mar, tal y como se

explica en el punto 4.1.8. aunque sufre cierta erosión, sigue siendo menor que en el entorno de la desembocadura del río Vélez, donde se registran los mayores cambios, con un incremento notable en la regresión de la costa, a pesar, como se acaba de exponer, de la disminución de los temporales y el aumento, en este periodo, de la pluviometría y, por tanto, de los aportes de sedimentos.

Cabe pensar que, debido a la reciente construcción de la presa de la Viñuela, siendo este el cambio más destacable en la cuenca del río Vélez en este último periodo, se ha modificado el régimen de transporte de sedimentos en dicha cuenca, afectando finalmente al balance sedimentario en el delta.

- Línea de costa de 1990

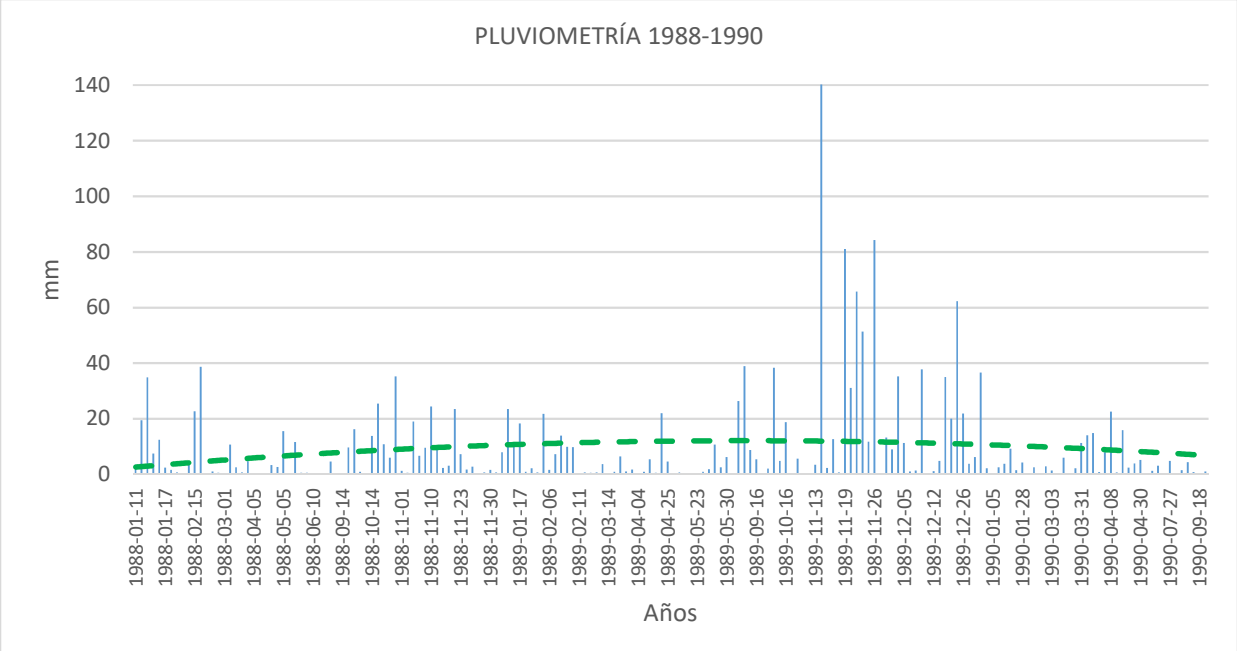
La línea de costa de 1990 muestra una regresión generalizada a lo largo de todo el tramo de estudio.

En el tramo de la playa de Almayate, la regresión ya ha afectado a la primera fila de parcelas rústicas que eran colindantes con la playa en años anteriores. Las formas irregulares en la costa se generalizan y llegan al delta del río Vélez, que continúa en regresión, favoreciendo la penetración del mar tierra adentro a través del cauce.

En la margen izquierda del río Vélez, hasta la playa de Torre del mar, distintas edificaciones realizadas sobre la playa han fomentado la construcción estructuras de defensa como escolleras, que dan como resultado formas irregulares que modifican la dinámica litoral.

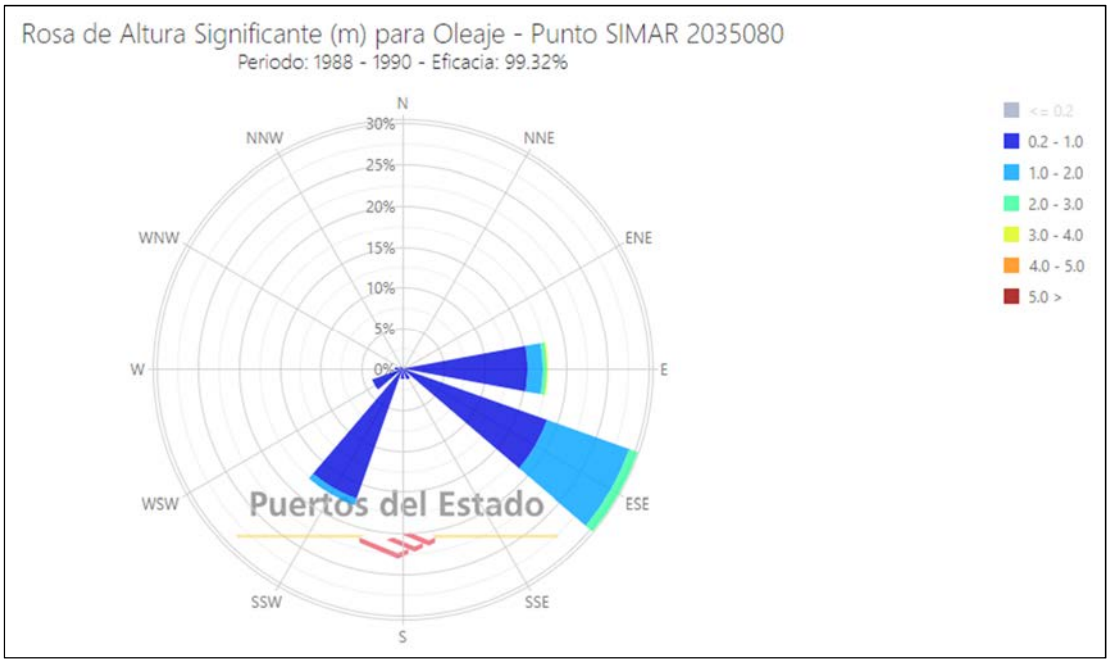
Por último, en la playa de Torre del Mar, a pesar de los movimientos regresivos, los efectos no son tan visibles y su forma se conserva más rectilínea debido tanto a la morfología de la zona de nearshore, comentada en el punto 4.1.8, como a las labores de conservación de la playa motivadas por la actividad turística.

Siendo 1989 un año lluvioso, con una intensidad de precipitación muy alta a finales de dicho año, no se observa en la reducción de la regresión de la costa, sin duda por el efecto que empieza a ejercer el embalse de la Viñuela en la retención de los sedimentos. Es especialmente interesante ver cómo ni siquiera en la desembocadura del río Vélez se ha observado un cambio notable en la línea de costa.



Intensidad pluviométrica de los años 1988-1990 (Fte.: AEMET. Estación meteorológica Málaga-Aeropuerto. 2023).

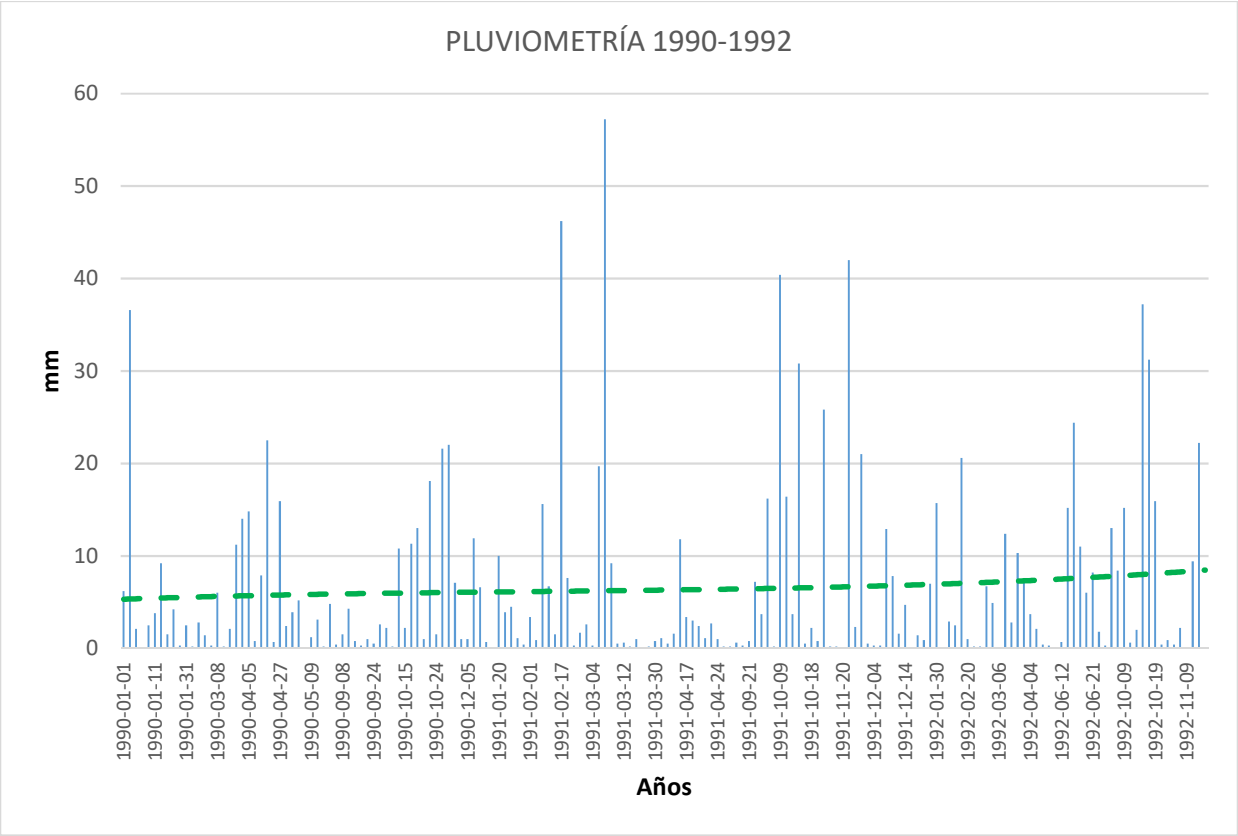
En el periodo 1988-1990 se observa el mayor incremento en la intensidad y frecuencia de temporales con Hs superior a 2 m (1.6% de oleaje con Hs superior a 2 m) desde la fecha de inicio del presente estudio (1957), llegando a máximos entre el 13 y 14 de noviembre de 1989 (coincidiendo con la máxima precipitación registrada) con Hs de 3.44 m. Todos estos temporales fueron de levante, y su frecuencia, en proporción a los oleajes de poniente, han sido proporcionalmente muy superiores, si lo comparamos con los periodos anteriores, lo que favoreció un incremento de la regresión en el tramo de la playa de Almayate y el lado oriental del delta del río Vélez. Es llamativo, a su vez, el incremento de la regresión observado en las proximidades de la playa de Torre del Mar, un tramo en el que, como se ha explicado, los temporales de levante no producen una erosión significativa. Esto hace pensar que este incremento haya sido favorecido, en parte, por las obras de protección (escolleras) construidas en este periodo.



Alturas significantes de oleaje (m). (Fte.: Puertos del Estado. 2023)

- Línea de costa de 1992

La línea de costa de 1992 muestra una continuidad con los movimientos regresivos de 1990 entorno a la desembocadura del río Vélez. En las ortofotos se pueden observar las estructuras dunares artificiales que se han levantado en la linde de las parcelas con la playa de Almayate para defender del oleaje las tierras interiores. El delta del río Vélez sigue en regresión y apenas se distinguen aportes fluviales en la morfología costera. En la margen izquierda del río Vélez, las estructuras de protección construidas en años anteriores (escolleras) han favorecido una mayor irregularidad en la línea de costa, incidiendo en la erosión de las áreas contiguas.

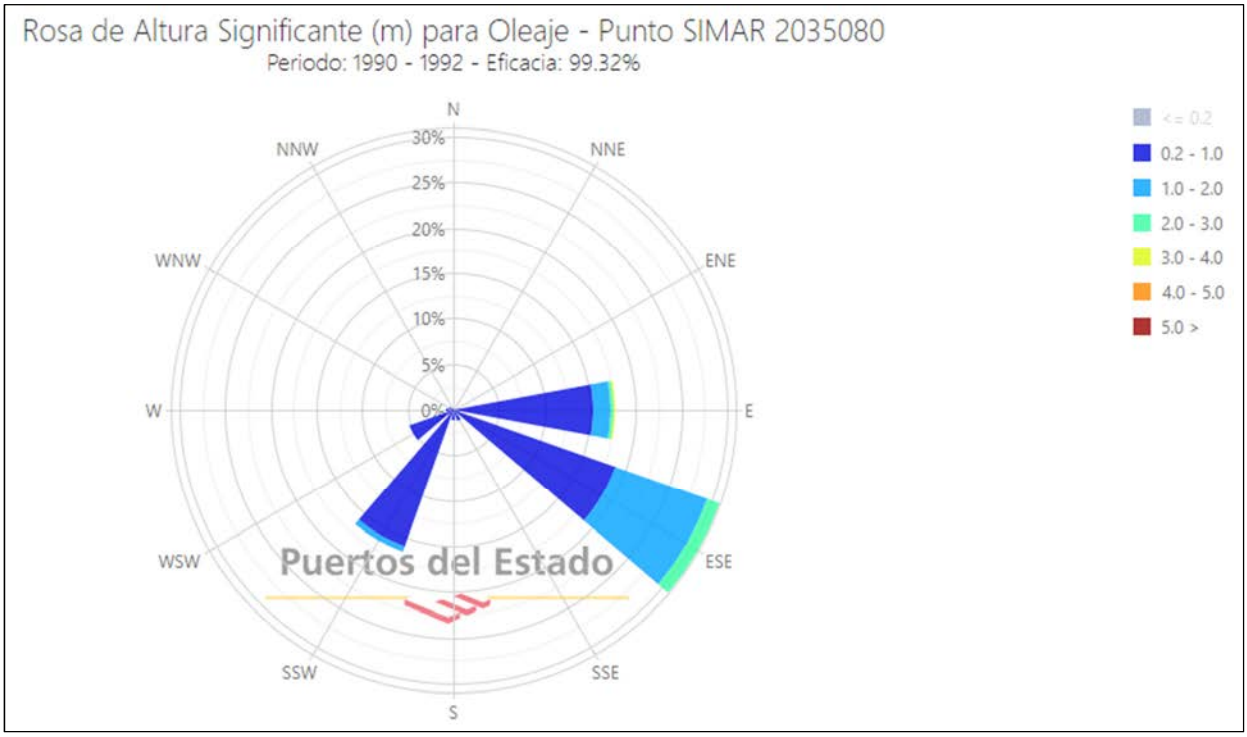


Intensidad pluviométrica de los años 1990-1992 (Fte.: AEMET. Estación meteorológica Málaga-Aeropuerto. 2023).

Las precipitaciones incrementan su intensidad a finales de 1991 y continúan a lo largo de 1992, lo que debería posibilitar un aumento del flujo de sedimentos fluviales hacia la costa.

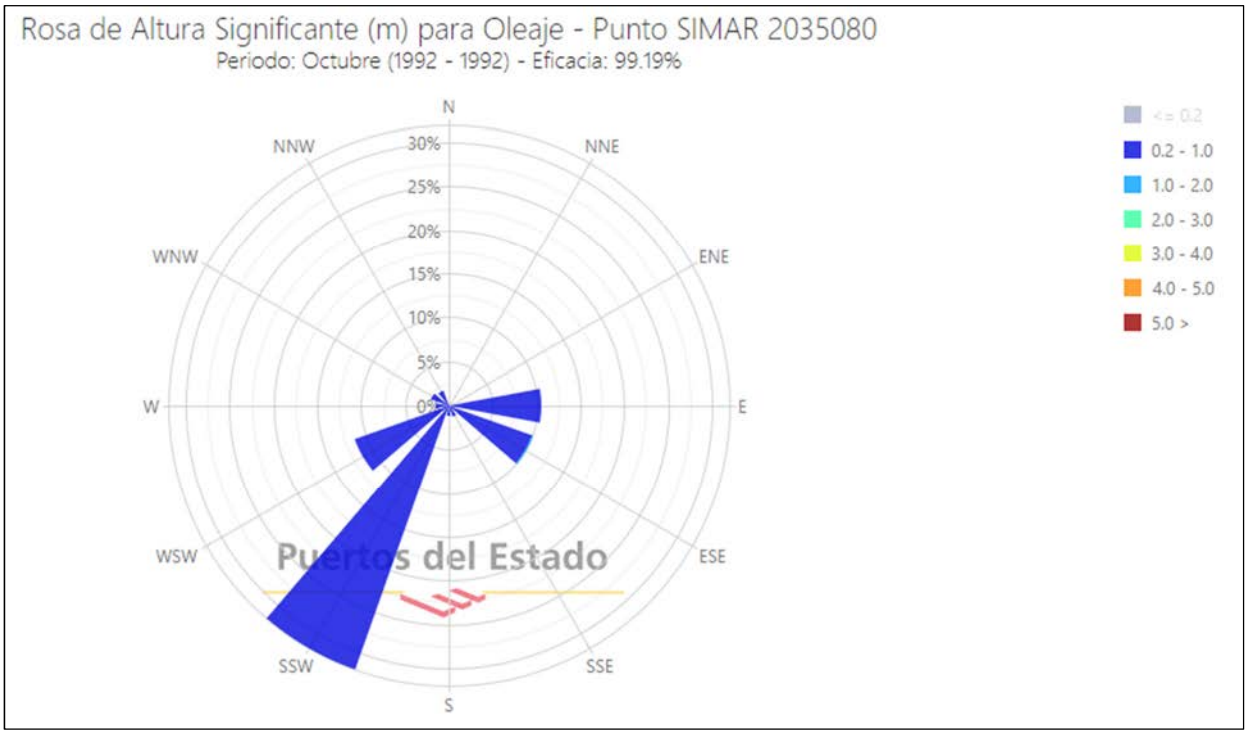
En el periodo 1990-1992 se observa el mayor incremento en la intensidad y frecuencia de temporales con Hs superior a 2 m (1.89% de oleaje con Hs superior a 2 m), siendo el mes de febrero de 1992 el último mes con temporales, coincidiendo con meses de bajas precipitaciones (comparado con los datos de dicho periodo).

Todos estos temporales fueron de levante, y su frecuencia, en proporción a los oleajes de poniente, han sido proporcionalmente muy superiores, al igual que lo sucedido en el periodo anterior (1988-1990), lo que favoreció un incremento de la regresión en el tramo de la playa de Almayate y el lado oriental del delta del río Vélez.



Alturas significantes de oleaje (m). (Fte.: Puertos del Estado. 2023)

Sin embargo, teniendo en cuenta la fecha de la ortofoto para la digitalización de la línea de costa de 1992 (octubre de 1992), se observa cómo durante este último mes apenas existe oleaje de levante. El predominio de oleaje de poniente durante el último mes posibilita la recuperación de la playa de Almayate, dando como resultado una situación de estabilidad tanto en dicha playa como en la de Torre del Mar.



Alturas significantes de oleaje (m). (Fte.: Puertos del Estado. 2023)

No obstante, entorno a la desembocadura, la regresión se hace más intensa, ya que el oleaje de poniente no favorece la sedimentación tanto como en la playa de Almayate (al ser una zona de

transición como se explica en el punto 4.1.8. Este hecho, no debiera ser tan destacado, habida cuenta del incremento de las precipitaciones registrada, lo que hace pensar en la influencia de las retenciones que se están produciendo en estos años en los que se procede al llenado del embalse de la Viñuela.

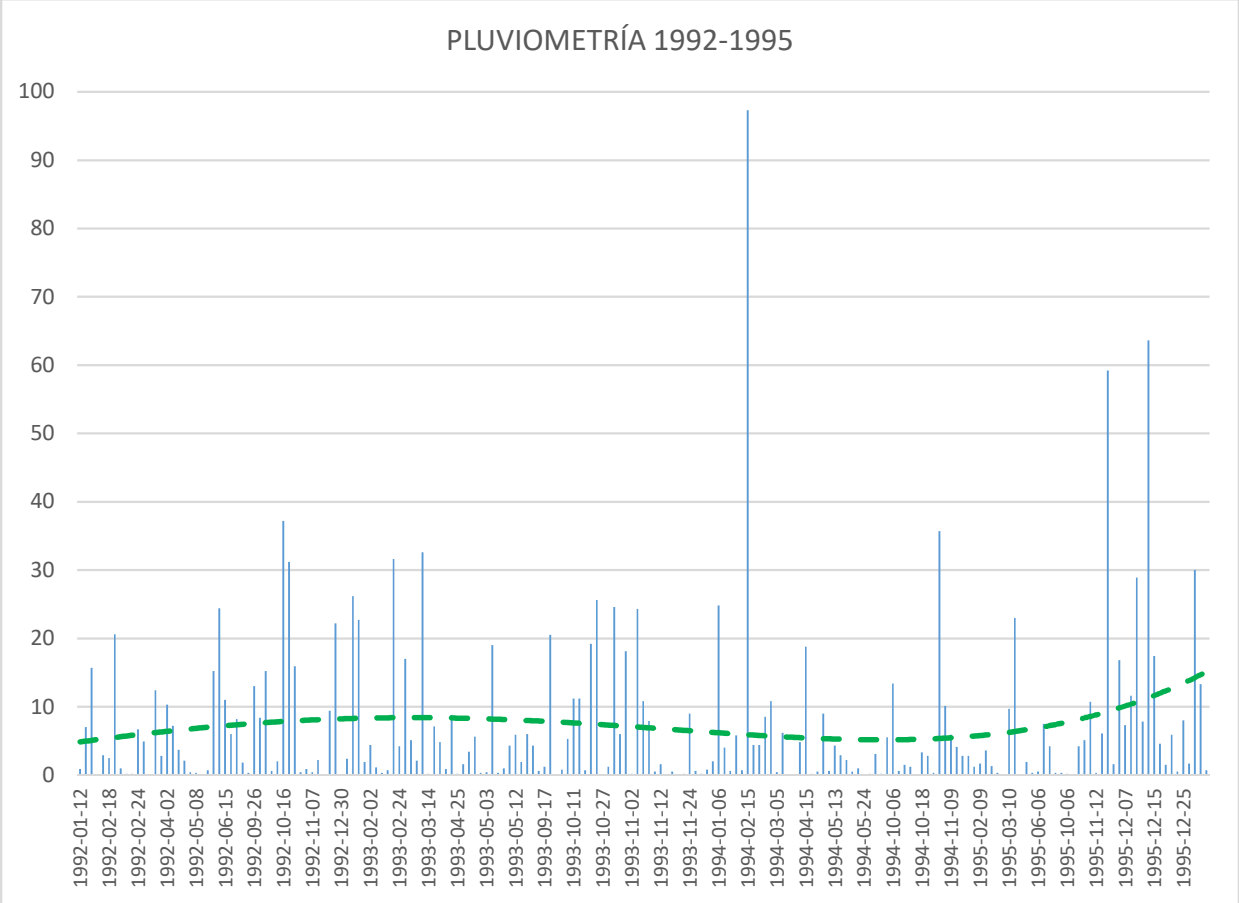
- Línea de costa de 1995

La línea de costa de 1995 destaca por tener de nuevo una forma rectilínea tanto en la playa de Almayate como en la desembocadura del río Vélez, sin embargo, esta línea se encuentra aún más hacia el interior, comparado con 1992. Lo que demuestra un movimiento regresivo generalizado.

En la margen izquierda del río Vélez se conservan las formas irregulares provocadas por las escolleras y el incremento de la actividad urbanística.

Por otra parte, la playa de Torre del Mar conserva su perfil.

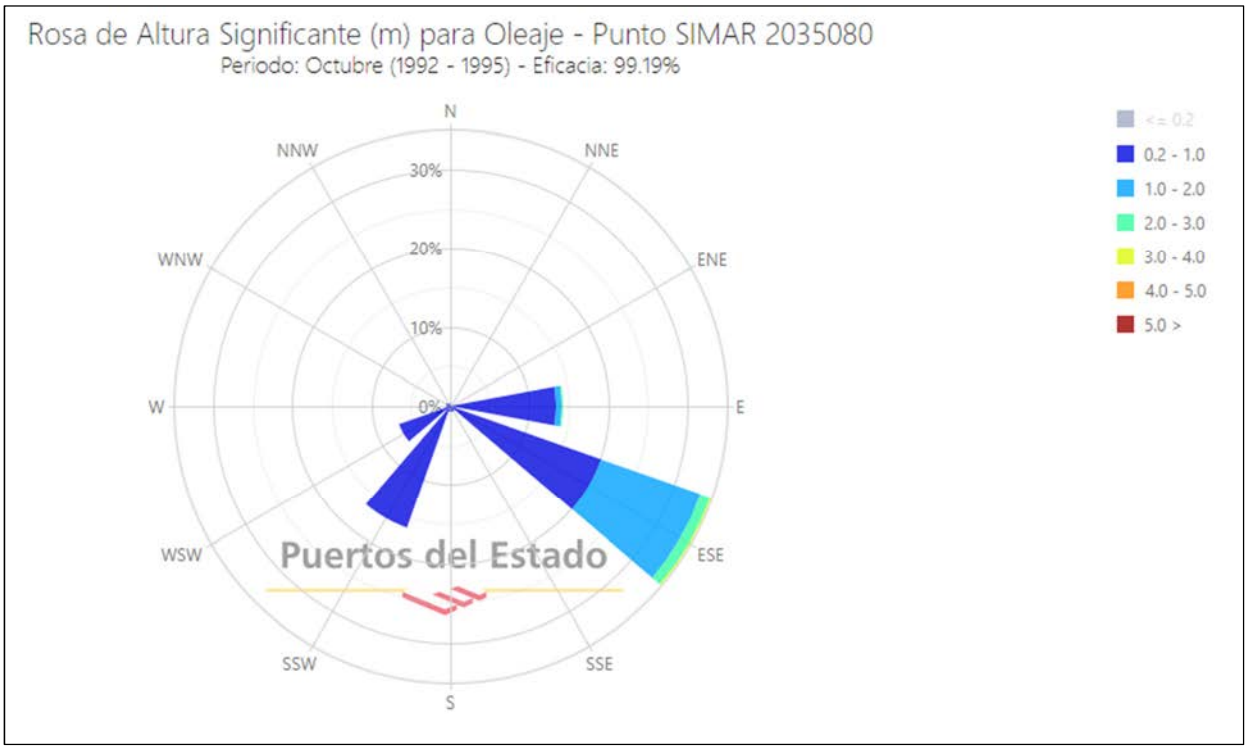
Entre 1992 y 1995 se observa una reducción en la intensidad de precipitaciones, siendo los años 1993 y 1994 los años donde se registran las menores precipitaciones de todo este periodo, detectándose un leve incremento a finales de 1995.



Intensidad pluviométrica de los años 1992-1995 (Fte.: AEMET. Estación meteorológica Málaga-Aeropuerto. 2023).

Por otra parte, entre 1992 y 1995, la frecuencia de los temporales es inferior que en el periodo 1990-1992, pero superior a la media de todo el periodo de estudio (desde 1957). Sin embargo, si nos concentramos en la frecuencia de estos temporales en los dos últimos años (1994-1995) observamos que la frecuencia se incrementa notablemente (2.04% de oleajes de Hs superior a 2 m), lo que puede condicionar en gran medida el resultado del cálculo de la regresión que se observa para este periodo.

Continúa el predominio de temporales de levante en estos años, favoreciendo la erosión del tramo de la playa de Almayate, no así la laya de Torre del mar, más afectada por los de poniente. Estos últimos son inexistentes en este periodo.



Alturas significantes de oleaje (m). (Fte.: Puertos del Estado. 2023)

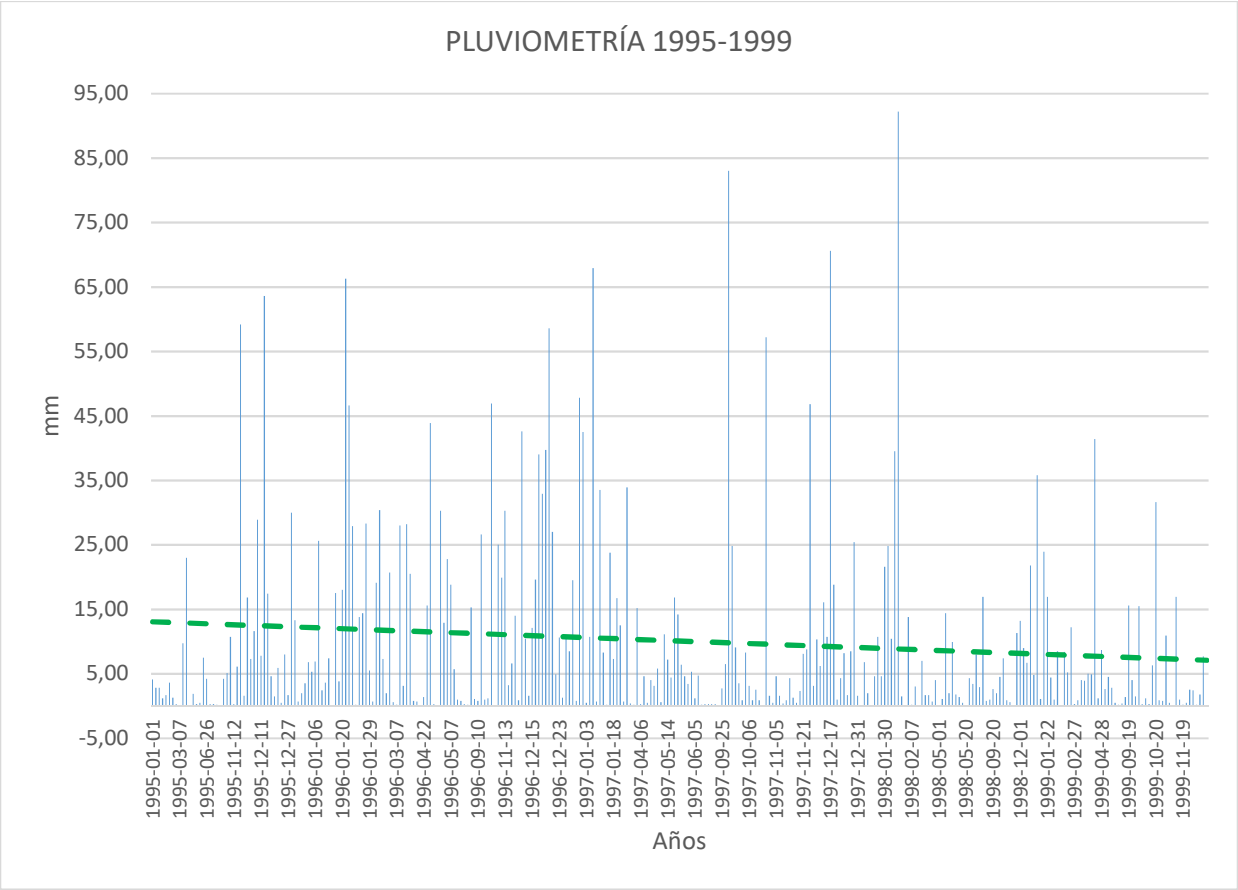
Continúa el predominio de temporales de levante en estos años, favoreciendo la erosión del tramo de la playa de Almayate, no así la laya de Torre del mar, más afectada por los de poniente. Estos últimos son inexistentes en este periodo.

Cabe pensar, por tanto, que en este periodo se combinan tanto el descenso de precipitaciones y sus aportes de sedimentos junto con el aumento de la frecuencia de temporales de levante de mayor intensidad para dar como resultado una regresión generalizada, siendo mayor en la playa de Almayate y la desembocadura del río Vélez.

- Línea de costa de 1999

La línea de costa de 1999, tal y como se observa en las imágenes, parece haber recuperado parte de la playa que ha sido erosionada en años anteriores, probablemente debido a la pluviometría del año 1996 que destacó por su abundancia y que generó el llenado completo del embalse de la Viñuela y, por tanto, la necesidad de desaguar mayor caudal que durante los años precedentes haciendo que llegase mayor cantidad de sedimentos a la costa. Sobre la morfología de la costa destaca la forma rectilínea en todo el tramo de estudio, incluso en las zonas contiguas a las escolleras donde parece haber recuperado parte del terreno perdido en años anteriores.

Se muestra así una evolución de la línea de costa oscilante en estos últimos años con regresión y acreción según la zona y el año, al contrario que en los periodos anteriores con regresión constante en varios periodos.

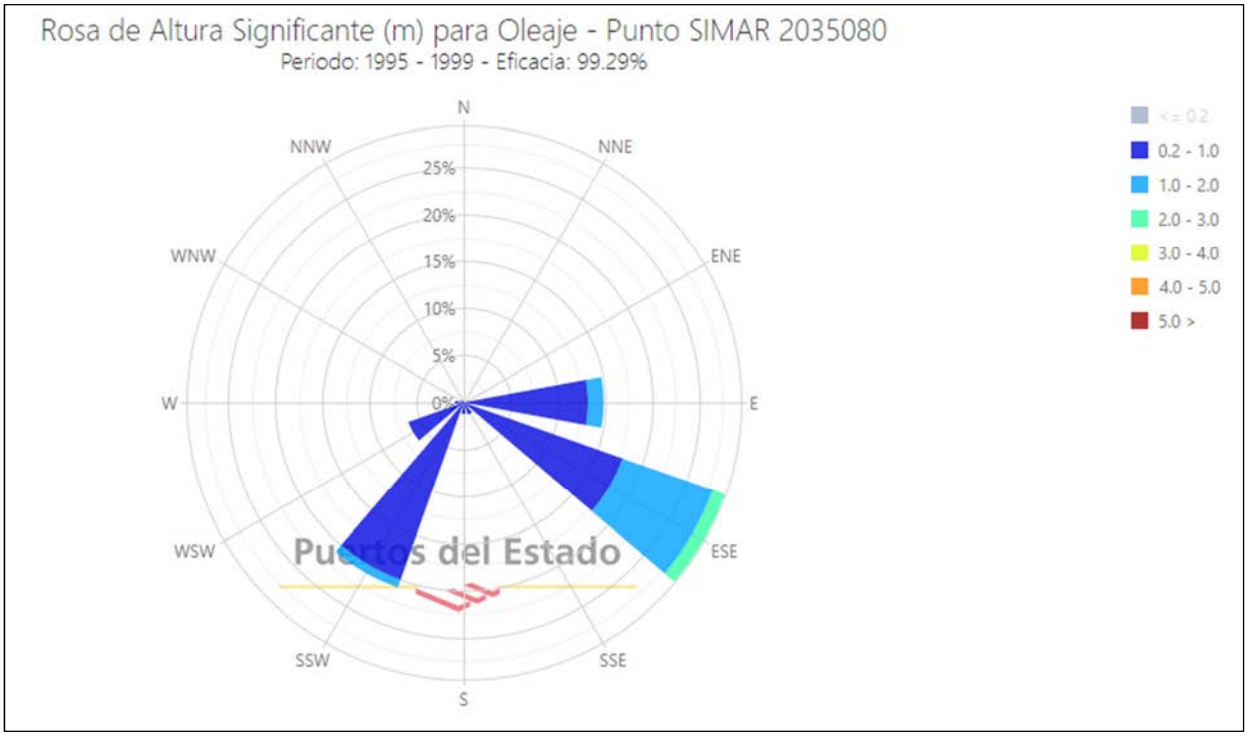


Intensidad pluviométrica de los años 1995-1999 (Fte.: AEMET. Estación meteorológica Málaga-Aeropuerto. 2023).

Se detecta en este periodo un momento complejo desde el punto de vista hidrológico. El año 1995 comienza siendo un año extremadamente seco y con escasos aportes sedimentarios. Este fenómeno finaliza en los años 1996-1997 que son muy lluviosos, destacando la avenida registrada en 1996, que registra caudales de 1298m²/s (Senciales, 1998) con una carga sedimentaria de 68gr/l que genera barras de arena en el mar a 200 m del delta, que desaparecen más tarde por la dinámica marina registrada posteriormente.

Se observa en este periodo un descenso en la frecuencia de temporales, siendo más destacables en los últimos dos años (0.76% del oleaje con Hs superior a 2 m). Estos temporales siguen siendo principalmente de levante y la distribución de los oleajes vuelve a ser marcadamente bidireccional, con mayor reparto entre direcciones de levante y poniente.

Este incremento de aporte de sedimentos, sumado al descenso de temporales y una vuelta a la frecuencia de direcciones de oleaje similares a periodos anteriores a 1990 dan como resultado una progresión notable que se hace más patente entre el lado oriental del delta y la playa de Torre del Mar. Sin embargo, 1999 se convierte en un año seco y se registran incipientes pérdidas en el ápice del delta.



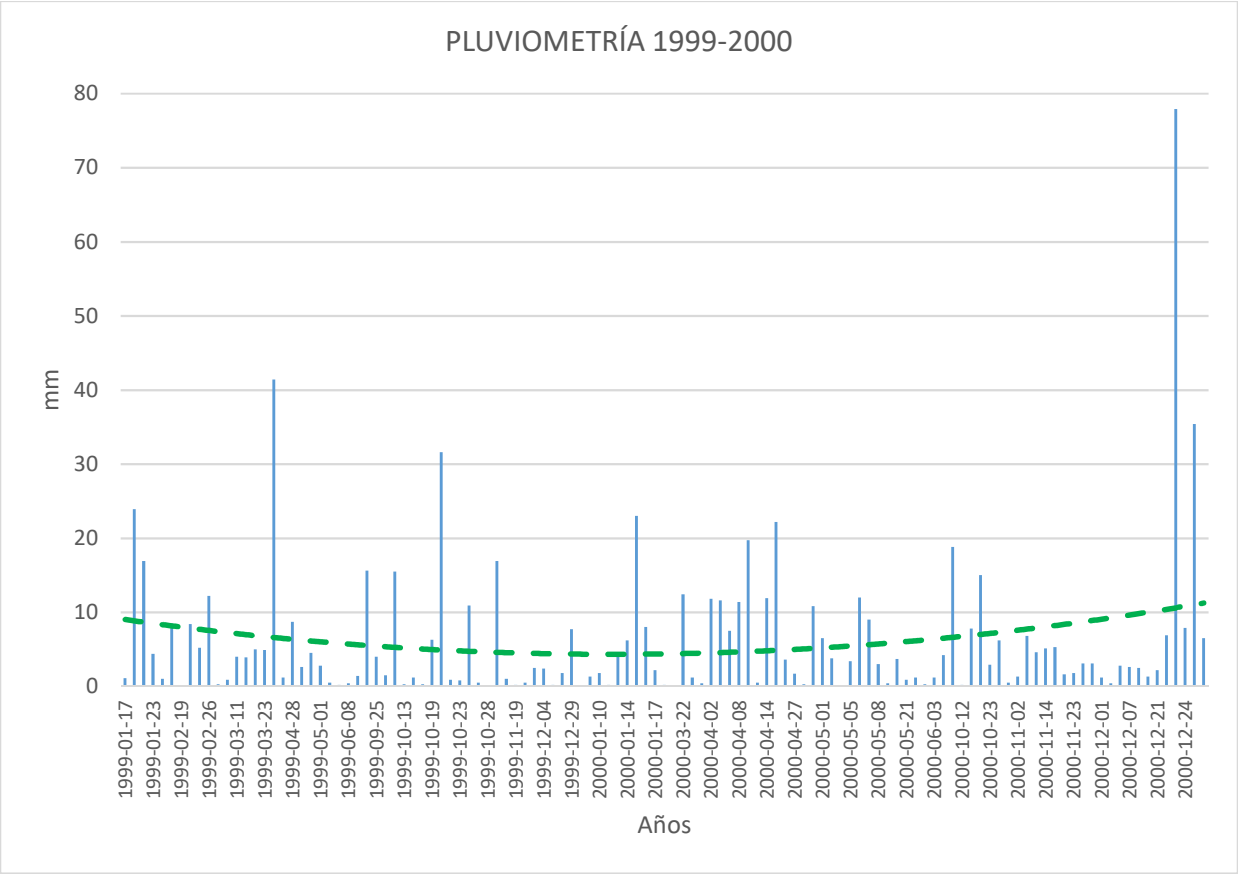
Alturas significantes de oleaje (m). (Fte.: Puertos del Estado. 2023)

- Línea de costa de 2000

La línea de costa del año 2000, trazada sobre el Vuelo Quinquenal 1998-2003, reduce la curvatura preexistente en el entorno de la desembocadura del río Vélez, lo que constata una regresión importante, sin perder la forma principalmente rectilínea de la costa, con mayor continuidad con la playa de Almayate donde, a pesar de no detectarse movimientos regresivos importantes, se han realizado labores de protección de parcelas colindantes con la costa haciéndolas retroceder, viéndose así afectadas.

Se observan las primeras transformaciones de tipo urbanístico entorno a la margen izquierda del río Vélez y pequeñas actuaciones que comienzan a tener un leve impacto sobre el trazado rectilíneo de la costa.

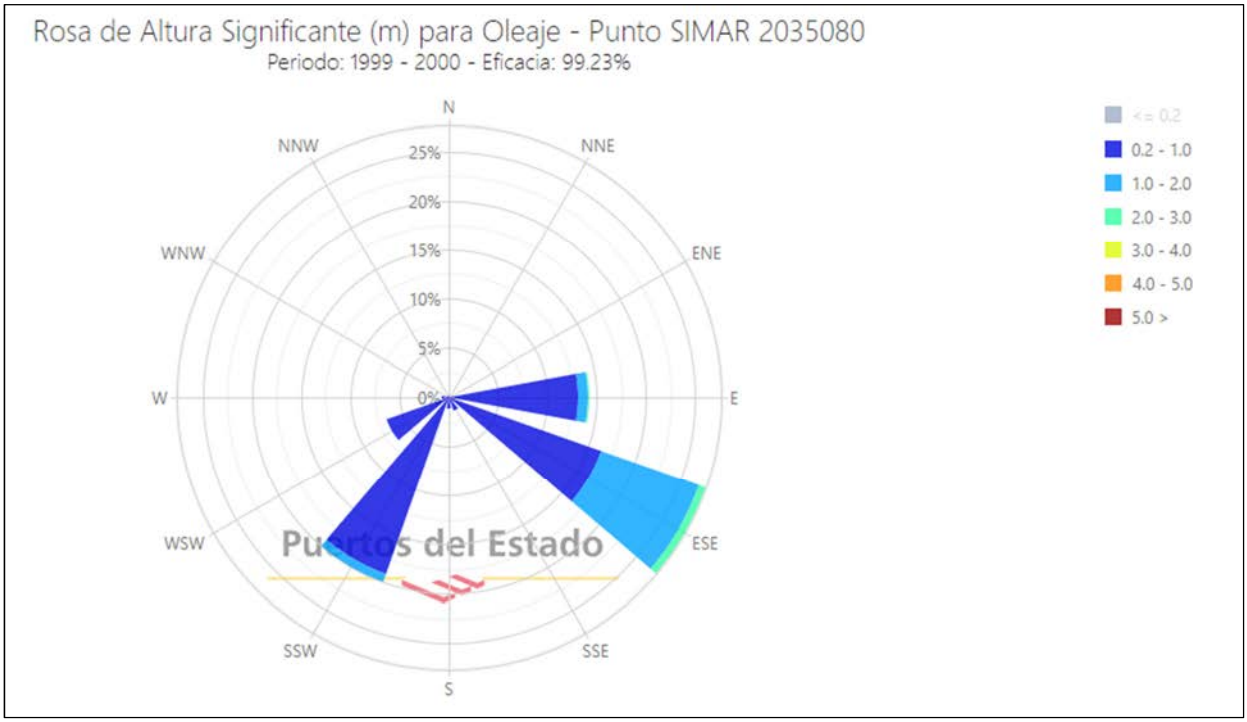
Como se menciona en el punto anterior, 1999 es un año extremadamente seco, que continúa en el año 2000. La intensidad de las precipitaciones registrada es muy inferior a las registradas en periodos anteriores, por lo que se estima un importante descenso en el transporte de sedimentos fluviales a la costa.



Intensidad pluviométrica de los años 1999-2000 (Fte.: AEMET. Estación meteorológica Málaga-Aeropuerto. 2023).

En cuanto a los temporales, la frecuencia e intensidad de los temporales entre 1999 y 2000 es similar al del periodo anterior, dando continuidad a un periodo de mayor calma. La distribución de las direcciones del oleaje también es similar al periodo anterior, con predominio de los temporales de levante y oleajes de poniente, de menor Hs, en proporción similar a los de levante.

Estos fenómenos descritos favorecen un proceso de regresión en el ápice del delta, que había sufrido una notable progresión en el periodo anterior y un incremento de la plataforma en la zona de nearshore, por lo que se exponía, ante una reducción drástica de aportes de sedimentos fluviales, a una clara regresión. Dicha regresión no afectó tanto a la playa de Almayate como a la de Torre del mar, dada la escasa intensidad de los temporales de levante en este periodo.

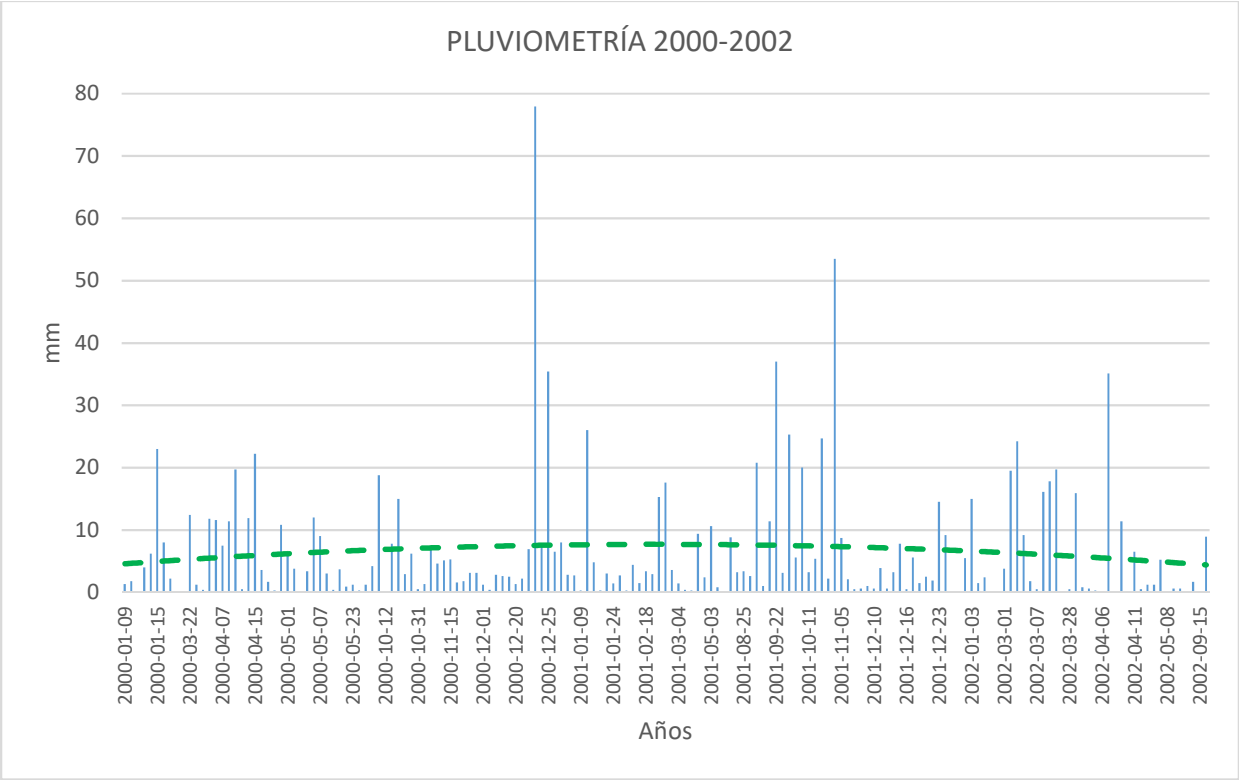


Alturas significantes de oleaje (m). (Fte.: Puertos del Estado. 2023)

- Línea de costa de 2002

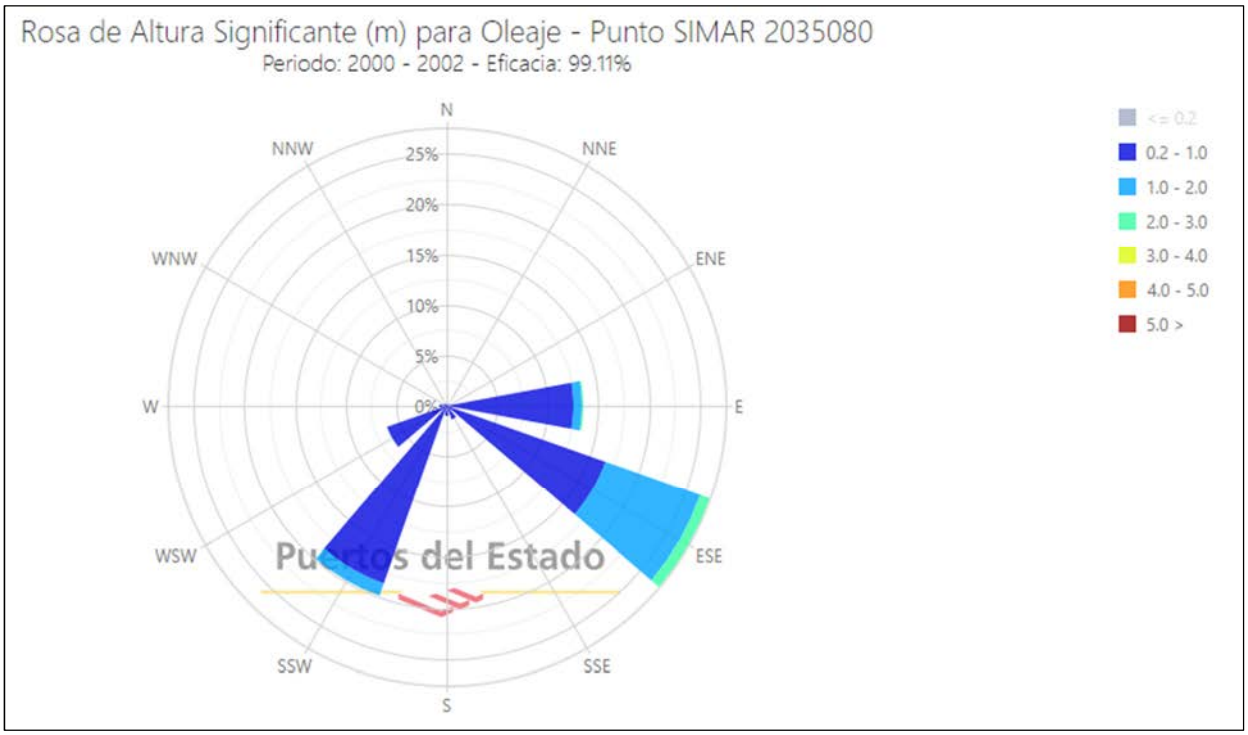
La línea de costa del año 2002, en relación con la línea de 2000, muestra un movimiento de los depósitos sedimentarios oscilante por la regresión y acreción por zonas y años que da como resultado una mayor irregularidad y movimientos regresivos intercalados en distintos tramos y un mantenimiento o crecimiento en otros. Destaca la continuidad del comportamiento regresivo del delta del río Vélez y mayor irregularidad entorno a las escolleras del tramo de costa próximo a la margen izquierda del río. La playa de Torre del Mar se conserva como en años anteriores.

Aunque en el año 2001 se observan fenómenos puntuales de intensas precipitaciones, éstas son escasas y menores que en épocas anteriores, dando como resultado una continuidad al régimen de escasas precipitaciones que se vienen registrando desde 1998 aproximadamente.



Intensidad pluviométrica de los años 2000-2002 (Fte.: AEMET. Estación meteorológica Málaga-Aeropuerto. 2023).

La frecuencia e intensidad de los temporales entre 2000 y 2002 es similar al del periodo anterior, aunque se detecta un incremento de la frecuencia de temporales en 2002, dando lugar a un periodo (2000-2002) con un 1.05% de oleaje con Hs superior a 2 m. La distribución de las direcciones del oleaje también es similar al periodo anterior, con predominio de los temporales de levante y oleajes de poniente, de menor Hs, en proporción similar a los de levante.



Alturas significantes de oleaje (m). (Fte.: Puertos del Estado. 2023)

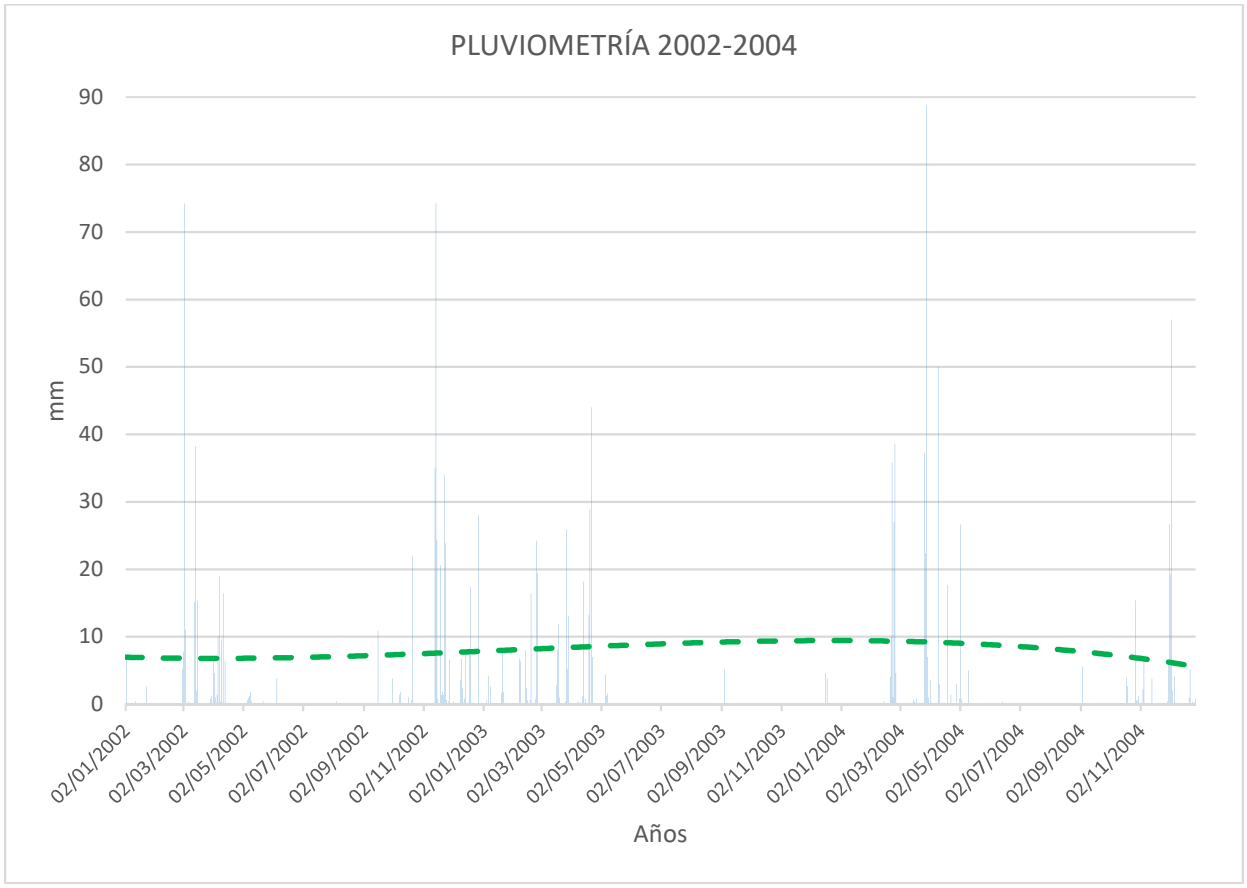
La similitud de las condiciones climáticas con el periodo anterior también se refleja en los procesos regresivos en el tramo de estudio, donde los mayores cambios se detectan entorno a la margen oriental del delta del río Vélez

- Línea de costa de 2004

La línea de costa en 2004, trazada sobre la ortofoto histórica del PNOA 2004, continúa modificándose, con respecto a la etapa anterior, entorno a la playa de Almayate y, especialmente, en la desembocadura del río Vélez. Aparece un crecimiento del delta muy localizado en la desembocadura, un aumento puntual en la deposición de sedimentos que genera un saliente pronunciado e irregular. Los años 2003 y 2004 son años de precipitación media-alta (superando los 700mm anuales en el aeropuerto de Málaga) por lo que este aumento en el delta puede deberse a un aumento del caudal con sedimento que deja pasar la presa de la Viñuela.

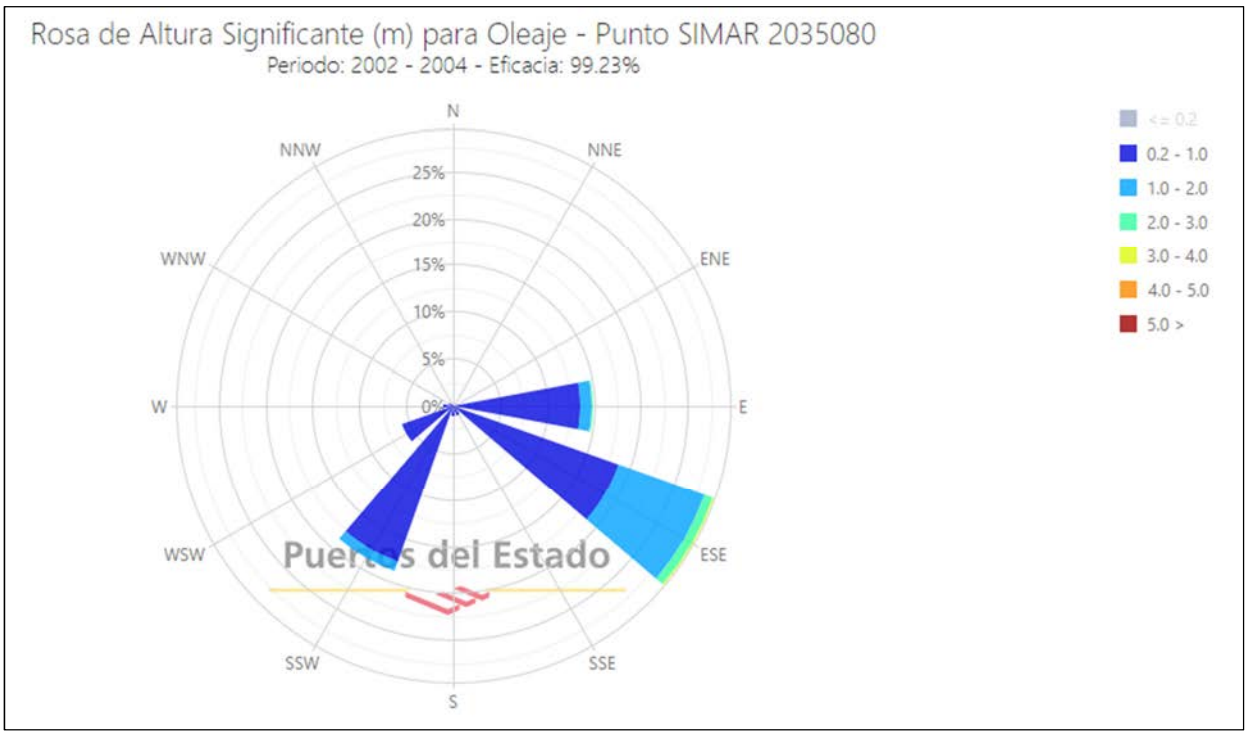
En la margen izquierda de la desembocadura, en la playa de Torre del Mar, se incrementan las actuaciones urbanísticas próximas a la costa que, unido a cierta regresión, llevan a la construcción de obras de protección tipo escollera de defensa, que generan mayores irregularidades en la línea de costa, rompiendo su forma rectilínea previa de forma drástica.

En el periodo 2002-2004 se observan grandes irregularidades en la distribución de las precipitaciones y la intensidad de las mismas, encontrando amplios periodos con baja intensidad de precipitación junto a otros de alta intensidad. Se ha documentado los efectos de estos últimos en la inundación de diversas áreas del delta (como la zona del camping) y su efecto en la pequeña progradación en la desembocadura del río Vélez.



Intensidad pluviométrica de los años 2002-2004 (Fte.: AEMET. Estación meteorológica Málaga-Aeropuerto. 2023).

Los temporales de levante registrados en 2002 reducen la línea de costa en la playa de Almayate. En este periodo se encuentran frecuencias de temporales similares al periodo anterior (2000-2002) pero se documenta un temporal de mayor intensidad (Hs=4.23m) en marzo de 2003. El predominio de los temporales de levante y, en general, el oleaje en este periodo favorece la regresión en la playa de Almayate.



Alturas significantes de oleaje (m). (Fte.: Puertos del Estado. 2023)

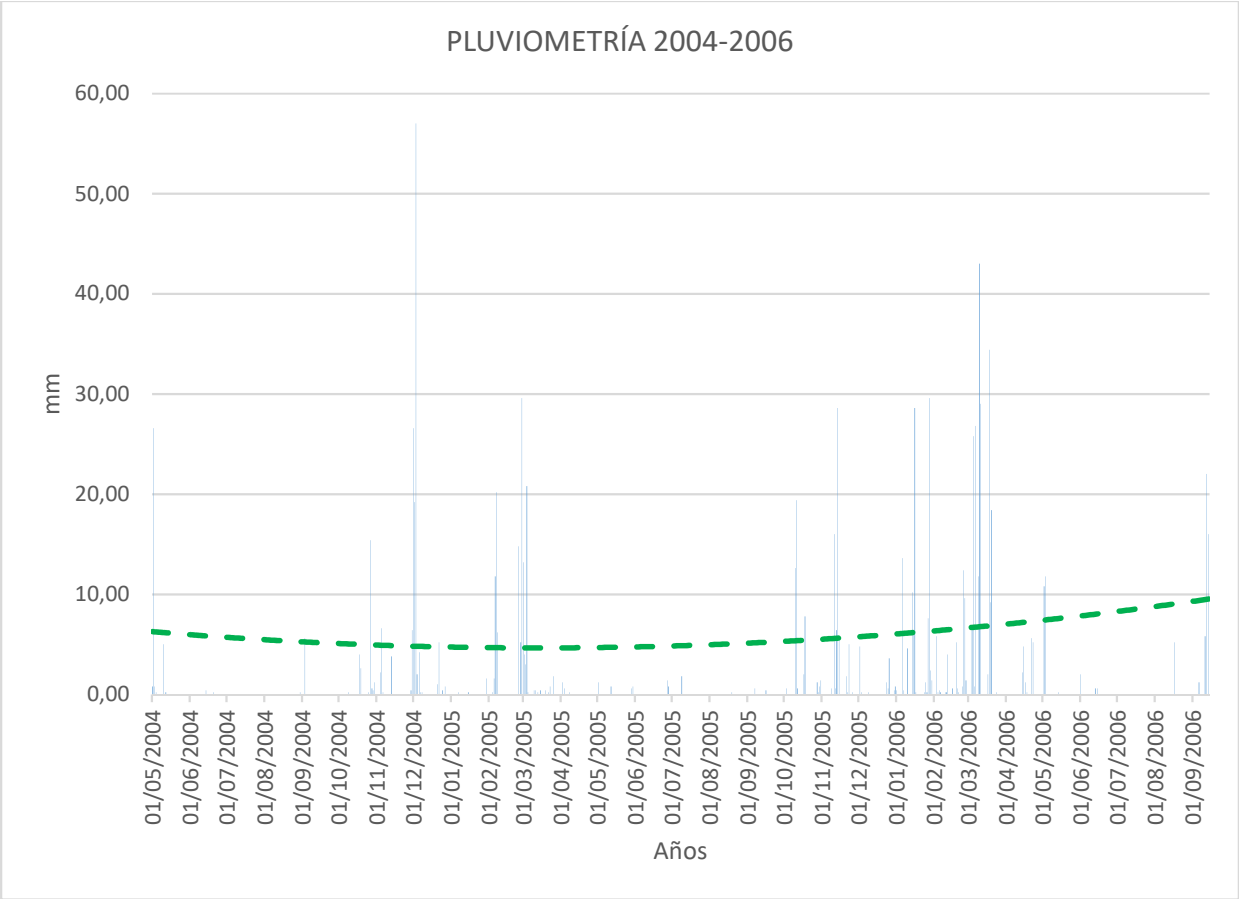
La regresión a levante de la desembocadura parece provocada por la construcción de las escolleras que, tras un periodo de estabilización, los temporales de levante (2002 principalmente) producen una mayor erosión.

- Línea de costa de 2006

La línea de costa en 2006, trazada sobre la ortofoto histórica del PNOA 2006, sufre un retroceso importante en el delta del río Vélez. La progresión acaecida en años anteriores desaparece hasta convertirse en una prolongación de la línea recta que forma la costa de Almayate. Lo que demuestra la desaparición de grandes cantidades de sedimentos y una regresión acelerada de dicho tramo.

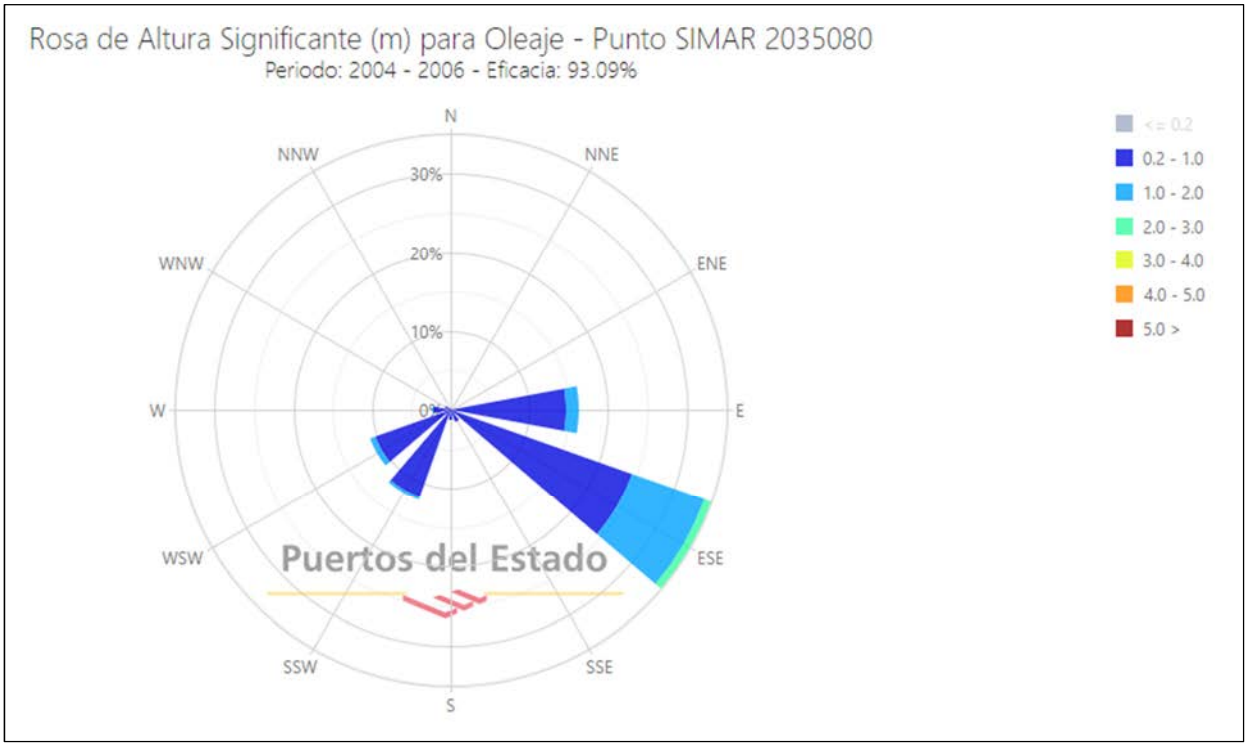
En la playa de Torre del Mar, en la margen izquierda del río Vélez, se consolidan las actuaciones urbanísticas y las obras de protección tipo escollera.

Se observa que en los últimos años las precipitaciones son menos homogéneas, cuando éstas se producen tienden a ser escasas o a ser de carácter torrencial. Esta característica se acentúa en este periodo, en el que se observa, además, unas precipitaciones escasas y, por tanto, una posible reducción de aportes de sedimentos a la costa.



Intensidad pluviométrica de los años 2004-2006 (Fte.: AEMET. Estación meteorológica Málaga-Aeropuerto. 2023).

La intensidad de los temporales en este periodo tiende a ser similar al del periodo anterior estudiado. El 0.93% del oleaje registrado tiene una Hs superior a 2 m. Sin embargo, se observa que, a finales de 2005 y durante 2006, el oleaje de poniente comienza a tener mayor intensidad, aunque menor frecuencia en comparación con los de levante. Es posible que estos eventos de poniente, además de labores de restauración de la costa, debido a la fuerte regresión y las consecuencias derivadas de los temporales de 2002, hayan permitido una progradación de la playa de Almayate. Por otra parte, se produce en este periodo la pérdida del ápice del delta del río Vélez como efecto directo de la reducción de aportes de sedimentos fluviales.



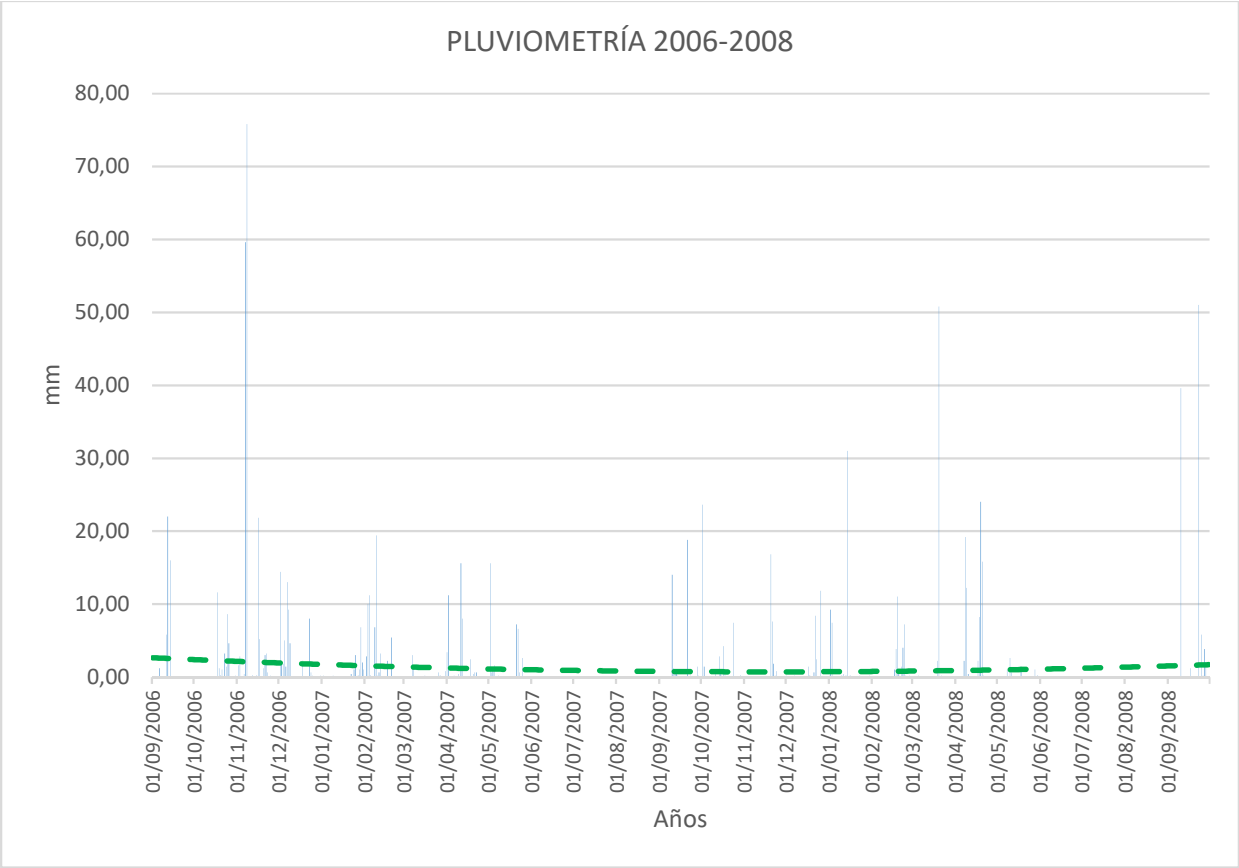
Alturas significantes de oleaje (m). (Fte.: Puertos del Estado. 2023)

- Línea de costa de 2008

La línea de 2008, trazada sobre la ortofoto histórica del PNOA 2008, muestra una fuerte regresión a poniente de la desembocadura del río Vélez.

En la playa de Torre del mar, las estructuras se han consolidado y el perfil apenas sufre cambios, en un inicio de procesos oscilantes en la morfología de este tramo de la costa, donde sus irregularidades incrementan o decrecen en breves espacios de tiempo, probablemente debidos a la regresión general de la zona y los aportes puntuales de arena durante los trabajos de regeneración de las playas de la localidad de Torre del Mar.

Se consolida un comportamiento de la distribución de las precipitaciones muy irregular, siendo en su conjunto un periodo muy seco, donde la mayor precipitación (mayor intensidad) se registra en noviembre de 2006. El descenso de los aportes de sedimentos del río Vélez es muy bajo, por lo que la evolución de la línea de costa queda determinada en estos años por el comportamiento del clima marino.

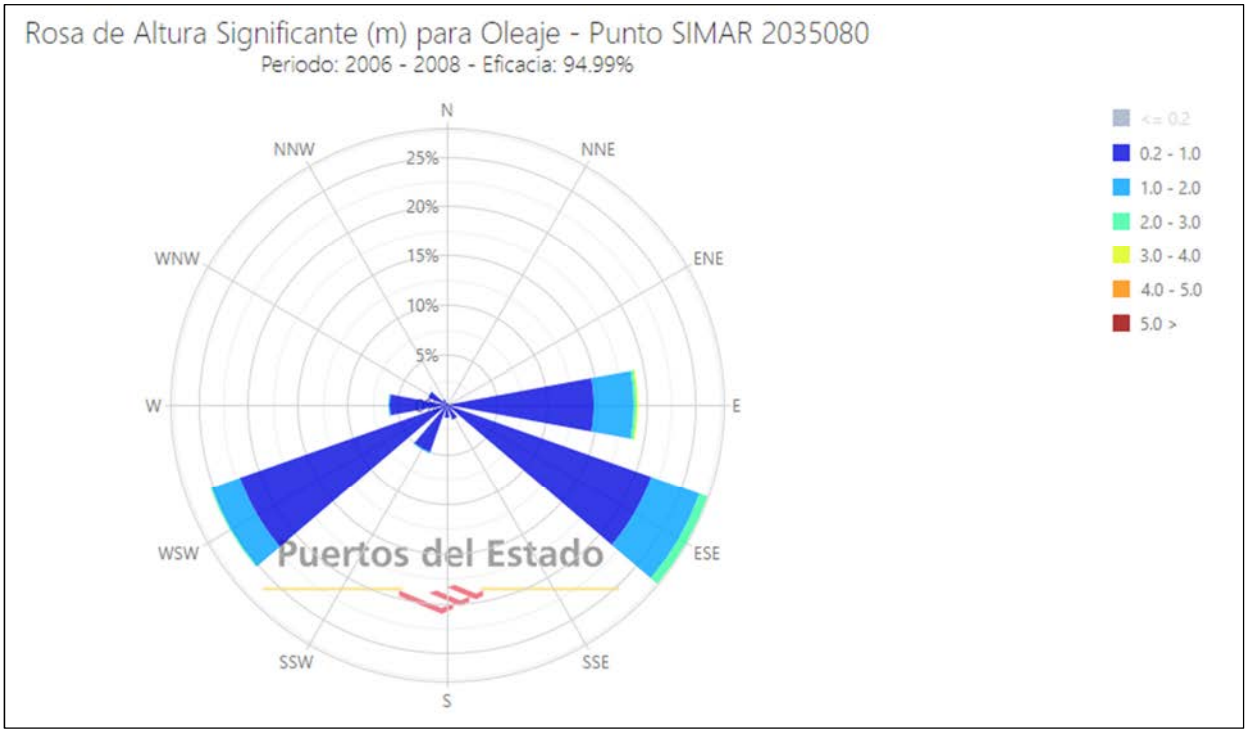


Intensidad pluviométrica de los años 2006-2008 (Fte.: AEMET. Estación meteorológica Málaga-Aeropuerto. 2023).

Entre los años 2006 y 2008 encontramos un incremento de la frecuencia de temporales con respecto al periodo anterior y, además, un incremento de la intensidad de los mismos, existiendo en 2007 y 2008 temporales con Hs superior a los 4 m. Dichos eventos apenas habían sido registrados hasta este momento, sin embargo, en un periodo de un año se produce en dos ocasiones.

Este hecho se suma a la aparición, por primera vez, de temporales con Hs superior a 3 m de poniente.

Se describa así un importante cambio en el comportamiento del clima marino que se produce en estos años y que determina la evolución de la línea de costa en los últimos años. El incremento en la intensidad de los temporales de levante y la aparición de temporales de poniente producen así, unido a la casi nula aportación de sedimentos fluviales, una regresión en todo el tramo de costa estudiado muy severa y generalizada, que sólo se ve disminuida en la zona de Torre del Mar debido no sólo a las características batimétricas (descritas en el punto 4.1.8), sino también a las labores de restauración de costas que se suceden tras la aparición de frecuentes temporales que inciden negativamente en las costas con mayor equipamiento y servicios turísticos (como es este caso).



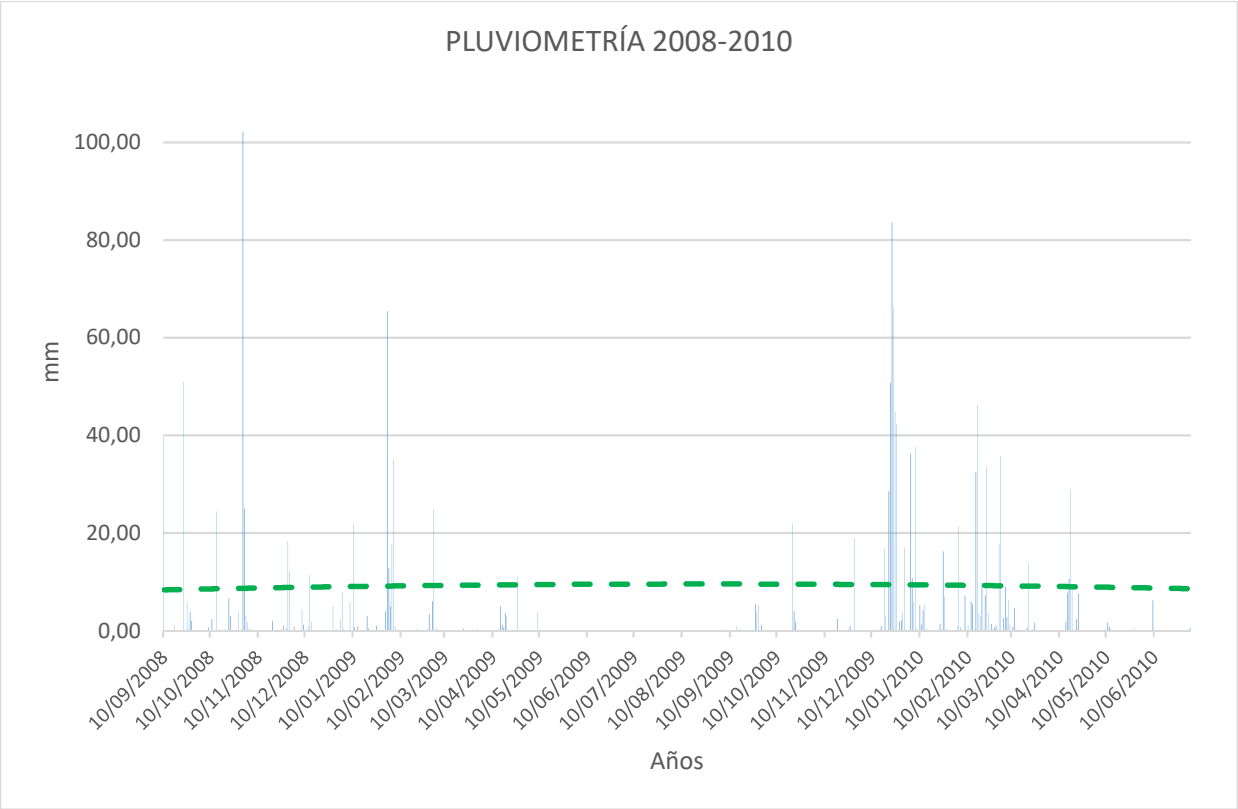
Alturas significantes de oleaje (m). (Fte.: Puertos del Estado. 2023)

- Línea de costa de 2010

La línea de 2010, trazada sobre la ortofoto histórica del PNOA 2010, sigue conservando la forma de los periodos anteriores, desde 2006. Aunque en comparación con 2008, el tramo de la playa de Almayate y el tramo entre el delta del río Vélez y las escolleras (a levante) ha sufrido una leve regresión que sigue amenazando la actividad agrícola próxima a la costa.

Se observa también una leve progresión entorno al delta del río Vélez.

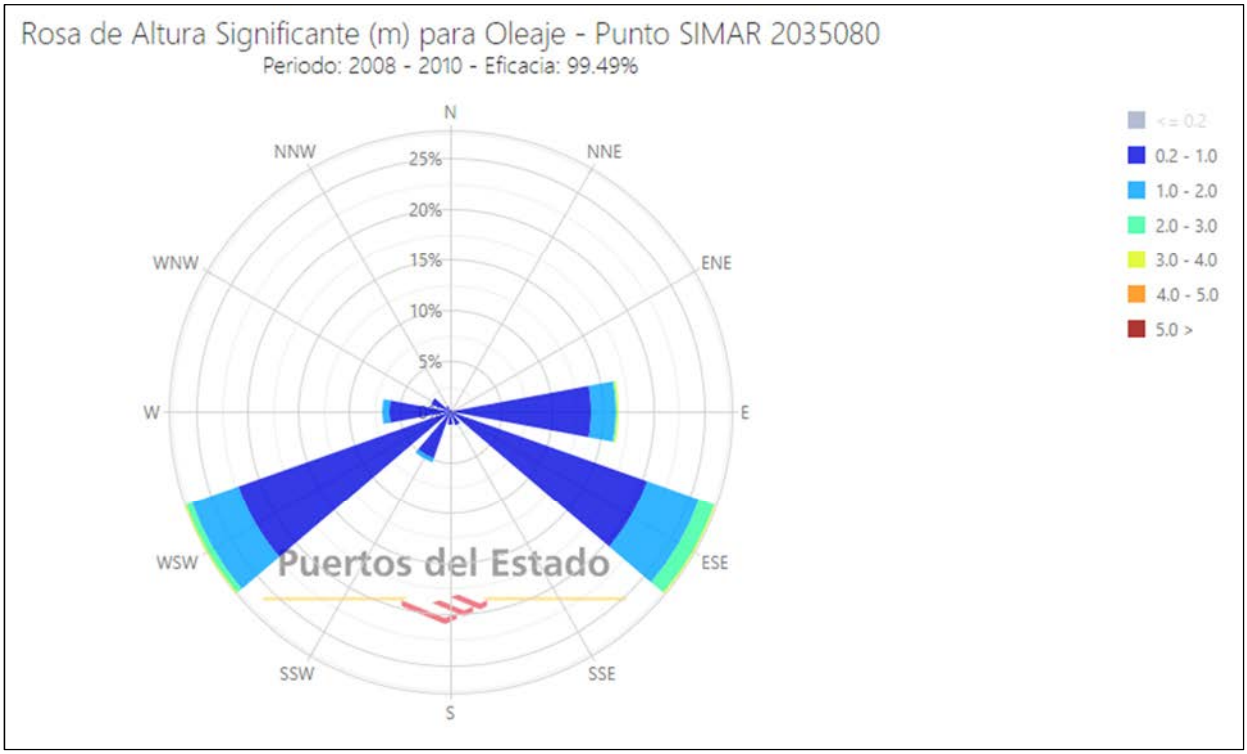
El año 2009 es el último año del periodo seco que comenzó en 2006 (aproximadamente), y a comienzos de 2010 se observa un incremento de las precipitaciones, con una mayor intensidad de las mismas y menos irregularidad.



Intensidad pluviométrica de los años 2008-2010 (Fte.: AEMET. Estación meteorológica Málaga-Aeropuerto. 2023).

Entre 2008 y 2010, se incrementa la tendencia en el aumento de la frecuencia de temporales, donde se observa que el 2.77% del oleaje registrado pertenece a temporales con Hs superior a 2 m, y, especialmente, aumentan aquellos con Hs superior a 4 m. Los temporales de poniente, que comenzaron entre 2006 y 2008, ahora son predominantes entre 2008 y 2010 y superan en intensidad a los de levante. Esto supone un gran cambio en la dinámica costera, generalizándose la erosión y el transporte de sedimentos a lo largo de todo el tramo de estudio, viéndose más afectada (proporcionalmente con lo que hemos visto hasta el momento) el tramo de la playa de Torre del Mar (debido al aumento de los temporales de poniente).

El hecho de que haya habido un notable incremento pluviométrico sirve para contener la regresión en el delta, sin embargo, tanto por la regulación de los cauces en la cuenca como por el evidente cambio en el clima marino no se puede hablar de una progresión clara, sino más bien de un momento en el que se ha compensado parcialmente el efecto negativo del incremento de los temporales sobre la costa.



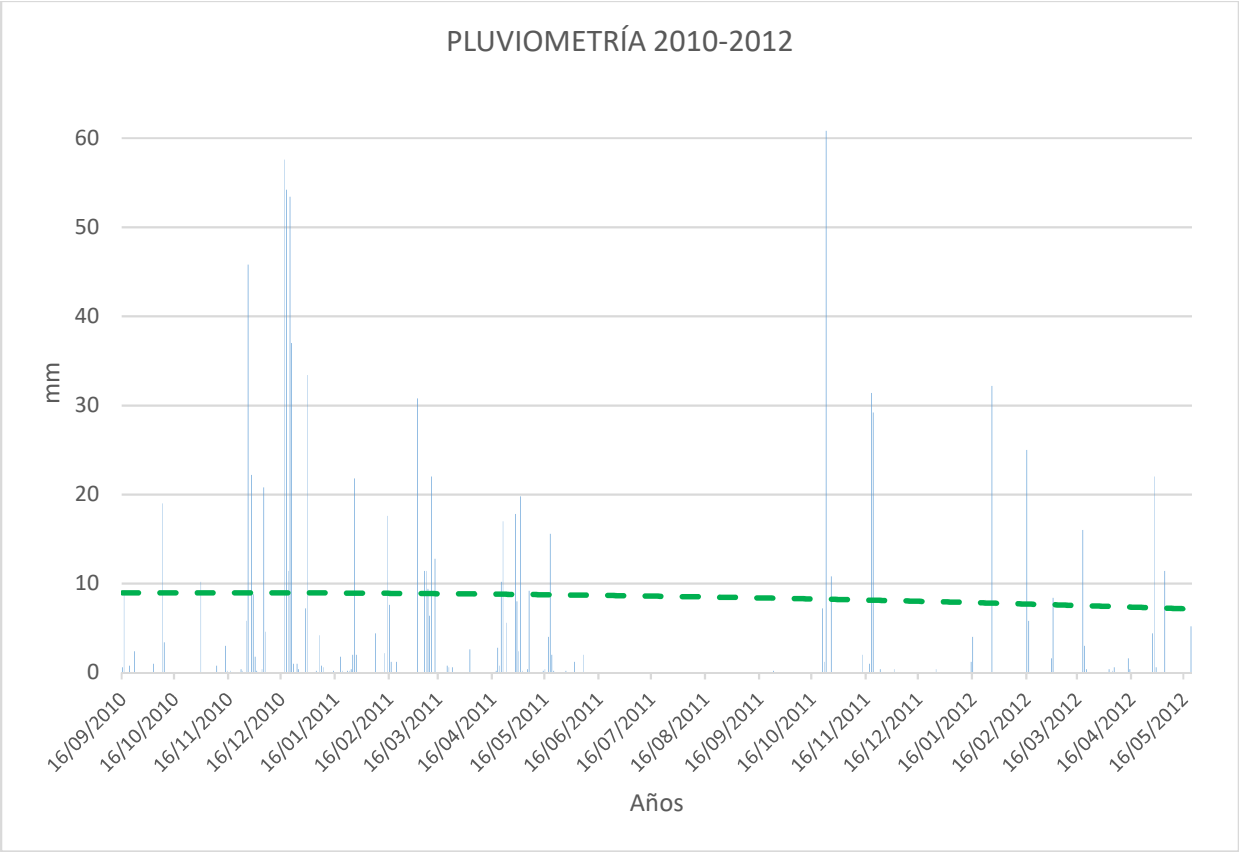
Alturas significantes de oleaje (m). (Fte.: Puertos del Estado. 2023)

- Línea de costa de 2012

La línea de costa en 2012, trazada sobre la ortofoto de IDEMAP 2012 de la Diputación de Málaga, acentúa la forma rectilínea del delta del río Vélez y la playa de Almayate, con pequeñas irregularidades debidas, probablemente, a aportaciones de sedimentos puntuales procedentes de las lluvias de 2010 que, en el aeropuerto de Málaga, superaron los 1100mm, pero no siendo suficientes para prevenir el retroceso del delta seguramente por la regulación que ejerce el embalse de la Viñuela.

La playa de Torre del Mar conserva una forma rectilínea, estabilizada, aunque con mayor ocupación de establecimientos y actividades turísticas que puedan fomentar actuaciones antrópicas de conservación por interés turístico.

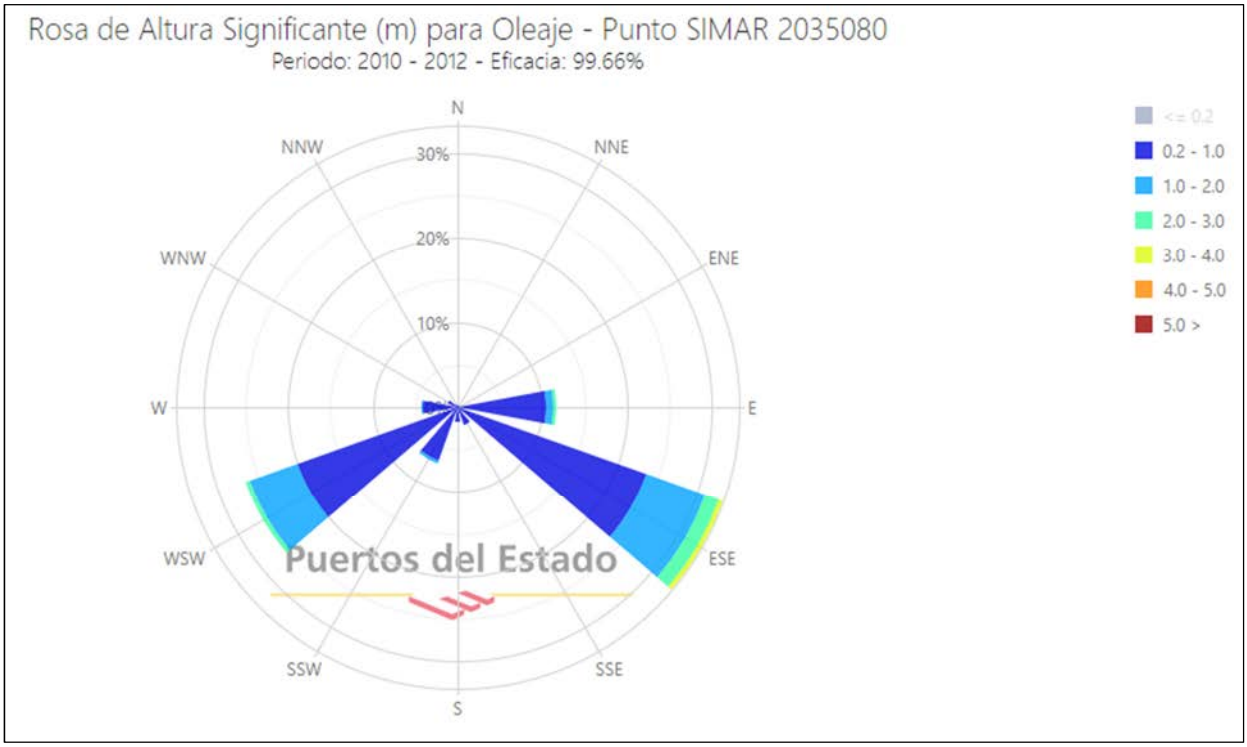
Este periodo comienza con mayores precipitaciones y de mayor intensidad con una distribución más homogénea y que, por tanto, pueden facilitar el mayor aporte de sedimentos fluviales al delta del río Vélez. Sin embargo, a partir de 2012, se observa de nuevo una vuelta a una distribución más irregular de precipitaciones, con un descenso global de las mismas y disminución de la torrencialidad, siendo las máximas precipitaciones registradas menores que la de años precedentes, más propias de 2008, cuando comenzó el último periodo seco.



Intensidad pluviométrica de los años 2010-2012 (Fte.: AEMET. Estación meteorológica Málaga-Aeropuerto. 2023).

La tendencia en los temporales observada en el periodo 2008-2010, con incremento de frecuencias, así como un importante aumento de los temporales de poniente (casi inexistentes en todo el periodo previo estudiado) continúa e incrementa los datos entre 2010 y 2012. Se observa que el porcentaje de olas con Hs superior a 2 m alcanza en este periodo el 2.97% (superior al periodo anterior y más del doble que en cualquier periodo previo a 2004). Los temporales de poniente empiezan a aparecen con mayor frecuencia en todos los años de este periodo, de forma que la bidireccionalidad del oleaje, característico de esta zona, permanece en equilibrio incluso cuando ambos están incrementando la intensidad y, por tanto, la peligrosidad de dichos fenómenos sobre la costa.

La consecuencia principal de las altas precipitaciones hasta 2012 (comenzando un periodo seco) es el aumento de la sedimentación en el delta, sin embargo, la intensidad de los temporales descritos y sus características hacen que se produzcan movimientos de erosión y transporte generalizado, más destacado en el delta (desembocadura del río Vélez). La progresión reflejada en este periodo de estudio en la playa de Almayate, así como en pequeños tramos a levante de la desembocadura son más propios de movimientos oscilantes altamente afectados por la intensidad de los fenómenos que se empiezan a registrar de forma especial a partir de 2006.



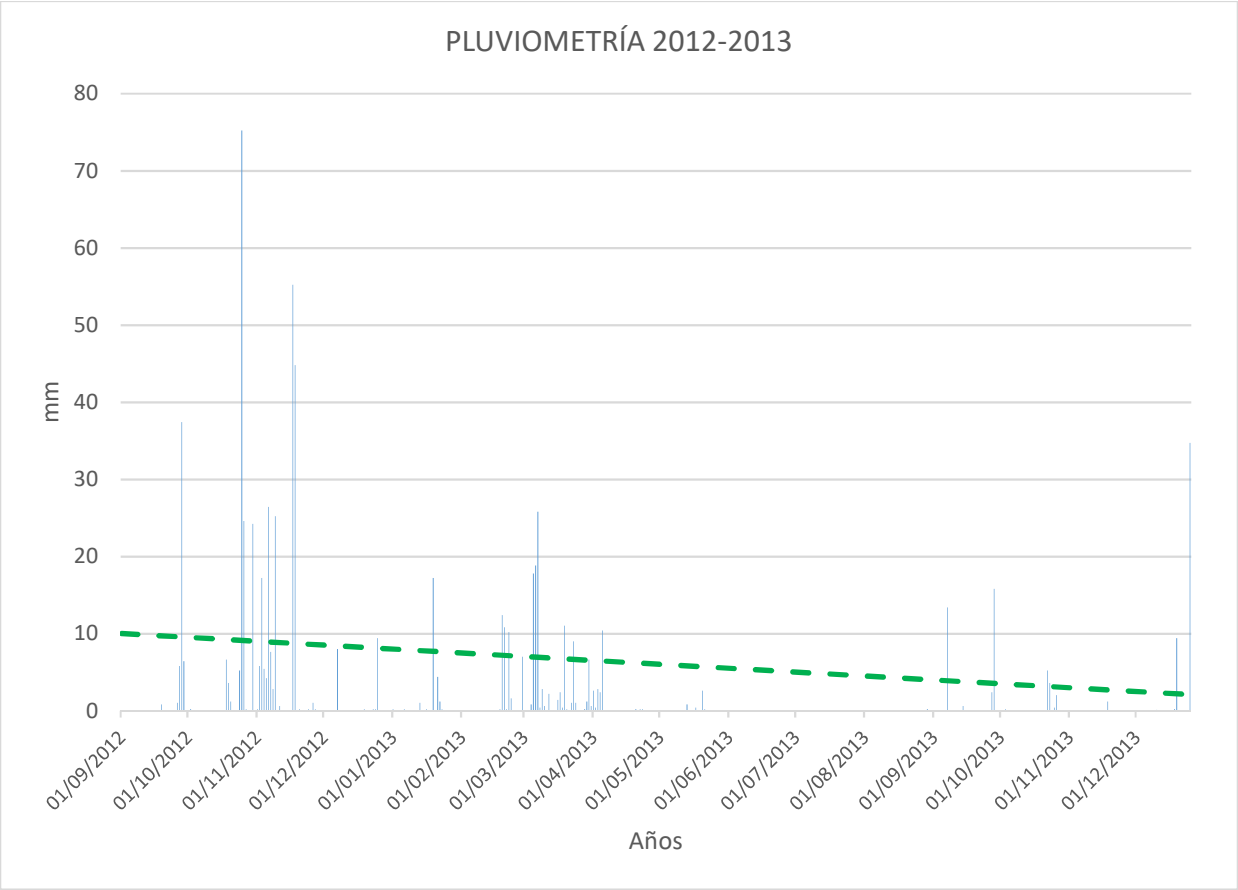
Alturas significantes de oleaje (m). (Fte.: Puertos del Estado. 2023)

- Línea de costa de 2013

La línea de 2013, trazada sobre la ortofoto histórica del PNOA 2013, hay una acreción similar a la ocurrida en 2004 en el delta del río Vélez, junto a una mayor regularidad de la playa de Almayate que se curva suavemente en función a las modificaciones en la desembocadura.

En la playa de Torre del Mar, se continúan dando los procesos, similares al 2012, que generan una línea quebrada en la costa entorno a las obras de protección con escolleras y pequeños espigones. Sus efectos se propagan hacia el este hasta que continúa con un trazado rectilíneo en el extremo oriental.

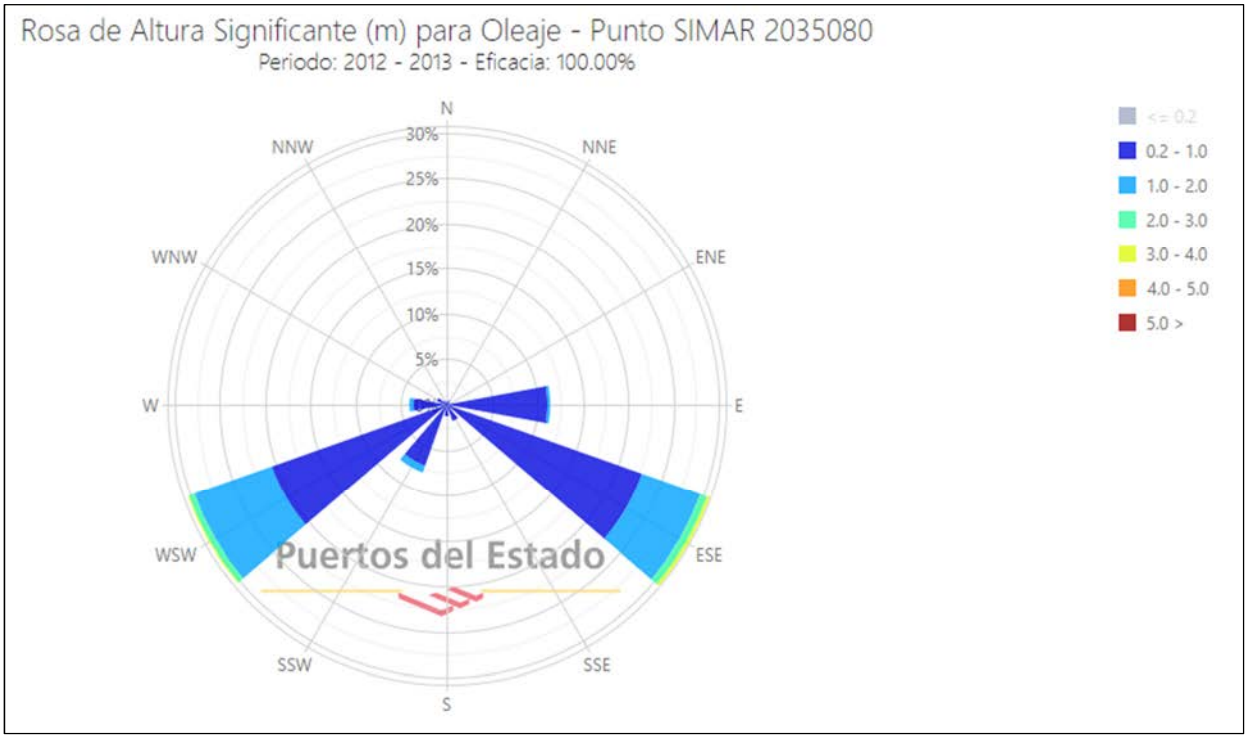
El año 2013 se caracteriza por ser un año seco en el que, en ningún caso, se llegan a registrar precipitaciones superiores a 30 mm acumulados en 24h, por lo que este evento provoca un transporte escaso de sedimentos fluviales.



Intensidad pluviométrica de los años 2012-2013 (Fte.: AEMET. Estación meteorológica Málaga-Aeropuerto. 2023).

Aunque la frecuencia de los temporales en estos años es inferior al del periodo anterior, sigue siendo elevada en comparación con la serie histórica (desde 1957). Los temporales de poniente que entre 2010-2012 sufrieron un fuerte incremento, continúan en el periodo 2012-2013.

Los temporales de poniente favorecen el aporte sedimentario hacia la costa en el lado occidental del delta, y es en este lado donde se observa un crecimiento en el ápice, detectándose incluso una flecha en el periodo 2010-2013 (Guisado-Pintado E., 2015), mientras que en el tramo oriental (playa de Torre del Mar y entorno de las escolleras) más protegido del oleaje de poniente, se generan bajas tasas de erosión/deposición. No obstante, conforme a lo expuesto en el punto 4.1.8, la orientación de la costa y la zona de nearshore favorecen ligeramente una mayor erosión y es así como encontramos en este año una mayor regresión en dicho tramo.



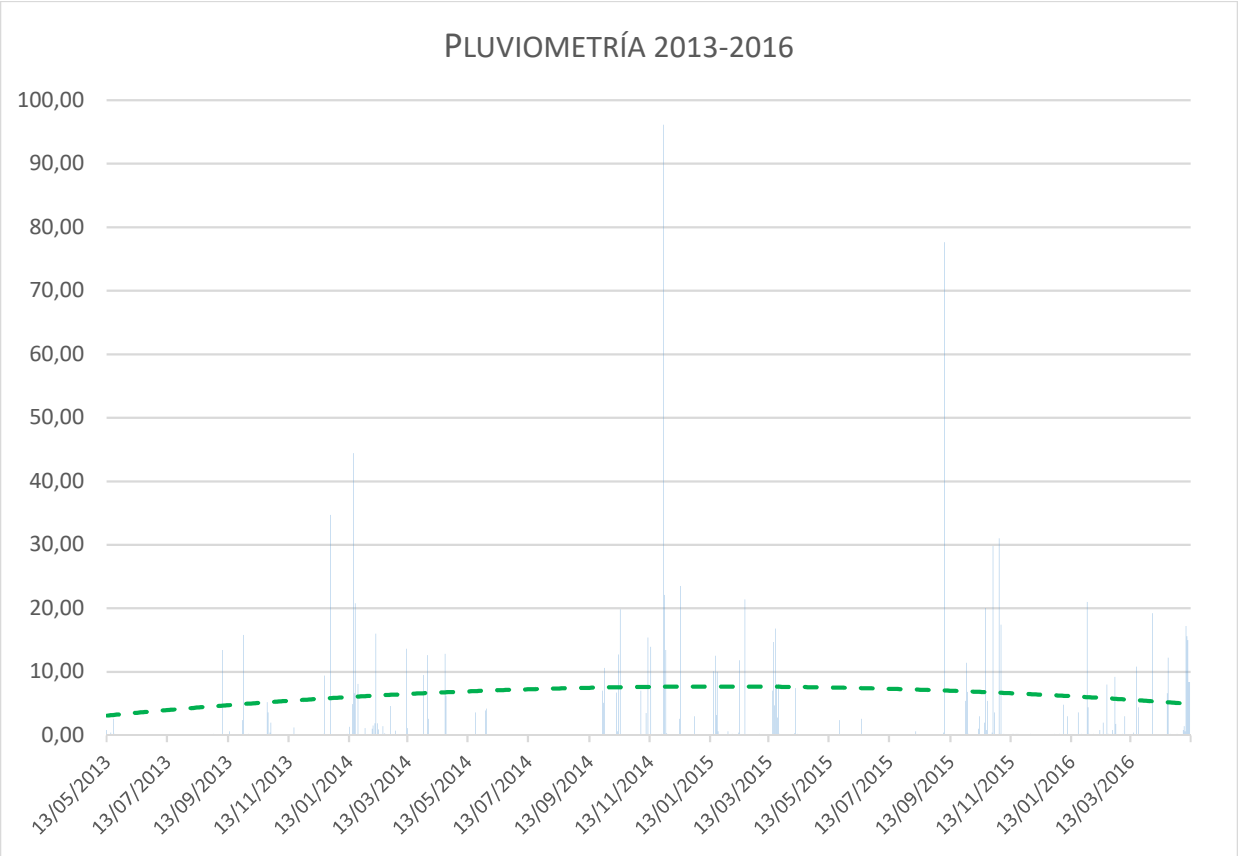
Alturas significantes de oleaje (m). (Fte.: Puertos del Estado. 2023)

- Línea de costa de 2016

La línea de costa en 2016, trazada sobre la ortofoto histórica del PNOA 2016, aumenta las irregularidades en el tramo de Almayate y el delta del río Vélez. Se observan tramos con mayor regresión que otros y comportamientos irregulares a lo largo de la línea de costa.

Igualmente, en la playa de Torre del Mar, la tendencia rectilínea de los últimos años se modifica levemente.

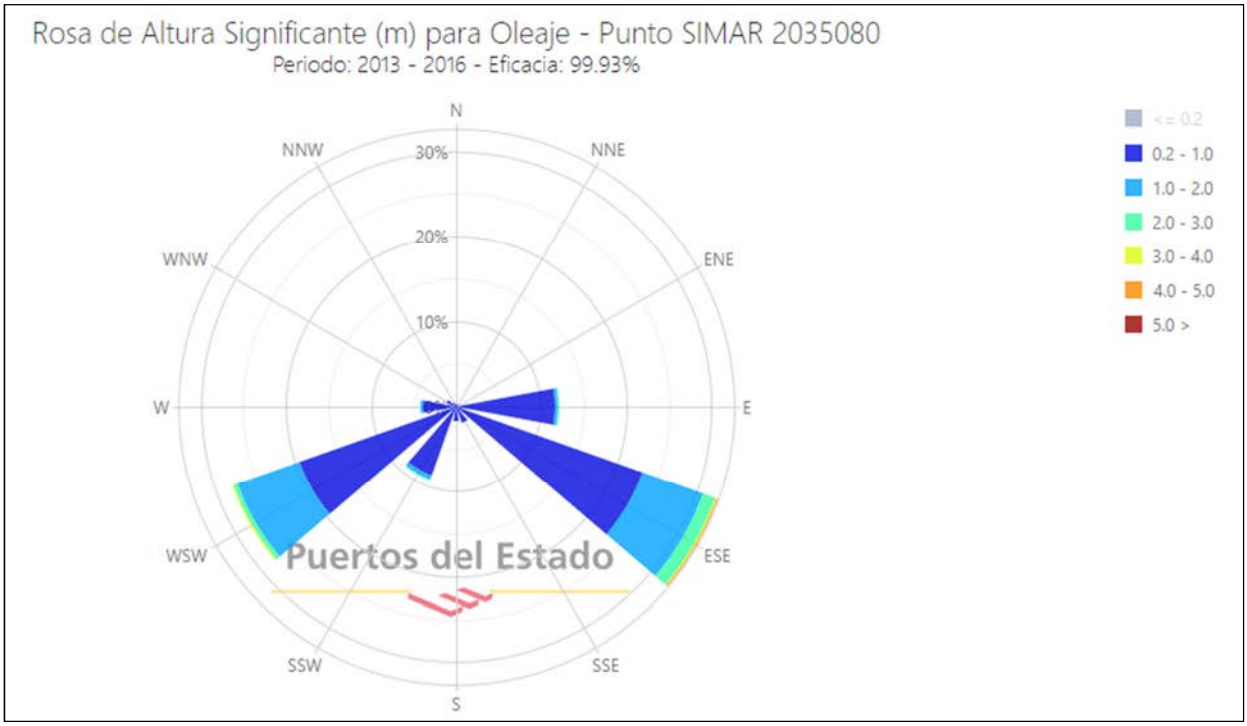
Aunque en estos años se incrementan las precipitaciones, éstas son muy irregulares y concentradas en periodos cortos con gran intensidad, seguidos de largo periodos de nulas o escasas precipitaciones que apenas posibilitan un flujo más o menos homogéneo de sedimentos para convertirse en eventos muy puntuales que, unido al control de caudales en la cuenca (diques y embalses), hace que el aporte fluvial sobre la costa sea cada vez más reducido.



Intensidad pluviométrica de los años 2013-2016 (Fte.: AEMET. Estación meteorológica Málaga-Aeropuerto. 2023).

Entre 2013 y 2016 vuelve a haber un repunte en la frecuencia de temporales donde se registra un 2.71% de Hs superior a 2 m. Es destacable el temporal de noviembre de 2015 con Hs de 5.37 m. Por otra parte, encontramos años donde, de forma inusual, prevalecen los oleajes de poniente, como en 2014.

Este incremento de oleaje de poniente permite que, entre el periodo 2013-2016, se haya podido registrar cierta progresión de la costa en la playa de Almayate, sin embargo, la mayor exposición del ápice del delta (que se desarrolló a poniente de la desembocadura) a los temporales de levante, siendo éstos inusualmente intensos, la han hecho desaparecer.

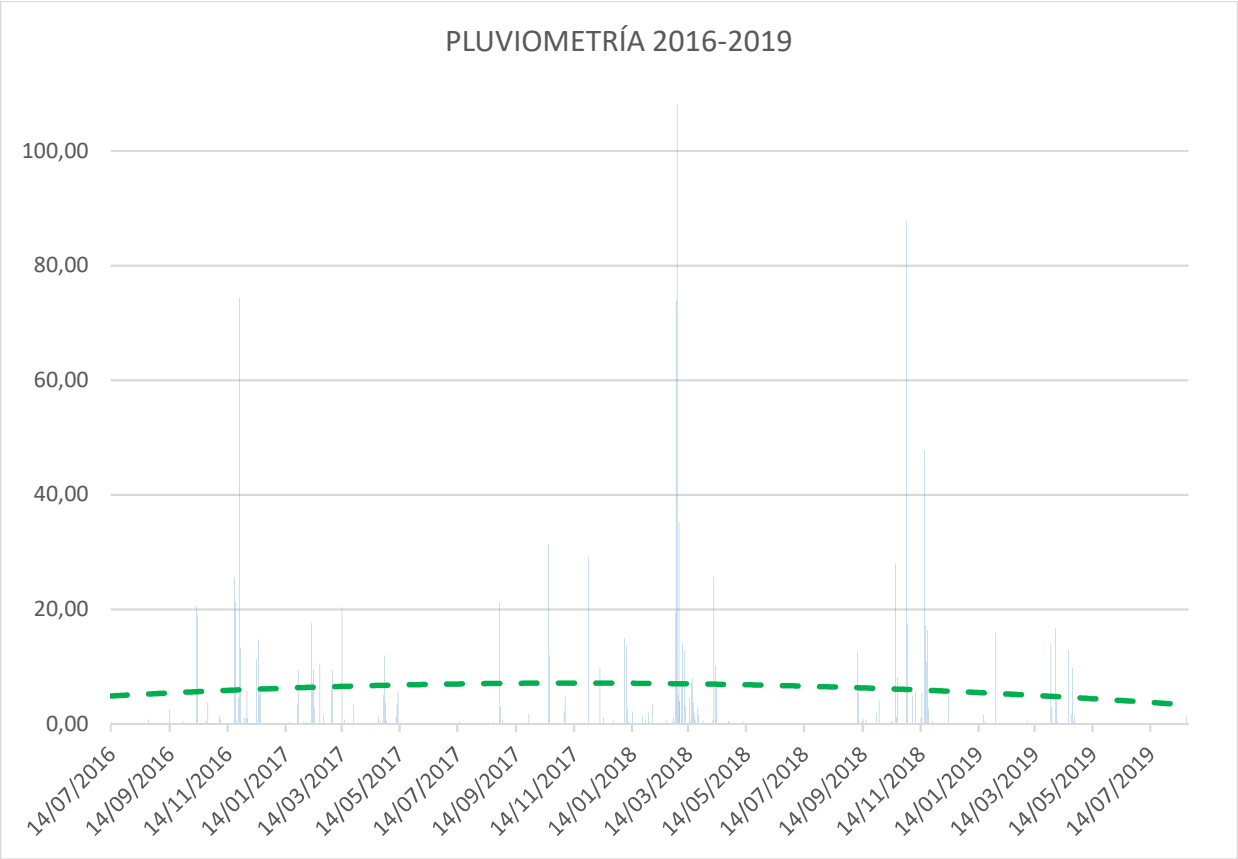


Alturas significantes de oleaje (m). (Fte.: Puertos del Estado. 2023)

- Línea de costa de 2019

La línea de 2019, trazada sobre la ortofoto histórica del PNOA 2019, muestra una continuidad con la tendencia de 2016. Incremento de las irregularidades en la playa de Almayate y delta del río Vélez.

La línea de costa de la playa de Torre del Mar sufre las mayores modificaciones en la zona próxima a las escolleras, con cambios drásticos en la línea, seguido de un trazado rectilíneo a medida que nos aproximamos al área urbana. En estas fechas se realizaron obras en la costa que eliminaron las escolleras ubicadas en la zona de levante de la zona de estudio y que son las que produjeron estas modificaciones en la línea de costa, además del proceso regresivo del delta que continua, indudablemente, en toda la zona y la falta de aportes de sedimentos desde la cuenca fluvial debido al periodo de sequía que se mantiene desde el año 2013 y que este año 2019 se agudiza (la precipitación anual de este año 2019 en el aeropuerto de Málaga no llega a los 150mm). Se observan, al igual que en periodos anteriores, la mayor irregularidad de las precipitaciones, cada vez más concentradas y con picos de intensidad menos frecuentes y con capacidad de carga de sedimentos muy puntual que, en conjunto, tienen poco efecto en el delta.

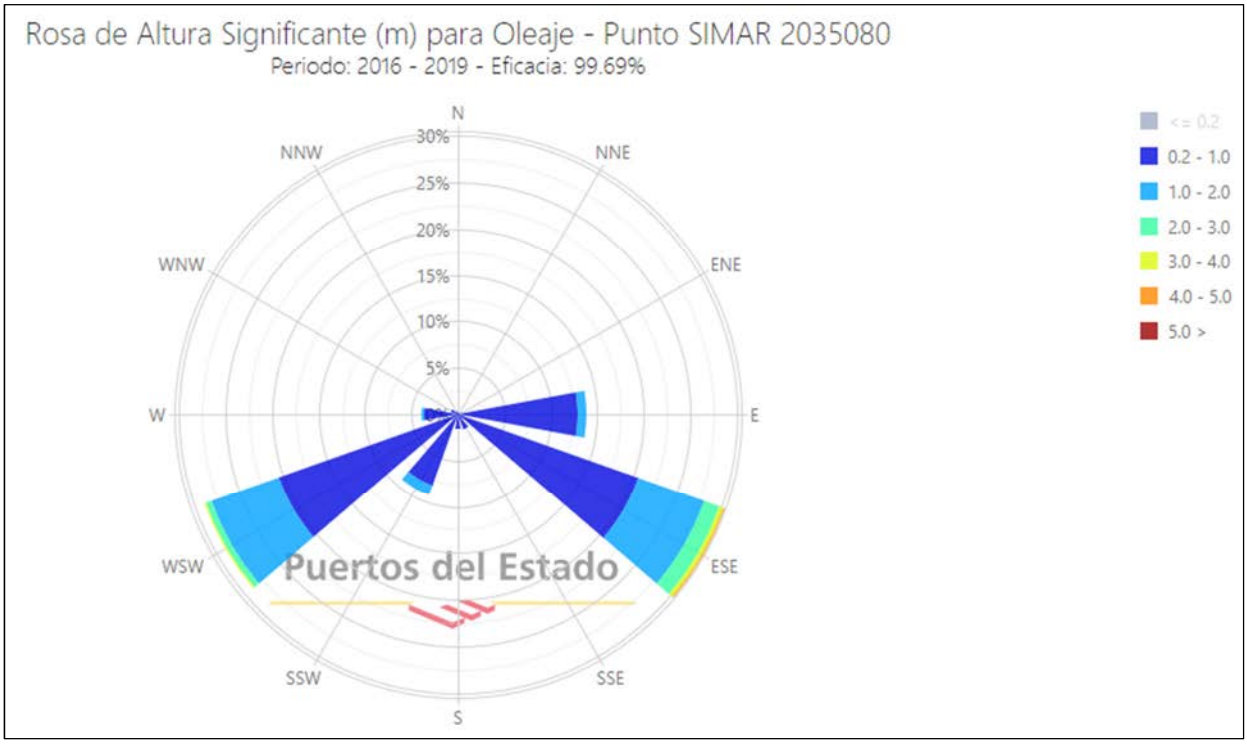


Intensidad pluviométrica de los años 2016-2019 (Fte.: AEMET. Estación meteorológica Málaga-Aeropuerto. 2023).

En este periodo se vuelve a superar la frecuencia de los temporales con respecto a la serie histórica (desde 1957) en el presente estudio. Se observa que el 3.17% del oleaje registrado posee una Hs superior a 2m, y cada vez son más frecuentes alturas superiores a 3 m, siendo casi habituales en momentos equinocciales. Es destacable el temporal de levante de marzo de 2019, donde se registran Hs de 5.24 m. Como vemos, estas cifras se están siendo más frecuentes a medida que avanza el tiempo.

Por otra parte, se estabiliza la tendencia a la aparición de temporales de poniente. Aunque no superan en frecuencia los de levante, estos ya forman parte relevante dentro del clima marino desde los últimos cinco años y sus efectos son más notables en los tramos a levante del delta.

En conclusión, tanto el periodo seco que se está registrando como el incremento paulatino de temporales, tanto de levante como de poniente, en frecuencia e intensidad, han propiciado una regresión en todo el tramo de estudio que amenaza principalmente el entorno del delta.



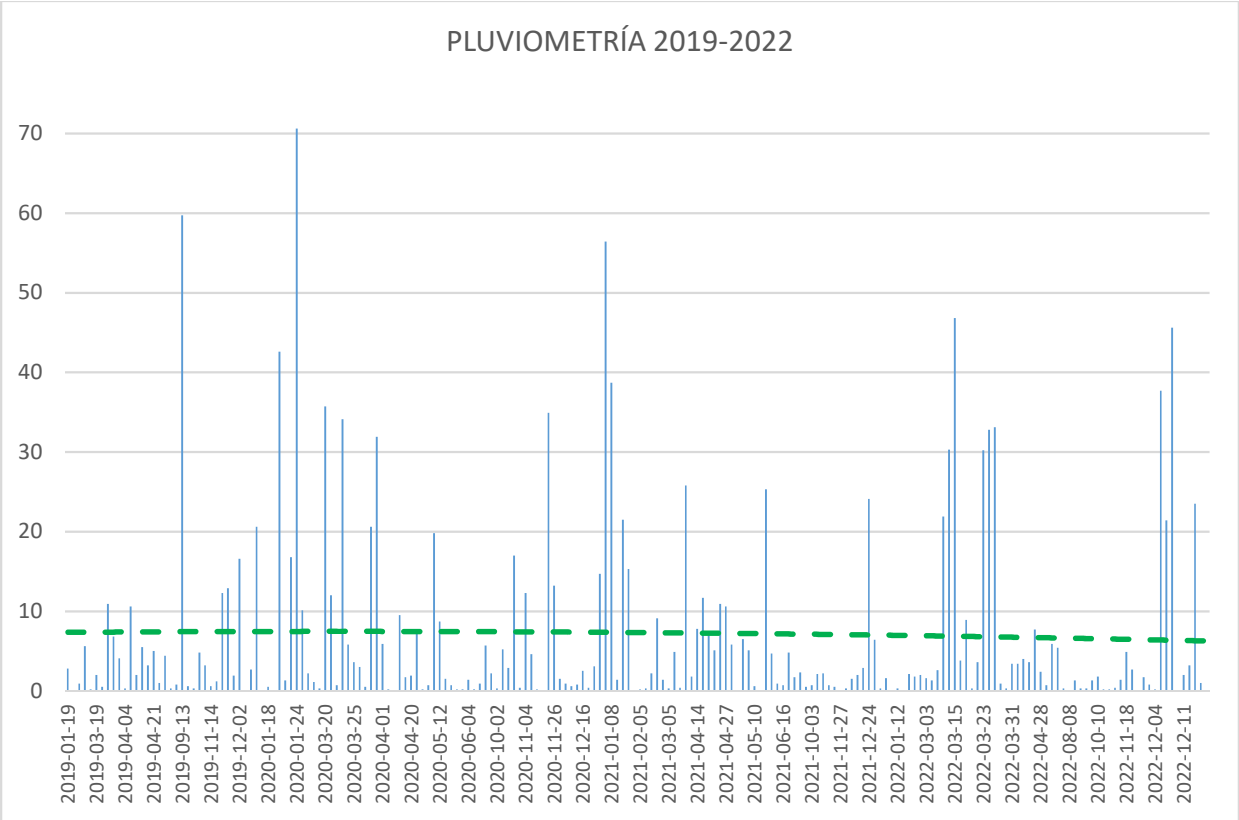
Alturas significantes de oleaje (m). (Fte.: Puertos del Estado. 2023)

- Línea de costa de 2022

La línea de costa en 2022, trazada sobre la ortofoto histórica del PNOA 2022, muestra una continuidad con la tendencia de 2019. Incremento de las irregularidades en la playa de Almayate y delta del río Vélez encontrándose un gran retroceso entre dicho delta y la escollera del extremo occidental de la playa de Torre del Mar.

La línea de costa de la playa de Torre del Mar sigue teniendo un trazado predominantemente rectilíneo a medida que nos aproximamos al área urbana, donde se encuentran las mayores intervenciones de conservación de playa mediante rellenos.

Desde 2020, las precipitaciones tienden a decrecer y a concentrarse más en cortos periodos de tiempo, hasta llegar a 2022 con una situación grave de sequía. Los aportes de sedimentos fluviales son, de esta manera, casi inexistentes a excepción de algún episodio puntual que apenas tiene efectos en la configuración de la costa, ya sea por el corto espacio de tiempo en el que se desarrolla dicho evento o por la regulación de los cauces en la cuenca.

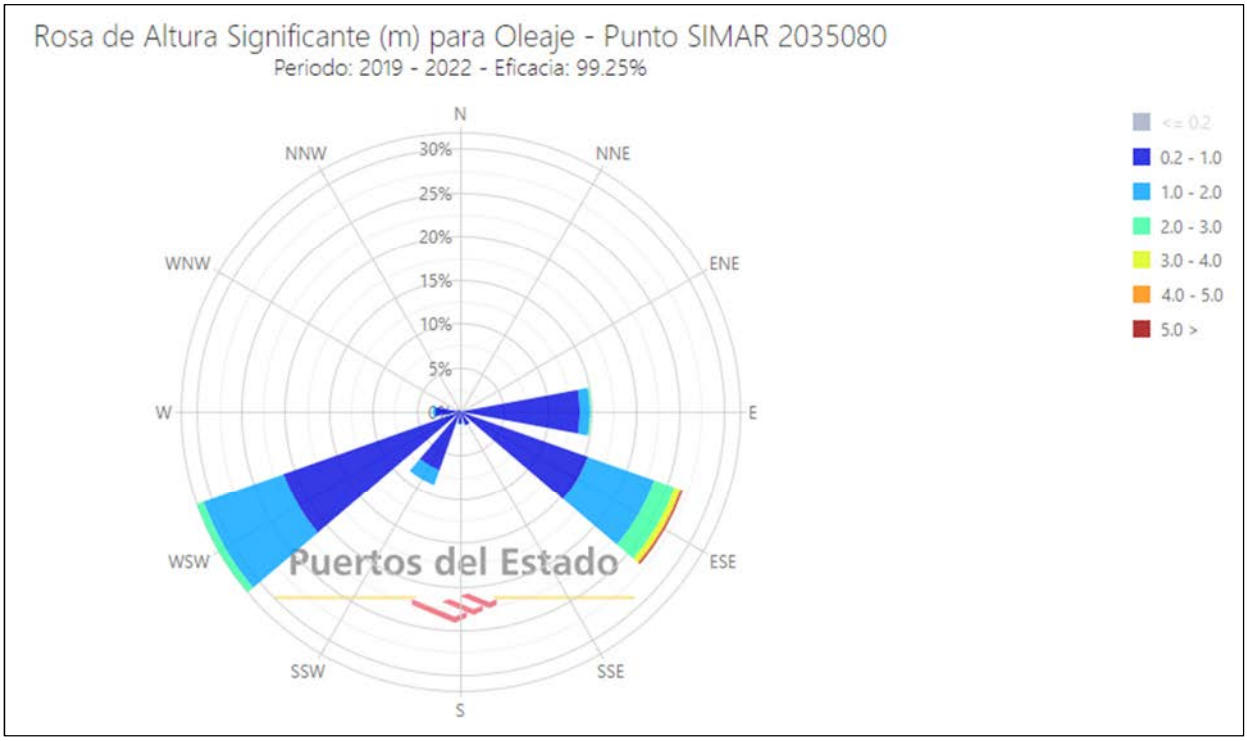


Intensidad pluviométrica de los años 2019-2022 (Fte.: AEMET. Estación meteorológica Málaga-Aeropuerto. 2023).

Entre 2019 y 2022 vuelven a superarse las frecuencias en la aparición de temporales. Se observa que el 4.37% del oleaje registrado tiene una Hs superior a 2 m. Se superan con facilidad estas alturas y aumenta la frecuencia Hs 4 m.

Aunque la aparición de los temporales de poniente ya es habitual, en este periodo son proporcionalmente inferiores a los de levante, que siguen siendo los más potentes. No obstante, en este periodo de tres años se registra, como dato global, por primera vez, una mayor frecuencia de oleaje de poniente.

Como conclusión, observamos entre 2019 y 2022 una situación similar al del periodo 2016-2019 pero con incremento de la intensidad de los fenómenos de carácter extremo, lo que, unido a una situación de escasas aportaciones fluviales, agudizan la situación de regresión en todo el tramo de costa estudiado.



Alturas significantes de oleaje (m). (Fte.: Puertos del Estado. 2023)

5.1.2 Evolución de la línea de costa

Para el análisis cuantitativo del comportamiento de la línea de costa en el periodo de estudio, establecido en el punto anterior, se ha procedido al trazado de transectos perpendiculares a la costa según la ortofoto de 2022 con una distancia entre ellos de 100 m, dando como resultado el trazado de 16 transectos. En las imágenes siguientes se muestra su distribución.



Distribución de transectos en la playa de Almayate y desembocadura del río Vélez.



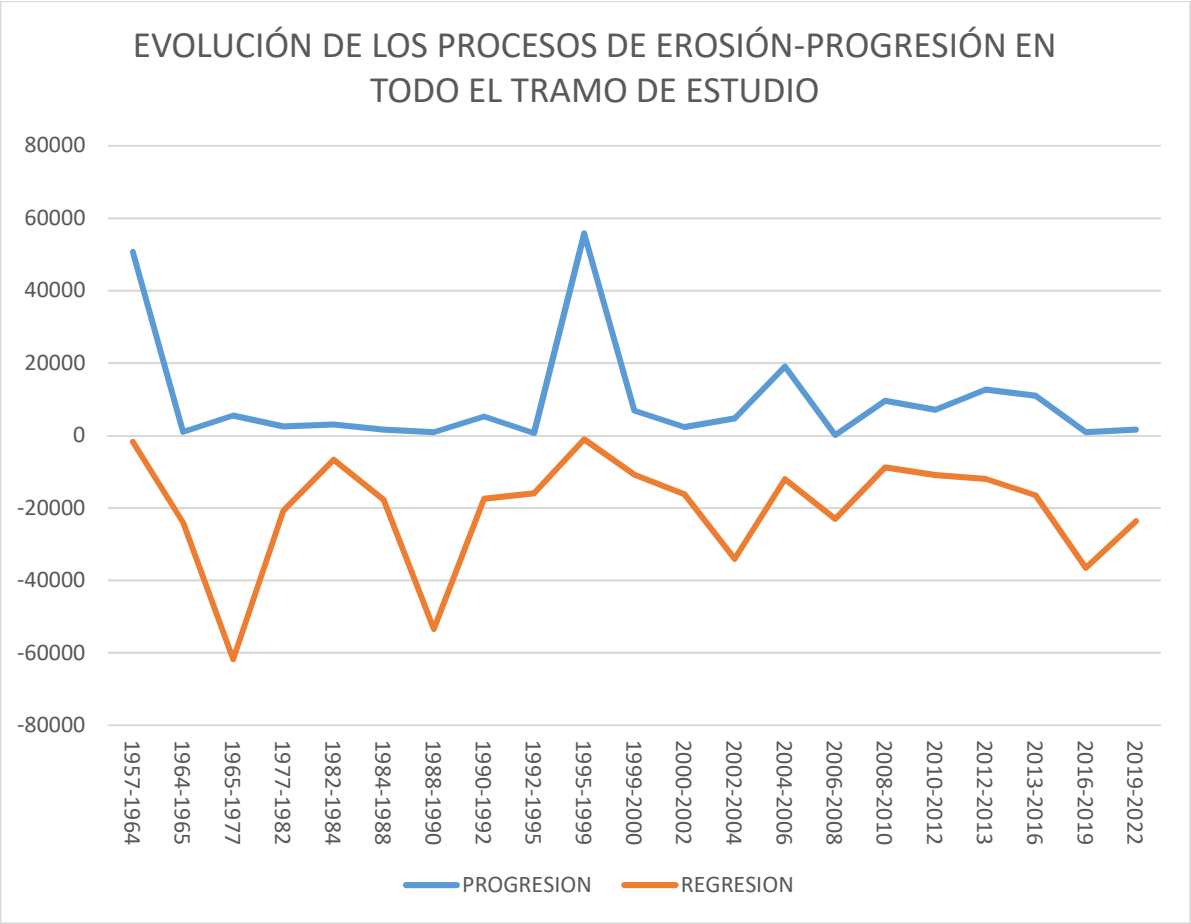
Distribución de transectos en la playa de Torre del Mar.

Entre los años 1957 y 2022, se ha observado una evolución oscilante de la costa con predominio de la regresión. Para cuantificar dichos cambios, hemos tomado la superficie afectada entre los distintos años estudiados, obtenidas entre la línea de referencia interior y las líneas de costa de cada año. Comparando dichas superficies, entre un año y otro, hemos obtenido valores representativos del comportamiento evolutivo de la costa. Los datos abarcan toda la superficie de playa, entre Almayate y Torre del Mar. Un análisis más detallado, con cálculos sobre los transectos representados anteriormente, nos mostrará, más adelante, cómo ha sido esa evolución en las distintas partes de la línea de costa.

A continuación se muestran los valores de la superficie afectada por los distintos procesos en el periodo de tiempo estudiado.

PERIODO	PROGRESION (m²)	REGRESION (m²)	BALANCE (m²)
1957-1964	50712	-1716	48997
1964-1965	1021	-24087	-23066
1965-1977	5537	-61788	-56251
1977-1982	2543	-20718	-18175
1982-1984	3032	-6673	-3641
1984-1988	1656	-17674	-16018
1988-1990	963	-53384	-52420
1990-1992	5223	-17427	-12204
1992-1995	649	-15979	-15330
1995-1999	55817	-1050	54767
1999-2000	6809	-10807	-3998
2000-2002	2303	-16255	-13952
2002-2004	4751	-34078	-29327
2004-2006	19016	-12102	6914
2006-2008	139	-23064	-22926
2008-2010	9626	-8798	828
2010-2012	7109	-10937	-3828
2012-2013	12665	-12011	654
2013-2016	10991	-16506	-5516
2016-2019	941	-36552	-35611
2019-2022	1605	-23608	-22003
TOTAL	203108	-425214	-222107

Evolución de los procesos erosivos en la zona de estudio entre 1957 y 2022 en m².



Evolución de los procesos de regresión-progresión de la costa de Vélez entre 1957-2022 (m²)

Los cambios más importantes en la línea de costa se dan entre 1965 y 2000, donde se observan grandes oscilaciones en los sedimentos que se depositan en la costa, predominando la regresión en toda el área de estudio sin apreciarse apenas movimientos de progresión. Destacan dos intervalos de tiempo en los que se aprecian en la gráfica anterior dos grandes regresiones; una entre 1965 y 1977, probablemente debida al amplio intervalo que abarca (12 años), y la otra entre 1988 y 1990 (2 años) y coincidente con la entrada en funcionamiento del embalse de La Viñuela, es decir, de la retención de sedimentos.

Por otro lado, destaca un movimiento progresivo de la línea de costa importante en el periodo 1995-1999, probablemente debido a las grandes lluvias que se produjeron en 1996 que, por una parte, facilitó el llenado completo del embalse de la Viñuela y, por otro, debido precisamente a ese llenado, se abrieron compuertas de la presa para evitar el rebose del pantano, por lo que la llegada de sedimentos a la costa fue mayor tanto por la mencionada apertura de compuertas como por las grandes lluvias que conllevaron un aumento de la cantidad de sedimentos por una mayor erosión en la cuenca del río Vélez. A partir de 2004 los movimientos de la costa se reducen, siendo predominantes las regresiones, aunque entre 2004 y 2006 el balance es positivo, probablemente por los aportes artificiales de arena en la zona y colindantes para recuperar espacios perdidos por la regresión.

Finalmente, desde 2016 se observa un incremento en la superficie regresiva de la costa, sin apreciarse apenas áreas progresivas lo que da como resultado una regresión grave en los dos últimos intervalos estudiados, es decir, entre 2016 y 2022.

El balance global, de todo el periodo estudiado (1957-2022), es negativo, con una reducción de la superficie de playa de más de 22 ha. Respecto a la cantidad de sedimentos retenidos por el embalse de la Viñuela, tras la batimetría realizada en febrero 2022, la capacidad del embalse ha

pasado de 170 hm3 a 164,37 hm3 por lo que casi 6 hm3 han dejado de circular por la desembocadura del río Vélez y por tanto de poder depositarse, siendo ésta una de las posibles razones de la regresión existente en esta zona y la pérdida del delta del río.

En el Anexo 2 se muestran los planos donde se delimitan las áreas que han sufrido episodios de regresión en los intervalos temporales que se establecen según fechas de las ortofotos y vuelos en base a los que se realiza el presente estudio, de tal forma que se facilite la interpretación del impacto territorial del proceso de regresión.

5.1.2.1 *Análisis cuantitativo y resultados*

De los datos anteriores y los planos del Anexo 2 se destaca lo siguiente:

- La playa de Almayate sufre un proceso continuo de regresión entre 1957 y 2004. Tras un ºperiodo de recuperación de dos años debido, probablemente, a aportes de arena para la regeneración de las playas, vuelve a sufrir una fuerte regresión entre 2006 y 2010. A partir de ese momento tiene un movimiento oscilante, tanto por algunos años de lluvias abundantes como por regeneración de playas, que finaliza entre 2016 y 2019 con una de las mayores regresiones que se han detectado en todo el periodo de estudio y que continúa en el periodo 2019-2022 pudiendo considerarse este último periodo como una regresión grave de la costa dada su intensidad.
- El tramo del delta del río Vélez es el que mayor regresión ha sufrido a lo largo de todo el periodo de estudio, hasta casi desaparecer cualquier forma característica de delta sobre la línea de costa. La mayor regresión sufrida se encuentra entre 1964 y el año 2000. Posteriormente se suceden intensos movimientos oscilantes, con un saldo global negativo.
- La playa de Torre del Mar, en la parte más cercana al delta del río Vélez, sufre las mismas variaciones que las descritas en el punto anterior. En la mitad oriental, se destaca un movimiento basculante de la costa, con cambios suaves y cuyo saldo global es algo más equilibrado, como se verá posteriormente. La mayor permanencia en el tiempo de las formas rectilíneas y menos regresivas de la playa de Torre del Mar, en el extremo oriental de nuestro tramo de estudio, se debe a los continuos trabajos de restauración de la playa con aportes artificiales de arena continuados, motivado por la creciente actividad turística.

Si analizamos estos procesos a través del siguiente, en su mayor parte regresivos, sobre los 16 transectos que se han trazado, observamos cómo en todos ellos, entre 1957 y 2022, ha habido un proceso de regresión generalizada, destacando los transectos 6 y 7, que se localizan en la desembocadura del río Vélez, con un máximo de regresión en el transecto 7 de 281 m.



Medición de la intensidad de la regresión de la línea de costa, medida en metros (m), sobre los transectos entre los años 1957 y 2022.

Tras analizar el comportamiento global de la playa desde 1957, nos centramos en los últimos años, entre 2016 y 2022, para acercarnos a los procesos más recientes.

En el gráfico siguiente, se observa un proceso de regresión en la mayor parte de los transectos, excepto en el 12 y 14. En el transecto 13 se obtienen valores próximos a cero. Es más destacable la regresión en torno a los transectos 7 y 4, que se localizan en las proximidades de la desembocadura del río Vélez, en ambas márgenes respectivamente. Por otra parte, se observa que en los transectos localizados sobre la desembocadura, donde se encuentran las máximas regresiones globales, y especialmente en periodos anteriores, se siguen detectando movimientos regresivos entre 2016 y 2022, pero de menor intensidad.



Evolución del acho de playa, en metros (m), sobre los transectos entre 2016 y 2022.

Estos datos nos muestran una regresión interanual media en estos últimos años (2016-2022), sobre los transectos, que se muestran en la tabla siguiente.

Nº TRANSECTO	REGRESIÓN PROMEDIO ENTRE 2016-2022 (m/año)
Transecto_01	5,98
Transecto_02	10,28
Transecto_03	11,73
Transecto_04	12,05
Transecto_05	7,50
Transecto_06	10,39
Transecto_07	14,33
Transecto_08	6,00
Transecto_09	0,44
Transecto_10	3,32
Transecto_11	3,98
Transecto_12	-0,69
Transecto_13	0,02
Transecto_14	-0,48
Transecto_15	0,41
Transecto_16	0,91

Promedio de la regresión anual entre 2016 y 2022.

Se destacan en rojo los valores promedios que representan una velocidad de regresión mayor a 5 m/año; en amarillo aquellos transectos que presentan regresión, pero a menor velocidad de 5 metros por año y en verde los transectos que se mantienen o tienen alguna progresión. Dichos transectos son específicamente: transecto 01 a 08 en regresión "grave", transectos 09 a 11 y transecto 15 a 16 en regresión y transectos 12 a 14 en progresión o se mantienen estables. Es reseñable que entre los transectos 11 y 12, entre 2017 y 2019 se elimina una escollera perpendicular a la costa produciendo una regresión, generando un entrante a levante de la escollera de defensa (transecto 10), que posteriormente se estabiliza al mantener la línea de playa de Torre del Mar (ortofoto 2022).

La mayor regresión en la zona se localiza en la parte oriental de la playa de Almayate y en la desembocadura del río Vélez, en ambas márgenes.

En la imagen siguiente se muestra el área afectada por estos valores de regresión/progresión durante los últimos cinco años con datos significativos (2016-2022).



Regresión en la playa de Almayate, desembocadura del río Vélez y extremo occidental de la playa de Torre del Mar, en el periodo 2016-2022.

Por tanto, se puede afirmar que entre el transecto 01 y el transecto 08 existe una regresión que puede considerarse "grave" desde el punto de vista del Reglamento General de Costas según su artículo 29 ya que la línea de costa se reduce en más de cinco metros al año durante los últimos cinco años que se ha podido estudiar mediante ortofotografía, es decir, entre 2018 a 2022, incluso más allá, dado que entre 2016 y 2022 (siete años) hay varias zonas en las que esta reducción es mayor de 10 metros anuales.

Teniendo en cuenta las características de la costa descritas en el punto 4.1.6, y a la descripción de los fenómenos hidrológicos y marinos descritos en cada periodo de estudio, se puede llegar a las siguientes conclusiones:

En relación a la hidrología:

- Se ha observado una tendencia a la reducción paulatina de las precipitaciones entorno a la cuenca del río Vélez.
- Estas precipitaciones son cada vez más concentradas, menos homogéneas en el tiempo y con momentos de alta y baja intensidad cada vez más extremos.
- Los aportes sedimentarios son así más puntuales, con menor efecto en la costa. Este hecho se ve agudizado por el control hidrológico de la cuenca mediante los embalses.

En relación al clima marino.

- A partir del año 2004 hay un claro aumento de la frecuencia de temporales, siendo esta frecuencia hasta cuatro veces superior de lo que acontece en las décadas de los 60, 70 y 80.
- La dirección del oleaje en los temporales sufre un importante cambio. Mientras que hasta el año 2004 éstos eran principalmente de levante, ahora surgen los temporales de poniente que progresivamente van adquiriendo mayor frecuencia y potencia.
-

5.1.2.2 *Previsión y tendencia del estado futuro de la línea de costa*

Tomando los datos sobre las líneas de costa mostrados en puntos anteriores, se analiza la evolución a 10 y 20 años de la costa mediante el modelo Digital Shoreline Analysis System-DSAS (Thier et al., 2010). Estos resultados serán comparados con una proyección del comportamiento de la línea de costa en base al desplazamiento medio anual entre 1957 y 2022, conforme a los datos expuestos en el punto anterior. Ambos métodos generan resultados diversos que deben responder a un comportamiento común: los procesos de regresión y progresión por cada transecto deben ser similares.

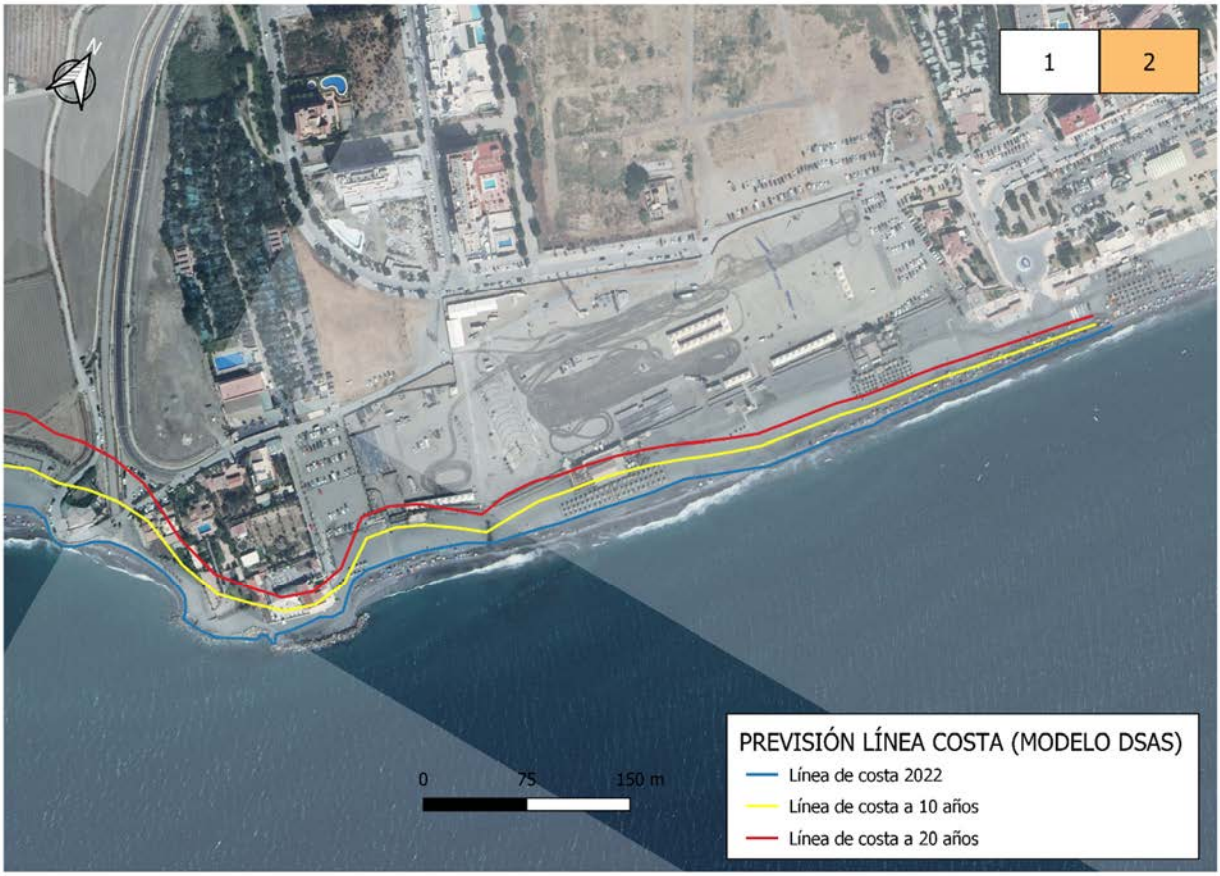
El objetivo es crear la línea de costa prevista para 50 años. Dicha línea es una proyección de los datos actuales de forma que su posición debe entenderse como consecuencia de las variables actuales e históricas, es decir, suponiendo que las condiciones actuales no se vean modificadas.

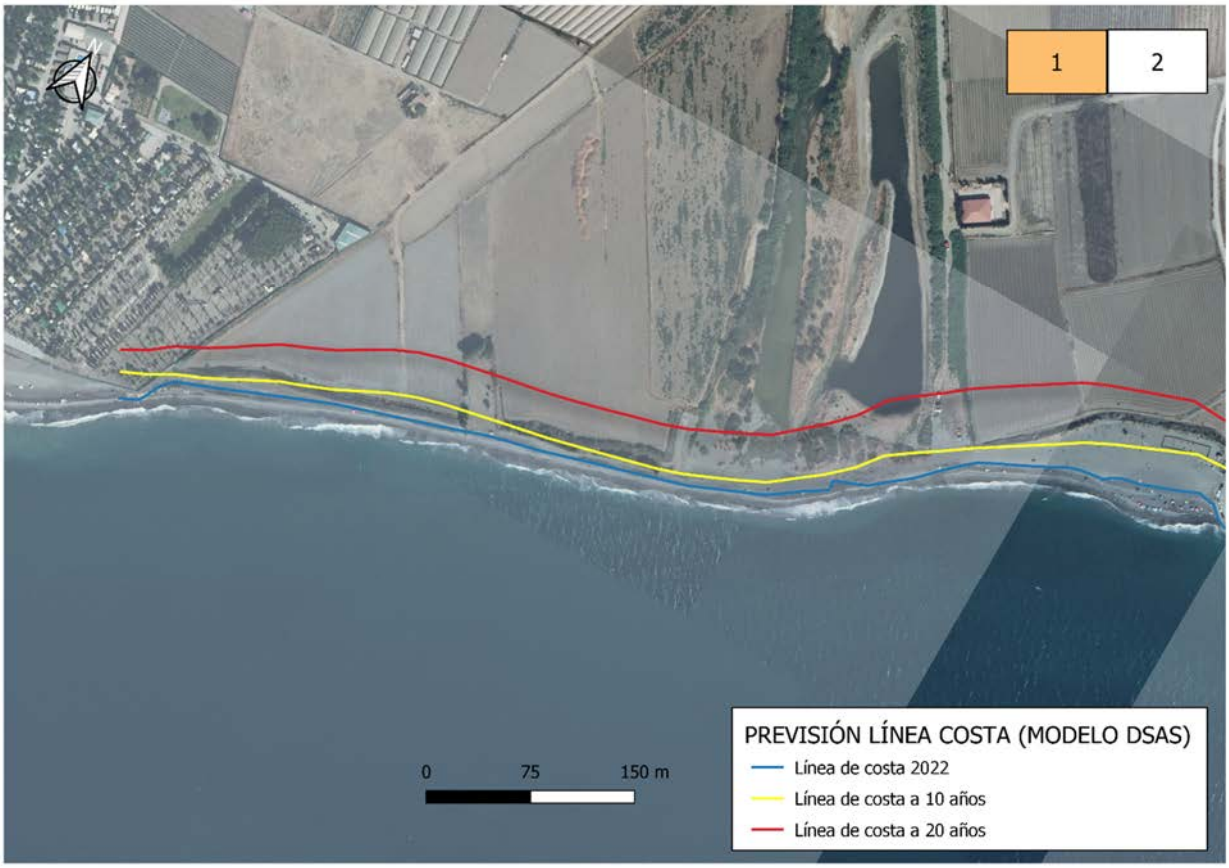
El modelo DSAS aporta predicciones a 10 y 20 años, pero no a cincuenta, por lo que debemos comprobar primero si haciendo una proyección lineal mediante los datos de evolución media anual, obtenida con los datos de los puntos anteriores, obtenemos un resultado similar al conseguido con DSAS, para después, poder proceder a la proyección a 50 años.

Para ello, los resultados de anchos de playa a 10 Y 20 años calculados por ambos métodos se evaluarán. En este caso, consideraremos que el modelo DSAS debe ser la variable de la que dependa el modelo de los datos medios anuales, y que nos confirme que, estadísticamente, ambos modelos predictivos ofrecen comportamientos similares para 10 y 20 años y, por tanto, la línea de costa prevista a 50 años se podrá definir.

5.1.2.2.1 Línea de costa a 10, 20 y 50 años

DSAS genera un modelo predictivo de evolución de la costa a 10 y 20 años. El resultado, que se muestra a continuación, revela una situación de la línea de costa con una fiabilidad del 90%, pero debe entenderse que este es un resultado que se obtiene al mantener como premisa que ninguna de las circunstancias de las que depende la dinámica litoral sean modificadas en el periodo modelizado.


1
2
PREVISIÓN LÍNEA COSTA (MODELO DSAS)
Línea de costa 2022
Línea de costa a 10 años
Línea de costa a 20 años
0
75
150 m



Modelo predictivo de evolución de la línea de costa a 10 y 20 años según DSAS entre la playa de Almayate y la playa de Torre del Mar

Teniendo en cuenta lo anterior, se estima que, si las condiciones no varían, en las predicciones a 10 y 20 años, el tramo de costa de la margen izquierda del río Vélez, entre los transectos 6 y 9 se producirán los mayores movimientos regresivos, con unos máximos de 40 m de regresión a los 10 años y de 70 m (con respecto a la línea de costa de 2022).

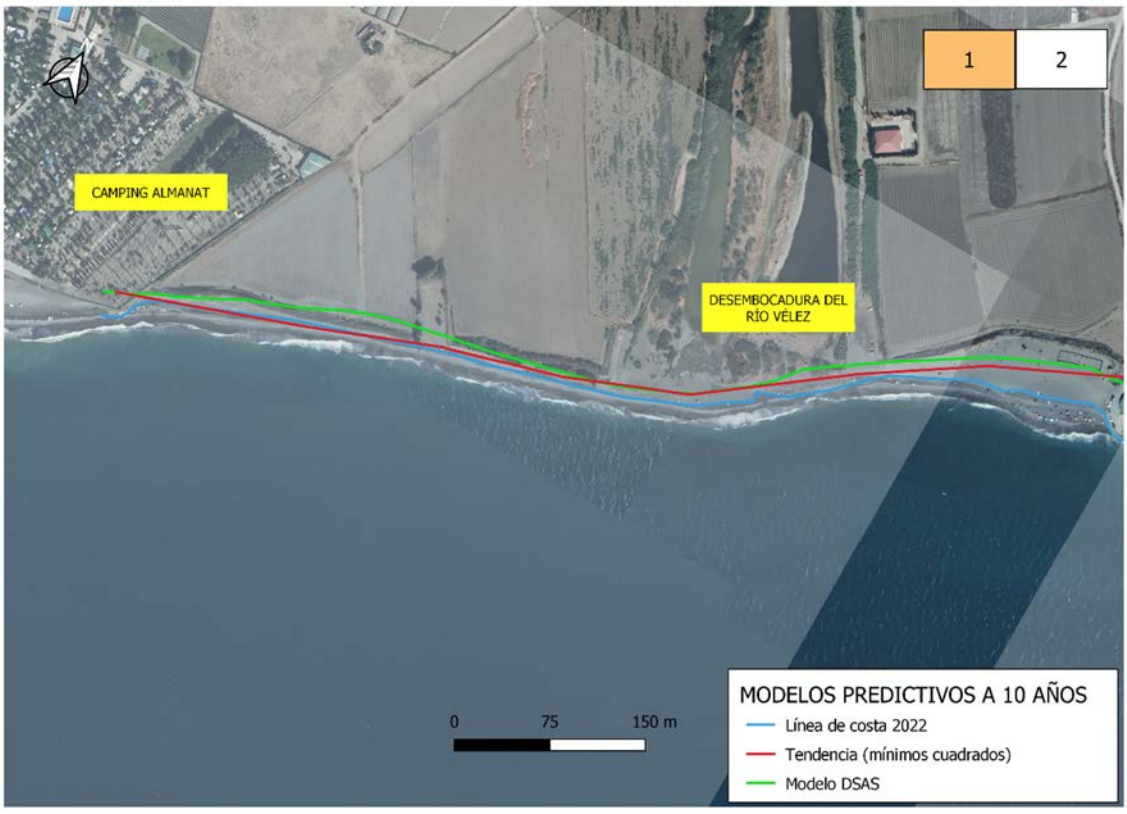
En el resto del área de estudio, la regresión será más leve, pero, en ningún caso, se prevén movimientos progresivos.

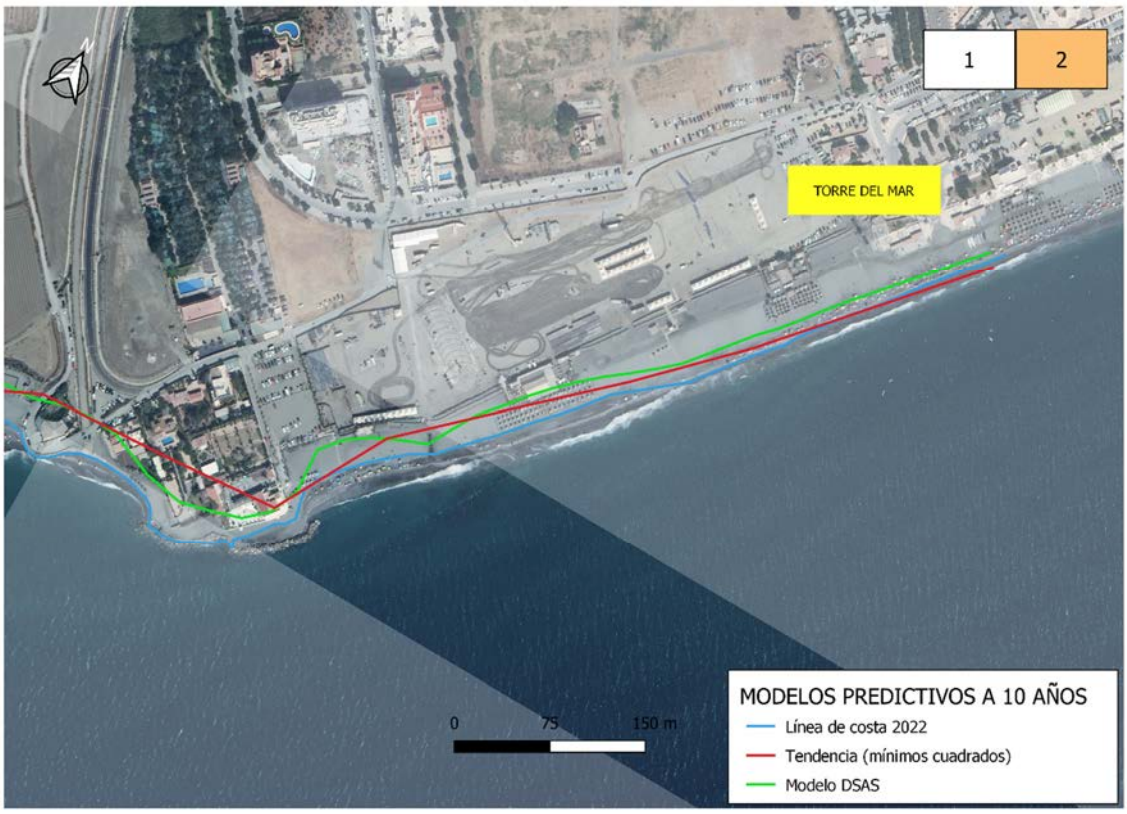
- *Proyección a 10 años*

En la siguiente tabla se exponen los valores de anchos de playa a 10 años que se obtienen con el método DSAS y los valores obtenidos aplicando una proyección con la variación media interanual por cada transecto de los anchos de playa obtenidos mediante la delimitación de la costa mediante ortofoto entre 1957 y 2022.

NUM. DE TRANSECTO	ANCHOS DE REFERENCIA - PREVISIÓN A 10 AÑOS (m)	
	MINIMOS CUADRADOS	DSAS 10 AÑOS
Transecto 1	-18.60	-18.98
Transecto 2	18.70	3.86
Transecto 3	12.86	3.61
Transecto 4	18.19	14.85
Transecto 5	199.17	198.62
Transecto 6	168.69	161.49
Transecto 7	23.44	17.45
Transecto 8	-45.24	-41.02
Transecto 9	-29.67	-10.55
Transecto 10	-8.25	-8.66
Transecto 11	13.51	13.81
Transecto 12	20.01	15.19
Transecto 13	39.29	32.63
Transecto 14	54.98	46.52
Transecto 15	63.38	52.66
Transecto 16	35.83	24.12

Valores de anchos de playas en la proyección a 10 años. Los valores negativos se producen cuando el modelo predictivo establece que la línea de costa se encuentra detrás (tierra adentro) de la línea de referencia interior.





Comparación entre línea DSAS y tendencia (mínimos cuadrados) en la proyección a 10 años.

A primera vista ambos conjuntos de datos muestran líneas de costa similares a excepción del tramo de oriental, a partir de las escolleras, cuyas discrepancias parten del hecho de que es un tramo altamente modificado a lo largo de todo el periodo de estudio con continuas intervenciones de distinto tipo y con un elevado impacto en la configuración de la costa. Por ese motivo, estas distorsiones deberán ser tenidas en cuenta para obtener un resultado más ajustado a la realidad y, además, deben ser interpretadas correctamente.

El coeficiente de correlación de Pearson es una medida estadística que indica la relación entre dos variables, en nuestro caso, el ancho de playa a 10 años según el modelo predictivo DSAS y el ancho de playa según el modelo predictivo resultante de la tendencia, en base a los datos de anchos de playa entre 1957 y 2022, con mínimos cuadrados.

Considerando la serie de datos de la tabla anterior, el coeficiente se define por la fórmula:

$$\rho_{X,Y} = \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{\operatorname{Cov}(X,Y)}{\sqrt{\operatorname{Var}(X)\operatorname{Var}(Y)}}$$

Donde:

σ_{xy} es la covarianza de (X, Y)

σ_x es la desviación estándar de la variable X

σ_y es la desviación estándar de la variable Y.

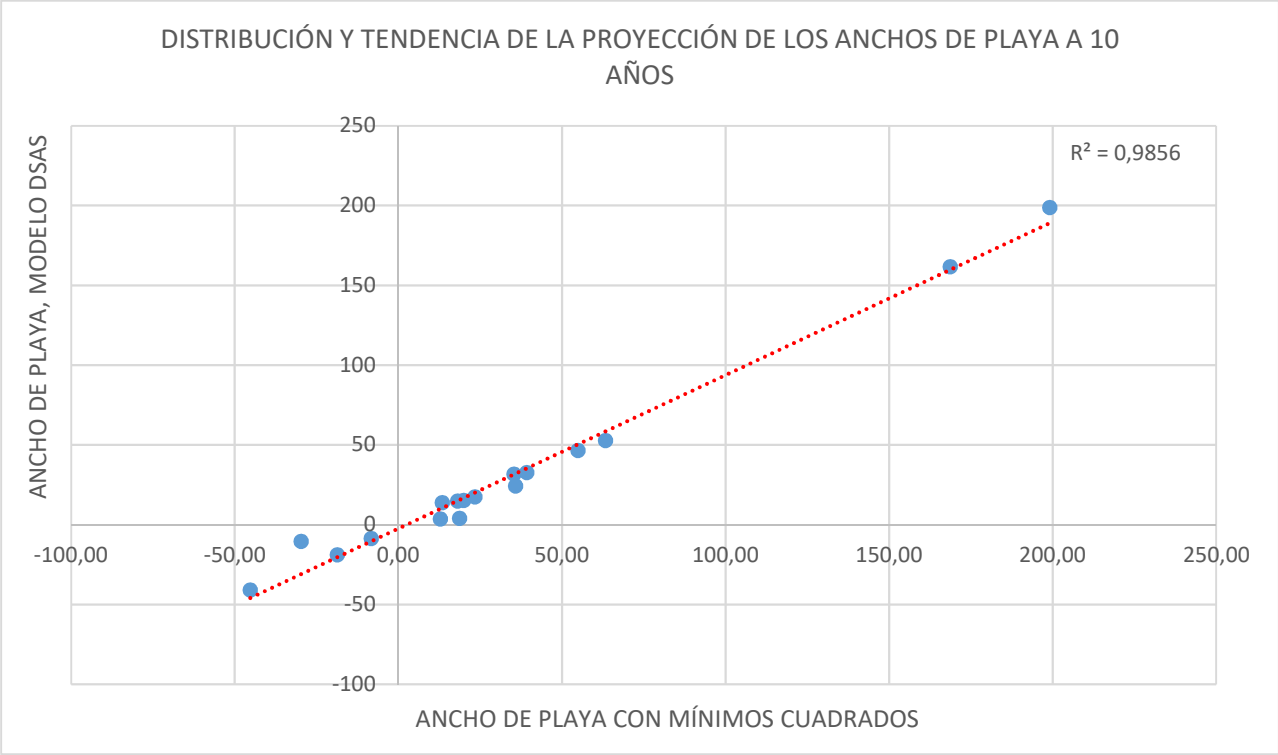
Cuanto más se acerca este valor a 1, más fuerte es la relación entre las variables.

El valor del coeficiente de correlación de Pearson para nuestras series es:

$$\rho_{x,y}=0,99$$

Por tanto, ambas series tienen un comportamiento similar para cada una de sus proyecciones a 10 años.

Dicha relación también puede reflejarse en el gráfico de dispersión que se observa a continuación donde comparamos ambas proyecciones. La línea de tendencia resultante es positiva y el valor de la R^2=0.99, lo que viene a corroborar que, aplicando distintos métodos predictivos, el comportamiento a 10 años de la línea de costa es el mismo, donde en la mayor parte del tramo es de carácter regresivo.



Distribución de los anchos de playa a 10 años (m) según modelo DSAS y proyección de la media entre 1957-2022

Una vez conocido el comportamiento similar de ambos conjuntos de datos, debemos saber si los anchos de playa por transecto son diferentes, a fin de poder tomar como válidos o no los anchos de playa de 50 años obtenidos mediante mínimos cuadrados.

Para ello realizamos la prueba de de *t-Student* para muestras independientes cuyas varianzas son desconocidas y diferentes.

Planteamos las siguientes hipótesis:

Hipótesis nula: H_0: $\mu_1 - \mu_2 = 0$ (ambas proyecciones no tienen diferencias)

Hipótesis alternativa: H_1: $\mu_1 - \mu_2 \neq 0$

Siendo la hipótesis alternativa que ambos conjuntos ofrecen los mismos resultados dentro de un valor crítico de la prueba de α=0.1.

No se conocen las varianzas de las poblaciones, pero se puede suponer que son iguales porque son datos obtenidos del mismo fenómeno y las mismas variables (desplazamiento de la línea de costa en los mismos transectos). Por lo tanto, la fórmula del estadístico de la prueba de hipótesis para la diferencia de medias que debemos usar es la siguiente:

$$t = \frac{(\overline{x_1} - \overline{x_2}) - (\mu_1 - \mu_2)}{s_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}}$$

Calculamos la desviación estándar combinada de las dos muestras:

$$s_p = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}}$$

Dando como resultado S_p=62,89

Por tanto, la prueba de la hipótesis para la diferencia de medias:

t=0,17

α=0.1 α/2=0,05

t α/2 n_1+n_2-2 = 1,694

Dado que el valor absoluto del estadístico de la prueba es menor que el valor crítico de la prueba, se acepta la hipótesis nula y se rechaza la hipótesis alternativa.

$|0,17| = 0,17<1,694$

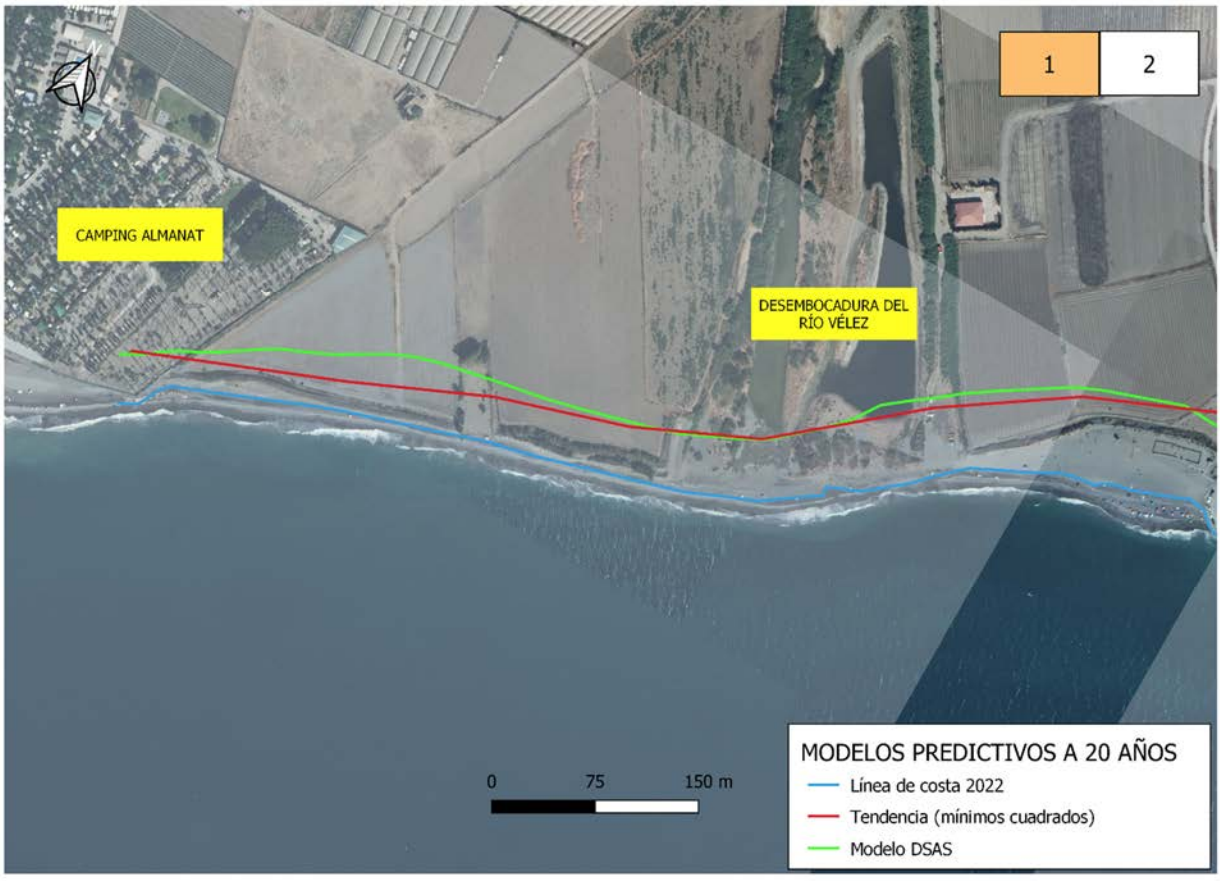
Por lo que se concluye que ambos conjuntos ofrecen datos similares dentro de un rango de incertidumbre α=0.1 y, por tanto, se pueden tomar los datos de los mínimos cuadrados para hacer la proyección a 10 años.

- *Proyección a 20 años*

En la siguiente tabla se exponen los valores de anchos de playa a 20 años que se obtienen con el método DSAS y los valores obtenidos aplicando una proyección con la variación media interanual por cada transecto de los anchos de playa obtenidos mediante la delimitación de la costa mediante ortofoto entre 1957 y 2022.

NUM. DE TRANSECTO	ANCHOS DE REFERENCIA - PREVISIÓN A 20 AÑOS	
	MINIMOS CUADRADOS	Método DSAS
Transecto 1	-37.32	-35.82
Transecto 2	-5.59	-25.68
Transecto 3	-16.45	-27.40
Transecto 4	-13.33	-16.60
Transecto 5	163.67	163.79
Transecto 6	127.09	120.32
Transecto 7	-19.83	-25.00
Transecto 8	-84.98	-71.60
Transecto 9	-56.19	-21.02
Transecto 10	-19.38	-17.67
Transecto 11	-1.57	0.32
Transecto 12	7.67	2.27
Transecto 13	30.39	22.06
Transecto 14	48.75	37.97
Transecto 15	58.95	44.56
Transecto 16	33.30	16.59

Promedio de la regresión anual entre 1957 y 2022. Los valores negativos se producen cuando el modelo predictivo establece que la línea de costa se encuentra detrás (tierra adentro) de la línea de referencia interior.





Comparación entre línea DSAS y tendencia (minimos cuadrados) en la proyección a 20 años.

Al igual que sucede con el modelo a 10 años, ambos conjuntos de datos muestran líneas de costa similares a excepción del tramo entre las escolleras y la playa de Torre del Mar.

El coeficiente de correlación de Pearson es una medida estadística que indica la relación entre dos variables, en nuestro caso, el ancho de playa a 20 años según el modelo predictivo DSAS y el ancho de playa según el modelo predictivo de la tendencia con mínimos cuadrados.

Considerando la serie de datos de la tabla anterior, el coeficiente se define por la fórmula:

$$\rho_{X,Y} = \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{\operatorname{Cov}(X,Y)}{\sqrt{\operatorname{Var}(X)\operatorname{Var}(Y)}}$$

Donde:

σ_{xy} es la covarianza de (X, Y)

σ_x es la desviación estándar de la variable X

σ_y es la desviación estándar de la variable Y.

Cuanto más se acerca este valor a 1, más fuerte es la relación entre las variables.

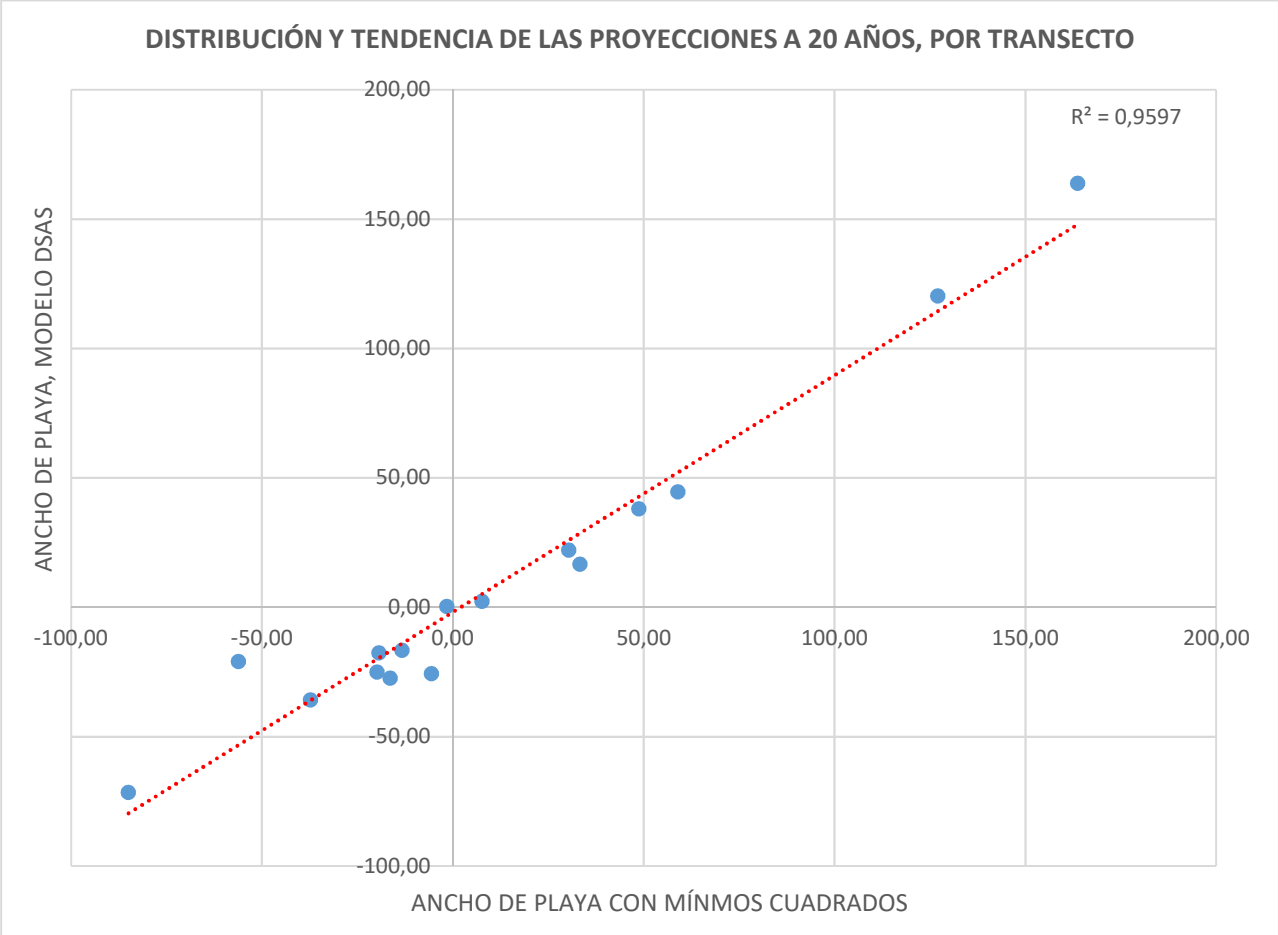
El valor del coeficiente de correlación de Pearson para nuestras series es:

$$\rho_{xy}=0{,}98$$

Por tanto, ambas series tienen un comportamiento similar para cada una de sus proyecciones a 20 años.

Dicha relación también puede reflejarse en el gráfico de dispersión que se observa a continuación donde comparamos ambas variables. La línea de tendencia resultante es positiva y el valor de la R^2=0.96, lo que viene a corroborar que, aplicando distintos métodos predictivos, el

comportamiento a 10 años de la línea de costa es el mismo, donde en la mayor parte del tramo es de carácter regresivo.



Distribución de los anchos de playa a 20 años (m) según modelo DSAS y tendencia con mínimos cuadrados.

Una vez conocido el comportamiento similar de ambos conjuntos de datos, debemos saber si los anchos de playa por transecto son diferentes, a fin de poder tomar como válidos o no los anchos de playa de 50 años obtenidos por mínimos cuadrados.

Para ello realizamos la prueba de de *t-Student* para muestras independientes cuyas varianzas son desconocidas y diferentes.

Planteamos las siguientes hipótesis:

Hipótesis nula: H_0: $\mu_1 - \mu_2 = 0$ (ambas proyecciones no tienen diferencias)

Hipótesis alternativa: H_1: $\mu_1 - \mu_2 \neq 0$

Siendo la hipótesis alternativa que ambos conjuntos ofrecen los mismos resultados dentro de un valor crítico de la prueba de α=0.1.

No se conocen las varianzas de las poblaciones, pero se puede suponer que son iguales porque son datos obtenidos del mismo fenómeno y las mismas variables (desplazamiento de la línea de costa en los mismos transectos). Por lo tanto, la fórmula del estadístico de la prueba de hipótesis para la diferencia de medias que debemos usar es la siguiente:

$$t = \frac{(\overline{x_1} - \overline{x_2}) - (\mu_1 - \mu_2)}{s_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}}$$

Calculamos la desviación estándar combinada de las dos muestras:

$$s_p = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}}$$

Dando como resultado S_p=61,7

Por tanto, la prueba de la hipótesis para la diferencia de medias:

t=0,14

α=0.1 α/2=0,05

t α/2 n_1+n_2-2 = 1,694

Dado que el valor absoluto del estadístico de la prueba es menor que el valor crítico de la prueba, se acepta la hipótesis nula y se rechaza la hipótesis alternativa.

$|0,14| = 0,14 < 1,694$

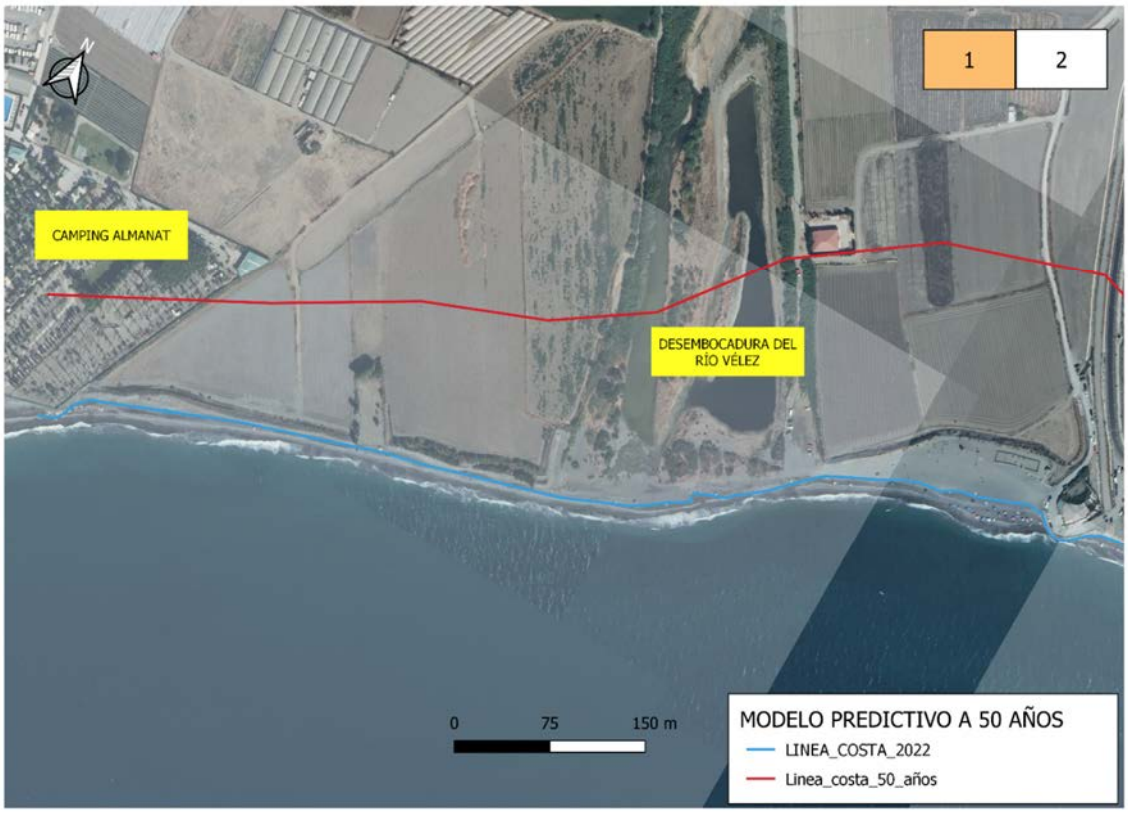
Por lo que se concluye que ambos conjuntos ofrecen datos similares dentro de un rango de incertidumbre α=0.1 y, por tanto, se pueden tomar los datos de los mínimos cuadrados para hacer la proyección a 50 años.

- *Proyección a 50 años*

Una vez comprobada estadísticamente la validez de la proyección de la línea de costa mediante mínimos cuadrados, se procede a obtener los anchos de playa con respecto a la línea de referencia interior, para un periodo de 50 años. Los datos son los siguientes:

NUM. DE TRANSECTO	ANCHO DE REFERENCIA A 50 AÑOS
Transecto 1	-93.45
Transecto 2	-78.48
Transecto 3	-104.37
Transecto 4	-107.87
Transecto 5	57.15
Transecto 6	2.30
Transecto 7	-149.63
Transecto 8	-204.20
Transecto 9	-135.75
Transecto 10	-52.77
Transecto 11	-46.80
Transecto 12	-29.33
Transecto 13	3.69
Transecto 14	30.05
Transecto 15	45.66
Transecto 16	25.73

Previsión de anchos de playa según proyección a 50 años. Los valores negativos se producen cuando el modelo predictivo establece que la línea de costa se encuentra detrás (tierra adentro) de la línea de referencia interior.


1
2
CAMPING ALMANAT
DESEMBOCADURA DEL RÍO VÉLEZ
0
75
150 m
MODELO PREDICTIVO A 50 AÑOS
LINEA_COSTA_2022
Linea_costa_50_años



Línea de costa a 50 años.

5.1.2.2.2 Análisis de la tendencia

Los cambios en el comportamiento de las precipitaciones y el clima marino se han ido afianzando con el tiempo, sin que se observe un comportamiento cíclico en la evolución costera que, conforme a la serie temporal analizada, jamás se han observado. De esta forma, al no existir datos que confirmen dicho comportamiento cíclico, no se puede asegurar que sus consecuencias en la morfología costera (una progresiva regresión) puedan ser revertidas por estos mismos mecanismos naturales.

Para detectar la existencia de tendencias significativas en series temporales se aplica en este estudio el test no paramétrico de Mann-Kendall, que se calcula mediante la fórmula:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} sgn\left(x_j - x_i\right)$$

Donde:

n=número de datos (en nuestro caso, tomaremos tantos datos como perfiles de costa hemos tomado mediante las ortos y vuelos de costa) referidos a los anchos de playa medidos sobre transectos.

x_i y x_j =son los valores en la serie de datos correspondiente a un momento dado i y j (j>i), respectivamente

sgn= $(x_j - x_i)$

De esta forma, el signo de la función (tendencia) será:

$$\operatorname{sgn}\left(x_j - x_i\right) = \begin{cases} +1, & \text{if } x_j - x_i > 0 \\ 0, & \text{if } x_j - x_i = 0 \\ -1, & \text{if } x_j - x_i < 0 \end{cases}.$$

La varianza se calcula:

$$Var(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^{m} t_i(t_i-1)(2t_i+5)}{18}$$

Para el cálculo del valor estadístico del test standard normalizado de Mann-Kendall (Zs), se usan muestras de datos superiores a 10 (n>10), aplicando la ecuación:

$$Z_S = \begin{cases} \dfrac{S-1}{\sqrt{Var(S)}}, & \text{if } S > 0 \\ 0, & \text{if } S = 0 \\ \dfrac{S+1}{\sqrt{Var(S)}}, & \text{if } S < 0 \end{cases}.$$

Los valores positivos de Zs indican una tendencia creciente mientras que los negativos indican lo contrario. El test se realiza con un valor específico de significancia (α), definiendo la probabilidad con la que se define la existencia de una tendencia. Cuando $Zs > Z_{1-\alpha/2}$ una tendencia significativa existe en la serie temporal.

En este estudio se aplica un nivel de significancia de α=0.005. A un nivel de significancia de 5% la hipótesis de que no hay tendencia se rechaza si Zs>1.96

A continuación, se muestran los valores del test Mann-Kendall, aplicados a las series de datos temporales de anchos de playa, medidos sobre los transectos, de forma que analizaremos si los cambios en la línea de costa, en cada uno de dichos transectos, responden al comportamiento de una tendencia o no.

TRANSECTOS	Mann-Kendall (S)	Normalized Test Statistic (Z)	Probabilidad	Tendencia (95% nivel de significancia)
Transecto 1	-87	-3,257482282	0,998875947	DECRECIENTE
Transecto 2	-109	-4,090791703	1	DECRECIENTE
Transecto 3	-105	-3,939280899	1	DECRECIENTE
Transecto 4	-85	-3,18172688	0,998536002	DECRECIENTE
Transecto 5	-83	-3,105971478	0,99810345	DECRECIENTE
Transecto 6	-113	-4,242302507	1	DECRECIENTE
Transecto 7	-105	-3,939280899	1	DECRECIENTE
Transecto 8	-119	-4,469568713	1	DECRECIENTE
Transecto 9	-66	-2,463818642	0,986253435	DECRECIENTE
Transecto 10	-63	-2,348417459	0,981146623	DECRECIENTE
Transecto 11	-83	-3,105971478	0,99810345	DECRECIENTE
Transecto 12	-111	-4,166547105	1	DECRECIENTE
Transecto 13	-93	-3,484748488	0,9995074	DECRECIENTE
Transecto 14	-99	-3,712014693	0,999794384	DECRECIENTE
Transecto 15	-105	-3,939280899	1	DECRECIENTE
Transecto 16	-107	-4,015036301	1	DECRECIENTE

Valores del test de Mann-Kendall aplicado a la evolución de anchos de playa.

Se puede observar que en todos los transectos, a lo largo de toda la serie temporal analizada, el test de Mann-Kendall resuelve que los datos de regresión de costa a lo largo de dicho periodo de tiempo responden a un comportamiento no cíclico, por lo que se confirma la tendencia, en este caso negativa (regresiva) de los anchos de playa en cada transecto y, por tanto, no se puede afirmar que exista un comportamiento claro acerca de la posibilidad de regeneración de la playa por medios naturales.

Todo hace indicar que la intensidad de los movimientos regresivos de la costa de las últimas dos décadas va acorde con los cambios descritos en el régimen hidrológico de la cuenca del río Vélez y el clima marítimo, por lo que cabe deducir que los fenómenos regresivos pueden seguir produciéndose en caso de que esta tendencia, descrita previamente, continúe en el tiempo, aumentando la probabilidad de que la costa llegue hasta las zonas previstas bajo el modelo DSAS que se muestra en este punto.

5.2 Modelos digitales del terreno (MDT)

Se ha elaborado un mapa topográfico a partir de las nubes de puntos 3D obtenidos con LIDAR.

Se ha utilizado la nube de puntos publicada en el Instituto Geográfico nacional correspondiente a la "2ª Cobertura (2015-Actualidad)". Particularmente, en el caso de nuestra zona de estudio, los datos fueron obtenidos en 2020. Estos son los datos más recientes publicados.

Se han descargado cuatro ficheros .LAZ (archivos comprimidos), que cubren la zona de estudio y el área de la parte baja de la cuenca del río Vélez:

- PNOA-2020-AND-400-4066-ORT-CLA-RGB.LAZ
- PNOA-2020-AND-400-4068-ORT-CLA-RGB.LAZ
- PNOA-2020-AND-402-4066-ORT-CLA-RGB.LAZ
- PNOA-2020-AND-402-4068-ORT-CLA-RGB.LAZ



Nube de puntos LIDAR (2020) de la desembocadura del río Vélez en RGB.

Para el análisis de la topografía, se han filtrado los puntos para utilizar sólo los de valor:

(2) Ground

Es decir, sólo aquellos puntos identificados como de suelo desnudo.

Tampoco ha sido necesario realizar un filtrado por números de retornos dado que más del 90% de los puntos son primer y último retorno (es decir, son el mismo retorno).

A partir de los valores de elevación de esta nube de puntos se realiza el DEM a partir del que se calcula, mediante GIS, las curvas de nivel con equidistancias de 0.5 m.

La topografía del terreno obtenida con este método se utiliza en los cálculos de alcance del oleaje y de cota de inundación que se exponen más adelante.

6 ESTUDIO DEL CÁLCULO DE MÁXIMA ELEVACIÓN DEL MAR EN CONDICIONES DEL AÑO 2024.

Previo a la determinación del alcance de la inundación por oleaje en la zona, se ha realizado un estudio genérico para definir la dirección principal de la dinámica litoral del entorno de costa del tramo mediante la dirección del flujo medio de energía del oleaje. En general, se puede decir que, en el tramo de costa en estudio, el flujo medio de energía se produce en modo oblicuo respecto al plano de la costa con tendencia de levante (entre dirección SE y SSE). La afección de la línea de costa por el movimiento de sedimentos es variable, en general, hay dos tipos de playas en flujos de energía oblicuos: las expuestas, que suelen ser estrechas o regresivas y las tipo "cala" que están protegidas por afloramientos rocosos en sus extremos por lo que estas últimas no suelen estar muy afectadas dicho flujo medio de energía.

La oblicuidad del flujo medio de energía ocasiona la estrechez de playas o su regresión en aquellas zonas no protegidas por salientes por lo que, en esta zona de la costa de la provincia de Málaga, la tendencia es a la regresión de la costa debido a que el delta del río Vélez forma un saliente en la costa por el aporte durante siglos de sedimentos y no tiene ningún tipo de protección de salientes rocosos ya que es una zona de costa muy lineal con el delta en sí como único "saliente" pero que, al no ser rocoso sino compuesto por sedimentos, está muy expuesto a la energía del oleaje y al aporte de sedimentos continentales. Actualmente, al haberse reducido considerablemente este aporte de sedimentos continentales, la costa tiende al equilibrio y a compensar el flujo medio de energía hasta la perpendicularidad de la costa con este flujo por lo que busca la linealidad con el resto de la costa y por tanto a la regresión del delta.

Para la determinación de alcance de la inundación por oleaje hay que contextualizarlo en las consideraciones que sobre el alcance se hace en la Ley de Costas ya que es el marco en el cual se sitúa este estudio de regresión de la costa y también en el marco del cambio climático con un incremento en la altura media del nivel del mar y el incremento en intensidad de los temporales marinos.

En función del estudio para la determinación del alcance del nivel máximo que asciende el mar durante los mayores temporales, analizando los diferentes planteamientos teóricos de distintas formulaciones empíricas, contrastados con el Atlas de Inundación en el Litoral Peninsular Español desarrollado por la Universidad de Cantabria, se pueden realizar las siguientes aseveraciones:

- La zona de estudio queda encuadrada en el Área V, subzona b, según el Atlas de Inundacióndel litoral peninsular español efectuado por el Grupo de Ingeniería Oceanográfica de la Universidad de Cantabria.
- Para la obtención del régimen medio de cota de inundación se ha tenido en cuenta los datos registrados por el mareógrafo y boya de Málaga.
- Para la obtención de datos de simulación de oleaje en los últimos años se ha utilizado la información del punto SIMAR 2035080 ya que es el punto más próximo a la zona objeto del estudio de cota máxima del nivel del mar.
- A efectos del cálculo del alcance máximo del oleaje en los mayores temporales, se han considerado las variaciones del nivel del mar y del oleaje registrados, para lo que se han tenido en cuenta los valores significantes de altura de ola desde que existen registros. Se han utilizado los datos registrados por Puertos del Estados, que datan del año 1958 hasta la actualidad, siendo, además públicos y disponibles para cualquier interesado.
- Se usaron todos los registros para determinar los mayores temporales conocidos desde que hay registros (desde 1958) y de ellos se estudiaron en detalle aquellos cuya altura de ola significante fue mayor junto con sus periodos pico y dirección predominante. Con ellos se hicieron los cálculos necesarios para establecer el mayor temporal acaecido en la zona.

- Se puede establecer que la cota de inundación a la que alcanza el mayor temporal ocurrido en la zona de estudio en zonas abiertas y sin estructuras de limitación (cuya estructura y cotas no aparezcan representadas en la cartografía) puede situarse en la cota de entre +2,13 m y +3,16 metros sobre el nivel medio del mar en Alicante según el sector del tramo. Esto se explicará en detalle en el cuerpo de este estudio.

Respecto al cálculo de la cota de inundación y el alcance de la inundación hay que tener en cuenta las siguientes precauciones de las que se da cuenta en la información de Puertos del Estado para los datos de partida que han sido usados, su relación con los cálculos y resultados finales, así como con el objetivo de este estudio:

- Los modelos generados por los puntos SIMAR *"tienden a subestimar los picos en las velocidades de viento y en las alturas de ola en situaciones de temporal muy extremo",* es decir, los datos de altura de ola y viento que ofrece durante los mayores temporales suelen ser inferiores a la altura real de las olas o la velocidad real del viento. Esto es importante en el objetivo que nos ocupa puesto que, con los datos subestimados de los temporales, la extensión de la inundación también estará "subestimada".
- Además, para el cálculo de la cota de inundación y del alcance de la inundación se usan la altura de ola significante (Hs) y el periodo pico (Tp) principalmente. Así Puertos del Estado explica que la altura de ola significante (Hs) *"equivale aproximadamente la altura media del tercio de olas más altas"* y el periodo pico (Tp) *"el periodo del grupo de ondas con más energía".* Por lo que el uso de Hs (ya subestimado porque los valores extremos de los puntos SIMAR los subestiman), al ser una media, también subestima aún más los resultados de cota y alcance de la inundación y con el Tp ocurre lo mismo al tratarse de una media de un grupo de ondas (no de la máxima) por lo que el límite de la inundación por los mayores temporales conocidos está "doblemente" subestimado (además de la subestimación de los datos extremos que tiene el uso de los puntos SIMAR).

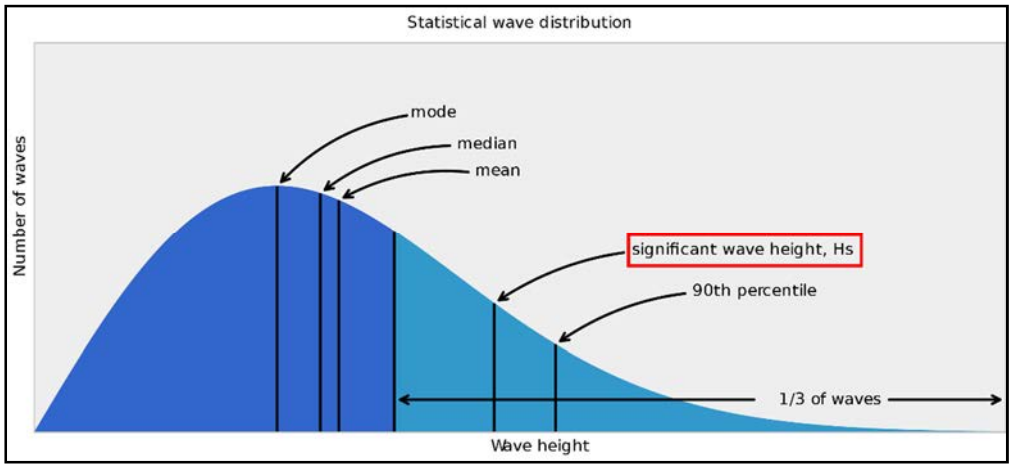
6.1 Descripción general del clima marítimo

La costa del Término Municipal de Vélez-Málaga se emplaza en la zona oriental de la provincia de Málaga. Existe un punto que caracteriza el oleaje incidente en este tramo de costa perteneciente a la red SIMAR; este punto está codificado con la numeración 2035080. El conjunto de datos SIMAR está formado por series temporales de parámetros de viento y oleaje procedentes de modelado numérico son, por tanto, datos generados por procesos de simulación y no proceden de medidas directas de la naturaleza. Las series SIMAR surgen de la concatenación de los dos grandes conjuntos de datos de simulación de oleaje con los que tradicionalmente ha contado Puertos del Estado: SIMAR y WANA. El objetivo es el de poder ofrecer series temporales más extensas en el tiempo y actualizadas diariamente. De este modo, el conjunto SIMAR ofrece información desde el año 1958 hasta la actualidad.

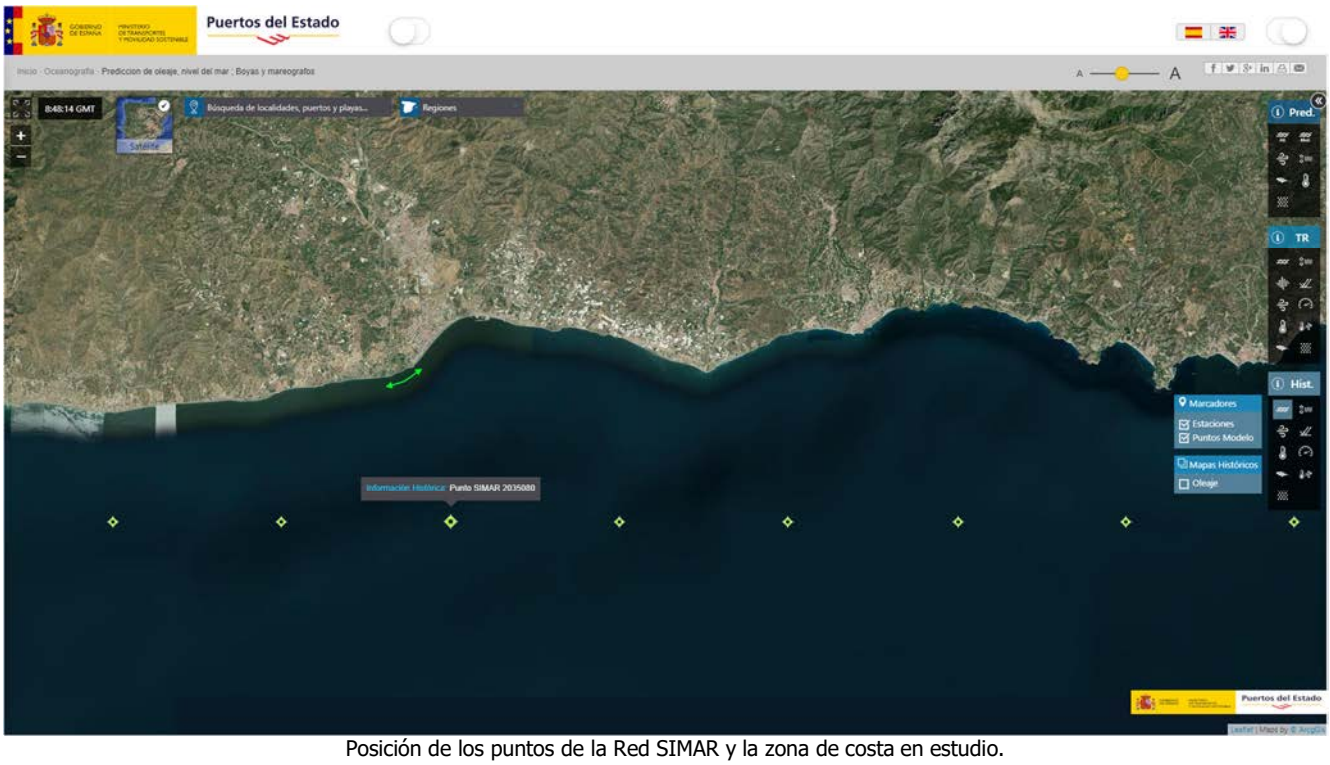
Como precaución en su uso, según la información de Puertos del Estado, es que los modelos generados por los puntos SIMAR "tienden a subestimar los picos en las velocidades de viento y en las alturas de ola en situaciones de temporal muy extremo", es decir, los datos de altura de ola y viento que ofrece durante los mayores temporales suelen ser inferiores a la altura real de las olas o la velocidad real del viento. Esto es importante en el objetivo que nos ocupa puesto que, con los datos subestimados de los temporales, la extensión de la inundación también estará "subestimada".

Además, para el cálculo de la cota de inundación y del alcance de la inundación se usan la altura de ola significante (Hs) y el periodo pico (Tp) principalmente. Así Puertos del Estado explica que la altura de ola significante (Hs) "equivale aproximadamente la altura media del tercio de olas más altas" y el periodo pico (Tp) "el periodo del grupo de ondas con más energía". Por lo que el

uso de Hs (ya subestimado porque los valores extremos los puntos SIMAR los subestiman), al ser una media, también subestima aún más los resultados de cota y alcance de la inundación y el Tp ocurre lo mismo al tratarse de una media de un grupo de ondas (no de la máxima) por lo que el alcance del oleaje por los mayores temporales conocidos está "doblemente" subestimado (además de la subestimación de los datos extremos que tiene el uso de los puntos SIMAR).

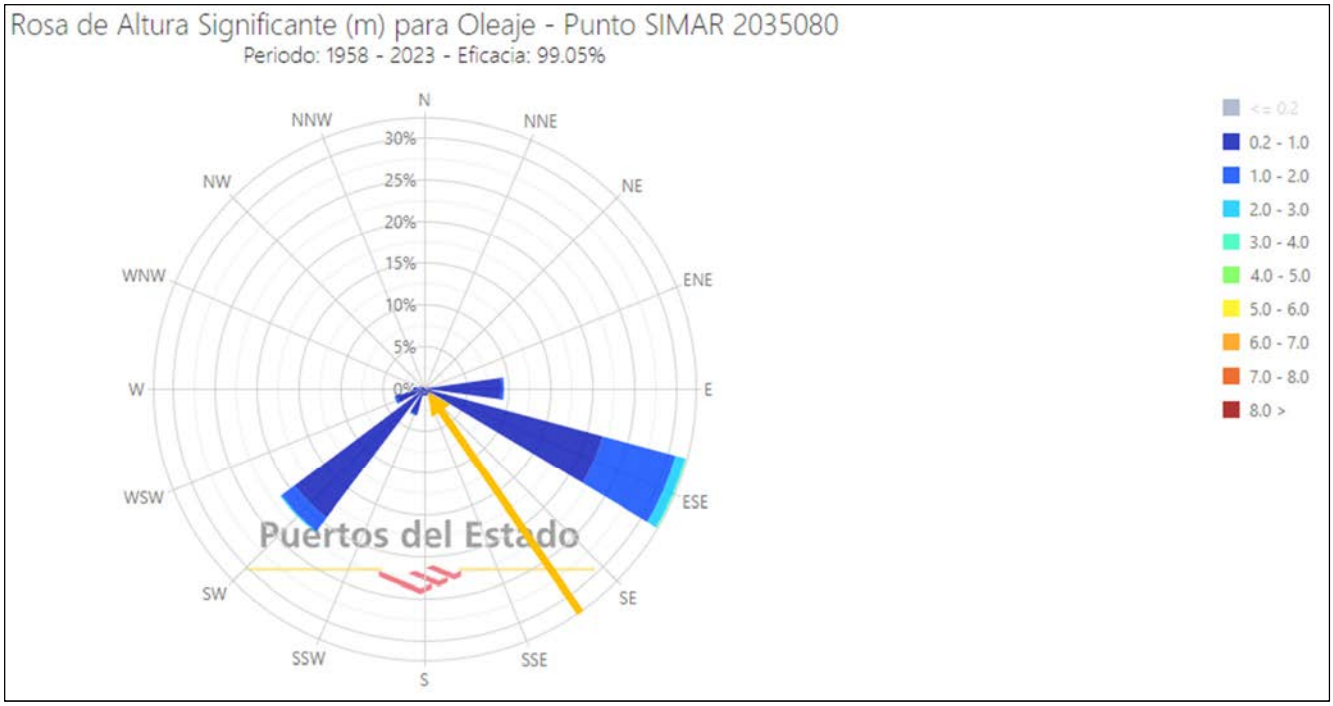


Los datos de oleaje en general y posicionamiento está disponible para consulta pública en la web www.puertos.es perteneciente a Puertos del Estado del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. En la zona de estudio, el punto de la red SIMAR más significativo es el numerado como 2035080:



Posición de los puntos de la Red SIMAR y la zona de costa en estudio.

El régimen general de vientos unidos a su disposición geográfica provoca una presencia de oleaje bimodal, procedente del levante, dirección Este-Sureste y procedente de poniente algo menor en intensidad y frecuencia, dirección Suroeste, que se puede observar en la rosa de oleajes, en donde además se representa la dirección del flujo medio de energía, es decir, la dirección de la media de todos los oleajes incidentes en la costa, y que determina las formas en planta de equilibrio del tramo de costas, que tenderá siempre a bascular para alinearse perpendicularmente a esta dirección para minimizar al máximo la energía incidente:



Rosa de Oleaje del punto SIMAR 2035080, y dirección del Flujo Medio de Energía.

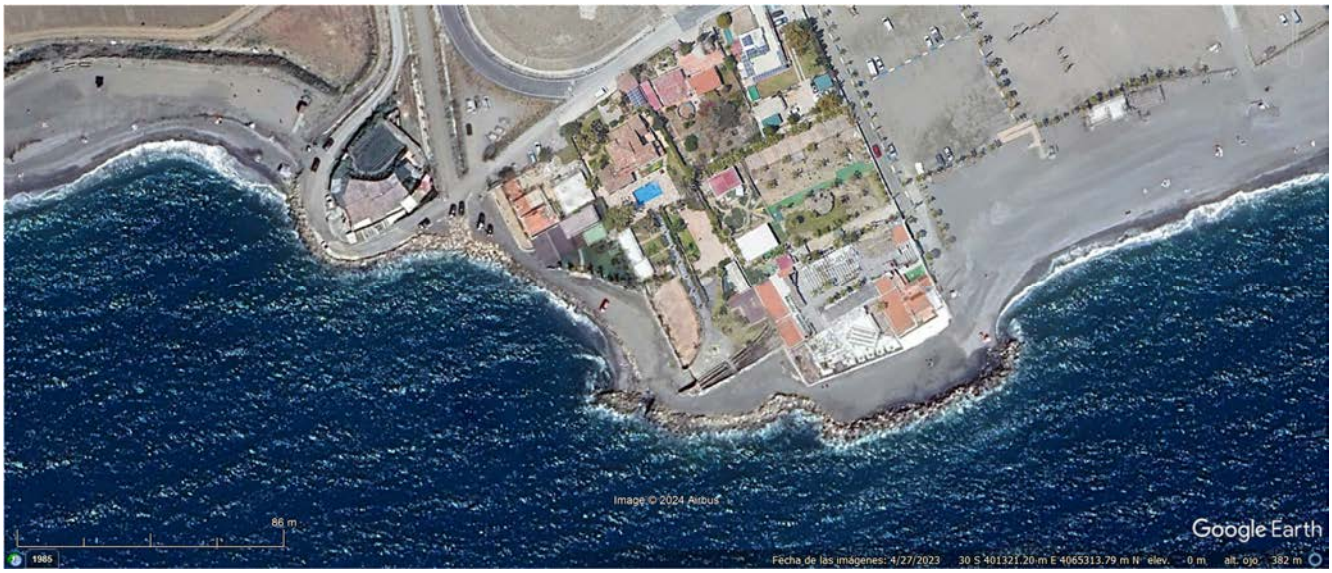
La línea que sigue la costa es entorno a WSW-ENE en la primera parte del tramo y prácticamente SW-NE desde la parte final del tramo. El flujo medio de energía del oleaje tiende a provenir entre la dirección SSE y la SE.



Alineación de la costa y dirección del flujo medio de energía.

Genéricamente, la estabilidad de los arenales no protegidos por barreras naturales como afloramientos rocosos, cabos, etc. se produce cuando el arenal se conforma en posición perpendicular al flujo medio de energía de los temporales y no es compensado por el flujo de las corrientes. En este tramo de costa el litoral está formado por la desembocadura del río Vélez que formó delta típico pero que actualmente la formación de dicho delta se está reduciendo ostensiblemente. Esta línea de costa de la desembocadura se encuentra expuesta al oleaje excepto en la margen oriental de la desembocadura donde existe una pequeña urbanización en la actual línea de costa y que ha tenido que instalar una escollera defensiva frente al oleaje y es

por ello que en este punto se mantiene la línea de costa, aunque durante los temporales el oleaje tiende a superar esta defensa.



En el resto del tramo, la línea de costa está muy expuesta modificándose la línea de costa con el paso del tiempo. Al principio del tramo, a poniente, la superficie de la playa se ha ido reduciendo tanto que el exterior del recinto de un camping ha tenido que ser defendido con una nueva escollera para evitar que el oleaje produzca más daños.

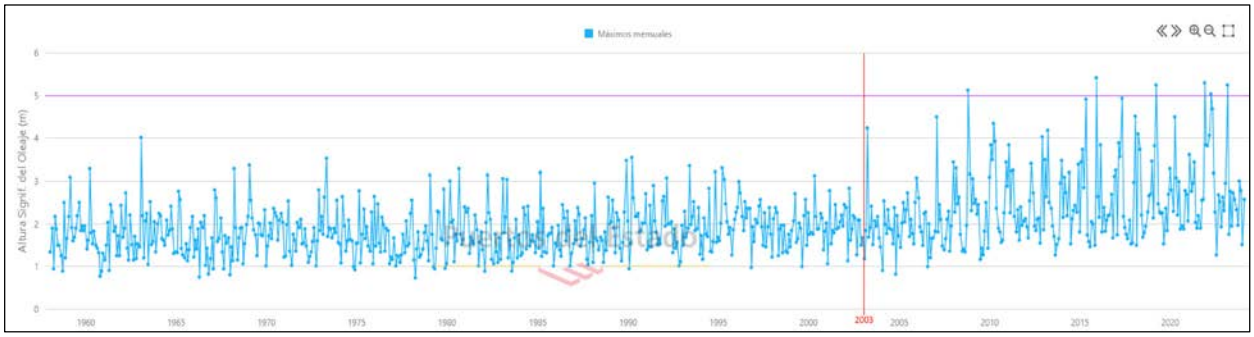


El flujo medio de energía del oleaje incide de forma ligeramente oblicua a la línea media de costa, por ello, tanto por los espigones que modifican la dinámica de las corrientes marinas, así como la ligera oblicuidad del flujo medio de energía del oleaje ocasiona que esta playa tenga tendencia a la regresión, excepto en la parte más oriental donde la línea de costa es prácticamente perpendicular al flujo medio de energía del oleaje histórico.

Los mayores episodios de erosión de los arenales tienen lugar en los eventos de temporal con los oleajes más intensos, llegando a producir importantes pérdidas de arena e inundaciones. Al interior de la zona más arenosa del tramo, se ha construido un cordón de arena extraída de su parte interior generando una zanja, con el doble objetivo de defensa de los campos de cultivos del interior: por un lado, el cordón de arena reduce el efecto del oleaje durante los temporales y, en caso de penetrar el agua del mar intentar que sea encauzada por dicha zanja de vuelta al mar y tratar de evitar la inundación de los cultivos.

Probablemente durante los temporales más intensos, el cordón de arena sea erosionado y al superar dicho cordón el oleaje la zanja será colmatada por la arena arrastrada por el agua del mar por lo que se considera que, si los temporales de mar son lo suficientemente largos en el tiempo e intensos en oleaje, esta defensa no será suficiente, aunque sí para los temporales habituales.

Respecto a los temporales, los eventos de oleaje más severos se están produciendo con mayor intensidad en los últimos 20 años como puede deducirse de la gráfica de oleaje que a continuación se presenta (extraída de www.puertos.es):



En ella se representan la altura de ola significante máxima mensual entre el 1 de enero de 1958 y el 27 de noviembre de 2023. Como se puede observar, en un intervalo de 45 años comprendido entre 1958 y 2003 se produce un solo evento de más de 4 metros de altura de ola (Hs=4,01m), y ninguno de más de 5 metros, mientras que en el intervalo de 20 años siguiente (menos de la mitad del intervalo anterior), desde 2003 hasta 2023, se producen 18 eventos de más de 4 metros de altura de ola significante (Hs) y 6 eventos de más de 5 metros de altura de ola significante máxima mensual.

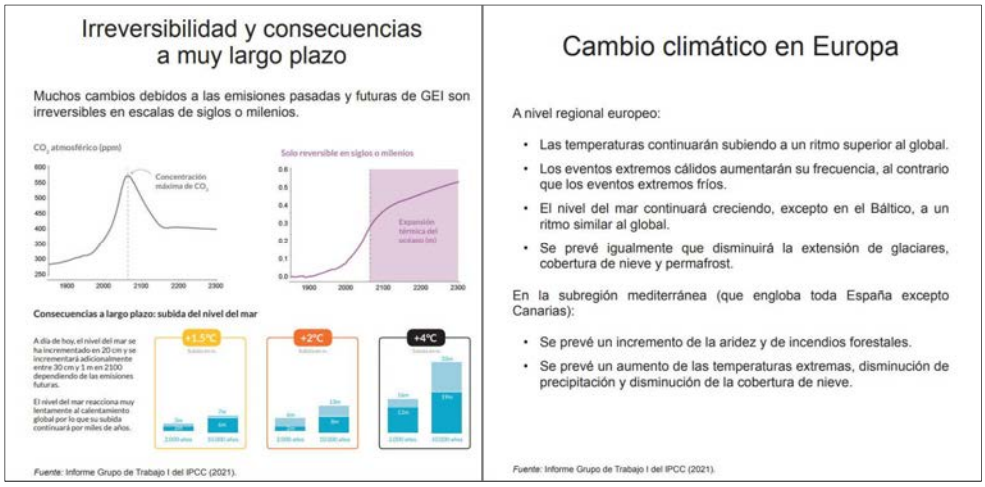
Esto podría indicar, aun siendo un análisis simplificado de la gráfica del histórico de temporales anterior que, en los últimos años debido al aumento en la frecuencia de temporales intensos, se produce una reducción de la arena en las playas de la zona y de mayor erosión de los terrenos emergidos en general, que puede deberse, en parte, a ese incremento de los temporales unido a otras de gran afección a la dinámica litoral, como la reducción de los sedimentos continentales por barreras en los cauces fluviales (a poco más de 20 km de la desembocadura se encuentra el embalse de "La Viñuela"), la disminución de los caudales de los ríos debido al aumento de los periodos de sequía y al aumento de las captaciones de aguas subterráneas, la construcción de espigones, escolleras y otras obras marítimas de gran envergadura como las marinas que modifican la dinámica de las corrientes costeras bloqueando o modificando los flujos de arena, la antropización de los arenales litorales que impide la compensación del volumen de arenas perdidas por el oleaje con el aporte desde estos depósitos, imprescindibles para la estabilidad de las playas.

Además de lo dicho anteriormente sobre la dinámica del litoral en la costa central del término municipal de Vélez-Málaga hay que hacer mención a los efectos del cambio climático que, como se ha visto en la gráfica de oleaje anterior y siendo una visión básica de un proceso tan complejo como es el calentamiento global y, por tanto, el cambio en el clima con todos los eventos que ello conlleva; el aumento de los eventos de temporal marítimo en las últimas 2 décadas respecto a las 4 anteriores es un indicativo asociable a dicho proceso y, por tanto, se hace necesario tenerlo en consideración con visión de futuro en todas aquellas actuaciones que se hagan en el litoral español y, concretamente en este tramo de la costa, para evitar las posibles pérdidas económicas y la pérdida de seguridad para la población en general como usuarios del dominio público que puedan producirse.

En este sentido, las condiciones climáticas de diversas variables marinas, tales como la temperatura, el viento o nivel del mar, se están viendo alteradas por el efecto del cambio climático, convirtiéndose en generadores de daños que pueden afectar a los bienes,

infraestructuras o ecosistemas litorales. Los principales impactos identificados en la costa son la inundación y la erosión que, a su vez, dependen principalmente de variables superficiales marinas, tales como el oleaje, la marea meteorológica y el aumento del nivel medio del mar, siendo estas variables de la dinámica litoral las que se están viendo modificadas por el cambio climático incrementando su frecuencia e intensidad.

Dicho esto, según los modelos predictivos que se vienen utilizando por parte de diversos organismos sobre las consecuencias del cambio climático en la línea de costa, se prevé que los eventos meteorológicos incrementarán su energía siendo más destructivos en las zonas costeras por el aumento del nivel medio del mar, también se prevé un incremento en la intensidad de los vientos y de la altura de las olas durante los temporales extremos y, además, por su mayor de frecuencia (que ya se está produciendo como puede verse en la gráfica de oleaje máximo mensual para el periodo 1958-2023 que se ha representado más arriba), las afecciones en la línea del litoral y de las infraestructuras costeras serán mayores. Así mismo las consecuencias a largo plazo del aumento de nivel del mar se presume prácticamente irreversible en los diferentes escenarios de aumento de la temperatura global:



Informe Grupo de Trabajo I del IPCC (2021)

Por tanto, se deberá considerar que la línea de costa es previsible que se vaya desplazando aún más al interior respecto a la que tenemos actualmente perdiéndose anchura de las playas (o incluso playas completas) porque la recuperación de éstas entre dos eventos severos será menor ya que en ese lapso de tiempo acortado no es suficiente para que la dinámica natural aporte la arena necesaria desde el mar para la recuperación de la superficie perdida y, en consecuencia, el impacto del oleaje en la costa se verá incrementado.

Esto ha de tenerse en cuenta porque la franja de defensa que, tanto para los hábitats costeros como para las infraestructuras artificiales, supone el DPMT deberá ser revisada cada vez con más frecuencia, conforme la línea de costa se vaya viendo modificada por dichos eventos y la intensidad del oleaje así lo indique, contemplando tanto las consecuencias medioambientales como las económicas y sociales que se irán produciendo. Se considera necesaria la realización de una estrategia para la conservación integral de la costa y, por tanto, del DPMT, antes de que el mar produzca más daños en los hábitats litorales aun no edificados y que tienen posibilidad de recuperación, y a los habitantes de las zonas costeras, trasladando más al interior, si fuese necesario, las infraestructuras antes de que los más que probables efectos del aumento del nivel del mar a consecuencia del cambio climático afecte a dichas infraestructuras actuales y produzca daños económicos y sociales (y sus consecuentes afecciones al erario público en razón de posibles indemnizaciones, gastos extraordinarios por actuaciones de emergencia, presión para la construcción de escolleras y espigones, diques semisumergidos, regeneración de la arena de las playas, etc.).

En este tramo de costa ya existen varias infraestructuras dedicadas al turismo (además de campos de cultivo) que, en el momento de su instalación, ya debieron ser defendidas del oleaje dada su cercanía a la línea de agua, como se puede comprobar con las ortofotografías históricas de la zona:



1977



1998



2004



2021

Estas infraestructuras ocupan terrenos litorales como las playas, (y zonas de inundación fluvial con cortos periodos de retorno) y que para su mantenimiento necesitan de la presencia de espigones y/o escolleras (o motas) para evitar su destrucción por la acción del oleaje (o el desbordamiento de ríos).

Así mismo, se deberá generar una legislación acorde a los cambios que se producirán a consecuencia del cambio climático para la obtención de una seguridad jurídica adecuada para todas aquellas actuaciones que sea necesario realizar de cara a la defensa de la población y del dominio público marítimo-terrestre en el marco de la transformación y resiliencia de la costa que se ha de conseguir para amortiguar los efectos de los eventos meteorológicos severos que se prevén y que, además, dé cumplimiento en su visión más amplia, al artículo 45 de la CE:

> *Artículo 45*
> *1. Todos tienen el derecho a disfrutar de un medio ambiente adecuado para el desarrollo de la persona, así como el deber de conservarlo.*
>
> *2. Los poderes públicos velarán por la utilización racional de todos los recursos naturales, con el fin de proteger y mejorar la calidad de la vida y defender y restaurar el medio ambiente, apoyándose en la indispensable solidaridad colectiva.*

3. Para quienes violen lo dispuesto en el apartado anterior, en los términos que la ley fije se establecerán sanciones penales o, en su caso, administrativas, así como la obligación de reparar el daño causado.

6.2 Planteamiento justificado de la estimación del nivel máximo que asciende el mar

El objeto de este apartado es estudiar justificadamente la cota que alcanzan los máximos temporales conocidos o las mayores olas en función de los datos registrados en boyas o satélites, o de los datos oceanográficos o meteorológicos existentes, y evaluar su afección a la zona de estudio.

Dado que este estudio trata sobre la regresión de la costa de un tramo del litoral y que esta regresión depende, en parte, por la intensidad de los temporales, se considerará para el cálculo de la cota máxima de inundación la de las mayores olas durante los temporales y que es el concepto que se recoge en toda la legislación sobre costas en España desde hace más de un siglo cuando en la Ley de Puertos de 1880 ya se decía en su artículo 1.1:

> **Artículo 1.1.** La zona marítimo terrestre, que es el espacio de las costas o fronteras marítimas del territorio español que baña el mar en su flujo y reflujo, en donde son sensibles las mareas, **y las mayores olas en los temporales** en donde no lo sean.
>
> Esta zona marítimo-terrestre se extiende también por las márgenes de los sitios hasta el sitio en que sean navegables o se hagan sensibles las mareas.

Manteniéndose este concepto en el resto de leyes sobre costas publicadas posteriormente, como la Ley de Puertos de 1928, La ley de Costas de 1969 y la vigente Ley de Costas de 1988.

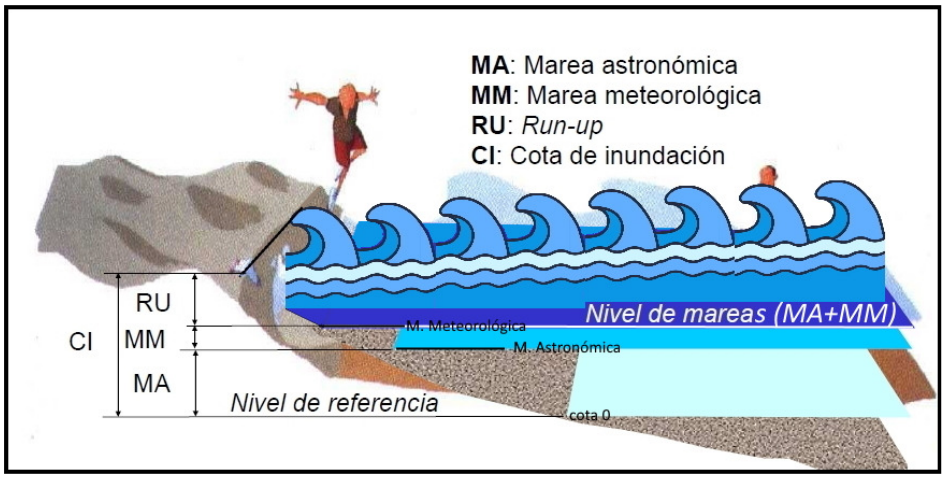
Por ello, para el cálculo de la máxima elevación del mar se utilizarán los datos de temporales, es decir, de las mayores olas, de los que se tienen registros considerándose estos desde 1958 que son los datos sobre oleaje que dispone el organismo público "Puertos del Estado" perteneciente al Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible.

Los datos de la red de boyas y puntos SIMAR de Puertos del Estado datan del año 1958 hasta la actualidad, por lo que es con estos datos con los que se realizaran los cálculos de máximo alcance de la inundación del oleaje durante el mayor temporal conocido.

Para ello ha de calcularse en primer lugar la cota de inundación del mayor temporal, es decir, aquel cuya cota de inundación es la más alta de todos los registrados.

La cota de inundación es un valor en metros que hace referencia a la altura que alcanza el agua del mar durante los temporales respecto al nivel del mar, siendo esta cota la suma de tres componentes:

- Marea astronómica.
- Marea meteorológica.
- Run-up, o alcance máximo vertical de un temporal respecto a un nivel del mar dado.



Esquema general del concepto de cota de inundación

La marea astronómica es un fenómeno periódico y predecible, es decir, determinista, está totalmente estudiado y es posible su evaluación y cálculo exacto en un momento dado u obtener el dato existente de marea en un momento temporal ya sucedido.

La marea astronómica es un fenómeno periódico y predecible, es decir, totalmente determinista, está totalmente estudiado y es posible su evaluación y cálculo exacto en un momento dado u obtener el dato existente de marea en un momento temporal ya sucedido.

La marea meteorológica es un fenómeno no periódico, pero si evaluable una vez conocidas una serie de condiciones climatológicas incidentes, sobre todo las que determina la velocidad del viento y la presión barométrica, se puede evaluar y estudiar su nivel máximo asociado a un periodo de retorno concreto, una vez estudiado una serie temporal de sucesos meteorológicos.

El run-up es un valor obtenido asociado a la incidencia de un oleaje por un temporal, siendo el valor de cota estimado evaluable si se conocen una serie de parámetros que caracterizan el oleaje del temporal, concretamente la altura de ola significante, periodo asociado o su longitud de onda.

Conocidos estos tres valores para un evento de temporal concreto, es posible determinar la cota de inundación que se produce. Por tanto, la metodología a utilizar tiene dos procesos diferenciados:

1) Estudiar y evaluar los sucesos de temporal más extremos en el periodo desde que existen registros hasta la actualidad. Es importante señalar que no necesariamente tiene que producirse el alcance máximo de olas el mayor temporal en altura de ola significante puesto que existen la variable del periodo pico que puede hacer variar la energía del oleaje, es decir, un periodo pico elevado puede hacer que un temporal sea más severo, aunque su altura de ola significante no sea la mayor. Por otro lado, las componentes adicionales de marea astronómica y marea meteorológica también intervienen en el resultado final. En cualquier caso, al considerar el alcance fijado en los mayores temporales conocidos, se estima oportuno estudiar la serie de los mayores los temporales producidos en el periodo desde que existen registros y evaluar la cota de inundación una cantidad suficiente de ellos para poder determinar cuál de ellos es el mayor de todos teniendo en cuenta todas las variables.
2) Aplicar un modelo o metodología de cálculo para una vez conocidos esos sucesos, evaluar la cota de inundación asociada.

6.3 Obtención de los datos de clima marítimo necesarios para la identificación de los mayores temporales.

Oleaje:

Como se ha indicado anteriormente se utilizan para realizar los cálculos de máxima elevación del nivel del mar los registros de boyas existentes o calculadas a través de datos oceanográficos, siendo la Red SIMAR a través del punto 2035080 el más significativo para la zona de estudio. Los registros históricos de oleaje de este punto se pueden consultar en la página web de Puertos del Estado (www.puertos.es) en el apartado de oceanografía/Previsión, tiempo real y clima/oleaje, (Prediccion de oleaje, nivel del mar ; Boyas y mareografos | puertos.es), siendo éstos de consulta pública, por lo que cualquier persona interesada puede acceder a ellos.

Dado el extenso número de registros de oleaje existentes, a continuación, se aportarán las mayores alturas de ola significantes encontradas en el periodo (entre el 1 de enero de 1958 y el 25 de enero de 2024) en este punto de la red SIMAR, así como la gráfica de máximas alturas de ola significante mensuales correspondiente a todo el periodo; también obtenida de la web de Puertos del Estado.

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110
1:00	27	3	2019	5,24	11,01	110
12:00	19	11	2021	5,29	10,01	110
3:00	11	10	2008	5,12	9,47	105
21:00	20	4	2017	4,93	10,51	110
19:00	20	4	2017	4,93	10,42	111
12:00	8	4	2015	4,9	10,31	110

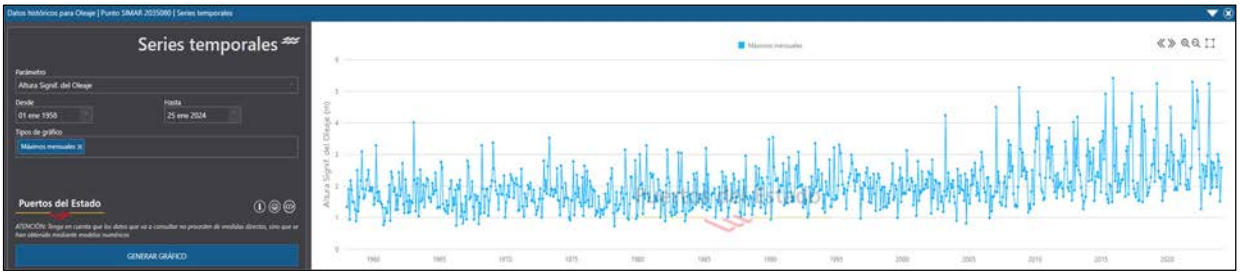
Tabla de máximos temporales desde que existen registros en el punto SIMAR 2035080. (www.puertos.es)

Donde:

Hs es la altura de ola significante en metros.

Tp es el periodo pico en segundos.

Dir es el rumbo desde la que llega el oleaje en el punto SIMAR, en grados sexagesimales.



Gráfica del periodo de estudio donde se representan las mayores alturas de ola significante (máx. mensuales) del punto SIMAR 2035080.

Nivel del mar asociado al evento de temporal

El nivel del mar asociado al evento de cada temporal es la suma del nivel obtenido por la marea astronómica y la marea meteorológica. Para obtener este valor podría realizarse por dos

procedimientos diferentes obteniendo datos de las boyas pertenecientes a la red de Puertos del Estado:

1) Estimar el valor de cada marea por separado, consultando en las tablas de mareas históricas la correspondiente al momento de cada evento de temporal para obtener el valor de la marea astronómica en ese momento, y obteniendo el valor de la marea meteorológica mediante formulaciones empíricas con los datos de viento (obtenibles de la red SIMAR) y presión barométrica (estimables según datos de meteorología). Los datos de presión barométrica eran obtenibles de la boya del Mar de Alborán para cada evento de temporal, y los datos de viento de los mismos puntos SIMAR de donde se han tomado los datos de oleaje.

2) Consultar el valor del nivel del mar con los datos de alguna boya próxima que recoja estos datos, como es la del mareógrafo del puerto de Málaga, que recoge cada minuto los datos del nivel del mar (los cuales quedan reflejados en una serie histórica consultable en la web de Puertos del Estado), siendo este nivel suma de la marea astronómica y meteorológica.

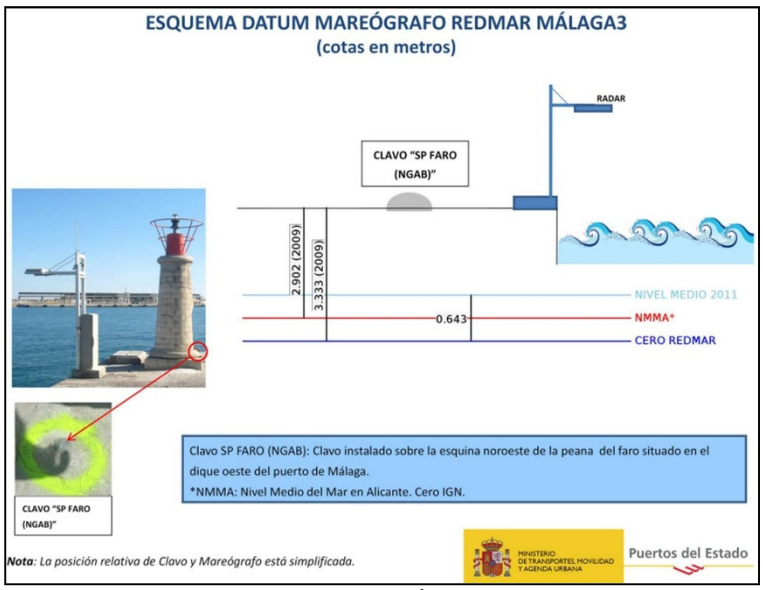
Este segundo procedimiento es el que se va a utilizar, por estimar que es más correcto y suficientemente representativo por la cercanía a la zona de estudio ya que la boya comentada anteriormente del Mar de Alborán se encuentra inactiva en la actualidad, lo que hace que se tendría que consultar otra más alejada de la zona de estudio (el mareógrafo de Motril) en comparación con la cercanía del mareógrafo de Málaga. Además, al recoger datos reales observados, se pierde cualquier incertidumbre que es intrínseca al hecho de utilizar formulaciones empíricas del primer procedimiento.

De esta manera, los datos a consultar corresponden a las series histórica de la boya mareógrafo de la red REDMAR en Málaga:



Los valores obtenidos vienen referenciados siempre respecto al cero en el puerto, que sigue el siguiente esquema en este caso:





Datum del cero en el Puerto de Málaga respecto al N.M.M.A.

Como se puede observar, hay una diferencia de 0,431 (*3.333-2.902=0.431*) metros entre el cero de la boya de la REDMAR y el cero del N.M.M.A, que es el coincidente con el cero geodésico y por tanto con el de las cartografías que se tiene de la zona de estudio. Al obtener las cotas del nivel del mar de cada evento de temporal, será necesario realizar una corrección restando la diferencia de 0,431 metros para tener una cota real del nivel del mar respecto al N.M.M.A.

Para cada evento de temporal, se utilizará el valor máximo recogido durante todo el día del evento del temporal, procedente también de la web de Puertos del Estado. De esta manera, se tienen los siguientes valores en relación a los temporales estimados de estudio:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593
1:00	27	3	2019	5,24	11,01	110	84,7	0,847	0,416
12:00	19	11	2021	5,29	10,01	110	105,6	1,056	0,625
3:00	11	10	2008	5,12	9,47	105	112	1,120	0,689
21:00	20	4	2017	4,93	10,51	110	92,7	0,927	0,496
19:00	20	4	2017	4,93	10,42	111	92,7	0,927	0,496
12:00	8	4	2015	4,9	10,31	110	87,3	0,873	0,442

Tabla de máximos temporales desde que existen registros en el punto SIMAR 2035080.

Donde:

S_{REDMAR} es la cota del nivel del mar respecto a la cota cero del puerto.

S_{NM} es la cota del nivel del mar respecto al nivel medio del mar en Alicante (NMMA).

6.4 Cálculo de la cota de inundación asociada a cada evento de temporal estimado.

En el anterior apartado se ha seleccionado, de los eventos de temporal marítimo, el que puede ocasionar cotas de inundación máximas, según la actual legislación de costas. Además, se ha calculado, para cada evento de temporal, el nivel del mar en ese momento como suma de la

marea astronómica y meteorológica asociada, siendo todos estos datos directamente consultables en la web www.puertos.es.

Falta el sumando del run-up para determinar exactamente la cota de inundación, que denominaremos S_{CI}, siguiendo siempre la nomenclatura propuesta en el Atlas de Inundación del Litoral Español redactado en su momento por el Grupo de Ingeniería Oceanográfica de la Universidad de Cantabria.

Para calcular el valor del run-up, existen varios modelos o formulaciones que determinan éste en función de varios parámetros o características del oleaje incidente. De las formulaciones más modernas, está muy extendida y aceptada la de Nielsen-Hanslow (1991), que estima el valor del run-up con una banda de confianza del 2% ($R_{2\%}$), en función de la altura de ola significante y la longitud de onda asociada a dicho oleaje, por lo que es necesario conocer el periodo de pico asociado, todo a pie de playa. Por tanto, es totalmente aplicable este modelo, considerando las alturas de olas significantes ya tomadas y su periodo de pico asociado para cada uno de los eventos de temporal.

Formulación de Nielsen-Hanslow (1991):

$$R_{uo}=0{,}47\cdot(Hs\cdot L)^{1/2}\cdot \mathrm{tg}\beta \qquad \text{si } \mathrm{tg}\beta>1/10$$

$$R_{uo}=0{,}04\cdot(Hs\cdot L)^{1/2} \qquad \text{si } \mathrm{tg}\beta<1/10$$

Y para la banda de confianza del 2%:

$$Ru_{2\%} = 1{,}98\cdot R_{uo}$$

Teniendo en cuenta que en las playas de estudio la pendiente del fondo es inferior a 1/10, la formulación resultante es:

$$R_{2\%} = 1{,}98\cdot 0{,}04\cdot(H_s\cdot L)^{1/2}$$

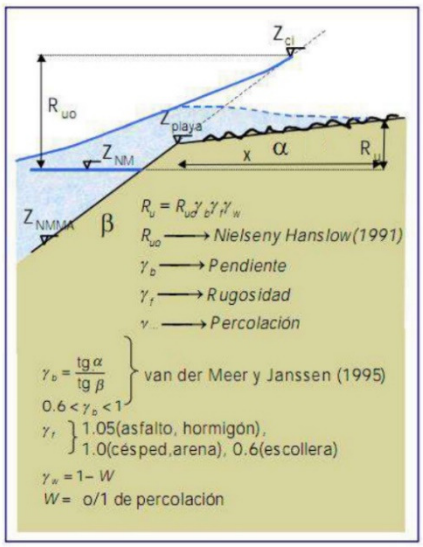
Donde:

L = Longitud de onda local = $1{,}56\cdot T_p^2$

H_s = Altura de ola significante de cada evento de temporal.

T_p = Periodo de pico asociado a cada evento de temporal.

A esta formulación, se le aplican además los factores de corrección de Van Der Meer y Jansen: pendientes, rugosidad y percolación, para tener en cuenta una aproximación más adecuada a la configuración del perfil de playa formada por doble pendiente (húmeda y seca), la rugosidad del terreno, en este caso, de la arena de la playa y la percolación en la superficie de incidencia dada la anchura de la playa de arena, ya que es lo suficientemente significativa como para tener un cierto efecto en la inundación del mar sobre los terrenos emergidos formados por dicha arena. Esto se resume en el siguiente esquema:



El factor de pendiente de Van der Meer y Janssen relaciona la pendiente de la playa seca con la pendiente de la playa sumergida:

$$\gamma_b = \frac{\tan\alpha}{\tan\beta}$$

El valor de este coeficiente estará comprendido entre 0.6 y 1. En el caso de obtenerse un valor inferior a 0.6 tras la aplicación de la relación de pendientes, se tomará el valor inferior del intervalo dado, es decir, 0.6. Del mismo modo se actuará en el caso de obtener un valor superior a 1, se tomará este valor máximo.

Debido a la diferente configuración del litoral en el tramo de costa que nos ocupa, se han de tomar en consideración diferentes zonas en las que calcular las pendientes de la playa para definir el factor de pendiente en cada zona homogénea.

El factor de rugosidad de la superficie de incidencia γ_f, tomará el valor de 1, al estar la playa formada por arenas limpias.

El factor de percolación γ_w se calcula con el coeficiente de percolación W; este coeficiente W está directamente relacionado con el diámetro efectivo de la arena y el coeficiente de Hazen. Existen suficientes estudios en los que se ha calculado el coeficiente de percolación de los terrenos.

Rango de valores del coeficiente de permeabilidad en suelos

Tipo de suelo	k (cm/s)
Grava mal graduada (GP)	≥ 1
Grava uniforme (GP)	0,2-1
Grava bien graduada (GW)	0,05-0,3
Arena uniforme (SP)	5×10^{-3}-0,2
Arena bien graduada (SW)	10^{-3}-0,1
Arena limosa (SM)	10^{-3}-5×10^{-3}
Arena arcillosa (SC)	10^{-4}-10^{-3}
Limo de baja plasticidad (ML)	5×10^{-5}-10^{-4}
Arcillas de baja plasticidad (CL)	10^{-5}-10^{-3}

(*L. González de Vallejo et al*, Ingeniería Geológica, Madrid 2002)

En el caso de arena de playa, que se encuentra lavada por el agua del mar y removida por el viento marino, se considera genéricamente que es del tipo 'arena bien graduada (SW)' de la tabla anterior.

Aplicando la formulación de Nielsen-Hanslow, podemos obtener el valor del run-up para cada evento de temporal (antes de aplicar los coeficientes de Van Der Meer y Janssen), que a su vez debe ser sumando a la componente del nivel del mar (S_{NM}) ya calculado para estimar definitivamente el valor de la cota de inundación de cada uno de los eventos de temporal para cada zona con pendiente homogénea; calculado mediante la obtención de los resultados necesarios de clima marítimo en primer lugar y la aplicación de un modelo o formulación de cálculo adecuado posteriormente.

Para el cálculo del run-up es necesario calcular la longitud de onda local asociada al oleaje:

$$L=1.56 \cdot T_p^2$$

Donde T_p es el periodo pico asociado a cada evento de temporal.

En la tabla siguiente se añade la columna 'L' con el resultado de la longitud de onda para cada evento de temporal:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10
1:00	27	3	2019	5,24	11,01	110	84,7	0,847	0,416	189,10
12:00	19	11	2021	5,29	10,01	110	105,6	1,056	0,625	156,31
3:00	11	10	2008	5,12	9,47	105	112	1,120	0,689	139,90
21:00	20	4	2017	4,93	10,51	110	92,7	0,927	0,496	172,32
19:00	20	4	2017	4,93	10,42	111	92,7	0,927	0,496	169,38
12:00	8	4	2015	4,9	10,31	110	87,3	0,873	0,442	165,82

Tabla de máximos temporales desde que existen registros en el punto SIMAR 2031080.

Cálculo del run-up corregido mediante los factores de Van der Meer.

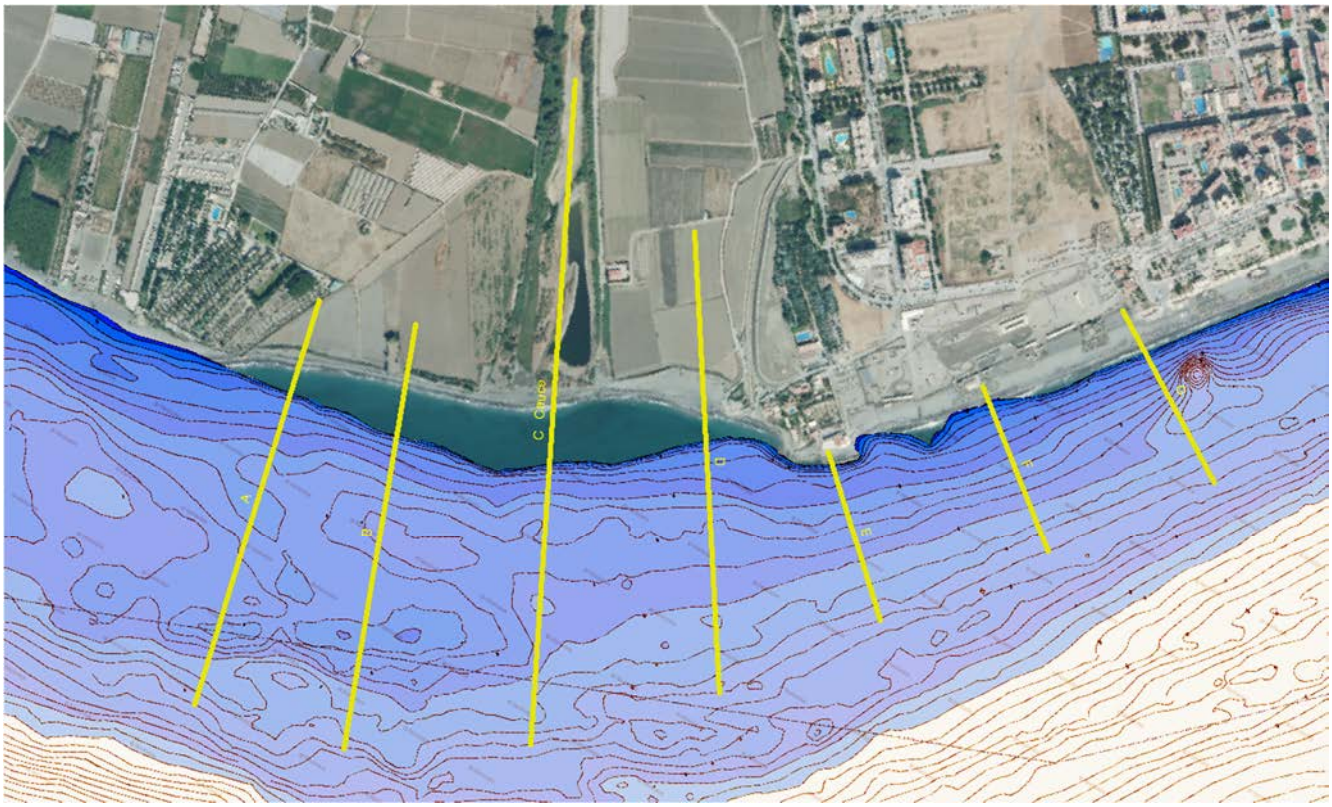
Para la realización de los cálculos de alcance de inundación, se ha dividido en 7 zonas en función de la homogeneidad de la costa sumergida, la emergida, del tipo geomorfológico, la morfología de las zonas antropizadas y, además, crear una densidad de medidas para que estas sean suficientes para caracterizar el alcance del oleaje y la cota de inundación con alta precisión en todo el tramo en estudio. A cada una de las zonas se le ha realizado un cálculo de alcance. Esto se ha hecho así ya que el factor de pendiente de Van der Meer y Janssen puede modificar el run-up (si su valor es menor que 1) por lo que ha de calcularse el run-up corregido para cada una de estas zonas.

Las zonas de medición vienen dadas por las pendientes de los terrenos sumergido y emergido. Las pendientes se han calculado mediante batimetría extraídos del visor de la empresa italiana Navionics (perteneciente a Garmin Ltd.), concretamente de la capa SonarChart™, cuyas curvas batimétricas tienen un intervalo de 50 cm creadas mediante "sistema propietario" de Navionics que procesa los datos de registros de sónar procedentes de aportaciones realizadas por navegantes adheridos a Navionics y que actualiza periódicamente sus cartas náuticas. Por ello se puede considerar que la batimetría representada es la más reciente de la zona. (*Los datos e imágenes de batimetría han sido cedidos por Navionics exclusivamente para este estudio no siendo posible su uso para cualquier otro fin incluida la navegación*).

La topografía se ha realizado a partir de un modelo digital del terreno elaborado a partir de las nubes de puntos 3D obtenidos con sistema LiDAR; para ello se ha utilizado la nube de puntos publicada por el Instituto Geográfico Nacional correspondiente a la "2ª Cobertura (2015-

Actualidad)", en nuestro caso los datos se obtuvieron en el año 2020, siendo éstos los datos más recientes publicados en la fecha de redacción de este estudio. Con estos datos se realiza un modelo digital de elevaciones con el que se calcula mediante software las curvas de nivel.

La ubicación de las zonas para el cálculo de las pendientes sumergida y emergida se representa en la siguiente imagen que incluye la batimetría:



Los datos de partida (ver tabla de la página 109) son los mismos para todas las zonas, y serán los que se usen para el cálculo del run-up en cada zona definida por los perfiles reseñados y que se desarrolla a continuación.

Zona A.

En primer lugar, calculamos las pendientes de la playa húmeda y de la seca. La pendiente de la playa húmeda nos indicará qué fórmula de Nielsen-Hanslow ha de usarse, dependiendo si esta pendiente es mayor o menor del 10%.

pendiente playa húmeda	
profundidad (m)	7,00
distancia (m)	577
pendiente %	1,213

La pendiente de la playa húmeda es menor del 10% por lo que se usará para el cálculo del run-up la fórmula del Nielsen-Hanslow para pendientes menores de ese valor:

$$R_{uo}=0,04\cdot(Hs\cdot L)^{1/2}$$

La pendiente de la playa seca es:

pendiente playa seca	
altura máx. playa (m)	2,00
distancia (m)	104
pendiente %	1,923

Después se calcula el run-up para cada evento de temporal.

Dado que se busca la cota de inundación y el alcance de los mayores temporales conocidos desde que existen registros, se toman para el cálculo del run-up (R_{uo}) los 4 eventos cuya altura de ola significante y/o periodo pico es mayor:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)		R_{uo}
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78		1,31
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22		1,19
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10		1,23
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10		1,19

Los factores de corrección de Van der Meer y Janssen para esta zona son:

- Factor por pendiente:

$$\gamma_b = \frac{\tan\alpha}{\tan\beta} = 1{,}6$$

al dar como resultado un valor superior a 1, y este coeficiente ha de estar en el intervalo entre un mínimo de 0,6 y un máximo de 1, se toma como coeficiente por pendiente:

$$\gamma_b = 1$$

- Factor de rugosidad:

El factor de rugosidad de la superficie de incidencia γ_f, tomará el valor de 1, al estar la playa formada por arenas limpias.

- Factor de percolación:

Como ya se ha dicho más arriba, este factor está relacionado con las características del terreno, y concretamente, en el caso de la arena, con el diámetro de sus granos y su disposición en el suelo. Así existen tablas en las que se define de manera genérica este factor en función de las características de la arena:

Rango de valores del coeficiente de permeabilidad en suelos

Tipo de suelo	k (cm/s)
Grava mal graduada (GP)	≥ 1
Grava uniforme (GP)	0,2-1
Grava bien graduada (GW)	0,05-0,3
Arena uniforme (SP)	5×10^{-3}-0,2
Arena bien graduada (SW)	10^{-3}-0,1
Arena limosa (SM)	10^{-3}-5×10^{-3}
Arena arcillosa (SC)	10^{-4}-10^{-3}
Limo de baja plasticidad (ML)	5×10^{-5}-10^{-4}
Arcillas de baja plasticidad (CL)	10^{-5}-10^{-8}

En nuestro caso se utilizará como coeficiente de percolación aquel que viene dado por la arena de la playa. Como ésta no viene explícitamente desarrollada en dicha tabla, se considera que se trata de una arena de playa bien graduada, limpia, dado el efecto de lavado que tiene el agua del mar durante los temporales sobre ésta y cuyos valores típicos están comprendidos entre 0,001 y 0,1.

Dado que el intervalo de los valores de k descritos en la tabla es amplio, tomamos el valor 0,01 de dicho intervalo por ser el valor medio del mismo. Aplicando la siguiente formulación se obtiene

el coeficiente de percolación (W) medio y, por tanto, un factor medio de percolación (γ_w) en la zona:

$$W=k \Rightarrow 0{,}01 \text{ cm/s}$$

$$\gamma_w=1-W \Rightarrow \gamma_w = 1 - 0{,}01 = 0{,}99$$

Un mayor valor del factor reductor de percolación implica una mayor reducción del valor de run-up corregido por estar directamente relacionados:

$$R_u = R_{uo} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_w$$

En esta zona, aplicando los factores de Van der Meer y Janssen:

$$R_u = R_{uo} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_w = R_{uo} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0{,}99$$

Con estos datos, para los eventos de temporal considerados se obtiene el run-up corregido (R_u) y con éste el run-up cuyo valor es superado en un porcentaje de tiempo inferior al 2% del evento:

$$R_{u2\%} = 1{,}98 \cdot R_u$$

Aplicando esta formulación se obtiene para cada evento de temporal en esta zona:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)		R_{uo}	R_U	$Ru_{2\%}$ (m)
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78		1,31	1,30	2,57
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22		1,19	1,18	2,34
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10		1,23	1,22	2,42
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10		1,19	1,18	2,34

A este run-up ($R_{u2\%}$) le sumamos el valor de la componente de nivel del mar ya calculado (S_{NM}), para estimar definitivamente el valor de la cota de inundación para cada uno de los máximos eventos registrados:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)		R_{uo}	R_U	$Ru_{2\%}$ (m)	S_{CI} (m)
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78		1,31	1,30	2,57	3,16
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22		1,19	1,18	2,34	3,08
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10		1,23	1,22	2,42	2,96
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10		1,19	1,18	2,34	2,93

Vistos los resultados tras la aplicación de las fórmulas y factores correctores desarrollados anteriormente se puede decir que el mayor temporal conocido que ha afectado a esta zona del tramo de la costa en estudio del término municipal de Vélez-Málaga es el acontecido el 4 de abril de 2022 que alcanzó su mayor intensidad a las 15:00 horas con una cota de inundación de unos 3,16 m.n.m.a.

Por lo tanto, este temporal de abril de 2022 será el que se desarrolle en el punto 6.5 donde se calcula el desplazamiento de la ola por la playa seca, por considerarse el mayor temporal conocido en esta zona desde que existen registros de boyas y con el que se tendrá una visión de la inundación de los terrenos en este sector del litoral.

Zona B.

En primer lugar, calculamos las pendientes de la playa húmeda y de la seca. La pendiente de la playa húmeda nos indicará qué formula de Nielsen-Hanslow ha de usarse, dependiendo si esta pendiente es mayor o menor del 10%.

pendiente playa húmeda	
profundidad (m)	7,50
distancia (m)	634
pendiente %	1,183

La pendiente de la playa húmeda es menor del 10% por lo que se usará para el cálculo del run-up la fórmula del Nielsen-Hanslow para pendientes menores de ese valor:

$$R_{uo}=0,04\cdot(Hs\cdot L)^{1/2}$$

La pendiente de la playa seca es:

pendiente playa seca	
altura máx. playa (m)	2,50
distancia (m)	258
pendiente %	0,969

Después se calcula el run-up para cada evento de temporal.

Dado que se busca la cota de inundación y el alcance de los mayores temporales conocidos desde que existen registros, se toman para el cálculo del run-up (R_{uo}) los 4 eventos cuya altura de ola significante y/o periodo pico es mayor:

Hora	**Día**	**Mes**	**Año**	**Hs**	**Tp (s)**	**Dir º**	**S_{REDMAR} (cm)**	**S_{REDMAR} (m)**	**S_{NM}**	**L (m)**		**R_{uo}**
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78		1,31
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22		1,19
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10		1,23
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10		1,19

Los factores de corrección de Van der Meer y Janssen para esta zona son:

- Factor por pendiente:

$$\gamma_b=\frac{\tan\alpha}{\tan\beta}=1,9$$

al dar como resultado un valor superior a 1, y este coeficiente ha de estar en el intervalo entre un mínimo de 0,6 y un máximo de 1, se toma como coeficiente por pendiente:

$$\gamma_b=1$$

- Factor de rugosidad:

El factor de rugosidad de la superficie de incidencia γ_f, tomará el valor de 1, al estar la playa formada por arenas limpias.

- Factor de percolación:

Como ya se ha dicho más arriba, este factor está relacionado con las características del terreno, y concretamente, en el caso de la arena, con el diámetro de sus granos y su disposición en el suelo. Así existen tablas en las que se define de manera genérica este factor en función de las características de la arena:

Rango de valores del coeficiente de permeabilidad en suelos

Tipo de suelo	k (cm/s)
Grava mal graduada (GP)	≥ 1
Grava uniforme (GP)	0,2-1
Grava bien graduada (GW)	0,05-0,3
Arena uniforme (SP)	5×10^{-3}-0,2
Arena bien graduada (SW)	10^{-3}-0,1
Arena limosa (SM)	10^{-3}-5×10^{-3}
Arena arcillosa (SC)	10^{-4}-10^{-3}
Limo de baja plasticidad (ML)	5×10^{-5}-10^{-4}
Arcillas de baja plasticidad (CL)	10^{-5}-10^{-8}

En nuestro caso se utilizará como coeficiente de percolación aquel que viene dado por la arena de la playa. Como ésta no viene explícitamente desarrollada en dicha tabla, se considera que se trata de una arena bien graduada, limpia, dado el efecto de lavado que tiene el agua del mar durante los temporales sobre ésta y cuyos valores típicos están comprendidos entre 0,001 y 0,1.

Dado que el intervalo de los valores de k descritos en la tabla es amplio, tomamos el valor 0,01 de dicho intervalo por ser el valor medio del mismo. Aplicando la siguiente formulación se obtiene el coeficiente de percolación (W) medio y, por tanto, un factor medio de percolación (γ_w) en la zona:

$$W=k \Rightarrow 0{,}01 \text{ cm/s}$$

$$\gamma_w=1\text{-}W \Rightarrow \gamma_w = 1 - 0{,}01 = 0{,}99$$

Un mayor valor del factor reductor de percolación implica una mayor reducción del valor de run-up corregido por estar directamente relacionados:

$$R_u = R_{uo} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_w$$

En esta zona, aplicando los factores de Van der Meer y Janssen:

$$R_u = R_{uo} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_w = R_{uo} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0{,}99$$

Con estos datos, para los eventos de temporal considerados se obtiene el run-up corregido (R_u) y con éste el run-up cuyo valor es superado en un porcentaje de tiempo inferior al 2% del evento:

$$R_{u2\%} = 1{,}98 \cdot R_u$$

Aplicando esta formulación se obtiene para cada evento de temporal en esta zona:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)		R_{uo}	R_U	$Ru_{2\%}$ (m)
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78		1,31	1,30	2,57
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22		1,19	1,18	2,34
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10		1,23	1,22	2,42
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10		1,19	1,18	2,34

A este run-up ($R_{u2\%}$) le sumamos el valor de la componente de nivel del mar ya calculado (S_{NM}), para estimar definitivamente el valor de la cota de inundación para cada uno de los máximos eventos registrados:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)		R_{uo}	R_U	$Ru_{2\%}$ (m)	S_{CI} (m)
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78		1,31	1,30	2,57	3,16
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22		1,19	1,18	2,34	3,08

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)		R_{uo}	R_U	$Ru_{2\%}$ (m)	S_{CI} (m)
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10		1,23	1,22	2,42	2,96
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10		1,19	1,18	2,34	2,93

Vistos los resultados tras la aplicación de las fórmulas y factores correctores desarrollados anteriormente se puede decir que el mayor temporal conocido que ha afectado a esta zona del tramo de la costa en estudio del término municipal de Vélez-Málaga es el acontecido el 4 de abril de 2022 que alcanzó su mayor intensidad a las 15:00 horas con una cota de inundación de unos 3,16 m.n.m.a.

Por lo tanto, este temporal de abril 2022 será el que se desarrolle en el punto 6.5 donde se calcula el desplazamiento de la ola por la playa seca, por considerarse el mayor temporal conocido en esta zona desde que existen registros de boyas y con el que se tendrá una visión de la inundación de los terrenos en este sector del litoral.

Zona C. Cauce río Vélez.

En primer lugar, calculamos las pendientes de la playa húmeda y de la seca. La pendiente de la playa húmeda nos indicará qué formula de Nielsen-Hanslow ha de usarse, dependiendo si esta pendiente es mayor o menor del 10%.

pendiente playa húmeda	
profundidad (m)	7,00
distancia (m)	552
pendiente %	1,268

La pendiente de la playa húmeda es menor del 10% por lo que se usará para el cálculo del run-up la fórmula del Nielsen-Hanslow para pendientes menores de ese valor:

$$R_{uo}=0,04\cdot(Hs\cdot L)^{1/2}$$

La pendiente de la playa seca es:

pendiente playa seca	
altura máx. playa (m)	2,00
distancia (m)	524
pendiente %	0,382

Después se calcula el run-up para cada evento de temporal.

Dado que se busca la cota de inundación y el alcance de los mayores temporales conocidos desde que existen registros, se toman para el cálculo del run-up (R_{uo}) los 4 eventos cuya altura de ola significante y/o periodo pico es mayor:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)		R_{uo}
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78		1,31
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22		1,19
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10		1,23
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10		1,19

Los factores de corrección de Van der Meer y Janssen para esta zona son:

- Factor por pendiente:

$$\gamma_b = \frac{\tan\alpha}{\tan\beta} = 0{,}3$$

al dar como resultado un valor inferior a 0,6, y este coeficiente ha de estar en el intervalo entre un mínimo de 0,6 y un máximo de 1, se toma como coeficiente por pendiente:

$$\gamma_b = 0{,}6$$

- Factor de rugosidad:

El factor de rugosidad de la superficie de incidencia γ_f, tomará el valor de 1, al estar la playa formada por arenas limpias.

- Factor de percolación:

Como ya se ha dicho más arriba, este factor está relacionado con las características del terreno, y concretamente, en el caso de la arena, con el diámetro de sus granos y su disposición en el suelo. Así existen tablas en las que se define de manera genérica este factor en función de las características de la arena:

Rango de valores del coeficiente de permeabilidad en suelos

Tipo de suelo	k (cm/s)
Grava mal graduada (GP)	≥ 1
Grava uniforme (GP)	0,2-1
Grava bien graduada (GW)	0,05-0,3
Arena uniforme (SP)	5×10^{-3}-0,2
Arena bien graduada (SW)	10^{-3}-0,1
Arena limosa (SM)	10^{-3}-5×10^{-3}
Arena arcillosa (SC)	10^{-4}-10^{-3}
Limo de baja plasticidad (ML)	5×10^{-5}-10^{-4}
Arcillas de baja plasticidad (CL)	10^{-5}-10^{-8}

En nuestro caso se utilizará como coeficiente de percolación aquel que viene dado por la arena de la playa. Como ésta no viene explícitamente desarrollada en dicha tabla, se considera que se trata de una arena bien graduada, limpia, dado el efecto de lavado que tiene el agua del mar durante los temporales sobre ésta y cuyos valores típicos están comprendidos entre 0,001 y 0,1.

Dado que el intervalo de los valores de k descritos en la tabla es amplio, tomamos el valor 0,01 de dicho intervalo por ser el valor medio del mismo. Aplicando la siguiente formulación se obtiene el coeficiente de percolación (W) medio y, por tanto, un factor medio de percolación (γ_w) en la zona:

$$W = k \Rightarrow 0{,}01 \text{ cm/s}$$

$$\gamma_w = 1 - W \Rightarrow \gamma_w = 1 - 0{,}01 = 0{,}99$$

Un mayor valor del factor reductor de percolación implica una mayor reducción del valor de run-up corregido por estar directamente relacionados:

$$R_u = R_{uo} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_w$$

En esta zona, aplicando los factores de Van der Meer y Janssen:

$$R_u = R_{uo} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_w = R_{uo} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0{,}99$$

Con estos datos, para los eventos de temporal considerados se obtiene el run-up corregido (R_u) y con éste el run-up cuyo valor es superado en un porcentaje de tiempo inferior al 2% del evento:

$$R_{u2\%} = 1{,}98 \cdot R_u$$

Aplicando esta formulación se obtiene para cada evento de temporal en esta zona:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)		R_{uo}	R_U	$Ru_{2\%}$ (m)
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78		1,31	0,78	1,54
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22		1,19	0,71	1,40
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10		1,23	0,73	1,45
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10		1,19	0,71	1,40

A este run-up ($R_{u2\%}$) le sumamos el valor de la componente de nivel del mar ya calculado (S_{NM}), para estimar definitivamente el valor de la cota de inundación para cada uno de los máximos eventos registrados:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)		R_{uo}	R_U	$Ru_{2\%}$ (m)	S_{CI} (m)
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78		1,31	0,78	1,54	2,13
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22		1,19	0,71	1,40	2,14
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10		1,23	0,73	1,45	1,99
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10		1,19	0,71	1,40	1,99

Vistos los resultados tras la aplicación de las fórmulas y factores correctores desarrollados anteriormente se puede decir que el mayor temporal conocido que ha afectado a esta zona del tramo de la costa en estudio del término municipal de Vélez-Málaga es el acontecido el 4 de abril de 2022 que alcanzó su mayor intensidad a las 15:00 horas con una cota de inundación de unos 2,13 m.n.m.a. en el cauce del río Vélez.

Por lo tanto, este temporal de abril de 2022 será el que se desarrolle en el punto 6.5 donde se calcula el desplazamiento de la ola por la playa seca, por considerarse el mayor temporal conocido en esta zona desde que existen registros de boyas y con el que se tendrá una visión de la inundación de los terrenos en este sector del litoral.

Zona D.

En primer lugar, calculamos las pendientes de la playa húmeda y de la seca. La pendiente de la playa húmeda nos indicará qué formula de Nielsen-Hanslow ha de usarse, dependiendo si esta pendiente es mayor o menor del 10%.

pendiente playa húmeda	
profundidad (m)	7,00
distancia (m)	474
pendiente %	1,477

La pendiente de la playa húmeda es menor del 10% por lo que se usará para el cálculo del run-up la fórmula del Nielsen-Hanslow para pendientes menores de ese valor:

$$R_{uo}=0,04\cdot(Hs\cdot L)^{1/2}$$

La pendiente de la playa seca es:

pendiente playa seca	
altura máx. playa (m)	2,00
distancia (m)	274
pendiente %	0,730

Después se calcula el run-up para cada evento de temporal.

Dado que se busca la cota de inundación y el alcance de los mayores temporales conocidos desde que existen registros, se toman para el cálculo del run-up (R_{uo}) los 4 eventos cuya altura de ola significante y/o periodo pico es mayor:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)		R_{uo}
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78		1,31
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22		1,19
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10		1,23
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10		1,19

Los factores de corrección de Van der Meer y Janssen para esta zona son:

- Factor por pendiente:

$$\gamma_b = \frac{\tan\alpha}{\tan\beta} = 0{,}5$$

al dar como resultado un valor inferior a 0,6, y este coeficiente ha de estar en el intervalo entre un mínimo de 0,6 y un máximo de 1, se toma como coeficiente por pendiente:

$$\gamma_b = 0{,}6$$

- Factor de rugosidad:

El factor de rugosidad de la superficie de incidencia γ_f, tomará el valor de 1, al estar la playa formada por arenas limpias.

- Factor de percolación:

Como ya se ha dicho más arriba, este factor está relacionado con las características del terreno, y concretamente, en el caso de la arena, con el diámetro de sus granos y su disposición en el suelo. Así existen tablas en las que se define de manera genérica este factor en función de las características de la arena:

Rango de valores del coeficiente de permeabilidad en suelos

Tipo de suelo	k (cm/s)
Grava mal graduada (GP)	≥ 1
Grava uniforme (GP)	0,2-1
Grava bien graduada (GW)	0,05-0,3
Arena uniforme (SP)	5×10^{-3}-0,2
Arena bien graduada (SW)	10^{-3}-0,1
Arena limosa (SM)	10^{-3}-5×10^{-3}
Arena arcillosa (SC)	10^{-4}-10^{-3}
Limo de baja plasticidad (ML)	5×10^{-5}-10^{-4}
Arcillas de baja plasticidad (CL)	10^{-5}-10^{-8}

En nuestro caso se utilizará como coeficiente de percolación aquel que viene dado por la arena de la playa. Como ésta no viene explícitamente desarrollada en dicha tabla, se considera que se trata de una arena bien graduada, limpia, dado el efecto de lavado que tiene el agua del mar durante los temporales sobre ésta y cuyos valores típicos están comprendidos entre 0,001 y 0,1.

Dado que el intervalo de los valores de k descritos en la tabla es amplio, tomamos el valor 0,01 de dicho intervalo por ser el valor medio del mismo. Aplicando la siguiente formulación se obtiene el coeficiente de percolación (W) medio y, por tanto, un factor medio de percolación (γ_w) en la zona:

$$W = k \Rightarrow 0{,}01 \text{ cm/s}$$

$$\gamma_w = 1 - W \Rightarrow \gamma_w = 1 - 0{,}01 = 0{,}99$$

Un mayor valor del factor reductor de percolación implica una mayor reducción del valor de run-up corregido por estar directamente relacionados:

$$R_u = R_{uo} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_w$$

En esta zona, aplicando los factores de Van der Meer y Janssen:

$$R_u = R_{uo} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_w = R_{uo} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0{,}99$$

Con estos datos, para los eventos de temporal considerados se obtiene el run-up corregido (R_u) y con éste el run-up cuyo valor es superado en un porcentaje de tiempo inferior al 2% del evento:

$$R_{u2\%} = 1{,}98 \cdot R_u$$

Aplicando esta formulación se obtiene para cada evento de temporal en esta zona:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)		R_{uo}	R_U	$Ru_{2\%}$ (m)
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78		1,31	0,78	1,54
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22		1,19	0,71	1,40
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10		1,23	0,73	1,45
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10		1,19	0,71	1,40

A este run-up ($R_{u2\%}$) le sumamos el valor de la componente de nivel del mar ya calculado (S_{NM}), para estimar definitivamente el valor de la cota de inundación para cada uno de los máximos eventos registrados:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)		R_{uo}	R_U	$Ru_{2\%}$ (m)	S_{CI} (m)
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78		1,31	0,78	1,54	2,13
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22		1,19	0,71	1,40	2,14
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10		1,23	0,73	1,45	1,99
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10		1,19	0,71	1,40	1,99

Vistos los resultados tras la aplicación de las fórmulas y factores correctores desarrollados anteriormente se puede decir que el mayor temporal conocido que ha afectado a esta zona del tramo de la costa en estudio del término municipal de Vélez-Málaga es el acontecido el 4 de abril de 2022 que alcanzó su mayor intensidad a las 15:00 horas con una cota de inundación de unos 2,13 m.n.m.a.

Por lo tanto, este temporal de abril de 202 será el que se desarrolle en el punto 6.5 donde se calcula el desplazamiento de la ola por la playa seca, por considerarse el mayor temporal conocido en esta zona desde que existen registros de boyas y con el que se tendrá una visión de la inundación de los terrenos en este sector del litoral.

Zona E.

En primer lugar, calculamos las pendientes de la playa húmeda y de la seca. La pendiente de la playa húmeda nos indicará qué formula de Nielsen-Hanslow ha de usarse, dependiendo si esta pendiente es mayor o menor del 10%.

pendiente playa húmeda	
profundidad (m)	7,00
distancia (m)	268
pendiente %	2,612

La pendiente de la playa húmeda es menor del 10% por lo que se usará para el cálculo del run-up la fórmula del Nielsen-Hanslow para pendientes menores de ese valor:

$$R_{uo}=0{,}04\cdot(Hs\cdot L)^{1/2}$$

La pendiente de la playa seca es:

pendiente playa seca	
altura máx. playa (m)	2,00
distancia (m)	15
pendiente %	13,333

Después se calcula el run-up para cada evento de temporal.

Dado que se busca la cota de inundación y el alcance de los mayores temporales conocidos desde que existen registros, se toman para el cálculo del run-up (R_{uo}) los 4 eventos cuya altura de ola significante y/o periodo pico es mayor:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)	R_{uo}
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78	1,31
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22	1,19
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10	1,23
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10	1,19

Los factores de corrección de Van der Meer y Janssen para esta zona son:

- Factor por pendiente:

$$\gamma_b=\frac{\tan\alpha}{\tan\beta}=5{,}1$$

al dar como resultado un valor superior a 1, y este coeficiente ha de estar en el intervalo entre un mínimo de 0,6 y un máximo de 1, se toma como coeficiente por pendiente:

$$\gamma_b=1$$

- Factor de rugosidad:

El factor de rugosidad de la superficie de incidencia γ_f, tomará el valor de 1, al estar la playa formada por arenas limpias.

- Factor de percolación:

Como ya se ha dicho más arriba, este factor está relacionado con las características del terreno, y concretamente, en el caso de la arena, con el diámetro de sus granos y su disposición en el suelo. Así existen tablas en las que se define de manera genérica este factor en función de las características de la arena:

Rango de valores del coeficiente de permeabilidad en suelos

Tipo de suelo	k (cm/s)
Grava mal graduada (GP)	≥ 1
Grava uniforme (GP)	0,2-1
Grava bien graduada (GW)	0,05-0,3
Arena uniforme (SP)	5×10^{-3}-0,2
Arena bien graduada (SW)	10^{-3}-0,1
Arena limosa (SM)	10^{-3}-5×10^{-3}
Arena arcillosa (SC)	10^{-4}-10^{-3}
Limo de baja plasticidad (ML)	5×10^{-5}-10^{-4}
Arcillas de baja plasticidad (CL)	10^{-5}-10^{-8}

En nuestro caso se utilizará como coeficiente de percolación aquel que viene dado por la arena de la playa. Como ésta no viene explícitamente desarrollada en dicha tabla, se considera que se trata de una arena bien graduada, limpia, dado el efecto de lavado que tiene el agua del mar durante los temporales sobre ésta y cuyos valores típicos están comprendidos entre 0,001 y 0,1.

Dado que el intervalo de los valores de k descritos en la tabla es amplio, tomamos el valor 0,01 de dicho intervalo por ser el valor medio del mismo. Aplicando la siguiente formulación se obtiene el coeficiente de percolación (W) medio y, por tanto, un factor medio de percolación (γ_w) en la zona:

$$W=k \Rightarrow 0{,}01 \text{ cm/s}$$

$$\gamma_w=1\text{-}W \Rightarrow \gamma_w = 1 - 0{,}01 = 0{,}99$$

Un mayor valor del factor reductor de percolación implica una mayor reducción del valor de run-up corregido por estar directamente relacionados:

$$R_u = R_{uo} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_w$$

En esta zona, aplicando los factores de Van der Meer y Janssen:

$$R_u = R_{uo} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_w = R_{uo} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0{,}99$$

Con estos datos, para los eventos de temporal considerados se obtiene el run-up corregido (R_u) y con éste el run-up cuyo valor es superado en un porcentaje de tiempo inferior al 2% del evento:

$$R_{u2\%} = 1{,}98 \cdot R_u$$

Aplicando esta formulación se obtiene para cada evento de temporal en esta zona:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)	R_{uo}	R_U	$Ru_{2\%}$ (m)
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78	1,31	1,30	2,57
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22	1,19	1,18	2,34
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10	1,23	1,22	2,42
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10	1,19	1,18	2,34

A este run-up ($R_{u2\%}$) le sumamos el valor de la componente de nivel del mar ya calculado (S_{NM}), para estimar definitivamente el valor de la cota de inundación para cada uno de los máximos eventos registrados:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)	R_{uo}	R_U	$Ru_{2\%}$ (m)	S_{CI} (m)
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78	1,31	1,30	2,57	3,16
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22	1,19	1,18	2,34	3,08

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)		R_{uo}	R_U	$Ru_{2\%}$ (m)	S_{CI} (m)
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10		1,23	1,22	2,42	2,96
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10		1,19	1,18	2,34	2,93

Vistos los resultados tras la aplicación de las fórmulas y factores correctores desarrollados anteriormente se puede decir que el mayor temporal conocido que ha afectado a esta zona del tramo de la costa en estudio del término municipal de Vélez-Málaga es el acontecido el 4 de abril de 2022 que alcanzó su mayor intensidad a las 15:00 horas con una cota de inundación de unos 3,16 m.n.m.a.

Por lo tanto, este temporal de abril de 2022 será el que se desarrolle en el punto 6.5 donde se calcula el desplazamiento de la ola por la playa seca, por considerarse el mayor temporal conocido en esta zona desde que existen registros de boyas y con el que se tendrá una visión de la inundación de los terrenos en este sector del litoral.

Zona F.

En primer lugar, calculamos las pendientes de la playa húmeda y de la seca. La pendiente de la playa húmeda nos indicará qué formula de Nielsen-Hanslow ha de usarse, dependiendo si esta pendiente es mayor o menor del 10%.

pendiente playa húmeda	
profundidad (m)	7,00
distancia (m)	252
pendiente %	2,778

La pendiente de la playa húmeda es menor del 10% por lo que se usará para el cálculo del run-up la fórmula del Nielsen-Hanslow para pendientes menores de ese valor:

$$R_{uo}=0,04\cdot(Hs\cdot L)^{1/2}$$

La pendiente de la playa seca es:

pendiente playa seca	
altura máx. playa (m)	3,00
distancia (m)	35
pendiente %	8,571

Después se calcula el run-up para cada evento de temporal.

Dado que se busca la cota de inundación y el alcance de los mayores temporales conocidos desde que existen registros, se toman para el cálculo del run-up (R_{uo}) los 4 eventos cuya altura de ola significante y/o periodo pico es mayor:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)		R_{uo}
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78		1,31
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22		1,19
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10		1,23
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10		1,19

Los factores de corrección de Van der Meer y Janssen para esta zona son:

- Factor por pendiente:

$$\gamma_b=\frac{\tan\alpha}{\tan\beta}=3,1$$

al dar como resultado un valor superior a 1, y este coeficiente ha de estar en el intervalo entre un mínimo de 0,6 y un máximo de 1, se toma como coeficiente por pendiente:

$$\gamma_b = 1$$

- Factor de rugosidad:

El factor de rugosidad de la superficie de incidencia γ_f, tomará el valor de 1, al estar la playa formada por arenas limpias.

- Factor de percolación:

Como ya se ha dicho más arriba, este factor está relacionado con las características del terreno, y concretamente, en el caso de la arena, con el diámetro de sus granos y su disposición en el suelo. Así existen tablas en las que se define de manera genérica este factor en función de las características de la arena:

Rango de valores del coeficiente de permeabilidad en suelos

Tipo de suelo	k (cm/s)
Grava mal graduada (GP)	≥ 1
Grava uniforme (GP)	0,2-1
Grava bien graduada (GW)	0,05-0,3
Arena uniforme (SP)	5×10^{-3}-0,2
Arena bien graduada (SW)	10^{-3}-0,1
Arena limosa (SM)	10^{-3}-5×10^{-3}
Arena arcillosa (SC)	10^{-4}-10^{-3}
Limo de baja plasticidad (ML)	5×10^{-5}-10^{-4}
Arcillas de baja plasticidad (CL)	10^{-5}-10^{-8}

En nuestro caso se utilizará como coeficiente de percolación aquel que viene dado por la arena de la playa. Como ésta no viene explícitamente desarrollada en dicha tabla, se considera que se trata de una arena bien graduada, limpia, dado el efecto de lavado que tiene el agua del mar durante los temporales sobre ésta y cuyos valores típicos están comprendidos entre 0,001 y 0,1.

Dado que el intervalo de los valores de k descritos en la tabla es amplio, tomamos el valor 0,01 de dicho intervalo por ser el valor medio del mismo. Aplicando la siguiente formulación se obtiene el coeficiente de percolación (W) medio y, por tanto, un factor medio de percolación (γ_w) en la zona:

$$W = k \Rightarrow 0{,}01 \text{ cm/s}$$

$$\gamma_w = 1\text{-}W \Rightarrow \gamma_w = 1 - 0{,}01 = 0{,}99$$

Un mayor valor del factor reductor de percolación implica una mayor reducción del valor de run-up corregido por estar directamente relacionados:

$$R_u = R_{uo} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_w$$

En esta zona, aplicando los factores de Van der Meer y Janssen:

$$R_u = R_{uo} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_w = R_{uo} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0{,}99$$

Con estos datos, para los eventos de temporal considerados se obtiene el run-up corregido (R_u) y con éste el run-up cuyo valor es superado en un porcentaje de tiempo inferior al 2% del evento:

$$R_{u2\%} = 1{,}98 \cdot R_u$$

Aplicando esta formulación se obtiene para cada evento de temporal en esta zona:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)	R_{uo}	R_U	$Ru_{2\%}$ (m)
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78	1,31	1,30	2,57
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22	1,19	1,18	2,34
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10	1,23	1,22	2,42
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10	1,19	1,18	2,34

A este run-up ($R_{u2\%}$) le sumamos el valor de la componente de nivel del mar ya calculado (S_{NM}), para estimar definitivamente el valor de la cota de inundación para cada uno de los máximos eventos registrados:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)	R_{uo}	R_U	$Ru_{2\%}$ (m)	S_{CI} (m)
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78	1,31	1,30	2,57	3,16
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22	1,19	1,18	2,34	3,08
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10	1,23	1,22	2,42	2,96
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10	1,19	1,18	2,34	2,93

Vistos los resultados tras la aplicación de las fórmulas y factores correctores desarrollados anteriormente se puede decir que el mayor temporal conocido que ha afectado a esta zona del tramo de la costa en estudio del término municipal de Vélez-Málaga es el acontecido el 4 de abril de 2022 que alcanzó su mayor intensidad a las 15:00 horas con una cota de inundación de unos 3,16 m.n.m.a.

Por lo tanto, este temporal de abril 2022 será el que se desarrolle en el punto 6.5 donde se calcula el desplazamiento de la ola por la playa seca, por considerarse el mayor temporal conocido en esta zona desde que existen registros de boyas y con el que se tendrá una visión de la inundación de los terrenos en este sector del litoral.

Zona G.

En primer lugar, calculamos las pendientes de la playa húmeda y de la seca. La pendiente de la playa húmeda nos indicará qué formula de Nielsen-Hanslow ha de usarse, dependiendo si esta pendiente es mayor o menor del 10%.

pendiente playa húmeda	
profundidad (m)	7,00
distancia (m)	253
pendiente %	2,767

La pendiente de la playa húmeda es menor del 10% por lo que se usará para el cálculo del run-up la fórmula del Nielsen-Hanslow para pendientes menores de ese valor:

$$R_{uo}=0,04\cdot(Hs\cdot L)^{1/2}$$

La pendiente de la playa seca es:

pendiente playa seca	
altura máx. playa (m)	3,00
distancia (m)	61
pendiente %	4,918

Después se calcula el run-up para cada evento de temporal.

Dado que se busca la cota de inundación y el alcance de los mayores temporales conocidos desde que existen registros, se toman para el cálculo del run-up (R_{uo}) los 4 eventos cuya altura de ola significante y/o periodo pico es mayor:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)		R_{uo}
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78		1,31
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22		1,19
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10		1,23
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10		1,19

Los factores de corrección de Van der Meer y Janssen para esta zona son:

- Factor por pendiente:

$$\gamma_b = \frac{\tan\alpha}{\tan\beta} = 1{,}8$$

al dar como resultado un valor superior a 1, y este coeficiente ha de estar en el intervalo entre un mínimo de 0,6 y un máximo de 1, se toma como coeficiente por pendiente:

$$\gamma_b = 1$$

- Factor de rugosidad:

El factor de rugosidad de la superficie de incidencia γ_f, tomará el valor de 1, al estar la playa formada por arenas limpias.

- Factor de percolación:

Como ya se ha dicho más arriba, este factor está relacionado con las características del terreno, y concretamente, en el caso de la arena, con el diámetro de sus granos y su disposición en el suelo. Así existen tablas en las que se define de manera genérica este factor en función de las características de la arena:

Rango de valores del coeficiente de permeabilidad en suelos

Tipo de suelo	k (cm/s)
Grava mal graduada (GP)	≥ 1
Grava uniforme (GP)	0,2-1
Grava bien graduada (GW)	0,05-0,3
Arena uniforme (SP)	5×10^{-3}-0,2
Arena bien graduada (SW)	10^{-3}-0,1
Arena limosa (SM)	10^{-3}-5×10^{-3}
Arena arcillosa (SC)	10^{-4}-10^{-3}
Limo de baja plasticidad (ML)	5×10^{-5}-10^{-4}
Arcillas de baja plasticidad (CL)	10^{-5}-10^{-8}

En nuestro caso se utilizará como coeficiente de percolación aquel que viene dado por la arena de la playa. Como ésta no viene explícitamente desarrollada en dicha tabla, se considera que se trata de una arena bien graduada, limpia, dado el efecto de lavado que tiene el agua del mar durante los temporales sobre ésta y cuyos valores típicos están comprendidos entre 0,001 y 0,1.

Dado que el intervalo de los valores de k descritos en la tabla es amplio, tomamos el valor 0,01 de dicho intervalo por ser el valor medio del mismo. Aplicando la siguiente formulación se obtiene el coeficiente de percolación (W) medio y, por tanto, un factor medio de percolación (γ_w) en la zona:

$$W = k \Rightarrow 0{,}01 \text{ cm/s}$$

$$\gamma_w = 1 - W \Rightarrow \gamma_w = 1 - 0{,}01 = 0{,}99$$

Un mayor valor del factor reductor de percolación implica una mayor reducción del valor de run-up corregido por estar directamente relacionados:

$$R_u = R_{uo} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_w$$

En esta zona, aplicando los factores de Van der Meer y Janssen:

$$R_u = R_{uo} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_w = R_{uo} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0{,}99$$

Con estos datos, para los eventos de temporal considerados se obtiene el run-up corregido (R_u) y con éste el run-up cuyo valor es superado en un porcentaje de tiempo inferior al 2% del evento:

$$R_{u2\%} = 1{,}98 \cdot R_u$$

Aplicando esta formulación se obtiene para cada evento de temporal en esta zona:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)	R_{uo}	R_U	$Ru_{2\%}$ (m)
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78	1,31	1,30	2,57
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22	1,19	1,18	2,34
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10	1,23	1,22	2,42
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10	1,19	1,18	2,34

A este run-up ($R_{u2\%}$) le sumamos el valor de la componente de nivel del mar ya calculado (S_{NM}), para estimar definitivamente el valor de la cota de inundación para cada uno de los máximos eventos registrados:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)	R_{uo}	R_U	$Ru_{2\%}$ (m)	S_{CI} (m)
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78	1,31	1,30	2,57	3,16
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22	1,19	1,18	2,34	3,08
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10	1,23	1,22	2,42	2,96
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10	1,19	1,18	2,34	2,93

Vistos los resultados tras la aplicación de las fórmulas y factores correctores desarrollados anteriormente se puede decir que el mayor temporal conocido que ha afectado a esta zona del tramo de la costa en estudio del término municipal de Vélez-Málaga es el acontecido el 4 de abril de 2022 que alcanzó su mayor intensidad a las 15:00 horas con una cota de inundación de unos 3,16 m.n.m.a.

Por lo tanto, este temporal de abril de 2022 será el que se desarrolle en el punto 6.5 donde se calcula el desplazamiento de la ola por la playa seca, por considerarse el mayor temporal conocido en esta zona desde que existen registros de boyas y con el que se tendrá una visión de la inundación de los terrenos en este sector del litoral.

6.5 Cálculo del desplazamiento de la ola por la playa seca para cada zona

Para realizar estos cálculos se va a realizar el estudio según las instrucciones del C.E.M. (Coastal Engineering Manual), con las ventajas que aporta el uso de los datos de los puntos SIMAR de Puertos del Estado y la base de datos reales de oleaje registrados desde 1958.

Según el C.E.M. es necesario obtener la altura de ola significante en aguas profundas para calcular la altura de ola significativa (H'0 según nomenclatura del C.E.M.). Como los datos obtenidos en el punto SIMAR son simulaciones de oleaje para ese punto, el valor que se obtiene en dicho punto SIMAR es igual para ambos parámetros.

La longitud de ola profunda es:

$$L = 1.56 \times {T_p}^2$$

Donde T_p es el periodo punta; también obtenido del punto SIMAR.

La altura de ruptura de la ola según Komar & Gaughan (1973) es:

$$\Omega_b = 0.56 \left(\frac{H_0}{L_0}\right)^{\frac{-1}{5}}$$

Donde, L_0 es la longitud de ola en aguas profundas (m).

Así mismo tenemos que,

$$H_b = H_0 \times \Omega_b$$

Para continuar con los cálculos según el C.E.M. del alcance del oleaje (Δx) lo hacemos mediante la fórmula:

$$\Delta x = \frac{\eta_s}{tan\vartheta - \frac{d_\eta}{d_x}}$$

Para ello necesitamos conocer la pendiente uniforme de la playa, ϑ, (húmeda + seca). Estos parámetros ya han sido obtenidos para el cálculo de la cota de inundación anteriormente.

El cálculo de la decaída de la ola cuando llega a la playa es:

$$\frac{d\eta}{dx} = \frac{1}{1 + \frac{8}{3 \times \gamma_b^2}} \times tan\beta$$

La elevación media de la ola sobre el litoral:

$$\eta_s = \eta_b + (d_b - \eta_b) + \frac{1}{1 + \frac{8}{(3 \times \gamma_b^2)}}$$

La elevación media sobre el nivel del mar en aguas tranquilas profundas:

$$\eta_b = \frac{-1}{16} \times \gamma_b^2 \times d_b$$

Donde γ_b, es el índice de profundidad de rotura, que se obtiene de:

$$\gamma b = b - a \frac{H_b}{g \times T^2}$$

Y la profundidad de rotura db, que se obtiene mediante la fórmula:

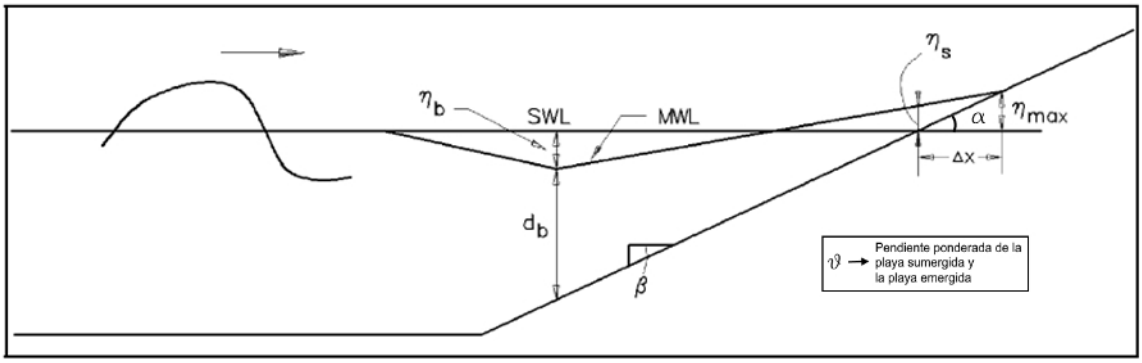
$$db = \frac{H_b}{\gamma_b^2}$$

Los parámetros a y b son coeficientes relacionados con la pendiente de la playa húmeda y responden a la siguiente formulación:

$$a = 43.8 \times (1 - e^{19tan\beta})$$

$$b = \frac{1.56}{(1 + e^{-19.5tan\beta})}$$

Así, aplicaremos este sistema de fórmulas del C.E.M. para los datos del máximo temporal desde que hay registros, considerando que el mayor temporal conocido es aquel cuya cota de inundación (calculada en el punto 6.4) es el de mayor valor, es decir, aquel temporal cuyo valor de S_{ci} es mayor.



Esquema de los parámetros calculados y su relación con el perfil de la playa (extraído del C.E.M.).

A continuación, se desarrollan los cálculos para cada zona.

Zona A:

Como ya se ha visto en el apartado 6.4, el mayor temporal conocido en esta zona, desde que existen registros de boyas, es el acontecido el 4 de abril de 2022 con una cota corregida de inundación de 3,16 m.n.m.a. Serán los datos de este temporal los que se desarrollen aquí para calcular el alcance del mar durante los mayores temporales conocidos, según el procedimiento del C.E.M.

Los datos de partida para los cálculos son:

Punto SIMAR	2035080
Fecha máx. temporal	04/04/2022
Hs	4,69
Tp	12,11
L	228,78

Resultando, tras la aplicación de la formulación anteriormente descrita:

Ωb	1,22
Hb	5,72
dη/dx	0,0025
ηs	1,18
ηb	-0,30
γb	0,84
db	6,84
tanα	0,019
tanβ	0,012
tanϑ	0,013

Por lo tanto, el alcance del mar durante este temporal, en esta zona, dado por la fórmula:

$$\Delta x = \frac{\eta_s}{tan\vartheta - \frac{d_\eta}{d_x}}$$

Arroja un resultado de 110,61 metros tierra adentro desde la línea de agua. Como línea de agua se ha tomado la línea costera de 2022 derivada de satélites proporcionada por EMODnet (European Marine Observation and Data Network), generada a partir de datos geográficos ópticos de alta resolución y modelado de mareas, se considera ésta como la línea de costa más reciente disponible a la fecha de redacción del estudio. Es decir, esa distancia es el lugar hasta donde

alcanzaría el agua del mar, según las cartografías utilizadas, con unas pendientes constantes, y un oleaje regular durante el máximo temporal conocido desde que existen registros.

Por tanto, podemos decir que el oleaje generado durante el temporal del día 4 de abril de 2022 en esta zona se habría adentrado hasta los 110,61 metros según indican los cálculos teóricos de alcance descritos en el manual de ingeniería de costas (CEM), usando como datos de partida los registros tomados por las boyas y el modelado numérico del oleaje y viento de los puntos SIMAR de Puertos del Estado, y asimilando la zona de costa en estudio como un sector homogéneo con oleaje regular durante el evento del mayor temporal como modelo simplificado del terreno costero para la realización estos cálculos.

Zona B.

Como ya se ha visto en el apartado 6.4, el mayor temporal conocido en esta zona, desde que existen registros de boyas, es el acontecido el 4 de abril de 2022 con una cota corregida de inundación de 3,16 m.n.m.a. Serán los datos de este temporal los que se desarrollen aquí para calcular el alcance del mar durante los mayores temporales conocidos, según el procedimiento del C.E.M.

Los datos de partida para los cálculos son:

Punto SIMAR	2035080
Fecha máx. temporal	04/04/2022
Hs	4,69
Tp	12,11
L	228,78

Resultando, tras la aplicación de la formulación anteriormente descrita:

Ωb	1,12
Hb	6,00
dη/dx	0,0024
ηs	1,23
ηb	-0,31
γb	0,82
db	7,31
tanα	0,010
tanβ	0,012
tanϑ	0,011

Por lo tanto, el alcance del mar durante este temporal, en esta zona, dado por la fórmula:

$$\Delta x = \frac{\eta_s}{tan\vartheta - \frac{d_\eta}{d_x}}$$

Arroja un resultado de 111,50 metros tierra adentro desde la línea de agua. Como línea de agua se ha tomado la línea costera de 2022 derivada de satélites proporcionada por EMODnet (European Marine Observation and Data Network), generada a partir de datos geográficos ópticos de alta resolución y modelado de mareas, se considera ésta como la línea de costa más reciente disponible a la fecha de redacción del estudio. Es decir, esa distancia es el lugar hasta donde alcanzaría el agua del mar, según las cartografías utilizadas, con unas pendientes constantes, y un oleaje regular durante el máximo temporal conocido desde que existen registros.

Por tanto, podemos decir que el oleaje generado durante el temporal del día 4 de abril de 2022 en esta zona se habría adentrado hasta los 111,50 metros según indican los cálculos teóricos de alcance descritos en el manual de ingeniería de costas (CEM), usando como datos de partida los

registros tomados por las boyas y el modelado numérico del oleaje y viento de los puntos SIMAR de Puertos del Estado, y asimilando la zona de costa en estudio como un sector homogéneo con oleaje regular durante el evento del mayor temporal como modelo simplificado del terreno costero para la realización estos cálculos.

Zona C, cauce del río Vélez.

Como ya se ha visto en el apartado 6.4, el mayor temporal conocido en esta zona, desde que existen registros de boyas, es el acontecido el 4 de abril de 2022 con una cota corregida de inundación de 2,13 m.n.m.a. Serán los datos de este temporal los que se desarrollen aquí para calcular el alcance del mar durante los mayores temporales conocidos, según el procedimiento del C.E.M.

Los datos de partida para los cálculos son:

Punto SIMAR	2035080
Fecha máx. temporal	04/04/2022
Hs	4,69
Tp	12,11
L	228,78

Resultando, tras la aplicación de la formulación anteriormente descrita:

Ωb	1,22
Hb	5,72
dη/dx	0,0026
ηs	1,19
ηb	-0,30
γb	0,84
db	6,82
tanα	0,004
tanβ	0,013
tanϑ	0,008

Por lo tanto, el alcance del mar durante este temporal, en esta zona, dado por la fórmula:

$$\Delta x = \frac{\eta_s}{tan\vartheta - \frac{d_\eta}{d_x}}$$

Arroja un resultado de 207,33 metros tierra adentro desde la línea de agua. Como línea de agua se ha tomado la línea costera de 2022 derivada de satélites proporcionada por EMODnet (European Marine Observation and Data Network), generada a partir de datos geográficos ópticos de alta resolución y modelado de mareas, se considera ésta como la línea de costa más reciente disponible a la fecha de redacción del estudio. Es decir, esa distancia es el lugar hasta donde alcanzaría el agua del mar, según las cartografías utilizadas, con unas pendientes constantes, y un oleaje regular durante el máximo temporal conocido desde que existen registros.

Por tanto, podemos decir que el oleaje generado durante el temporal del día 4 de abril de 2022 en esta zona se habría adentrado hasta los 207,33 metros según indican los cálculos teóricos de alcance descritos en el manual de ingeniería de costas (CEM), usando como datos de partida los registros tomados por las boyas y el modelado numérico del oleaje y viento de los puntos SIMAR de Puertos del Estado, y asimilando la zona de costa en estudio como un sector homogéneo con oleaje regular durante el evento del mayor temporal como modelo simplificado del terreno costero para la realización estos cálculos.

Zona D.

Como ya se ha visto en el apartado 6.4, el mayor temporal conocido en esta zona, desde que existen registros de boyas, es el acontecido el 4 de abril de 2022 con una cota corregida de inundación de 2,13 m.n.m.a. Serán los datos de este temporal los que se desarrollen aquí para calcular el alcance del mar durante los mayores temporales conocidos, según el procedimiento del C.E.M.

Los datos de partida para los cálculos son:

Punto SIMAR	2035080
Fecha máx. temporal	04/04/2022
Hs	4,69
Tp	12,11
L	228,78

Resultando, tras la aplicación de la formulación anteriormente descrita:

Ωb	1,22
Hb	5,72
dη/dx	0,0031
ηs	1,19
ηb	-0,30
γb	0,85
db	6,73
tanα	0,007
tanβ	0,015
tanϑ	0,012

Por lo tanto, el alcance del mar durante este temporal, en esta zona, dado por la fórmula:

$$\Delta x = \frac{\eta_s}{tan\vartheta - \frac{d_\eta}{d_x}}$$

Arroja un resultado de 134,28 metros tierra adentro desde la línea de agua. Como línea de agua se ha tomado la línea costera de 2022 derivada de satélites proporcionada por EMODnet (European Marine Observation and Data Network), generada a partir de datos geográficos ópticos de alta resolución y modelado de mareas, se considera ésta como la línea de costa más reciente disponible a la fecha de redacción del estudio. Es decir, esa distancia es el lugar hasta donde alcanzaría el agua del mar, según las cartografías utilizadas, con unas pendientes constantes, y un oleaje regular durante el máximo temporal conocido desde que existen registros.

Por tanto, podemos decir que el oleaje generado durante el temporal del día 4 de abril de 2022 en esta zona se habría adentrado hasta los 134,28 metros según indican los cálculos teóricos de alcance descritos en el manual de ingeniería de costas (CEM), usando como datos de partida los registros tomados por las boyas y el modelado numérico del oleaje y viento de los puntos SIMAR de Puertos del Estado, y asimilando la zona de costa en estudio como un sector homogéneo con oleaje regular durante el evento del mayor temporal como modelo simplificado del terreno costero para la realización estos cálculos.

Zona E.

Como ya se ha visto en el apartado 6.4, el mayor temporal conocido en esta zona, desde que existen registros de boyas, es el acontecido el 4 de abril de 2022 con una cota corregida de inundación de 3,16 m.n.m.a. Serán los datos de este temporal los que se desarrollen aquí para

calcular el alcance del mar durante los mayores temporales conocidos, según el procedimiento del C.E.M.

Los datos de partida para los cálculos son:

Punto SIMAR	2035080
Fecha máx. temporal	04/04/2022
Hs	4,69
Tp	12,11
L	228,78

Resultando, tras la aplicación de la formulación anteriormente descrita:

Ωb	1,22
Hb	5,72
dη/dx	0,0062
ηs	1,24
ηb	-0,32
γb	0,91
db	6,31
tanα	0,133
tanβ	0,026
tanϑ	0,032

Por lo tanto, el alcance del mar durante este temporal, en esta zona, dado por la fórmula:

$$\Delta x = \frac{\eta_s}{tan\vartheta - \frac{d_\eta}{d_x}}$$

Arroja un resultado de 48,25 metros tierra adentro desde la línea de agua. Como línea de agua se ha tomado la línea costera de 2022 derivada de satélites proporcionada por EMODnet (European Marine Observation and Data Network), generada a partir de datos geográficos ópticos de alta resolución y modelado de mareas, se considera ésta como la línea de costa más reciente disponible a la fecha de redacción del estudio. Es decir, esa distancia es el lugar hasta donde alcanzaría el agua del mar, según las cartografías utilizadas, con unas pendientes constantes, y un oleaje regular durante el máximo temporal conocido desde que existen registros.

Por tanto, podemos decir que el oleaje generado durante el temporal del día 4 de abril de 2022 en esta zona se habría adentrado hasta los 48,25 metros según indican los cálculos teóricos de alcance descritos en el manual de ingeniería de costas (CEM), usando como datos de partida los registros tomados por las boyas y el modelado numérico del oleaje y viento de los puntos SIMAR de Puertos del Estado, y asimilando la zona de costa en estudio como un sector homogéneo con oleaje regular durante el evento del mayor temporal como modelo simplificado del terreno costero para la realización estos cálculos.

Zona F.

Como ya se ha visto en el apartado 6.4, el mayor temporal conocido en esta zona, desde que existen registros de boyas, es el acontecido el 4 de abril de 2022 con una cota de inundación corregida de 3,16 m.n.m.a. Serán los datos de este temporal los que se desarrollen aquí para calcular el alcance del mar durante los mayores temporales conocidos, según el procedimiento del C.E.M.

Los datos de partida para los cálculos son:

Punto SIMAR	2035080
Fecha máx. temporal	04/04/2022

Hs	4,69
Tp	12,11
L	228,78

Resultando, tras la aplicación de la formulación anteriormente descrita:

Ωb	1,22
Hb	5,72
dη/dx	0,0066
ηs	1,24
ηb	-0,33
γb	0,91
db	6,25
tanα	0,086
tanβ	0,028
tanϑ	0,035

Por lo tanto, el alcance del mar durante este temporal, en esta zona, dado por la fórmula:

$$\Delta x = \frac{\eta_s}{tan\vartheta - \frac{d_\eta}{d_x}}$$

Arroja un resultado de 44,09 metros tierra adentro desde la línea de agua. Como línea de agua se ha tomado la línea costera de 2022 derivada de satélites proporcionada por EMODnet (European Marine Observation and Data Network), generada a partir de datos geográficos ópticos de alta resolución y modelado de mareas, se considera ésta como la línea de costa más reciente disponible a la fecha de redacción del estudio. Es decir, esa distancia es el lugar hasta donde alcanzaría el agua del mar, según las cartografías utilizadas, con unas pendientes constantes, y un oleaje regular durante el máximo temporal conocido desde que existen registros.

Por tanto, podemos decir que el oleaje generado durante el temporal del día 4 de abril de 2022 en esta zona se habría adentrado hasta los 44,09 metros según indican los cálculos teóricos de alcance descritos en el manual de ingeniería de costas (CEM), usando como datos de partida los registros tomados por las boyas y el modelado numérico del oleaje y viento de los puntos SIMAR de Puertos del Estado, y asimilando la zona de costa en estudio como un sector homogéneo con oleaje regular durante el evento del mayor temporal como modelo simplificado del terreno costero para la realización estos cálculos.

Zona G.

Como ya se ha visto en el apartado 6.4, el mayor temporal conocido en esta zona, desde que existen registros de boyas, es el acontecido el 1 de noviembre de 2015 con una cota corregida de inundación de 2,16 m.n.m.a. Serán los datos de este temporal los que se desarrollen aquí para calcular el alcance del mar durante los mayores temporales conocidos, según el procedimiento del C.E.M.

Los datos de partida para los cálculos son:

Punto SIMAR	2035080
Fecha máx. temporal	04/04/2022
Hs	4,69
Tp	12,11
L	228,78

Resultando, tras la aplicación de la formulación anteriormente descrita:

Ωb	1,22

Hb	5,72
dη/dx	0,0066
ηs	1,24
ηb	-0,33
γb	0,91
db	6,25
tanα	0,049
tanβ	0,028
tanϑ	0,032

Por lo tanto, el alcance del mar durante este temporal, en esta zona, dado por la fórmula:

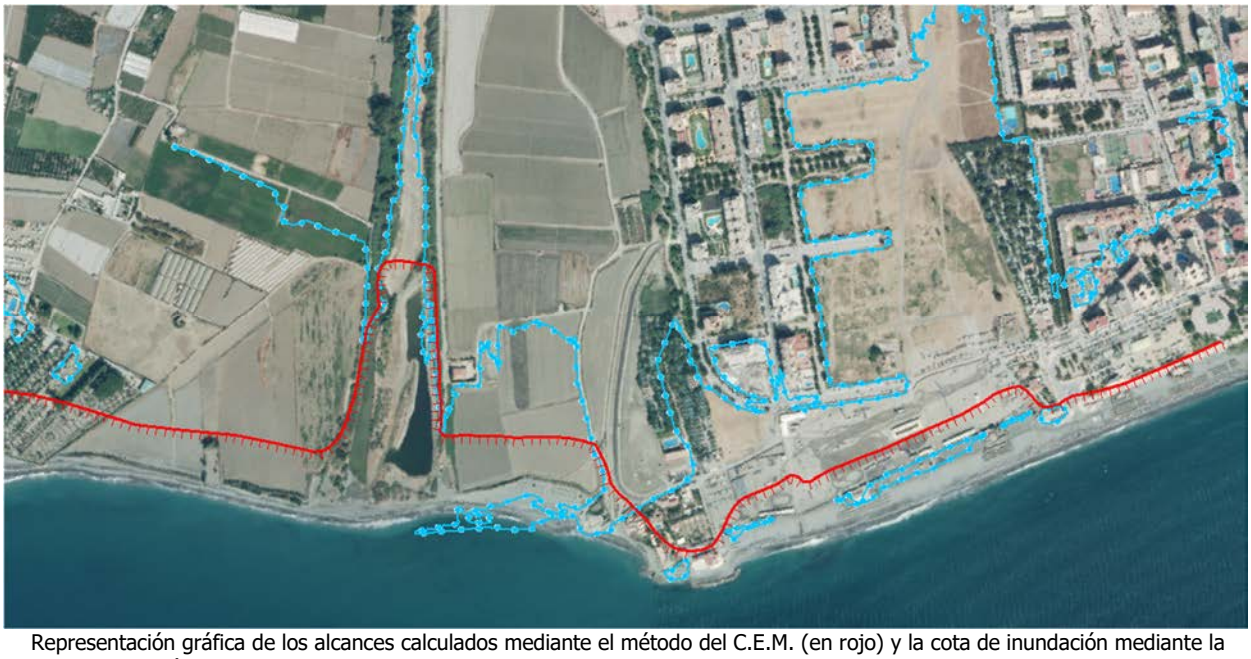
$$\Delta x = \frac{\eta_s}{tan\vartheta - \frac{d_\eta}{d_x}}$$

Arroja un resultado de 49,25 metros tierra adentro desde la línea de agua. Como línea de agua se ha tomado la línea costera de 2022 derivada de satélites proporcionada por EMODnet (European Marine Observation and Data Network), generada a partir de datos geográficos ópticos de alta resolución y modelado de mareas, se considera ésta como la línea de costa más reciente disponible a la fecha de redacción del estudio. Es decir, esa distancia es el lugar hasta donde alcanzaría el agua del mar, según las cartografías utilizadas, con unas pendientes constantes, y un oleaje regular durante el máximo temporal conocido desde que existen registros.

Por tanto, podemos decir que el oleaje generado durante el temporal del día 4 de abril de 2022 en esta zona se habría adentrado hasta los 49,25 metros según indican los cálculos teóricos de alcance descritos en el manual de ingeniería de costas (CEM), usando como datos de partida los registros tomados por las boyas y el modelado numérico del oleaje y viento de los puntos SIMAR de Puertos del Estado, y asimilando la zona de costa en estudio como un sector homogéneo con oleaje regular durante el evento del mayor temporal como modelo simplificado del terreno costero para la realización estos cálculos.

6.6 Estudio de los resultados.

Teniendo en cuenta estos valores de alcance obtenidos para cada zona definida, se puede representar en el mapa el alcance de la inundación teórica durante los máximos temporales (según el método del C.E.M.) así como la cota de inundación (según Nielsen-Hanslow).



Representación gráfica de los alcances calculados mediante el método del C.E.M. (en rojo) y la cota de inundación mediante la fórmula de Nielsen-Hanslow (1991) corregida con los factores de Van der Meer y Jansen (en azul).

Una vez obtenidos los valores de cota de inundación (S_{CI}), medida en vertical, y de alcance de la inundación (Δx), medida en horizontal, se puede calcular la extensión de la inundación (sin tener en cuenta obstáculos cuya altura no esté cartografiada como curva de nivel, ni las superficies cuyos terrenos estén más bajos colindantes a los que si llega el agua y que por gravedad se desplazaría e inundaría también esos terrenos bajos), pues la forma del perfil medio de la playa relaciona las distancias en vertical y en horizontal de la inundación desde los puntos extremos de la medición.

Al ser variables distintas y haberse tratado y calculado de forma independiente, no se obtienen los mismos resultados de extensión de la inundación. Así, al representar la distancia de inundación y la cota de inundación sobre la cartografía no serán coincidentes por sus características intrínsecas.

La topografía del terreno es un factor limitante en la extensión de la inundación y se relaciona con los dos parámetros calculados, pudiéndose dar tres casos genéricos que han de ser considerados en cada zona de estudio. Estos casos son:

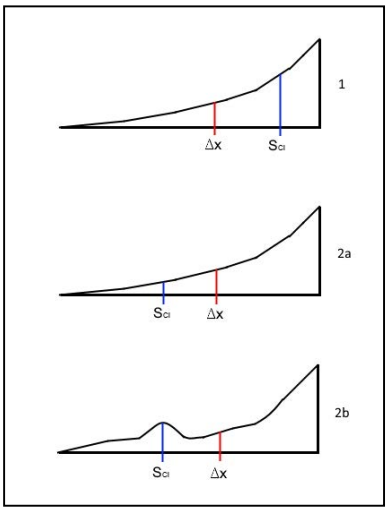
1 – La cota de inundación (S_{CI}), según la topografía del terreno, se ubica más al interior que el alcance de la inundación (Δx).

2 – La cota de inundación (S_{CI}), se ubica más al exterior que el alcance de inundación (Δx). En este supuesto pueden darse 2 situaciones según la topografía del terreno:

2.a – La pendiente del terreno asciende de forma constante desde la cota cero hacia arriba.

2.b – La pendiente del terreno asciende para luego descender al interior, porque existe un montículo u obstáculo más alto que el terreno más al interior.

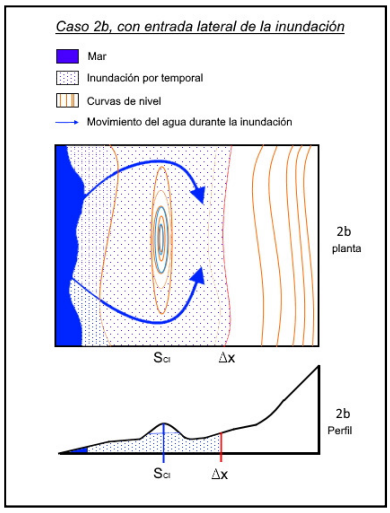
Esquemáticamente:



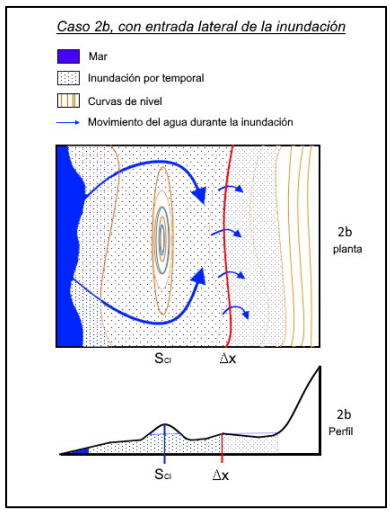
Así, cuando tras los cálculos y su representación sobre la cartografía de las líneas que indican los límites, tanto de la cota de inundación (S_{CI}) sobre el nivel del mar (cota 0 n.m.m.a.) como del alcance (desplazamiento de la ola tierra adentro, Δx), nos encontramos con la situación '1' se considera que la inundación se extiende tierra adentro hasta el límite marcado por el cálculo del alcance (Δx).

En el caso de encontrarnos con el supuesto 2a, es decir, el límite interior del alcance (Δx) se ubica más al interior que la inundación arrojada por el valor de la cota de inundación (S_{CI}) en un terreno que va ascendiendo de manera constante desde la línea de agua hacia el interior, se considera que la inundación por el temporal se extiende hasta el límite interior marcado por la cota de inundación (S_{CI}) ya que se hace la hipótesis de que el agua no puede superar la cota de inundación calculada ya que más al interior de ésta, el terreno tiene mayor cota por su ascenso en altura uniforme.

En el caso de encontrarnos con el supuesto 2b, es decir, el límite interior del alcance (Δx) se ubica más al interior que la inundación arrojada por el valor de la cota de inundación (S_{CI}) en un terreno que no asciende de forma constante desde la cota cero sino que, por la existencia de montículos de arena o por las propias características del terreno en las que se alcanza una cota determinada y más al interior el terreno baja y, por tanto, tiene cota inferior a ese montículo, cordón, etc. se considera que el límite hasta el que se extiende la inundación por el temporal lo marca cálculo del alcance de las olas (Δx) dado que el agua de la inundación pueda provenir de zonas más bajas, no venir del punto de medición, sino de zonas aledañas más bajas y que se extiende por detrás de este cordón u obstáculo más alto, pero inundándose al interior con aguas de mar procedentes de las entradas más bajas que el cordón o montículo, en otros lugares más o menos cercanos. Esta situación se trata de ilustrar con el siguiente esquema:



Una variante de este último caso, habitual en los terrenos que abarca este estudio de regresión de la costa, es que los terrenos más al interior del alcance de las olas (Δx) siguen siendo bajos por lo que el agua, por la gravedad y sus características de fluido, se extiende por esos terrenos hasta donde la topografía del suelo vuelve a ascender, por lo que la extensión de la inundación ha de estudiarse en cada caso concreto ya que el agua avanzará incluso más allá de esa línea teórica Δx. Esta situación se trata de ilustrar con el siguiente esquema:



Vistos los casos genéricos, se debe considerar si la extensión de inundación viene limitada por cota (S_{CI}), por distancia (Δx) o por distancia y extensión por terrenos bajos, en cada uno de los casos de los terrenos estudiados.

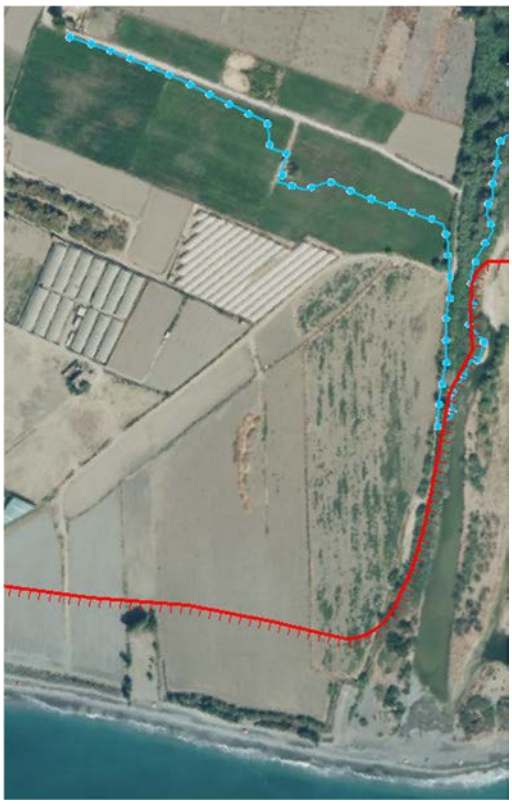
En las representaciones gráficas anteriores se han mostrado las líneas que marcan la cota de inundación calculada mediante la formulación de Nielsen-Hanslow y el alcance de la inundación calculada por el método de C.E.M.

En el inicio del tramo, zona A, la cota de inundación es de 3,16m por lo que siendo terrenos bajos que en su mayor parte están por debajo de los 3 metros de altitud, la cota de inundación se ubica a una gran distancia horizontal de la costa (más de 400 metros). El alcance de las olas (Δx) en esta zona se ubica a 110 metros de la línea de agua, por tanto, sería el caso de la hipótesis '1' antes comentada siendo este último parámetro el que indicaría la extensión numérica de la inundación.



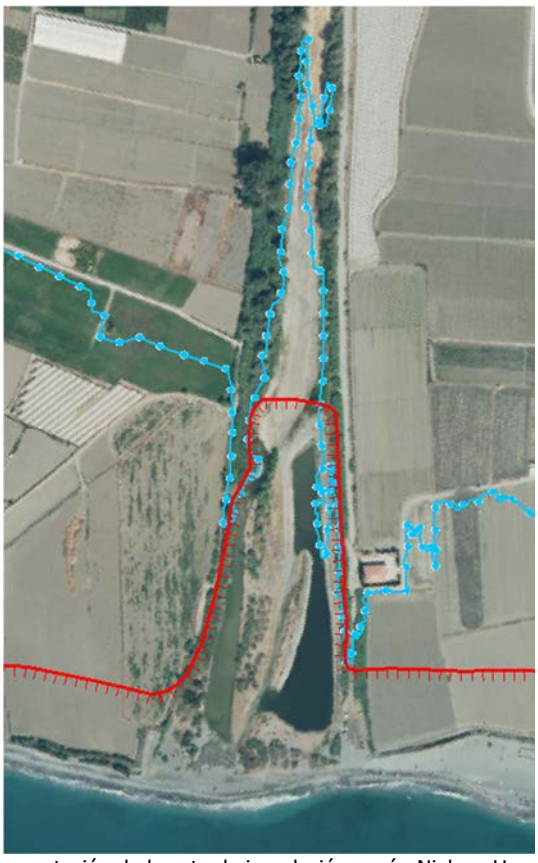
Representación de la cota de inundación según Nielsen-Hanslow (azul) y el alcance del oleaje según C.E.M. (rojo)

En la zona B, la cota de inundación es de 3,16m por lo que siendo terrenos bajos que en su mayor parte están por debajo de los 3 metros de altitud, la cota de inundación se ubica a una gran distancia horizontal de la línea media de agua. El alcance de las olas (Δx) en esta zona se ubica a 111 metros de la línea de agua, por tanto, estaríamos en la hipótesis '1' arriba expuesta siendo este último parámetro el que indicaría la extensión numérica de la inundación.



Representación de la cota de inundación según Nielsen-Hanslow
(azul) y el alcance del oleaje según C.E.M. (rojo)

La zona C los cálculos del alcance del oleaje se han realizado para el cauce del río Vélez; la cota de inundación es de 2,13m. El alcance de las olas (Δx) en el cauce remonta hasta los a los 207 metros medidos desde la línea de agua, por tanto, estaríamos en la hipótesis '1' arriba expuesta siendo este último parámetro el que indicaría la extensión numérica de la inundación.



Representación de la cota de inundación según Nielsen-Hanslow
(azul) y el alcance del oleaje según C.E.M. (rojo)

En la zona D, la cota de inundación es de 2,13m. que se sitúa en los campos de cultivo a casi 300 metros de distancia de la línea de agua. Tras el gran temporal de abril de 2022, para intentar defender los terrenos cultivados, en el fondo de la playa se elevó un cordón de arena sacada en parte de la parte interior y dejando una zanja para la evacuación del agua. El alcance de las olas (Δx) en esta zona se ubica a 134 metros de la línea de agua situándose en las primeras parcelas cultivadas, al interior del cordón arenoso artificial, por tanto, estaríamos en la hipótesis '1' anteriormente expuesta, siendo el parámetro del alcance de las olas la extensión numérica de la inundación.



Representación de la cota de inundación según Nielsen-Hanslow (azul) y el alcance del oleaje según C.E.M. (rojo)

En la zona E, la cota de inundación es de 3,16m. Se trata de una zona con algunas edificaciones protegidas frente al oleaje y la regresión de la línea de costa por diversas escolleras que, debido a la regresión de la línea de costa a su poniente, queda esta urbanización como un cabo respecto al resto de la línea de agua. Los terrenos tras esta escollera, en general, tienen una cota situada entre los 2 y los 2,5 metros. El alcance de las olas (Δx) en esta zona se ubica a 48 metros de la línea de agua situándose en el interior de esta urbanización, por tanto, estaríamos en la hipótesis '1' anteriormente expuesta, siendo el parámetro del alcance de las olas la extensión numérica de la inundación.



Representación de la cota de inundación según Nielsen-Hanslow (azul) y el alcance del oleaje según C.E.M. (rojo)

En la zona F, la cota de inundación es de 3,16m. el terreno en esta zona tiene las características propias de una ancha playa. En la parte interior de esta existe una zona plana de arena compactada que se utiliza como aparcamiento de vehículos con una cota situada entre los 2 y los 2,5 metros.

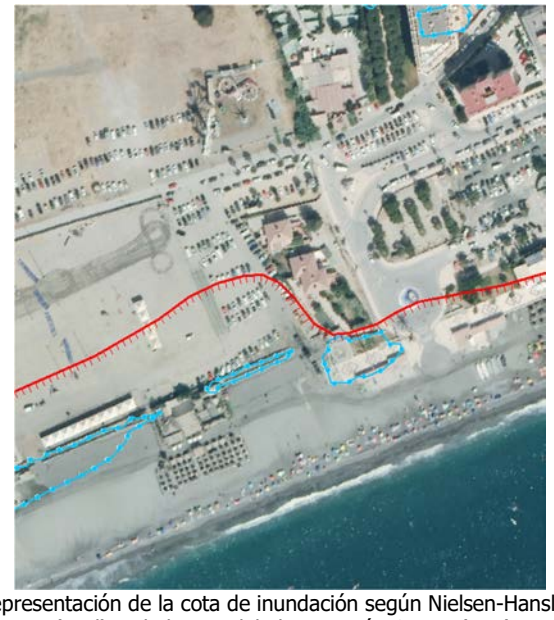
El alcance de las olas (Δx) en esta zona se ubica a 44 metros de la línea de agua situándose en la explanada que se usa como aparcamiento antes comentado. Entre esta explanada y la playa existe una zona de cota próxima a los 3 metros pero que no tiene continuidad en todo el ancho de la zona por lo que la hipótesis de trabajo sería la '2b' anteriormente expuesta ya que el oleaje, aunque la cota de inundación es próxima a la altura de esta zona, el agua rodea la parte más alta de la playa e incluso, el oleaje erosiona este punto superando y penetrando hacia el interior el agua del mar. Por todo ello el parámetro del alcance de las olas (Δx) indica la extensión teórica de la inundación.



Representación de la cota de inundación según Nielsen-Hanslow (azul) y el alcance del oleaje según C.E.M. (rojo)

En la zona G, la cota de inundación es de 3,16m. Los terrenos tienen la misma configuración que la anterior zona F, con un frente de playa ancho con cota máxima próxima a los 3 metros y, a levante, el inicio de la zona urbanizada del paseo marítimo de Torre del Mar. En la parte interior de ésta existe una zona plana de arena compactada a poniente y el inicio del paseo marítimo con viales asfaltados, jardines etc. con una cota situada alrededor de los 2,5 metros.

El alcance de las olas (Δx) en esta zona se ubica a 49 metros de la línea de agua situándose en la explanada que se usa como aparcamiento y el paseo marítimo antes comentado. Entre esta explanada y la playa existen puntos de cota próxima a los 3 metros pero que no tienen continuidad lineal en todo el ancho de la zona por lo que la hipótesis de trabajo sería la '2b' anteriormente expuesta ya que el oleaje, aunque la cota de inundación es próxima a la altura de esta zona, el agua rodea la parte más alta de la playa e incluso, el oleaje erosiona este punto superando y penetrando hacia el interior el agua del mar bajando por tener una cota inferior tanto por la energía que aún conserva el oleaje del temporal como por gravedad. Por todo ello el parámetro del alcance de las olas (Δx) indica la extensión teórica de la inundación.

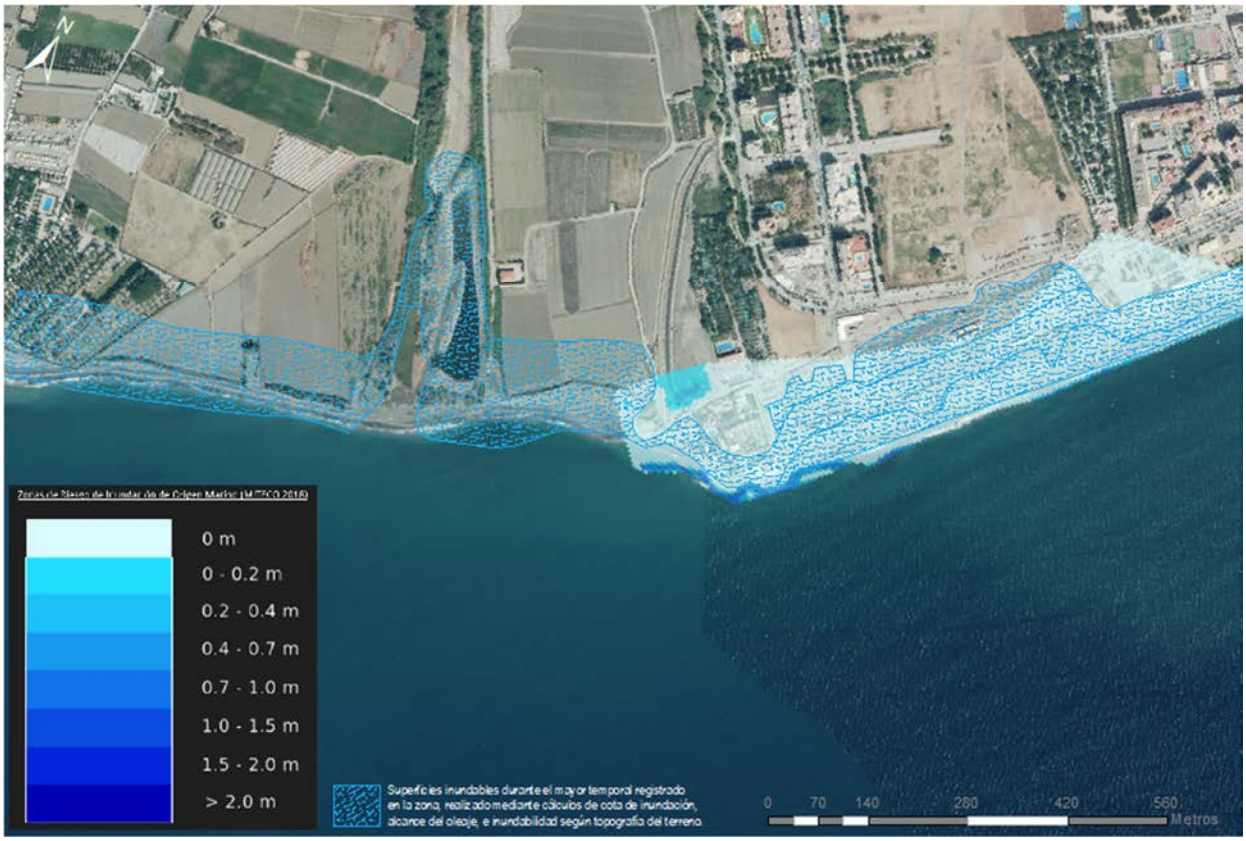


Representación de la cota de inundación según Nielsen-Hanslow (azul) y el alcance del oleaje según C.E.M. (rojo)

Una vez analizados pormenorizadamente todos los sectores del tramo en estudio se representan en el siguiente mapa las superficies probablemente inundables según los cálculos de cota de inundación, alcance de la inundación y el análisis de dichos resultados cruzados con la topografía del terreno durante los mayores temporales registrados en la zona:



Estos son aproximadamente coincidentes con los resultados del mapa riesgo para la población de inundación de origen marino realizado por el entonces denominado Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (mapa actualizado en 2018) en los terrenos que son comunes a este estudio:



6.7 Cambio climático: consecuencias económicas, sociales y protección de la costa.

En este apartado del presente trabajo sobre la regresión de la costa en la desembocadura del río Vélez, se han hecho los estudios de alcance del mar durante los mayores temporales conocidos con los datos de oleaje durante los eventos ya ocurridos y/o con la superficie de los depósitos de arena o extensión de las playas existentes en la actualidad (considerando ésta aquella de la que existen datos topográficos de la línea de costa) pero, ha de hacerse la indicación que estas superficies que se definen actualmente son susceptibles de ser modificadas en un futuro relativamente próximo si se tiene en consideración para dichas superficies posibles modificaciones por los cambios que se puedan producir, principalmente por el alcance del oleaje, la dinámica de las corrientes marinas y la regresión de la costa y, en consecuencia, la determinación de los alcances del oleaje ya que estos se calcula desde la línea de agua hacia el interior por lo que, debido a la variación del nivel del mar y la severidad de los temporales en la zona a consecuencia del calentamiento global y el cambio climático estos cambios en la línea de costa mar y del alcance del oleaje se tendrán que estudiar periódicamente dada la movilidad de los arenales costeros y su vulnerabilidad frente a los eventos de mar y viento y por ello promover, conforme las evidencias de regresión de la costa o del alcance del oleaje durante los mayores temporales debido al cambio climático su estudio continuo conforme vayan produciéndose como así se indica en el artículo 2.a) de la Ley 22/88 de Costas:

> ***Artículo 2***
>
> *La actuación administrativa sobre el dominio público marítimo-terrestre perseguirá los siguientes fines:*
>
> a) ***Determinar el dominio público marítimo-terrestre y asegurar su integridad y adecuada conservación**, adoptando, en su caso, las medidas de protección, y de restauración necesarias y, cuando proceda, de adaptación, **teniendo en cuenta los efectos del cambio climático.***

Cabe destacar llegados a este punto, en relación a la morfología actual de la costa en esta zona, su presión antrópica ya que los terrenos colindantes son susceptibles de ser urbanizados y

transformados por grandes proyectos de infraestructuras marítimo-terrestres que se barajan para la zona y, al mismo tiempo, el deber de protección del medio ambiente natural que emana de la Constitución Española de 1978 (artículo 45), así como aquello que al respecto se hace referencia en la Exposición de Motivos de la Ley de Costas de 1988:

> *"[…] A este olvido de que los áridos son un recurso escaso, con un largo o costoso proceso de renovación, hay que añadir la destrucción de dunas litorales, las extracciones abusivas de áridos y, en muchas ocasiones,* ***la ejecución de obras a lo largo de la costa****.*
>
> *Se ha producido además con demasiada frecuencia la* ***desnaturalización de porciones del dominio público litoral,*** *no sólo porque se ha reconocido la propiedad particular, sino también por la* ***privatización de hecho que ha supuesto el otorgamiento de determinadas concesiones*** *y la carencia de accesos públicos, con el resultado de que ciertas extensiones de la ribera del mar han quedado injustificadamente sustraídas al disfrute de la colectividad".*
>
> *"[…]* ***Las consecuencias del creciente proceso de privatización y depredación, posibilitado por una grave dejación administrativa****, han hecho irreconocible, en numerosas zonas, el paisaje litoral de no hace más de treinta años, con un urbanismo nocivo de altas murallas de edificios al mismo borde de la playa o del mar, vías de transporte de gran intensidad de tráfico demasiado próximas a la orilla, y vertidos al mar sin depuración en la mayoría de los casos.*
>
> *Este doble fenómeno de destrucción y privatización del litoral, que amenaza extenderse a toda su longitud,* ***exige de modo apremiante una solución*** *clara e inequívoca, acorde con la naturaleza de estos bienes, y que,* ***con una perspectiva de futuro, tenga como objetivos la defensa de su equilibrio y su progreso físico, la protección y conservación de sus valores y virtualidades naturales y culturales, el aprovechamiento racional de sus recursos, la garantía de su uso y disfrute abierto a todos****, con excepciones plenamente justificadas por el interés colectivo y* **estrictamente limitadas en el tiempo y en el espacio, y con la adopción de las adecuadas medidas de restauración***".*
>
> *[…] De especial novedad e interés, porque* ***el tiempo actúa en contra de la conservación de los espacios naturales y a favor de la extensión de las áreas urbanas,*** *es el título dedicado a* ***la protección del dominio público marítimo-terrestre****. Este título establece, como es tradicional en la legislación española reguladora de bienes de dominio público, una serie de* ***limitaciones*** *a la propiedad de los terrenos colindantes, que tienen el carácter de regulación mínima y complementaria de la que dicten las Comunidades Autónomas en el ámbito de sus competencias, por lo que la presente Ley se contrae a la definición de las condiciones básicas para el ejercicio de ese derecho en los mencionados terrenos y trata de* ***asegurar la efectividad del derecho a disfrutar de un medio ambiente adecuado, así como el deber de conservarlo****, siguiendo pautas ya establecidas en otros países europeos y también en el nuestro en relación a los terrenos colindantes con otros bienes de dominio público. La mayor parte de esas limitaciones venían ya establecidas por la legislación hasta ahora vigente, pero la nueva Ley, en coherencia con sus* ***objetivos de conservación de la integridad del dominio público****, configura la vieja servidumbre de salvamento, obsoleta en cuanto a la finalidad específica que indica su denominación, como una servidumbre de protección del citado dominio, que comporta la* ***prohibición general*** *de determinadas actividades y, sobre todo,* ***construcciones consideradas perjudiciales*** *para la adecuada protección de un medio natural tan sensible, como la experiencia ha puesto de relieve. En efecto, la garantía de la conservación del dominio público marítimo-terrestre no puede obtenerse sólo mediante una acción eficaz sobre la estrecha franja que tiene esa calificación jurídica, sino que resulta también imprescindible la actuación sobre la franja privada colindante,* ***para evitar que la interrupción del transporte eólico de los áridos*** *y el cierre de las perspectivas visuales para la construcción de edificaciones en pantalla, la propia sombra que proyectan los edificios sobre la ribera del mar, el vertido incontrolado* ***y, en general, la incidencia negativa de la presión edificatoria y de los usos y actividades que ella genera sobre el medio natural puedan causar daños irreparables o de muy difícil y costosa reparación****. La anchura de esta zona de servidumbre de protección ha de ser, lógicamente, convencional, si bien debe* fijarse conjugando con carácter general una profundidad de 100 metros, si bien en las zonas ya urbanizadas se mantiene la anchura de 20 metros de la anterior servidumbre de salvamento, como se indicará más adelante al comentar el régimen transitorio. Estas dimensiones están entre las menores que recoge el derecho comparado.

Mencionar en relación a las obligaciones que el artículo 45 de la CE expresa respecto a la conservación del medio ambiente natural, y en relación a la perspectiva de futuro que ha de tenerse en cuenta respecto a las consecuencias del cambio climático (en las que España se encuentra implicada mediante la firma de numerosos Acuerdos Internacionales), que la existencia de infraestructuras artificiales, como los paseos marítimos o terrenos rellenados sobre antiguas zonas ocupadas por el mar, con diques y espigones que puedan modificar las corrientes litorales y el movimiento de los sedimentos, aunque actualmente podrían ser consideradas como barreras defensivas frente a los temporales, se ha de tener en consideración los escenarios que los modelos matemáticos, realizados para diferentes escalas territoriales y de tiempo, indican sobre el aumento del nivel del mar y de la severidad de los temporales por las consecuencias del cambio climático, por lo que es muy previsible que los terrenos sean, alcanzados por el oleaje o retranqueadas por la tendencia regresiva de la costa, ocasionando daños en las infraestructuras ubicadas al interior de la actual ribera del mar. Todo ello implicará unas mayores pérdidas

económicas, así como un incremento en las posibles indemnizaciones y/o ayudas de las administraciones al ámbito privado afectado. Adicionalmente, se tendrá que tener en consideración las posteriores "reclamaciones" por parte de la ciudadanía y de los agentes económicos afectados de una mayor inversión económica por parte de ellas para la recuperación de las zonas dañadas, como puede ser la regeneración artificial de las playas, creación de infraestructuras para mantener la arena en aquellos lugares donde de manera natural no existirían determinadas playas, espigones y diques, creación de escolleras, o la reparación de las infraestructuras existentes, para mantener el sistema económico de la costa mediterránea claramente insostenible, medioambientalmente hablando, y escasamente resiliente ante las consecuencias del cambio climático como ya se está viendo con los temporales de los últimos años y los daños que producen, así como la clara tendencia regresiva de la costa en esta zona.

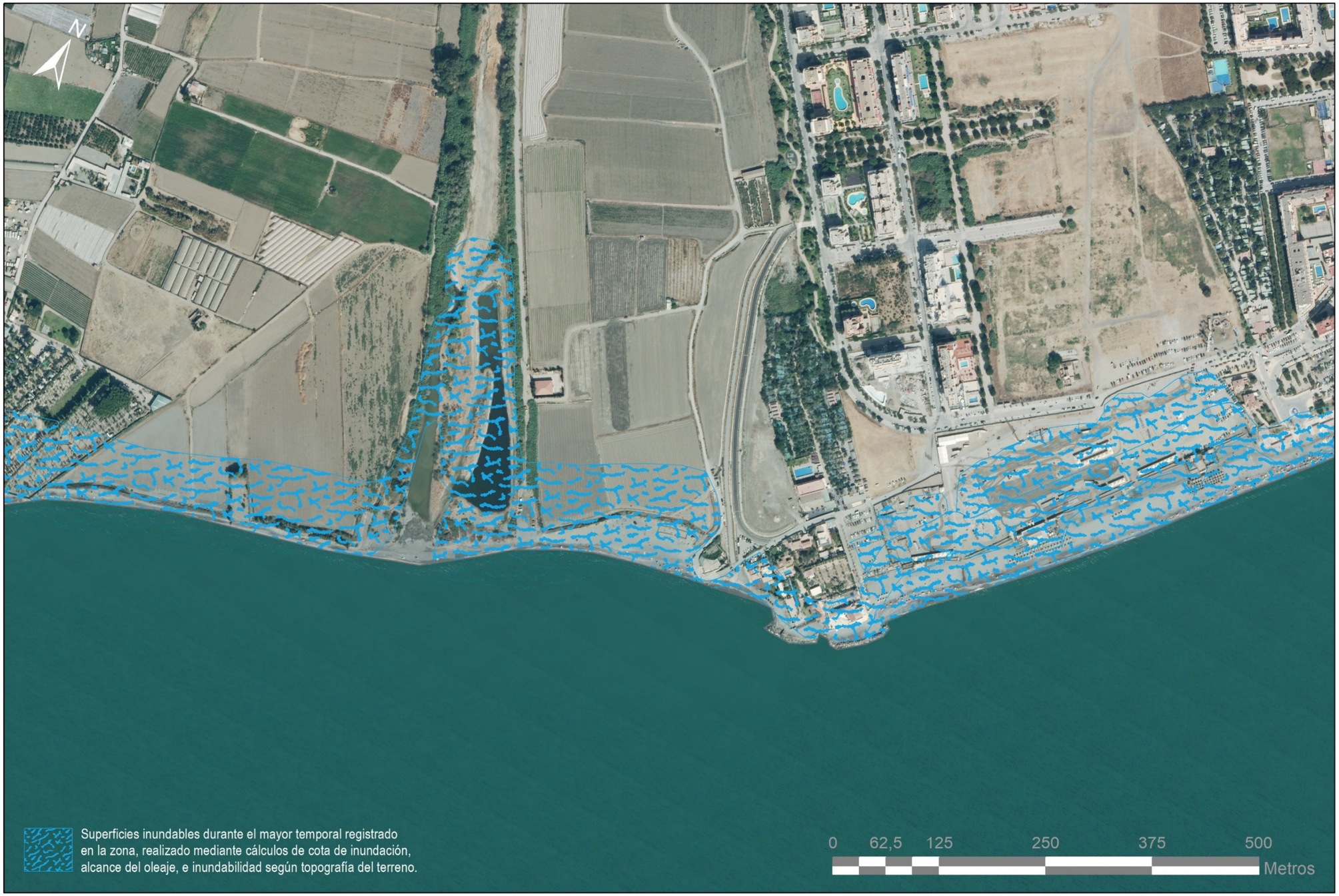
Ante el escenario de cambios en el litoral español que se presenta en los próximos años, el mantenimiento íntegro del dominio público marítimo-terrestre y unas servidumbres lo más amplias posibles ha de considerarse como un instrumento imprescindible para la defensa de la costa desde el punto de vista ambiental ante la presión que las diversas actividades humanas que afectan a las zonas litorales cuyos intereses económicos se contraponen a la conservación del medio ambiente.

Así mismo, las consecuencias del cambio climático en el ya visible incremento de la severidad de los temporales marinos, regresión de las costas y los consecuentes daños económicos que se producen en las infraestructuras litorales hace ineludible evitar la construcción de nuevas instalaciones en el litoral y comenzar a desplazar tanto las infraestructuras públicas como las privadas tierra adentro creando zonas de amortiguación para evitar unas mayores pérdidas económicas y una destrucción de la zona litoral liberándose de infraestructuras zonas de costa que servirán de áreas de amortiguamiento donde el desarrollo urbanístico se prohíba o se restrinja significativamente en pro de la seguridad de las personas y de la conservación de la zona litoral como así se aconseja desde la Universidad Chrstian-Albrechts de Kiel (Alemania) donde investigadores de esta Universidad han estudiado la eficiencia de diferentes tipos de zonas de amortiguamiento para reducir la exposición urbana futura al aumento del nivel del mar y sus peligros relacionados. El estudio, respaldado por el proyecto CoCliCo y financiado por la UE muestra que la creación de zonas costeras retranqueadas podría ayudar a que el nuevo desarrollo urbanístico sea al menos un 50% menos vulnerable a los riesgos del aumento del nivel del mar en la mayoría de los Estados miembros de la UE para el año 2100. Estas áreas de amortiguamiento deberán tener en cuenta, no solo el aumento del nivel del mar y la severidad de los temporales sino también la velocidad de regresión de la costa, la tendencia al hundimiento de determinadas zonas costeras y la cota del terreno para que las nuevas zonas urbanas puedan estar más protegidas de los riesgos potenciales del aumento del nivel del mar y del incremento en la frecuencia e intensidad de los temporales costeros.

6.8 Planos



GOBIERNO DE ESPAÑA · VICEPRESIDENCIA TERCERA DEL GOBIERNO · MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOGRÁFICO · SECRETARÍA DE ESTADO DE MEDIO AMBIENTE · DIRECCIÓN GENERAL DE LA COSTA Y EL MAR *DEMARCACIÓN DE COSTAS ANDALUCÍA-MEDITERRÁNEO MÁLAGA*	FECHA: febrero 2024 *Escala: 1:4.000*	Alcance del oleaje y cota de inundación en 2024 mediante el máximo temporal conocido	Vélez-Málaga: Desembocadura Río Vélez	Elaborado por: Tragsatec



GOBIERNO DE ESPAÑA · VICEPRESIDENCIA TERCERA DEL GOBIERNO · MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOGRÁFICO · SECRETARÍA DE ESTADO DE MEDIO AMBIENTE · DIRECCIÓN GENERAL DE LA COSTA Y EL MAR

DEMARCACIÓN DE COSTAS ANDALUCÍA-MEDITERRÁNEO MÁLAGA

FECHA: febrero 2024

Escala: 1:4.000

Cálculo de extensión de la inundación durante el máximo temporal conocido

Vélez-Málaga: Desembocadura Río Vélez

Elaborado por: Tragsatec

7 COTA DE INUNDACIÓN EN ESCENARIOS FUTUROS

7.1 Introducción

Para el cálculo de la cota de inundación en los años 2030, 2040 y 2070 se ha de partir de una serie de premisas que condicionarán los resultados, pero que son necesarias para poder estimar tanto la cota de inundación como el alcance del oleaje.

En primer lugar, se ha de considerar dónde se situará la línea de agua debido a que la zona en estudio sufre la regresión de la costa, por lo que es necesario determinar su ubicación en 10, 20 y 50 años contados desde el año 2020 por ser el año con datos topográficos más recientes. Esto se ha desarrollado en el punto 5.1 "Estudio de la evolución de la costa de la desembocadura del río Vélez mediante ortofotografía histórica", mediante dos sistemas – ortofotografía histórica y modelo DSAS (Digital Shoreline Analysis System-DSAS (Thier et al., 2010)) para aplicación GIS – dando como resultado una estimación que, en ambos casos, tienen comportamientos similares a 10 y 20 años, por lo que se puede proyectar a 50 años con fiabilidad suficiente.

La línea de agua resultante en los años 2030, 2040 y 2070 son una proyección de los datos actuales, de forma que su posición debe entenderse como consecuencia de las variables actuales e históricas, es decir, suponiendo que las condiciones actuales no se vean modificadas como tampoco las características morfológicas del terreno, siendo estas variaciones no cíclicas, negativas y por tanto regresivas según los cálculos realizados.

En segundo lugar, una vez determinadas las líneas de agua proyectadas a futuro según las tendencias actuales, se ha añadido el valor del aumento del nivel del mar debido al cambio climático previsto por el IPCC extraídos de la herramienta de proyección del nivel del mar (sea level projection tool) del Programa de Sistemas de Datos de la Tierra (ESDS) de la N.A.S.A.

Se ha usado el escenario SSP2-4.5 por ser el más aceptado actualmente, aunque, debido a la lentitud en la toma de medidas de muchos países para la reducción de la emisión de gases, no se descarta que en un futuro próximo se tienda al escenario SSP3-7.0. Estos escenarios se explican a continuación:

- **SSP2-4.5** está aproximadamente en línea con el límite superior de los niveles agregados de emisiones de la Contribución Determinada a Nivel Nacional para 2030. En la SR1,5 se evaluó que las proyecciones de temperatura para las NDC estarían entre 2,7 y 3,4 °C para 2100, lo que corresponde a la mitad superior del calentamiento proyectado bajo SSP2-4,5. Las NDC nuevas o actualizadas para finales de 2020 no cambiaron significativamente las proyecciones de emisiones hasta 2030, aunque más países adoptaron objetivos de cero emisiones netas para 2050 en línea con SSP1-1.9 o SSP1-2.6. El escenario SSP2-4.5 se desvía ligeramente de un escenario de referencia de "política climática no adicional", lo que resulta en un calentamiento estimado de alrededor de 2,7 °C para fines del siglo XXI en relación con 1850-1900.
- **SSP3-7.0** es un escenario de referencia medio-alto que resulta de la ausencia de una política climática adicional bajo la narrativa de desarrollo socioeconómico de SSP3. SSP3-7.0 tiene emisiones no relacionadas con el CO2 particularmente altas, incluidas altas emisiones de aerosoles.

En tercer lugar, una vez que se obtiene la proyección combinada de las líneas de agua debido a la regresión de la costa y del aumento del nivel medio del mar en la zona de Málaga debido al cambio climático, para el cálculo del alcance del oleaje y la cota de inundación marina se mantiene como premisa que el terreno emergido mantendrá las mismas características morfológicas que tiene en la actualidad.

En cuarto lugar, se considera que ha de usarse el mayor temporal registrado hasta la fecha de redacción de este documento por tratarse de un estudio sobre la situación física de los terrenos ante los efectos del mar sobre el suelo tanto por su regresión como por el aumento del nivel del mar por el cambio climático, por lo que hay que tener en cuenta el peor de los casos (temporal más severo registrado) dado que, aunque se prevé que los temporales aumenten en intensidad

(aumento de la altura de ola significante y periodo de pico) es difícil estimar en qué cuantía lo harán a corto y medio plazo. Es por esto que se usará el peor de los temporales registrados en la zona aun sabiendo que se estará subestimando los resultados de alcance, pero ha de servir de indicio para la posible adopción de medidas en defensa o adaptación de la costa frente a los efectos del cambio climático y de la continua regresión de la línea de costa en un futuro próximo.

En relación al aumento del nivel del mar mencionado anteriormente, las proyecciones se basan en la evaluación presentada por el Sexto Informe de Evaluación del IPCC. En el recuadro RT.4 y en la sección 9.6 de la contribución del Grupo de Trabajo 1 al Sexto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático figuran detalles sobre las proyecciones del nivel del mar.

Se proporcionan proyecciones del nivel del mar que consideran solo los procesos para los cuales se pueden hacer proyecciones con al menos un nivel de confianza medio, en relación con el período 1995-2014, para cinco escenarios de Trayectoria Socioeconómica Compartida (SSP). Las hipótesis se describen en las secciones RT1.3 y 1.6 y en el recuadro 1.4 de la contribución del Grupo de Trabajo 1.

Como se describe en el recuadro 1.4 de los capítulos:

- **SSP1-1.9** mantiene el calentamiento en aproximadamente 1,5 °C por encima de 1850-1900 en 2100 después de un ligero rebasamiento (mediana) e implica cero emisiones netas de CO2 a mediados de siglo.
- **SSP1-2.6** se mantiene por debajo de 2.0 °C de calentamiento en relación con 1850-1900 (mediana) con emisiones netas cero implícitas en la segunda mitad del siglo.
- **SSP2-4.5** está aproximadamente en línea con el límite superior de los niveles agregados de emisiones de la Contribución Determinada a Nivel Nacional para 2030. En la SR1,5 se evaluó que las proyecciones de temperatura para las NDC estarían entre 2,7 y 3,4 °C para 2100, lo que corresponde a la mitad superior del calentamiento proyectado bajo SSP2-4,5. Las NDC nuevas o actualizadas para finales de 2020 no cambiaron significativamente las proyecciones de emisiones hasta 2030, aunque más países adoptaron objetivos de cero emisiones netas para 2050 en línea con SSP1-1.9 o SSP1-2.6. El escenario SSP2-4.5 se desvía ligeramente de un escenario de referencia de "política climática no adicional", lo que resulta en un calentamiento estimado de alrededor de 2,7 °C para fines del siglo XXI en relación con 1850-1900.
- **SSP3-7.0** es un escenario de referencia medio-alto que resulta de la ausencia de una política climática adicional bajo la narrativa de desarrollo socioeconómico de SSP3. SSP3-7.0 tiene emisiones no relacionadas con el CO2 particularmente altas, incluidas altas emisiones de aerosoles.
- **SSP5-8.5** es un escenario de alta referencia sin política climática adicional. Los niveles de emisión tan altos como SSP5-8.5 no se obtienen mediante Modelos de Evaluación Integrada (IAM) en ninguno de los SSP que no sean la vía de desarrollo socioeconómico SSP5 alimentada con combustibles fósiles.

Según se dice en la herramienta de proyección del nivel del mar de la NASA (US), en comparación con 1850-1900, es muy probable que la temperatura media mundial del aire en la superficie durante el período 2081-2100 (al menos un 90% de probabilidad) sea superior en 1,0 °C a 1,8 °C en SSP1-1,9, 1,3 °C a 2,4 °C en SSP1-2,6, 2,1 °C a 3,5 °C en SSP2-4,5, 2,8 °C a 4,6 °C en SSP3-7.0 y 3,3 °C a 5,7 °C en SSP5-8,5.

En las proyecciones del nivel del mar, los rangos probables se evalúan sobre la base de la combinación de la incertidumbre en el cambio de temperatura asociado con un escenario de emisiones y la incertidumbre en las relaciones entre la temperatura y los impulsores del cambio proyectado del nivel del mar, como la expansión térmica, la dinámica oceánica y la pérdida de masa de glaciares y capas de hielo. En general, los resultados de los percentiles 17-83 se interpretan como rangos probables, lo que refleja el uso del término probable para referirse a una probabilidad de al menos el 66%.

Para indicar el impacto potencial de los procesos de la capa de hielo profundamente inciertos, sobre los cuales actualmente existe un bajo nivel de acuerdo y evidencia limitada, también se proporcionan proyecciones de baja confianza para SSP1-2.6 y SSP5-8.5. Tanto para las capas de hielo de Groenlandia como para las de la Antártida, las proyecciones de baja confianza integran información del estudio Structured Expert Judgement de Bamber et al. (2019). Para la capa de hielo de la Antártida, las proyecciones de baja confianza también incorporan los resultados de un estudio de simulación que incorpora la inestabilidad de los acantilados de hielo marino (DeConto

et al., 2021). Los resultados mostrados son proyecciones de percentiles 17-83, pero no se evalúan como rangos probables debido a la baja concordancia y la evidencia limitada. Véanse las secciones 9.6 y 9.4 para más detalles.

Así, para la costa de Málaga se obtienen los siguientes resultados de aumento del nivel medio del mar:

Valores en metros

	SSP1-1.9	SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP5-8.5	SSP1-2.6 Confianza baja	SSP5-8.5 Confianza baja
Expansión térmica	0.04 (0.03–0.05)	0.04 (0.03–0.05)	0.04 (0.03–0.05)	0.04 (0.03–0.05)	0.04 (0.04–0.05)	0.04 (0.03–0.05)	0.04 (0.04–0.05)
Glaciares	0.02 (0.02–0.03)	0.02 (0.02–0.03)	0.02 (0.02–0.03)	0.03 (0.02–0.03)	0.03 (0.02–0.03)	0.03 (0.02–0.04)	0.03 (0.02–0.04)
Groenlandia	0.01 (0.01–0.01)	0.01 (0.01–0.01)	0.01 (0.01–0.01)	0.01 (0.01–0.01)	0.01 (0.01–0.02)	0.02 (0.01–0.04)	0.02 (0.01–0.05)
Antártida	0.01 (0.01–0.03)	0.01 (0.01–0.03)	0.01 (0.01–0.03)	0.01 (0.01–0.03)	0.01 (0.01–0.03)	0.01 (-0.00–0.03)	0.01 (-0.01–0.04)
Almacenamiento de agua terrestre	0.00 (0.00–0.01)	0.00 (0.00–0.01)	0.00 (0.00–0.01)	0.00 (0.00–0.01)	0.00 (0.00–0.01)	0.00 (0.00–0.01)	0.00 (0.00–0.01)
Total (2030)	0.09 (0.08–0.12)	0.09 (0.08–0.12)	0.09 (0.08–0.12)	0.09 (0.08–0.12)	0.10 (0.09–0.12)	0.10 (0.08–0.14)	0.10 (0.09–0.15)

AÑO

2030

OBTENER DATOS

Valores en metros

	SSP1-1.9	SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP5-8.5	SSP1-2.6 Confianza baja	SSP5-8.5 Confianza baja
Expansión térmica	0.06 (0.04–0.07)	0.06 (0.05–0.07)	0.06 (0.05–0.07)	0.06 (0.05–0.07)	0.07 (0.05–0.08)	0.06 (0.05–0.07)	0.07 (0.05–0.08)
Glaciares	0.03 (0.02–0.04)	0.03 (0.03–0.04)	0.04 (0.03–0.04)	0.04 (0.03–0.04)	0.04 (0.04–0.05)	0.04 (0.03–0.05)	0.04 (0.03–0.05)
Groenlandia	0.02 (0.01–0.02)	0.02 (0.01–0.02)	0.02 (0.01–0.03)	0.02 (0.01–0.03)	0.02 (0.01–0.03)	0.03 (0.01–0.07)	0.03 (0.01–0.09)
Antártida	0.02 (0.01–0.06)	0.02 (0.01–0.06)	0.02 (0.01–0.06)	0.02 (0.01–0.06)	0.02 (0.01–0.06)	0.02 (-0.01–0.06)	0.02 (-0.01–0.08)
Almacenamiento de agua terrestre	0.01 (0.00–0.01)	0.01 (0.00–0.01)	0.01 (0.00–0.01)	0.01 (0.00–0.01)	0.01 (0.00–0.01)	0.01 (0.00–0.01)	0.01 (0.00–0.01)
Total (2040)	0.13 (0.11–0.17)	0.14 (0.11–0.17)	0.14 (0.12–0.18)	0.14 (0.12–0.18)	0.16 (0.13–0.20)	0.14 (0.11–0.22)	0.16 (0.13–0.26)

AÑO

2040

OBTENER DATOS

Valores en metros

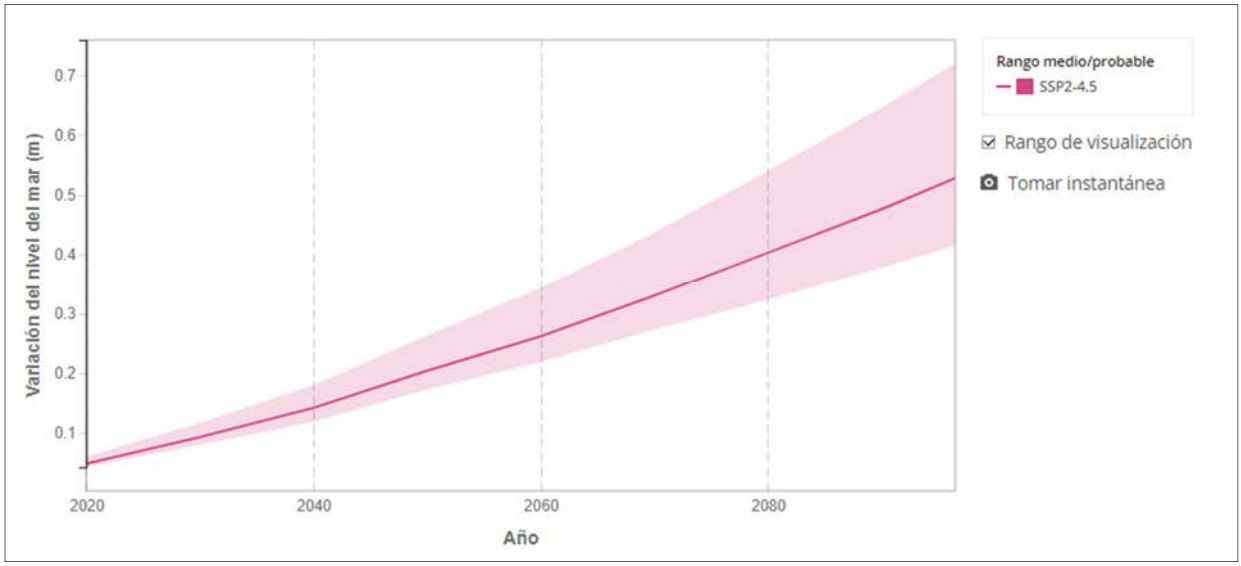
	SSP1-1.9	SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP5-8.5	SSP1-2.6 Confianza baja	SSP5-8.5 Confianza baja
Expansión térmica	0.09 (0.07–0.11)	0.10 (0.09–0.13)	0.13 (0.10–0.15)	0.14 (0.12–0.17)	0.16 (0.13–0.20)	0.10 (0.09–0.13)	0.16 (0.13–0.20)
Glaciares	0.06 (0.04–0.07)	0.06 (0.05–0.08)	0.08 (0.07–0.09)	0.09 (0.08–0.11)	0.11 (0.09–0.12)	0.07 (0.05–0.09)	0.10 (0.07–0.12)
Groenlandia	0.04 (0.02–0.06)	0.04 (0.03–0.06)	0.05 (0.03–0.07)	0.05 (0.04–0.07)	0.06 (0.04–0.08)	0.06 (0.03–0.17)	0.09 (0.04–0.29)
Antártida	0.05 (0.02–0.14)	0.05 (0.02–0.15)	0.05 (0.02–0.15)	0.05 (0.02–0.15)	0.05 (0.02–0.16)	0.05 (-0.00–0.15)	0.06 (0.00–0.26)
Almacenamiento de agua terrestre	0.02 (0.01–0.03)	0.02 (0.01–0.03)	0.02 (0.01–0.03)	0.02 (0.01–0.03)	0.02 (0.01–0.03)	0.02 (0.01–0.03)	0.02 (0.01–0.03)
Total (2070)	0.26 (0.21–0.36)	0.29 (0.23–0.39)	0.33 (0.27–0.44)	0.37 (0.31–0.48)	0.40 (0.34–0.52)	0.30 (0.23–0.49)	0.43 (0.34–0.78)

AÑO

2070

OBTENER DATOS

La representación gráfica del aumento del nivel del mar en el escenario SSP2-4.5 en la costa de Málaga donde existe una confianza media es la siguiente:



Donde la línea roja es el rango medio de la proyección y el sombreado rosa se corresponde con los rangos de percentil 17-83. Las proyecciones son relativas a una línea de base de 1995-2014.

Con estos datos de aumento en cota del nivel del mar por los efectos del cambio climático se calcula el espacio medio inundado por dicho aumento y que se suma a la superficie de terrenos ganados por el mar debido a la regresión costera.

Con estas condiciones de inicio se procede al cálculo de la cota de inundación en los escenarios futuros, así como el alcance del oleaje.

7.2 Estimación de la cota de inundación y el alcance del oleaje en el año 2030.

Para estimar la cota de inundación y el alcance del oleaje en el año 2030 se ha considerado la tendencia regresiva de la costa y el aumento del nivel del mar. A partir de esta línea de agua en el año 2030 se realizan los cálculos de cota y alcance de oleaje con los datos de oleaje histórico existente hasta la fecha ya que estimar el incremento de la severidad de los temporales (medidos con el cálculo del aumento de la altura de ola significante y del periodo de la onda debido al cambio climático) para ser añadidos a los cálculos ya realizados de estimación de regresión de la costa y aumento de la cota del nivel del mar, supera el objetivo del presente trabajo. Por ello se realizan los cálculos con el mayor temporal del que existen registros en la zona en estudio, pero sin añadir parametrización debida al cambio climático a los datos de altura significante y periodo pico del temporal más severo de la zona.

El estudio para la determinación del alcance del nivel máximo que asciende el mar durante el temporal más severo, analizando los diferentes planteamientos teóricos de distintas formulaciones empíricas, contrastados con el Atlas de Inundación en el Litoral Peninsular Español desarrollado por la Universidad de Cantabria, se pueden realizar las siguientes aseveraciones:

- La zona de estudio queda encuadrada en el Área V, subzona b, según el Atlas de Inundacióndel litoral peninsular español efectuado por el Grupo de Ingeniería Oceanográfica de la Universidad de Cantabria.
- Para la obtención del régimen medio de cota de inundación se ha tenido en cuenta los datos registrados por el mareógrafo y boya de Málaga.
- Para la obtención de datos de simulación de oleaje en los últimos años se ha utilizado la información del punto SIMAR 2035080 ya que es el punto más próximo a la zona objeto del estudio de cota máxima del nivel del mar.
- A efectos del cálculo del alcance del oleaje durante el temporal más severo acontecido, se han considerado las variaciones del nivel del mar y del oleaje registrados, para lo que se han tenido en cuenta los valores significantes de altura de ola desde que existen registros. Se han utilizado los datos registrados por Puertos del Estados, que datan del año 1958 hasta la actualidad, siendo, además públicos y disponibles para cualquier persona.
- Se usaron todos los registros para determinar los mayores temporales desde que hay registros (desde 1958) y de ellos se estudiaron en detalle aquellos cuya altura de ola significante fue mayor junto con sus periodos pico y dirección predominante.

Respecto al cálculo de la cota de inundación y el alcance de la inundación hay que tener en cuenta las siguientes precauciones de las que se da cuenta en la información de Puertos del Estado para los datos de partida que han sido usados, su relación con los cálculos y resultados finales, así como con el objetivo de este estudio:

- Los modelos generados por los puntos SIMAR *"tienden a subestimar los picos en las velocidades de viento y en las alturas de ola en situaciones de temporal muy extremo",* es decir, los datos de altura de ola y viento que ofrece durante los mayores temporales suelen ser inferiores a la altura real de las olas o la velocidad real del viento. Esto es importante en el objetivo que nos ocupa puesto que, con los datos subestimados de los temporales, la extensión de la inundación también estará "subestimada".
- Además, para el cálculo de la cota de inundación y del alcance de la inundación se usan la altura de ola significante (Hs) y el periodo pico (Tp) principalmente. Así Puertos del Estado explica que la altura de ola significante (Hs) *"equivale aproximadamente la altura media del tercio de olas más altas"* y el periodo pico (Tp) *"el periodo del grupo de ondas con más energía".* Por lo que el uso de Hs (ya subestimado porque los valores extremos de los

puntos SIMAR los subestiman), al ser una media, también subestima aún más los resultados de cota y alcance de la inundación y con el Tp ocurre lo mismo al tratarse de una media de un grupo de ondas (no de la máxima) por lo que el límite de la inundación por los mayores temporales conocidos está "doblemente" subestimado (además de la subestimación de los datos extremos que tiene el uso de los puntos SIMAR).

Dado que los datos de partida de los temporales de Puertos del Estado son los mismos que los extraídos anteriormente en el punto "6 Estudio de cálculo de máxima elevación del mar", se remite a ese ítem para su conocimiento. A continuación, se procede directamente al cálculo de la cota de inundación de cada uno de los transectos (los mismos que en el punto 6).

7.2.1 Cálculo de la cota de inundación en el año 2030 asociada a cada evento de temporal estimado hasta la actualidad.

En el apartado 6 se seleccionó, de los eventos de temporal marítimo, el que puede ocasionar cotas de inundación máximas. Además, se ha calculado, para cada evento de temporal, el nivel del mar en ese momento como suma de la marea astronómica y meteorológica asociada, siendo todos estos datos directamente consultables en la web www.puertos.es.

Falta el sumando del run-up para determinar exactamente la cota de inundación en el año 2030, que denominaremos S_{CI}, siguiendo siempre la nomenclatura propuesta en el Atlas de Inundación del Litoral Español redactado en su momento por el Grupo de Ingeniería Oceanográfica de la Universidad de Cantabria.

Para calcular el valor del run-up, existen varios modelos o formulaciones que determinan éste en función de varios parámetros o características del oleaje incidente. De las formulaciones más modernas, está muy extendida y aceptada la de Nielsen-Hanslow (1991), que estima el valor del run-up con una banda de confianza del 2% ($R_{2\%}$), en función de la altura de ola significante y la longitud de onda asociada a dicho oleaje, por lo que es necesario conocer el periodo de pico asociado, todo a pie de playa. Por tanto, es totalmente aplicable este modelo, considerando las alturas de olas significantes ya tomadas y su periodo de pico asociado para cada uno de los eventos de temporal.

Formulación de Nielsen-Hanslow (1991):

$$R_{uo}=0{,}47\cdot(Hs\cdot L)^{1/2}\cdot tg\beta \qquad \text{si } tg\beta>1/10$$

$$R_{uo}=0{,}04\cdot(Hs\cdot L)^{1/2} \qquad \text{si } tg\beta<1/10$$

Y para la banda de confianza del 2%:

$$Ru_{2\%} = 1{,}98\cdot R_{uo}$$

Teniendo en cuenta que en las playas de estudio la pendiente del fondo es inferior a 1/10, la formulación resultante es:

$$R_{2\%} = 1{,}98\cdot 0{,}04\cdot(H_s\cdot L)^{1/2}$$

Donde:

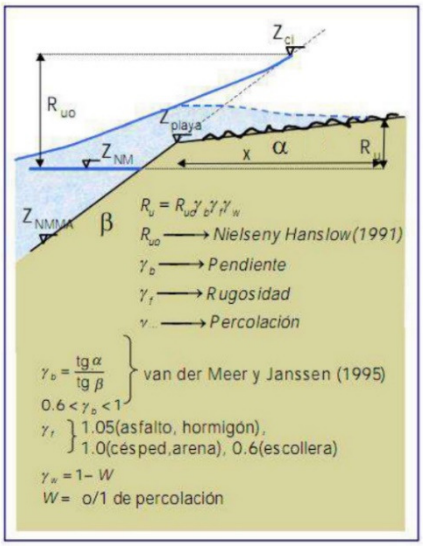
L = Longitud de onda local = $1{,}56\cdot T_p^2$

H_s = Altura de ola significante de cada evento de temporal.

T_p = Periodo de pico asociado a cada evento de temporal.

A esta formulación, se le aplican además los factores de corrección de Van Der Meer y Jansen: pendientes, rugosidad y percolación, para tener en cuenta una aproximación más adecuada a la configuración del perfil de playa formada por doble pendiente (húmeda y seca), la rugosidad del terreno, en este caso, de la arena de la playa y la percolación en la superficie de incidencia dada la anchura de la playa de arena, ya que es lo suficientemente significativa como para tener un

cierto efecto en la inundación del mar sobre los terrenos emergidos formados por dicha arena. Esto se resume en el siguiente esquema:



El factor de pendiente de Van der Meer y Janssen relaciona la pendiente de la playa seca con la pendiente de la playa sumergida:

$$\gamma_b = \frac{\tan\alpha}{\tan\beta}$$

El valor de este coeficiente estará comprendido entre 0.6 y 1. En el caso de obtenerse un valor inferior a 0.6 tras la aplicación de la relación de pendientes, se tomará el valor inferior del intervalo dado, es decir, 0.6. Del mismo modo se actuará en el caso de obtener un valor superior a 1, se tomará este valor máximo.

Debido a la diferente configuración del litoral en el tramo de costa que nos ocupa, se han de tomar en consideración diferentes zonas en las que calcular las pendientes de la playa para definir el factor de pendiente en cada zona homogénea.

El factor de rugosidad de la superficie de incidencia γ_f, tomará el valor de 1, al estar la playa formada por arenas limpias.

El factor de percolación γ_w se calcula con el coeficiente de percolación W; este coeficiente W está directamente relacionado con el diámetro efectivo de la arena y el coeficiente de Hazen. Existen suficientes estudios en los que se ha calculado el coeficiente de percolación de los terrenos.

Rango de valores del coeficiente de permeabilidad en suelos

Tipo de suelo	k (cm/s)
Grava mal graduada (GP)	≥ 1
Grava uniforme (GP)	0,2-1
Grava bien graduada (GW)	0,05-0,3
Arena uniforme (SP)	5×10^{-3}-0,2
Arena bien graduada (SW)	10^{-3}-0,1
Arena limosa (SM)	10^{-3}-5×10^{-3}
Arena arcillosa (SC)	10^{-4}-10^{-3}
Limo de baja plasticidad (ML)	5×10^{-5}-10^{-4}
Arcillas de baja plasticidad (CL)	10^{-5}-10^{-8}

(*L. González de Vallejo et al*, Ingeniería Geológica, Madrid 2002)

En el caso de arena de playa, que se encuentra lavada por el agua del mar y removida por el viento marino, se considera genéricamente que es del tipo 'arena bien graduada (SW)' de la tabla anterior.

Aplicando la formulación de Nielsen-Hanslow, podemos obtener el valor del run-up para cada evento de temporal (antes de aplicar los coeficientes de Van Der Meer y Janssen), que a su vez debe ser sumando a la componente del nivel del mar (S_{NM}) ya calculado para estimar definitivamente el valor de la cota de inundación de cada uno de los eventos de temporal para cada zona con pendiente homogénea; calculado mediante la obtención de los resultados necesarios de clima marítimo en primer lugar y la aplicación de un modelo o formulación de cálculo adecuado posteriormente.

Para el cálculo del run-up es necesario calcular la longitud de onda local asociada al oleaje:

$$L=1.56 \cdot T_p^2$$

Donde T_p es el periodo pico asociado a cada evento de temporal.

En la tabla siguiente se añade la columna 'L' con el resultado de la longitud de onda para cada evento de temporal:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10
1:00	27	3	2019	5,24	11,01	110	84,7	0,847	0,416	189,10
12:00	19	11	2021	5,29	10,01	110	105,6	1,056	0,625	156,31
3:00	11	10	2008	5,12	9,47	105	112	1,120	0,689	139,90
21:00	20	4	2017	4,93	10,51	110	92,7	0,927	0,496	172,32
19:00	20	4	2017	4,93	10,42	111	92,7	0,927	0,496	169,38
12:00	8	4	2015	4,9	10,31	110	87,3	0,873	0,442	165,82

Tabla de máximos temporales desde que existen registros en el punto SIMAR 2035080.

Cálculo del run-up corregido mediante los factores de Van der Meer.

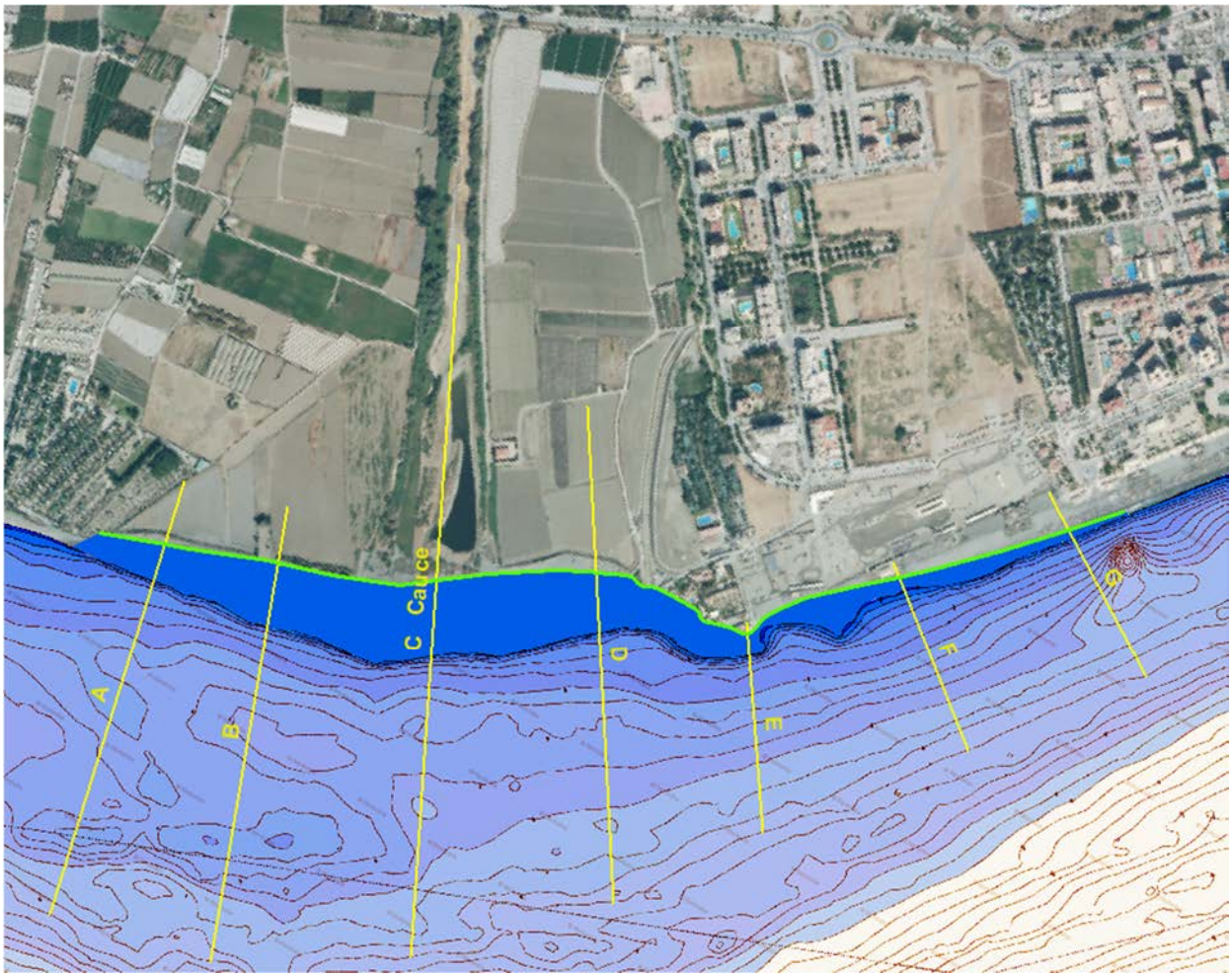
Para la realización de los cálculos de alcance de inundación el tramo se ha dividido en 7 zonas en función de la homogeneidad de la costa sumergida, la emergida, del tipo geomorfológico, la morfología de las zonas antropizadas y, además, crear una densidad de medidas para que estas sean suficientes para caracterizar el alcance del oleaje y la cota de inundación con alta precisión en todo el tramo en estudio. A cada una de las zonas se le ha realizado un cálculo de alcance. Esto se ha hecho así ya que el factor de pendiente de Van der Meer y Janssen puede modificar el run-up (si su valor es menor que 1) por lo que ha de calcularse el run-up corregido para cada una de estas zonas.

Las zonas de medición vienen dadas por las pendientes de los terrenos sumergido y emergido. Las pendientes se han calculado mediante batimetría extraídos del visor de la empresa italiana Navionics (perteneciente a Garmin Ltd.), concretamente de la capa SonarChart™, cuyas curvas batimétricas tienen un intervalo de 50 cm creadas mediante "sistema propietario" de Navionics que procesa los datos de registros de sónar procedentes de aportaciones realizadas por navegantes adheridos a Navionics que actualiza periódicamente sus cartas náuticas. Por ello se puede considerar que la batimetría representada es la más reciente de la zona. (*Los datos e imágenes de batimetría han sido cedidos por Navionics exclusivamente para este estudio no siendo posible su uso para cualquier otro fin incluida la navegación*).

La topografía se ha realizado a partir de un modelo digital del terreno elaborado a partir de las nubes de puntos 3D obtenidos con sistema LiDAR; para ello se ha utilizado la nube de puntos publicada por el Instituto Geográfico Nacional correspondiente a la "2ª Cobertura (2015-Actualidad)", en nuestro caso los datos se obtuvieron en el año 2020, siendo éstos los datos más recientes publicados en la fecha de redacción de este estudio. Con estos datos se realiza un modelo digital de elevaciones con el que se calcula mediante software las curvas de nivel.

Como se ha dicho en la introducción, la morfología de la zona emergida y la sumergida se hipotetiza que se mantiene invariable excepto en el tramo entre la nueva línea de agua y la anterior pero, dado que para los cálculos se utilizan pendientes medias (desde la cota 0 hasta otra determinada sin tener en cuenta las características intermedias) no es relevante su morfología.

La ubicación de las zonas para el cálculo de las pendientes sumergida y emergida se representa en la siguiente imagen que incluye la batimetría:



Transectos (en amarillo) y línea de agua estimada en 2030 (en verde).

Los datos de partida (ver tabla de la página 156) son los mismos para todas las zonas, y serán los que se usen para el cálculo del run-up en cada zona definida por los perfiles reseñados y que se desarrolla a continuación.

Zona A.

En primer lugar, calculamos las pendientes de la playa húmeda y de la seca. La pendiente de la playa húmeda nos indicará qué formula de Nielsen-Hanslow ha de usarse, dependiendo si esta pendiente es mayor o menor del 10%.

pendiente playa húmeda

profundidad (m)	7,00
distancia (m)	584
pendiente %	1,199

La pendiente de la playa húmeda es menor del 10% por lo que se usará para el cálculo del run-up la fórmula del Nielsen-Hanslow para pendientes menores de ese valor:

$$R_{uo}=0,04\cdot(Hs\cdot L)^{1/2}$$

La pendiente de la playa seca es:

pendiente playa seca	
altura máx. playa (m)	2,00
distancia (m)	98
pendiente %	2,041

Después se calcula el run-up para cada evento de temporal.

Dado que se busca la cota de inundación y el alcance de los mayores temporales conocidos desde que existen registros, se toman para el cálculo del run-up (R_{uo}) los 4 eventos cuya altura de ola significante y/o periodo pico es mayor:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)		R_{uo}
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78		1,31
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22		1,19
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10		1,23
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10		1,19

Los factores de corrección de Van der Meer y Janssen para esta zona son:

- Factor por pendiente:

$$\gamma_b=\frac{\tan\alpha}{\tan\beta}=1,7$$

al dar como resultado un valor superior a 1, y este coeficiente ha de estar en el intervalo entre un mínimo de 0,6 y un máximo de 1, se toma como coeficiente por pendiente:

$$\gamma_b=1$$

- Factor de rugosidad:

El factor de rugosidad de la superficie de incidencia γ_f, tomará el valor de 1, al estar la playa formada por arenas limpias.

- Factor de percolación:

Como ya se ha dicho más arriba, este factor está relacionado con las características del terreno, y concretamente, en el caso de la arena, con el diámetro de sus granos y su disposición en el suelo. Así existen tablas en las que se define de manera genérica este factor en función de las características de la arena:

Rango de valores del coeficiente de permeabilidad en suelos

Tipo de suelo	k (cm/s)
Grava mal graduada (GP)	$\geqslant 1$
Grava uniforme (GP)	0,2-1
Grava bien graduada (GW)	0,05-0,3
Arena uniforme (SP)	5×10^{-3}-0,2
Arena bien graduada (SW)	10^{-3}-0,1
Arena limosa (SM)	10^{-3}-5×10^{-3}
Arena arcillosa (SC)	10^{-4}-10^{-3}
Limo de baja plasticidad (ML)	5×10^{-5}-10^{-4}
Arcillas de baja plasticidad (CL)	10^{-5}-10^{-8}

En nuestro caso se utilizará como coeficiente de percolación aquel que viene dado por la arena de la playa. Como ésta no viene explícitamente desarrollada en dicha tabla, se considera que se trata de una arena bien graduada, limpia, dado el efecto de lavado que tiene el agua del mar sobre ésta y cuyos valores típicos están comprendidos entre 0,001 y 0,1.

Dado que el intervalo de los valores de k descritos en la tabla es amplio, tomamos el valor 0,01 de dicho intervalo por ser el valor medio del mismo y considerando que la proporción media de arcillas en el terreno se encuentra mayoritariamente entre el 10% y el 20%, por lo que su presencia reduce la permeabilidad del suelo. Aplicando la siguiente formulación se obtiene el coeficiente de percolación (W) medio y, por tanto, un factor medio de percolación (γ_w) en la zona:

$$W=k \Rightarrow 0{,}01 \text{ cm/s}$$

$$\gamma_w=1\text{-}W \Rightarrow \gamma_w = 1 - 0{,}01 = 0{,}99$$

Un mayor valor del factor reductor de percolación implica una mayor reducción del valor de run-up corregido por estar directamente relacionados:

$$R_u = R_{uo} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_w$$

En esta zona, aplicando los factores de Van der Meer y Janssen:

$$R_u = R_{uo} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_w = R_{uo} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0{,}99$$

Con estos datos, para los eventos de temporal considerados se obtiene el run-up corregido (R_u) y con éste el run-up cuyo valor es superado en un porcentaje de tiempo inferior al 2% del evento:

$$R_{u2\%} = 1{,}98 \cdot R_u$$

Aplicando esta formulación se obtiene para cada evento de temporal en esta zona:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)		R_{uo}	R_U	$Ru_{2\%}$ (m)
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78		1,31	1,30	2,57
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22		1,19	1,18	2,34
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10		1,23	1,22	2,42
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10		1,19	1,18	2,34

A este run-up ($R_{u2\%}$) le sumamos el valor de la componente de nivel del mar ya calculado (S_{NM}), para estimar definitivamente el valor de la cota de inundación para cada uno de los máximos eventos registrados:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)		R_{uo}	R_U	$Ru_{2\%}$ (m)	S_{CI} (m)
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78		1,31	1,30	2,57	3,16
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22		1,19	1,18	2,34	3,08
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10		1,23	1,22	2,42	2,96
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10		1,19	1,18	2,34	2,93

Vistos los resultados tras la aplicación de las fórmulas y factores correctores desarrollados anteriormente se puede decir que el mayor temporal conocido que ha afectado a esta zona del tramo de la costa en estudio del término municipal de Vélez-Málaga es el acontecido el 4 de abril de 2022 que alcanzó su mayor intensidad a las 15:00 horas con una cota de inundación de unos 3,16 m.n.m.a.

Por lo tanto, este temporal de abril de 2022 será el que se desarrolle en el punto 7.2.2 donde se calcula el desplazamiento de la ola por la playa seca, por considerarse el mayor temporal conocido en esta zona desde que existen registros de boyas y con el que se tendrá una visión de la inundación de los terrenos en este sector del litoral.

Zona B.

En primer lugar, calculamos las pendientes de la playa húmeda y de la seca. La pendiente de la playa húmeda nos indicará qué formula de Nielsen-Hanslow ha de usarse, dependiendo si esta pendiente es mayor o menor del 10%.

pendiente playa húmeda	
profundidad (m)	7,00
distancia (m)	607
pendiente %	1,153

La pendiente de la playa húmeda es menor del 10% por lo que se usará para el cálculo del run-up la fórmula del Nielsen-Hanslow para pendientes menores de ese valor:

$$R_{uo}=0{,}04\cdot(Hs\cdot L)^{1/2}$$

La pendiente de la playa seca es:

pendiente playa seca	
altura máx. playa (m)	2,00
distancia (m)	86
pendiente %	2,326

Después se calcula el run-up para cada evento de temporal.

Dado que se busca la cota de inundación y el alcance de los mayores temporales conocidos desde que existen registros, se toman para el cálculo del run-up (R_{uo}) los 4 eventos cuya altura de ola significante y/o periodo pico es mayor:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)		R_{uo}
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78		1,31
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22		1,19
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10		1,23
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10		1,19

Los factores de corrección de Van der Meer y Janssen para esta zona son:

- Factor por pendiente:

$$\gamma_b = \frac{\tan\alpha}{\tan\beta} = 2{,}0$$

al dar como resultado un valor superior a 1, y este coeficiente ha de estar en el intervalo entre un mínimo de 0,6 y un máximo de 1, se toma como coeficiente por pendiente:

$$\gamma_b = 1$$

- Factor de rugosidad:

El factor de rugosidad de la superficie de incidencia γ_f, tomará el valor de 1, al estar la playa formada por arenas limpias.

- Factor de percolación:

Como ya se ha dicho más arriba, este factor está relacionado con las características del terreno, y concretamente, en el caso de la arena, con el diámetro de sus granos y su disposición en el suelo. Así existen tablas en las que se define de manera genérica este factor en función de las características de la arena:

Rango de valores del coeficiente de permeabilidad en suelos

Tipo de suelo	k (cm/s)
Grava mal graduada (GP)	≥ 1
Grava uniforme (GP)	0,2-1
Grava bien graduada (GW)	0,05-0,3
Arena uniforme (SP)	5×10^{-3}-0,2
Arena bien graduada (SW)	10^{-3}-0,1
Arena limosa (SM)	10^{-3}-5×10^{-3}
Arena arcillosa (SC)	10^{-4}-10^{-3}
Limo de baja plasticidad (ML)	5×10^{-5}-10^{-4}
Arcillas de baja plasticidad (CL)	10^{-5}-10^{-3}

En nuestro caso se utilizará como coeficiente de percolación aquel que viene dado por la arena de la playa. Como ésta no viene explícitamente desarrollada en dicha tabla, se considera que se trata de una arena bien graduada, limpia, dado el efecto de lavado que tiene el agua del mar sobre ésta y cuyos valores típicos están comprendidos entre 0,001 y 0,1.

Dado que el intervalo de los valores de k descritos en la tabla es amplio, tomamos el valor 0,01 de dicho intervalo por ser el valor medio del mismo y considerando que la proporción media de arcillas en el terreno se encuentra mayoritariamente entre el 10% y el 20%, por lo que su presencia reduce la permeabilidad del suelo. Aplicando la siguiente formulación se obtiene el coeficiente de percolación (W) medio y, por tanto, un factor medio de percolación (γ_w) en la zona:

$$W = k \Rightarrow 0{,}01 \text{ cm/s}$$

$$\gamma_w = 1 - W \Rightarrow \gamma_w = 1 - 0{,}01 = 0{,}99$$

Un mayor valor del factor reductor de percolación implica una mayor reducción del valor de run-up corregido por estar directamente relacionados:

$$R_u = R_{uo} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_w$$

En esta zona, aplicando los factores de Van der Meer y Janssen:

$$R_u = R_{uo} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_w = R_{uo} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0{,}99$$

Con estos datos, para los eventos de temporal considerados se obtiene el run-up corregido (R_u) y con éste el run-up cuyo valor es superado en un porcentaje de tiempo inferior al 2% del evento:

$$R_{u2\%} = 1{,}98 \cdot R_u$$

Aplicando esta formulación se obtiene para cada evento de temporal en esta zona:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)		R_{uo}	R_U	$Ru_{2\%}$ (m)
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78		1,31	1,30	2,57
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22		1,19	1,18	2,34
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10		1,23	1,22	2,42
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10		1,19	1,18	2,34

A este run-up ($R_{u2\%}$) le sumamos el valor de la componente de nivel del mar ya calculado (S_{NM}), para estimar definitivamente el valor de la cota de inundación para cada uno de los máximos eventos registrados:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)		R_{uo}	R_U	$Ru_{2\%}$ (m)	S_{CI} (m)
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78		1,31	1,30	2,57	3,16
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22		1,19	1,18	2,34	3,08
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10		1,23	1,22	2,42	2,96
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10		1,19	1,18	2,34	2,93

Vistos los resultados tras la aplicación de las fórmulas y factores correctores desarrollados anteriormente se puede decir que el mayor temporal conocido que ha afectado a esta zona del tramo de la costa en estudio del término municipal de Vélez-Málaga es el acontecido el 4 de abril de 2022 que alcanzó su mayor intensidad a las 15:00 horas con una cota de inundación de unos 3,16 m.n.m.a.

Por lo tanto, este temporal de abril de 2022 será el que se desarrolle en el punto 7.2.2 donde se calcula el desplazamiento de la ola por la playa seca, por considerarse el mayor temporal conocido en esta zona desde que existen registros de boyas y con el que se tendrá una visión de la inundación de los terrenos en este sector del litoral.

Zona C.

En primer lugar, calculamos las pendientes de la playa húmeda y de la seca. La pendiente de la playa húmeda nos indicará qué formula de Nielsen-Hanslow ha de usarse, dependiendo si esta pendiente es mayor o menor del 10%.

pendiente playa húmeda	
profundidad (m)	7,00
distancia (m)	568
pendiente %	1,232

La pendiente de la playa húmeda es menor del 10% por lo que se usará para el cálculo del run-up la fórmula del Nielsen-Hanslow para pendientes menores de ese valor:

$$R_{uo}=0{,}04\cdot(Hs\cdot L)^{1/2}$$

La pendiente de la playa seca es:

pendiente playa seca	
altura máx. playa (m)	2,00
distancia (m)	507
pendiente %	0,394

Después se calcula el run-up para cada evento de temporal.

Dado que se busca la cota de inundación y el alcance de los mayores temporales conocidos desde que existen registros, se toman para el cálculo del run-up (R_{uo}) los 4 eventos cuya altura de ola significante y/o periodo pico es mayor:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)		R_{uo}
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78		1,31
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22		1,19
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10		1,23
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10		1,19

Los factores de corrección de Van der Meer y Janssen para esta zona son:

- Factor por pendiente:

$$\gamma_b = \frac{\tan\alpha}{\tan\beta} = 0{,}3$$

al dar como resultado un valor inferior a 0,6, y este coeficiente ha de estar en el intervalo entre un mínimo de 0,6 y un máximo de 1, se toma como coeficiente por pendiente:

$$\gamma_b = 0{,}6$$

- Factor de rugosidad:

El factor de rugosidad de la superficie de incidencia γ_f, tomará el valor de 1, al estar la playa formada por arenas limpias.

- Factor de percolación:

Como ya se ha dicho más arriba, este factor está relacionado con las características del terreno, y concretamente, en el caso de la arena, con el diámetro de sus granos y su disposición en el suelo. Así existen tablas en las que se define de manera genérica este factor en función de las características de la arena:

Rango de valores del coeficiente de permeabilidad en suelos

Tipo de suelo	k (cm/s)
Grava mal graduada (GP)	≥ 1
Grava uniforme (GP)	0,2-1
Grava bien graduada (GW)	0,05-0,3
Arena uniforme (SP)	5×10^{-3}-0,2
Arena bien graduada (SW)	10^{-3}-0,1
Arena limosa (SM)	10^{-3}-5×10^{-3}
Arena arcillosa (SC)	10^{-4}-10^{-3}
Limo de baja plasticidad (ML)	5×10^{-5}-10^{-4}
Arcillas de baja plasticidad (CL)	10^{-5}-10^{-8}

En nuestro caso se utilizará como coeficiente de percolación aquel que viene dado por la arena de la playa. Como ésta no viene explícitamente desarrollada en dicha tabla, se considera que se trata de una arena bien graduada, limpia, dado el efecto de lavado que tiene el agua del mar sobre ésta y cuyos valores típicos están comprendidos entre 0,001 y 0,1.

Dado que el intervalo de los valores de k descritos en la tabla es amplio, tomamos el valor 0,01 de dicho intervalo por ser el valor medio del mismo y considerando que la proporción media de arcillas en el terreno se encuentra mayoritariamente entre el 10% y el 20%, por lo que su presencia reduce la permeabilidad del suelo. Aplicando la siguiente formulación se obtiene el

coeficiente de percolación (W) medio y, por tanto, un factor medio de percolación (γ_w) en la zona:

$$W=k \Rightarrow 0{,}01 \text{ cm/s}$$

$$\gamma_w=1\text{-}W \Rightarrow \gamma_w = 1 - 0{,}01 = 0{,}99$$

Un mayor valor del factor reductor de percolación implica una mayor reducción del valor de run-up corregido por estar directamente relacionados:

$$R_u = R_{uo} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_w$$

En esta zona, aplicando los factores de Van der Meer y Janssen:

$$R_u = R_{uo} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_w = R_{uo} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0{,}99$$

Con estos datos, para los eventos de temporal considerados se obtiene el run-up corregido (R_u) y con éste el run-up cuyo valor es superado en un porcentaje de tiempo inferior al 2% del evento:

$$R_{u2\%} = 1{,}98 \cdot R_u$$

Aplicando esta formulación se obtiene para cada evento de temporal en esta zona:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)		R_{uo}	R_U	$Ru_{2\%}$ (m)
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78		1,31	0,78	1,54
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22		1,19	0,71	1,40
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10		1,23	0,73	1,45
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10		1,19	0,71	1,40

A este run-up ($R_{u2\%}$) le sumamos el valor de la componente de nivel del mar ya calculado (S_{NM}), para estimar definitivamente el valor de la cota de inundación para cada uno de los máximos eventos registrados:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)		R_{uo}	R_U	$Ru_{2\%}$ (m)	S_{CI} (m)
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78		1,31	0,78	1,54	2,13
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22		1,19	0,71	1,40	2,14
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10		1,23	0,73	1,45	1,99
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10		1,19	0,71	1,40	1,99

Vistos los resultados tras la aplicación de las fórmulas y factores correctores desarrollados anteriormente se puede decir que el mayor temporal conocido que ha afectado a esta zona del tramo de la costa en estudio del término municipal de Vélez-Málaga es el acontecido el 4 de abril de 2022 que alcanzó su mayor intensidad a las 15:00 horas con una cota de inundación de unos 2,13 m.n.m.a.

Por lo tanto, este temporal de abril de 2022 será el que se desarrolle en el punto 7.2.2 donde se calcula el desplazamiento de la ola por la playa seca, por considerarse el mayor temporal conocido en esta zona desde que existen registros de boyas y con el que se tendrá una visión de la inundación de los terrenos en este sector del litoral.

Zona D.

En primer lugar, calculamos las pendientes de la playa húmeda y de la seca. La pendiente de la playa húmeda nos indicará qué formula de Nielsen-Hanslow ha de usarse, dependiendo si esta pendiente es mayor o menor del 10%.

pendiente playa húmeda	
profundidad (m)	7,00
distancia (m)	498
pendiente %	1,406

La pendiente de la playa húmeda es menor del 10% por lo que se usará para el cálculo del run-up la fórmula del Nielsen-Hanslow para pendientes menores de ese valor:

$$R_{uo}=0,04\cdot(Hs\cdot L)^{1/2}$$

La pendiente de la playa seca es:

pendiente playa seca	
altura máx. playa (m)	2,00
distancia (m)	248
pendiente %	0,806

Después se calcula el run-up para cada evento de temporal.

Dado que se busca la cota de inundación y el alcance de los mayores temporales conocidos desde que existen registros, se toman para el cálculo del run-up (R_{uo}) los 4 eventos cuya altura de ola significante y/o periodo pico es mayor:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)		R_{uo}
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78		1,31
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22		1,19
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10		1,23
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10		1,19

Los factores de corrección de Van der Meer y Janssen para esta zona son:

- Factor por pendiente:

$$\gamma_b=\frac{\tan\alpha}{\tan\beta}=0,6$$

al dar como resultado un valor igual a 0,6, y este coeficiente ha de estar en el intervalo entre un mínimo de 0,6 y un máximo de 1, se toma como coeficiente por pendiente:

$$\gamma_b=0,6$$

- Factor de rugosidad:

El factor de rugosidad de la superficie de incidencia γ_f, tomará el valor de 1, al estar la playa formada por arenas limpias.

- Factor de percolación:

Como ya se ha dicho más arriba, este factor está relacionado con las características del terreno, y concretamente, en el caso de la arena, con el diámetro de sus granos y su disposición en el suelo. Así existen tablas en las que se define de manera genérica este factor en función de las características de la arena:

Rango de valores del coeficiente de permeabilidad en suelos

Tipo de suelo	k (cm/s)
Grava mal graduada (GP)	$\geqslant 1$
Grava uniforme (GP)	0,2-1
Grava bien graduada (GW)	0,05-0,3
Arena uniforme (SP)	5×10^{-3}-0,2
Arena bien graduada (SW)	10^{-3}-0,1
Arena limosa (SM)	10^{-3}-5×10^{-3}
Arena arcillosa (SC)	10^{-4}-10^{-3}
Limo de baja plasticidad (ML)	5×10^{-5}-10^{-4}
Arcillas de baja plasticidad (CL)	10^{-5}-10^{-8}

En nuestro caso se utilizará como coeficiente de percolación aquel que viene dado por la arena de la playa. Como ésta no viene explícitamente desarrollada en dicha tabla, se considera que se trata de una arena bien graduada, limpia, dado el efecto de lavado que tiene el agua del mar sobre ésta y cuyos valores típicos están comprendidos entre 0,001 y 0,1.

Dado que el intervalo de los valores de k descritos en la tabla es amplio, tomamos el valor 0,01 de dicho intervalo por ser el valor medio del mismo y considerando que la proporción media de arcillas en el terreno se encuentra mayoritariamente entre el 10% y el 20%, por lo que su presencia reduce la permeabilidad del suelo. Aplicando la siguiente formulación se obtiene el coeficiente de percolación (W) medio y, por tanto, un factor medio de percolación (γ_w) en la zona:

$$W=k \Rightarrow 0{,}01 \text{ cm/s}$$

$$\gamma_w=1-W \Rightarrow \gamma_w = 1 - 0{,}01 = 0{,}99$$

Un mayor valor del factor reductor de percolación implica una mayor reducción del valor de run-up corregido por estar directamente relacionados:

$$R_u = R_{uo} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_w$$

En esta zona, aplicando los factores de Van der Meer y Janssen:

$$R_u = R_{uo} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_w = R_{uo} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0{,}99$$

Con estos datos, para los eventos de temporal considerados se obtiene el run-up corregido (R_u) y con éste el run-up cuyo valor es superado en un porcentaje de tiempo inferior al 2% del evento:

$$R_{u2\%} = 1{,}98 \cdot R_u$$

Aplicando esta formulación se obtiene para cada evento de temporal en esta zona:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)		R_{uo}	R_U	$Ru_{2\%}$ (m)
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78		1,31	0,78	1,54
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22		1,19	0,71	1,40
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10		1,23	0,73	1,45
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10		1,19	0,71	1,40

A este run-up ($R_{u2\%}$) le sumamos el valor de la componente de nivel del mar ya calculado (S_{NM}), para estimar definitivamente el valor de la cota de inundación para cada uno de los máximos eventos registrados:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)		R_{uo}	R_U	$Ru_{2\%}$ (m)	S_{CI} (m)
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78		1,31	0,78	1,54	2,13
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22		1,19	0,71	1,40	2,14
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10		1,23	0,73	1,45	1,99
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10		1,19	0,71	1,40	1,99

Vistos los resultados tras la aplicación de las fórmulas y factores correctores desarrollados anteriormente se puede decir que el mayor temporal conocido que ha afectado a esta zona del tramo de la costa en estudio del término municipal de Vélez-Málaga es el acontecido el 4 de abril de 2022 que alcanzó su mayor intensidad a las 15:00 horas con una cota de inundación de unos 2,13 m.n.m.a.

Por lo tanto, este temporal de abril 2022 será el que se desarrolle en el punto 7.2.2 donde se calcula el desplazamiento de la ola por la playa seca, por considerarse el mayor temporal conocido en esta zona desde que existen registros de boyas y con el que se tendrá una visión de la inundación de los terrenos en este sector del litoral.

Zona E.

En primer lugar, calculamos las pendientes de la playa húmeda y de la seca. La pendiente de la playa húmeda nos indicará qué formula de Nielsen-Hanslow ha de usarse, dependiendo si esta pendiente es mayor o menor del 10%.

pendiente playa húmeda	
profundidad (m)	7,00
distancia (m)	300
pendiente %	2,333

La pendiente de la playa húmeda es menor del 10% por lo que se usará para el cálculo del run-up la fórmula del Nielsen-Hanslow para pendientes menores de ese valor:

$$R_{uo}=0,04\cdot(Hs\cdot L)^{1/2}$$

La pendiente de la playa seca es:

pendiente playa seca	
altura máx. playa (m)	2,50
distancia (m)	16
pendiente %	15,625

Después se calcula el run-up para cada evento de temporal.

Dado que se busca la cota de inundación y el alcance de los mayores temporales conocidos desde que existen registros, se toman para el cálculo del run-up (R_{uo}) los 4 eventos cuya altura de ola significante y/o periodo pico es mayor:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)		R_{uo}
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78		1,31
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22		1,19
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10		1,23
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10		1,19

Los factores de corrección de Van der Meer y Janssen para esta zona son:

- Factor por pendiente:

$$\gamma_b = \frac{\tan\alpha}{\tan\beta} = 6{,}7$$

al dar como resultado un valor superior a 1, y este coeficiente ha de estar en el intervalo entre un mínimo de 0,6 y un máximo de 1, se toma como coeficiente por pendiente:

$$\gamma_b = 1$$

- Factor de rugosidad:

El factor de rugosidad de la superficie de incidencia γ_f, tomará el valor de 1, al estar la playa formada por arenas limpias.

- Factor de percolación:

Como ya se ha dicho más arriba, este factor está relacionado con las características del terreno, y concretamente, en el caso de la arena, con el diámetro de sus granos y su disposición en el suelo. Así existen tablas en las que se define de manera genérica este factor en función de las características de la arena:

Rango de valores del coeficiente de permeabilidad en suelos

Tipo de suelo	k (cm/s)
Grava mal graduada (GP)	≥ 1
Grava uniforme (GP)	0,2-1
Grava bien graduada (GW)	0,05-0,3
Arena uniforme (SP)	5×10^{-3}-0,2
Arena bien graduada (SW)	10^{-3}-0,1
Arena limosa (SM)	10^{-3}-5×10^{-3}
Arena arcillosa (SC)	10^{-4}-10^{-3}
Limo de baja plasticidad (ML)	5×10^{-5}-10^{-4}
Arcillas de baja plasticidad (CL)	10^{-5}-10^{-8}

En nuestro caso se utilizará como coeficiente de percolación aquel que viene dado por la arena de la playa. Como ésta no viene explícitamente desarrollada en dicha tabla, se considera que se trata de una arena bien graduada, limpia, dado el efecto de lavado que tiene el agua del mar sobre ésta y cuyos valores típicos están comprendidos entre 0,001 y 0,1.

Dado que el intervalo de los valores de k descritos en la tabla es amplio, tomamos el valor 0,01 de dicho intervalo por ser el valor medio del mismo y considerando que la proporción media de arcillas en el terreno se encuentra mayoritariamente entre el 10% y el 20%, por lo que su presencia reduce la permeabilidad del suelo. Aplicando la siguiente formulación se obtiene el coeficiente de percolación (W) medio y, por tanto, un factor medio de percolación (γ_w) en la zona:

$$W = k \Rightarrow 0{,}01 \text{ cm/s}$$

$$\gamma_w = 1 - W \Rightarrow \gamma_w = 1 - 0{,}01 = 0{,}99$$

Un mayor valor del factor reductor de percolación implica una mayor reducción del valor de run-up corregido por estar directamente relacionados:

$$R_u = R_{uo} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_w$$

En esta zona, aplicando los factores de Van der Meer y Janssen:

$$R_u = R_{uo} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_w = R_{uo} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0{,}99$$

Con estos datos, para los eventos de temporal considerados se obtiene el run-up corregido (R_u) y con éste el run-up cuyo valor es superado en un porcentaje de tiempo inferior al 2% del evento:

$$R_{u2\%} = 1{,}98 \cdot R_u$$

Aplicando esta formulación se obtiene para cada evento de temporal en esta zona:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)	R_{uo}	R_U	$Ru_{2\%}$ (m)
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78	1,31	1,30	2,57
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22	1,19	1,18	2,34
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10	1,23	1,22	2,42
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10	1,19	1,18	2,34

A este run-up ($R_{u2\%}$) le sumamos el valor de la componente de nivel del mar ya calculado (S_{NM}), para estimar definitivamente el valor de la cota de inundación para cada uno de los máximos eventos registrados:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)	R_{uo}	R_U	$Ru_{2\%}$ (m)	S_{CI} (m)
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78	1,31	1,30	2,57	3,16
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22	1,19	1,18	2,34	3,08
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10	1,23	1,22	2,42	2,96
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10	1,19	1,18	2,34	2,93

Vistos los resultados tras la aplicación de las fórmulas y factores correctores desarrollados anteriormente se puede decir que el mayor temporal conocido que ha afectado a esta zona del tramo de la costa en estudio del término municipal de Vélez-Málaga es el acontecido el 4 de abril de 2022 que alcanzó su mayor intensidad a las 15:00 horas con una cota de inundación de unos 3,16 m.n.m.a.

Por lo tanto, este temporal de abril de 2022 será el que se desarrolle en el punto 7.2.2 donde se calcula el desplazamiento de la ola por la playa seca, por considerarse el mayor temporal conocido en esta zona desde que existen registros de boyas y con el que se tendrá una visión de la inundación de los terrenos en este sector del litoral.

Zona F.

En primer lugar, calculamos las pendientes de la playa húmeda y de la seca. La pendiente de la playa húmeda nos indicará qué formula de Nielsen-Hanslow ha de usarse, dependiendo si esta pendiente es mayor o menor del 10%.

pendiente playa húmeda	
profundidad (m)	7,00
distancia (m)	282
pendiente %	2,482

La pendiente de la playa húmeda es menor del 10% por lo que se usará para el cálculo del run-up la fórmula del Nielsen-Hanslow para pendientes menores de ese valor:

$$R_{uo}=0{,}04\cdot(Hs\cdot L)^{1/2}$$

La pendiente de la playa seca es:

pendiente playa seca	
altura máx. playa (m)	3,00
distancia (m)	23

pendiente %	13,043

Después se calcula el run-up para cada evento de temporal.

Dado que se busca la cota de inundación y el alcance de los mayores temporales conocidos desde que existen registros, se toman para el cálculo del run-up (R_{uo}) los 4 eventos cuya altura de ola significante y/o periodo pico es mayor:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)	R_{uo}
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78	1,31
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22	1,19
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10	1,23
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10	1,19

Los factores de corrección de Van der Meer y Janssen para esta zona son:

- Factor por pendiente:

$$\gamma_b = \frac{\tan\alpha}{\tan\beta} = 5{,}3$$

al dar como resultado un valor superior a 1, y este coeficiente ha de estar en el intervalo entre un mínimo de 0,6 y un máximo de 1, se toma como coeficiente por pendiente:

$$\gamma_b = 1$$

- Factor de rugosidad:

El factor de rugosidad de la superficie de incidencia γ_f, tomará el valor de 1, al estar la playa formada por arenas limpias.

- Factor de percolación:

Como ya se ha dicho más arriba, este factor está relacionado con las características del terreno, y concretamente, en el caso de la arena, con el diámetro de sus granos y su disposición en el suelo. Así existen tablas en las que se define de manera genérica este factor en función de las características de la arena:

Rango de valores del coeficiente de permeabilidad en suelos

Tipo de suelo	k (cm/s)
Grava mal graduada (GP)	≥ 1
Grava uniforme (GP)	0,2-1
Grava bien graduada (GW)	0,05-0,3
Arena uniforme (SP)	5×10^{-3}-0,2
Arena bien graduada (SW)	10^{-3}-0,1
Arena limosa (SM)	10^{-3}-5×10^{-3}
Arena arcillosa (SC)	10^{-4}-10^{-3}
Limo de baja plasticidad (ML)	5×10^{-5}-10^{-4}
Arcillas de baja plasticidad (CL)	10^{-5}-10^{-8}

En nuestro caso se utilizará como coeficiente de percolación aquel que viene dado por la arena de la playa. Como ésta no viene explícitamente desarrollada en dicha tabla, se considera que se trata de una arena bien graduada, limpia, dado el efecto de lavado que tiene el agua del mar sobre ésta y cuyos valores típicos están comprendidos entre 0,001 y 0,1.

Dado que el intervalo de los valores de k descritos en la tabla es amplio, tomamos el valor 0,01 de dicho intervalo por ser el valor medio del mismo y considerando que la proporción media de

arcillas en el terreno se encuentra mayoritariamente entre el 10% y el 20%, por lo que su presencia reduce la permeabilidad del suelo. Aplicando la siguiente formulación se obtiene el coeficiente de percolación (W) medio y, por tanto, un factor medio de percolación (γ_w) en la zona:

$$W=k \Rightarrow 0{,}01 \text{ cm/s}$$

$$\gamma_w=1-W \Rightarrow \gamma_w = 1 - 0{,}01 = 0{,}99$$

Un mayor valor del factor reductor de percolación implica una mayor reducción del valor de run-up corregido por estar directamente relacionados:

$$R_u = R_{uo} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_w$$

En esta zona, aplicando los factores de Van der Meer y Janssen:

$$R_u = R_{uo} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_w = R_{uo} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0{,}99$$

Con estos datos, para los eventos de temporal considerados se obtiene el run-up corregido (R_u) y con éste el run-up cuyo valor es superado en un porcentaje de tiempo inferior al 2% del evento:

$$R_{u2\%} = 1{,}98 \cdot R_u$$

Aplicando esta formulación se obtiene para cada evento de temporal en esta zona:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)	R_{uo}	R_U	$Ru_{2\%}$ (m)
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78	1,31	1,30	2,57
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22	1,19	1,18	2,34
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10	1,23	1,22	2,42
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10	1,19	1,18	2,34

A este run-up ($R_{u2\%}$) le sumamos el valor de la componente de nivel del mar ya calculado (S_{NM}), para estimar definitivamente el valor de la cota de inundación para cada uno de los máximos eventos registrados:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)	R_{uo}	R_U	$Ru_{2\%}$ (m)	S_{CI} (m)
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78	1,31	1,30	2,57	3,16
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22	1,19	1,18	2,34	3,08
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10	1,23	1,22	2,42	2,96
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10	1,19	1,18	2,34	2,93

Vistos los resultados tras la aplicación de las fórmulas y factores correctores desarrollados anteriormente se puede decir que el mayor temporal conocido que ha afectado a esta zona del tramo de la costa en estudio del término municipal de Vélez-Málaga es el acontecido el 4 de abril de 2022 que alcanzó su mayor intensidad a las 15:00 horas con una cota de inundación de unos 3,16 m.n.m.a.

Por lo tanto, este temporal de abril de 2022 será el que se desarrolle en el punto 7.2.2 donde se calcula el desplazamiento de la ola por la playa seca, por considerarse el mayor temporal conocido en esta zona desde que existen registros de boyas y con el que se tendrá una visión de la inundación de los terrenos en este sector del litoral.

Zona G.

En primer lugar, calculamos las pendientes de la playa húmeda y de la seca. La pendiente de la playa húmeda nos indicará qué formula de Nielsen-Hanslow ha de usarse, dependiendo si esta pendiente es mayor o menor del 10%.

pendiente playa húmeda	
profundidad (m)	7,00
distancia (m)	251
pendiente %	2,789

La pendiente de la playa húmeda es menor del 10% por lo que se usará para el cálculo del run-up la fórmula del Nielsen-Hanslow para pendientes menores de ese valor:

$$R_{uo}=0,04\cdot(Hs\cdot L)^{1/2}$$

La pendiente de la playa seca es:

pendiente playa seca	
altura máx. playa (m)	3,00
distancia (m)	63
pendiente %	4,762

Después se calcula el run-up para cada evento de temporal.

Dado que se busca la cota de inundación y el alcance de los mayores temporales conocidos desde que existen registros, se toman para el cálculo del run-up (R_{uo}) los 4 eventos cuya altura de ola significante y/o periodo pico es mayor:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)		R_{uo}
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78		1,31
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22		1,19
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10		1,23
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10		1,19

Los factores de corrección de Van der Meer y Janssen para esta zona son:

- Factor por pendiente:

$$\gamma_b=\frac{\tan\alpha}{\tan\beta}=1,7$$

al dar como resultado un valor superior a 1, y este coeficiente ha de estar en el intervalo entre un mínimo de 0,6 y un máximo de 1, se toma como coeficiente por pendiente:

$$\gamma_b=1$$

- Factor de rugosidad:

El factor de rugosidad de la superficie de incidencia γ_f, tomará el valor de 1, al estar la playa formada por arenas limpias.

- Factor de percolación:

Como ya se ha dicho más arriba, este factor está relacionado con las características del terreno, y concretamente, en el caso de la arena, con el diámetro de sus granos y su disposición en el suelo. Así existen tablas en las que se define de manera genérica este factor en función de las características de la arena:

Rango de valores del coeficiente de permeabilidad en suelos

Tipo de suelo	k (cm/s)
Grava mal graduada (GP)	$\geqslant 1$
Grava uniforme (GP)	0,2-1
Grava bien graduada (GW)	0,05-0,3
Arena uniforme (SP)	5×10^{-3}-0,2
Arena bien graduada (SW)	10^{-3}-0,1
Arena limosa (SM)	10^{-3}-5×10^{-3}
Arena arcillosa (SC)	10^{-4}-10^{-3}
Limo de baja plasticidad (ML)	5×10^{-5}-10^{-4}
Arcillas de baja plasticidad (CL)	10^{-5}-10^{-8}

En nuestro caso se utilizará como coeficiente de percolación aquel que viene dado por la arena de la playa. Como ésta no viene explícitamente desarrollada en dicha tabla, se considera que se trata de una arena bien graduada, limpia, dado el efecto de lavado que tiene el agua del mar sobre ésta y cuyos valores típicos están comprendidos entre 0,001 y 0,1.

Dado que el intervalo de los valores de k descritos en la tabla es amplio, tomamos el valor 0,01 de dicho intervalo por ser el valor medio del mismo y considerando que la proporción media de arcillas en el terreno se encuentra mayoritariamente entre el 10% y el 20%, por lo que su presencia reduce la permeabilidad del suelo. Aplicando la siguiente formulación se obtiene el coeficiente de percolación (W) medio y, por tanto, un factor medio de percolación (γ_w) en la zona:

$$W=k \Rightarrow 0{,}01 \text{ cm/s}$$

$$\gamma_w=1-W \Rightarrow \gamma_w = 1 - 0{,}01 = 0{,}99$$

Un mayor valor del factor reductor de percolación implica una mayor reducción del valor de run-up corregido por estar directamente relacionados:

$$R_u = R_{uo} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_w$$

En esta zona, aplicando los factores de Van der Meer y Janssen:

$$R_u = R_{uo} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_w = R_{uo} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0{,}99$$

Con estos datos, para los eventos de temporal considerados se obtiene el run-up corregido (R_u) y con éste el run-up cuyo valor es superado en un porcentaje de tiempo inferior al 2% del evento:

$$R_{u2\%} = 1{,}98 \cdot R_u$$

Aplicando esta formulación se obtiene para cada evento de temporal en esta zona:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)		R_{uo}	R_U	$Ru_{2\%}$ (m)
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78		1,31	1,30	2,57
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22		1,19	1,18	2,34
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10		1,23	1,22	2,42
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10		1,19	1,18	2,34

A este run-up ($R_{u2\%}$) le sumamos el valor de la componente de nivel del mar ya calculado (S_{NM}), para estimar definitivamente el valor de la cota de inundación para cada uno de los máximos eventos registrados:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)		R_{uo}	R_U	$Ru_{2\%}$ (m)	S_{CI} (m)
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78		1,31	1,30	2,57	3,16
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22		1,19	1,18	2,34	3,08
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10		1,23	1,22	2,42	2,96
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10		1,19	1,18	2,34	2,93

Vistos los resultados tras la aplicación de las fórmulas y factores correctores desarrollados anteriormente se puede decir que el mayor temporal conocido que ha afectado a esta zona del tramo de la costa en estudio del término municipal de Vélez-Málaga es el acontecido el 4 de abril de 2022 que alcanzó su mayor intensidad a las 15:00 horas con una cota de inundación de unos 3,16 m.n.m.a.

Por lo tanto, este temporal de abril de 2022 será el que se desarrolle en el punto 7.2.2 donde se calcula el desplazamiento de la ola por la playa seca, por considerarse el mayor temporal conocido en esta zona desde que existen registros de boyas y con el que se tendrá una visión de la inundación de los terrenos en este sector del litoral.

7.2.2 Estimación del desplazamiento de la ola por la playa seca en el año 2030

Para realizar estos cálculos se va a realizar el estudio según las instrucciones del C.E.M. (Coastal Engineering Manual), con las ventajas que aporta el uso de los datos de los puntos SIMAR de Puertos del Estado y la base de datos reales de oleaje registrados desde 1958.

Según el C.E.M. es necesario obtener la altura de ola significante en aguas profundas para calcular la altura de ola significativa (H'0 según nomenclatura del C.E.M.). Como los datos obtenidos en el punto SIMAR son simulaciones de oleaje para ese punto, el valor que se obtiene en dicho punto SIMAR es igual para ambos parámetros.

La longitud de ola profunda es:

$$L = 1.56 \times {T_p}^2$$

Donde T_p es el periodo punta; también obtenido del punto SIMAR.

La altura de ruptura de la ola según Komar & Gaughan (1973) es:

$$\Omega_b = 0.56 \left(\frac{H_0}{L_0}\right)^{\frac{-1}{5}}$$

Donde, L_0 es la longitud de ola en aguas profundas (m).

Así mismo tenemos que,

$$H_b = H_0 \times \Omega_b$$

Para continuar con los cálculos según el C.E.M. del alcance del oleaje (Δx) lo hacemos mediante la fórmula:

$$\Delta x = \frac{\eta_s}{tan\vartheta - \frac{d_\eta}{d_x}}$$

Para ello necesitamos conocer la pendiente uniforme de la playa, ϑ, (húmeda + seca). Estos parámetros ya han sido obtenidos para el cálculo de la cota de inundación anteriormente y han sido medidos, recordemos, desde la cota 0 (línea de agua) estimada para el año 2030 teniendo en cuenta la regresión de la costa y el aumento del nivel del mar por efecto del cambio climático.

El cálculo de la decaída de la ola cuando llega a la playa es:

$$\frac{d\eta}{dx} = \frac{1}{1 + \frac{8}{3 \times \gamma_b^2}} \times tan\beta$$

La elevación media de la ola sobre el litoral:

$$\eta_s = \eta_b + (d_b - \eta_b) + \frac{1}{1 + \frac{8}{(3 \times \gamma_b^2)}}$$

La elevación media sobre el nivel del mar en aguas tranquilas profundas:

$$\eta_b = \frac{-1}{16} \times \gamma_b^2 \times d_b$$

Donde γ_b, es el índice de profundidad de rotura, que se obtiene de:

$$\gamma b = b - a\ \frac{H_b}{g \times T^2}$$

Y la profundidad de rotura db, que se obtiene mediante la fórmula:

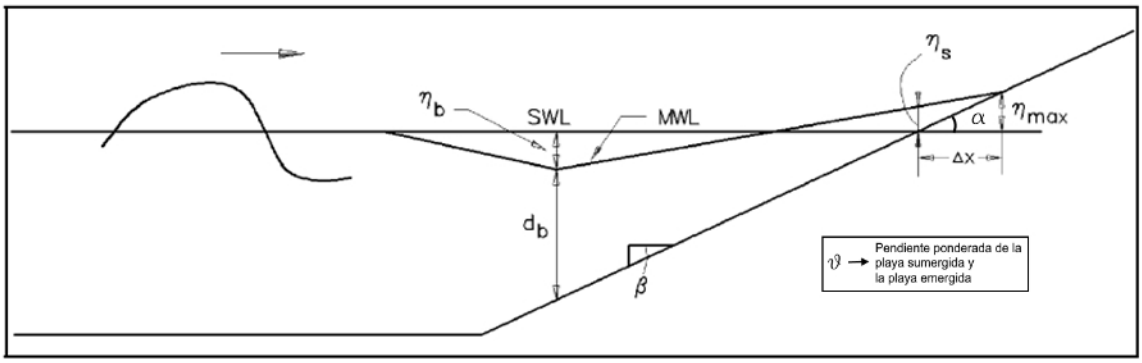
$$db = \frac{H_b}{\gamma_b^2}$$

Los parámetros a y b son coeficientes relacionados con la pendiente de la playa húmeda y responden a la siguiente formulación:

$$a = 43.8 \times (1 - e^{19tan\beta})$$

$$b = \frac{1.56}{(1 + e^{-19.5tan\beta})}$$

Así, aplicaremos este sistema de fórmulas del C.E.M. para los datos del temporal más severo desde que hay registros, considerando que éste es aquel cuya cota de inundación (calculada en el punto 7.2.1) es el de mayor valor, es decir, aquel temporal cuyo valor de S_{ci} es mayor.



Esquema de los parámetros calculados y su relación con el perfil de la playa (extraído del C.E.M.).

A continuación, se desarrollan los cálculos para cada transecto.

Zona A:

Como ya se ha visto en el apartado 7.2.1, el mayor temporal conocido en esta zona, desde que existen registros de boyas, es el acontecido el 4 de abril de 2022 con una cota corregida de inundación de 3,16 m.n.m.a. Serán los datos de este temporal los que se desarrollen aquí para

calcular el alcance del mar durante los mayores temporales conocidos, según el procedimiento del C.E.M.

Los datos de partida para los cálculos son:

Punto SIMAR	2035080
Fecha máx. temporal	04/04/2022
Hs	4,69
Tp	12,11
L	228,78

Resultando, tras la aplicación de la formulación anteriormente descrita:

Ωb	1,22
Hb	5,72
dη/dx	0,0025
ηs	1,18
ηb	-0,30
γb	0,84
db	6,84
tanα	0,020
tanβ	0,012
tanϑ	0,013

Por lo tanto, el alcance del mar durante este temporal, en esta zona, dado por la fórmula:

$$\Delta x = \frac{\eta_s}{tan\vartheta - \frac{d_\eta}{d_x}}$$

Arroja un resultado de 110,41 metros tierra adentro desde la línea de agua. Es decir, esa distancia es el lugar hasta donde alcanzaría el agua del mar, según las cartografías utilizadas, con unas pendientes constantes, y un oleaje regular durante el máximo temporal conocido desde que existen registros.

Por tanto, podemos decir que el oleaje generado durante el temporal del día 4 de abril de 2022 en esta zona se adentraría hasta los 110,41 metros según indican los cálculos teóricos de alcance descritos en el manual de ingeniería de costas (CEM), usando como datos de partida los registros tomados por las boyas y el modelado numérico del oleaje y viento de los puntos SIMAR de Puertos del Estado, y asimilando la zona de costa en estudio como un sector homogéneo con oleaje regular durante el evento del mayor temporal como modelo simplificado del terreno costero para la realización estos cálculos y considerando la cota cero o línea de agua la resultante de la estimación a 10 años de la regresión de la costa incrementada con el aumento del nivel del mar a causa del cambio climático, estimado éste en 9 cm de media.

Zona B:

Como ya se ha visto en el apartado 7.2.1, el mayor temporal conocido en esta zona, desde que existen registros de boyas, es el acontecido el 4 de abril de 2022 con una cota corregida de inundación de 3,16 m.n.m.a. Serán los datos de este temporal los que se desarrollen aquí para calcular el alcance del mar durante los mayores temporales conocidos, según el procedimiento del C.E.M.

Los datos de partida para los cálculos son:

Punto SIMAR	2035080
Fecha máx. temporal	04/04/2022
Hs	4,69
Tp	12,11
L	228,78

Resultando, tras la aplicación de la formulación anteriormente descrita:

Ωb	1,22
Hb	5,72
dη/dx	0,0024
ηs	1,18
ηb	-0,30
γb	0,83
db	6,86
tanα	0,023
tanβ	0,012
tanϑ	0,013

Por lo tanto, el alcance del mar durante este temporal, en esta zona, dado por la fórmula:

$$\Delta x = \frac{\eta_s}{tan\vartheta - \frac{d_\eta}{d_x}}$$

Arroja un resultado de 111,34 metros tierra adentro desde la línea de agua. Es decir, esa distancia es el lugar hasta donde alcanzaría el agua del mar, según las cartografías utilizadas, con unas pendientes constantes, y un oleaje regular durante el máximo temporal conocido desde que existen registros.

Por tanto, podemos decir que el oleaje generado durante el temporal del día 4 de abril de 2022 en esta zona se adentraría hasta los 111,34 metros según indican los cálculos teóricos de alcance descritos en el manual de ingeniería de costas (CEM), usando como datos de partida los registros tomados por las boyas y el modelado numérico del oleaje y viento de los puntos SIMAR de Puertos del Estado, y asimilando la zona de costa en estudio como un sector homogéneo con oleaje regular durante el evento del mayor temporal como modelo simplificado del terreno costero para la realización estos cálculos y considerando la cota cero o línea de agua la resultante de la estimación a 10 años de la regresión de la costa incrementada con el aumento del nivel del mar a causa del cambio climático, estimado éste en 9 cm de media.

Zona C:

Como ya se ha visto en el apartado 7.2.1, el mayor temporal conocido en esta zona, desde que existen registros de boyas, es el acontecido el 4 de abril de 2022 con una cota corregida de inundación de 2,13 m.n.m.a. Serán los datos de este temporal los que se desarrollen aquí para calcular el alcance del mar durante los mayores temporales conocidos, según el procedimiento del C.E.M.

Los datos de partida para los cálculos son:

Punto SIMAR	2035080
Fecha máx. temporal	04/04/2022
Hs	4,69
Tp	12,11
L	228,78

Resultando, tras la aplicación de la formulación anteriormente descrita:

Ωb	1,22
Hb	5,72
dη/dx	0,0026
ηs	1,18
ηb	-0,30
γb	0,84
db	6,83
tanα	0,004
tanβ	0,012
tanϑ	0,008

Por lo tanto, el alcance del mar durante este temporal, en esta zona, dado por la fórmula:

$$\Delta x = \frac{\eta_s}{tan\vartheta - \frac{d_\eta}{d_x}}$$

Arroja un resultado de 203,84 metros tierra adentro desde la línea de agua. Es decir, esa distancia es el lugar hasta donde alcanzaría el agua del mar, según las cartografías utilizadas, con unas pendientes constantes, y un oleaje regular durante el máximo temporal conocido desde que existen registros.

Por tanto, podemos decir que el oleaje generado durante el temporal del día 4 de abril de 2022 en esta zona se adentraría hasta los 203,84 metros según indican los cálculos teóricos de alcance descritos en el manual de ingeniería de costas (CEM), usando como datos de partida los registros tomados por las boyas y el modelado numérico del oleaje y viento de los puntos SIMAR de Puertos del Estado, y asimilando la zona de costa en estudio como un sector homogéneo con oleaje regular durante el evento del mayor temporal como modelo simplificado del terreno costero para la realización estos cálculos y considerando la cota cero o línea de agua la resultante de la estimación a 10 años de la regresión de la costa incrementada con el aumento del nivel del mar a causa del cambio climático, estimado éste en 9 cm de media.

Zona D:

Como ya se ha visto en el apartado 7.2.1, el mayor temporal conocido en esta zona, desde que existen registros de boyas, es el acontecido el 4 de abril de 2022 con una cota corregida de inundación de 2,13 m.n.m.a. Serán los datos de este temporal los que se desarrollen aquí para calcular el alcance del mar durante los mayores temporales conocidos, según el procedimiento del C.E.M.

Los datos de partida para los cálculos son:

Punto SIMAR	2035080
Fecha máx. temporal	04/04/2022
Hs	4,69
Tp	12,11
L	228,78

Resultando, tras la aplicación de la formulación anteriormente descrita:

Ωb	1,22
Hb	5,72
dη/dx	0,0030
ηs	1,19
ηb	-0,30
γb	0,85
db	6,76

tanα	0,008
tanβ	0,014
tanϑ	0,012

Por lo tanto, el alcance del mar durante este temporal, en esta zona, dado por la fórmula:

$$\Delta x = \frac{\eta_s}{tan\vartheta - \frac{d_\eta}{d_x}}$$

Arroja un resultado de 130,97 metros tierra adentro desde la línea de agua. Es decir, esa distancia es el lugar hasta donde alcanzaría el agua del mar, según las cartografías utilizadas, con unas pendientes constantes, y un oleaje regular durante el máximo temporal conocido desde que existen registros.

Por tanto, podemos decir que el oleaje generado durante el temporal del día 4 de abril de 2022 en esta zona se adentraría hasta los 130,97 metros según indican los cálculos teóricos de alcance descritos en el manual de ingeniería de costas (CEM), usando como datos de partida los registros tomados por las boyas y el modelado numérico del oleaje y viento de los puntos SIMAR de Puertos del Estado, y asimilando la zona de costa en estudio como un sector homogéneo con oleaje regular durante el evento del mayor temporal como modelo simplificado del terreno costero para la realización estos cálculos y considerando la cota cero o línea de agua la resultante de la estimación a 10 años de la regresión de la costa incrementada con el aumento del nivel del mar a causa del cambio climático, estimado éste en 9 cm de media.

Zona E:

Como ya se ha visto en el apartado 7.2.1, el mayor temporal conocido en esta zona, desde que existen registros de boyas, es el acontecido el 4 de abril de 2022 con una cota corregida de inundación de 3,16 m.n.m.a. Serán los datos de este temporal los que se desarrollen aquí para calcular el alcance del mar durante los mayores temporales conocidos, según el procedimiento del C.E.M.

Los datos de partida para los cálculos son:

Punto SIMAR	2035080
Fecha máx. temporal	04/04/2022
Hs	4,69
Tp	12,11
L	228,78

Resultando, tras la aplicación de la formulación anteriormente descrita:

Ωb	1,22
Hb	5,72
dη/dx	0,0054
ηs	1,23
ηb	-0,32
γb	0,89
db	6,41
tanα	0,156
tanβ	0,023
tanϑ	0,030

Por lo tanto, el alcance del mar durante este temporal, en esta zona, dado por la fórmula:

$$\Delta x = \frac{\eta_s}{tan\vartheta - \frac{d_\eta}{d_x}}$$

Arroja un resultado de 49,69 metros tierra adentro desde la línea de agua. Es decir, esa distancia es el lugar hasta donde alcanzaría el agua del mar, según las cartografías utilizadas, con unas pendientes constantes, y un oleaje regular durante el máximo temporal conocido desde que existen registros.

Por tanto, podemos decir que el oleaje generado durante el temporal del día 4 de abril de 2022 en esta zona se adentraría hasta los 49,69 metros según indican los cálculos teóricos de alcance descritos en el manual de ingeniería de costas (CEM), usando como datos de partida los registros tomados por las boyas y el modelado numérico del oleaje y viento de los puntos SIMAR de Puertos del Estado, y asimilando la zona de costa en estudio como un sector homogéneo con oleaje regular durante el evento del mayor temporal como modelo simplificado del terreno costero para la realización estos cálculos y considerando la cota cero o línea de agua la resultante de la estimación a 10 años de la regresión de la costa incrementada con el aumento del nivel del mar a causa del cambio climático, estimado éste en 9 cm de media.

Zona F:

Como ya se ha visto en el apartado 7.2.1, el mayor temporal conocido en esta zona, desde que existen registros de boyas, es el acontecido el 4 de abril de 2022 con una cota corregida de inundación de 3,16 m.n.m.a. Serán los datos de este temporal los que se desarrollen aquí para calcular el alcance del mar durante los mayores temporales conocidos, según el procedimiento del C.E.M.

Los datos de partida para los cálculos son:

Punto SIMAR	2035080
Fecha máx. temporal	04/04/2022
Hs	4,69
Tp	12,11
L	228,78

Resultando, tras la aplicación de la formulación anteriormente descrita:

Ωb	1,22
Hb	5,72
dη/dx	0,0058
ηs	1,23
ηb	-0,32
γb	0,90
db	6,35
tanα	0,130
tanβ	0,025
tanϑ	0,033

Por lo tanto, el alcance del mar durante este temporal, en esta zona, dado por la fórmula:

$$\Delta x = \frac{\eta_s}{tan\vartheta - \frac{d_\eta}{d_x}}$$

Arroja un resultado de 45,65 metros tierra adentro desde la línea de agua. Es decir, esa distancia es el lugar hasta donde alcanzaría el agua del mar, según las cartografías utilizadas, con unas

pendientes constantes, y un oleaje regular durante el máximo temporal conocido desde que existen registros.

Por tanto, podemos decir que el oleaje generado durante el temporal del día 4 de abril de 2022 en esta zona se adentraría hasta los 45,65 metros según indican los cálculos teóricos de alcance descritos en el manual de ingeniería de costas (CEM), usando como datos de partida los registros tomados por las boyas y el modelado numérico del oleaje y viento de los puntos SIMAR de Puertos del Estado, y asimilando la zona de costa en estudio como un sector homogéneo con oleaje regular durante el evento del mayor temporal como modelo simplificado del terreno costero para la realización estos cálculos y considerando la cota cero o línea de agua la resultante de la estimación a 10 años de la regresión de la costa incrementada con el aumento del nivel del mar a causa del cambio climático, estimado éste en 9 cm de media.

Zona G:

Como ya se ha visto en el apartado 7.2.1, el mayor temporal conocido en esta zona, desde que existen registros de boyas, es el acontecido el 4 de abril de 2022 con una cota corregida de inundación de 3,16 m.n.m.a. Serán los datos de este temporal los que se desarrollen aquí para calcular el alcance del mar durante los mayores temporales conocidos, según el procedimiento del C.E.M.

Los datos de partida para los cálculos son:

Punto SIMAR	2035080
Fecha máx. temporal	04/04/2022
Hs	4,69
Tp	12,11
L	228,78

Resultando, tras la aplicación de la formulación anteriormente descrita:

Ωb	1,22
Hb	5,72
dη/dx	0,0067
ηs	1,24
ηb	-0,33
γb	0,92
db	6,24
tanα	0,048
tanβ	0,028
tanϑ	0,032

Por lo tanto, el alcance del mar durante este temporal, en esta zona, dado por la fórmula:

$$\Delta x = \frac{\eta_s}{tan\vartheta - \frac{d_\eta}{d_x}}$$

Arroja un resultado de 49,41 metros tierra adentro desde la línea de agua. Es decir, esa distancia es el lugar hasta donde alcanzaría el agua del mar, según las cartografías utilizadas, con unas pendientes constantes, y un oleaje regular durante el máximo temporal conocido desde que existen registros.

Por tanto, podemos decir que el oleaje generado durante el temporal del día 4de abril de 2022 en esta zona se adentraría hasta los 49,41 metros según indican los cálculos teóricos de alcance descritos en el manual de ingeniería de costas (CEM), usando como datos de partida los registros tomados por las boyas y el modelado numérico del oleaje y viento de los puntos SIMAR de Puertos

del Estado, y asimilando la zona de costa en estudio como un sector homogéneo con oleaje regular durante el evento del mayor temporal como modelo simplificado del terreno costero para la realización estos cálculos y considerando la cota cero o línea de agua la resultante de la estimación a 10 años de la regresión de la costa incrementada con el aumento del nivel del mar a causa del cambio climático, estimado éste en 9 cm de media.

7.2.3 Discusión de los resultados para el año 2030

Teniendo en cuenta estos valores de alcance obtenidos para cada transecto, se puede representar en el mapa el alcance de la inundación teórica en el año 2030 según el método del C.E.M.) así como la cota de inundación (según Nielsen-Hanslow), teniendo en cuenta tanto la regresión de la costa como la elevación del nivel del mar por los efectos del cambio climático.



Representación gráfica de los alcances calculados mediante el método del C.E.M. (en verde) y la cota de inundación mediante la fórmula de Nielsen-Hanslow (1991) corregida con los factores de Van der Meer y Jansen (en azul).

Una vez obtenidos los valores de cota de inundación (S_{CI}), medida en vertical, y de alcance de la inundación (Δx), medida en horizontal, se puede calcular la extensión de la inundación (sin tener en cuenta obstáculos cuya altura no esté cartografiada como curva de nivel, ni las superficies cuyos terrenos estén más bajos colindantes a los que si llega el agua y que por gravedad se desplazaría e inundaría también esos terrenos bajos), pues la forma del perfil medio de la playa relaciona las distancias en vertical y en horizontal de la inundación desde los puntos extremos de la medición.

Al ser variables distintas y haberse tratado y calculado de forma independiente, no se obtienen los mismos resultados de extensión de la inundación. Así, al representar la distancia de inundación y la cota de inundación sobre la cartografía no serán coincidentes por sus características intrínsecas.

La topografía del terreno es un factor limitante en la extensión de la inundación y se relaciona con los dos parámetros calculados, pudiéndose dar tres casos genéricos que han de ser considerados en cada zona de estudio. Estos casos son:

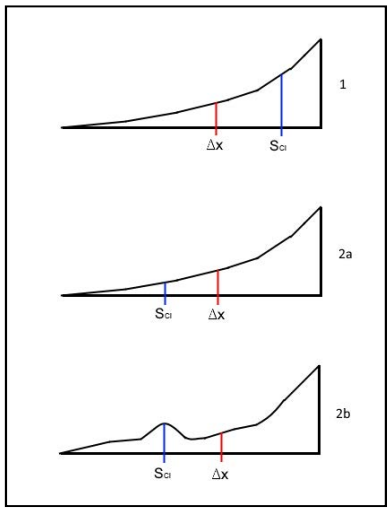
1 – La cota de inundación (S_{CI}), según la topografía del terreno, se ubica más al interior que el alcance de la inundación (Δx).

2 – La cota de inundación (S_{CI}), se ubica más al exterior que el alcance de inundación (Δx). En este supuesto pueden darse 2 situaciones según la topografía del terreno:

2.a – La pendiente del terreno asciende de forma constante desde la cota cero hacia arriba.

2.b – La pendiente del terreno asciende para luego descender al interior, porque existe un montículo u obstáculo más alto que el terreno más al interior.

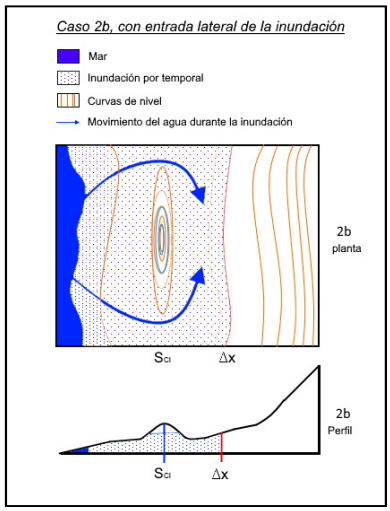
Esquemáticamente:



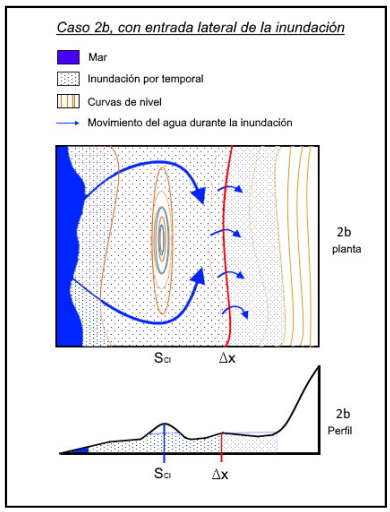
Así, cuando tras los cálculos y su representación sobre la cartografía de las líneas que indican los límites, tanto de la cota de inundación (S_{CI}) sobre el nivel del mar (cota 0 n.m.m.a.) como del alcance (desplazamiento de la ola tierra adentro, Δx), nos encontramos con la situación '1' se considera que la inundación se extiende tierra adentro hasta el límite marcado por el cálculo del alcance (Δx).

En el caso de encontrarnos con el supuesto 2a, es decir, el límite interior del alcance (Δx) se ubica más al interior que la inundación arrojada por el valor de la cota de inundación (S_{CI}) en un terreno que va ascendiendo de manera constante desde la línea de agua hacia el interior, se considera que la inundación por el temporal se extiende hasta el límite interior marcado por la cota de inundación (S_{CI}) ya que se hace la hipótesis de que el agua no puede superar la cota de inundación calculada ya que más al interior de ésta, el terreno tiene mayor cota por su ascenso en altura uniforme.

En el caso de encontrarnos con el supuesto 2b, es decir, el límite interior del alcance (Δx) se ubica más al interior que la inundación arrojada por el valor de la cota de inundación (S_{CI}) en un terreno que no asciende de forma constante desde la cota cero sino que, por la existencia de montículos de arena o por las propias características del terreno en las que se alcanza una cota determinada y más al interior el terreno baja y, por tanto, tiene cota inferior a ese montículo, cordón, etc. se considera que el límite hasta el que se extiende la inundación por el temporal lo marca cálculo del alcance de las olas (Δx) dado que el agua de la inundación pueda provenir de zonas más bajas, no venir del punto de medición, sino de zonas aledañas más bajas y que se extiende por detrás de este cordón u obstáculo más alto, pero inundándose al interior con aguas de mar procedentes de las entradas más bajas que el cordón o montículo, en otros lugares más o menos cercanos. Esta situación se trata de ilustrar con el siguiente esquema:



Una variante de este último caso, habitual en los terrenos que abarca este estudio de regresión de la costa, es que los terrenos más al interior del alcance de las olas (Δx) siguen siendo bajos por lo que el agua, por la gravedad y sus características de fluido, se extiende por esos terrenos hasta donde la topografía del suelo vuelve a ascender, por lo que la extensión de la inundación ha de estudiarse en cada caso concreto ya que el agua avanzará incluso más allá de esa línea teórica Δx. Esta situación se trata de ilustrar con el siguiente esquema:



Vistos los casos genéricos, se debe considerar si la extensión de inundación viene limitada por cota (S_{CI}), por distancia (Δx) o por distancia y extensión por terrenos bajos, en cada uno de los casos de los terrenos estudiados.

En las representaciones gráficas anteriores se han mostrado las líneas que marcan la cota de inundación calculada mediante la formulación de Nielsen-Hanslow y el alcance de la inundación calculada por el método de C.E.M.

En la zona de influencia del transecto A, la cota de inundación es de 3,16m por lo que siendo terrenos bajos que en su mayor parte están por debajo de los 3 metros de altitud, la cota de inundación se ubica en el fondo de los terrenos del delta. El alcance de las olas (Δx) en esta zona se ubica a algo más de 110 metros de la línea de agua estimada para el año 2030 situándose en la zona de cultivos, por tanto, estaríamos en la hipótesis '1' antes comentada siendo este último parámetro el que indicaría la extensión numérica de la inundación.



Representación de la cota de inundación según Nielsen-Hanslow
(azul) y el alcance del oleaje en 2030 según C.E.M. (verde)

A partir de aquí es necesario comprobar la cota de los terrenos comparando la cota en la zona inundable según el alcance del oleaje y los terrenos al interior por si se da el caso de que, por efecto de la gravedad, el agua que alcanza esa distancia se adentra más al interior rellenando terrenos bajos, cubetas, etc. contiguos del mismo modo que se ha hecho en el punto 6.

En esta zona tenemos que la cota de inundación es 3,16 que supera con facilidad el talud de defensa que existe en el límite de la línea media de agua, desplazándose al interior por los terrenos completamente llanos propios de los deltas de los ríos situándose el alcance del oleaje teórico a 110 metros de la línea de agua y prácticamente coincidente con la cota 2m del terreno encharcando todos los terrenos llanos que mantengan esta cota por efecto de la gravedad.

En la zona del transecto B, la cota de inundación es de 3,16m por lo que siendo terrenos bajos que en su mayor parte están por debajo de los 3 metros de altitud, la cota de inundación se ubica en el fondo de los terrenos del delta. El alcance de las olas (Δx) en esta zona se sitúa a algo más de 111 metros de la línea de agua estimada para el año 2030 situándose en la zona de cultivos, por tanto, estaríamos en la hipótesis '1' antes comentada siendo este último parámetro el que indicaría la extensión numérica de la inundación.



Representación de la cota de inundación según Nielsen-Hanslow
(azul) y el alcance del oleaje según C.E.M. (verde)

A partir de aquí es necesario comprobar la cota de los terrenos comparando la cota en la zona inundable según el alcance del oleaje y los terrenos al interior por si se da el caso de que, por

efecto de la gravedad, el agua que alcanza esa distancia se adentra más al interior rellenando terrenos bajos, cubetas, etc. contiguos del mismo modo que se ha hecho en el punto 6.

En este caso tenemos que la cota máxima que alcanza el oleaje y que es superado hasta alcanzar su límite interior (Δx) se encuentra aproximadamente en los 2,0 metros inundándose los terrenos llanos del delta contiguos que mantienen esta cota a su interior y por tanto formando balsas de agua de mar más al interior del alcance del oleaje teórico.

La zona C los cálculos del alcance del oleaje se han realizado para el cauce del río Vélez, la cota de inundación es de 2,13m. El cauce, al ser un terreno bajo la cota de inundación se sitúa, según la topografía, al interior de la laguna de la margen izquierda que se formó en la desembocadura tras el temporal de abril de 2022. El alcance de las olas (Δx) en el cauce se ubica a más de 203 metros de la línea de agua estimada para el año 2030, por tanto, estaríamos en la hipótesis '1' arriba expuesta siendo este último parámetro el que indicaría la extensión numérica de la inundación (excepto en las motas de las márgenes cuya altura es igual o mayor que la cota de inundación).



Representación de la cota de inundación según Nielsen-Hanslow (azul) y el alcance del oleaje según C.E.M. (verde)

A partir de aquí es necesario comprobar la cota de los terrenos del cauce comparando la cota en la zona inundable según el alcance del oleaje y los terrenos al interior por si se da el caso de que, por efecto de la gravedad, el agua que alcanza esa distancia se adentra más al interior rellenando terrenos bajos, cubetas, etc. contiguos del mismo modo que se ha hecho en el punto 6.

En este caso tenemos que la cota donde se encuentra el límite interior teórico del alcance del oleaje (Δx) es aproximadamente 1,5 metros y, por tanto, inundándose los terrenos llanos contiguos que mantienen esta cota a su interior y por tanto formando balsas de agua de mar más al interior del alcance del oleaje teórico.

En la zona del transecto D, la cota de inundación es de 2,13m por lo que siendo terrenos bajos que en parte están por debajo de los 2 metros de altitud, la cota de inundación se ubica en el interior de las parcelas agrícolas exteriores del delta. El alcance de las olas (Δx) en esta zona se sitúa a 131 metros de la línea de agua estimada para el año 2030 situándose en la zona de cultivos, por tanto, estaríamos en la hipótesis '1' antes comentada excepto en un camino agrícola que se encuentra por encima de los 2 metros y donde será la cota de inundación la que marque el límite de la extensión de la inundación por los temporales. (hipótesis '2b').



Representación de la cota de inundación según Nielsen-Hanslow
(azul) y el alcance del oleaje según C.E.M. (verde)

A partir de aquí es necesario comprobar la cota de los terrenos comparando la altitud en la zona inundable según el alcance del oleaje y los terrenos al interior por si se da el caso de que, por efecto de la gravedad, el agua que alcanza esa distancia se adentra más al interior rellenando terrenos bajos, cubetas, etc. contiguos del mismo modo que se ha hecho en el punto 6.

En este caso tenemos que la cota máxima que alcanza el oleaje, y que es superado hasta alcanzar su límite interior (Δx), se encuentra aproximadamente a 1,5 metros ascendiendo ligeramente hacia el interior (aunque prácticamente en llano) con una pendiente media de apenas el 0,2% durante 230 metros. El límite interior de Δx se encuentra en esta zona prácticamente llana, por lo que estos terrenos contiguos al Δx se les presupone inundables por la llegada del agua impulsada por el oleaje y que se dispersa por esta zona llana contigua al alcance del oleaje teórico.

En la zona E, la cota de inundación es de 3,16m. en este sector el terreno es más heterogéneo que en los tramos anteriores por situarse en el extremo oriental del delta y ser el límite de la zona construida de la localidad de Torre del Mar que tiene una pequeña urbanización y un camping en la zona más cercana al delta y al mar y, tierra adentro, parcelas que se están actualmente urbanizando.

En este transecto, el alcance del oleaje se sitúa en los casi 50m desde la línea de agua estimada para el año 2030 ubicándose el límite interior del oleaje durante los temporales más severos en el área de la mencionada pequeña urbanización, situada en el borde del agua en el año 2020 y circundada con escolleras que en el año 2030 se presuponen sobrepasadas por el agua debido a la regresión costera en la zona y el aumento del nivel del mar por efecto el cambio climático. La extensión de la inundación en el sector del transecto E viene dado por la hipótesis ‘1’.



Representación de la cota de inundación según Nielsen-Hanslow (azul) y el alcance del oleaje según C.E.M. (verde)

A partir de aquí es necesario comprobar la cota de los terrenos comparando la altitud en la zona inundable según el alcance del oleaje y los terrenos al interior por si se da el caso de que, por efecto de la gravedad, el agua que alcanza esa distancia se adentra más al interior rellenando terrenos bajos, cubetas, etc. contiguos del mismo modo que se ha hecho en el punto 6.

En este caso tenemos que la cota máxima que alcanza el oleaje y que es superado hasta alcanzar su límite interior (Δx) se encuentra aproximadamente en los 2,5 metros descendiendo al interior hasta los 2 metros en el límite de Δx, por lo que la gravedad impulsa el agua que ha llegado hasta la Δx hacia el interior por ser terrenos más bajos contiguos y por tanto formando balsas de agua de mar más al interior del alcance del oleaje teórico.

En la zona F, la cota de inundación es de 3,16m. la regresión de la costa y el aumento del nivel del mar a causa del cambio climático ha ocasionado que la línea de agua estimada en el año 2030 se posicione de forma que se haya perdido en ese año prácticamente la mitad de la playa actual. En el año 2030 se estima que aún se mantendría una cota en el interior de una parte de la playa de hasta 3 metros. Al interior, los terrenos descienden de cota hasta los 2 metros.

El alcance de las olas (Δx) en esta zona se ubica a casi 46 metros de la línea de agua estimada, situándose en la zona baja comentada en el anterior párrafo y que actualmente se utiliza como zona de aparcamiento de vehículos de los usuarios de la playa, por tanto, estaríamos en la hipótesis '2b' ya que aunque hay una zona de cota igual a la cota de inundación, las laterales son más bajas, por no mencionar que al tratarse de una playa de arena ésta es removida por el oleaje severo de los temporales y tiende a perder su cota y ser extendida por el oleaje. Así mismo el muro que contiene la arena de la playa para que no se disperse por la zona de aparcamiento tiene aperturas para los accesos a la playa por lo que, durante los temporales, son zonas de paso del agua del mar hacia el interior, superando esta línea de muro artificial. Dicho esto, dado que se dan tanto la hipótesis '1', en las zonas de playa más bajas y la hipótesis '2b' en las más altas (pero que el agua puede rodear a éstas), el parámetro del alcance de las olas (Δx) indica la extensión teórica de la inundación en todo el sector.



Representación de la cota de inundación según Nielsen-Hanslow
(azul) y el alcance del oleaje según C.E.M. (verde)

A partir de aquí es necesario comprobar la cota de los terrenos comparando la altitud en la zona inundable según el alcance del oleaje y los terrenos al interior por si se da el caso de que, por efecto de la gravedad, el agua que alcanza esa distancia se adentra más al interior rellenando terrenos bajos, cubetas, etc. contiguos del mismo modo que se ha hecho en el punto 6.

En este caso tenemos que puede penetrar el oleaje al interior del aparcamiento a tratarse de terrenos más bajos que la playa y dado que el alcance teórico del oleaje durante los temporales llega a esta explanad, se deduce que el agua se extenderá por toda ella por la acumulación constate por el aporte de las olas durante los temporales. Esto se aprecia en la fotografía satelital de mayo de 2022 una vez evaporada y desaparecida el agua acumulada donde se ven las acumulaciones de sal en dicha zona llana de aparcamiento:



En rojo se marcan las mayores acumulaciones de sal visibles.

En la zona G la cota de inundación es de 3,16m.

La configuración del terreno en aquí es similar a la anterior, aunque la zona de la playa con cota cercana a la cota de inundación es menor que en el caso anterior. El alcance de las olas (Δx) en esta zona se ubica a casi 50 metros de la línea de agua estimada, situándose en límite interior de la playa por lo que nos encontraríamos en el supuesto '1'.



Representación de la cota de inundación según Nielsen-Hanslow (azul) y el alcance del oleaje según C.E.M. (verde)

A partir de aquí es necesario comprobar la cota de los terrenos comparando la altitud en la zona inundable según el alcance del oleaje y los terrenos al interior por si se da el caso de que, por efecto de la gravedad, el agua que alcanza esa distancia se adentra más al interior rellenando terrenos bajos, cubetas, etc. contiguos del mismo modo que se ha realizado en el punto 6.

En este caso tenemos que, aunque el agua del mar directamente por este transecto no se adentraría, teóricamente, al interior del aparcamiento, sí que entraría desde el transecto anterior extendiéndose por toda la zona plana y por lo tanto inundándola como ya ocurrió con el temporal de abril de 2022 y que en la imagen de satélite que se ha mostrado anteriormente se aprecian las costras de sal que quedaron tras desaparecer el agua de la inundación.

Una vez analizados pormenorizadamente todos los sectores del tramo en estudio se representan en el siguiente mapa las superficies probablemente inundables según los cálculos de cota de inundación, alcance de la inundación y el análisis de dichos resultados cruzados con la topografía del terreno durante los mayores temporales registrados en la zona:



7.3 Estimación de la cota de inundación y el alcance del oleaje en el año 2040.

Para estimar la cota de inundación y el alcance del oleaje en el año 2040 se ha considerado la tendencia regresiva de la costa y el aumento del nivel del mar. A partir de esta línea de agua en el año 2040 se realizan los cálculos de cota y alcance de oleaje con los datos de oleaje histórico existente hasta la fecha de redacción del estudio ya que estimar el incremento de la severidad de los temporales (medidos con el cálculo del aumento de la altura de ola significante y del periodo de la onda debido al cambio climático) para ser añadidos a los cálculos ya realizados de estimación de regresión de la costa y aumento de la cota del nivel del mar, supera el objetivo del presente trabajo. Por ello se realizan los cálculos con el mayor temporal del que existen registros en la zona en estudio, pero sin añadir parametrización debida al cambio climático a los datos de altura significante y periodo pico del temporal más severo de la zona.

El estudio para la determinación del alcance del nivel máximo que asciende el mar durante el temporal más severo, analizando los diferentes planteamientos teóricos de distintas formulaciones empíricas, contrastados con el Atlas de Inundación en el Litoral Peninsular Español desarrollado por la Universidad de Cantabria, se pueden realizar las siguientes aseveraciones:

- La zona de estudio queda encuadrada en el Área V, subzona b, según el Atlas de Inundacióndel litoral peninsular español efectuado por el Grupo de Ingeniería Oceanográfica de la Universidad de Cantabria.
- Para la obtención del régimen medio de cota de inundación se ha tenido en cuenta los datos registrados por el mareógrafo y boya de Málaga.
- Para la obtención de datos de simulación de oleaje en los últimos años se ha utilizado la información del punto SIMAR 2035080 ya que es el punto más próximo a la zona objeto del estudio de cota máxima del nivel del mar.
- A efectos del cálculo del alcance del oleaje durante el temporal más severo acontecido, se han considerado las variaciones del nivel del mar y del oleaje registrados, para lo que se han tenido en cuenta los valores significantes de altura de ola desde que existen registros. Se han utilizado los datos registrados por Puertos del Estados, que datan del año 1958 hasta la actualidad, siendo, además públicos y disponibles para cualquier persona.

Respecto al cálculo de la cota de inundación y el alcance de la inundación hay que tener en cuenta las siguientes precauciones de las que se da cuenta en la información de Puertos del Estado para los datos de partida que han sido usados, su relación con los cálculos y resultados finales, así como con el objetivo de este estudio:

- Los modelos generados por los puntos SIMAR *"tienden a subestimar los picos en las velocidades de viento y en las alturas de ola en situaciones de temporal muy extremo",* es decir, los datos de altura de ola y viento que ofrece durante los mayores temporales suelen ser inferiores a la altura real de las olas o la velocidad real del viento. Esto es importante en el objetivo que nos ocupa puesto que, con los datos subestimados de los temporales, la extensión de la inundación también estará "subestimada".
- Además, para el cálculo de la cota de inundación y del alcance de la inundación se usan la altura de ola significante (Hs) y el periodo pico (Tp) principalmente. Así Puertos del Estado explica que la altura de ola significante (Hs) *"equivale aproximadamente la altura media del tercio de olas más altas"* y el periodo pico (Tp) *"el periodo del grupo de ondas con más energía".* Por lo que el uso de Hs (ya subestimado porque los valores extremos de los puntos SIMAR los subestiman), al ser una media, también subestima aún más los resultados de cota y alcance de la inundación y con el Tp ocurre lo mismo al tratarse de una media de un grupo de ondas (no de la máxima) por lo que el límite de la inundación

por los mayores temporales conocidos está "doblemente" subestimado (además de la subestimación de los datos extremos que tiene el uso de los puntos SIMAR).

Dado que los datos de partida de los temporales de Puertos del Estado son los mismos que los extraídos anteriormente en el punto "6 - Estudio de cálculo de máxima elevación del mar", se remite a ese ítem para su conocimiento. A continuación, se procede directamente al cálculo de la cota de inundación de cada uno de los transectos (los mismos que en el punto 6).

7.3.1 Cálculo de la cota de inundación en el año 2040 asociada a cada evento de temporal estimado hasta la actualidad.

En el apartado 6 se seleccionó, de los eventos de temporal marítimo, el que puede ocasionar cotas de inundación máximas. Además, se ha calculado, para cada evento de temporal, el nivel del mar en ese momento como suma de la marea astronómica y meteorológica asociada, siendo todos estos datos directamente consultables en la web www.puertos.es.

Falta el sumando del run-up para determinar exactamente la cota de inundación en el año 2040, que denominaremos S_{CI}, siguiendo siempre la nomenclatura propuesta en el Atlas de Inundación del Litoral Español redactado en su momento por el Grupo de Ingeniería Oceanográfica de la Universidad de Cantabria.

Para calcular el valor del run-up, existen varios modelos o formulaciones que determinan éste en función de varios parámetros o características del oleaje incidente. De las formulaciones más modernas, está muy extendida y aceptada la de Nielsen-Hanslow (1991), que estima el valor del run-up con una banda de confianza del 2% ($R_{2\%}$), en función de la altura de ola significante y la longitud de onda asociada a dicho oleaje, por lo que es necesario conocer el periodo de pico asociado, todo a pie de playa. Por tanto, es totalmente aplicable este modelo, considerando las alturas de olas significantes ya tomadas y su periodo de pico asociado para cada uno de los eventos de temporal.

Formulación de Nielsen-Hanslow (1991):

$$R_{uo}=0{,}47\cdot(Hs\cdot L)^{1/2}\cdot \mathrm{tg}\beta \qquad \text{si } \mathrm{tg}\beta > 1/10$$

$$R_{uo}=0{,}04\cdot(Hs\cdot L)^{1/2} \qquad \text{si } \mathrm{tg}\beta < 1/10$$

Y para la banda de confianza del 2%:

$$Ru_{2\%} = 1{,}98\cdot R_{uo}$$

Teniendo en cuenta que en las playas de estudio la pendiente del fondo es inferior a 1/10, la formulación resultante es:

$$R_{2\%} = 1{,}98\cdot 0{,}04\cdot(H_s\cdot L)^{1/2}$$

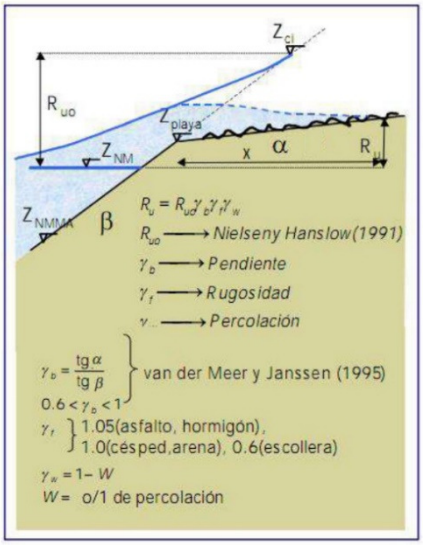
Donde:

L = Longitud de onda local = $1{,}56\cdot T_p^2$

H_s = Altura de ola significante de cada evento de temporal.

T_p = Periodo de pico asociado a cada evento de temporal.

A esta formulación, se le aplican además los factores de corrección de Van Der Meer y Jansen: pendientes, rugosidad y percolación, para tener en cuenta una aproximación más adecuada a la configuración del perfil de playa formada por doble pendiente (húmeda y seca), la rugosidad del terreno, en este caso, de la arena de la playa y la percolación en la superficie de incidencia dada la anchura de la playa de arena, ya que es lo suficientemente significativa como para tener un cierto efecto en la inundación del mar sobre los terrenos emergidos formados por dicha arena. Esto se resume en el siguiente esquema:



El factor de pendiente de Van der Meer y Janssen relaciona la pendiente de la playa seca con la pendiente de la playa sumergida:

$$\gamma_b = \frac{\tan\alpha}{\tan\beta}$$

El valor de este coeficiente estará comprendido entre 0.6 y 1. En el caso de obtenerse un valor inferior a 0.6 tras la aplicación de la relación de pendientes, se tomará el valor inferior del intervalo dado, es decir, 0.6. Del mismo modo se actuará en el caso de obtener un valor superior a 1, se tomará este valor máximo.

Debido a la diferente configuración del litoral en el tramo de costa que nos ocupa, se han de tomar en consideración diferentes zonas en las que calcular las pendientes de la playa para definir el factor de pendiente en cada zona homogénea.

El factor de rugosidad de la superficie de incidencia γ_f, tomará el valor de 1, al estar la playa formada por arenas limpias.

El factor de percolación γ_w se calcula con el coeficiente de percolación W; este coeficiente W está directamente relacionado con el diámetro efectivo de la arena y el coeficiente de Hazen. Existen suficientes estudios en los que se ha calculado el coeficiente de percolación de los terrenos.

Rango de valores del coeficiente de permeabilidad en suelos

Tipo de suelo	k (cm/s)
Grava mal graduada (GP)	≥ 1
Grava uniforme (GP)	0,2-1
Grava bien graduada (GW)	0,05-0,3
Arena uniforme (SP)	5×10^{-3}-0,2
Arena bien graduada (SW)	10^{-3}-0,1
Arena limosa (SM)	10^{-3}-5×10^{-3}
Arena arcillosa (SC)	10^{-4}-10^{-3}
Limo de baja plasticidad (ML)	5×10^{-5}-10^{-4}
Arcillas de baja plasticidad (CL)	10^{-5}-10^{-3}

(*L. González de Vallejo et al*, Ingeniería Geológica, Madrid 2002)

En el caso de arena de playa, que se encuentra lavada por el agua del mar y removida por el viento marino, se considera genéricamente que es del tipo 'arena bien graduada (SW)' de la tabla anterior.

Aplicando la formulación de Nielsen-Hanslow, podemos obtener el valor del run-up para cada evento de temporal (antes de aplicar los coeficientes de Van Der Meer y Janssen), que a su vez debe ser sumando a la componente del nivel del mar (S_{NM}) ya calculado para estimar definitivamente el valor de la cota de inundación de cada uno de los eventos de temporal para cada zona con pendiente homogénea; calculado mediante la obtención de los resultados necesarios de clima marítimo en primer lugar y la aplicación de un modelo o formulación de cálculo adecuado posteriormente.

Para el cálculo del run-up es necesario calcular la longitud de onda local asociada al oleaje:

$$L=1.56 \cdot T_p^2$$

Donde T_p es el periodo pico asociado a cada evento de temporal.

En la tabla siguiente se añade la columna 'L' con el resultado de la longitud de onda para cada evento de temporal:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10
1:00	27	3	2019	5,24	11,01	110	84,7	0,847	0,416	189,10
12:00	19	11	2021	5,29	10,01	110	105,6	1,056	0,625	156,31
3:00	11	10	2008	5,12	9,47	105	112	1,120	0,689	139,90
21:00	20	4	2017	4,93	10,51	110	92,7	0,927	0,496	172,32
19:00	20	4	2017	4,93	10,42	111	92,7	0,927	0,496	169,38
12:00	8	4	2015	4,9	10,31	110	87,3	0,873	0,442	165,82

Tabla de máximos temporales desde que existen registros en el punto SIMAR 2035080.

Cálculo del run-up corregido mediante los factores de Van der Meer.

Para la realización de los cálculos de alcance de inundación, se ha dividido 7 zonas en función de la homogeneidad de la costa sumergida, la emergida, del tipo geomorfológico, la morfología de las zonas antropizadas y, además, crear una densidad de medidas para que estas sean suficientes para caracterizar el alcance del oleaje y la cota de inundación con alta precisión en todo el tramo en estudio. A cada una de las zonas se le ha realizado un cálculo de alcance. Esto se ha hecho así ya que el factor de pendiente de Van der Meer y Janssen puede modificar el run-up (si su valor es menor que 1) por lo que ha de calcularse el run-up corregido para cada una de estas zonas.

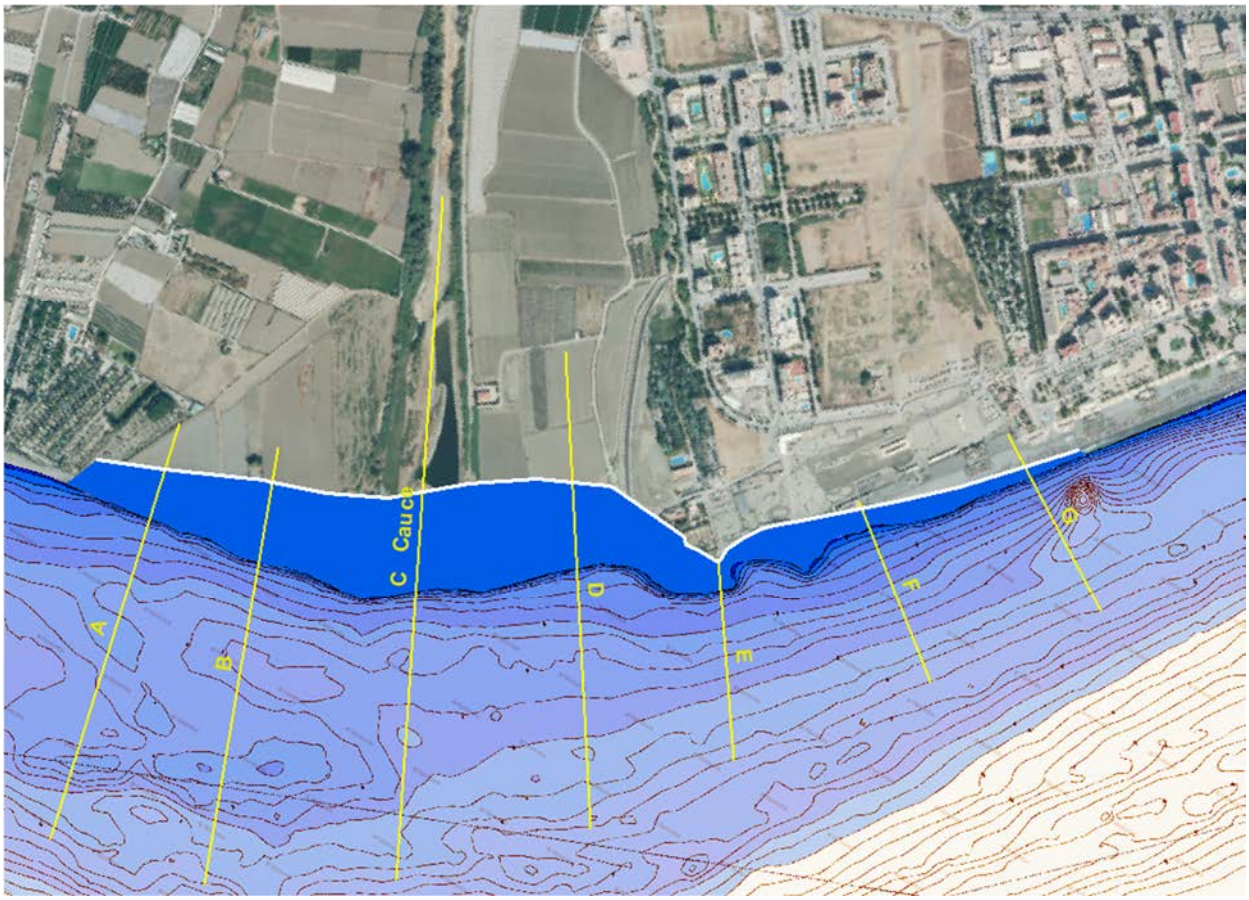
Las zonas de medición vienen dadas por las pendientes de los terrenos sumergido y emergido. Las pendientes se han calculado mediante batimetría extraídos del visor de la empresa italiana Navionics (perteneciente a Garmin Ltd.), concretamente de la capa SonarChart™, cuyas curvas batimétricas tienen un intervalo de 50 cm creadas mediante "sistema propietario" de Navionics que procesa los datos de registros de sónar procedentes de aportaciones realizadas por navegantes adheridos a Navionics que actualizada periódicamente sus cartas náuticas. Por ello se puede considerar que la batimetría representadas es la más reciente de la zona. (*Los datos e imágenes de batimetría han sido cedidos por Navionics exclusivamente para este estudio no siendo posible su uso para cualquier otro fin incluida la navegación*).

La topografía se ha realizado a partir de un modelo digital del terreno elaborado a partir de las nubes de puntos 3D obtenidos con sistema LiDAR; para ello se ha utilizado la nube de puntos publicada por el Instituto Geográfico Nacional correspondiente a la "2ª Cobertura (2015-Actualidad)", en nuestro caso los datos se obtuvieron en el año 2020, siendo éstos los datos más

recientes publicados en la fecha de redacción de este estudio. Con estos datos se realiza un modelo digital de elevaciones con el que se calcula mediante software las curvas de nivel.

Como se ha dicho en la introducción, la morfología de la zona emergida y la sumergida se hipotetiza que se mantiene invariable excepto en el tramo entre la nueva línea de agua y la anterior pero, dado que para los cálculos se utilizan pendientes medias (desde la cota 0 hasta otra determinada sin tener en cuenta las características intermedias) no es relevante su morfología.

La ubicación de las zonas para el cálculo de las pendientes sumergida y emergida se representa en la siguiente imagen que incluye la batimetría:



Transectos (en amarillo) y línea de agua estimada en 2040 (en blanco).

Los datos de partida (ver tabla de la página 194) son los mismos para todas las zonas, y serán los que se usen para el cálculo del run-up en cada zona definida por los perfiles reseñados y que se desarrolla a continuación.

Zona A.

En primer lugar, calculamos las pendientes de la playa húmeda y de la seca. La pendiente de la playa húmeda nos indicará qué formula de Nielsen-Hanslow ha de usarse, dependiendo si esta pendiente es mayor o menor del 10%.

pendiente playa húmeda	
profundidad (m)	7,00
distancia (m)	608
pendiente %	1,151

La pendiente de la playa húmeda es menor del 10% por lo que se usará para el cálculo del run-up la fórmula del Nielsen-Hanslow para pendientes menores de ese valor:

$$R_{uo}=0,04\cdot(Hs\cdot L)^{1/2}$$

La pendiente de la playa seca es:

pendiente playa seca	
altura máx. playa (m)	2,00
distancia (m)	73
pendiente %	2,740

Después se calcula el run-up para cada evento de temporal.

Dado que se busca la cota de inundación y el alcance de los mayores temporales conocidos desde que existen registros, se toman para el cálculo del run-up (R_{uo}) los 4 eventos cuya altura de ola significante y/o periodo pico es mayor:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)	R_{uo}
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78	1,31
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22	1,19
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10	1,23
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10	1,19

Los factores de corrección de Van der Meer y Janssen para esta zona son:

- Factor por pendiente:

$$\gamma_b=\frac{\tan\alpha}{\tan\beta}=2,4$$

al dar como resultado un valor superior a 1, y este coeficiente ha de estar en el intervalo entre un mínimo de 0,6 y un máximo de 1, se toma como coeficiente por pendiente:

$$\gamma_b=1$$

- Factor de rugosidad:

El factor de rugosidad de la superficie de incidencia γ_f, tomará el valor de 1, al estar la playa formada por arenas limpias.

- Factor de percolación:

Como ya se ha dicho más arriba, este factor está relacionado con las características del terreno, y concretamente, en el caso de la arena, con el diámetro de sus granos y su disposición en el suelo. Así existen tablas en las que se define de manera genérica este factor en función de las características de la arena:

Rango de valores del coeficiente de permeabilidad en suelos

Tipo de suelo	k (cm/s)
Grava mal graduada (GP)	≥ 1
Grava uniforme (GP)	0,2-1
Grava bien graduada (GW)	0,05-0,3
Arena uniforme (SP)	5×10^{-3}-0,2
Arena bien graduada (SW)	10^{-3}-0,1
Arena limosa (SM)	10^{-3}-5×10^{-3}
Arena arcillosa (SC)	10^{-4}-10^{-3}
Limo de baja plasticidad (ML)	5×10^{-5}-10^{-4}
Arcillas de baja plasticidad (CL)	10^{-5}-10^{-8}

En nuestro caso se utilizará como coeficiente de percolación aquel que viene dado por la arena de la playa. Como ésta no viene explícitamente desarrollada en dicha tabla, se considera que se trata de una arena bien graduada, limpia, dado el efecto de lavado que tiene el agua del mar sobre ésta y cuyos valores típicos están comprendidos entre 0,001 y 0,1.

Dado que el intervalo de los valores de k descritos en la tabla es amplio, tomamos el valor 0,01 de dicho intervalo por ser el valor medio del mismo y considerando que la proporción media de arcillas en el terreno se encuentra mayoritariamente entre el 10% y el 20%, por lo que su presencia reduce la permeabilidad del suelo. Aplicando la siguiente formulación se obtiene el coeficiente de percolación (W) medio y, por tanto, un factor medio de percolación (γ_w) en la zona:

$$W=k \Rightarrow 0{,}01 \text{ cm/s}$$

$$\gamma_w=1-W \Rightarrow \gamma_w = 1 - 0{,}01 = 0{,}99$$

Un mayor valor del factor reductor de percolación implica una mayor reducción del valor de run-up corregido por estar directamente relacionados:

$$R_u = R_{uo} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_w$$

En esta zona, aplicando los factores de Van der Meer y Janssen:

$$R_u = R_{uo} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_w = R_{uo} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0{,}99$$

Con estos datos, para los eventos de temporal considerados se obtiene el run-up corregido (R_u) y con éste el run-up cuyo valor es superado en un porcentaje de tiempo inferior al 2% del evento:

$$R_{u2\%} = 1{,}98 \cdot R_u$$

Aplicando esta formulación se obtiene para cada evento de temporal en esta zona:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)		R_{uo}	R_U	$Ru_{2\%}$ (m)
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78		1,31	1,30	2,57
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22		1,19	1,18	2,34
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10		1,23	1,22	2,42
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10		1,19	1,18	2,34

A este run-up ($R_{u2\%}$) le sumamos el valor de la componente de nivel del mar ya calculado (S_{NM}), para estimar definitivamente el valor de la cota de inundación para cada uno de los máximos eventos registrados:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)		R_{uo}	R_U	$Ru_{2\%}$ (m)	S_{CI} (m)
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78		1,31	1,30	2,57	3,16
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22		1,19	1,18	2,34	3,08
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10		1,23	1,22	2,42	2,96
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10		1,19	1,18	2,34	2,93

Vistos los resultados tras la aplicación de las fórmulas y factores correctores desarrollados anteriormente se puede decir que el mayor temporal conocido que ha afectado a esta zona del tramo de la costa en estudio del término municipal de Vélez-Málaga es el acontecido el 4 de abril de 2022 que alcanzó su mayor intensidad a las 15:00 horas con una cota de inundación de unos 3,16 m.n.m.a.

Por lo tanto, este temporal de abril de 2022 será el que se desarrolle en el punto 7.3.2 donde se calcula el desplazamiento de la ola por la playa seca, por considerarse el mayor temporal conocido

en esta zona desde que existen registros de boyas y con el que se tendrá una visión de la inundación de los terrenos en este sector del litoral.

Zona B.

En primer lugar, calculamos las pendientes de la playa húmeda y de la seca. La pendiente de la playa húmeda nos indicará qué formula de Nielsen-Hanslow ha de usarse, dependiendo si esta pendiente es mayor o menor del 10%.

pendiente playa húmeda	
profundidad (m)	7,00
distancia (m)	640
pendiente %	1,095

La pendiente de la playa húmeda es menor del 10% por lo que se usará para el cálculo del run-up la fórmula del Nielsen-Hanslow para pendientes menores de ese valor:

$$R_{uo}=0,04\cdot(Hs\cdot L)^{1/2}$$

La pendiente de la playa seca es:

pendiente playa seca	
altura máx. playa (m)	2,00
distancia (m)	54
pendiente %	3,704

Después se calcula el run-up para cada evento de temporal.

Dado que se busca la cota de inundación y el alcance de los mayores temporales conocidos desde que existen registros, se toman para el cálculo del run-up (R_{uo}) los 4 eventos cuya altura de ola significante y/o periodo pico es mayor:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)		R_{uo}
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78		1,31
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22		1,19
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10		1,23
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10		1,19

Los factores de corrección de Van der Meer y Janssen para esta zona son:

- Factor por pendiente:

$$\gamma_b=\frac{\tan\alpha}{\tan\beta}=3,4$$

al dar como resultado un valor superior a 1, y este coeficiente ha de estar en el intervalo entre un mínimo de 0,6 y un máximo de 1, se toma como coeficiente por pendiente

$$\gamma_b=1$$

- Factor de rugosidad:

El factor de rugosidad de la superficie de incidencia γ_f, tomará el valor de 1, al estar la playa formada por arenas limpias.

- Factor de percolación:

Como ya se ha dicho más arriba, este factor está relacionado con las características del terreno, y concretamente, en el caso de la arena, con el diámetro de sus granos y su disposición en el suelo. Así existen tablas en las que se define de manera genérica este factor en función de las características de la arena:

Rango de valores del coeficiente de permeabilidad en suelos

Tipo de suelo	k (cm/s)
Grava mal graduada (GP)	≥ 1
Grava uniforme (GP)	0,2-1
Grava bien graduada (GW)	0,05-0,3
Arena uniforme (SP)	5×10^{-3}-0,2
Arena bien graduada (SW)	10^{-3}-0,1
Arena limosa (SM)	10^{-3}-5×10^{-3}
Arena arcillosa (SC)	10^{-4}-10^{-3}
Limo de baja plasticidad (ML)	5×10^{-5}-10^{-4}
Arcillas de baja plasticidad (CL)	10^{-5}-10^{-8}

En nuestro caso se utilizará como coeficiente de percolación aquel que viene dado por la arena de la playa. Como ésta no viene explícitamente desarrollada en dicha tabla, se considera que se trata de una arena bien graduada, limpia, dado el efecto de lavado que tiene el agua del mar sobre ésta y cuyos valores típicos están comprendidos entre 0,001 y 0,1.

Dado que el intervalo de los valores de k descritos en la tabla es amplio, tomamos el valor 0,01 de dicho intervalo por ser el valor medio del mismo y considerando que la proporción media de arcillas en el terreno se encuentra mayoritariamente entre el 10% y el 20%, por lo que su presencia reduce la permeabilidad del suelo. Aplicando la siguiente formulación se obtiene el coeficiente de percolación (W) medio y, por tanto, un factor medio de percolación (γ_w) en la zona:

$$W=k \Rightarrow 0{,}01 \text{ cm/s}$$

$$\gamma_w=1-W \Rightarrow \gamma_w = 1 - 0{,}01 = 0{,}99$$

Un mayor valor del factor reductor de percolación implica una mayor reducción del valor de run-up corregido por estar directamente relacionados:

$$R_u = R_{uo} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_w$$

En esta zona, aplicando los factores de Van der Meer y Janssen:

$$R_u = R_{uo} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_w = R_{uo} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0{,}99$$

Con estos datos, para los eventos de temporal considerados se obtiene el run-up corregido (R_u) y con éste el run-up cuyo valor es superado en un porcentaje de tiempo inferior al 2% del evento:

$$R_{u2\%} = 1{,}98 \cdot R_u$$

Aplicando esta formulación se obtiene para cada evento de temporal en esta zona:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)		R_{uo}	R_U	$Ru_{2\%}$ (m)
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78		1,31	1,30	2,57
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22		1,19	1,18	2,34
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10		1,23	1,22	2,42
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10		1,19	1,18	2,34

A este run-up ($R_{u2\%}$) le sumamos el valor de la componente de nivel del mar ya calculado (S_{NM}), para estimar definitivamente el valor de la cota de inundación para cada uno de los máximos eventos registrados:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)		R_{uo}	R_U	$Ru_{2\%}$ (m)	S_{CI} (m)
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78		1,31	1,30	2,57	3,16
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22		1,19	1,18	2,34	3,08
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10		1,23	1,22	2,42	2,96
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10		1,19	1,18	2,34	2,93

Vistos los resultados tras la aplicación de las fórmulas y factores correctores desarrollados anteriormente se puede decir que el mayor temporal conocido que ha afectado a esta zona del tramo de la costa en estudio del término municipal de Vélez-Málaga es el acontecido el 4 de abril de 2022 que alcanzó su mayor intensidad a las 15:00 horas con una cota de inundación de unos 3,16 m.n.m.a.

Por lo tanto, este temporal de abril de 2022 será el que se desarrolle en el punto 7.3.2 donde se calcula el desplazamiento de la ola por la playa seca, por considerarse el mayor temporal conocido en esta zona desde que existen registros de boyas y con el que se tendrá una visión de la inundación de los terrenos en este sector del litoral.

Zona C.

En primer lugar, calculamos las pendientes de la playa húmeda y de la seca. La pendiente de la playa húmeda nos indicará qué formula de Nielsen-Hanslow ha de usarse, dependiendo si esta pendiente es mayor o menor del 10%.

pendiente playa húmeda	
profundidad (m)	7,00
distancia (m)	610
pendiente %	1,148

La pendiente de la playa húmeda es menor del 10% por lo que se usará para el cálculo del run-up la fórmula del Nielsen-Hanslow para pendientes menores de ese valor:

$$R_{uo}=0{,}04\cdot(Hs\cdot L)^{1/2}$$

La pendiente de la playa seca es:

pendiente playa seca	
altura máx. playa (m)	2,00
distancia (m)	465
pendiente %	0,430

Después se calcula el run-up para cada evento de temporal.

Dado que se busca la cota de inundación y el alcance de los mayores temporales conocidos desde que existen registros, se toman para el cálculo del run-up (R_{uo}) los 4 eventos cuya altura de ola significante y/o periodo pico es mayor:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)		R_{uo}
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78		1,31
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22		1,19
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10		1,23
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10		1,19

Los factores de corrección de Van der Meer y Janssen para esta zona son:

- Factor por pendiente:

$$\gamma_b = \frac{\tan\alpha}{\tan\beta} = 0{,}4$$

al dar como resultado un valor inferior a 0,6 y este coeficiente ha de estar en el intervalo entre un mínimo de 0,6 y un máximo de 1, se toma como coeficiente por pendiente:

$$\gamma_b = 0{,}6$$

- Factor de rugosidad:

El factor de rugosidad de la superficie de incidencia γ_f, tomará el valor de 1, al estar la playa formada por arenas limpias.

- Factor de percolación:

Como ya se ha dicho más arriba, este factor está relacionado con las características del terreno, y concretamente, en el caso de la arena, con el diámetro de sus granos y su disposición en el suelo. Así existen tablas en las que se define de manera genérica este factor en función de las características de la arena:

Rango de valores del coeficiente de permeabilidad en suelos

Tipo de suelo	k (cm/s)
Grava mal graduada (GP)	≥ 1
Grava uniforme (GP)	0,2-1
Grava bien graduada (GW)	0,05-0,3
Arena uniforme (SP)	5×10^{-3}-0,2
Arena bien graduada (SW)	10^{-3}-0,1
Arena limosa (SM)	10^{-3}-5×10^{-3}
Arena arcillosa (SC)	10^{-4}-10^{-3}
Limo de baja plasticidad (ML)	5×10^{-5}-10^{-4}
Arcillas de baja plasticidad (CL)	10^{-5}-10^{-3}

En nuestro caso se utilizará como coeficiente de percolación aquel que viene dado por la arena de la playa. Como ésta no viene explícitamente desarrollada en dicha tabla, se considera que se trata de una arena bien graduada, limpia, dado el efecto de lavado que tiene el agua del mar sobre ésta y cuyos valores típicos están comprendidos entre 0,001 y 0,1.

Dado que el intervalo de los valores de k descritos en la tabla es amplio, tomamos el valor 0,01 de dicho intervalo por ser el valor medio del mismo y considerando que la proporción media de arcillas en el terreno se encuentra mayoritariamente entre el 10% y el 20%, por lo que su presencia reduce la permeabilidad del suelo. Aplicando la siguiente formulación se obtiene el coeficiente de percolación (W) medio y, por tanto, un factor medio de percolación (γ_w) en la zona:

$$W = k \Rightarrow 0{,}01 \text{ cm/s}$$

$$\gamma_w = 1 - W \Rightarrow \gamma_w = 1 - 0{,}01 = 0{,}99$$

Un mayor valor del factor reductor de percolación implica una mayor reducción del valor de run-up corregido por estar directamente relacionados:

$$R_u = R_{uo} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_w$$

En esta zona, aplicando los factores de Van der Meer y Janssen:

$$R_u = R_{uo} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_w = R_{uo} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0{,}99$$

Con estos datos, para los eventos de temporal considerados se obtiene el run-up corregido (R_u) y con éste el run-up cuyo valor es superado en un porcentaje de tiempo inferior al 2% del evento:

$$R_{u2\%} = 1{,}98 \cdot R_u$$

Aplicando esta formulación se obtiene para cada evento de temporal en esta zona:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)		R_{uo}	R_U	$Ru_{2\%}$ (m)
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78		1,31	0,78	1,54
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22		1,19	0,71	1,40
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10		1,23	0,73	1,45
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10		1,19	0,71	1,40

A este run-up ($R_{u2\%}$) le sumamos el valor de la componente de nivel del mar ya calculado (S_{NM}), para estimar definitivamente el valor de la cota de inundación para cada uno de los máximos eventos registrados:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)		R_{uo}	R_U	$Ru_{2\%}$ (m)	S_{CI} (m)
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78		1,31	0,78	1,54	2,13
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22		1,19	0,71	1,40	2,14
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10		1,23	0,73	1,45	1,99
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10		1,19	0,71	1,40	1,99

Vistos los resultados tras la aplicación de las fórmulas y factores correctores desarrollados anteriormente se puede decir que el mayor temporal conocido que ha afectado a esta zona del tramo de la costa en estudio del término municipal de Vélez-Málaga es el acontecido el 4 de abril de 2022 que alcanzó su mayor intensidad a las 15:00 horas con una cota de inundación de unos 2,13 m.n.m.a.

Por lo tanto, este temporal de abril 2022 será el que se desarrolle en el punto 7.3.2 donde se calcula el desplazamiento de la ola por la playa seca, por considerarse el mayor temporal conocido en esta zona desde que existen registros de boyas y con el que se tendrá una visión de la inundación de los terrenos en este sector del litoral.

Zona D.

En primer lugar, calculamos las pendientes de la playa húmeda y de la seca. La pendiente de la playa húmeda nos indicará qué formula de Nielsen-Hanslow ha de usarse, dependiendo si esta pendiente es mayor o menor del 10%.

pendiente playa húmeda	
profundidad (m)	7,00
distancia (m)	544
pendiente %	1,287

La pendiente de la playa húmeda es menor del 10% por lo que se usará para el cálculo del run-up la fórmula del Nielsen-Hanslow para pendientes menores de ese valor:

$$R_{uo}=0{,}04\cdot(Hs\cdot L)^{1/2}$$

La pendiente de la playa seca es:

pendiente playa seca	
altura máx. playa (m)	2,00
distancia (m)	204
pendiente %	0,980

Después se calcula el run-up para cada evento de temporal.

Dado que se busca la cota de inundación y el alcance de los mayores temporales conocidos desde que existen registros, se toman para el cálculo del run-up (R_{uo}) los 4 eventos cuya altura de ola significante y/o periodo pico es mayor:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)		R_{uo}
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78		1,31
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22		1,19
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10		1,23
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10		1,19

Los factores de corrección de Van der Meer y Janssen para esta zona son:

- Factor por pendiente:

$$\gamma_b = \frac{\tan\alpha}{\tan\beta} = 0{,}8$$

al dar como resultado un valor dentro del intervalo entre un mínimo de 0,6 y un máximo de 1, se toma como coeficiente por pendiente:

$$\gamma_b = 0{,}8$$

- Factor de rugosidad:

El factor de rugosidad de la superficie de incidencia γ_f, tomará el valor de 1, al estar la playa formada por arenas limpias.

- Factor de percolación:

Como ya se ha dicho más arriba, este factor está relacionado con las características del terreno, y concretamente, en el caso de la arena, con el diámetro de sus granos y su disposición en el suelo. Así existen tablas en las que se define de manera genérica este factor en función de las características de la arena:

Rango de valores del coeficiente de permeabilidad en suelos

Tipo de suelo	k (cm/s)
Grava mal graduada (GP)	≥ 1
Grava uniforme (GP)	0,2-1
Grava bien graduada (GW)	0,05-0,3
Arena uniforme (SP)	5×10^{-3}-0,2
Arena bien graduada (SW)	10^{-3}-0,1
Arena limosa (SM)	10^{-3}-5×10^{-3}
Arena arcillosa (SC)	10^{-4}-10^{-3}
Limo de baja plasticidad (ML)	5×10^{-5}-10^{-4}
Arcillas de baja plasticidad (CL)	10^{-5}-10^{-8}

En nuestro caso se utilizará como coeficiente de percolación aquel que viene dado por la arena de la playa. Como ésta no viene explícitamente desarrollada en dicha tabla, se considera que se trata de una arena bien graduada, limpia, dado el efecto de lavado que tiene el agua del mar sobre ésta y cuyos valores típicos están comprendidos entre 0,001 y 0,1.

Dado que el intervalo de los valores de k descritos en la tabla es amplio, tomamos el valor 0,01 de dicho intervalo por ser el valor medio del mismo y considerando que la proporción media de arcillas en el terreno se encuentra mayoritariamente entre el 10% y el 20%, por lo que su presencia reduce la permeabilidad del suelo. Aplicando la siguiente formulación se obtiene el

coeficiente de percolación (W) medio y, por tanto, un factor medio de percolación (γ_w) en la zona:

$$W=k \Rightarrow 0{,}01 \text{ cm/s}$$

$$\gamma_w=1-W \Rightarrow \gamma_w = 1 - 0{,}01 = 0{,}99$$

Un mayor valor del factor reductor de percolación implica una mayor reducción del valor de run-up corregido por estar directamente relacionados:

$$R_u = R_{uo} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_w$$

En esta zona, aplicando los factores de Van der Meer y Janssen:

$$R_u = R_{uo} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_w = R_{uo} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0{,}99$$

Con estos datos, para los eventos de temporal considerados se obtiene el run-up corregido (R_u) y con éste el run-up cuyo valor es superado en un porcentaje de tiempo inferior al 2% del evento:

$$R_{u2\%} = 1{,}98 \cdot R_u$$

Aplicando esta formulación se obtiene para cada evento de temporal en esta zona:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)		R_{uo}	R_U	$Ru_{2\%}$ (m)
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78		1,31	0,99	1,96
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22		1,19	0,90	1,78
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10		1,23	0,93	1,84
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10		1,19	0,90	1,78

A este run-up ($R_{u2\%}$) le sumamos el valor de la componente de nivel del mar ya calculado (S_{NM}), para estimar definitivamente el valor de la cota de inundación para cada uno de los máximos eventos registrados:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)		R_{uo}	R_U	$Ru_{2\%}$ (m)	S_{CI} (m)
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78		1,31	0,99	1,96	2,55
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22		1,19	0,90	1,78	2,52
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10		1,23	0,93	1,84	2,39
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10		1,19	0,90	1,78	2,37

Vistos los resultados tras la aplicación de las fórmulas y factores correctores desarrollados anteriormente se puede decir que el mayor temporal conocido que ha afectado a esta zona del tramo de la costa en estudio del término municipal de Vélez-Málaga es el acontecido el 4 de abril de 2022 que alcanzó su mayor intensidad a las 15:00 horas con una cota de inundación de unos 2,55 m.n.m.a.

Por lo tanto, este temporal de abril de 2022 será el que se desarrolle en el punto 7.3.2 donde se calcula el desplazamiento de la ola por la playa seca, por considerarse el mayor temporal conocido en esta zona desde que existen registros de boyas y con el que se tendrá una visión de la inundación de los terrenos en este sector del litoral.

Zona E.

En primer lugar, calculamos las pendientes de la playa húmeda y de la seca. La pendiente de la playa húmeda nos indicará qué formula de Nielsen-Hanslow ha de usarse, dependiendo si esta pendiente es mayor o menor del 10%.

pendiente playa húmeda	
profundidad (m)	7,00
distancia (m)	312
pendiente %	2,244

La pendiente de la playa húmeda es menor del 10% por lo que se usará para el cálculo del run-up la fórmula del Nielsen-Hanslow para pendientes menores de ese valor:

$$R_{uo}=0,04\cdot(Hs\cdot L)^{1/2}$$

La pendiente de la playa seca es:

pendiente playa seca	
altura máx. playa (m)	2,50
distancia (m)	14
pendiente %	17,857

Después se calcula el run-up para cada evento de temporal.

Dado que se busca la cota de inundación y el alcance de los mayores temporales conocidos desde que existen registros, se toman para el cálculo del run-up (R_{uo}) los 4 eventos cuya altura de ola significante y/o periodo pico es mayor:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)	R_{uo}
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78	1,31
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22	1,19
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10	1,23
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10	1,19

Los factores de corrección de Van der Meer y Janssen para esta zona son:

- Factor por pendiente:

$$\gamma_b=\frac{\tan\alpha}{\tan\beta}=8,0$$

al dar como resultado un valor superior a 1, y este coeficiente ha de estar en el intervalo entre un mínimo de 0,6 y un máximo de 1, se toma como coeficiente por pendiente:

$$\gamma_b=1$$

- Factor de rugosidad:

El factor de rugosidad de la superficie de incidencia γ_f, tomará el valor de 1, al estar la playa formada por arenas limpias.

- Factor de percolación:

Como ya se ha dicho más arriba, este factor está relacionado con las características del terreno, y concretamente, en el caso de la arena, con el diámetro de sus granos y su disposición en el suelo. Así existen tablas en las que se define de manera genérica este factor en función de las características de la arena:

Rango de valores del coeficiente de permeabilidad en suelos

Tipo de suelo	k (cm/s)
Grava mal graduada (GP)	$\geqslant 1$
Grava uniforme (GP)	0,2-1
Grava bien graduada (GW)	0,05-0,3
Arena uniforme (SP)	5×10^{-3}-0,2
Arena bien graduada (SW)	10^{-3}-0,1
Arena limosa (SM)	10^{-3}-5×10^{-3}
Arena arcillosa (SC)	10^{-4}-10^{-3}
Limo de baja plasticidad (ML)	5×10^{-5}-10^{-4}
Arcillas de baja plasticidad (CL)	10^{-5}-10^{-8}

En nuestro caso se utilizará como coeficiente de percolación aquel que viene dado por la arena de la playa. Como ésta no viene explícitamente desarrollada en dicha tabla, se considera que se trata de una arena bien graduada, limpia, dado el efecto de lavado que tiene el agua del mar sobre ésta y cuyos valores típicos están comprendidos entre 0,001 y 0,1.

Dado que el intervalo de los valores de k descritos en la tabla es amplio, tomamos el valor 0,01 de dicho intervalo por ser el valor medio del mismo y considerando que la proporción media de arcillas en el terreno se encuentra mayoritariamente entre el 10% y el 20%, por lo que su presencia reduce la permeabilidad del suelo. Aplicando la siguiente formulación se obtiene el coeficiente de percolación (W) medio y, por tanto, un factor medio de percolación (γ_w) en la zona:

$$W=k \Rightarrow 0{,}01 \text{ cm/s}$$

$$\gamma_w=1\text{-}W \Rightarrow \gamma_w = 1 - 0{,}01 = 0{,}99$$

Un mayor valor del factor reductor de percolación implica una mayor reducción del valor de run-up corregido por estar directamente relacionados:

$$R_u = R_{uo} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_w$$

En esta zona, aplicando los factores de Van der Meer y Janssen:

$$R_u = R_{uo} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_w = R_{uo} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0{,}99$$

Con estos datos, para los eventos de temporal considerados se obtiene el run-up corregido (R_u) y con éste el run-up cuyo valor es superado en un porcentaje de tiempo inferior al 2% del evento:

$$R_{u2\%} = 1{,}98 \cdot R_u$$

Aplicando esta formulación se obtiene para cada evento de temporal en esta zona:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)		R_{uo}	R_U	$Ru_{2\%}$ (m)
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78		1,31	1,30	2,57
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22		1,19	1,18	2,34
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10		1,23	1,22	2,42
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10		1,19	1,18	2,34

A este run-up ($R_{u2\%}$) le sumamos el valor de la componente de nivel del mar ya calculado (S_{NM}), para estimar definitivamente el valor de la cota de inundación para cada uno de los máximos eventos registrados:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)		R_{uo}	R_U	$Ru_{2\%}$ (m)	S_{CI} (m)
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78		1,31	1,30	2,57	3,16

16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22	1,19	1,18	2,34	3,08
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10	1,23	1,22	2,42	2,96
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10	1,19	1,18	2,34	2,93

Vistos los resultados tras la aplicación de las fórmulas y factores correctores desarrollados anteriormente se puede decir que el mayor temporal conocido que ha afectado a esta zona del tramo de la costa en estudio del término municipal de Vélez-Málaga es el acontecido el 4 de abril de 2022 que alcanzó su mayor intensidad a las 15:00 horas con una cota de inundación de unos 3,16 m.n.m.a.

Por lo tanto, este temporal de abril de 2022 será el que se desarrolle en el punto 7.3.2 donde se calcula el desplazamiento de la ola por la playa seca, por considerarse el mayor temporal conocido en esta zona desde que existen registros de boyas y con el que se tendrá una visión de la inundación de los terrenos en este sector del litoral.

Zona F.

En primer lugar, calculamos las pendientes de la playa húmeda y de la seca. La pendiente de la playa húmeda nos indicará qué formula de Nielsen-Hanslow ha de usarse, dependiendo si esta pendiente es mayor o menor del 10%.

pendiente playa húmeda	
profundidad (m)	7,00
distancia (m)	293
pendiente %	2,389

La pendiente de la playa húmeda es menor del 10% por lo que se usará para el cálculo del run-up la fórmula del Nielsen-Hanslow para pendientes menores de ese valor:

$$R_{uo}=0,04\cdot(Hs\cdot L)^{1/2}$$

La pendiente de la playa seca es:

pendiente playa seca	
altura máx. playa (m)	3,00
distancia (m)	12
pendiente %	25,000

Después se calcula el run-up para cada evento de temporal.

Dado que se busca la cota de inundación y el alcance de los mayores temporales conocidos desde que existen registros, se toman para el cálculo del run-up (R_{uo}) los 4 eventos cuya altura de ola significante y/o periodo pico es mayor:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)	R_{uo}
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78	1,31
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22	1,19
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10	1,23
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10	1,19

Los factores de corrección de Van der Meer y Janssen para esta zona son:

- Factor por pendiente:

$$\gamma_b=\frac{\tan\alpha}{\tan\beta}=10,5$$

al dar como resultado un valor superior a 1, y este coeficiente ha de estar en el intervalo entre un mínimo de 0,6 y un máximo de 1, se toma como coeficiente por pendiente:

$$\gamma_b = 1$$

- Factor de rugosidad:

El factor de rugosidad de la superficie de incidencia γ_f, tomará el valor de 1, al estar la playa formada por arenas limpias.

- Factor de percolación:

Como ya se ha dicho más arriba, este factor está relacionado con las características del terreno, y concretamente, en el caso de la arena, con el diámetro de sus granos y su disposición en el suelo. Así existen tablas en las que se define de manera genérica este factor en función de las características de la arena:

Rango de valores del coeficiente de permeabilidad en suelos

Tipo de suelo	k (cm/s)
Grava mal graduada (GP)	≥ 1
Grava uniforme (GP)	0,2-1
Grava bien graduada (GW)	0,05-0,3
Arena uniforme (SP)	5×10^{-3}-0,2
Arena bien graduada (SW)	10^{-3}-0,1
Arena limosa (SM)	10^{-3}-5×10^{-3}
Arena arcillosa (SC)	10^{-4}-10^{-3}
Limo de baja plasticidad (ML)	5×10^{-5}-10^{-4}
Arcillas de baja plasticidad (CL)	10^{-5}-10^{-8}

En nuestro caso se utilizará como coeficiente de percolación aquel que viene dado por la arena de la playa. Como ésta no viene explícitamente desarrollada en dicha tabla, se considera que se trata de una arena bien graduada, limpia, dado el efecto de lavado que tiene el agua del mar sobre ésta y cuyos valores típicos están comprendidos entre 0,001 y 0,1.

Dado que el intervalo de los valores de k descritos en la tabla es amplio, tomamos el valor 0,01 de dicho intervalo por ser el valor medio del mismo y considerando que la proporción media de arcillas en el terreno se encuentra mayoritariamente entre el 10% y el 20%, por lo que su presencia reduce la permeabilidad del suelo. Aplicando la siguiente formulación se obtiene el coeficiente de percolación (W) medio y, por tanto, un factor medio de percolación (γ_w) en la zona:

$$W=k \Rightarrow 0{,}01 \text{ cm/s}$$

$$\gamma_w=1-W \Rightarrow \gamma_w = 1 - 0{,}01 = 0{,}99$$

Un mayor valor del factor reductor de percolación implica una mayor reducción del valor de run-up corregido por estar directamente relacionados:

$$R_u = R_{uo} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_w$$

En esta zona, aplicando los factores de Van der Meer y Janssen:

$$R_u = R_{uo} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_w = R_{uo} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0{,}99$$

Con estos datos, para los eventos de temporal considerados se obtiene el run-up corregido (R_u) y con éste el run-up cuyo valor es superado en un porcentaje de tiempo inferior al 2% del evento:

$$R_{u2\%} = 1{,}98 \cdot R_u$$

Aplicando esta formulación se obtiene para cada evento de temporal en esta zona:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)	R_{uo}	R_U	$Ru_{2\%}$ (m)
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78	1,31	1,30	2,57
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22	1,19	1,18	2,34
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10	1,23	1,22	2,42
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10	1,19	1,18	2,34

A este run-up ($R_{u2\%}$) le sumamos el valor de la componente de nivel del mar ya calculado (S_{NM}), para estimar definitivamente el valor de la cota de inundación para cada uno de los máximos eventos registrados:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)	R_{uo}	R_U	$Ru_{2\%}$ (m)	S_{CI} (m)
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78	1,31	1,30	2,57	3,16
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22	1,19	1,18	2,34	3,08
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10	1,23	1,22	2,42	2,96
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10	1,19	1,18	2,34	2,93

Vistos los resultados tras la aplicación de las fórmulas y factores correctores desarrollados anteriormente se puede decir que el mayor temporal conocido que ha afectado a esta zona del tramo de la costa en estudio del término municipal de Vélez-Málaga es el acontecido el 4 de abril de 2022 que alcanzó su mayor intensidad a las 15:00 horas con una cota de inundación de unos 3,16 m.n.m.a.

Por lo tanto, este temporal de abril 2022 será el que se desarrolle en el punto 7.3.2 donde se calcula el desplazamiento de la ola por la playa seca, por considerarse el mayor temporal conocido en esta zona desde que existen registros de boyas y con el que se tendrá una visión de la inundación de los terrenos en este sector del litoral.

Zona G.

En primer lugar, calculamos las pendientes de la playa húmeda y de la seca. La pendiente de la playa húmeda nos indicará qué formula de Nielsen-Hanslow ha de usarse, dependiendo si esta pendiente es mayor o menor del 10%.

pendiente playa húmeda	
profundidad (m)	7,00
distancia (m)	256
pendiente %	2,734

La pendiente de la playa húmeda es menor del 10% por lo que se usará para el cálculo del run-up la fórmula del Nielsen-Hanslow para pendientes menores de ese valor:

$$R_{uo}=0,04\cdot(Hs\cdot L)^{1/2}$$

La pendiente de la playa seca es:

pendiente playa seca	
altura máx. playa (m)	3,00
distancia (m)	58
pendiente %	5,172

Después se calcula el run-up para cada evento de temporal.

Dado que se busca la cota de inundación y el alcance de los mayores temporales conocidos desde que existen registros, se toman para el cálculo del run-up (R_{uo}) los 4 eventos cuya altura de ola significante y/o periodo pico es mayor:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)		R_{uo}
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78		1,31
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22		1,19
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10		1,23
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10		1,19

Los factores de corrección de Van der Meer y Janssen para esta zona son:

- Factor por pendiente:

$$\gamma_b = \frac{\tan\alpha}{\tan\beta} = 1{,}9$$

al dar como resultado un valor superior a 1, y este coeficiente ha de estar en el intervalo entre un mínimo de 0,6 y un máximo de 1, se toma como coeficiente por pendiente:

$$\gamma_b = 1{,}9$$

- Factor de rugosidad:

El factor de rugosidad de la superficie de incidencia γ_f, tomará el valor de 1, al estar la playa formada por arenas limpias.

- Factor de percolación:

Como ya se ha dicho más arriba, este factor está relacionado con las características del terreno, y concretamente, en el caso de la arena, con el diámetro de sus granos y su disposición en el suelo. Así existen tablas en las que se define de manera genérica este factor en función de las características de la arena:

Rango de valores del coeficiente de permeabilidad en suelos

Tipo de suelo	k (cm/s)
Grava mal graduada (GP)	≥ 1
Grava uniforme (GP)	0,2-1
Grava bien graduada (GW)	0,05-0,3
Arena uniforme (SP)	5×10^{-3}-0,2
Arena bien graduada (SW)	10^{-3}-0,1
Arena limosa (SM)	10^{-3}-5×10^{-3}
Arena arcillosa (SC)	10^{-4}-10^{-3}
Limo de baja plasticidad (ML)	5×10^{-5}-10^{-4}
Arcillas de baja plasticidad (CL)	10^{-5}-10^{-8}

En nuestro caso se utilizará como coeficiente de percolación aquel que viene dado por la arena de la playa. Como ésta no viene explícitamente desarrollada en dicha tabla, se considera que se trata de una arena bien graduada, limpia, dado el efecto de lavado que tiene el agua del mar sobre ésta y cuyos valores típicos están comprendidos entre 0,001 y 0,1.

Dado que el intervalo de los valores de k descritos en la tabla es amplio, tomamos el valor 0,01 de dicho intervalo por ser el valor medio del mismo y considerando que la proporción media de arcillas en el terreno se encuentra mayoritariamente entre el 10% y el 20%, por lo que su presencia reduce la permeabilidad del suelo. Aplicando la siguiente formulación se obtiene el coeficiente de percolación (W) medio y, por tanto, un factor medio de percolación (γ_w) en la zona:

$$W = k \Rightarrow 0{,}01 \text{ cm/s}$$

$$\gamma_w = 1 - W \Rightarrow \gamma_w = 1 - 0{,}01 = 0{,}99$$

Un mayor valor del factor reductor de percolación implica una mayor reducción del valor de run-up corregido por estar directamente relacionados:

$$R_u = R_{uo} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_w$$

En esta zona, aplicando los factores de Van der Meer y Janssen:

$$R_u = R_{uo} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_w = R_{uo} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0{,}99$$

Con estos datos, para los eventos de temporal considerados se obtiene el run-up corregido (R_u) y con éste el run-up cuyo valor es superado en un porcentaje de tiempo inferior al 2% del evento:

$$R_{u2\%} = 1{,}98 \cdot R_u$$

Aplicando esta formulación se obtiene para cada evento de temporal en esta zona:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)	R_{uo}	R_U	$Ru_{2\%}$ (m)
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78	1,31	1,30	2,57
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22	1,19	1,18	2,34
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10	1,23	1,22	2,42
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10	1,19	1,18	2,34

A este run-up ($R_{u2\%}$) le sumamos el valor de la componente de nivel del mar ya calculado (S_{NM}), para estimar definitivamente el valor de la cota de inundación para cada uno de los máximos eventos registrados:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)	R_{uo}	R_U	$Ru_{2\%}$ (m)	S_{CI} (m)
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78	1,31	1,30	2,57	3,16
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22	1,19	1,18	2,34	3,08
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10	1,23	1,22	2,42	2,96
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10	1,19	1,18	2,34	2,93

Vistos los resultados tras la aplicación de las fórmulas y factores correctores desarrollados anteriormente se puede decir que el mayor temporal conocido que ha afectado a esta zona del tramo de la costa en estudio del término municipal de Vélez-Málaga es el acontecido el 4 de abril de 2022 que alcanzó su mayor intensidad a las 15:00 horas con una cota de inundación de unos 3,16 m.n.m.a.

Por lo tanto, este temporal de abril de 2022 será el que se desarrolle en el punto 7.3.2 donde se calcula el desplazamiento de la ola por la playa seca, por considerarse el mayor temporal conocido en esta zona desde que existen registros de boyas y con el que se tendrá una visión de la inundación de los terrenos en este sector del litoral.

7.3.2 Estimación del desplazamiento de la ola por la playa seca en el año 2040

Para realizar estos cálculos se va a realizar el estudio según las instrucciones del C.E.M. (Coastal Engineering Manual), con las ventajas que aporta el uso de los datos de los puntos SIMAR de Puertos del Estado y la base de datos reales de oleaje registrados desde 1958.

Según el C.E.M. es necesario obtener la altura de ola significante en aguas profundas para calcular la altura de ola significativa (H'0 según nomenclatura del C.E.M.). Como los datos obtenidos en el punto SIMAR son simulaciones de oleaje para ese punto, el valor que se obtiene en dicho punto SIMAR es igual para ambos parámetros.

La longitud de ola profunda es:

$$L = 1.56 \times {T_p}^2$$

Donde T_p es el periodo punta; también obtenido del punto SIMAR.

La altura de ruptura de la ola según Komar & Gaughan (1973) es:

$$\Omega_b = 0.56 \left(\frac{H_0}{L_0}\right)^{\frac{-1}{5}}$$

Donde, L_0 es la longitud de ola en aguas profundas (m).

Así mismo tenemos que,

$$H_b = H_0 \times \Omega_b$$

Para continuar con los cálculos según el C.E.M. del alcance del oleaje (Δx) lo hacemos mediante la fórmula:

$$\Delta x = \frac{\eta_s}{tan\vartheta - \frac{d_\eta}{d_x}}$$

Para ello necesitamos conocer la pendiente uniforme de la playa, ϑ, (húmeda + seca). Estos parámetros ya han sido obtenidos para el cálculo de la cota de inundación anteriormente y han sido medidos, recordemos, desde la cota 0 (línea de agua) estimada para el año 2040 teniendo en cuenta la regresión de la costa y el aumento del nivel del mar por efecto del cambio climático.

El cálculo de la decaída de la ola cuando llega a la playa es:

$$\frac{d\eta}{dx} = \frac{1}{1 + \frac{8}{3 \times \gamma_b^2}} \times tan\beta$$

La elevación media de la ola sobre el litoral:

$$\eta_s = \eta_b + (d_b - \eta_b) + \frac{1}{1 + \frac{8}{(3 \times \gamma_b^2)}}$$

La elevación media sobre el nivel del mar en aguas tranquilas profundas:

$$\eta_b = \frac{-1}{16} \times \gamma_b^2 \times d_b$$

Donde γ_b, es el índice de profundidad de rotura, que se obtiene de:

$$\gamma b = b - a \frac{H_b}{g \times T^2}$$

Y la profundidad de rotura db, que se obtiene mediante la fórmula:

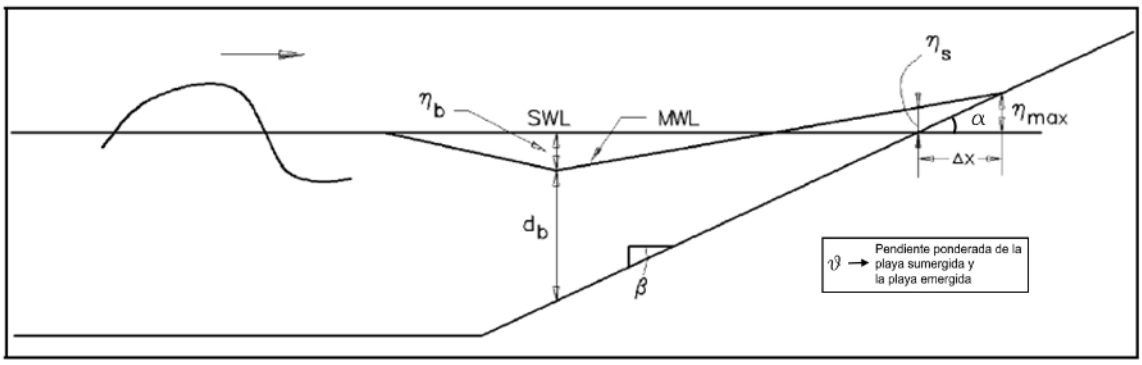
$$db = \frac{H_b}{\gamma_b^2}$$

Los parámetros a y b son coeficientes relacionados con la pendiente de la playa húmeda y responden a la siguiente formulación:

$$a = 43.8 \times (1 - e^{19tan\beta})$$

$$b = \frac{1.56}{(1 + e^{-19.5tan\beta})}$$

Así, aplicaremos este sistema de fórmulas del C.E.M. para los datos del temporal más severo desde que hay registros, considerando que éste es aquel cuya cota de inundación (calculada en el punto 7.3.1) es el de mayor valor, es decir, aquel temporal cuyo valor de S_{ci} es mayor.



Esquema de los parámetros calculados y su relación con el perfil de la playa (extraído del C.E.M.).

A continuación, se desarrollan los cálculos para cada transecto.

Zona A:

Como ya se ha visto en el apartado 7.3.1, el mayor temporal conocido en esta zona, desde que existen registros de boyas, es el acontecido el 4 de abril de 2022 con una cota corregida de inundación de 3,16 m.n.m.a. Serán los datos de este temporal los que se desarrollen aquí para calcular el alcance del mar durante los mayores temporales conocidos, según el procedimiento del C.E.M.

Los datos de partida para los cálculos son:

Punto SIMAR	2035080
Fecha máx. temporal	04/04/2022
Hs	4,69
Tp	12,11
L	228,78

Resultando, tras la aplicación de la formulación anteriormente descrita:

Ωb	1,22
Hb	5,72
dη/dx	0,0024
ηs	1,18
ηb	-0,30
γb	0,83
db	6,86
tanα	0,027
tanβ	0,012
tanϑ	0,013

Por lo tanto, el alcance del mar durante este temporal, en esta zona, dado por la fórmula:

$$\Delta x = \frac{\eta_s}{tan\vartheta - \frac{d_\eta}{d_x}}$$

Arroja un resultado de 108,93 metros tierra adentro desde la línea de agua estimada para el año 2040. Es decir, esa distancia es el lugar hasta donde alcanzaría el agua del mar, según las

cartografías utilizadas, con unas pendientes constantes, y un oleaje regular durante el máximo temporal conocido desde que existen registros.

Por tanto, podemos decir que el oleaje generado durante el temporal del día 4 de abril de 2022 en esta zona se adentraría hasta los 108,93 metros según indican los cálculos teóricos de alcance descritos en el manual de ingeniería de costas (CEM), usando como datos de partida los registros tomados por las boyas y el modelado numérico del oleaje y viento de los puntos SIMAR de Puertos del Estado, y asimilando la zona de costa en estudio como un sector homogéneo con oleaje regular durante el evento del mayor temporal como modelo simplificado del terreno costero para la realización estos cálculos y considerando la cota cero o línea de agua la resultante de la estimación a 20 años de la regresión de la costa incrementada con el aumento del nivel del mar a causa del cambio climático, estimado éste en 13 cm de media.

Zona B:

Como ya se ha visto en el apartado 7.3.1, el mayor temporal conocido en esta zona, desde que existen registros de boyas, es el acontecido el 4 de abril de 2022 con una cota corregida de inundación de 3,16 m.n.m.a. Serán los datos de este temporal los que se desarrollen aquí para calcular el alcance del mar durante los mayores temporales conocidos, según el procedimiento del C.E.M.

Los datos de partida para los cálculos son:

Punto SIMAR	2035080
Fecha máx. temporal	04/04/2022
Hs	4,69
Tp	12,11
L	228,78

Resultando, tras la aplicación de la formulación anteriormente descrita:

Ωb	1,22
Hb	5,72
dη/dx	0,0022
ηs	1,18
ηb	-0,30
γb	0,83
db	6,88
tanα	0,037
tanβ	0,011
tanϑ	0,013

Por lo tanto, el alcance del mar durante este temporal, en esta zona, dado por la fórmula:

$$\Delta x = \frac{\eta_s}{tan\vartheta - \frac{d_\eta}{d_x}}$$

Arroja un resultado de 109,90 metros tierra adentro desde la línea de agua estimada para el año 2040. Es decir, esa distancia es el lugar hasta donde alcanzaría el agua del mar, según las cartografías utilizadas, con unas pendientes constantes, y un oleaje regular durante el máximo temporal conocido desde que existen registros.

Por tanto, podemos decir que el oleaje generado durante el temporal del día 4 de abril de 2022 en esta zona se adentraría hasta los 109,90 metros según indican los cálculos teóricos de alcance descritos en el manual de ingeniería de costas (CEM), usando como datos de partida los registros tomados por las boyas y el modelado numérico del oleaje y viento de los puntos SIMAR de Puertos

del Estado, y asimilando la zona de costa en estudio como un sector homogéneo con oleaje regular durante el evento del mayor temporal como modelo simplificado del terreno costero para la realización estos cálculos y considerando la cota cero o línea de agua la resultante de la estimación a 20 años de la regresión de la costa incrementada con el aumento del nivel del mar a causa del cambio climático, estimado éste en 13 cm de media.

Zona C:

Como ya se ha visto en el apartado 7.3.1, el mayor temporal conocido en esta zona, desde que existen registros de boyas, es el acontecido el 4 de abril de 2022 con una cota corregida de inundación de 2,13 m.n.m.a. Serán los datos de este temporal los que se desarrollen aquí para calcular el alcance del mar durante los mayores temporales conocidos, según el procedimiento del C.E.M.

Los datos de partida para los cálculos son:

Punto SIMAR	2035080
Fecha máx. temporal	04/04/2022
Hs	4,69
Tp	12,11
L	228,78

Resultando, tras la aplicación de la formulación anteriormente descrita:

Ωb	1,22
Hb	5,72
dη/dx	0,0024
ηs	1,18
ηb	-0,30
γb	0,83
db	6,86
tanα	0,004
tanβ	0,011
tanϑ	0,008

Por lo tanto, el alcance del mar durante este temporal, en esta zona, dado por la fórmula:

$$\Delta x = \frac{\eta_s}{tan\vartheta - \frac{d_\eta}{d_x}}$$

Arroja un resultado de 196,64 metros tierra adentro desde la línea de agua estimada de 2040. Es decir, esa distancia es el lugar hasta donde alcanzaría el agua del mar, según las cartografías utilizadas, con unas pendientes constantes, y un oleaje regular durante el máximo temporal conocido desde que existen registros.

Por tanto, podemos decir que el oleaje generado durante el temporal del día 4 de abril 2022 en esta zona se adentraría hasta los 196,64 metros según indican los cálculos teóricos de alcance descritos en el manual de ingeniería de costas (CEM), usando como datos de partida los registros tomados por las boyas y el modelado numérico del oleaje y viento de los puntos SIMAR de Puertos del Estado, y asimilando la zona de costa en estudio como un sector homogéneo con oleaje regular durante el evento del mayor temporal como modelo simplificado del terreno costero para la realización estos cálculos y considerando la cota cero o línea de agua la resultante de la estimación a 20 años de la regresión de la costa incrementada con el aumento del nivel del mar a causa del cambio climático, estimado éste en 13 cm de media.

Zona D:

Como ya se ha visto en el apartado 7.3.1, el mayor temporal conocido en esta zona, desde que existen registros de boyas, es el acontecido el 4 abril de 2022 con una cota corregida de inundación de 2,55 m.n.m.a. Serán los datos de este temporal los que se desarrollen aquí para calcular el alcance del mar durante los mayores temporales conocidos, según el procedimiento del C.E.M.

Los datos de partida para los cálculos son:

Punto SIMAR	2035080
Fecha máx. temporal	04/04/2022
Hs	4,69
Tp	12,11
L	228,78

Resultando, tras la aplicación de la formulación anteriormente descrita:

Ωb	1,22
Hb	5,72
dη/dx	0,0027
ηs	1,19
ηb	-0,30
γb	0,84
db	6,81
tanα	0,010
tanβ	0,013
tanϑ	0,012

Por lo tanto, el alcance del mar durante este temporal, en esta zona, dado por la fórmula:

$$\Delta x = \frac{\eta_s}{tan\vartheta - \frac{d_\eta}{d_x}}$$

Arroja un resultado de 126,97 metros tierra adentro desde la línea de agua. Es decir, esa distancia es el lugar hasta donde alcanzaría el agua del mar, según las cartografías utilizadas, con unas pendientes constantes, y un oleaje regular durante el máximo temporal conocido desde que existen registros.

Por tanto, podemos decir que el oleaje generado durante el temporal del día 4 de abril de 2022 en esta zona se adentraría hasta los 126,97 metros según indican los cálculos teóricos de alcance descritos en el manual de ingeniería de costas (CEM), usando como datos de partida los registros tomados por las boyas y el modelado numérico del oleaje y viento de los puntos SIMAR de Puertos del Estado, y asimilando la zona de costa en estudio como un sector homogéneo con oleaje regular durante el evento del mayor temporal como modelo simplificado del terreno costero para la realización estos cálculos y considerando la cota cero o línea de agua la resultante de la estimación a 20 años de la regresión de la costa incrementada con el aumento del nivel del mar a causa del cambio climático, estimado éste en 13 cm de media.

Zona E:

Como ya se ha visto en el apartado 7.3.1, el mayor temporal conocido en esta zona, desde que existen registros de boyas, es el acontecido el 4 de abril de 2022 con una cota corregida de inundación de 3,16 m.n.m.a. Serán los datos de este temporal los que se desarrollen aquí para calcular el alcance del mar durante los mayores temporales conocidos, según el procedimiento del C.E.M.

Los datos de partida para los cálculos son:

Punto SIMAR	2035080
Fecha máx. temporal	04/04/2022
Hs	4,69
Tp	12,11
L	228,78

Resultando, tras la aplicación de la formulación anteriormente descrita:

Ωb	1,22
Hb	5,72
dη/dx	0,0051
ηs	1,22
ηb	-0,32
γb	0,89
db	6,44
tanα	0,179
tanβ	0,022
tanϑ	0,029

Por lo tanto, el alcance del mar durante este temporal, en esta zona, dado por la fórmula:

$$\Delta x = \frac{\eta_s}{tan\vartheta - \frac{d_\eta}{d_x}}$$

Arroja un resultado de 50,94 metros tierra adentro desde la línea de agua estimada para el año 2040. Es decir, esa distancia es el lugar hasta donde alcanzaría el agua del mar, según las cartografías utilizadas, con unas pendientes constantes, y un oleaje regular durante el máximo temporal conocido desde que existen registros.

Por tanto, podemos decir que el oleaje generado durante el temporal del día 4 de abril de 2022 en esta zona se adentraría hasta los 50,94 metros según indican los cálculos teóricos de alcance descritos en el manual de ingeniería de costas (CEM), usando como datos de partida los registros tomados por las boyas y el modelado numérico del oleaje y viento de los puntos SIMAR de Puertos del Estado, y asimilando la zona de costa en estudio como un sector homogéneo con oleaje regular durante el evento del mayor temporal como modelo simplificado del terreno costero para la realización estos cálculos y considerando la cota cero o línea de agua la resultante de la estimación a 20 años de la regresión de la costa incrementada con el aumento del nivel del mar a causa del cambio climático, estimado éste en 13 cm de media.

Zona F:

Como ya se ha visto en el apartado 7.3.1, el mayor temporal conocido en esta zona, desde que existen registros de boyas, es el acontecido el 4 de abril de 2022 con una cota corregida de inundación de 3,16 m.n.m.a. Serán los datos de este temporal los que se desarrollen aquí para calcular el alcance del mar durante los mayores temporales conocidos, según el procedimiento del C.E.M.

Los datos de partida para los cálculos son:

Punto SIMAR	2035080
Fecha máx. temporal	04/04/2022
Hs	4,69
Tp	12,11
L	228,78

Resultando, tras la aplicación de la formulación anteriormente descrita:

Ωb	1,22
Hb	5,72
dη/dx	0,0055
ηs	1,23
ηb	-0,32
γb	0,89
db	6,39
tanα	0,250
tanβ	0,024
tanϑ	0,033

Por lo tanto, el alcance del mar durante este temporal, en esta zona, dado por la fórmula:

$$\Delta x = \frac{\eta_s}{tan\vartheta - \frac{d_\eta}{d_x}}$$

Arroja un resultado de 45,08 metros tierra adentro desde la línea de agua estimada para el año 2040. Es decir, esa distancia es el lugar hasta donde alcanzaría el agua del mar, según las cartografías utilizadas, con unas pendientes constantes, y un oleaje regular durante el máximo temporal conocido desde que existen registros.

Por tanto, podemos decir que el oleaje generado durante el temporal del día 4 de abril de 2022 en esta zona se adentraría hasta los 45,08 metros según indican los cálculos teóricos de alcance descritos en el manual de ingeniería de costas (CEM), usando como datos de partida los registros tomados por las boyas y el modelado numérico del oleaje y viento de los puntos SIMAR de Puertos del Estado, y asimilando la zona de costa en estudio como un sector homogéneo con oleaje regular durante el evento del mayor temporal como modelo simplificado del terreno costero para la realización estos cálculos y considerando la cota cero o línea de agua la resultante de la estimación a 20 años de la regresión de la costa incrementada con el aumento del nivel del mar a causa del cambio climático, estimado éste en 13 cm de media.

Zona G:

Como ya se ha visto en el apartado 7.3.1, el mayor temporal conocido en esta zona, desde que existen registros de boyas, es el acontecido el 4 de abril de 2022 con una cota corregida de inundación de 3,16 m.n.m.a. Serán los datos de este temporal los que se desarrollen aquí para calcular el alcance del mar durante los mayores temporales conocidos, según el procedimiento del C.E.M.

Los datos de partida para los cálculos son:

Punto SIMAR	2035080
Fecha máx. temporal	04/04/2022
Hs	4,69
Tp	12,11
L	228,78

Resultando, tras la aplicación de la formulación anteriormente descrita:

Ωb	1,22
Hb	5,72
dη/dx	0,0065
ηs	1,24
ηb	-0,33

γb	0,91
db	6,26
tanα	0,052
tanβ	0,027
tanϑ	0,032

Por lo tanto, el alcance del mar durante este temporal, en esta zona, dado por la fórmula:

$$\Delta x = \frac{\eta_s}{tan\vartheta - \frac{d_\eta}{d_x}}$$

Arroja un resultado de 49,02 metros tierra adentro desde la línea de agua estimada para el año 2040. Es decir, esa distancia es el lugar hasta donde alcanzaría el agua del mar, según las cartografías utilizadas, con unas pendientes constantes, y un oleaje regular durante el máximo temporal conocido desde que existen registros.

Por tanto, podemos decir que el oleaje generado durante el temporal del día 4 de abril de 2022 en esta zona se adentraría hasta los 49,02 metros según indican los cálculos teóricos de alcance descritos en el manual de ingeniería de costas (CEM), usando como datos de partida los registros tomados por las boyas y el modelado numérico del oleaje y viento de los puntos SIMAR de Puertos del Estado, y asimilando la zona de costa en estudio como un sector homogéneo con oleaje regular durante el evento del mayor temporal como modelo simplificado del terreno costero para la realización estos cálculos y considerando la cota cero o línea de agua la resultante de la estimación a 20 años de la regresión de la costa incrementada con el aumento del nivel del mar a causa del cambio climático, estimado éste en 13 cm de media.

7.3.3 Discusión de los resultados para el año 2040

Teniendo en cuenta estos valores de alcance obtenidos para cada transecto, se puede representar en el mapa el alcance de la inundación teórica en el año 2040 según el método del C.E.M.) así como la cota de inundación (según Nielsen-Hanslow), teniendo en cuenta tanto la regresión de la costa como la elevación del nivel del mar por los efectos del cambio climático.



Representación gráfica de los alcances calculados mediante el método del C.E.M. (en amarillo) y la cota de inundación mediante la fórmula de Nielsen-Hanslow (1991) corregida con los factores de Van der Meer y Jansen (en azul).

Una vez obtenidos los valores de cota de inundación (S_{CI}), medida en vertical, y de alcance de la inundación (Δx), medida en horizontal, se puede calcular la extensión de la inundación (sin tener en cuenta obstáculos cuya altura no esté cartografiada como curva de nivel, ni las superficies cuyos terrenos estén más bajos colindantes a los que si llega el agua y que por gravedad se desplazaría e inundaría también esos terrenos bajos), pues la forma del perfil medio de la playa relaciona las distancias en vertical y en horizontal de la inundación desde los puntos extremos de la medición.

Al ser variables distintas y haberse tratado y calculado de forma independiente, no se obtienen los mismos resultados de extensión de la inundación. Así, al representar la distancia de inundación y la cota de inundación sobre la cartografía no serán coincidentes por sus características intrínsecas.

La topografía del terreno es un factor limitante en la extensión de la inundación y se relaciona con los dos parámetros calculados, pudiéndose dar tres casos genéricos que han de ser considerados en cada zona de estudio. Estos casos son:

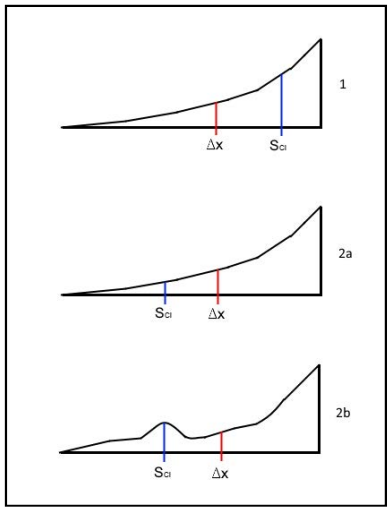
1 – La cota de inundación (S_{CI}), según la topografía del terreno, se ubica más al interior que el alcance de la inundación (Δx).

2 – La cota de inundación (S_{CI}), se ubica más al exterior que el alcance de inundación (Δx). En este supuesto pueden darse 2 situaciones según la topografía del terreno:

2.a – La pendiente del terreno asciende de forma constante desde la cota cero hacia arriba.

2.b – La pendiente del terreno asciende para luego descender al interior, porque existe un montículo u obstáculo más alto que el terreno más al interior.

Esquemáticamente:

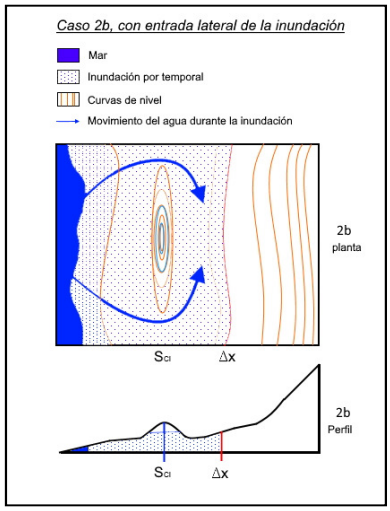


Así, cuando tras los cálculos y su representación sobre la cartografía de las líneas que indican los límites, tanto de la cota de inundación (S_{CI}) sobre el nivel del mar (cota 0 n.m.m.a.) como del alcance (desplazamiento de la ola tierra adentro, Δx), nos encontramos con la situación '1' se considera que la inundación se extiende tierra adentro hasta el límite marcado por el cálculo del alcance (Δx).

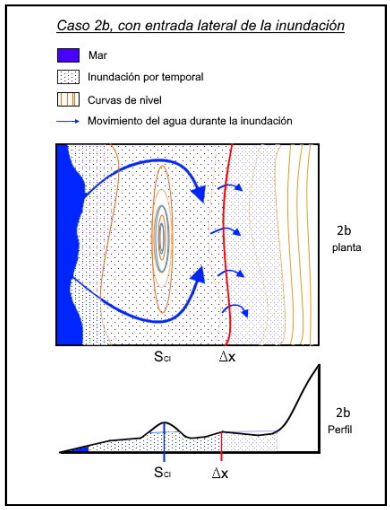
En el caso de encontrarnos con el supuesto 2a, es decir, el límite interior del alcance (Δx) se ubica más al interior que la inundación arrojada por el valor de la cota de inundación (S_{CI}) en un terreno que va ascendiendo de manera constante desde la línea de agua hacia el interior, se considera que la inundación por el temporal se extiende hasta el límite interior marcado por la cota de inundación (S_{CI}) ya que se hace la hipótesis de que el agua no puede superar la cota de

inundación calculada ya que más al interior de ésta, el terreno tiene mayor cota por su ascenso en altura uniforme.

En el caso de encontrarnos con el supuesto 2b, es decir, el límite interior del alcance (Δx) se ubica más al interior que la inundación arrojada por el valor de la cota de inundación (S_{CI}) en un terreno que no asciende de forma constante desde la cota cero sino que, por la existencia de montículos de arena o por las propias características del terreno en las que se alcanza una cota determinada y más al interior el terreno baja y, por tanto, tiene cota inferior a ese montículo, cordón, etc. se considera que el límite hasta el que se extiende la inundación por el temporal lo marca cálculo del alcance de las olas (Δx) dado que el agua de la inundación pueda provenir de zonas más bajas, no venir del punto de medición, sino de zonas aledañas más bajas y que se extiende por detrás de este cordón u obstáculo más alto, pero inundándose al interior con aguas de mar procedentes de las entradas más bajas que el cordón o montículo, en otros lugares más o menos cercanos. Esta situación se trata de ilustrar con el siguiente esquema:



Una variante de este último caso, habitual en los terrenos que abarca este estudio de regresión de la costa, es que los terrenos más al interior del alcance de las olas (Δx) siguen siendo bajos por lo que el agua, por la gravedad y sus características de fluido, se extiende por esos terrenos hasta donde la topografía del suelo vuelve a ascender, por lo que la extensión de la inundación ha de estudiarse en cada caso concreto ya que el agua avanzará incluso más allá de esa línea teórica Δx. Esta situación se trata de ilustrar con el siguiente esquema:



Vistos los casos genéricos, se debe considerar si la extensión de inundación viene limitada por cota (S_{CI}), por distancia (Δx) o por distancia y extensión por terrenos bajos, en cada uno de los casos de los terrenos estudiados.

En las representaciones gráficas anteriores se han mostrado las líneas que marcan la cota de inundación calculada mediante la formulación de Nielsen-Hanslow y el alcance de la inundación calculada por el método de C.E.M.

En la zona de influencia del transecto A, la cota de inundación es de 3,16m por lo que siendo terrenos bajos que en su mayor parte están por debajo de los 3 metros de altitud, la cota de inundación se ubica en el fondo de los terrenos del delta. El alcance de las olas (Δx) en esta zona se ubica a casi 109 metros de la línea de agua estimada para el año 2040 situándose en la zona de cultivos, por tanto, estaríamos en la hipótesis '1' antes comentada siendo este último parámetro el que indicaría la extensión numérica de la inundación.



Representación de la cota de inundación según Nielsen-Hanslow (azul) y el alcance del oleaje en 2040 según C.E.M. (amarillo)

A partir de aquí es necesario comprobar la cota de los terrenos comparando la cota en la zona inundable según el alcance del oleaje y los terrenos al interior por si se da el caso de que, por efecto de la gravedad, el agua que alcanza esa distancia se adentra más al interior rellenando terrenos bajos, cubetas, etc. contiguos del mismo modo que se ha hecho en el punto 6.

En esta zona tenemos que la cota de inundación es 3,16 que supera con facilidad el talud de defensa que existe en el límite de la línea media de agua, desplazándose al interior por los terrenos completamente llanos propios de los deltas de los ríos situándose el alcance del oleaje teórico a 109 metros de la línea de agua y coincidente con la cota 2m del terreno, encharcando todos los terrenos llanos que mantengan esta cota por efecto de la gravedad.

En la zona del transecto B, la cota de inundación es de 3,16m por lo que siendo terrenos bajos que en están por debajo de los 3 metros de altitud, la cota de inundación se ubica en el fondo de los terrenos del delta. El alcance de las olas (Δx) en esta zona se sitúa a casi 110 metros de la línea de agua estimada para el año 2040 situándose en la zona de cultivos, por tanto, estaríamos en la hipótesis '1' antes comentada siendo este último parámetro el que indicaría la extensión numérica de la inundación.



Representación de la cota de inundación según Nielsen-Hanslow
(azul) y el alcance del oleaje según C.E.M. (amarillo)

A partir de aquí es necesario comprobar la cota de los terrenos comparando la cota en la zona inundable según el alcance del oleaje y los terrenos al interior por si se da el caso de que, por efecto de la gravedad, el agua que alcanza esa distancia se adentra más al interior rellenando terrenos bajos, cubetas, etc. contiguos del mismo modo que se ha hecho en el punto 6.

En este caso tenemos que la cota máxima que alcanza el oleaje y que es superado hasta alcanzar su límite interior (Δx) se encuentra aproximadamente en los 2,0 metros inundándose los terrenos llanos del delta contiguos que mantienen esta cota a su interior y por tanto formando balsas de agua de mar más al interior del alcance del oleaje teórico.

La zona C los cálculos del alcance del oleaje se han realizado para el cauce del río Vélez, la cota de inundación es de 2,13m. El cauce, al ser un terreno bajo la cota de inundación se sitúa, según la topografía, al interior de la laguna de la margen izquierda que se formó en la desembocadura tras el temporal de abril de 2022. El alcance de las olas (Δx) en el cauce se ubica a más de 196 metros de la línea de agua estimada para el año 2040, por tanto, estaríamos en la hipótesis '1' arriba expuesta siendo este último parámetro el que indicaría la extensión numérica de la inundación (excepto en las motas de las márgenes cuya altura es igual o mayor que la cota de inundación).



Representación de la cota de inundación según Nielsen-Hanslow
(azul) y el alcance del oleaje según C.E.M. (amarillo)

A partir de aquí es necesario comprobar la cota de los terrenos del cauce comparando la cota en la zona inundable según el alcance del oleaje y los terrenos al interior por si se da el caso de que, por efecto de la gravedad, el agua que alcanza esa distancia se adentra más al interior rellenando terrenos bajos, cubetas, etc. contiguos del mismo modo que se ha hecho en el punto 6.

En este caso tenemos que la cota donde se encuentra el límite interior teórico del alcance del oleaje (Δx) es aproximadamente 1,5 metros y, por tanto, inundándose los terrenos llanos contiguos que mantienen esta cota a su interior y por tanto formando balsas de agua de mar más al interior del alcance del oleaje teórico.

En la zona del transecto D, la cota de inundación es de 2,55m por lo que, siendo terrenos bajos que están por debajo de los 2 metros de altitud, la cota de inundación se ubica en el interior de las parcelas agrícolas exteriores del delta. El alcance de las olas (Δx) en esta zona se sitúa a 126 metros de la línea de agua estimada para el año 2040 situándose en la zona de cultivos, por tanto, estaríamos en la hipótesis '1' antes comentada excepto en un camino agrícola que se encuentra por encima de los 2 metros y donde será la cota de inundación la que marque el límite de la extensión de la inundación por los temporales. (hipótesis '2a').



Representación de la cota de inundación según Nielsen-Hanslow
(azul) y el alcance del oleaje según C.E.M. (amarillo)

A partir de aquí es necesario comprobar la cota de los terrenos comparando la altitud en la zona inundable según el alcance del oleaje y los terrenos al interior por si se da el caso de que, por efecto de la gravedad, el agua que alcanza esa distancia se adentra más al interior rellenando terrenos bajos, cubetas, etc. contiguos del mismo modo que se ha hecho en el punto 6.

En este caso tenemos que la cota máxima que alcanza el oleaje, y que es superado hasta alcanzar su límite interior (Δx), se encuentra entre los 1,5 y los 2 metros. El límite interior de Δx se encuentra en esta zona prácticamente llana, por lo que estos terrenos contiguos al Δx se les presupone inundables por la llegada del agua impulsada por el oleaje y que se dispersará por esta zona llana contigua al alcance del oleaje teórico.

En la zona E, la cota de inundación es de 3,16m. en este sector el terreno es más heterogéneo que en los tramos anteriores por situarse en el extremo oriental del delta y ser el límite de la zona construida de la localidad de Torre del Mar que tiene una pequeña urbanización y un camping (en el año de referencia 2020) en la zona más cercana al delta y al mar y, tierra adentro, parcelas que se están actualmente (2024) urbanizadas.

En este transecto, el alcance del oleaje se sitúa en los casi 51m desde la línea de agua estimada para el año 2040 ubicándose el límite interior del oleaje durante los temporales más severos superando la mencionada pequeña urbanización, situada en el borde del agua en el año 2020 y circundada con escolleras que en el año 2040 habrán sido sobrepasadas por el agua debido a la

regresión costera en la zona y el aumento del nivel del mar por efecto el cambio climático (según las premisas de trabajo de este estudio). La extensión de la inundación en el sector del transecto E viene dado por la hipótesis '1'.



Representación de la cota de inundación según Nielsen-Hanslow (azul) y el alcance del oleaje según C.E.M. (amarillo)

A partir de aquí es necesario comprobar la cota de los terrenos comparando la altitud en la zona inundable según el alcance del oleaje y los terrenos al interior por si se da el caso de que, por efecto de la gravedad, el agua que alcanza esa distancia se adentra más al interior rellenando terrenos bajos, cubetas, etc. contiguos del mismo modo que se ha hecho en el punto 6.

En este caso tenemos que la cota máxima que alcanza el oleaje y que es superado hasta alcanzar su límite interior (Δx) se encuentra aproximadamente en los 2,5 metros descendiendo al interior hasta los 2 metros o manteniéndose en esos 2,5 metros en el límite de Δx, por lo que la gravedad y la energía del oleaje impulsa el agua que ha llegado hasta la Δx hacia el interior por ser terrenos más bajos contiguos y por tanto formando balsas y encharcamientos de agua de mar más al interior del alcance del oleaje teórico.

En la zona F, la cota de inundación es de 3,16m. la regresión de la costa y el aumento del nivel del mar a causa del cambio climático ha ocasionado que la línea de agua estimada en el año 2040 se posicione de forma que se haya perdido en ese año prácticamente la playa actual (2024). En el año 2040 se estima que aún se mantendría una cota en el interior de una parte de la playa de hasta 3 metros. Al interior, los terrenos descienden de cota hasta los 2 metros.

El alcance de las olas (Δx) en esta zona se ubica a 45 metros de la línea de agua estimada para 2040, situándose en la zona baja comentada en el anterior párrafo y que actualmente se utiliza como zona de aparcamiento de vehículos de los usuarios de la playa, por tanto, estaríamos en la hipótesis '2b' ya que, aunque hay una zona de cota igual a la cota de inundación, las laterales son más bajas, por no mencionar que al tratarse de una playa de arena ésta es removida por el oleaje severo de los temporales y tiende a perder su cota y ser extendida por el oleaje. Así mismo el muro que contiene la arena de la playa para que no se disperse por la zona de aparcamiento tiene aperturas para el acceso a la playa por lo que, durante los temporales, son zonas de paso del agua del mar hacia el interior, superando esta línea de muro artificial. Dicho esto, dado que se dan tanto la hipótesis '1', en las zonas de playa más bajas y la hipótesis '2b' en las más altas (pero que el agua puede rodear a éstas), el parámetro del alcance de las olas (Δx) indica la extensión teórica de la inundación en todo el sector.



Representación de la cota de inundación según Nielsen-Hanslow
(azul) y el alcance del oleaje según C.E.M. (amarillo)

A partir de aquí es necesario comprobar la cota de los terrenos comparando la altitud en la zona inundable según el alcance del oleaje y los terrenos al interior por si se da el caso de que, por efecto de la gravedad, el agua que alcanza esa distancia se adentra más al interior rellenando terrenos bajos, cubetas, etc. contiguos del mismo modo que se ha hecho en el punto 6.

En este caso tenemos que puede penetrar el oleaje al interior del aparcamiento a tratarse de terrenos más bajos que la playa y dado que el alcance teórico del oleaje durante los temporales llega a esta explanad, se deduce que el agua se extenderá por toda ella por la acumulación constate por el aporte de las olas durante los temporales. Esto se aprecia en la fotografía satelital de mayo de 2022 una vez evaporada y desaparecida el agua acumulada donde se ven las acumulaciones de sal en dicha zona llana de aparcamiento:



En rojo se marcan las mayores acumulaciones de sal visibles.

En la zona G la cota de inundación es de 3,16m.

La configuración del terreno en aquí es similar a la anterior, aunque la zona de la playa con cota cercana a la cota de inundación es menor que en el caso anterior. El alcance de las olas (Δx) en esta zona se ubica a 49 metros de la línea de agua estimada, situándose en límite interior de la playa por lo que nos encontraríamos en el supuesto '1'.



Representación de la cota de inundación según Nielsen-Hanslow
(azul) y el alcance del oleaje según C.E.M. (amarillo)

A partir de aquí es necesario comprobar la cota de los terrenos comparando la altitud en la zona inundable según el alcance del oleaje y los terrenos al interior por si se da el caso de que, por efecto de la gravedad, el agua que alcanza esa distancia se adentra más al interior rellenando terrenos bajos, cubetas, etc. contiguos del mismo modo que se ha realizado en el punto 6.

En este caso tenemos que, aunque el agua del mar directamente por este transecto no se adentraría, teóricamente, al interior del aparcamiento, sí que entraría desde el transecto anterior extendiéndose por toda la zona plana y por lo tanto inundándola como ya ocurrió con el temporal de abril de 2022 y que en la imagen de satélite que se ha mostrado anteriormente se aprecian las costras de sal que quedaron tras desaparecer el agua de la inundación.

Una vez analizados pormenorizadamente todos los sectores del tramo en estudio se representan en el siguiente mapa las superficies probablemente inundables según los cálculos de cota de inundación, alcance de la inundación y el análisis de dichos resultados cruzados con la topografía del terreno durante los mayores temporales registrados en la zona:



7.4 Estimación de la cota de inundación y el alcance del oleaje en el año 2070.

Para estimar la cota de inundación y el alcance del oleaje en el año 2070 se ha considerado la tendencia regresiva de la costa y el aumento del nivel del mar. A partir de esta línea de agua en el año 2070 se realizan los cálculos de cota y alcance de oleaje con los datos de oleaje histórico existente hasta la fecha ya que estimar el incremento de la severidad de los temporales (medidos con el cálculo del aumento de la altura de ola significante y del periodo de la onda debido al cambio climático) para ser añadidos a los cálculos ya realizados de estimación de regresión de la costa y aumento de la cota del nivel del mar, supera el objetivo del presente trabajo. Por ello se realizan los cálculos con el mayor temporal del que existen registros en la zona en estudio, pero sin añadir parametrización debida al cambio climático a los datos de altura significante y periodo pico del temporal más severo de la zona.

El estudio para la determinación del alcance del nivel máximo que asciende el mar durante el temporal más severo, analizando los diferentes planteamientos teóricos de distintas formulaciones empíricas, contrastados con el Atlas de Inundación en el Litoral Peninsular Español desarrollado por la Universidad de Cantabria, se pueden realizar las siguientes aseveraciones:

- La zona de estudio queda encuadrada en el Área V, subzona b, según el Atlas de Inundacióndel litoral peninsular español efectuado por el Grupo de Ingeniería Oceanográfica de la Universidad de Cantabria.
- Para la obtención del régimen medio de cota de inundación se ha tenido en cuenta los datos registrados por el mareógrafo y boya de Málaga.
- Para la obtención de datos de simulación de oleaje en los últimos años se ha utilizado la información del punto SIMAR 2035080 ya que es el punto más próximo a la zona objeto del estudio de cota máxima del nivel del mar.
- A efectos del cálculo del alcance del oleaje durante el temporal más severo acontecido, se han considerado las variaciones del nivel del mar y del oleaje registrados, para lo que se han tenido en cuenta los valores significantes de altura de ola desde que existen registros. Se han utilizado los datos registrados por Puertos del Estados, que datan del año 1958 hasta la actualidad, siendo, además públicos y disponibles para cualquier persona.
- Se usaron todos los registros para determinar los mayores temporales desde que hay registros (desde 1958) y de ellos se estudiaron en detalle aquellos cuya altura de ola significante fue mayor junto con sus periodos pico y dirección predominante.

Respecto al cálculo de la cota de inundación y el alcance de la inundación hay que tener en cuenta las siguientes precauciones de las que se da cuenta en la información de Puertos del Estado para los datos de partida que han sido usados, su relación con los cálculos y resultados finales, así como con el objetivo de este estudio:

- Los modelos generados por los puntos SIMAR *"tienden a subestimar los picos en las velocidades de viento y en las alturas de ola en situaciones de temporal muy extremo",* es decir, los datos de altura de ola y viento que ofrece durante los mayores temporales suelen ser inferiores a la altura real de las olas o la velocidad real del viento. Esto es importante en el objetivo que nos ocupa puesto que, con los datos subestimados de los temporales, la extensión de la inundación también estará "subestimada".
- Además, para el cálculo de la cota de inundación y del alcance de la inundación se usan la altura de ola significante (Hs) y el periodo pico (Tp) principalmente. Así Puertos del Estado explica que la altura de ola significante (Hs) *"equivale aproximadamente la altura media del tercio de olas más altas"* y el periodo pico (Tp) *"el periodo del grupo de ondas con más energía".* Por lo que el uso de Hs (ya subestimado porque los valores extremos de los

puntos SIMAR los subestiman), al ser una media, también subestima aún más los resultados de cota y alcance de la inundación y con el Tp ocurre lo mismo al tratarse de una media de un grupo de ondas (no de la máxima) por lo que el límite de la inundación por los mayores temporales conocidos está "doblemente" subestimado (además de la subestimación de los datos extremos que tiene el uso de los puntos SIMAR).

Dado que los datos de partida de los temporales de Puertos del Estado son los mismos que los extraídos anteriormente en el punto "6 - Estudio de cálculo de máxima elevación del mar", se remite a ese ítem para su conocimiento. A continuación, se procede directamente al cálculo de la cota de inundación de cada uno de los transectos (los mismos que en el punto 6).

7.4.1 Cálculo de la cota de inundación en el año 2070 asociada a cada evento de temporal estimado hasta la actualidad.

En el apartado 6 se seleccionó, de los eventos de temporal marítimo, el que puede ocasionar cotas de inundación máximas. Además, se ha calculado, para cada evento de temporal, el nivel del mar en ese momento como suma de la marea astronómica y meteorológica asociada, siendo todos estos datos directamente consultables en la web www.puertos.es.

Falta el sumando del run-up para determinar exactamente la cota de inundación en el año 2070, que denominaremos S_{CI}, siguiendo siempre la nomenclatura propuesta en el Atlas de Inundación del Litoral Español redactado en su momento por el Grupo de Ingeniería Oceanográfica de la Universidad de Cantabria.

Para calcular el valor del run-up, existen varios modelos o formulaciones que determinan éste en función de varios parámetros o características del oleaje incidente. De las formulaciones más modernas, está muy extendida y aceptada la de Nielsen-Hanslow (1991), que estima el valor del run-up con una banda de confianza del 2% ($R_{2\%}$), en función de la altura de ola significante y la longitud de onda asociada a dicho oleaje, por lo que es necesario conocer el periodo de pico asociado, todo a pie de playa. Por tanto, es totalmente aplicable este modelo, considerando las alturas de olas significantes ya tomadas y su periodo de pico asociado para cada uno de los eventos de temporal.

Formulación de Nielsen-Hanslow (1991):

$$R_{uo}=0{,}47\cdot(Hs\cdot L)^{1/2}\cdot \mathrm{tg}\beta \qquad \text{si } \mathrm{tg}\beta>1/10$$

$$R_{uo}=0{,}04\cdot(Hs\cdot L)^{1/2} \qquad \text{si } \mathrm{tg}\beta<1/10$$

Y para la banda de confianza del 2%:

$$Ru_{2\%} = 1{,}98\cdot R_{uo}$$

Teniendo en cuenta que en las playas de estudio la pendiente del fondo es inferior a 1/10, la formulación resultante es:

$$R_{2\%} = 1{,}98\cdot 0{,}04\cdot(H_s\cdot L)^{1/2}$$

Donde:

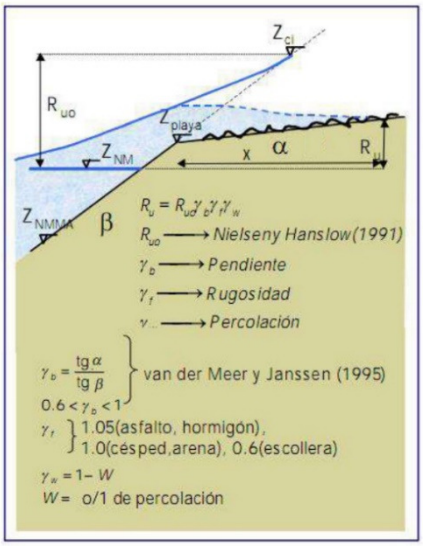
L = Longitud de onda local = $1{,}56\cdot T_p^2$

H_s = Altura de ola significante de cada evento de temporal.

T_p = Periodo de pico asociado a cada evento de temporal.

A esta formulación, se le aplican además los factores de corrección de Van Der Meer y Jansen: pendientes, rugosidad y percolación, para tener en cuenta una aproximación más adecuada a la configuración del perfil de playa formada por doble pendiente (húmeda y seca), la rugosidad del terreno, en este caso, de la arena de la playa y la percolación en la superficie de incidencia dada la anchura de la playa de arena, ya que es lo suficientemente significativa como para tener un

cierto efecto en la inundación del mar sobre los terrenos emergidos formados por dicha arena. Esto se resume en el siguiente esquema:



El factor de pendiente de Van der Meer y Janssen relaciona la pendiente de la playa seca con la pendiente de la playa sumergida:

$$\gamma_b = \frac{\tan\alpha}{\tan\beta}$$

El valor de este coeficiente estará comprendido entre 0.6 y 1. En el caso de obtenerse un valor inferior a 0.6 tras la aplicación de la relación de pendientes, se tomará el valor inferior del intervalo dado, es decir, 0.6. Del mismo modo se actuará en el caso de obtener un valor superior a 1, se tomará este valor máximo.

Debido a la diferente configuración del litoral en el tramo de costa que nos ocupa, se han de tomar en consideración diferentes zonas en las que calcular las pendientes de la playa para definir el factor de pendiente en cada zona homogénea.

El factor de rugosidad de la superficie de incidencia γ_f, tomará el valor de 1, al estar la playa formada por arenas limpias.

El factor de percolación γ_w se calcula con el coeficiente de percolación W; este coeficiente W está directamente relacionado con el diámetro efectivo de la arena y el coeficiente de Hazen. Existen suficientes estudios en los que se ha calculado el coeficiente de percolación de los terrenos.

Rango de valores del coeficiente de permeabilidad en suelos

Tipo de suelo	k (cm/s)
Grava mal graduada (GP)	≥ 1
Grava uniforme (GP)	0,2-1
Grava bien graduada (GW)	0,05-0,3
Arena uniforme (SP)	5×10^{-3}-0,2
Arena bien graduada (SW)	10^{-3}-0,1
Arena limosa (SM)	10^{-3}-5×10^{-3}
Arena arcillosa (SC)	10^{-4}-10^{-3}
Limo de baja plasticidad (ML)	5×10^{-5}-10^{-4}
Arcillas de baja plasticidad (CL)	10^{-5}-10^{-8}

(*L. González de Vallejo et al*, Ingeniería Geológica, Madrid 2002)

En el caso de arena de playa, que se encuentra lavada por el agua del mar y removida por el viento marino, se considera genéricamente que es del tipo 'arena bien graduada (SW)' de la tabla anterior.

Aplicando la formulación de Nielsen-Hanslow, podemos obtener el valor del run-up para cada evento de temporal (antes de aplicar los coeficientes de Van Der Meer y Janssen), que a su vez debe ser sumando a la componente del nivel del mar (S_{NM}) ya calculado para estimar definitivamente el valor de la cota de inundación de cada uno de los eventos de temporal para cada zona con pendiente homogénea; calculado mediante la obtención de los resultados necesarios de clima marítimo en primer lugar y la aplicación de un modelo o formulación de cálculo adecuado posteriormente.

Para el cálculo del run-up es necesario calcular la longitud de onda local asociada al oleaje:

$$L=1.56 \cdot T_p^2$$

Donde T_p es el periodo pico asociado a cada evento de temporal.

En la tabla siguiente se añade la columna 'L' con el resultado de la longitud de onda para cada evento de temporal:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10
1:00	27	3	2019	5,24	11,01	110	84,7	0,847	0,416	189,10
12:00	19	11	2021	5,29	10,01	110	105,6	1,056	0,625	156,31
3:00	11	10	2008	5,12	9,47	105	112	1,120	0,689	139,90
21:00	20	4	2017	4,93	10,51	110	92,7	0,927	0,496	172,32
19:00	20	4	2017	4,93	10,42	111	92,7	0,927	0,496	169,38
12:00	8	4	2015	4,9	10,31	110	87,3	0,873	0,442	165,82

Tabla de máximos temporales desde que existen registros en el punto SIMAR 2035080.

Cálculo del run-up corregido mediante los factores de Van der Meer.

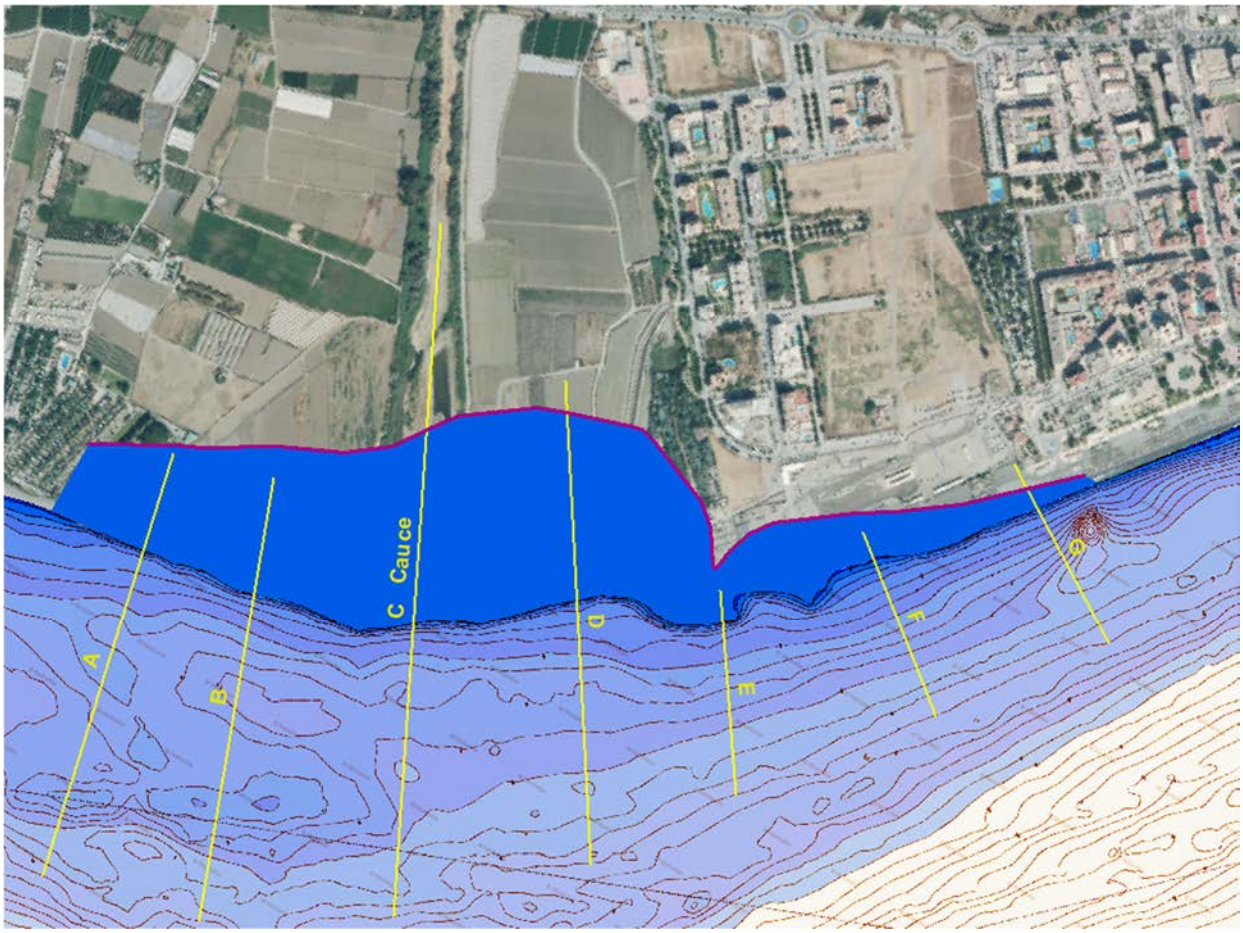
Para la realización de los cálculos de alcance de inundación, se ha dividido 7 zonas en función de la homogeneidad de la costa sumergida, la emergida, del tipo geomorfológico, la morfología de las zonas antropizadas y, además, crear una densidad de medidas para que estas sean suficientes para caracterizar el alcance del oleaje y la cota de inundación con alta precisión en todo el tramo en estudio. A cada una de las zonas se le ha realizado un cálculo de alcance. Esto se ha hecho así ya que el factor de pendiente de Van der Meer y Janssen puede modificar el run-up (si su valor es menor que 1) por lo que ha de calcularse el run-up corregido para cada una de estas zonas.

Las zonas de medición vienen dadas por las pendientes de los terrenos sumergido y emergido. Las pendientes se han calculado mediante batimetría extraídos del visor de la empresa italiana Navionics (perteneciente a Garmin Ltd.), concretamente de la capa SonarChart™, cuyas curvas batimétricas tienen un intervalo de 50 cm creadas mediante "sistema propietario" de Navionics que procesa los datos de registros de sónar procedentes de aportaciones realizadas por navegantes adheridos a Navionics que actualizada periódicamente sus cartas náuticas. Por ello se puede considerar que la batimetría representadas es la más reciente de la zona. (*Los datos e imágenes de batimetría han sido cedidos por Navionics exclusivamente para este estudio no siendo posible su uso para cualquier otro fin incluida la navegación*).

La topografía se ha realizado a partir de un modelo digital del terreno elaborado a partir de las nubes de puntos 3D obtenidos con sistema LiDAR; para ello se ha utilizado la nube de puntos publicada por el Instituto Geográfico Nacional correspondiente a la "2ª Cobertura (2015-Actualidad)", en nuestro caso los datos se obtuvieron en el año 2020, siendo éstos los datos más recientes publicados en la fecha de redacción de este estudio. Con estos datos se realiza un modelo digital de elevaciones con el que se calcula mediante software las curvas de nivel.

Como se ha dicho en la introducción, la morfología de la zona emergida y la sumergida se hipotetiza que se mantiene invariable excepto en el tramo entre la nueva línea de agua y la anterior pero, dado que para los cálculos se utilizan pendientes medias (desde la cota 0 hasta otra determinada sin tener en cuenta las características intermedias) no es relevante su morfología.

La ubicación de las zonas para el cálculo de las pendientes sumergida y emergida se representa en la siguiente imagen que incluye la batimetría:



Transectos (en amarillo) y línea de agua estimada en 2070 (en marrón).

Los datos de partida (ver tabla de la página 232) son los mismos para todas las zonas, y serán los que se usen para el cálculo del run-up en cada zona definida por los perfiles reseñados y que se desarrolla a continuación.

Zona A.

En primer lugar, calculamos las pendientes de la playa húmeda y de la seca. La pendiente de la playa húmeda nos indicará qué formula de Nielsen-Hanslow ha de usarse, dependiendo si esta pendiente es mayor o menor del 10%.

pendiente playa húmeda	
profundidad (m)	7,00
distancia (m)	695

pendiente %	1,007

La pendiente de la playa húmeda es menor del 10% por lo que se usará para el cálculo del run-up la fórmula del Nielsen-Hanslow para pendientes menores de ese valor:

$$R_{uo}=0,04\cdot(Hs\cdot L)^{1/2}$$

La pendiente de la playa seca es:

pendiente playa seca	
altura máx. playa (m)	2,50
distancia (m)	117
pendiente %	2,137

Después se calcula el run-up para cada evento de temporal.

Dado que se busca la cota de inundación y el alcance de los mayores temporales conocidos desde que existen registros, se toman para el cálculo del run-up (R_{uo}) los 4 eventos cuya altura de ola significante y/o periodo pico es mayor:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)		R_{uo}
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78		1,31
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22		1,19
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10		1,23
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10		1,19

Los factores de corrección de Van der Meer y Janssen para esta zona son:

- Factor por pendiente:

$$\gamma_b=\frac{\tan\alpha}{\tan\beta}=2,1$$

al dar como resultado un valor superior a 1, y este coeficiente ha de estar en el intervalo entre un mínimo de 0,6 y un máximo de 1, se toma como coeficiente por pendiente:

$$\gamma_b=1$$

- Factor de rugosidad:

El factor de rugosidad de la superficie de incidencia γ_f, tomará el valor de 1, al estar la playa formada por arenas limpias.

- Factor de percolación:

Como ya se ha dicho más arriba, este factor está relacionado con las características del terreno, y concretamente, en el caso de la arena, con el diámetro de sus granos y su disposición en el suelo. Así existen tablas en las que se define de manera genérica este factor en función de las características de la arena:

Rango de valores del coeficiente de permeabilidad en suelos

Tipo de suelo	k (cm/s)
Grava mal graduada (GP)	$\geqslant 1$
Grava uniforme (GP)	0,2-1
Grava bien graduada (GW)	0,05-0,3
Arena uniforme (SP)	5×10^{-3}-0,2
Arena bien graduada (SW)	10^{-3}-0,1
Arena limosa (SM)	10^{-3}-5×10^{-3}
Arena arcillosa (SC)	10^{-4}-10^{-3}
Limo de baja plasticidad (ML)	5×10^{-5}-10^{-4}
Arcillas de baja plasticidad (CL)	10^{-5}-10^{-8}

En nuestro caso se utilizará como coeficiente de percolación aquel que viene dado por la arena de la playa. Como ésta no viene explícitamente desarrollada en dicha tabla, se considera que se trata de una arena bien graduada, limpia, dado el efecto de lavado que tiene el agua del mar sobre ésta y cuyos valores típicos están comprendidos entre 0,001 y 0,1.

Dado que el intervalo de los valores de k descritos en la tabla es amplio, tomamos el valor 0,01 de dicho intervalo por ser el valor medio del mismo y considerando que la proporción media de arcillas en el terreno se encuentra mayoritariamente entre el 10% y el 20%, por lo que su presencia reduce la permeabilidad del suelo. Aplicando la siguiente formulación se obtiene el coeficiente de percolación (W) medio y, por tanto, un factor medio de percolación (γ_w) en la zona:

$$W=k \Rightarrow 0{,}01 \text{ cm/s}$$

$$\gamma_w=1\text{-}W \Rightarrow \gamma_w = 1 - 0{,}01 = 0{,}99$$

Un mayor valor del factor reductor de percolación implica una mayor reducción del valor de run-up corregido por estar directamente relacionados:

$$R_u = R_{uo} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_w$$

En esta zona, aplicando los factores de Van der Meer y Janssen:

$$R_u = R_{uo} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_w = R_{uo} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0{,}99$$

Con estos datos, para los eventos de temporal considerados se obtiene el run-up corregido (R_u) y con éste el run-up cuyo valor es superado en un porcentaje de tiempo inferior al 2% del evento:

$$R_{u2\%} = 1{,}98 \cdot R_u$$

Aplicando esta formulación se obtiene para cada evento de temporal en esta zona:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)		R_{uo}	R_U	$Ru_{2\%}$ (m)
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78		1,31	1,30	2,57
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22		1,19	1,18	2,34
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10		1,23	1,22	2,42
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10		1,19	1,18	2,34

A este run-up ($R_{u2\%}$) le sumamos el valor de la componente de nivel del mar ya calculado (S_{NM}), para estimar definitivamente el valor de la cota de inundación para cada uno de los máximos eventos registrados:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)		R_{uo}	R_U	$Ru_{2\%}$ (m)	S_{CI} (m)
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78		1,31	1,30	2,57	3,16

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)		R_{uo}	R_U	$Ru_{2\%}$ (m)	S_{CI} (m)
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22		1,19	1,18	2,34	3,08
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10		1,23	1,22	2,42	2,96
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10		1,19	1,18	2,34	2,93

Vistos los resultados tras la aplicación de las fórmulas y factores correctores desarrollados anteriormente se puede decir que el mayor temporal conocido que ha afectado a esta zona del tramo de la costa en estudio del término municipal de Vélez-Málaga es el acontecido el 4 de abril de 2022 que alcanzó su mayor intensidad a las 15:00 horas con una cota de inundación de unos 3,16 m.n.m.a.

Por lo tanto, este temporal de abril de 2022 será el que se desarrolle en el punto 7.4.2 donde se calcula el desplazamiento de la ola por la playa seca, por considerarse el mayor temporal conocido en esta zona desde que existen registros de boyas y con el que se tendrá una visión de la inundación de los terrenos en este sector del litoral.

Zona B.

En primer lugar, calculamos las pendientes de la playa húmeda y de la seca. La pendiente de la playa húmeda nos indicará qué formula de Nielsen-Hanslow ha de usarse, dependiendo si esta pendiente es mayor o menor del 10%.

pendiente playa húmeda	
profundidad (m)	7,00
distancia (m)	743
pendiente %	0,942

La pendiente de la playa húmeda es menor del 10% por lo que se usará para el cálculo del run-up la fórmula del Nielsen-Hanslow para pendientes menores de ese valor:

$$R_{uo}=0,04\cdot(Hs\cdot L)^{1/2}$$

La pendiente de la playa seca es:

pendiente playa seca	
altura máx. playa (m)	2,50
distancia (m)	132
pendiente %	1,894

Después se calcula el run-up para cada evento de temporal.

Dado que se busca la cota de inundación y el alcance de los mayores temporales conocidos desde que existen registros, se toman para el cálculo del run-up (R_{uo}) los 4 eventos cuya altura de ola significante y/o periodo pico es mayor:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)		R_{uo}
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78		1,31
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22		1,19
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10		1,23
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10		1,19

Los factores de corrección de Van der Meer y Janssen para esta zona son:

- Factor por pendiente:

$$\gamma_b = \frac{\tan\alpha}{\tan\beta} = 2{,}0$$

al dar como resultado un valor superior a 1, y este coeficiente ha de estar en el intervalo entre un mínimo de 0,6 y un máximo de 1, se toma como coeficiente por pendiente:

$$\gamma_b = 1$$

- Factor de rugosidad:

El factor de rugosidad de la superficie de incidencia γ_f, tomará el valor de 1, al estar la playa formada por arenas limpias.

- Factor de percolación:

Como ya se ha dicho más arriba, este factor está relacionado con las características del terreno, y concretamente, en el caso de la arena, con el diámetro de sus granos y su disposición en el suelo. Así existen tablas en las que se define de manera genérica este factor en función de las características de la arena:

Rango de valores del coeficiente de permeabilidad en suelos

Tipo de suelo	k (cm/s)
Grava mal graduada (GP)	≥ 1
Grava uniforme (GP)	0,2-1
Grava bien graduada (GW)	0,05-0,3
Arena uniforme (SP)	5×10^{-3}-0,2
Arena bien graduada (SW)	10^{-3}-0,1
Arena limosa (SM)	10^{-3}-5×10^{-3}
Arena arcillosa (SC)	10^{-4}-10^{-3}
Limo de baja plasticidad (ML)	5×10^{-5}-10^{-4}
Arcillas de baja plasticidad (CL)	10^{-5}-10^{-8}

En nuestro caso se utilizará como coeficiente de percolación aquel que viene dado por la arena de la playa. Como ésta no viene explícitamente desarrollada en dicha tabla, se considera que se trata de una arena bien graduada, limpia, dado el efecto de lavado que tiene el agua del mar sobre ésta y cuyos valores típicos están comprendidos entre 0,001 y 0,1.

Dado que el intervalo de los valores de k descritos en la tabla es amplio, tomamos el valor 0,01 de dicho intervalo por ser el valor medio del mismo y considerando que la proporción media de arcillas en el terreno se encuentra mayoritariamente entre el 10% y el 20%, por lo que su presencia reduce la permeabilidad del suelo. Aplicando la siguiente formulación se obtiene el coeficiente de percolación (W) medio y, por tanto, un factor medio de percolación (γ_w) en la zona:

$$W = k \Rightarrow 0{,}01 \text{ cm/s}$$

$$\gamma_w = 1 - W \Rightarrow \gamma_w = 1 - 0{,}01 = 0{,}99$$

Un mayor valor del factor reductor de percolación implica una mayor reducción del valor de run-up corregido por estar directamente relacionados:

$$R_u = R_{uo} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_w$$

En esta zona, aplicando los factores de Van der Meer y Janssen:

$$R_u = R_{uo} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_w = R_{uo} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0{,}99$$

Con estos datos, para los eventos de temporal considerados se obtiene el run-up corregido (R_u) y con éste el run-up cuyo valor es superado en un porcentaje de tiempo inferior al 2% del evento:

$$R_{u2\%} = 1{,}98 \cdot R_u$$

Aplicando esta formulación se obtiene para cada evento de temporal en esta zona:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)		R_{uo}	R_U	$Ru_{2\%}$ (m)
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78		1,31	1,30	2,57
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22		1,19	1,18	2,34
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10		1,23	1,22	2,42
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10		1,19	1,18	2,34

A este run-up ($R_{u2\%}$) le sumamos el valor de la componente de nivel del mar ya calculado (S_{NM}), para estimar definitivamente el valor de la cota de inundación para cada uno de los máximos eventos registrados:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)		R_{uo}	R_U	$Ru_{2\%}$ (m)	S_{CI} (m)
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78		1,31	1,30	2,57	3,16
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22		1,19	1,18	2,34	3,08
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10		1,23	1,22	2,42	2,96
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10		1,19	1,18	2,34	2,93

Vistos los resultados tras la aplicación de las fórmulas y factores correctores desarrollados anteriormente se puede decir que el mayor temporal conocido que ha afectado a esta zona del tramo de la costa en estudio del término municipal de Vélez-Málaga es el acontecido el 4 de abril de 2022 que alcanzó su mayor intensidad a las 15:00 horas con una cota de inundación de unos 3,16 m.n.m.a.

Por lo tanto, este temporal de noviembre de 2015 será el que se desarrolle en el punto 7.4.2 donde se calcula el desplazamiento de la ola por la playa seca, por considerarse el mayor temporal conocido en esta zona desde que existen registros de boyas y con el que se tendrá una visión de la inundación de los terrenos en este sector del litoral.

Zona C.

En primer lugar, calculamos las pendientes de la playa húmeda y de la seca. La pendiente de la playa húmeda nos indicará qué formula de Nielsen-Hanslow ha de usarse, dependiendo si esta pendiente es mayor o menor del 10%.

pendiente playa húmeda	
profundidad (m)	7,00
distancia (m)	754
pendiente %	0,928

La pendiente de la playa húmeda es menor del 10% por lo que se usará para el cálculo del run-up la fórmula del Nielsen-Hanslow para pendientes menores de ese valor:

$$R_{uo}=0{,}04\cdot(Hs\cdot L)^{1/2}$$

La pendiente de la playa seca es:

pendiente playa seca	
altura máx. playa (m)	2,00
distancia (m)	321
pendiente %	0,623

Después se calcula el run-up para cada evento de temporal.

Dado que se busca la cota de inundación y el alcance de los mayores temporales conocidos desde que existen registros, se toman para el cálculo del run-up (R_{uo}) los 4 eventos cuya altura de ola significante y/o periodo pico es mayor:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)		R_{uo}
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78		1,31
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22		1,19
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10		1,23
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10		1,19

Los factores de corrección de Van der Meer y Janssen para esta zona son:

- Factor por pendiente:

$$\gamma_b = \frac{\tan\alpha}{\tan\beta} = 0,7$$

al dar como resultado un valor dentro del intervalo de limitación (0,6 a 1), se toma como coeficiente por pendiente:

$$\gamma_b = 0,7$$

- Factor de rugosidad:

El factor de rugosidad de la superficie de incidencia γ_f, tomará el valor de 1, al estar la playa formada por arenas limpias.

- Factor de percolación:

Como ya se ha dicho más arriba, este factor está relacionado con las características del terreno, y concretamente, en el caso de la arena, con el diámetro de sus granos y su disposición en el suelo. Así existen tablas en las que se define de manera genérica este factor en función de las características de la arena:

Rango de valores del coeficiente de permeabilidad en suelos

Tipo de suelo	k (cm/s)
Grava mal graduada (GP)	≥ 1
Grava uniforme (GP)	0,2-1
Grava bien graduada (GW)	0,05-0,3
Arena uniforme (SP)	5×10^{-3}-0,2
Arena bien graduada (SW)	10^{-3}-0,1
Arena limosa (SM)	10^{-3}-5×10^{-3}
Arena arcillosa (SC)	10^{-4}-10^{-3}
Limo de baja plasticidad (ML)	5×10^{-5}-10^{-4}
Arcillas de baja plasticidad (CL)	10^{-5}-10^{-8}

En nuestro caso se utilizará como coeficiente de percolación aquel que viene dado por la arena de la playa. Como ésta no viene explícitamente desarrollada en dicha tabla, se considera que se trata de una arena bien graduada, limpia, dado el efecto de lavado que tiene el agua del mar sobre ésta y cuyos valores típicos están comprendidos entre 0,001 y 0,1.

Dado que el intervalo de los valores de k descritos en la tabla es amplio, tomamos el valor 0,01 de dicho intervalo por ser el valor medio del mismo y considerando que la proporción media de arcillas en el terreno se encuentra mayoritariamente entre el 10% y el 20%, por lo que su presencia reduce la permeabilidad del suelo. Aplicando la siguiente formulación se obtiene el

coeficiente de percolación (W) medio y, por tanto, un factor medio de percolación (γ_w) en la zona:

$$W=k \Rightarrow 0{,}01 \text{ cm/s}$$

$$\gamma_w=1\text{-}W \Rightarrow \gamma_w = 1 - 0{,}01 = 0{,}99$$

Un mayor valor del factor reductor de percolación implica una mayor reducción del valor de run-up corregido por estar directamente relacionados:

$$R_u = R_{uo} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_w$$

En esta zona, aplicando los factores de Van der Meer y Janssen:

$$R_u = R_{uo} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_w = R_{uo} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0{,}99$$

Con estos datos, para los eventos de temporal considerados se obtiene el run-up corregido (R_u) y con éste el run-up cuyo valor es superado en un porcentaje de tiempo inferior al 2% del evento:

$$R_{u2\%} = 1{,}98 \cdot R_u$$

Aplicando esta formulación se obtiene para cada evento de temporal en esta zona:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)		R_{uo}	R_U	$Ru_{2\%}$ (m)
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78		1,31	0,87	1,72
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22		1,19	0,79	1,57
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10		1,23	0,82	1,62
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10		1,19	0,79	1,57

A este run-up ($R_{u2\%}$) le sumamos el valor de la componente de nivel del mar ya calculado (S_{NM}), para estimar definitivamente el valor de la cota de inundación para cada uno de los máximos eventos registrados:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)		R_{uo}	R_U	$Ru_{2\%}$ (m)	S_{CI} (m)
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78		1,31	0,87	1,72	2,32
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22		1,19	0,79	1,57	2,31
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10		1,23	0,82	1,62	2,17
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10		1,19	0,79	1,57	2,16

Vistos los resultados tras la aplicación de las fórmulas y factores correctores desarrollados anteriormente se puede decir que el mayor temporal conocido que ha afectado a esta zona del tramo de la costa en estudio del término municipal de Vélez-Málaga es el acontecido el 4 de abril de 2022 que alcanzó su mayor intensidad a las 15:00 horas con una cota de inundación de unos 2,32 m.n.m.a.

Por lo tanto, este temporal de abril de 2022 será el que se desarrolle en el punto 7.4.2 donde se calcula el desplazamiento de la ola por la playa seca, por considerarse el mayor temporal conocido en esta zona desde que existen registros de boyas y con el que se tendrá una visión de la inundación de los terrenos en este sector del litoral.

Zona D.

En primer lugar, calculamos las pendientes de la playa húmeda y de la seca. La pendiente de la playa húmeda nos indicará qué formula de Nielsen-Hanslow ha de usarse, dependiendo si esta pendiente es mayor o menor del 10%.

pendiente playa húmeda	
profundidad (m)	7,00
distancia (m)	699
pendiente %	1,001

La pendiente de la playa húmeda es menor del 10% por lo que se usará para el cálculo del run-up la fórmula del Nielsen-Hanslow para pendientes menores de ese valor:

$$R_{uo}=0,04\cdot(Hs\cdot L)^{1/2}$$

La pendiente de la playa seca es:

pendiente playa seca	
altura máx. playa (m)	2,50
distancia (m)	153
pendiente %	1,634

Después se calcula el run-up para cada evento de temporal.

Dado que se busca la cota de inundación y el alcance de los mayores temporales conocidos desde que existen registros, se toman para el cálculo del run-up (R_{uo}) los 4 eventos cuya altura de ola significante y/o periodo pico es mayor:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)		R_{uo}
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78		1,31
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22		1,19
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10		1,23
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10		1,19

Los factores de corrección de Van der Meer y Janssen para esta zona son:

- Factor por pendiente:

$$\gamma_b=\frac{\tan\alpha}{\tan\beta}=1,6$$

al dar como resultado un valor superior a 1, y este coeficiente ha de estar en el intervalo entre un mínimo de 0,6 y un máximo de 1, se toma como coeficiente por pendiente:

$$\gamma_b=1$$

- Factor de rugosidad:

El factor de rugosidad de la superficie de incidencia γ_f, tomará el valor de 1, al estar la playa formada por arenas limpias.

- Factor de percolación:

Como ya se ha dicho más arriba, este factor está relacionado con las características del terreno, y concretamente, en el caso de la arena, con el diámetro de sus granos y su disposición en el suelo. Así existen tablas en las que se define de manera genérica este factor en función de las características de la arena:

Rango de valores del coeficiente de permeabilidad en suelos

Tipo de suelo	k (cm/s)
Grava mal graduada (GP)	$\geqslant 1$
Grava uniforme (GP)	0,2-1
Grava bien graduada (GW)	0,05-0,3
Arena uniforme (SP)	5×10^{-3}-0,2
Arena bien graduada (SW)	10^{-3}-0,1
Arena limosa (SM)	10^{-3}-5×10^{-3}
Arena arcillosa (SC)	10^{-4}-10^{-3}
Limo de baja plasticidad (ML)	5×10^{-5}-10^{-4}
Arcillas de baja plasticidad (CL)	10^{-5}-10^{-8}

En nuestro caso se utilizará como coeficiente de percolación aquel que viene dado por la arena de la playa. Como ésta no viene explícitamente desarrollada en dicha tabla, se considera que se trata de una arena bien graduada, limpia, dado el efecto de lavado que tiene el agua del mar sobre ésta y cuyos valores típicos están comprendidos entre 0,001 y 0,1.

Dado que el intervalo de los valores de k descritos en la tabla es amplio, tomamos el valor 0,01 de dicho intervalo por ser el valor medio del mismo y considerando que la proporción media de arcillas en el terreno se encuentra mayoritariamente entre el 10% y el 20%, por lo que su presencia reduce la permeabilidad del suelo. Aplicando la siguiente formulación se obtiene el coeficiente de percolación (W) medio y, por tanto, un factor medio de percolación (γ_w) en la zona:

$$W=k \Rightarrow 0{,}01 \text{ cm/s}$$

$$\gamma_w=1-W \Rightarrow \gamma_w = 1 - 0{,}01 = 0{,}99$$

Un mayor valor del factor reductor de percolación implica una mayor reducción del valor de run-up corregido por estar directamente relacionados:

$$R_u = R_{uo} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_w$$

En esta zona, aplicando los factores de Van der Meer y Janssen:

$$R_u = R_{uo} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_w = R_{uo} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0{,}99$$

Con estos datos, para los eventos de temporal considerados se obtiene el run-up corregido (R_u) y con éste el run-up cuyo valor es superado en un porcentaje de tiempo inferior al 2% del evento:

$$R_{u2\%} = 1{,}98 \cdot R_u$$

Aplicando esta formulación se obtiene para cada evento de temporal en esta zona:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)		R_{uo}	R_U	$Ru_{2\%}$ (m)
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78		1,31	1,30	2,57
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22		1,19	1,18	2,34
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10		1,23	1,22	2,42
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10		1,19	1,18	2,34

A este run-up ($R_{u2\%}$) le sumamos el valor de la componente de nivel del mar ya calculado (S_{NM}), para estimar definitivamente el valor de la cota de inundación para cada uno de los máximos eventos registrados:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)		R_{uo}	R_U	$Ru_{2\%}$ (m)	S_{CI} (m)

15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78	1,31	1,30	2,57	3,16
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22	1,19	1,18	2,34	3,08
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10	1,23	1,22	2,42	2,96
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10	1,19	1,18	2,34	2,93

Vistos los resultados tras la aplicación de las fórmulas y factores correctores desarrollados anteriormente se puede decir que el mayor temporal conocido que ha afectado a esta zona del tramo de la costa en estudio del término municipal de Vélez-Málaga es el acontecido el 4 de abril de 2022 que alcanzó su mayor intensidad a las 15:00 horas con una cota de inundación de unos 3,16 m.n.m.a.

Por lo tanto, este temporal de abril de 2022 será el que se desarrolle en el punto 7.4.2 donde se calcula el desplazamiento de la ola por la playa seca, por considerarse el mayor temporal conocido en esta zona desde que existen registros de boyas y con el que se tendrá una visión de la inundación de los terrenos en este sector del litoral.

Zona E.

En primer lugar, calculamos las pendientes de la playa húmeda y de la seca. La pendiente de la playa húmeda nos indicará qué formula de Nielsen-Hanslow ha de usarse, dependiendo si esta pendiente es mayor o menor del 10%.

pendiente playa húmeda	
profundidad (m)	7,00
distancia (m)	364
pendiente %	1,923

La pendiente de la playa húmeda es menor del 10% por lo que se usará para el cálculo del run-up la fórmula del Nielsen-Hanslow para pendientes menores de ese valor:

$$R_{uo}=0,04\cdot(Hs\cdot L)^{1/2}$$

La pendiente de la playa seca es:

pendiente playa seca	
altura máx. playa (m)	2,50
distancia (m)	74
pendiente %	3,378

Después se calcula el run-up para cada evento de temporal.

Dado que se busca la cota de inundación y el alcance de los mayores temporales conocidos desde que existen registros, se toman para el cálculo del run-up (R_{uo}) los 4 eventos cuya altura de ola significante y/o periodo pico es mayor:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)	R_{uo}
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78	1,31
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22	1,19
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10	1,23
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10	1,19

Los factores de corrección de Van der Meer y Janssen para esta zona son:

- Factor por pendiente:

$$\gamma_b = \frac{\tan\alpha}{\tan\beta} = 1{,}8$$

al dar como resultado un valor superior a 1, y este coeficiente ha de estar en el intervalo entre un mínimo de 0,6 y un máximo de 1, se toma como coeficiente por pendiente:

$$\gamma_b = 1$$

- Factor de rugosidad:

El factor de rugosidad de la superficie de incidencia γ_f, tomará el valor de 1, al estar la playa formada por arenas limpias.

- Factor de percolación:

Como ya se ha dicho más arriba, este factor está relacionado con las características del terreno, y concretamente, en el caso de la arena, con el diámetro de sus granos y su disposición en el suelo. Así existen tablas en las que se define de manera genérica este factor en función de las características de la arena:

Rango de valores del coeficiente de permeabilidad en suelos

Tipo de suelo	k (cm/s)
Grava mal graduada (GP)	≥ 1
Grava uniforme (GP)	0,2-1
Grava bien graduada (GW)	0,05-0,3
Arena uniforme (SP)	5×10^{-3}-0,2
Arena bien graduada (SW)	10^{-3}-0,1
Arena limosa (SM)	10^{-3}-5×10^{-3}
Arena arcillosa (SC)	10^{-4}-10^{-3}
Limo de baja plasticidad (ML)	5×10^{-5}-10^{-4}
Arcillas de baja plasticidad (CL)	10^{-5}-10^{-8}

En nuestro caso se utilizará como coeficiente de percolación aquel que viene dado por la arena de la playa. Como ésta no viene explícitamente desarrollada en dicha tabla, se considera que se trata de una arena bien graduada, limpia, dado el efecto de lavado que tiene el agua del mar sobre ésta y cuyos valores típicos están comprendidos entre 0,001 y 0,1.

Dado que el intervalo de los valores de k descritos en la tabla es amplio, tomamos el valor 0,01 de dicho intervalo por ser el valor medio del mismo y considerando que la proporción media de arcillas en el terreno se encuentra mayoritariamente entre el 10% y el 20%, por lo que su presencia reduce la permeabilidad del suelo. Aplicando la siguiente formulación se obtiene el coeficiente de percolación (W) medio y, por tanto, un factor medio de percolación (γ_w) en la zona:

$$W = k \Rightarrow 0{,}01 \text{ cm/s}$$

$$\gamma_w = 1 - W \Rightarrow \gamma_w = 1 - 0{,}01 = 0{,}99$$

Un mayor valor del factor reductor de percolación implica una mayor reducción del valor de run-up corregido por estar directamente relacionados:

$$R_u = R_{uo} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_w$$

En esta zona, aplicando los factores de Van der Meer y Janssen:

$$R_u = R_{uo} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_w = R_{uo} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0{,}99$$

Con estos datos, para los eventos de temporal considerados se obtiene el run-up corregido (R_u) y con éste el run-up cuyo valor es superado en un porcentaje de tiempo inferior al 2% del evento:

$$R_{u2\%} = 1{,}98 \cdot R_u$$

Aplicando esta formulación se obtiene para cada evento de temporal en esta zona:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)	R_{uo}	R_U	$Ru_{2\%}$ (m)
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78	1,31	1,30	2,57
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22	1,19	1,18	2,34
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10	1,23	1,22	2,42
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10	1,19	1,18	2,34

A este run-up ($R_{u2\%}$) le sumamos el valor de la componente de nivel del mar ya calculado (S_{NM}), para estimar definitivamente el valor de la cota de inundación para cada uno de los máximos eventos registrados:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)	R_{uo}	R_U	$Ru_{2\%}$ (m)	S_{CI} (m)
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78	1,31	1,30	2,57	3,16
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22	1,19	1,18	2,34	3,08
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10	1,23	1,22	2,42	2,96
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10	1,19	1,18	2,34	2,93

Vistos los resultados tras la aplicación de las fórmulas y factores correctores desarrollados anteriormente se puede decir que el mayor temporal conocido que ha afectado a esta zona del tramo de la costa en estudio del término municipal de Vélez-Málaga es el acontecido el 4 de abril de 2022 que alcanzó su mayor intensidad a las 15:00 horas con una cota de inundación de unos 3,16 m.n.m.a.

Por lo tanto, este temporal de abril de 2022 será el que se desarrolle en el punto 7.4.2 donde se calcula el desplazamiento de la ola por la playa seca, por considerarse el mayor temporal conocido en esta zona desde que existen registros de boyas y con el que se tendrá una visión de la inundación de los terrenos en este sector del litoral.

Zona F.

En primer lugar, calculamos las pendientes de la playa húmeda y de la seca. La pendiente de la playa húmeda nos indicará qué formula de Nielsen-Hanslow ha de usarse, dependiendo si esta pendiente es mayor o menor del 10%.

pendiente playa húmeda	
profundidad (m)	7,00
distancia (m)	337
pendiente %	2,077

La pendiente de la playa húmeda es menor del 10% por lo que se usará para el cálculo del run-up la fórmula del Nielsen-Hanslow para pendientes menores de ese valor:

$$R_{uo}=0,04\cdot(Hs\cdot L)^{1/2}$$

La pendiente de la playa seca es:

pendiente playa seca	
altura máx. playa (m)	3,00
distancia (m)	95
pendiente %	3,158

Después se calcula el run-up para cada evento de temporal.

Dado que se busca la cota de inundación y el alcance de los mayores temporales conocidos desde que existen registros, se toman para el cálculo del run-up (R_{uo}) los 4 eventos cuya altura de ola significante y/o periodo pico es mayor:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)		R_{uo}
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78		1,31
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22		1,19
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10		1,23
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10		1,19

Los factores de corrección de Van der Meer y Janssen para esta zona son:

- Factor por pendiente:

$$\gamma_b = \frac{\tan\alpha}{\tan\beta} = 1{,}5$$

al dar como resultado un valor superior al intervalo entre un mínimo de 0,6 y un máximo de 1, se toma como coeficiente por pendiente:

$$\gamma_b = 1$$

- Factor de rugosidad:

El factor de rugosidad de la superficie de incidencia γ_f, tomará el valor de 1, al estar la playa formada por arenas limpias.

- Factor de percolación:

Como ya se ha dicho más arriba, este factor está relacionado con las características del terreno, y concretamente, en el caso de la arena, con el diámetro de sus granos y su disposición en el suelo. Así existen tablas en las que se define de manera genérica este factor en función de las características de la arena:

Rango de valores del coeficiente de permeabilidad en suelos

Tipo de suelo	k (cm/s)
Grava mal graduada (GP)	≥ 1
Grava uniforme (GP)	0,2-1
Grava bien graduada (GW)	0,05-0,3
Arena uniforme (SP)	5×10^{-3}-0,2
Arena bien graduada (SW)	10^{-3}-0,1
Arena limosa (SM)	10^{-3}-5×10^{-3}
Arena arcillosa (SC)	10^{-4}-10^{-3}
Limo de baja plasticidad (ML)	5×10^{-5}-10^{-4}
Arcillas de baja plasticidad (CL)	10^{-5}-10^{-8}

En nuestro caso se utilizará como coeficiente de percolación aquel que viene dado por la arena de la playa. Como ésta no viene explícitamente desarrollada en dicha tabla, se considera que se trata de una arena bien graduada, limpia, dado el efecto de lavado que tiene el agua del mar sobre ésta y cuyos valores típicos están comprendidos entre 0,001 y 0,1.

Dado que el intervalo de los valores de k descritos en la tabla es amplio, tomamos el valor 0,01 de dicho intervalo por ser el valor medio del mismo y considerando que la proporción media de arcillas en el terreno se encuentra mayoritariamente entre el 10% y el 20%, por lo que su presencia reduce la permeabilidad del suelo. Aplicando la siguiente formulación se obtiene el

coeficiente de percolación (W) medio y, por tanto, un factor medio de percolación (γ_w) en la zona:

$$W=k \Rightarrow 0{,}01 \text{ cm/s}$$

$$\gamma_w=1\text{-}W \Rightarrow \gamma_w = 1 - 0{,}01 = 0{,}99$$

Un mayor valor del factor reductor de percolación implica una mayor reducción del valor de run-up corregido por estar directamente relacionados:

$$R_u = R_{uo} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_w$$

En esta zona, aplicando los factores de Van der Meer y Janssen:

$$R_u = R_{uo} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_w = R_{uo} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0{,}99$$

Con estos datos, para los eventos de temporal considerados se obtiene el run-up corregido (R_u) y con éste el run-up cuyo valor es superado en un porcentaje de tiempo inferior al 2% del evento:

$$R_{u2\%} = 1{,}98 \cdot R_u$$

Aplicando esta formulación se obtiene para cada evento de temporal en esta zona:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)	R_{uo}	R_U	$Ru_{2\%}$ (m)
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78	1,31	1,30	2,57
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22	1,19	1,18	2,34
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10	1,23	1,22	2,42
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10	1,19	1,18	2,34

A este run-up ($R_{u2\%}$) le sumamos el valor de la componente de nivel del mar ya calculado (S_{NM}), para estimar definitivamente el valor de la cota de inundación para cada uno de los máximos eventos registrados:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)	R_{uo}	R_U	$Ru_{2\%}$ (m)	S_{CI} (m)
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78	1,31	1,30	2,57	3,16
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22	1,19	1,18	2,34	3,08
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10	1,23	1,22	2,42	2,96
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10	1,19	1,18	2,34	2,93

Vistos los resultados tras la aplicación de las fórmulas y factores correctores desarrollados anteriormente se puede decir que el mayor temporal conocido que ha afectado a esta zona del tramo de la costa en estudio del término municipal de Vélez-Málaga es el acontecido el 4 de abril de 2022 que alcanzó su mayor intensidad a las 15:00 horas con una cota de inundación de unos 3,16 m.n.m.a.

Por lo tanto, este temporal de abril de 2022 será el que se desarrolle en el punto 7.4.2 donde se calcula el desplazamiento de la ola por la playa seca, por considerarse el mayor temporal conocido en esta zona desde que existen registros de boyas y con el que se tendrá una visión de la inundación de los terrenos en este sector del litoral.

Zona G.

En primer lugar, calculamos las pendientes de la playa húmeda y de la seca. La pendiente de la playa húmeda nos indicará qué formula de Nielsen-Hanslow ha de usarse, dependiendo si esta pendiente es mayor o menor del 10%.

pendiente playa húmeda	
profundidad (m)	7,00
distancia (m)	269
pendiente %	2,602

La pendiente de la playa húmeda es menor del 10% por lo que se usará para el cálculo del run-up la fórmula del Nielsen-Hanslow para pendientes menores de ese valor:

$$R_{uo}=0,04\cdot(Hs\cdot L)^{1/2}$$

La pendiente de la playa seca es:

pendiente playa seca	
altura máx. playa (m)	2,50
distancia (m)	50
pendiente %	5,000

Después se calcula el run-up para cada evento de temporal.

Dado que se busca la cota de inundación y el alcance de los mayores temporales conocidos desde que existen registros, se toman para el cálculo del run-up (R_{uo}) los 4 eventos cuya altura de ola significante y/o periodo pico es mayor:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)	R_{uo}
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78	1,31
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22	1,19
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10	1,23
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10	1,19

Los factores de corrección de Van der Meer y Janssen para esta zona son:

- Factor por pendiente:

$$\gamma_b=\frac{\tan\alpha}{\tan\beta}=1,9$$

al dar como resultado un valor superior a 1, y este coeficiente ha de estar en el intervalo entre un mínimo de 0,6 y un máximo de 1, se toma como coeficiente por pendiente:

$$\gamma_b=1$$

- Factor de rugosidad:

El factor de rugosidad de la superficie de incidencia γ_f, tomará el valor de 1, al estar la playa formada por arenas limpias.

- Factor de percolación:

Como ya se ha dicho más arriba, este factor está relacionado con las características del terreno, y concretamente, en el caso de la arena, con el diámetro de sus granos y su disposición en el suelo. Así existen tablas en las que se define de manera genérica este factor en función de las características de la arena:

Rango de valores del coeficiente de permeabilidad en suelos

Tipo de suelo	k (cm/s)
Grava mal graduada (GP)	$\geqslant 1$
Grava uniforme (GP)	0,2-1
Grava bien graduada (GW)	0,05-0,3
Arena uniforme (SP)	5×10^{-3}-0,2
Arena bien graduada (SW)	10^{-3}-0,1
Arena limosa (SM)	10^{-3}-5×10^{-3}
Arena arcillosa (SC)	10^{-4}-10^{-3}
Limo de baja plasticidad (ML)	5×10^{-5}-10^{-4}
Arcillas de baja plasticidad (CL)	10^{-5}-10^{-8}

En nuestro caso se utilizará como coeficiente de percolación aquel que viene dado por la arena de la playa. Como ésta no viene explícitamente desarrollada en dicha tabla, se considera que se trata de una arena bien graduada, limpia, dado el efecto de lavado que tiene el agua del mar sobre ésta y cuyos valores típicos están comprendidos entre 0,001 y 0,1.

Dado que el intervalo de los valores de k descritos en la tabla es amplio, tomamos el valor 0,01 de dicho intervalo por ser el valor medio del mismo y considerando que la proporción media de arcillas en el terreno se encuentra mayoritariamente entre el 10% y el 20%, por lo que su presencia reduce la permeabilidad del suelo. Aplicando la siguiente formulación se obtiene el coeficiente de percolación (W) medio y, por tanto, un factor medio de percolación (γ_w) en la zona:

$$W=k \Rightarrow 0{,}01 \text{ cm/s}$$

$$\gamma_w=1\text{-}W \Rightarrow \gamma_w = 1 - 0{,}01 = 0{,}99$$

Un mayor valor del factor reductor de percolación implica una mayor reducción del valor de run-up corregido por estar directamente relacionados:

$$R_u = R_{uo} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_w$$

En esta zona, aplicando los factores de Van der Meer y Janssen:

$$R_u = R_{uo} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_w = R_{uo} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0{,}99$$

Con estos datos, para los eventos de temporal considerados se obtiene el run-up corregido (R_u) y con éste el run-up cuyo valor es superado en un porcentaje de tiempo inferior al 2% del evento:

$$R_{u2\%} = 1{,}98 \cdot R_u$$

Aplicando esta formulación se obtiene para cada evento de temporal en esta zona:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)		R_{uo}	R_U	$Ru_{2\%}$ (m)
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78		1,31	1,30	2,57
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22		1,19	1,18	2,34
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10		1,23	1,22	2,42
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10		1,19	1,18	2,34

A este run-up ($R_{u2\%}$) le sumamos el valor de la componente de nivel del mar ya calculado (S_{NM}), para estimar definitivamente el valor de la cota de inundación para cada uno de los máximos eventos registrados:

Hora	Día	Mes	Año	Hs	Tp (s)	Dir °	S_{REDMAR} (cm)	S_{REDMAR} (m)	S_{NM}	L (m)		R_{uo}	R_U	$Ru_{2\%}$ (m)	S_{CI} (m)
15:00	4	4	2022	4,69	12,11	109	102,4	1,024	0,593	228,78		1,31	1,30	2,57	3,16
16:00	1	11	2015	5,41	10,26	115	117,3	1,173	0,742	164,22		1,19	1,18	2,34	3,08
2:00	25	3	2022	5,03	11,01	109	97,5	0,975	0,544	189,10		1,23	1,22	2,42	2,96
14:00	4	4	2022	4,69	11,01	110	102,4	1,024	0,593	189,10		1,19	1,18	2,34	2,93

Vistos los resultados tras la aplicación de las fórmulas y factores correctores desarrollados anteriormente se puede decir que el mayor temporal conocido que ha afectado a esta zona del tramo de la costa en estudio del término municipal de Vélez-Málaga es el acontecido el 4 de abril de 2022 que alcanzó su mayor intensidad a las 15:00 horas con una cota de inundación de unos 3,16 m.n.m.a.

Por lo tanto, este temporal de abril de 2022 será el que se desarrolle en el punto 7.4.2 donde se calcula el desplazamiento de la ola por la playa seca, por considerarse el mayor temporal conocido en esta zona desde que existen registros de boyas y con el que se tendrá una visión de la inundación de los terrenos en este sector del litoral.

7.4.2 Estimación del desplazamiento de la ola por la playa seca en el año 2070

Para realizar estos cálculos se va a realizar el estudio según las instrucciones del C.E.M. (Coastal Engineering Manual), con las ventajas que aporta el uso de los datos de los puntos SIMAR de Puertos del Estado y la base de datos reales de oleaje registrados desde 1958.

Según el C.E.M. es necesario obtener la altura de ola significante en aguas profundas para calcular la altura de ola significativa (H'0 según nomenclatura del C.E.M.). Como los datos obtenidos en el punto SIMAR son simulaciones de oleaje para ese punto, el valor que se obtiene en dicho punto SIMAR es igual para ambos parámetros.

La longitud de ola profunda es:

$$L = 1.56 \times {T_p}^2$$

Donde T_p es el periodo punta; también obtenido del punto SIMAR.

La altura de ruptura de la ola según Komar & Gaughan (1973) es:

$$\Omega_b = 0.56 \left(\frac{H_0}{L_0}\right)^{\frac{-1}{5}}$$

Donde, L_0 es la longitud de ola en aguas profundas (m).

Así mismo tenemos que,

$$H_b = H_0 \times \Omega_b$$

Para continuar con los cálculos según el C.E.M. del alcance del oleaje (Δx) lo hacemos mediante la fórmula:

$$\Delta x = \frac{\eta_s}{tan\vartheta - \frac{d_\eta}{d_x}}$$

Para ello necesitamos conocer la pendiente uniforme de la playa, ϑ, (húmeda + seca). Estos parámetros ya han sido obtenidos para el cálculo de la cota de inundación anteriormente y han sido medidos, recordemos, desde la cota 0 (línea de agua) estimada para el año 2070 teniendo en cuenta la regresión de la costa y el aumento del nivel del mar por efecto del cambio climático.

El cálculo de la decaída de la ola cuando llega a la playa es:

$$\frac{d\eta}{dx} = \frac{1}{1 + \frac{8}{3 \times \gamma_b^2}} \times tan\beta$$

La elevación media de la ola sobre el litoral:

$$\eta_s = \eta_b + (d_b - \eta_b) + \frac{1}{1 + \frac{8}{(3 \times \gamma_b^2)}}$$

La elevación media sobre el nivel del mar en aguas tranquilas profundas:

$$\eta_b = \frac{-1}{16} \times \gamma_b^2 \times d_b$$

Donde γ_b, es el índice de profundidad de rotura, que se obtiene de:

$$\gamma b = b - a\ \frac{H_b}{g \times T^2}$$

Y la profundidad de rotura db, que se obtiene mediante la fórmula:

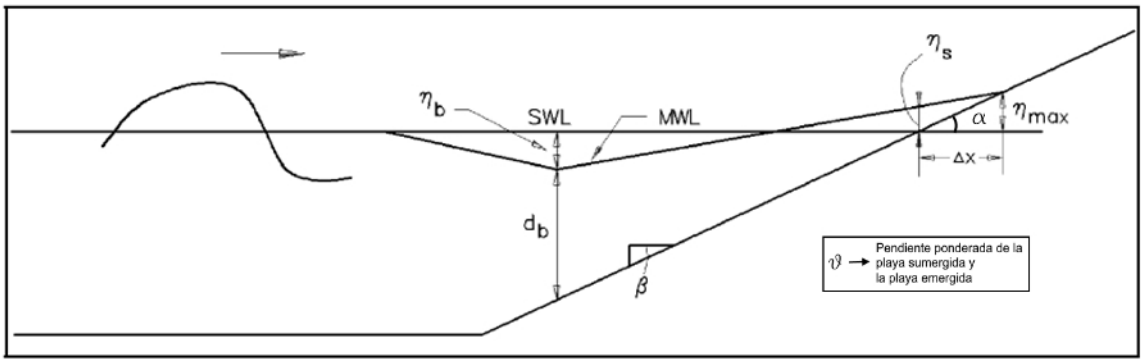
$$db = \frac{H_b}{\gamma_b^2}$$

Los parámetros a y b son coeficientes relacionados con la pendiente de la playa húmeda y responden a la siguiente formulación:

$$a = 43.8 \times (1 - e^{19tan\beta})$$

$$b = \frac{1.56}{(1 + e^{-19.5tan\beta})}$$

Así, aplicaremos este sistema de fórmulas del C.E.M. para los datos del temporal más severo desde que hay registros, considerando que éste es aquel cuya cota de inundación (calculada en el punto 7.4.1) es el de mayor valor, es decir, aquel temporal cuyo valor de S_{ci} es mayor.



Esquema de los parámetros calculados y su relación con el perfil de la playa (extraído del C.E.M.).

A continuación, se desarrollan los cálculos para cada transecto.

Zona A:

Como ya se ha visto en el apartado 7.4.1, el mayor temporal conocido en esta zona, desde que existen registros de boyas, es el acontecido el 4 de abril de 2022 con una cota corregida de inundación de 3,16 m.n.m.a. Serán los datos de este temporal los que se desarrollen aquí para

calcular el alcance del mar durante los mayores temporales conocidos, según el procedimiento del C.E.M.

Los datos de partida para los cálculos son:

Punto SIMAR	2035080
Fecha máx. temporal	04/04/2022
Hs	4,69
Tp	12,11
L	228,78

Resultando, tras la aplicación de la formulación anteriormente descrita:

Ωb	1,22
Hb	5,72
dη/dx	0,0021
ηs	1,17
ηb	-0,30
γb	0,83
db	6,92
tanα	0,021
tanβ	0,010
tanϑ	0,012

Por lo tanto, el alcance del mar durante este temporal, en esta zona, dado por la fórmula:

$$\Delta x = \frac{\eta_s}{tan\vartheta - \frac{d_\eta}{d_x}}$$

Arroja un resultado de 121,78 metros tierra adentro desde la línea de agua estimada para el año 2070. Es decir, esa distancia es el lugar hasta donde alcanzaría el agua del mar, según las cartografías utilizadas, con unas pendientes constantes, y un oleaje regular durante el máximo temporal conocido desde que existen registros.

Por tanto, podemos decir que el oleaje generado durante el temporal del día 4 de abril de 2022 en esta zona se adentraría hasta los 121,78 metros según indican los cálculos teóricos de alcance descritos en el manual de ingeniería de costas (CEM), usando como datos de partida los registros tomados por las boyas y el modelado numérico del oleaje y viento de los puntos SIMAR de Puertos del Estado, y asimilando la zona de costa en estudio como un sector homogéneo con oleaje regular durante el evento del mayor temporal como modelo simplificado del terreno costero para la realización estos cálculos y considerando la cota cero o línea de agua la resultante de la estimación a 50 años de la regresión de la costa incrementada con el aumento del nivel del mar a causa del cambio climático, estimado éste en 31 cm de media.

Zona B:

Como ya se ha visto en el apartado 7.4.1, el mayor temporal conocido en esta zona, desde que existen registros de boyas, es el acontecido el 4 de abril de 2022 con una cota corregida de inundación de 3,16 m.n.m.a. Serán los datos de este temporal los que se desarrollen aquí para calcular el alcance del mar durante los mayores temporales conocidos, según el procedimiento del C.E.M.

Los datos de partida para los cálculos son:

Punto SIMAR	2035080

Fecha máx. temporal	04/04/2022
Hs	4,69
Tp	12,11
L	228,78

Resultando, tras la aplicación de la formulación anteriormente descrita:

Ωb	1,22
Hb	5,72
dη/dx	0,0019
ηs	1,17
ηb	-0,29
γb	0,82
db	6,95
tanα	0,019
tanβ	0,009
tanϑ	0,011

Por lo tanto, el alcance del mar durante este temporal, en esta zona, dado por la fórmula:

$$\Delta x = \frac{\eta_s}{tan\vartheta - \frac{d_\eta}{d_x}}$$

Arroja un resultado de 130,99 metros tierra adentro desde la línea de agua estimada para el año 2070. Es decir, esa distancia es el lugar hasta donde alcanzaría el agua del mar, según las cartografías utilizadas, con unas pendientes constantes, y un oleaje regular durante el máximo temporal conocido desde que existen registros.

Por tanto, podemos decir que el oleaje generado durante el temporal del día 4 de abril de 2022 en esta zona se adentraría hasta los 130,99 metros según indican los cálculos teóricos de alcance descritos en el manual de ingeniería de costas (CEM), usando como datos de partida los registros tomados por las boyas y el modelado numérico del oleaje y viento de los puntos SIMAR de Puertos del Estado, y asimilando la zona de costa en estudio como un sector homogéneo con oleaje regular durante el evento del mayor temporal como modelo simplificado del terreno costero para la realización estos cálculos y considerando la cota cero o línea de agua la resultante de la estimación a 50 años de la regresión de la costa incrementada con el aumento del nivel del mar a causa del cambio climático, estimado éste en 31 cm de media.

Zona C:

Como ya se ha visto en el apartado 7.4.1, el mayor temporal conocido en esta zona, desde que existen registros de boyas, es el acontecido el 4 de abril de 2022 con una cota corregida de inundación de 2,32 m.n.m.a. Serán los datos de este temporal los que se desarrollen aquí para calcular el alcance del mar durante los mayores temporales conocidos, según el procedimiento del C.E.M.

Los datos de partida para los cálculos son:

Punto SIMAR	2035080
Fecha máx. temporal	04/04/2022
Hs	4,69
Tp	12,11
L	228,78

Resultando, tras la aplicación de la formulación anteriormente descrita:

Ωb	1,22
Hb	5,72
dη/dx	0,0019
ηs	1,17
ηb	-0,29
γb	0,82
db	6,95
tanα	0,006
tanβ	0,009
tanϑ	0,008

Por lo tanto, el alcance del mar durante este temporal, en esta zona, dado por la fórmula:

$$\Delta x = \frac{\eta_s}{tan\vartheta - \frac{d_\eta}{d_x}}$$

Arroja un resultado de 180,41 metros tierra adentro desde la línea de agua estimada para el año 2070. Es decir, esa distancia es el lugar hasta donde alcanzaría el agua del mar, según las cartografías utilizadas, con unas pendientes constantes, y un oleaje regular durante el máximo temporal conocido desde que existen registros.

Por tanto, podemos decir que el oleaje generado durante el temporal del día 4 de abril de 2022 en esta zona se adentraría hasta los 180,41 metros según indican los cálculos teóricos de alcance descritos en el manual de ingeniería de costas (CEM), usando como datos de partida los registros tomados por las boyas y el modelado numérico del oleaje y viento de los puntos SIMAR de Puertos del Estado, y asimilando la zona de costa en estudio como un sector homogéneo con oleaje regular durante el evento del mayor temporal como modelo simplificado del terreno costero para la realización estos cálculos y considerando la cota cero o línea de agua la resultante de la estimación a 50 años de la regresión de la costa incrementada con el aumento del nivel del mar a causa del cambio climático, estimado éste en 31 cm de media.

Zona D:

Como ya se ha visto en el apartado 7.4.1, el mayor temporal conocido en esta zona, desde que existen registros de boyas, es el acontecido el 4 de abril de 2022 con una cota corregida de inundación de 3,16 m.n.m.a. Serán los datos de este temporal los que se desarrollen aquí para calcular el alcance del mar durante los mayores temporales conocidos, según el procedimiento del C.E.M.

Los datos de partida para los cálculos son:

Punto SIMAR	2035080
Fecha máx. temporal	04/04/2022
Hs	4,69
Tp	12,11
L	228,78

Resultando, tras la aplicación de la formulación anteriormente descrita:

Ωb	1,22
Hb	5,72
dη/dx	0,0020

ηs	1,17
ηb	-0,29
γb	0,83
db	6,92
tanα	0,016
tanβ	0,010
tanϑ	0,011

Por lo tanto, el alcance del mar durante este temporal, en esta zona, dado por la fórmula:

$$\Delta x = \frac{\eta_s}{tan\vartheta - \frac{d_\eta}{d_x}}$$

Arroja un resultado de 128,92 metros tierra adentro desde la línea de agua. Es decir, esa distancia es el lugar hasta donde alcanzaría el agua del mar, según las cartografías utilizadas, con unas pendientes constantes, y un oleaje regular durante el máximo temporal conocido desde que existen registros.

Por tanto, podemos decir que el oleaje generado durante el temporal del día 4 de abril de 2022 en esta zona se adentraría hasta los 128,92 metros según indican los cálculos teóricos de alcance descritos en el manual de ingeniería de costas (CEM), usando como datos de partida los registros tomados por las boyas y el modelado numérico del oleaje y viento de los puntos SIMAR de Puertos del Estado, y asimilando la zona de costa en estudio como un sector homogéneo con oleaje regular durante el evento del mayor temporal como modelo simplificado del terreno costero para la realización estos cálculos y considerando la cota cero o línea de agua la resultante de la estimación a 50 años de la regresión de la costa incrementada con el aumento del nivel del mar a causa del cambio climático, estimado éste en 31 cm de media.

Zona E:

Como ya se ha visto en el apartado 7.4.1, el mayor temporal conocido en esta zona, desde que existen registros de boyas, es el acontecido el 4 de abril de 2022 con una cota corregida de inundación de 3,16 m.n.m.a. Serán los datos de este temporal los que se desarrollen aquí para calcular el alcance del mar durante los mayores temporales conocidos, según el procedimiento del C.E.M.

Los datos de partida para los cálculos son:

Punto SIMAR	2035080
Fecha máx. temporal	04/04/2022
Hs	4,69
Tp	12,11
L	228,78

Resultando, tras la aplicación de la formulación anteriormente descrita:

Ωb	1,22
Hb	5,72
dη/dx	0,0043
ηs	1,21
ηb	-0,31
γb	0,87
db	6,56

tanα	0,034
tanβ	0,019
tanϑ	0,022

Por lo tanto, el alcance del mar durante este temporal, en esta zona, dado por la fórmula:

$$\Delta x = \frac{\eta_s}{tan\vartheta - \frac{d_\eta}{d_x}}$$

Arroja un resultado de 69,51 metros tierra adentro desde la línea de agua estimada para el año 2070. Es decir, esa distancia es el lugar hasta donde alcanzaría el agua del mar, según las cartografías utilizadas, con unas pendientes constantes, y un oleaje regular durante el máximo temporal conocido desde que existen registros.

Por tanto, podemos decir que el oleaje generado durante el temporal del día 4 de abril de 2022 en esta zona se adentraría hasta los 69,51 metros según indican los cálculos teóricos de alcance descritos en el manual de ingeniería de costas (CEM), usando como datos de partida los registros tomados por las boyas y el modelado numérico del oleaje y viento de los puntos SIMAR de Puertos del Estado, y asimilando la zona de costa en estudio como un sector homogéneo con oleaje regular durante el evento del mayor temporal como modelo simplificado del terreno costero para la realización estos cálculos y considerando la cota cero o línea de agua la resultante de la estimación a 50 años de la regresión de la costa incrementada con el aumento del nivel del mar a causa del cambio climático, estimado éste en 31 cm de media.

Zona F:

Como ya se ha visto en el apartado 7.4.1, el mayor temporal conocido en esta zona, desde que existen registros de boyas, es el acontecido el 4 de abril de 2022 con una cota corregida de inundación de 3,16 m.n.m.a. Serán los datos de este temporal los que se desarrollen aquí para calcular el alcance del mar durante los mayores temporales conocidos, según el procedimiento del C.E.M.

Los datos de partida para los cálculos son:

Punto SIMAR	2035080
Fecha máx. temporal	04/04/2022
Hs	4,69
Tp	12,11
L	228,78

Resultando, tras la aplicación de la formulación anteriormente descrita:

Ωb	1,22
Hb	5,72
dη/dx	0,0047
ηs	1,22
ηb	-0,31
γb	0,88
db	6,50
tanα	0,032
tanβ	0,021
tanϑ	0,023

Por lo tanto, el alcance del mar durante este temporal, en esta zona, dado por la fórmula:

$$\Delta x = \frac{\eta_s}{tan\vartheta - \frac{d_\eta}{d_x}}$$

Arroja un resultado de 65,87 metros tierra adentro desde la línea de agua estimada para el año 2070. Es decir, esa distancia es el lugar hasta donde alcanzaría el agua del mar, según las cartografías utilizadas, con unas pendientes constantes, y un oleaje regular durante el máximo temporal conocido desde que existen registros.

Por tanto, podemos decir que el oleaje generado durante el temporal del día 4 de abril de 2022 en esta zona se adentraría hasta los 65,87 metros según indican los cálculos teóricos de alcance descritos en el manual de ingeniería de costas (CEM), usando como datos de partida los registros tomados por las boyas y el modelado numérico del oleaje y viento de los puntos SIMAR de Puertos del Estado, y asimilando la zona de costa en estudio como un sector homogéneo con oleaje regular durante el evento del mayor temporal como modelo simplificado del terreno costero para la realización estos cálculos y considerando la cota cero o línea de agua la resultante de la estimación a 50 años de la regresión de la costa incrementada con el aumento del nivel del mar a causa del cambio climático, estimado éste en 31 cm de media.

Zona G:

Como ya se ha visto en el apartado 7.4.1, el mayor temporal conocido en esta zona, desde que existen registros de boyas, es el acontecido el 4 de abril de 2022 con una cota corregida de inundación de 3,16 m.n.m.a. Serán los datos de este temporal los que se desarrollen aquí para calcular el alcance del mar durante los mayores temporales conocidos, según el procedimiento del C.E.M.

Los datos de partida para los cálculos son:

Punto SIMAR	2035080
Fecha máx. temporal	04/04/2022
Hs	4,69
Tp	12,11
L	228,78

Resultando, tras la aplicación de la formulación anteriormente descrita:

Ωb	1,22
Hb	5,72
dη/dx	0,0061
ηs	1,24
ηb	-0,32
γb	0,91
db	6,31
tanα	0,050
tanβ	0,026
tanϑ	0,030

Por lo tanto, el alcance del mar durante este temporal, en esta zona, dado por la fórmula:

$$\Delta x = \frac{\eta_s}{tan\vartheta - \frac{d_\eta}{d_x}}$$

Arroja un resultado de 52,30 metros tierra adentro desde la línea de agua estimada para el año 2070. Es decir, esa distancia es el lugar hasta donde alcanzaría el agua del mar, según las cartografías utilizadas, con unas pendientes constantes, y un oleaje regular durante el máximo temporal conocido desde que existen registros.

Por tanto, podemos decir que el oleaje generado durante el temporal del día 4 de abril de 2022 en esta zona se adentraría hasta los 52,30 metros según indican los cálculos teóricos de alcance descritos en el manual de ingeniería de costas (CEM), usando como datos de partida los registros tomados por las boyas y el modelado numérico del oleaje y viento de los puntos SIMAR de Puertos del Estado, y asimilando la zona de costa en estudio como un sector homogéneo con oleaje regular durante el evento del mayor temporal como modelo simplificado del terreno costero para la realización estos cálculos y considerando la cota cero o línea de agua la resultante de la estimación a 50 años de la regresión de la costa incrementada con el aumento del nivel del mar a causa del cambio climático, estimado éste en 31 cm de media.

7.4.3 Discusión de los resultados para el año 2070

Teniendo en cuenta estos valores de alcance obtenidos para cada transecto, se puede representar en el mapa el alcance de la inundación teórica en el año 2070 (según el método del C.E.M.) así como la cota de inundación (según Nielsen-Hanslow), teniendo en cuenta tanto la regresión de la costa como la elevación del nivel del mar por los efectos del cambio climático.



Representación gráfica de los alcances calculados mediante el método del C.E.M. (en fucsia) y la cota de inundación mediante la fórmula de Nielsen-Hanslow (1991) corregida con los factores de Van der Meer y Jansen (en azul).

Una vez obtenidos los valores de cota de inundación (S_{CI}), medida en vertical, y de alcance de la inundación (Δx), medida en horizontal, se puede calcular la extensión de la inundación (sin tener en cuenta obstáculos cuya altura no esté cartografiada como curva de nivel, ni las superficies cuyos terrenos estén más bajos colindantes a los que si llega el agua y que por gravedad se desplazaría e inundaría también esos terrenos bajos), pues la forma del perfil medio de la playa relaciona las distancias en vertical y en horizontal de la inundación desde los puntos extremos de la medición.

Al ser variables distintas y haberse tratado y calculado de forma independiente, no se obtienen los mismos resultados de extensión de la inundación. Así, al representar la distancia de inundación

y la cota de inundación sobre la cartografía no serán coincidentes por sus características intrínsecas.

La topografía del terreno es un factor limitante en la extensión de la inundación y se relaciona con los dos parámetros calculados, pudiéndose dar tres casos genéricos que han de ser considerados en cada zona de estudio. Estos casos son:

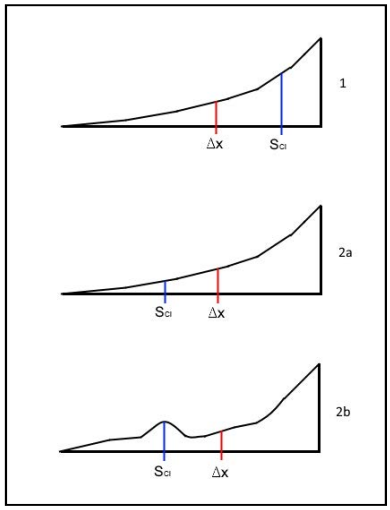
1 – La cota de inundación (S_{CI}), según la topografía del terreno, se ubica más al interior que el alcance de la inundación (Δx).

2 – La cota de inundación (S_{CI}), se ubica más al exterior que el alcance de inundación (Δx). En este supuesto pueden darse 2 situaciones según la topografía del terreno:

2.a – La pendiente del terreno asciende de forma constante desde la cota cero hacia arriba.

2.b – La pendiente del terreno asciende para luego descender al interior, porque existe un montículo u obstáculo más alto que el terreno más al interior.

Esquemáticamente:

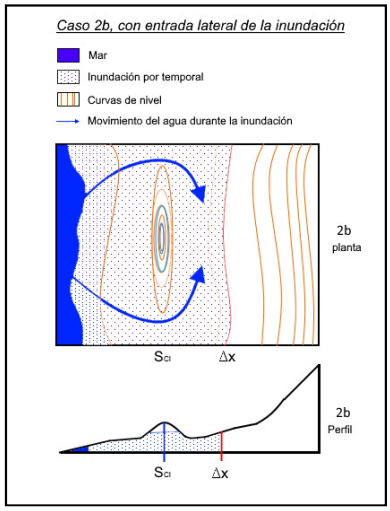


Así, cuando tras los cálculos y su representación sobre la cartografía de las líneas que indican los límites, tanto de la cota de inundación (S_{CI}) sobre el nivel del mar (cota 0 n.m.m.a.) como del alcance (desplazamiento de la ola tierra adentro, Δx), nos encontramos con la situación '1' se considera que la inundación se extiende tierra adentro hasta el límite marcado por el cálculo del alcance (Δx).

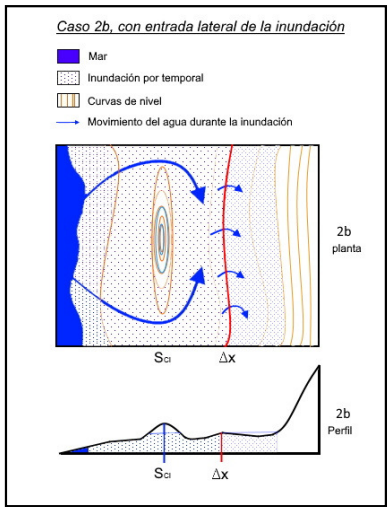
En el caso de encontrarnos con el supuesto 2a, es decir, el límite interior del alcance (Δx) se ubica más al interior que la inundación arrojada por el valor de la cota de inundación (S_{CI}) en un terreno que va ascendiendo de manera constante desde la línea de agua hacia el interior, se considera que la inundación por el temporal se extiende hasta el límite interior marcado por la cota de inundación (S_{CI}) ya que se hace la hipótesis de que el agua no puede superar la cota de inundación calculada ya que más al interior de ésta, el terreno tiene mayor cota por su ascenso en altura uniforme.

En el caso de encontrarnos con el supuesto 2b, es decir, el límite interior del alcance (Δx) se ubica más al interior que la inundación arrojada por el valor de la cota de inundación (S_{CI}) en un terreno que no asciende de forma constante desde la cota cero sino que, por la existencia de montículos de arena o por las propias características del terreno en las que se alcanza una cota determinada y más al interior el terreno baja y, por tanto, tiene cota inferior a ese montículo, cordón, etc. se considera que el límite hasta el que se extiende la inundación por el temporal lo marca cálculo del alcance de las olas (Δx) dado que el agua de la inundación pueda provenir de zonas más bajas, no venir del punto de medición, sino de zonas aledañas más bajas y que se

extiende por detrás de este cordón u obstáculo más alto, pero inundándose al interior con aguas de mar procedentes de las entradas más bajas que el cordón o montículo, en otros lugares más o menos cercanos. Esta situación se trata de ilustrar con el siguiente esquema:



Una variante de este último caso, habitual en los terrenos que abarca este estudio de regresión de la costa, es que los terrenos más al interior del alcance de las olas (Δx) siguen siendo bajos por lo que el agua, por la gravedad y sus características de fluido, se extiende por esos terrenos hasta donde la topografía del suelo vuelve a ascender, por lo que la extensión de la inundación ha de estudiarse en cada caso concreto ya que el agua avanzará incluso más allá de esa línea teórica Δx. Esta situación se trata de ilustrar con el siguiente esquema:



Vistos los casos genéricos, se debe considerar si la extensión de inundación viene limitada por cota (S_{CI}), por distancia (Δx) o por distancia y extensión por terrenos bajos, en cada uno de los casos de los terrenos estudiados.

En las representaciones gráficas anteriores se han mostrado las líneas que marcan la cota de inundación calculada mediante la formulación de Nielsen-Hanslow y el alcance de la inundación calculada por el método de C.E.M.

En la zona de influencia del transecto A, la cota de inundación es de 3,16m por lo que siendo terrenos bajos que en su mayor parte están por debajo de los 3 metros de altitud, la cota de inundación se ubica en el fondo de los terrenos del delta. El alcance de las olas (Δx) en esta zona se ubica a casi 122 metros de la línea de agua estimada para el año 2070 situándose en la zona de cultivos, por tanto, estaríamos en la hipótesis '1' antes comentada siendo este último parámetro el que indicaría la extensión numérica de la inundación.



Representación de la cota de inundación según Nielsen-Hanslow
(azul) y el alcance del oleaje en 2070 según C.E.M. (fucsia)

A partir de aquí es necesario comprobar la cota de los terrenos comparando la cota en la zona inundable según el alcance del oleaje y los terrenos al interior por si se da el caso de que, por efecto de la gravedad, el agua que alcanza esa distancia se adentra más al interior rellenando terrenos bajos, cubetas, etc. contiguos del mismo modo que se ha hecho en el punto 6.

En esta zona tenemos que la cota de inundación es 3,16 por lo que el agua se desplaza al interior por los terrenos llanos propios de los deltas de los ríos situándose el alcance del oleaje teórico a 122 metros de la línea de agua estimada para el año 2070 y coincidente con la cota 2,5 m del terreno, encharcando todos los terrenos llanos que mantengan esta cota por efecto de la gravedad y la energía cinética.

En la zona del transecto B, la cota de inundación es de 3,16m por lo que siendo terrenos bajos que en están por debajo de los 3 metros de altitud, la cota de inundación se ubica en el fondo de los terrenos del delta. El alcance de las olas (Δx) en esta zona se sitúa 131 metros de la línea de agua estimada para el año 2070 situándose en la zona de cultivos interiores, por tanto, estaríamos en la hipótesis '1' antes comentada siendo este último parámetro el que indicaría la extensión numérica de la inundación.



Representación de la cota de inundación según Nielsen-Hanslow
(azul) y el alcance del oleaje según C.E.M. (fucsia)

A partir de aquí es necesario comprobar la cota de los terrenos comparando la cota en la zona inundable según el alcance del oleaje y los terrenos al interior por si se da el caso de que, por

efecto de la gravedad, el agua que alcanza esa distancia se adentra más al interior rellenando terrenos bajos, cubetas, etc. contiguos del mismo modo que se ha hecho en el punto 6.

En este caso tenemos que el límite interior del alcance el oleaje (Δx) se encuentra aproximadamente en los 2,5 metros de cota, inundándose los terrenos llanos del delta contiguos que mantienen esta cota a su interior y por tanto formando balsas de agua de mar más al interior del alcance del oleaje teórico.

La zona C los cálculos del alcance del oleaje se han realizado para el cauce del río Vélez, la cota de inundación es de 2,32m. El cauce, al ser un terreno bajo la cota de inundación se sitúa, según la topografía, al interior de la laguna de la margen izquierda que se formó en la desembocadura tras el temporal de abril de 2022. El alcance de las olas (Δx) en el cauce se ubica a más de 180 metros de la línea de agua estimada para el año 2070, por tanto, estaríamos en la hipótesis '1' arriba expuesta siendo este último parámetro el que indicaría la extensión numérica de la inundación (excepto en las motas de las márgenes cuya altura es igual o mayor que la cota de inundación).



Representación de la cota de inundación según Nielsen-Hanslow (azul) y el alcance del oleaje según C.E.M. (fucsia)

A partir de aquí es necesario comprobar la cota de los terrenos del cauce comparando la cota en la zona inundable según el alcance del oleaje y los terrenos al interior por si se da el caso de que, por efecto de la gravedad, el agua que alcanza esa distancia se adentra más al interior rellenando terrenos bajos, cubetas, etc. contiguos del mismo modo que se ha hecho en el punto 6.

En este caso tenemos que la cota donde se encuentra el límite interior teórico del alcance del oleaje (Δx) es aproximadamente 1,5 metros y, por tanto, inundándose los terrenos llanos contiguos que mantienen esta cota a su interior y por tanto formando balsas de agua de mar más al interior del alcance del oleaje teórico.

En la zona del transecto D, la cota de inundación es de 3,16m por lo que, siendo terrenos bajos que están por debajo de los 3 metros de altitud, la cota de inundación se ubica en las parcelas agrícolas interiores del delta. El alcance de las olas (Δx) en esta zona se sitúa a 129 metros de la línea de agua estimada para el año 2070 situándose en la zona de cultivos, por tanto, estaríamos en la hipótesis '1' antes comentada excepto en la mota de la margen izquierda del río Vélez donde será la cota de inundación la que marque el límite de la extensión de la inundación por los temporales. (hipótesis '2a').



Representación de la cota de inundación según Nielsen-Hanslow
(azul) y el alcance del oleaje según C.E.M. (fucsia)

A partir de aquí es necesario comprobar la cota de los terrenos comparando la altitud en la zona inundable según el alcance del oleaje y los terrenos al interior por si se da el caso de que, por efecto de la gravedad, el agua que alcanza esa distancia se adentra más al interior rellenando terrenos bajos, cubetas, etc. contiguos del mismo modo que se ha hecho en el punto 6.

En este caso tenemos que la cota que alcanza el oleaje en su límite interior (Δx), se encuentra entre los 2,5 y los 3 metros por lo que estos terrenos contiguos al Δx se les presupone inundables por la llegada del agua impulsada por el oleaje y que se dispersará por esta zona llana contigua al alcance del oleaje teórico.

En la zona E, la cota de inundación es de 3,16m. en este sector el terreno es más heterogéneo que en los tramos anteriores por situarse en el extremo oriental del delta y ser el límite de la zona construida de la localidad de Torre del Mar que tiene una pequeña urbanización y un camping (en el año de referencia 2020) en la zona más cercana al delta y al mar y, tierra adentro, parcelas que se están actualmente (2024) urbanizadas.

En este transecto, el alcance del oleaje se sitúa en los 69,5m desde la línea de agua estimada para el año 2070 ubicándose el límite interior del oleaje durante los temporales más severos superando la mencionada pequeña urbanización y el camping, situada en el borde del agua en el año 2020 y circundada con escolleras que en el año 2070 habrán sido sobrepasadas por el agua habiendo desaparecido bajo las aguas la urbanización debido a la regresión costera en la zona y el aumento del nivel del mar por efecto el cambio climático (según las premisas de trabajo de este estudio). La extensión de la inundación en el sector del transecto E viene dado por la hipótesis ‘1’.



Representación de la cota de inundación según Nielsen-Hanslow
(azul) y el alcance del oleaje según C.E.M. (fucsia)

A partir de aquí es necesario comprobar la cota de los terrenos comparando la altitud en la zona inundable según el alcance del oleaje y los terrenos al interior por si se da el caso de que, por efecto de la gravedad, el agua que alcanza esa distancia se adentra más al interior rellenando terrenos bajos, cubetas, etc. contiguos del mismo modo que se ha hecho en el punto 6.

En este caso tenemos que la cota máxima que alcanza el oleaje y que es superado hasta alcanzar su límite interior (Δx) es de 2,5 metros en una escasa superficie, estando la mayor parte del terreno a unos 2 metros de cota siendo terrenos próximos a la zona de bloques residenciales del oeste de Torre del Mar y que marcan la ubicación de la cota de inundación. Por ello existen terrenos que una vez llegada el agua del mar, dado que son llanos o incluso más bajos, son ocupados por el agua del mar debido a la gravedad y a la energía cinética que lleva el agua.

En la zona F, la cota de inundación es de 3,16m la regresión de la costa y el aumento del nivel del mar a causa del cambio climático ha ocasionado que la línea de agua estimada en el año 2070 se posicione de forma que se haya perdido en ese año la playa actual (2024) y sse adentre la línea de agua en el aparcamiento existente en 2024 en una parte del sector mientras que en el resto de este sector, la línea de agua se sitúa de forma oblicua a la playa de 2024 permaneciendo parte de esta en 2024 a una cota máxima coincidente con la cota de inundación. Al interior, los terrenos descienden de cota hasta los 2 metros.

El alcance de las olas (Δx) en esta zona se ubica a 68 metros de la línea de agua estimada para 2070, situándose en la zona baja comentada en el anterior párrafo y que actualmente se utiliza como zona de aparcamiento de vehículos de los usuarios de la playa, por tanto, estaríamos en la hipótesis ‘1’ en la parte occidental del sector y la hipótesis ‘2b’ en la parte oriental ya que existe una zona coincidente con la cota de inundación, pero que el agua circundará este punto de cota de inundación rodeándolo y por tanto inundando los terrenos interiores que tienen una cota inferior.



Representación de la cota de inundación según Nielsen-Hanslow
(azul) y el alcance del oleaje según C.E.M. (fucsia)

A partir de aquí es necesario comprobar la cota de los terrenos comparando la altitud en la zona inundable según el alcance del oleaje y los terrenos al interior por si se da el caso de que, por efecto de la gravedad, el agua que alcanza esa distancia se adentra más al interior rellenando terrenos bajos, cubetas, etc. contiguos del mismo modo que se ha hecho en el punto 6.

En este caso tenemos que puede penetrar el oleaje al interior del aparcamiento al tratarse de terrenos más bajos que la playa y dado que el alcance teórico del oleaje durante los temporales llega a esta explanada, se deduce que el agua se extenderá por toda ella por la acumulación constate por el aporte de las olas durante los temporales. Esto se aprecia en la fotografía satelital de mayo de 2022 una vez evaporada y desaparecida el agua acumulada donde se ven las acumulaciones de sal en dicha zona llana de aparcamiento:



En rojo se marcan las mayores acumulaciones de sal visibles.

En la zona G la cota de inundación es de 3,16m.

La configuración del terreno en aquí es similar a la anterior, aunque la zona de la playa con cota cercana a la cota de inundación tiene menor extensión que el caso anterior. El alcance de las olas (Δx) en esta zona se ubica a 52 metros de la línea de agua estimada para el año 2070, situándose

unos metros al interior de la playa con unos puntos de cota más alta cercana a la cota de inundación por lo que nos encontraríamos en el supuesto '2b'.



Representación de la cota de inundación según Nielsen-Hanslow (azul) y el alcance del oleaje según C.E.M. (fucsia)

A partir de aquí es necesario comprobar la cota de los terrenos comparando la altitud en la zona inundable según el alcance del oleaje y los terrenos al interior por si se da el caso de que, por efecto de la gravedad, el agua que alcanza esa distancia se adentra más al interior rellenando terrenos bajos, cubetas, etc. contiguos del mismo modo que se ha realizado en el punto 6.

En este caso tenemos que, el agua del mar durante los temporales se adentra hasta la explanada baja del aparcamiento entrando por los accesos a la playa, rodeando los puntos de cota más alta (hipótesis '2b') extendiéndose por toda la zona plana y por lo tanto inundándola como ya ocurrió con el temporal de abril de 2022 y que en la imagen de satélite que se ha mostrado anteriormente se aprecian las costras de sal que quedaron tras desaparecer el agua de la inundación.

Una vez analizados pormenorizadamente todos los sectores del tramo en estudio se representan en el siguiente mapa las superficies probablemente inundables según los cálculos de cota de inundación, alcance de la inundación y el análisis de dichos resultados cruzados con la topografía del terreno durante los mayores temporales registrados en la zona:



7.5 Planos



GOBIERNO DE ESPAÑA · VICEPRESIDENCIA TERCERA DEL GOBIERNO · MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOGRÁFICO · SECRETARÍA DE ESTADO DE MEDIO AMBIENTE · DIRECCIÓN GENERAL DE LA COSTA Y EL MAR *DEMARCACIÓN DE COSTAS ANDALUCÍA-MEDITERRÁNEO MÁLAGA*	FECHA: febrero 2024 *Escala: 1:4.000*	Estimación de la línea de agua a causa de la regresión de la costa y el aumento del nivel del mar por el cambio climático	Vélez-Málaga: Desembocadura Río Vélez	Elaborado por: Tragsatec



GOBIERNO DE ESPAÑA · VICEPRESIDENCIA TERCERA DEL GOBIERNO · MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOGRÁFICO · SECRETARÍA DE ESTADO DE MEDIO AMBIENTE · DIRECCIÓN GENERAL DE LA COSTA Y EL MAR DEMARCACIÓN DE COSTAS ANDALUCÍA-MEDITERRÁNEO MÁLAGA	FECHA: febrero 2024 *Escala: 1:4.000*	Cálculo del alcance del oleaje y cota de inundación en 2030 mediante el máximo temporal conocido hasta 2024	Vélez-Málaga: Desembocadura Río Vélez	Elaborado por: Tragsatec



GOBIERNO DE ESPAÑA · VICEPRESIDENCIA TERCERA DEL GOBIERNO · MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOGRÁFICO · SECRETARÍA DE ESTADO DE MEDIO AMBIENTE · DIRECCIÓN GENERAL DE LA COSTA Y EL MAR

DEMARCACIÓN DE COSTAS ANDALUCÍA-MEDITERRÁNEO
MÁLAGA

FECHA: febrero 2024
Escala: 1:4.000

Estimación para el año 2030 de la extensión de la inundación y la línea de agua por regresión y cambio climatico

Vélez-Málaga: Desembocadura Río Vélez

Elaborado por: Tragsatec



GOBIERNO DE ESPAÑA · VICEPRESIDENCIA TERCERA DEL GOBIERNO · MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOGRÁFICO · SECRETARÍA DE ESTADO DE MEDIO AMBIENTE · DIRECCIÓN GENERAL DE LA COSTA Y EL MAR DEMARCACIÓN DE COSTAS ANDALUCÍA-MEDITERRÁNEO MÁLAGA	FECHA: febrero 2024 *Escala: 1:4.000*	Cálculo del alcance del oleaje y cota de inundación en 2040 mediante el máximo temporal conocido hasta 2024	Vélez-Málaga: Desembocadura Río Vélez	Elaborado por: Tragsatec



GOBIERNO DE ESPAÑA · VICEPRESIDENCIA TERCERA DEL GOBIERNO · MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOGRÁFICO · SECRETARÍA DE ESTADO DE MEDIO AMBIENTE · DIRECCIÓN GENERAL DE LA COSTA Y EL MAR

DEMARCACIÓN DE COSTAS ANDALUCÍA-MEDITERRÁNEO MÁLAGA

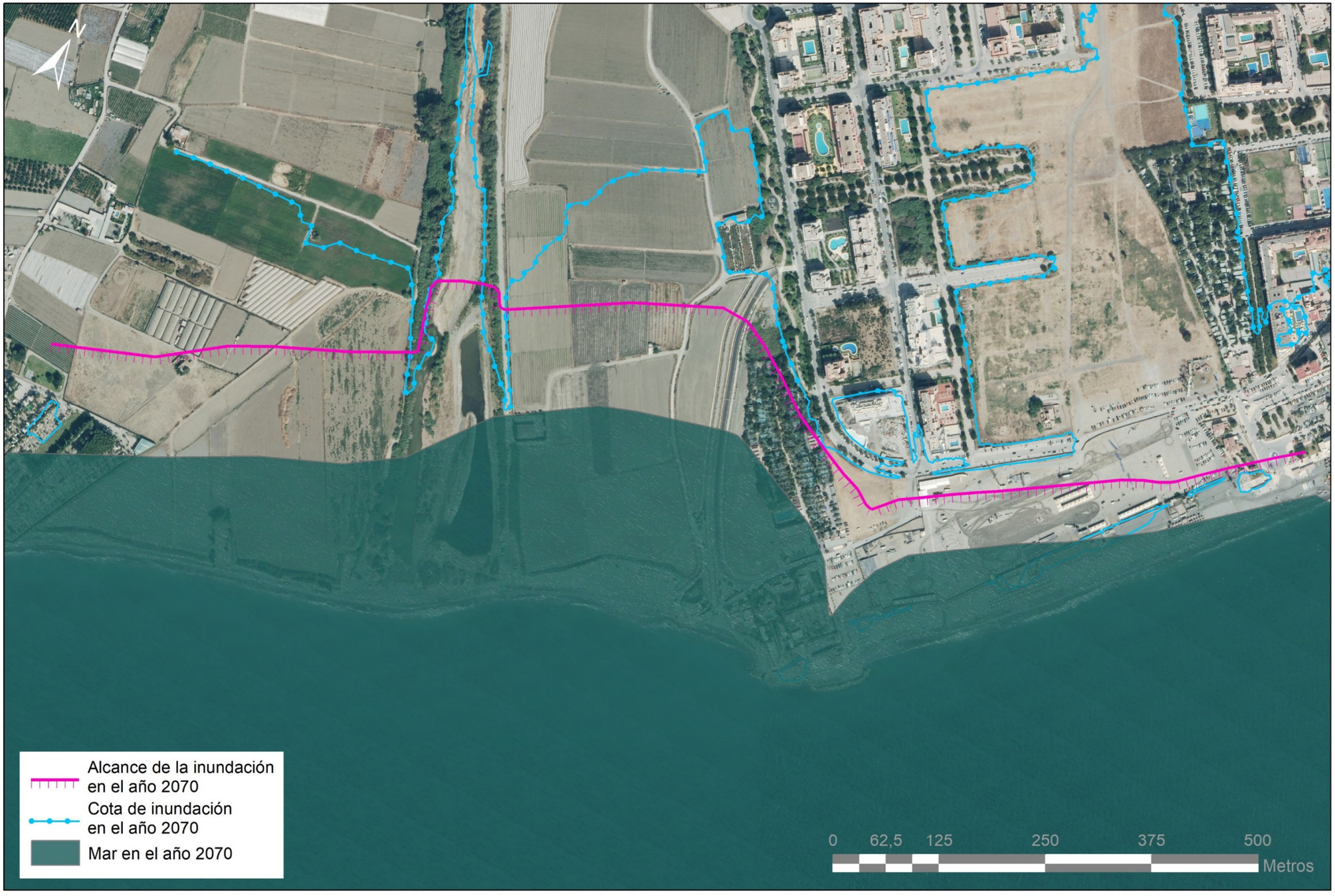
FECHA: febrero 2024

Escala: 1:4.000

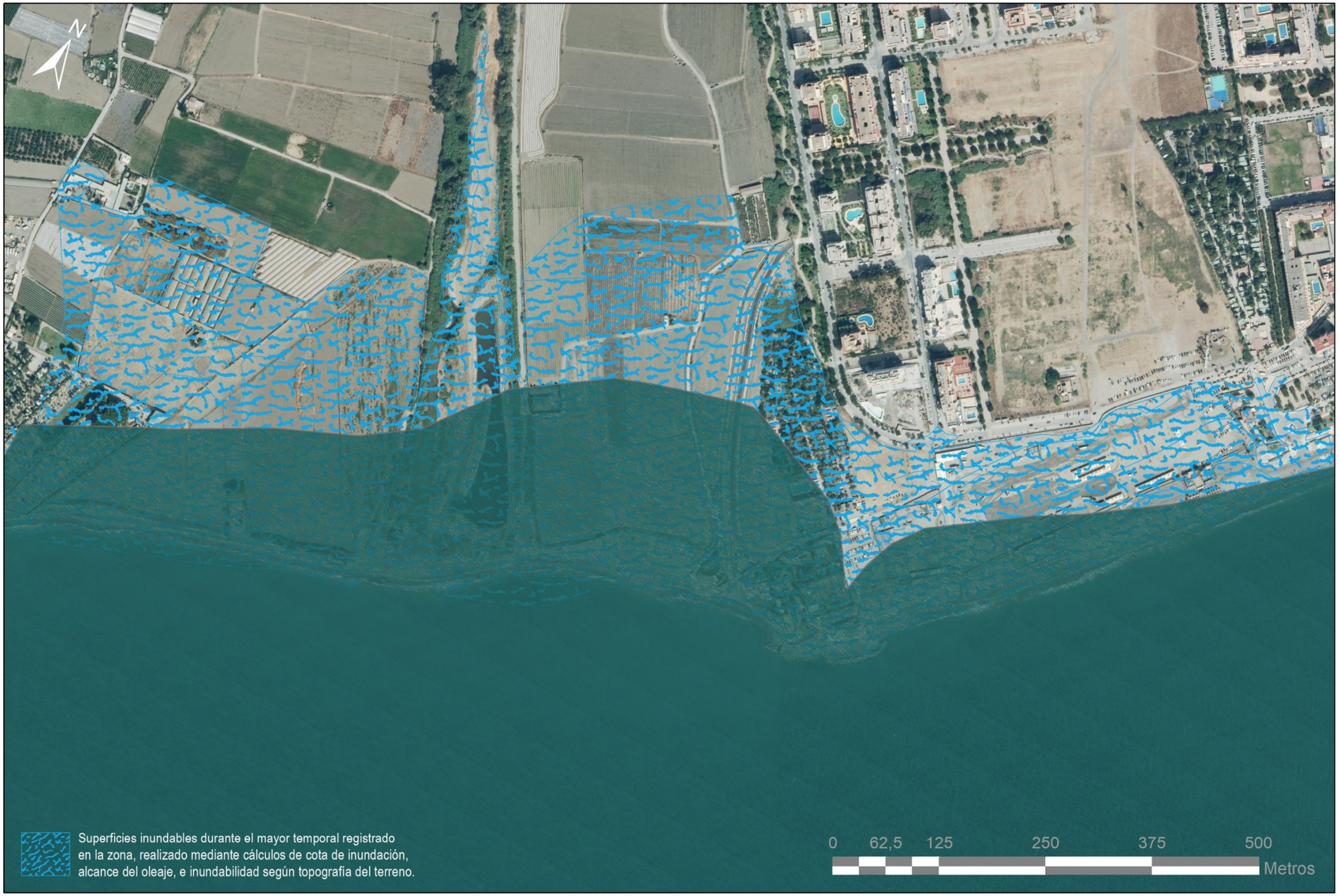
Estimación para el año 2040 de la extensión de la inundación y la línea de agua por regresión y cambio climatico

Vélez-Málaga: Desembocadura Río Vélez

Elaborado por: Tragsatec



GOBIERNO DE ESPAÑA · VICEPRESIDENCIA TERCERA DEL GOBIERNO · MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOGRÁFICO · SECRETARÍA DE ESTADO DE MEDIO AMBIENTE · DIRECCIÓN GENERAL DE LA COSTA Y EL MAR DEMARCACIÓN DE COSTAS ANDALUCÍA-MEDITERRÁNEO MÁLAGA	FECHA: febrero 2024 *Escala: 1:4.000*	Cálculo del alcance del oleaje y cota de inundación en 2070 mediante el máximo temporal conocido hasta 2024	Vélez-Málaga: Desembocadura Río Vélez	Elaborado por: Tragsatec



GOBIERNO DE ESPAÑA · VICEPRESIDENCIA TERCERA DEL GOBIERNO · MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOGRÁFICO · SECRETARÍA DE ESTADO DE MEDIO AMBIENTE · DIRECCIÓN GENERAL DE LA COSTA Y EL MAR

DEMARCACIÓN DE COSTAS ANDALUCÍA-MEDITERRÁNEO MÁLAGA

FECHA: abril 2024

Escala: 1:4.000

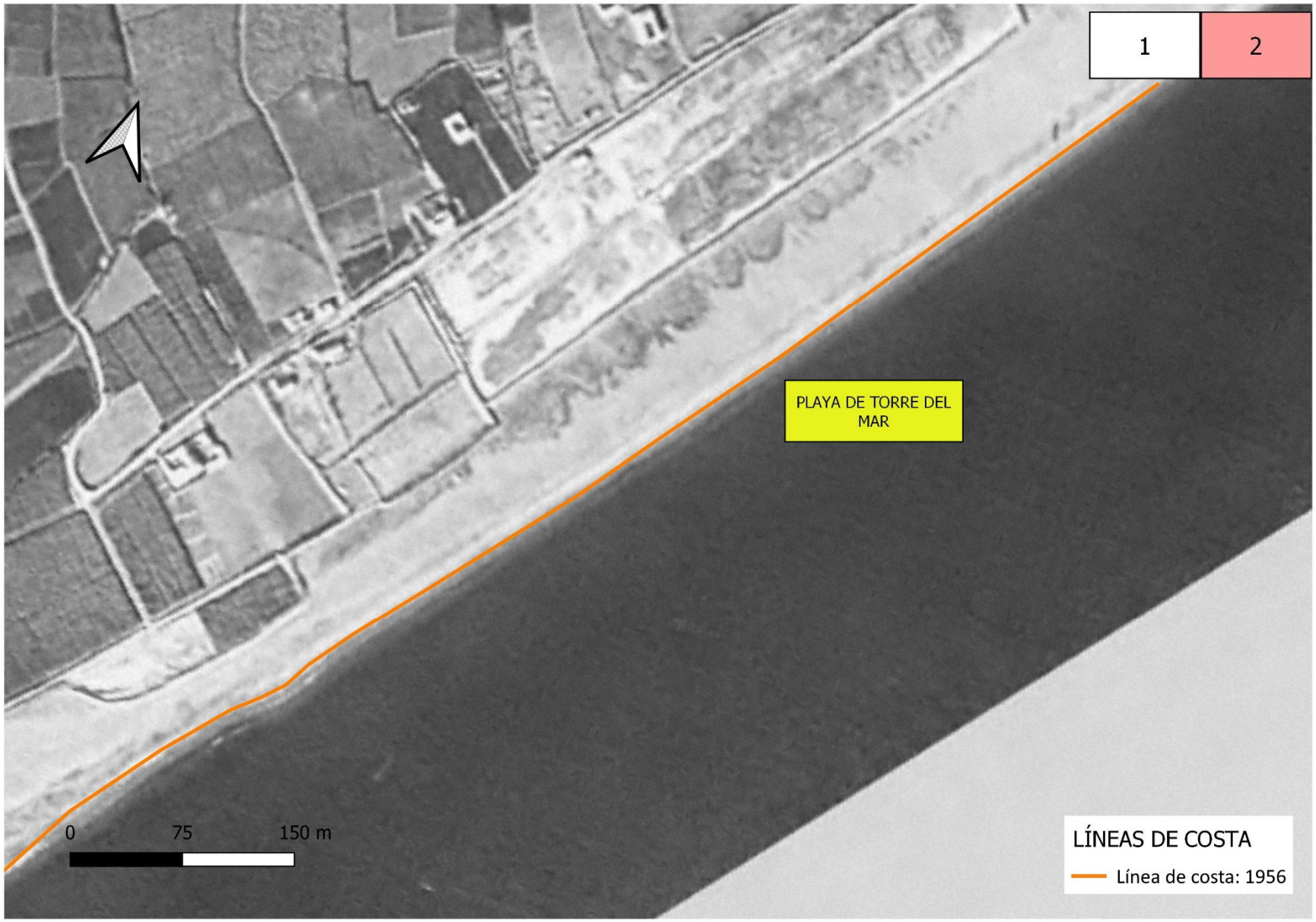
Estimación para el año 2070 de la extensión de la inundación y la línea de agua por regresión y cambio climatico

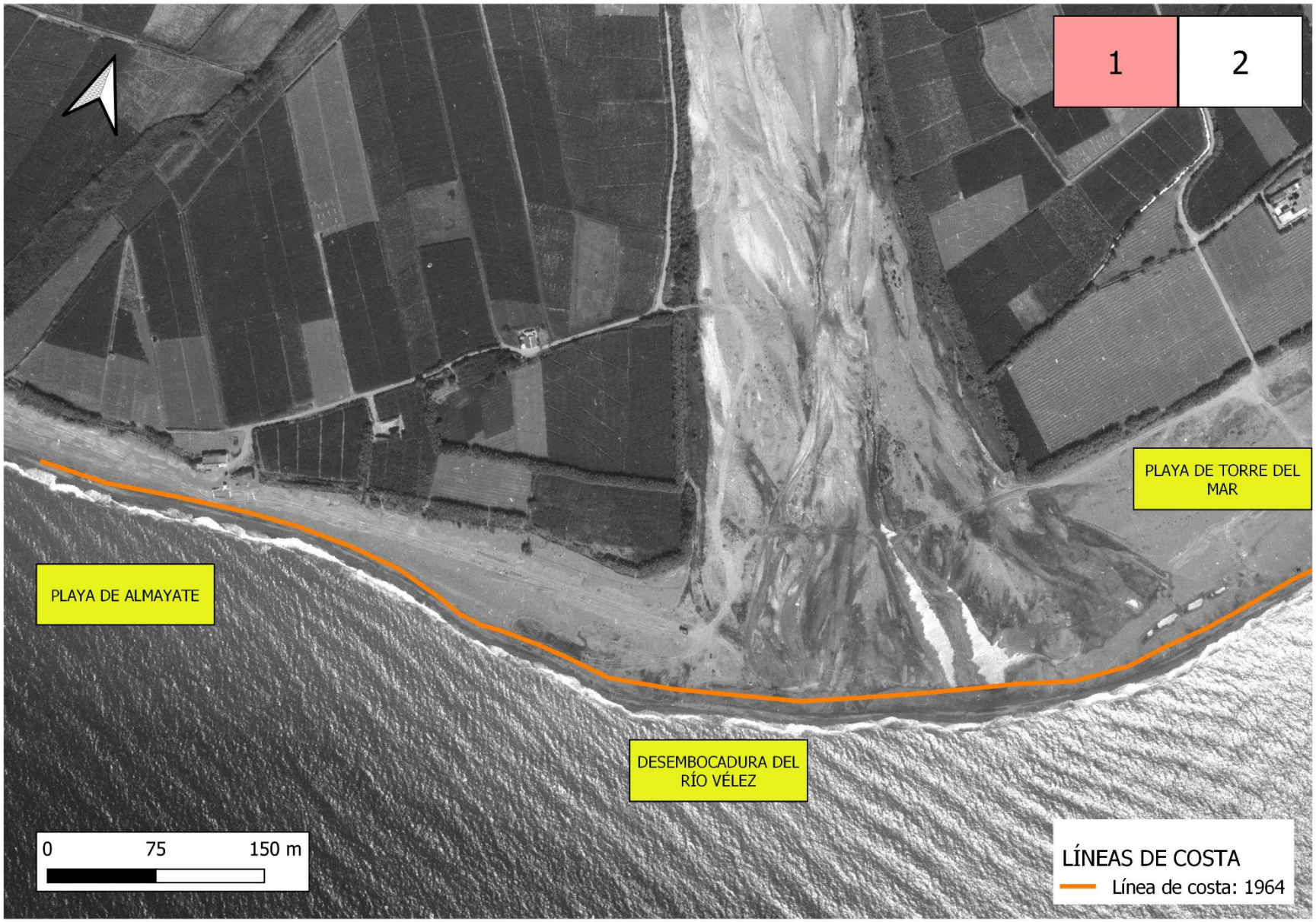
Vélez-Málaga: Desembocadura Río Vélez

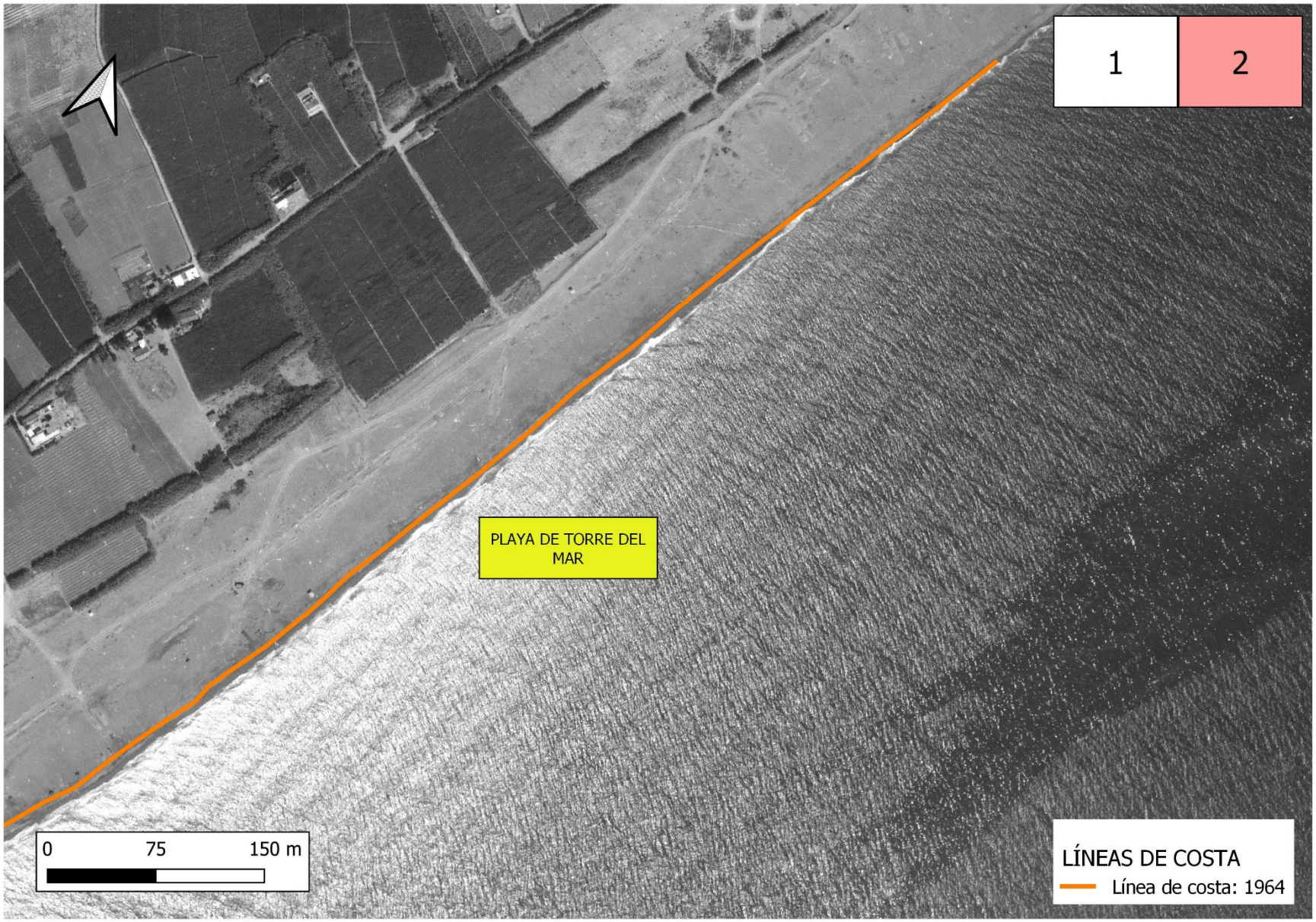
Elaborado por: Tragsatec

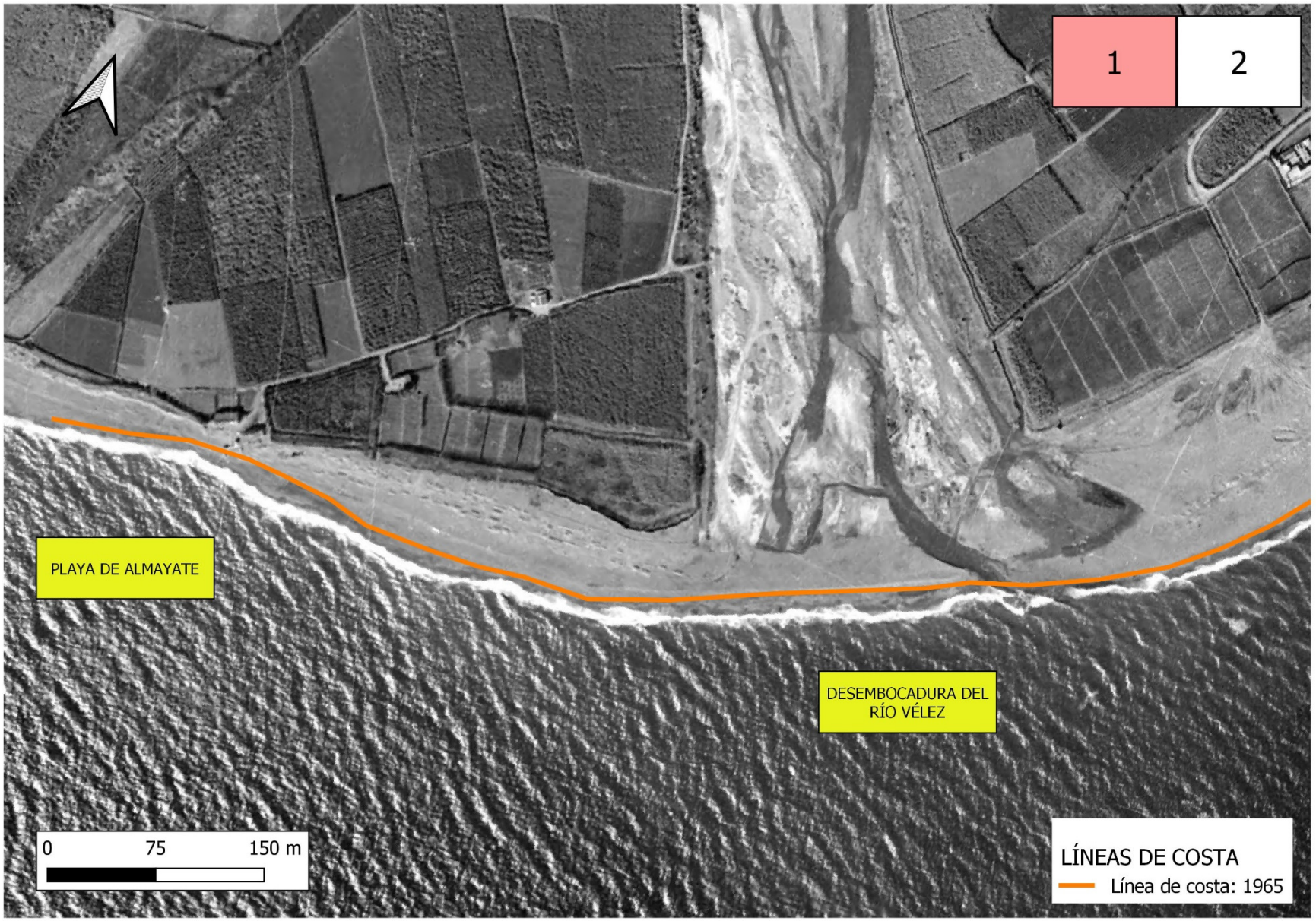
ANEXO 1: IMÁGENES DE LAS LÍNEAS DE COSTA ENTRE 1957 Y 2022

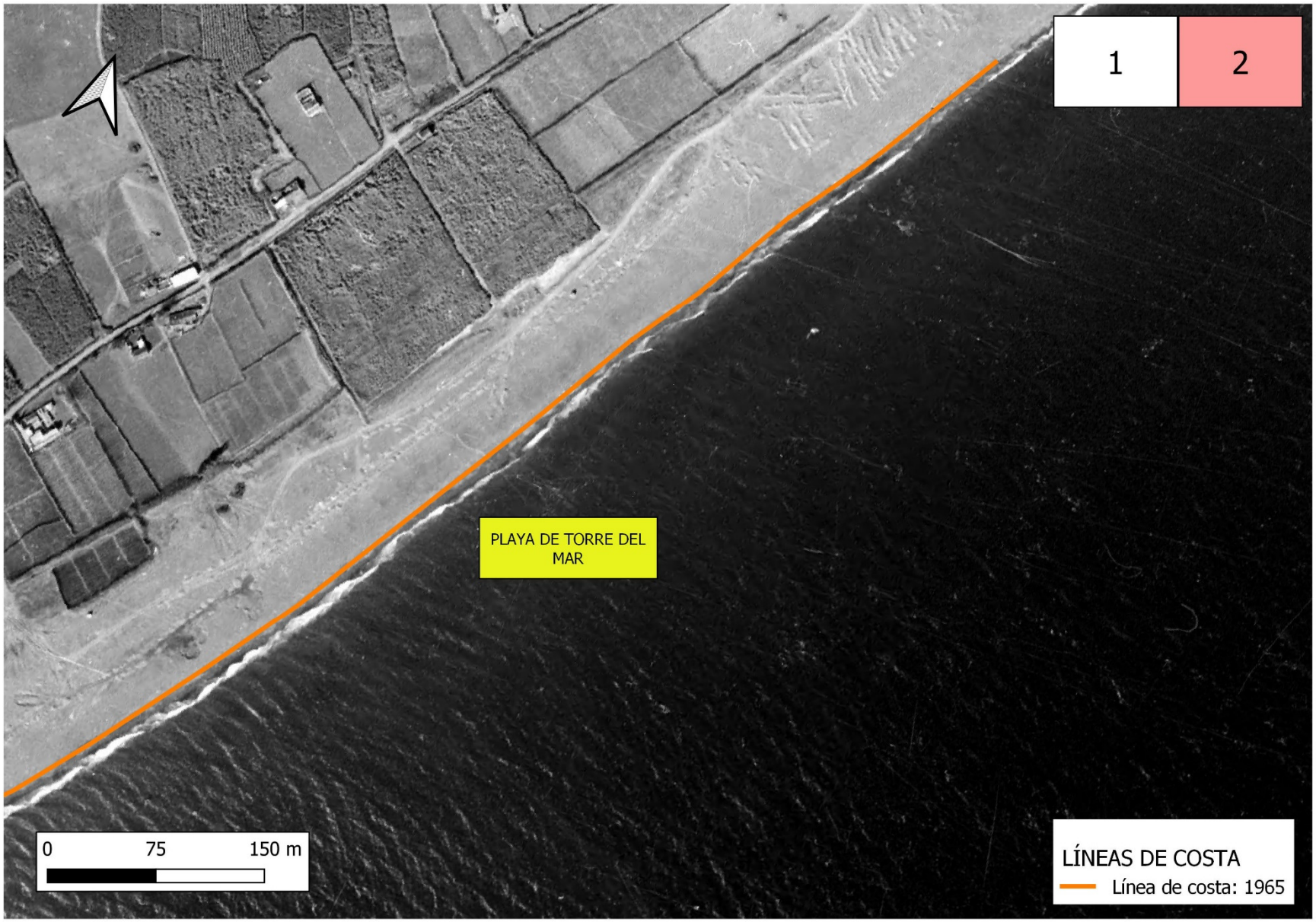

1
2
DESEMBOCADURA DEL RÍO VÉLEZ
0
75
150 m
LÍNEAS DE COSTA
Línea de costa: 1956

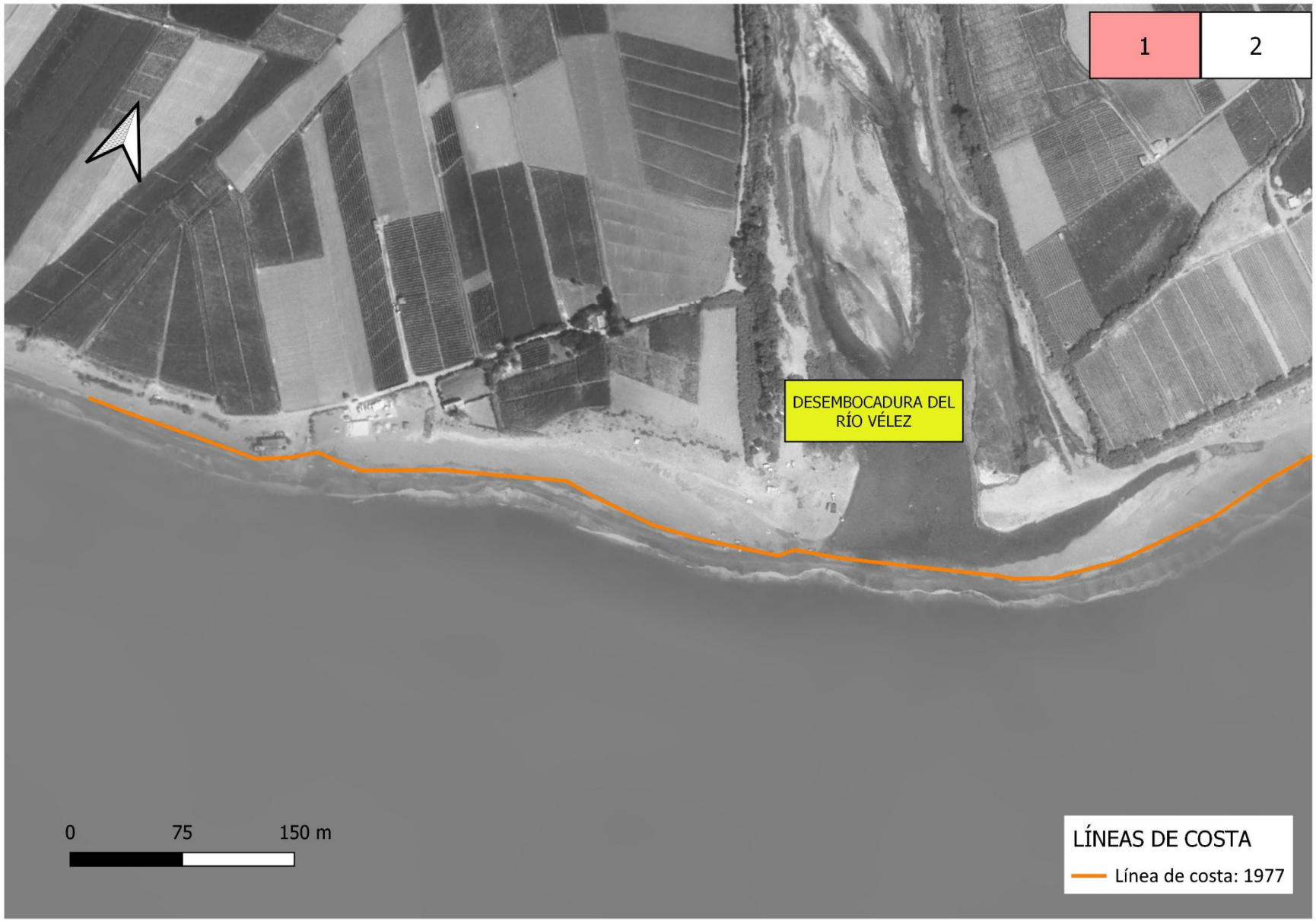

1
2
PLAYA DE TORRE DEL MAR
0
75
150 m
LÍNEAS DE COSTA
Línea de costa: 1956


1
2
PLAYA DE TORRE DEL MAR
PLAYA DE ALMAYATE
DESEMBOCADURA DEL RÍO VÉLEZ
0
75
150 m
LÍNEAS DE COSTA
Línea de costa: 1964

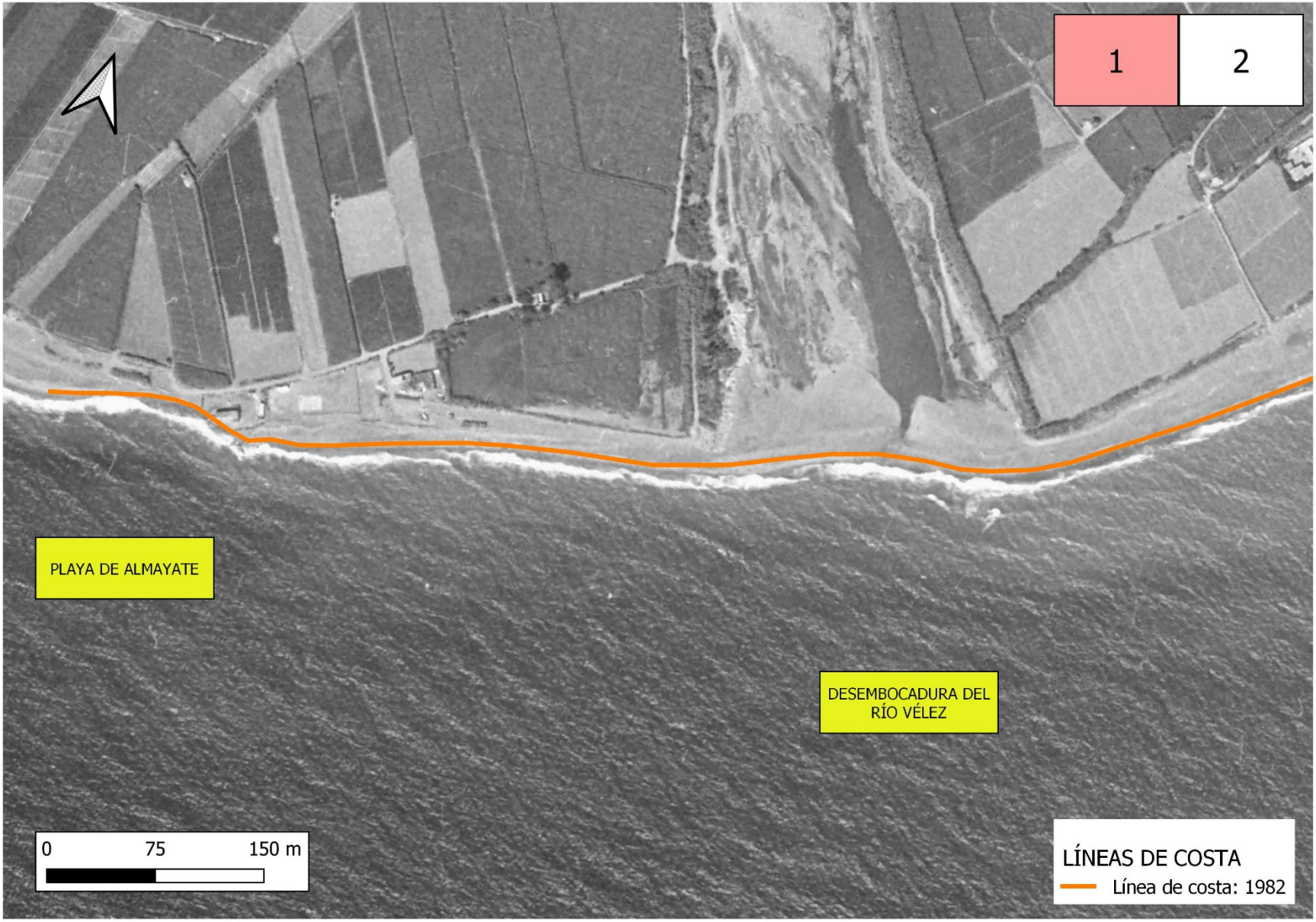

1
2
PLAYA DE TORRE DEL MAR
0
75
150 m
LÍNEAS DE COSTA
Línea de costa: 1964

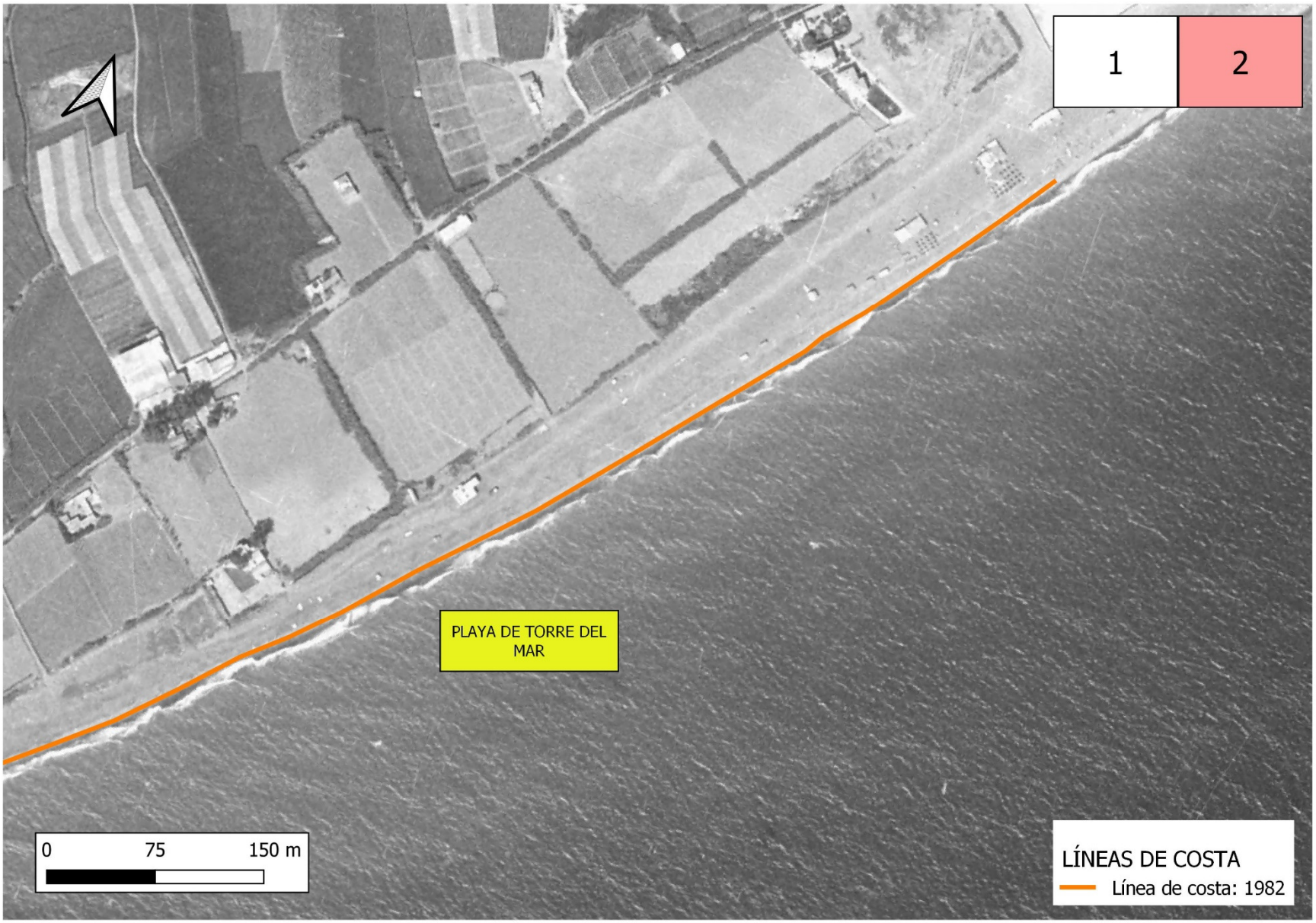

1
2
PLAYA DE ALMAYATE
DESEMBOCADURA DEL RÍO VÉLEZ
0
75
150 m
LÍNEAS DE COSTA
Línea de costa: 1965

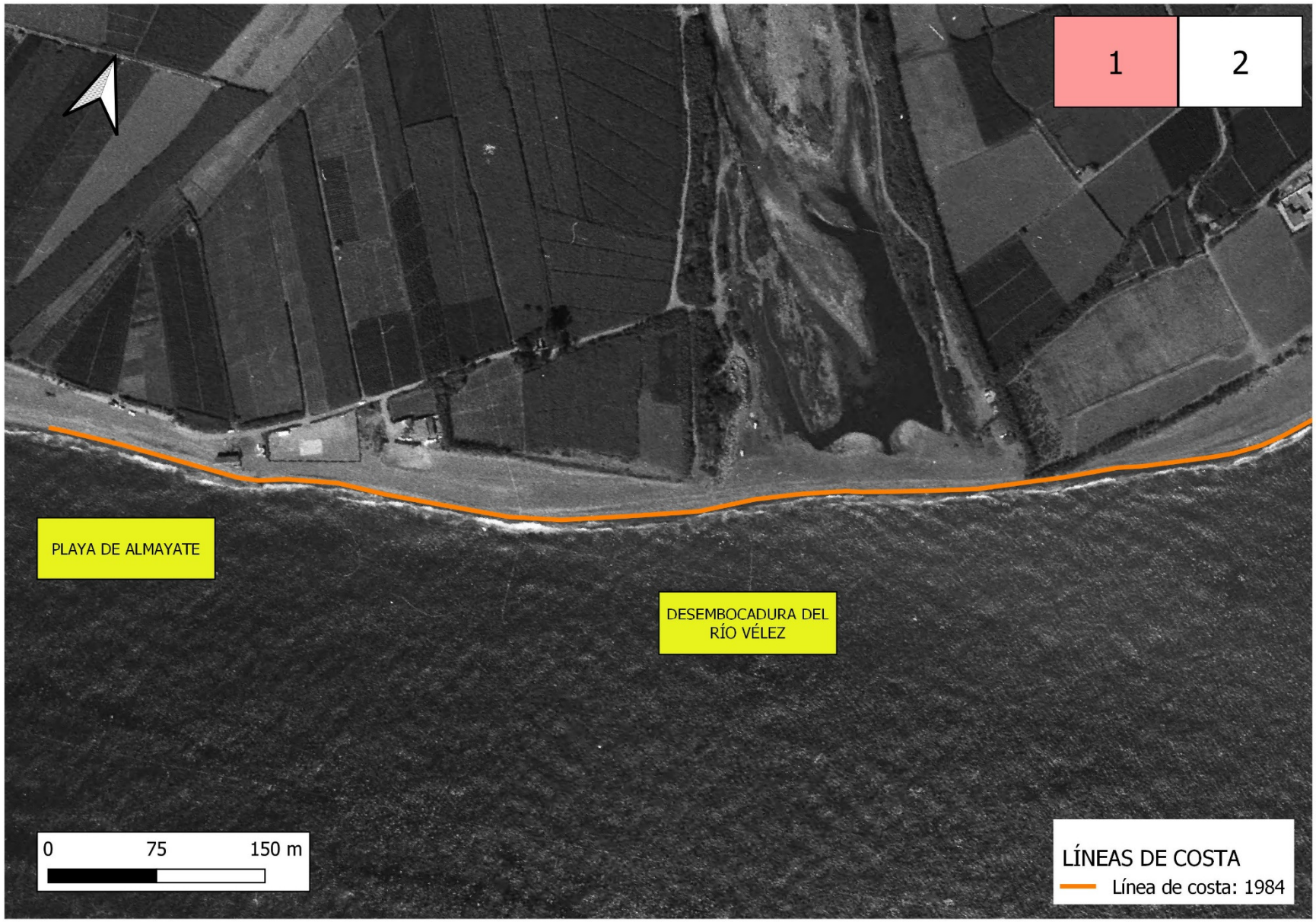

1
2
PLAYA DE TORRE DEL MAR
0
75
150 m
LÍNEAS DE COSTA
Línea de costa: 1965

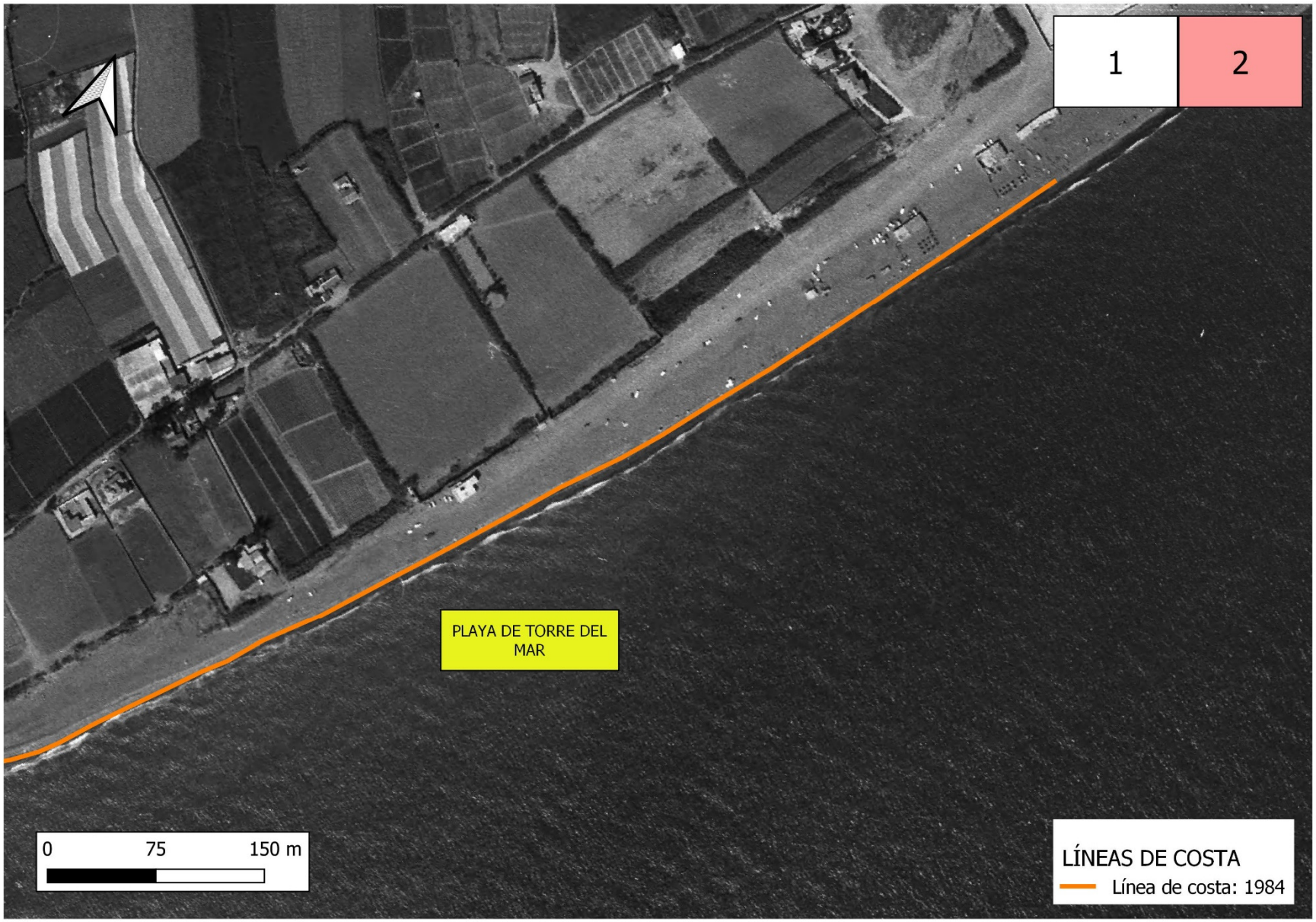

1
2
DESEMBOCADURA DEL RÍO VÉLEZ
0
75
150 m
LÍNEAS DE COSTA
Línea de costa: 1977

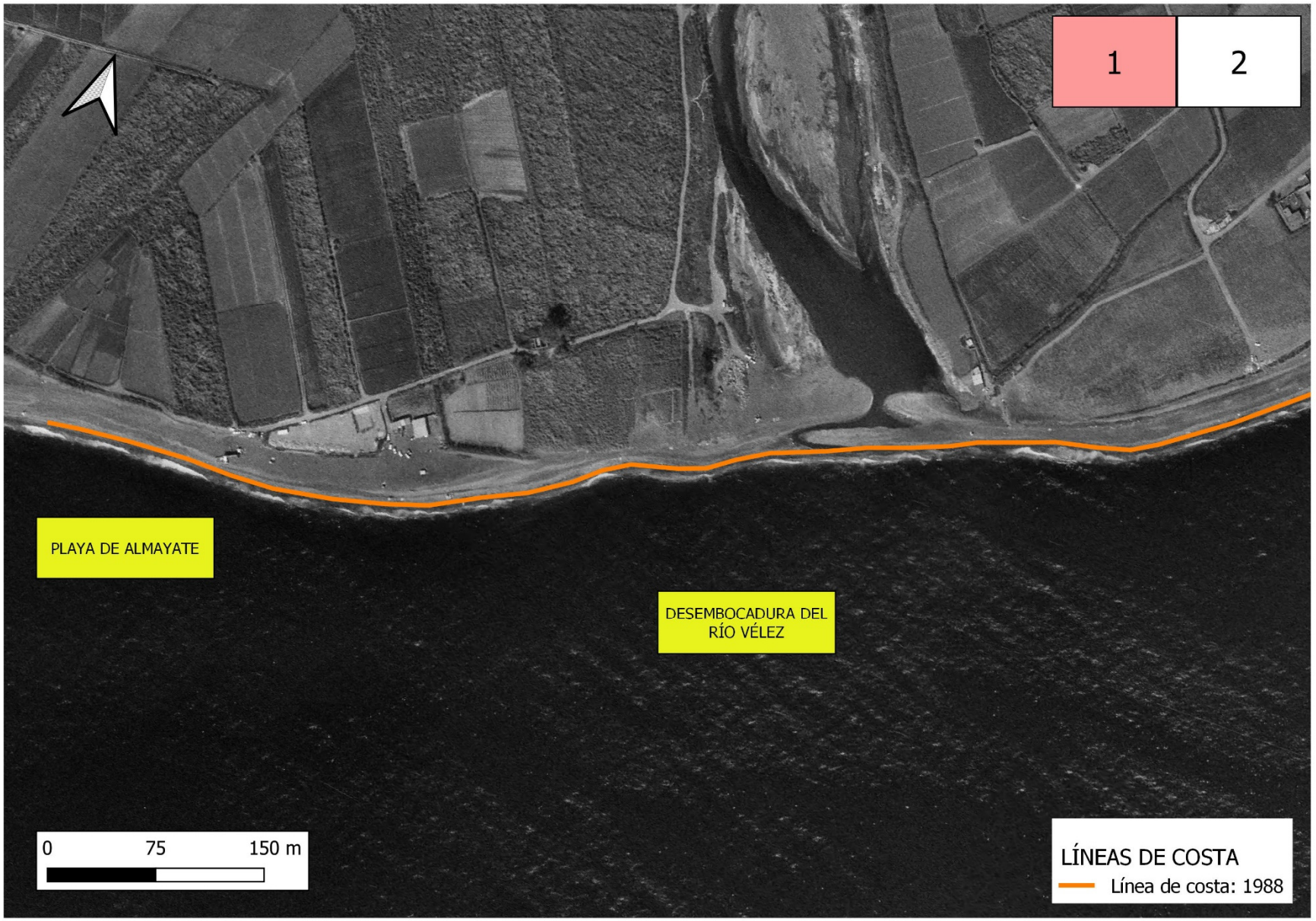

1
2
PLAYA DE TORRE DEL MAR
0
75
150 m
LÍNEAS DE COSTA
Línea de costa: 1977

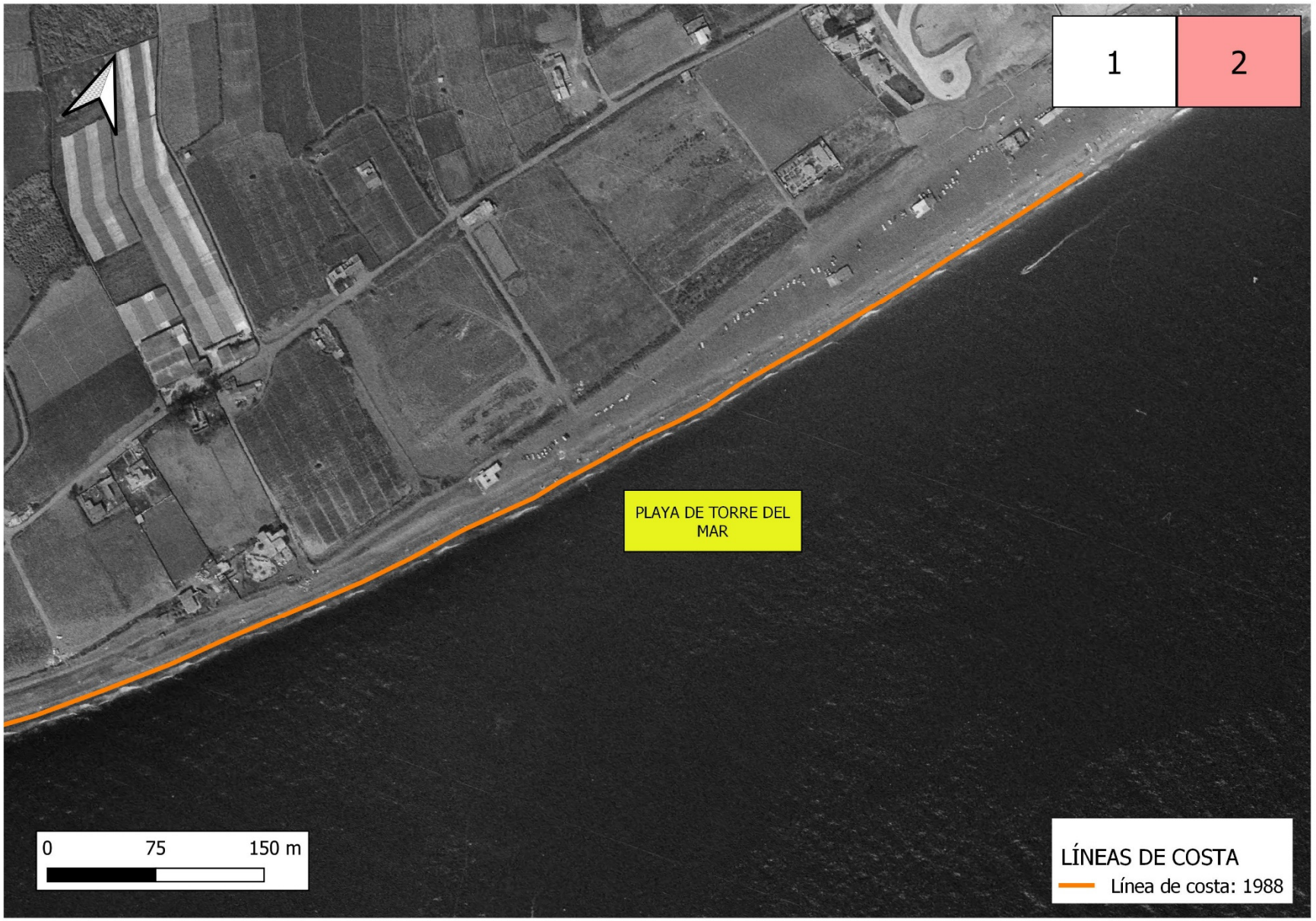

1
2
PLAYA DE ALMAYATE
DESEMBOCADURA DEL
RÍO VÉLEZ
0
75
150 m
LÍNEAS DE COSTA
Línea de costa: 1982

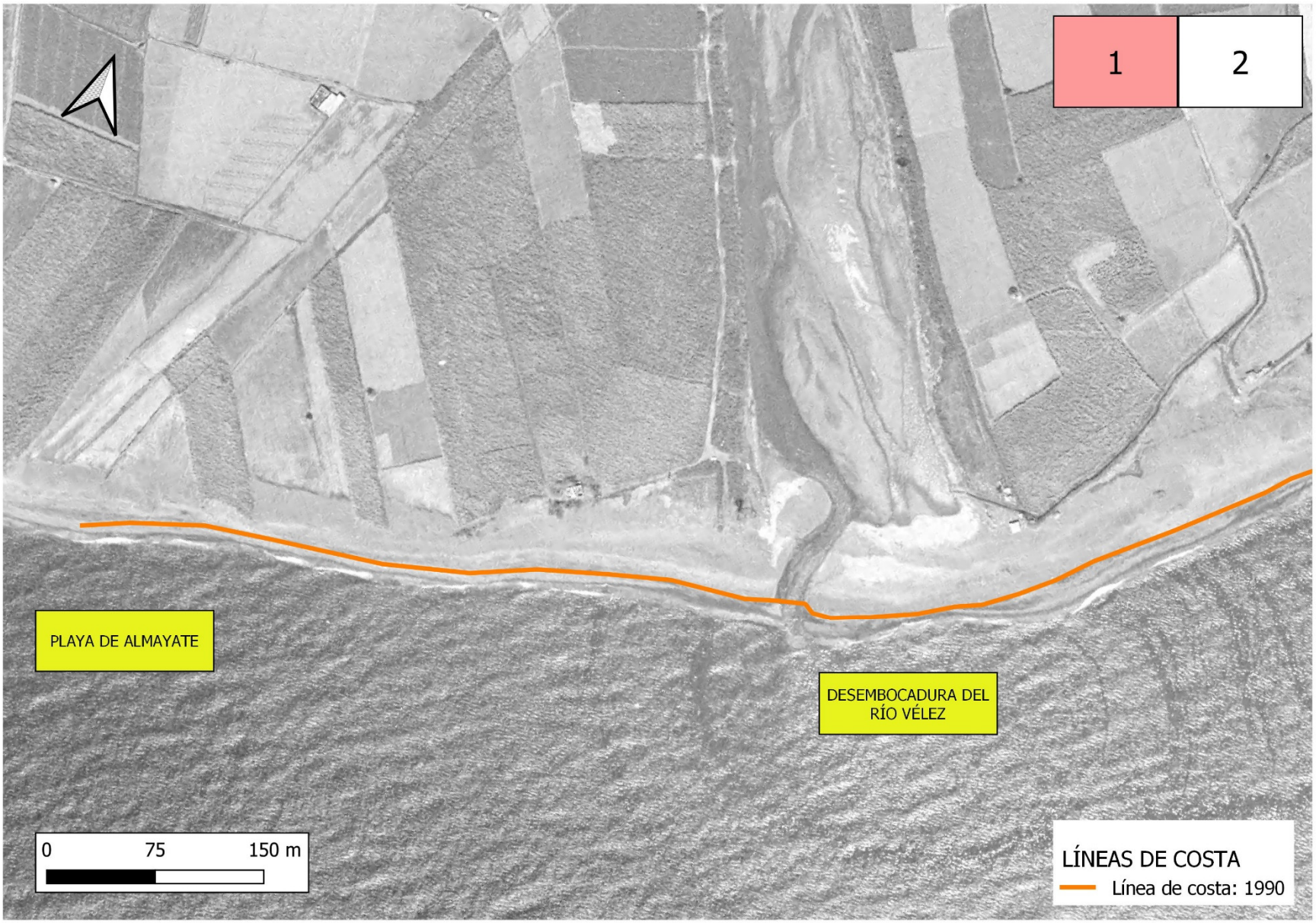

1
2
PLAYA DE TORRE DEL MAR
0
75
150 m
LÍNEAS DE COSTA
Línea de costa: 1982

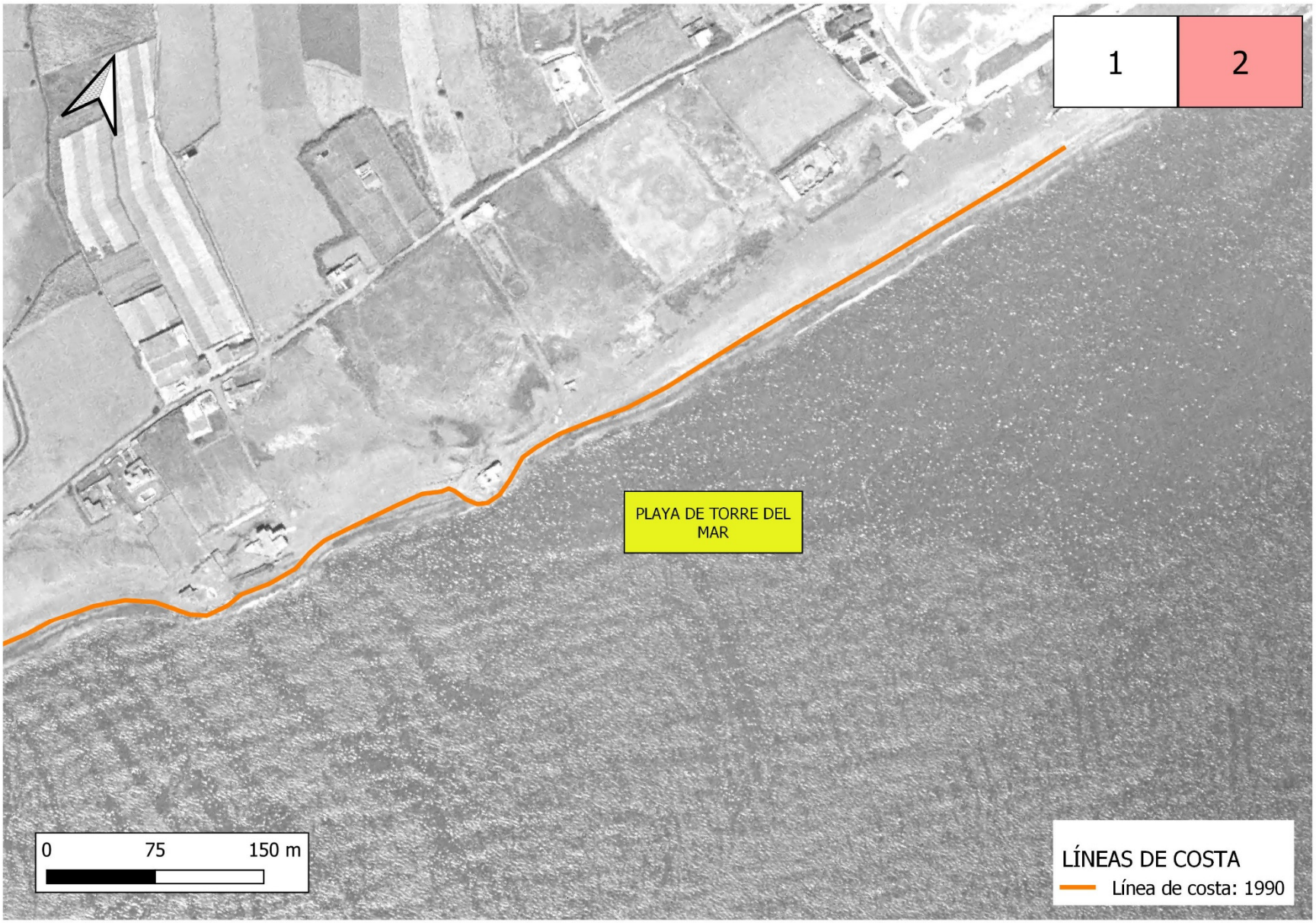

1
2
PLAYA DE ALMAYATE
DESEMBOCADURA DEL RÍO VÉLEZ
0
75
150 m
LÍNEAS DE COSTA
Línea de costa: 1984

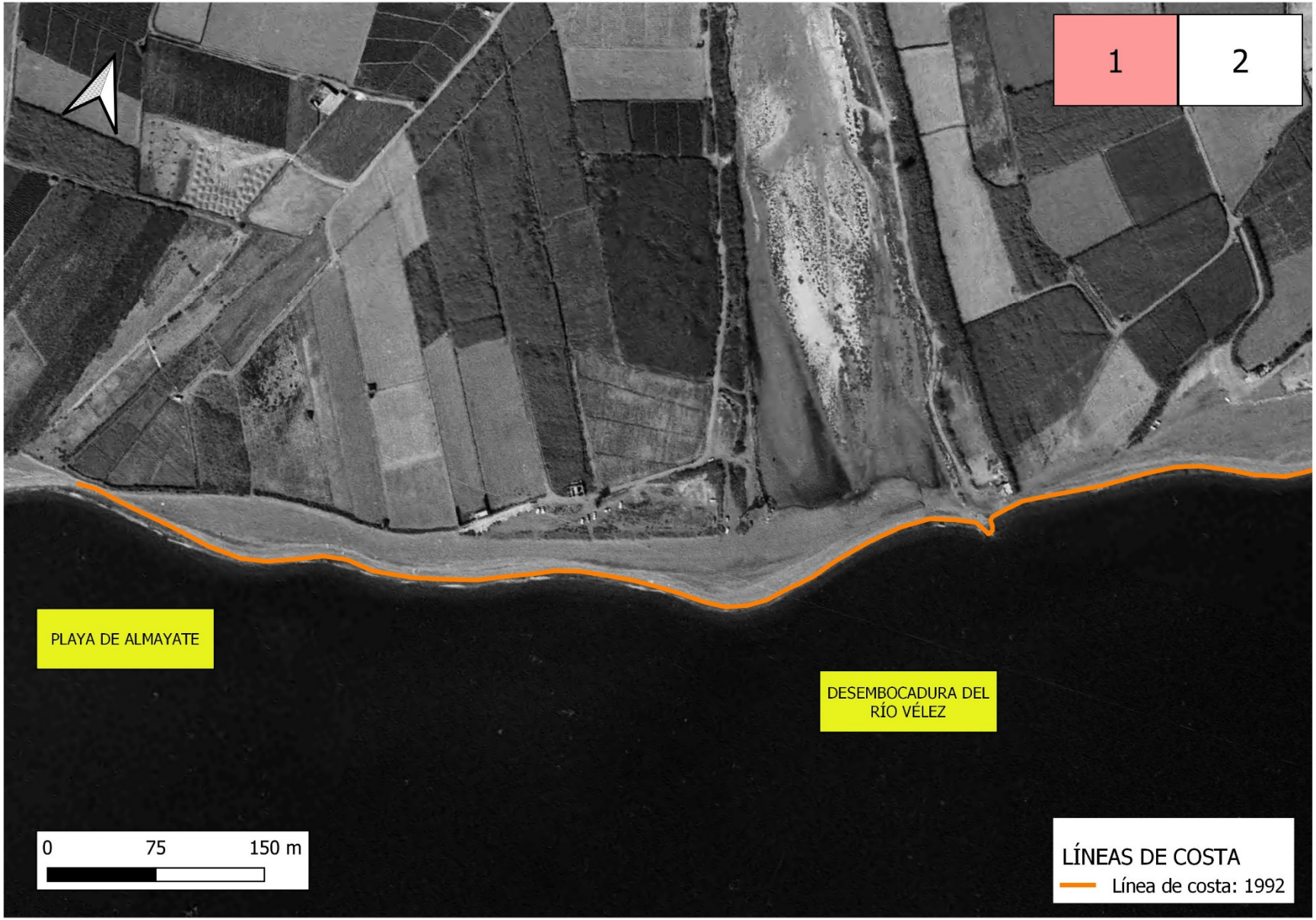

1
2
PLAYA DE TORRE DEL MAR
0
75
150 m
LÍNEAS DE COSTA
Línea de costa: 1984

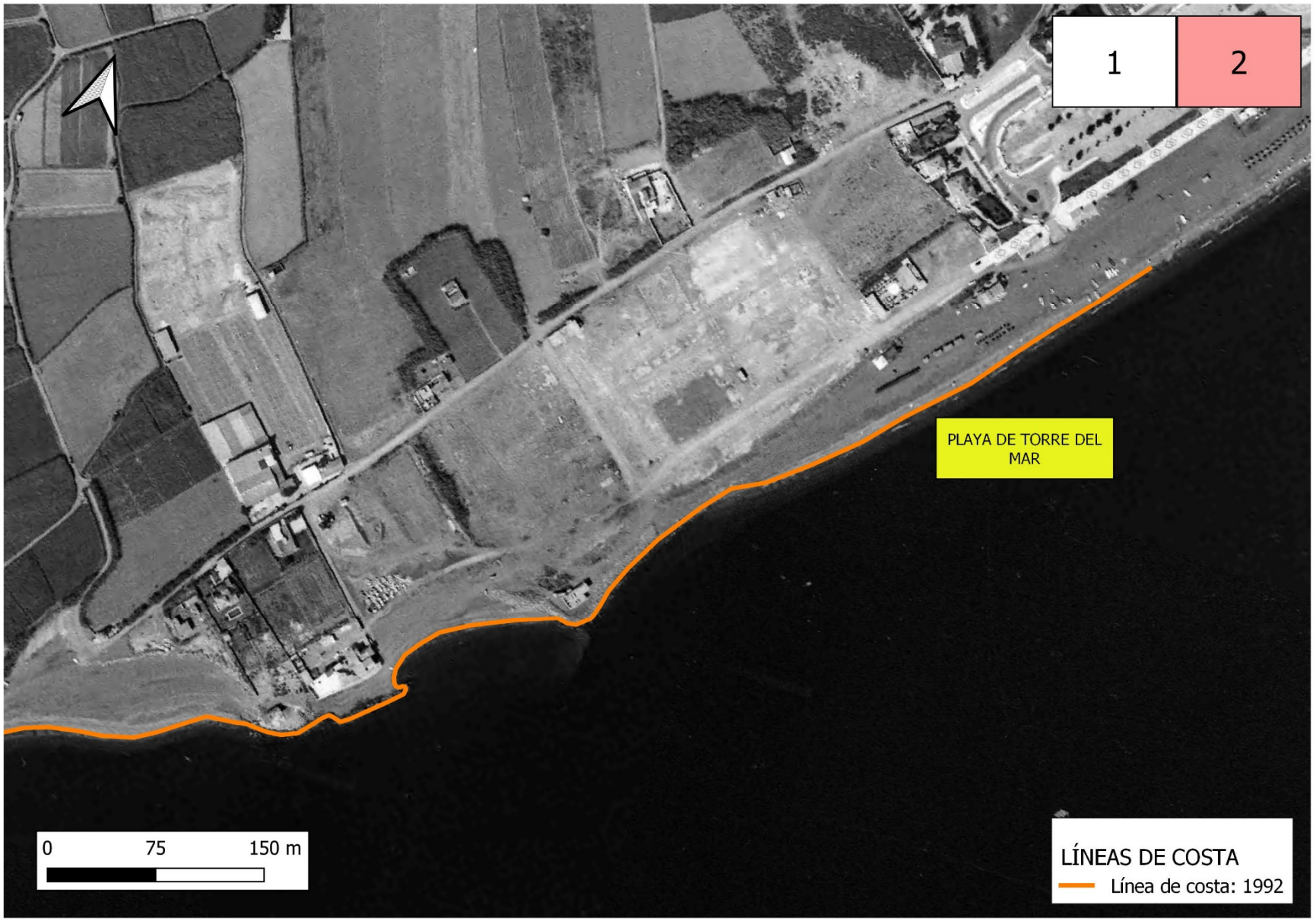

1
2
PLAYA DE ALMAYATE
DESEMBOCADURA DEL RÍO VÉLEZ
0
75
150 m
LÍNEAS DE COSTA
Línea de costa: 1988

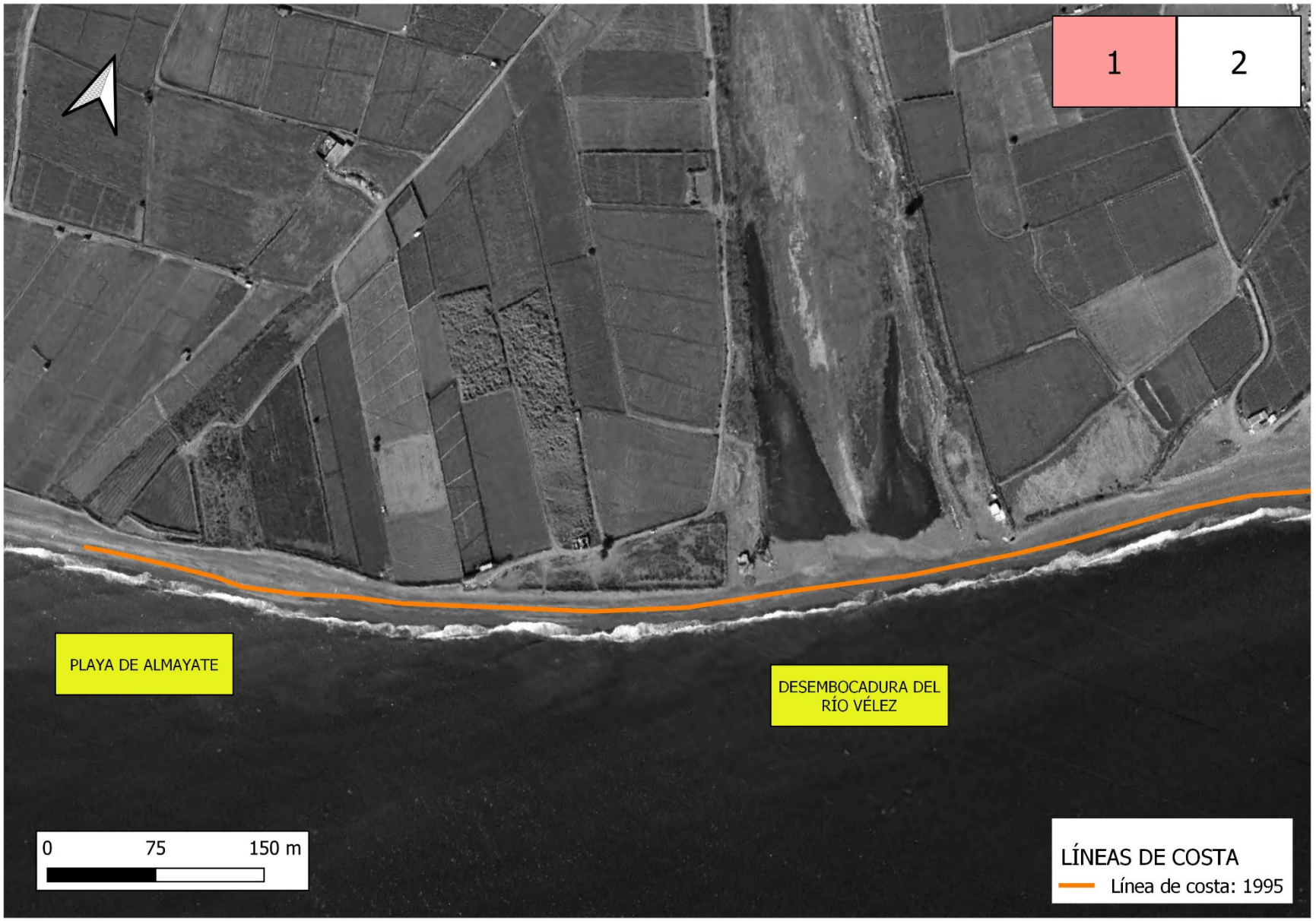

1
2
PLAYA DE TORRE DEL MAR
0
75
150 m
LÍNEAS DE COSTA
Línea de costa: 1988


1
2
PLAYA DE ALMAYATE
DESEMBOCADURA DEL RÍO VÉLEZ
0
75
150 m
LÍNEAS DE COSTA
Línea de costa: 1990


1
2
PLAYA DE TORRE DEL MAR
0
75
150 m
LÍNEAS DE COSTA
Línea de costa: 1990


1
2
PLAYA DE ALMAYATE
DESEMBOCADURA DEL RÍO VÉLEZ
0
75
150 m
LÍNEAS DE COSTA
Línea de costa: 1992


1
2
PLAYA DE TORRE DEL MAR
0
75
150 m
LÍNEAS DE COSTA
Línea de costa: 1992


1
2
PLAYA DE ALMAYATE
DESEMBOCADURA DEL RÍO VÉLEZ
0
75
150 m
LÍNEAS DE COSTA
Línea de costa: 1995


1
2
PLAYA DE TORRE DEL MAR
0
75
150 m
LÍNEAS DE COSTA
Línea de costa: 1995


1
2
PLAYA DE ALMAYATE
DESEMBOCADURA DEL RÍO VÉLEZ
0
75
150 m
LÍNEAS DE COSTA
Línea de costa: 1999

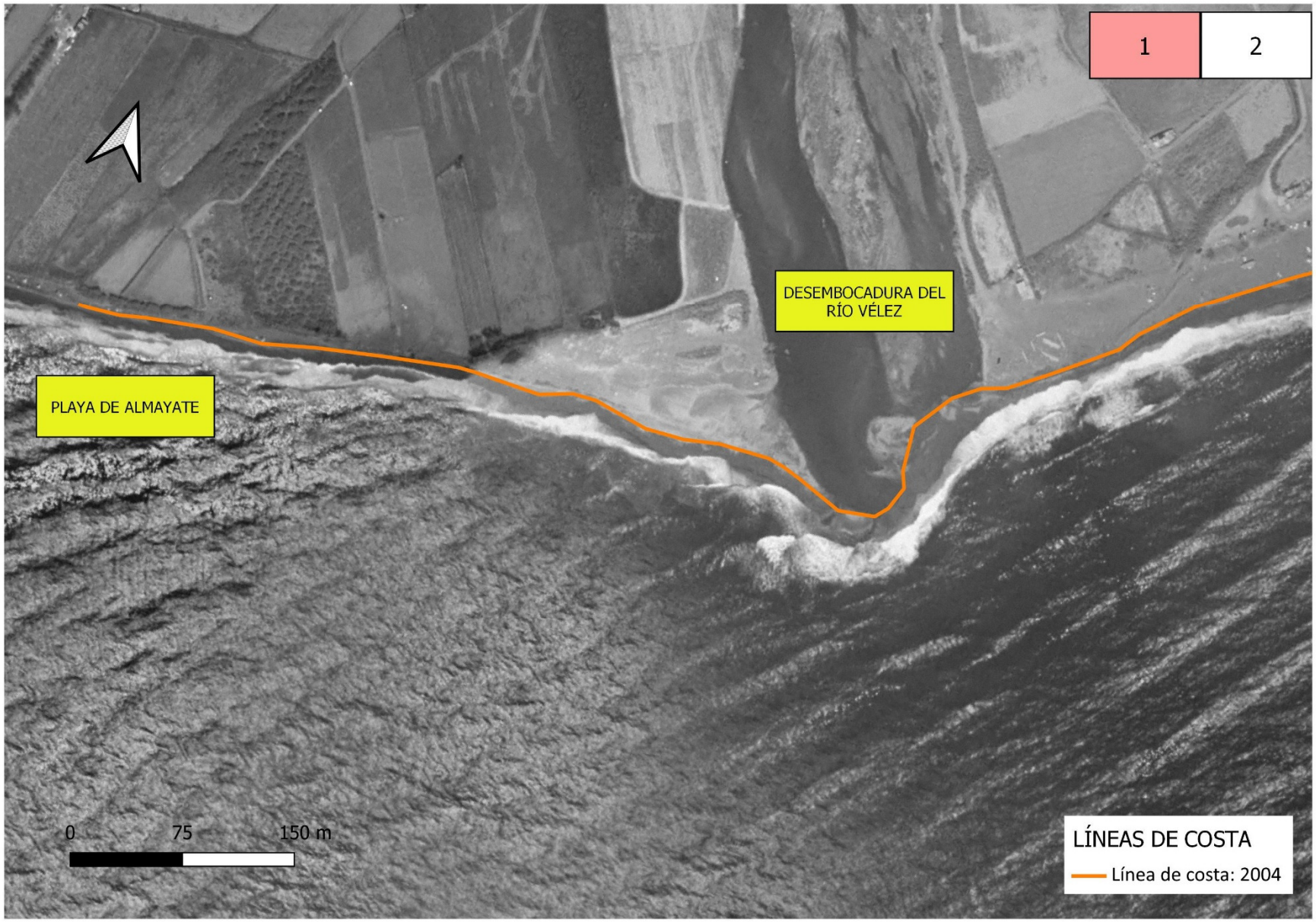

1
2
PLAYA DE TORRE DEL MAR
0
75
150 m
LÍNEAS DE COSTA
Línea de costa: 1999

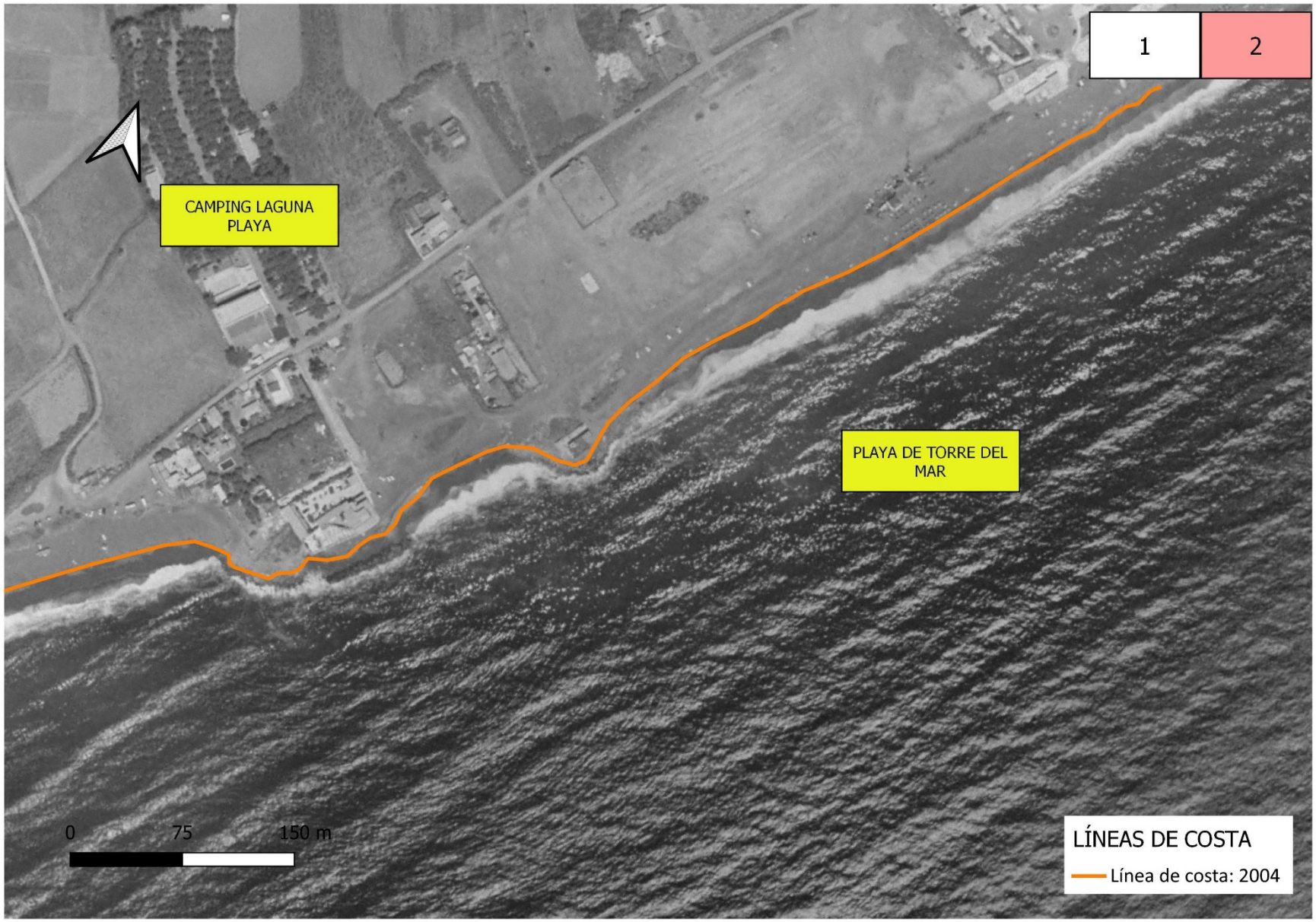

1
2
DESEMBOCADURA DEL RÍO VÉLEZ
0
75
150 m
LÍNEAS DE COSTA
Líneas de costa: 2000


1
2
PLAYA DE TORRE DEL MAR
0
75
150 m
LÍNEAS DE COSTA
Líneas de costa: 2000


1
2
PLAYA DE ALMAYATE
DESEMBOCADURA DEL RÍO VÉLEZ
0
75
150 m
LÍNEAS DE COSTA
Línea de costa: 2002

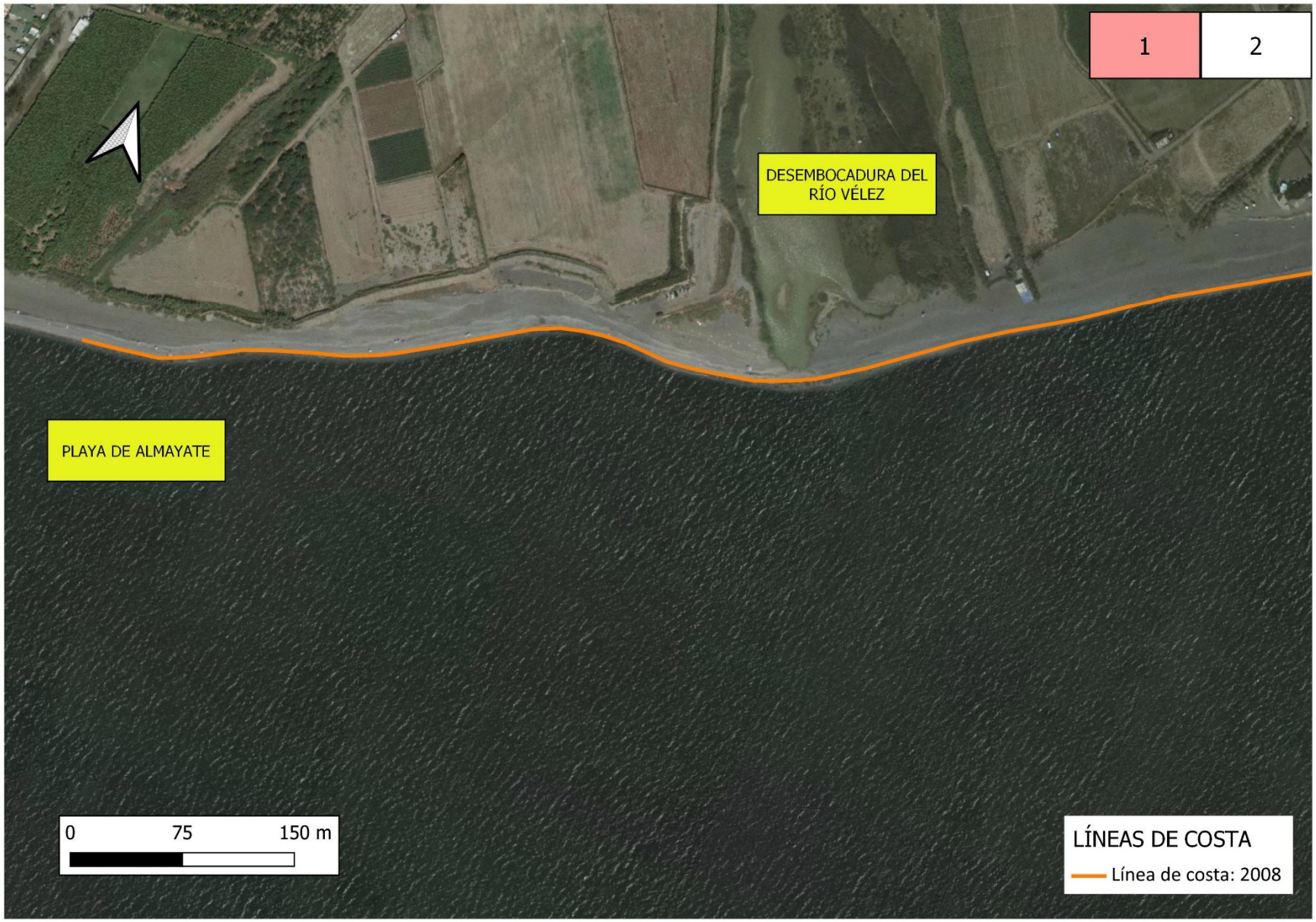

1
2
PLAYA DE TORRE DEL MAR
0
75
150 m
LÍNEAS DE COSTA
Línea de costa: 2002


1
2
DESEMBOCADURA DEL RÍO VÉLEZ
PLAYA DE ALMAYATE
0
75
150 m
LÍNEAS DE COSTA
Línea de costa: 2004


1
2
CAMPING LAGUNA PLAYA
PLAYA DE TORRE DEL MAR
0
75
150 m
LÍNEAS DE COSTA
Línea de costa: 2004


1
2
DESEMBOCADURA DEL RÍO VÉLEZ
PLAYA DE ALMAYATE
0
75
150 m
LÍNEAS DE COSTA
Línea de costa: 2006

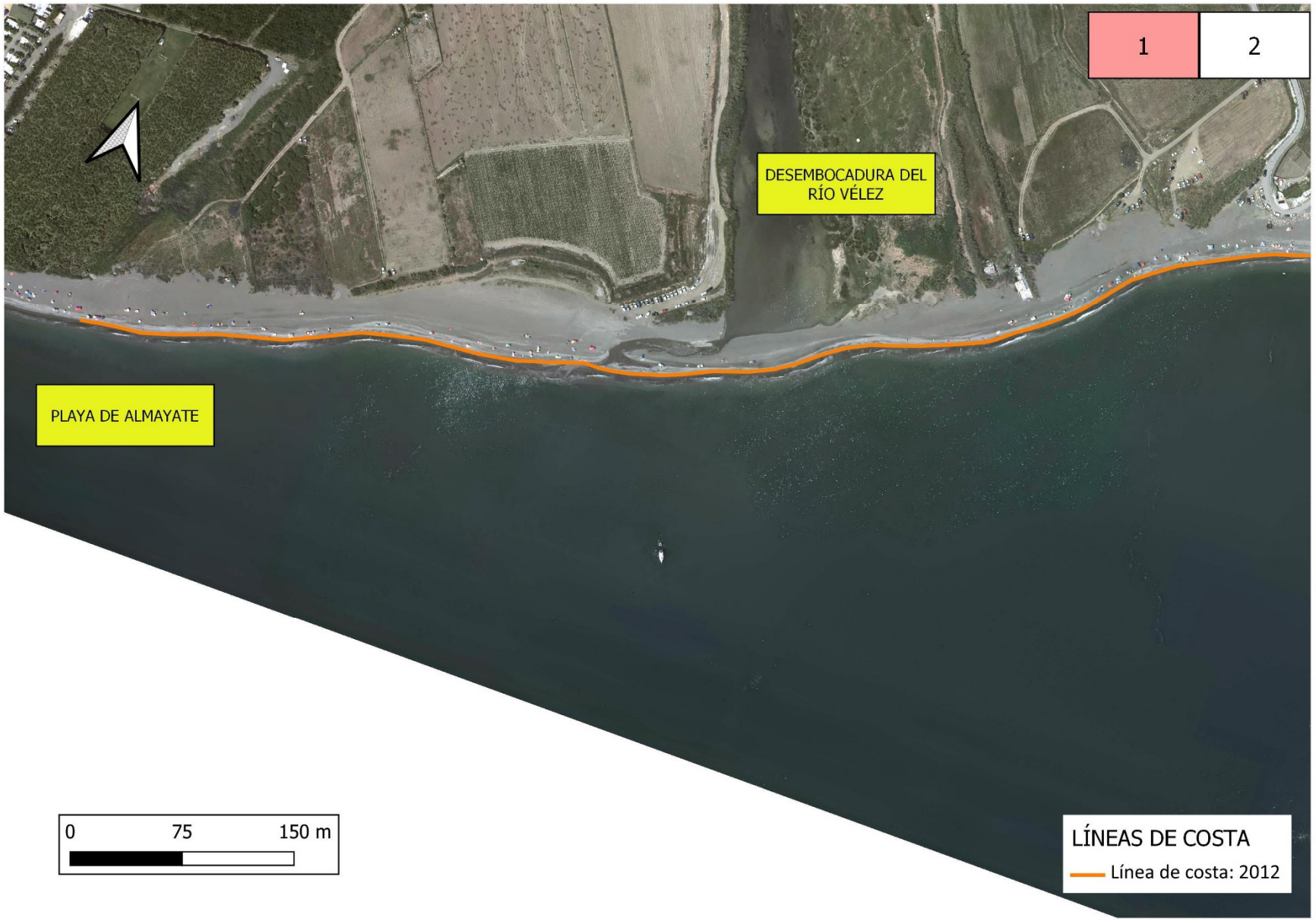

1
2
CAMPING LAGUNA PLAYA
PLAYA DE TORRE DEL MAR
0
75
150 m
LÍNEAS DE COSTA
Línea de costa: 2006


1
2
DESEMBOCADURA DEL RÍO VÉLEZ
PLAYA DE ALMAYATE
0
75
150 m
LÍNEAS DE COSTA
Línea de costa: 2008


1
2
CAMPING LAGUNA PLAYA
PLAYA DE TORRE DEL MAR
0
75
150 m
LÍNEAS DE COSTA
Línea de costa: 2008


1
2
DESEMBOCADURA DEL RÍO VÉLEZ
PLAYA DE ALMAYATE
0
75
150 m
LÍNEAS DE COSTA
Línea de costa: 2010


1
2
CAMPING LAGUNA PLAYA
PLAYA DE TORRE DEL MAR
0
75
150 m
LÍNEAS DE COSTA
Línea de costa: 2010


1
2
DESEMBOCADURA DEL RÍO VÉLEZ
PLAYA DE ALMAYATE
0
75
150 m
LÍNEAS DE COSTA
Línea de costa: 2012

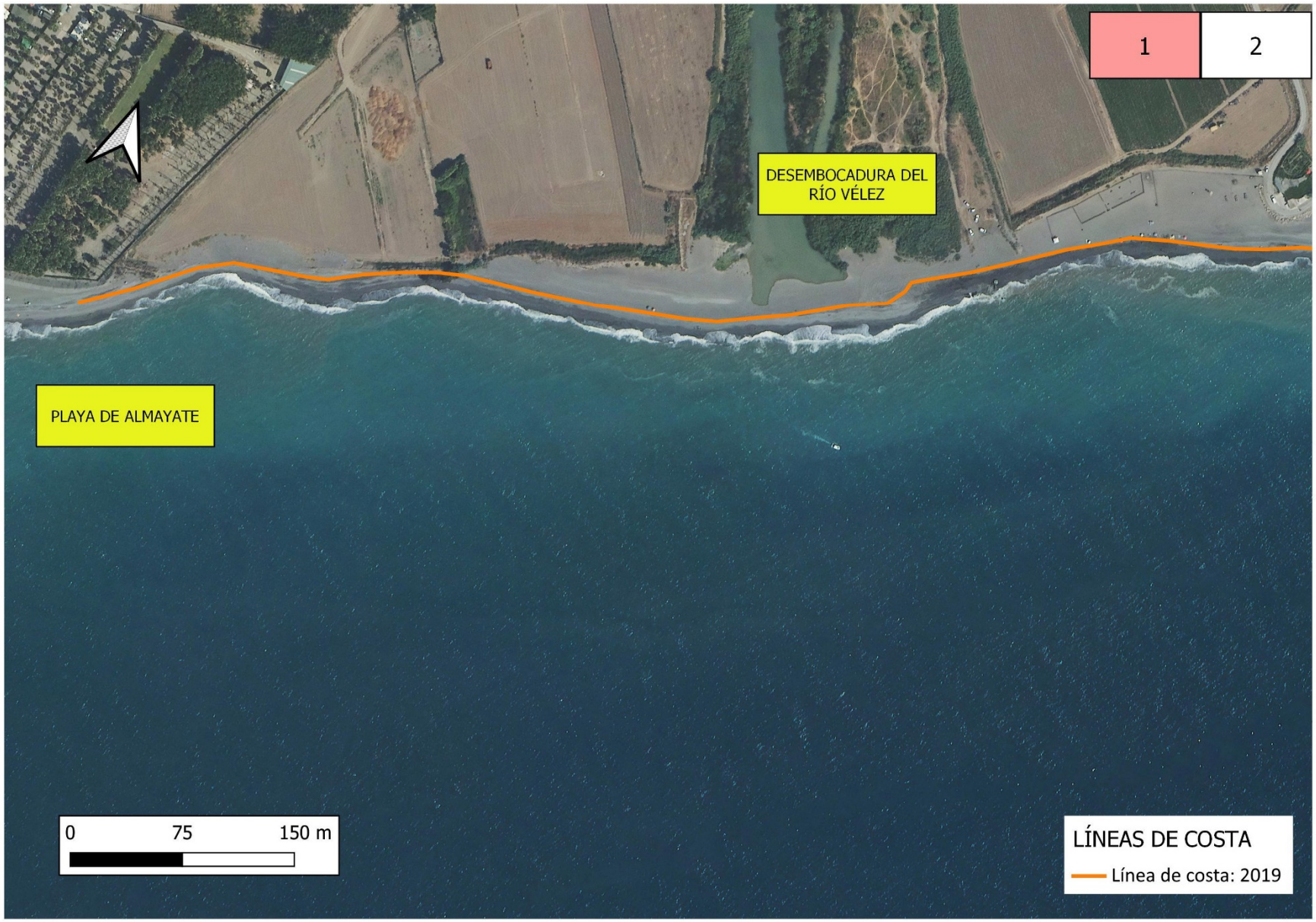

1
2
CAMPING LAGUNA PLAYA
PLAYA DE TORRE DEL MAR
0
75
150 m
LÍNEAS DE COSTA
Línea de costa: 2012


1
2
PLAYA DE ALMAYATE
DESEMBOCADURA DEL RÍO VÉLEZ
0
75
150 m
LINEAS DE COSTA
Línea de costa: 2013


1
2
CAMPING LAGUNA PLAYA
PLAYA DE TORRE DEL MAR
0
75
150 m
LINEAS DE COSTA
Línea de costa: 2013


1
2
DESEMBOCADURA DEL RÍO VÉLEZ
PLAYA DE ALMAYATE
0
75
150 m
LÍNEAS DE COSTA
Línea de costa: 2016


1
2
CAMPING LAGUNA PLAYA
PLAYA DE TORRE DEL MAR
0
75
150 m
LÍNEAS DE COSTA
Línea de costa: 2016

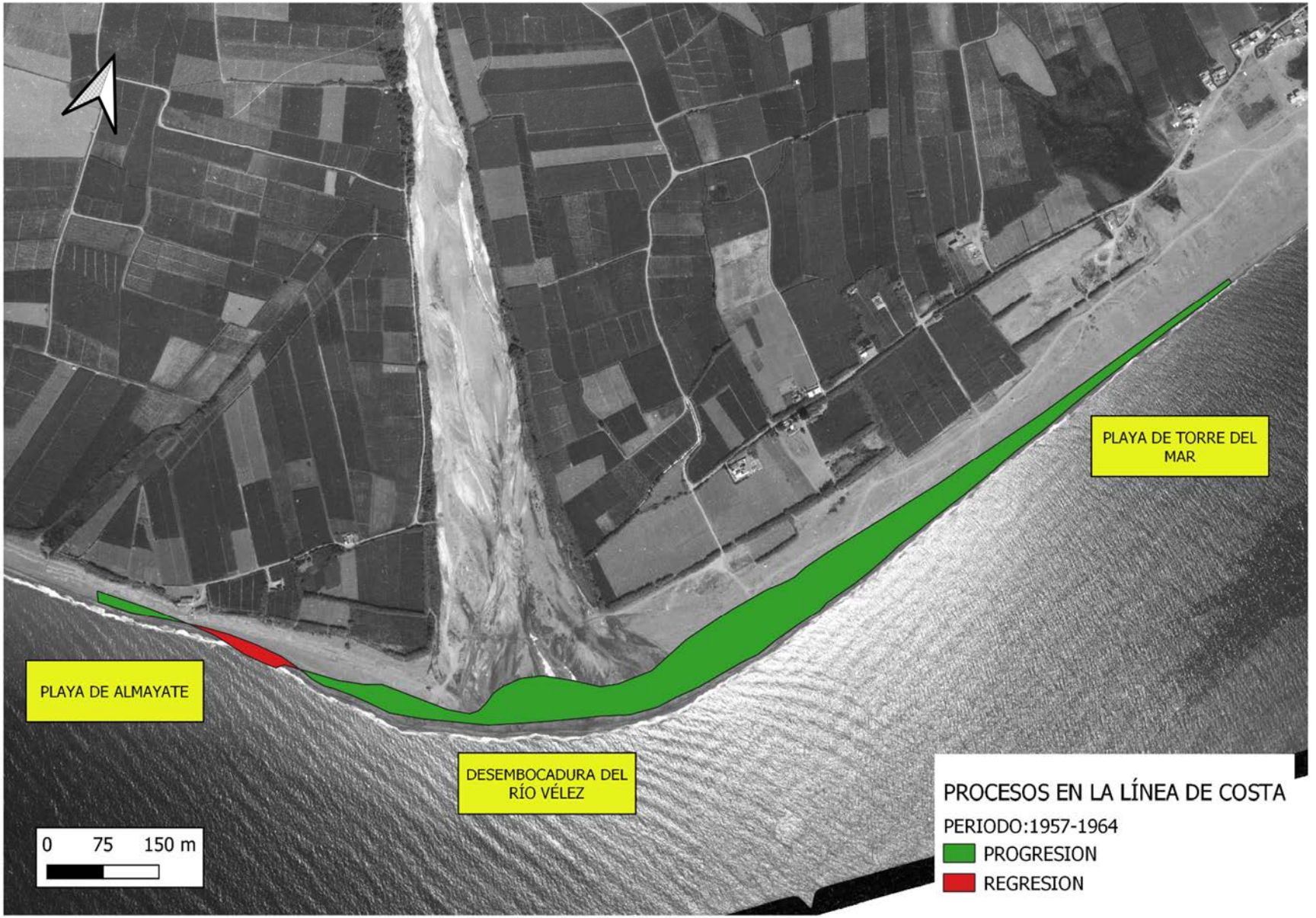

1
2
DESEMBOCADURA DEL RÍO VÉLEZ
PLAYA DE ALMAYATE
0
75
150 m
LÍNEAS DE COSTA
Línea de costa: 2019

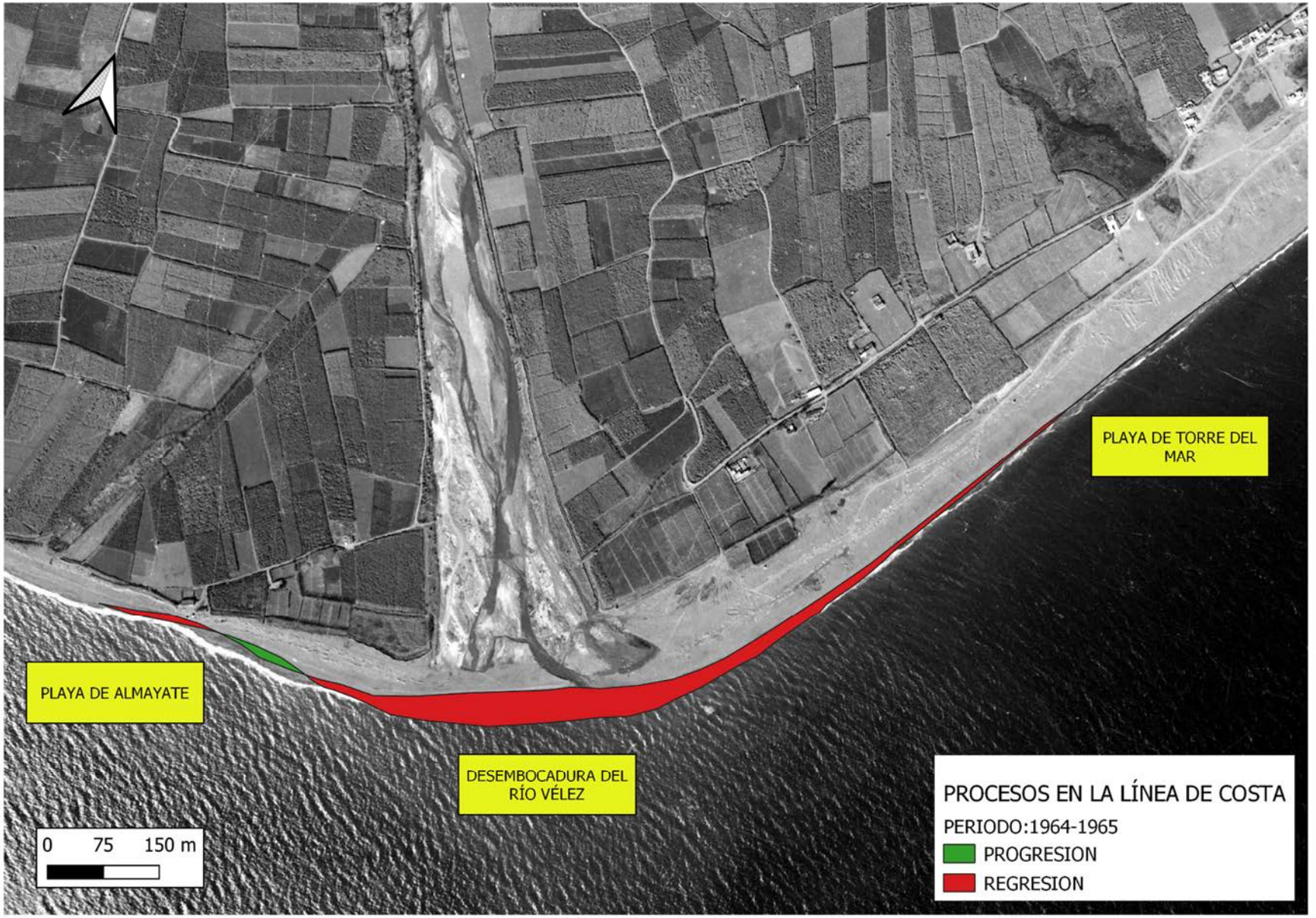

1
2
CAMPING LAGUNA PLAYA
PLAYA DE TORRE DEL MAR
0
75
150 m
LÍNEAS DE COSTA
Línea de costa: 2019

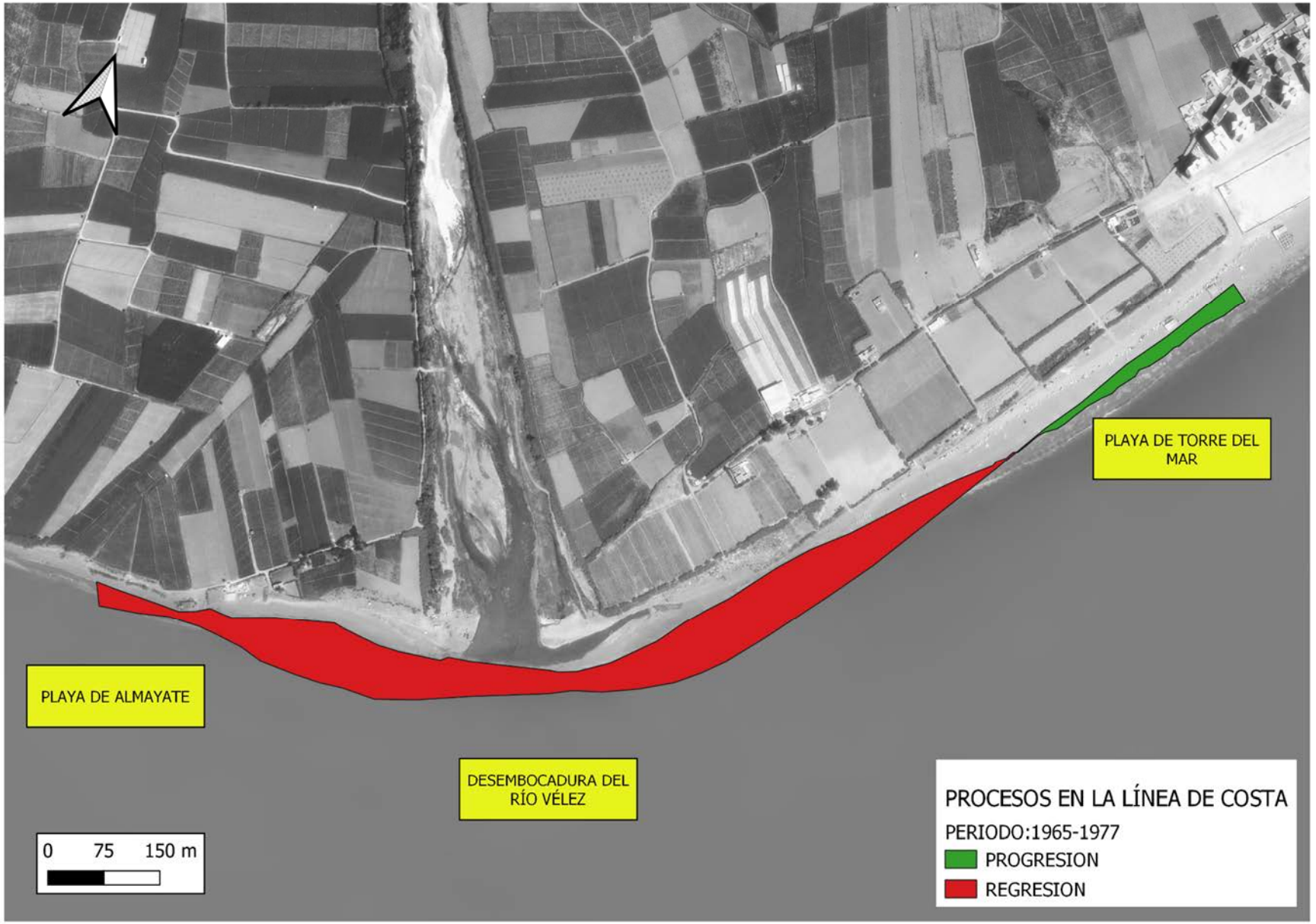

1
2
CAMPING ALMANAT
DELTA DEL RÍO VÉLEZ
0
75
150 m
LÍNEAS DE COSTA
Línea de costa: 2022

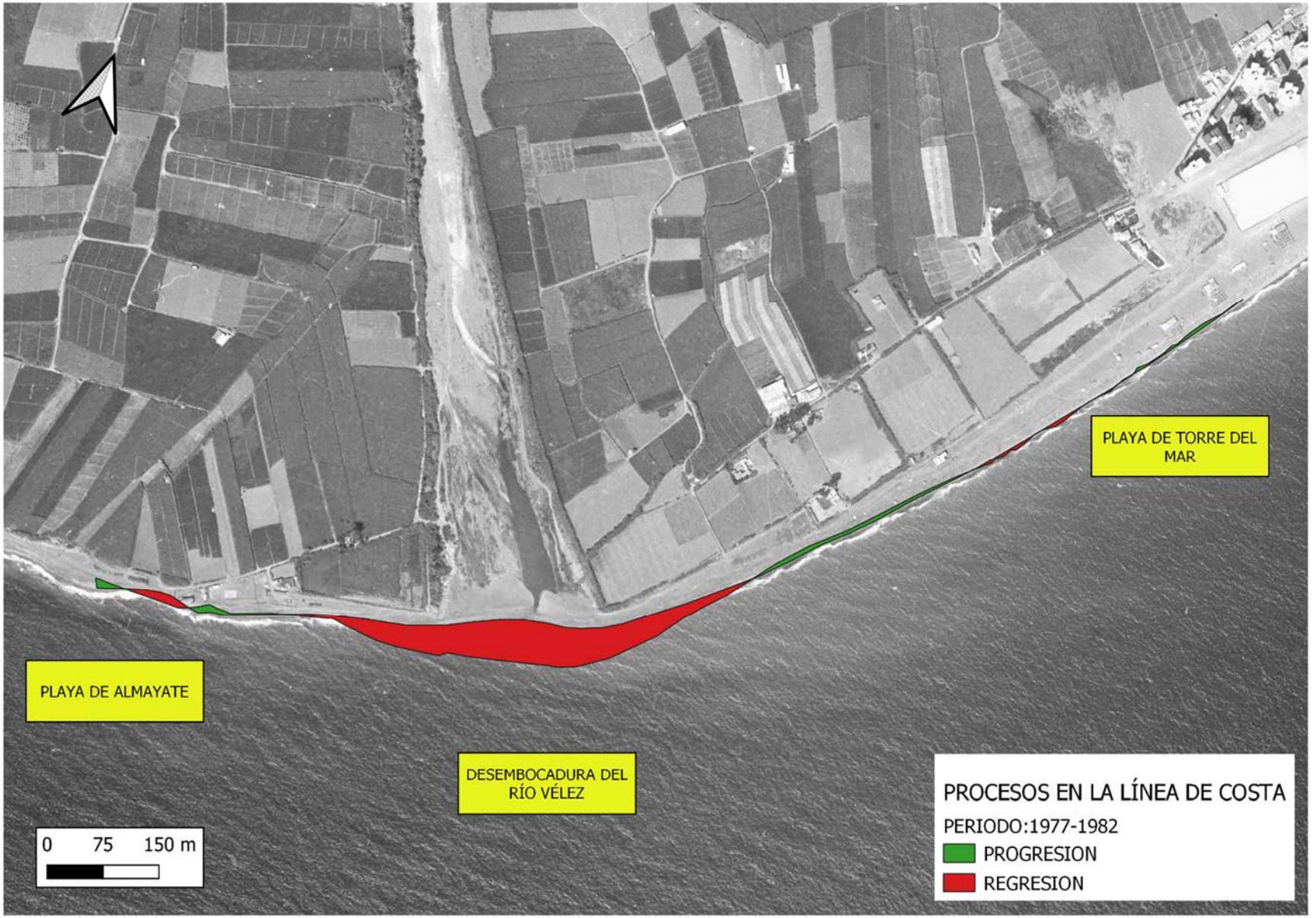

1
2
CAMPING LAGUNA PLAYA
PLAYA DE TORRE DEL MAR
0
75
150 m
LÍNEAS DE COSTA
Línea de costa: 2022

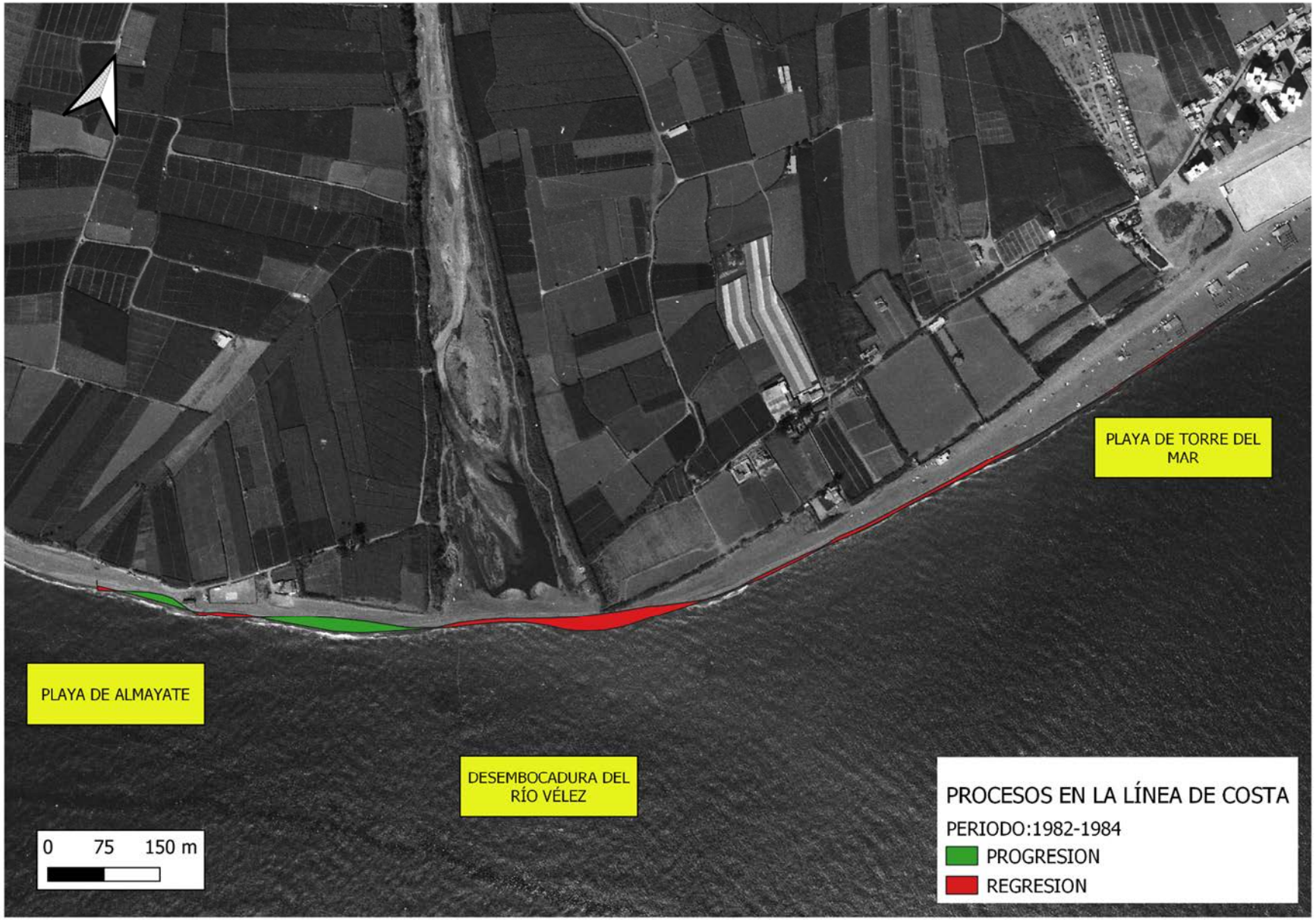
ANEXO 2: PROCESOS DE REGRESIÓN Y ACRECIÓN ENTRE 1957 Y 2022

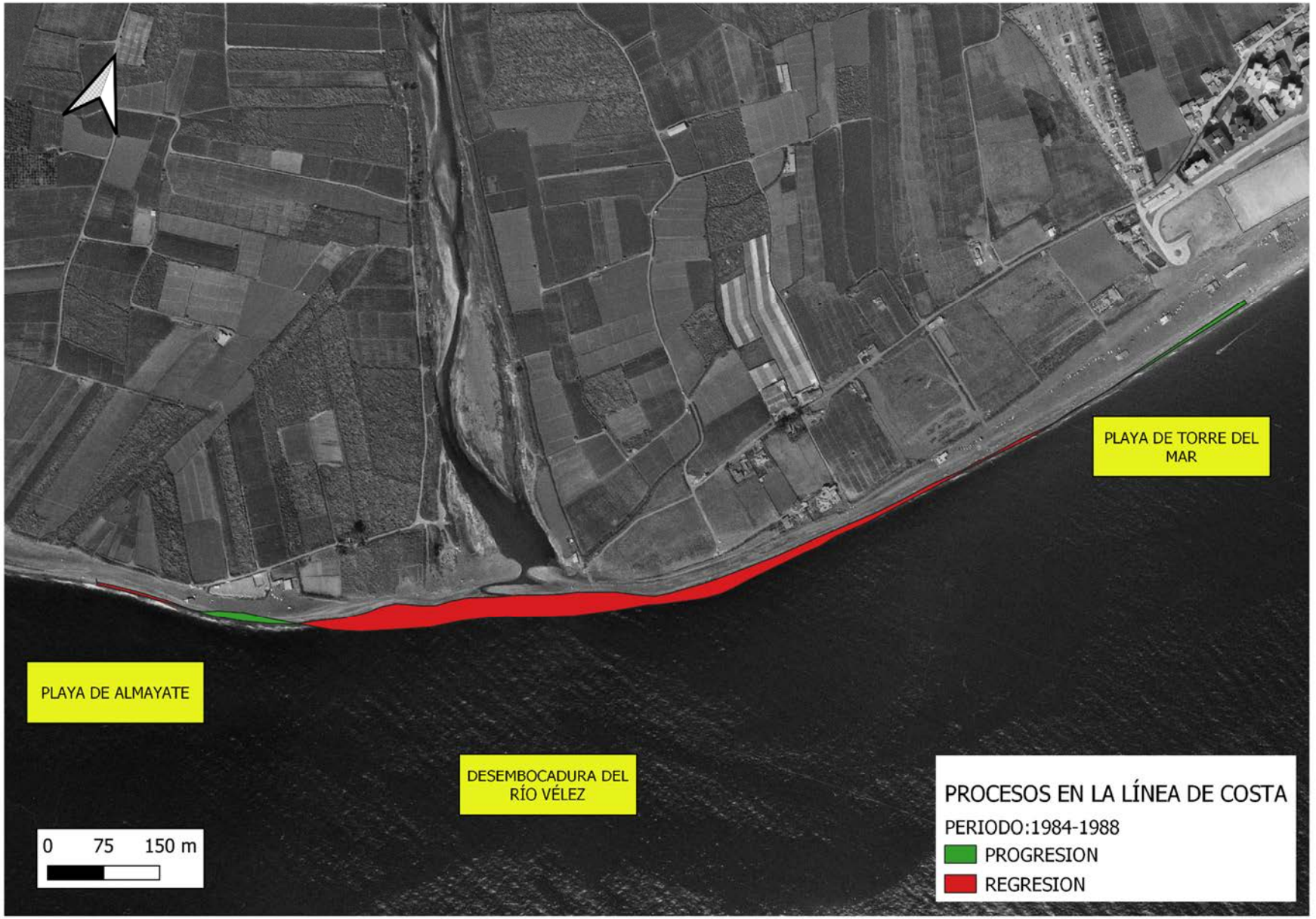

PLAYA DE TORRE DEL MAR
PLAYA DE ALMAYATE
DESEMBOCADURA DEL RÍO VÉLEZ
0 75 150 m
PROCESOS EN LA LÍNEA DE COSTA
PERIODO:1957-1964
PROGRESION
REGRESION

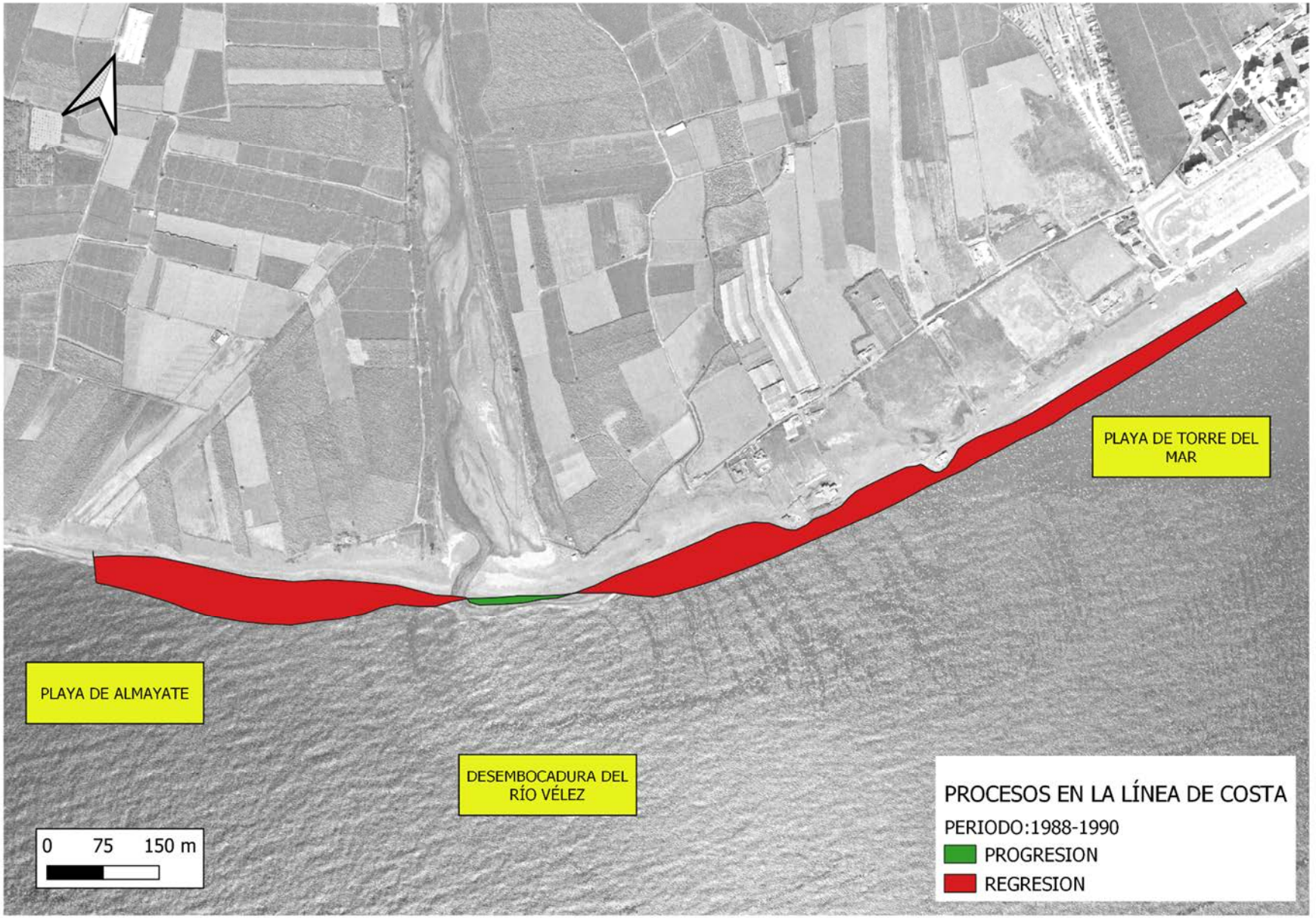

PLAYA DE TORRE DEL MAR
PLAYA DE ALMAYATE
DESEMBOCADURA DEL RÍO VÉLEZ
0 75 150 m
PROCESOS EN LA LÍNEA DE COSTA
PERIODO:1964-1965
PROGRESION
REGRESION

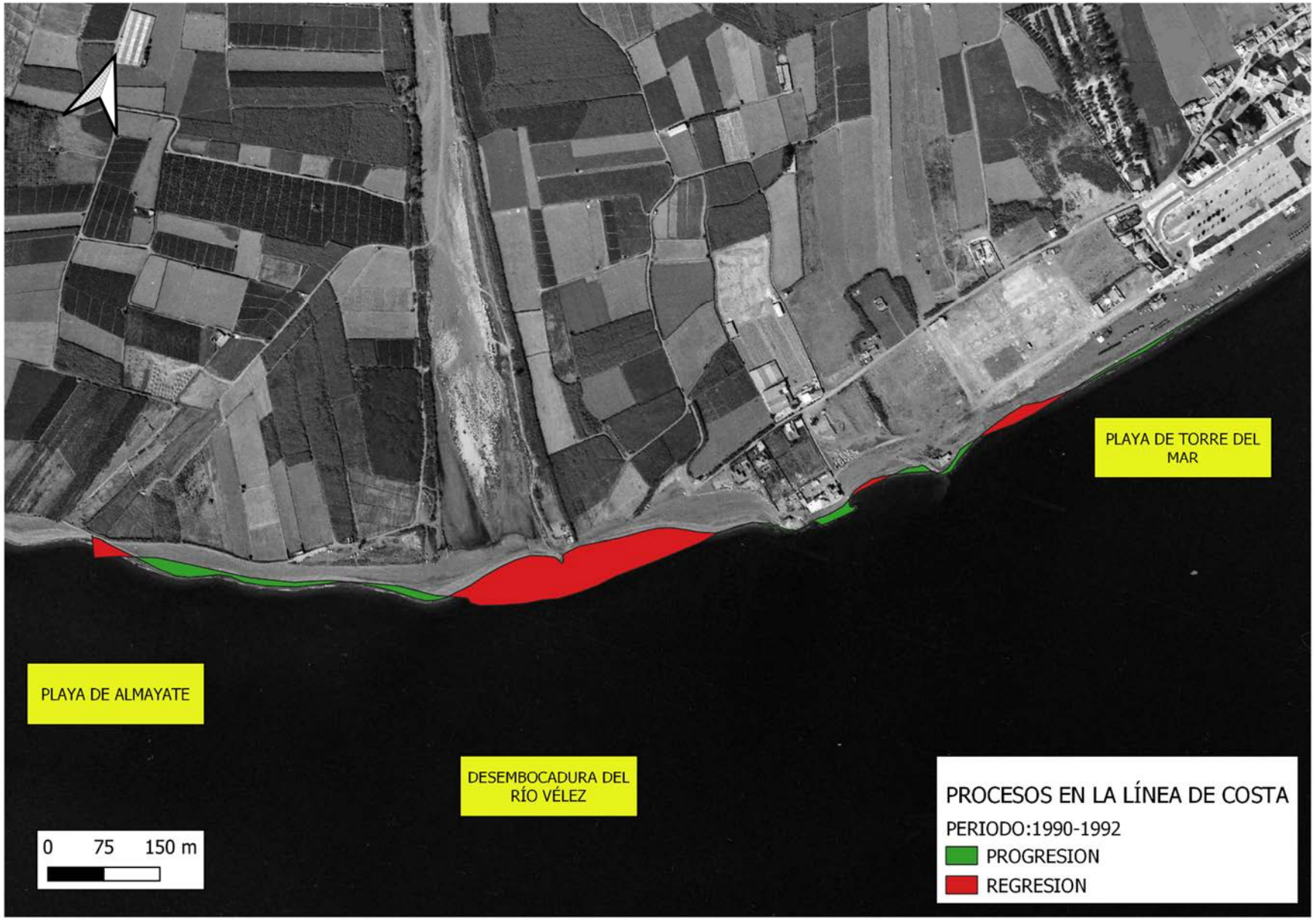

PLAYA DE TORRE DEL MAR
PLAYA DE ALMAYATE
DESEMBOCADURA DEL RÍO VÉLEZ
0 75 150 m
PROCESOS EN LA LÍNEA DE COSTA
PERIODO:1965-1977
PROGRESION
REGRESION

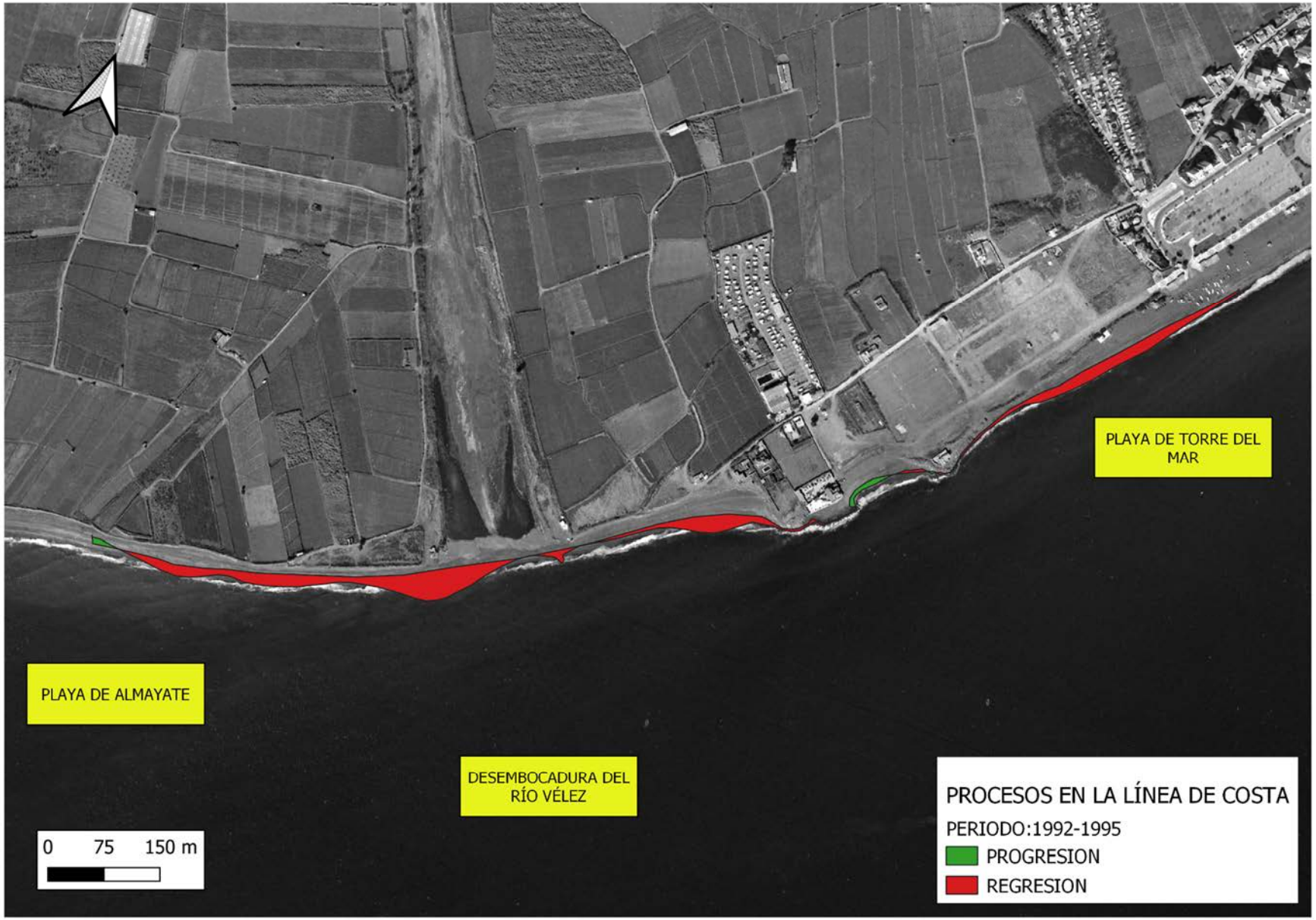

PLAYA DE TORRE DEL MAR
PLAYA DE ALMAYATE
DESEMBOCADURA DEL RÍO VÉLEZ
0 75 150 m
PROCESOS EN LA LÍNEA DE COSTA
PERIODO:1977-1982
PROGRESION
REGRESION

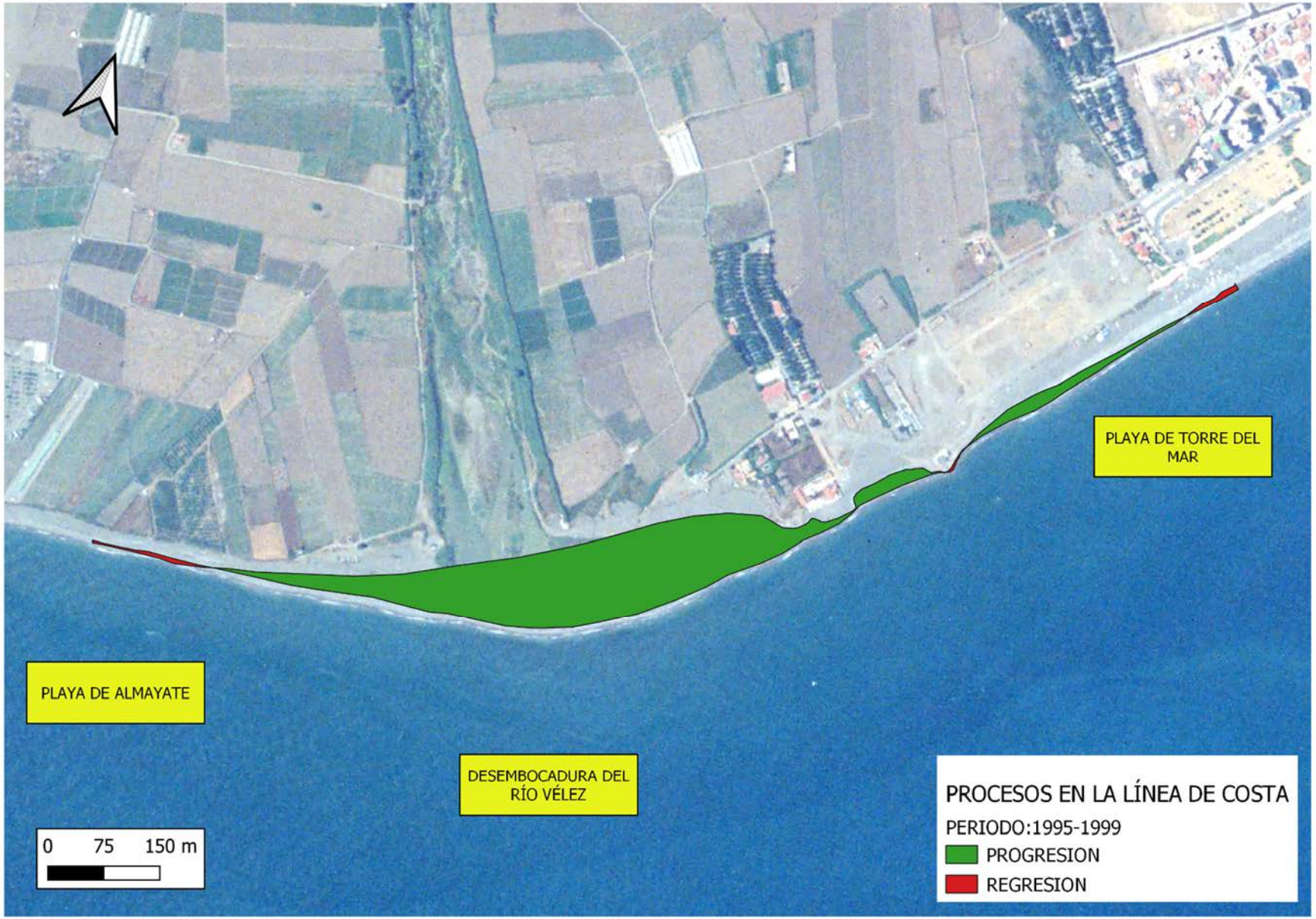

PLAYA DE TORRE DEL MAR
PLAYA DE ALMAYATE
DESEMBOCADURA DEL RÍO VÉLEZ
0 75 150 m
PROCESOS EN LA LÍNEA DE COSTA
PERIODO:1982-1984
PROGRESION
REGRESION

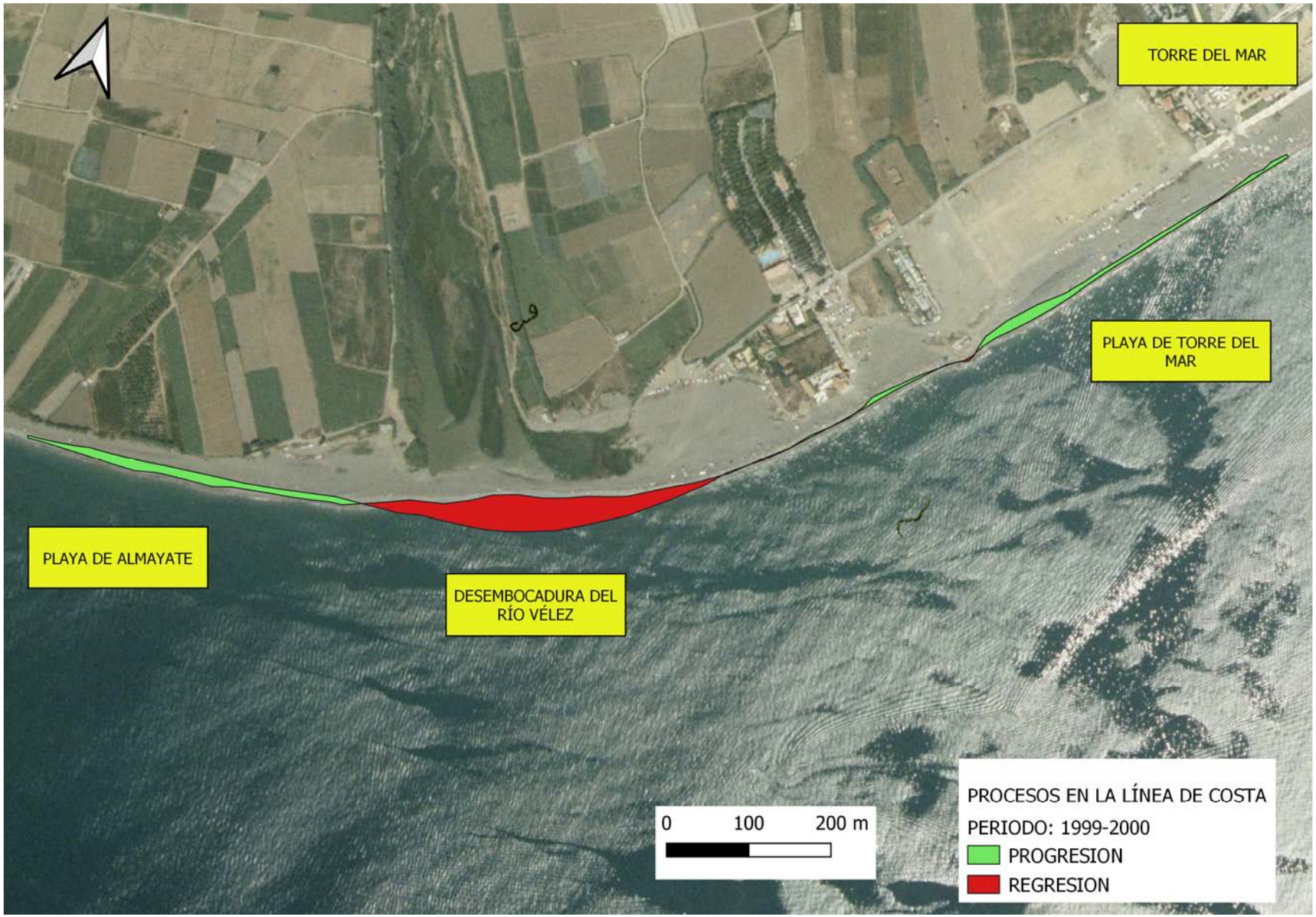

PLAYA DE TORRE DEL MAR
PLAYA DE ALMAYATE
DESEMBOCADURA DEL RÍO VÉLEZ
0 75 150 m
PROCESOS EN LA LÍNEA DE COSTA
PERIODO:1984-1988
PROGRESION
REGRESION

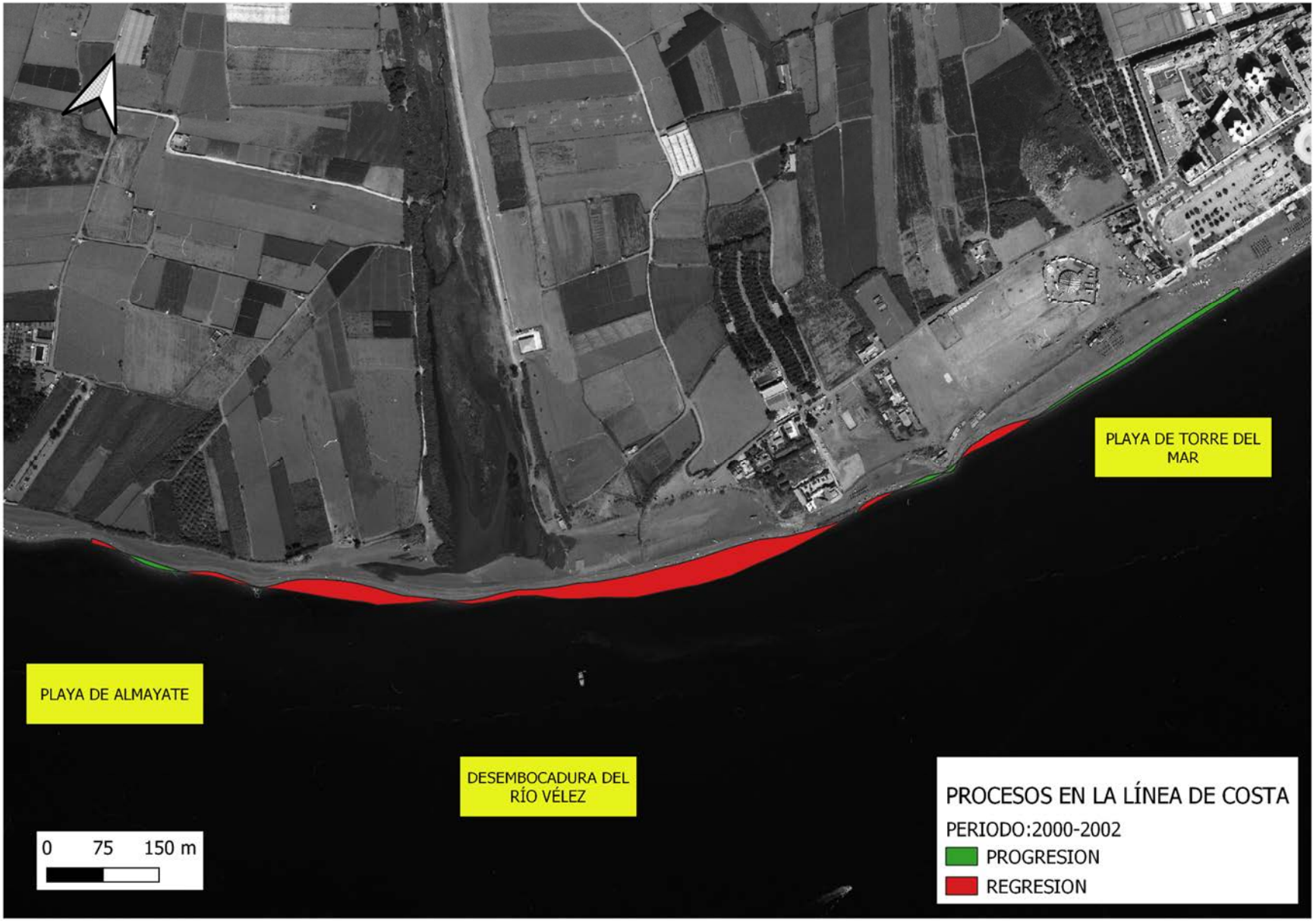

PLAYA DE TORRE DEL MAR
PLAYA DE ALMAYATE
DESEMBOCADURA DEL RÍO VÉLEZ
0 75 150 m
PROCESOS EN LA LÍNEA DE COSTA
PERIODO:1988-1990
PROGRESION
REGRESION

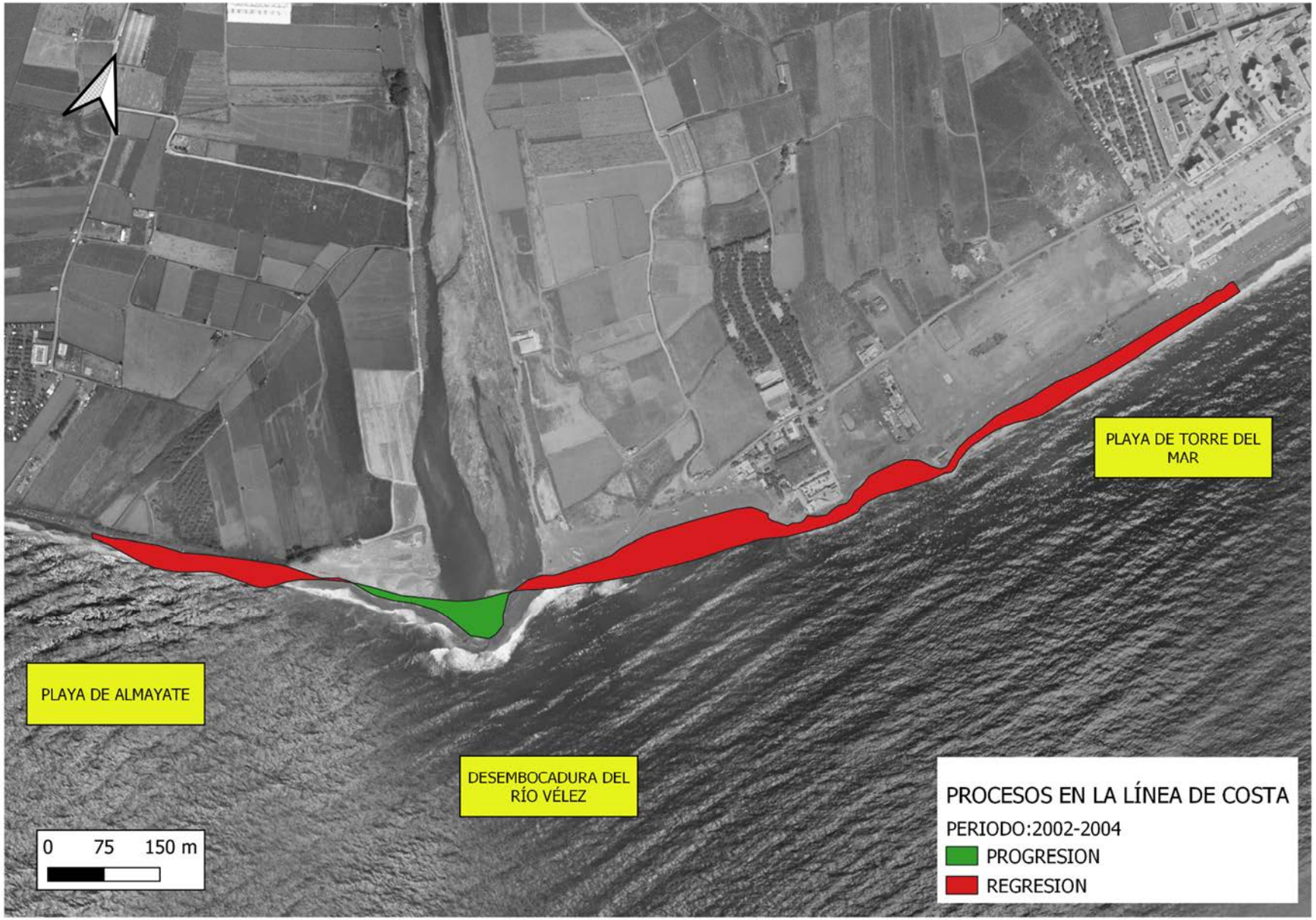

PLAYA DE TORRE DEL MAR
PLAYA DE ALMAYATE
DESEMBOCADURA DEL RÍO VÉLEZ
0 75 150 m
PROCESOS EN LA LÍNEA DE COSTA
PERIODO:1990-1992
PROGRESION
REGRESION

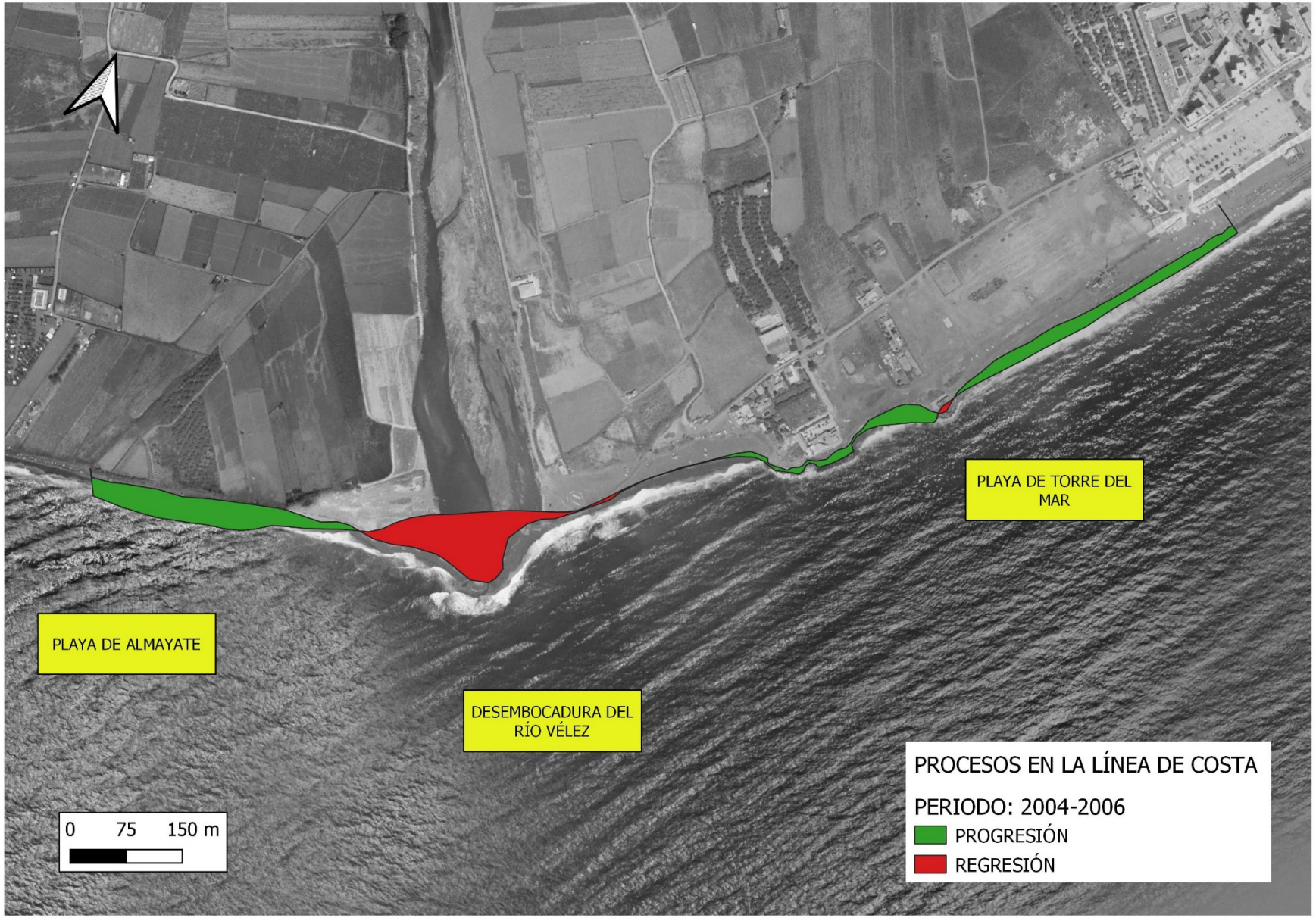

PLAYA DE TORRE DEL MAR
PLAYA DE ALMAYATE
DESEMBOCADURA DEL RÍO VÉLEZ
0 75 150 m
PROCESOS EN LA LÍNEA DE COSTA
PERIODO:1992-1995
PROGRESION
REGRESION


PLAYA DE TORRE DEL MAR
PLAYA DE ALMAYATE
DESEMBOCADURA DEL RÍO VÉLEZ
0 75 150 m
PROCESOS EN LA LÍNEA DE COSTA
PERIODO:1995-1999
PROGRESION
REGRESION

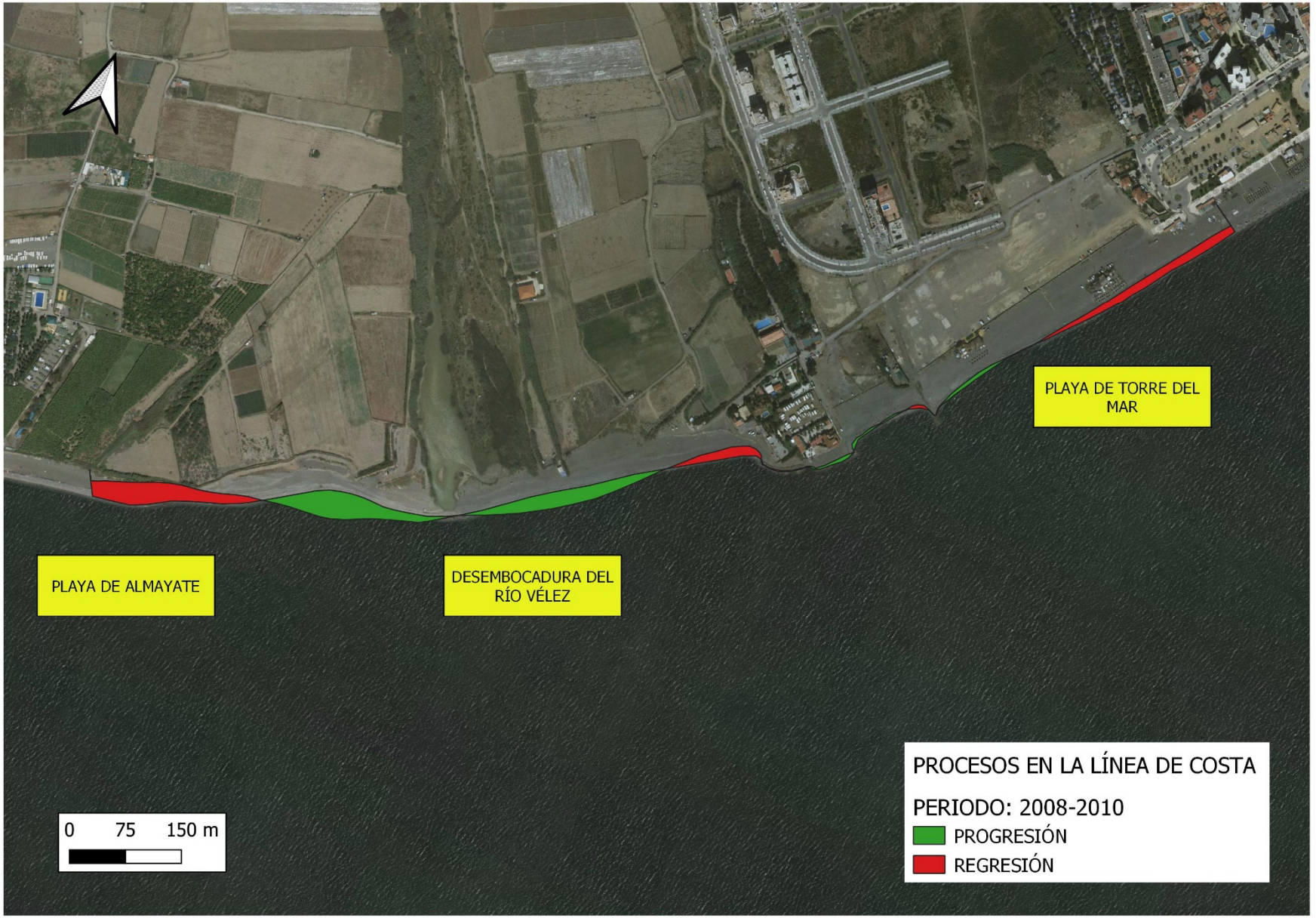

TORRE DEL MAR
PLAYA DE TORRE DEL MAR
PLAYA DE ALMAYATE
DESEMBOCADURA DEL RÍO VÉLEZ
0
100
200 m
PROCESOS EN LA LÍNEA DE COSTA
PERIODO: 1999-2000
PROGRESION
REGRESION

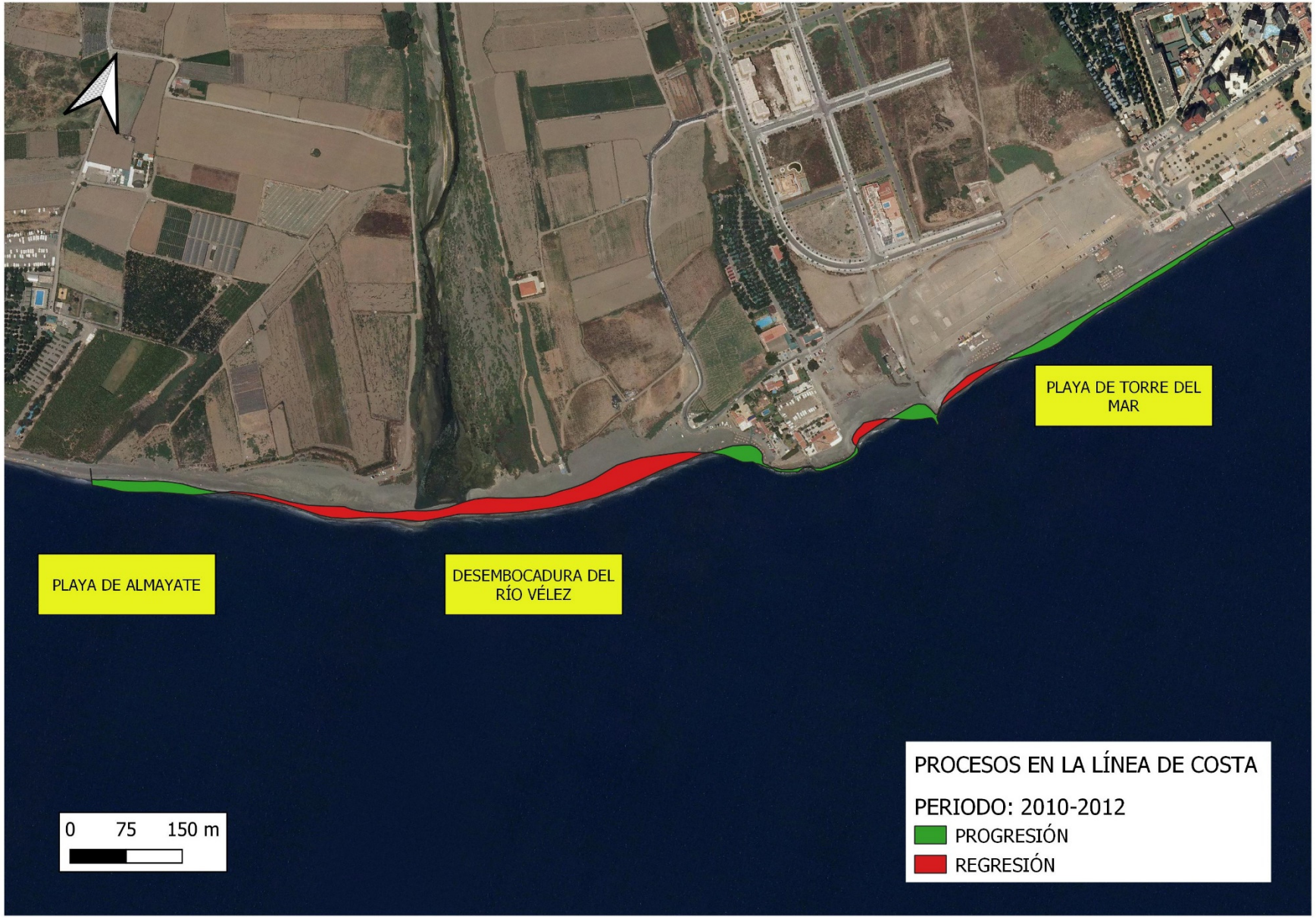

PLAYA DE TORRE DEL MAR
PLAYA DE ALMAYATE
DESEMBOCADURA DEL RÍO VÉLEZ
0 75 150 m
PROCESOS EN LA LÍNEA DE COSTA
PERIODO:2000-2002
PROGRESION
REGRESION

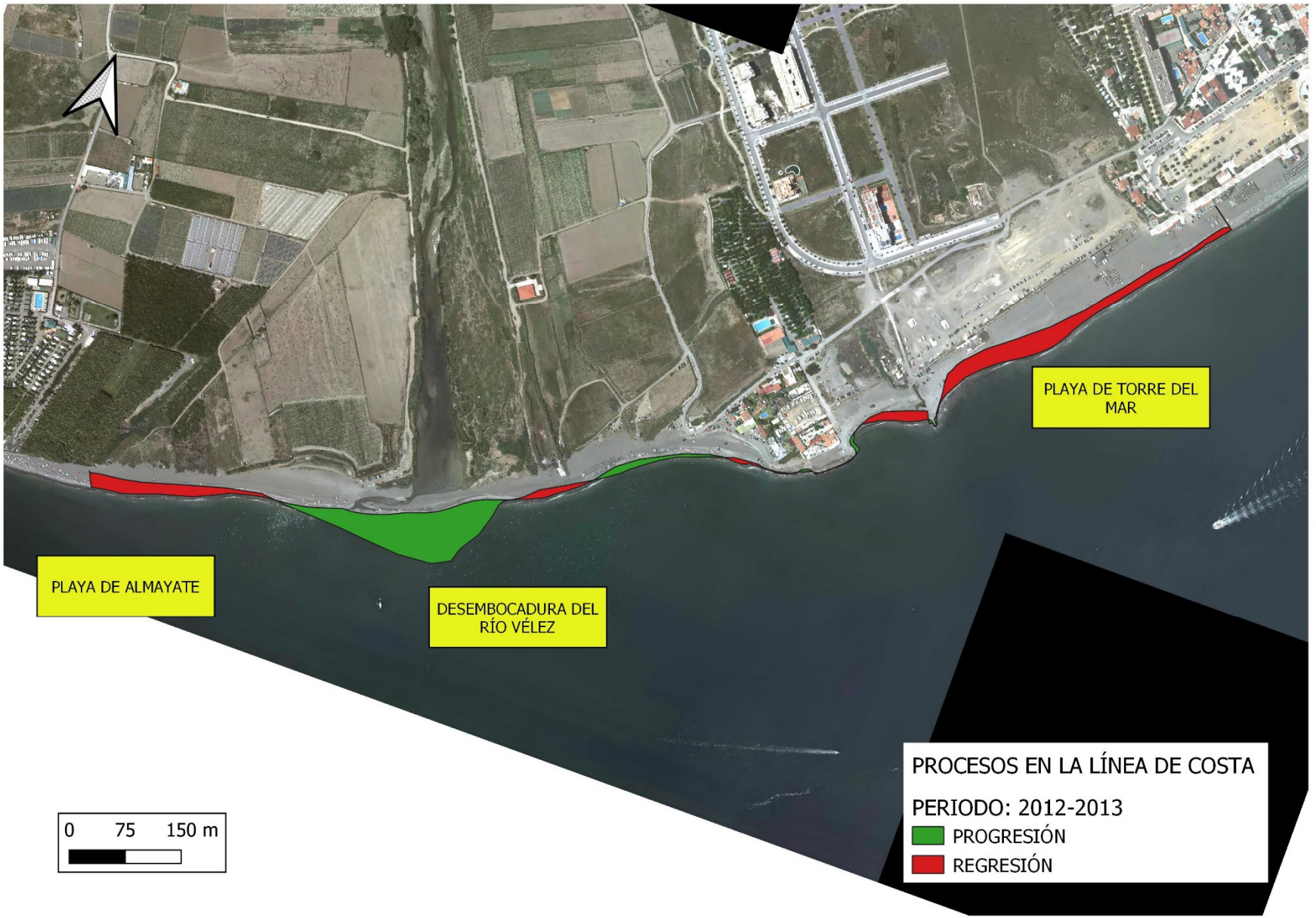

PLAYA DE TORRE DEL MAR
PLAYA DE ALMAYATE
DESEMBOCADURA DEL RÍO VÉLEZ
0 75 150 m
PROCESOS EN LA LÍNEA DE COSTA
PERIODO:2002-2004
PROGRESION
REGRESION


PLAYA DE TORRE DEL MAR
PLAYA DE ALMAYATE
DESEMBOCADURA DEL RÍO VÉLEZ
0 75 150 m
PROCESOS EN LA LÍNEA DE COSTA
PERIODO: 2004-2006
PROGRESIÓN
REGRESIÓN


PLAYA DE TORRE DEL MAR
PLAYA DE ALMAYATE
DESEMBOCADURA DEL RÍO VÉLEZ
0 75 150 m
PROCESOS EN LA LÍNEA DE COSTA
PERIODO: 2006-2008
PROGRESIÓN
REGRESIÓN


PLAYA DE TORRE DEL MAR
PLAYA DE ALMAYATE
DESEMBOCADURA DEL RÍO VÉLEZ
0 75 150 m
PROCESOS EN LA LÍNEA DE COSTA
PERIODO: 2008-2010
PROGRESIÓN
REGRESIÓN


PLAYA DE TORRE DEL MAR
PLAYA DE ALMAYATE
DESEMBOCADURA DEL RÍO VÉLEZ
0 75 150 m
PROCESOS EN LA LÍNEA DE COSTA
PERIODO: 2010-2012
PROGRESIÓN
REGRESIÓN

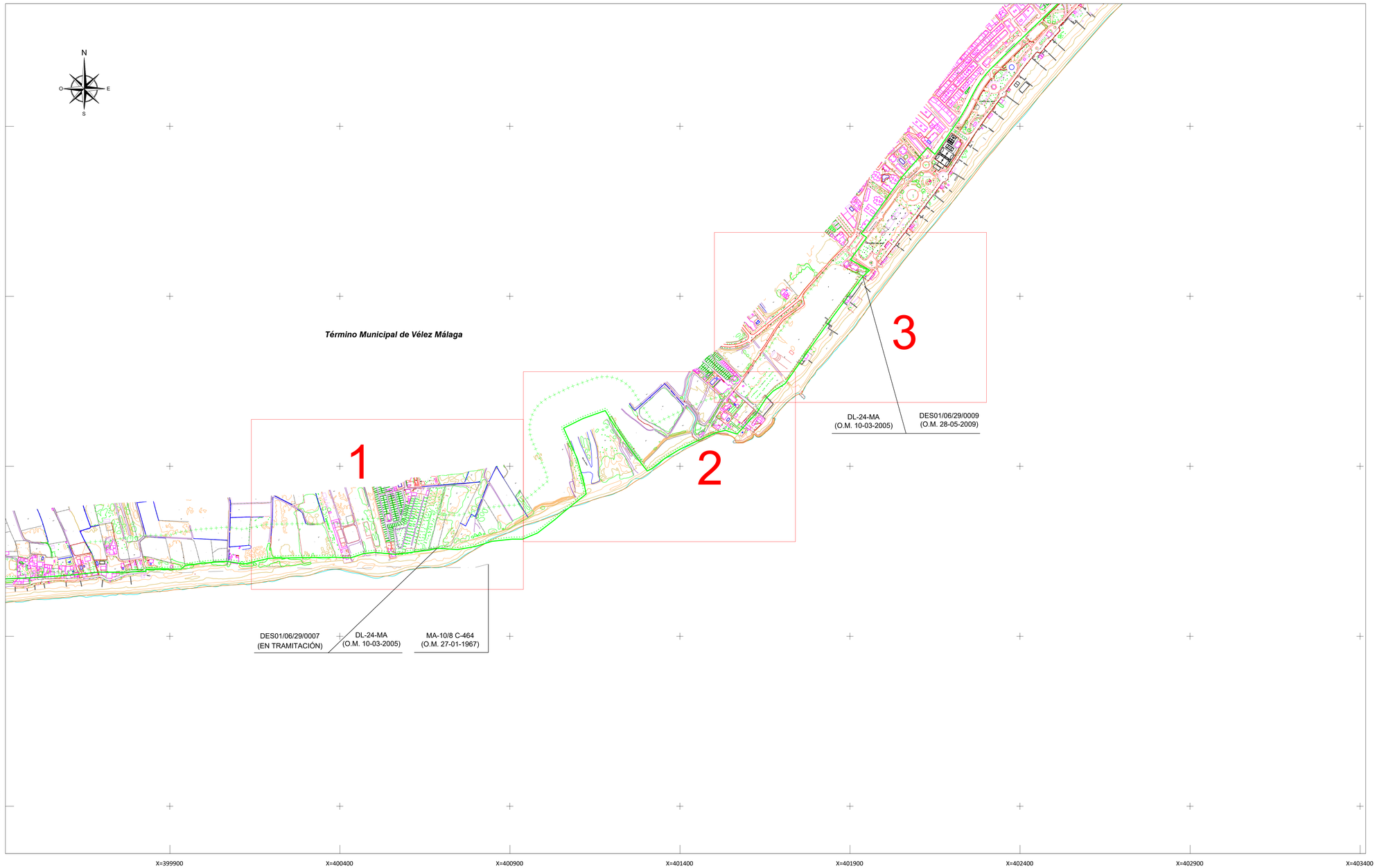

PLAYA DE TORRE DEL MAR
PLAYA DE ALMAYATE
DESEMBOCADURA DEL RÍO VÉLEZ
0 75 150 m
PROCESOS EN LA LÍNEA DE COSTA
PERIODO: 2012-2013
PROGRESIÓN
REGRESIÓN


PLAYA DE TORRE DEL MAR
PLAYA DE ALMAYATE
DESEMBOCADURA DEL RÍO VÉLEZ
0 75 150 m
PROCESOS EN LA LÍNEA DE COSTA
PERIODO: 2013-2016
PROGRESIÓN
REGRESIÓN


PLAYA DE TORRE DEL MAR
PLAYA DE ALMAYATE
DESEMBOCADURA DEL RÍO VÉLEZ
0 75 150 m
PROCESOS EN LA LÍNEA DE COSTA
PERIODO: 2016-2019
PROGRESIÓN
REGRESIÓN


PLAYA DE ALMAYATE
DESEMBOCADURA DEL RÍO VÉLEZ
PLAYA DE TORRE DEL MAR
0 75 150 m
PROCESOS EN LA LÍNEA DE COSTA
PERIODO: 2019-2022
PROGRESIÓN
REGRESIÓN

ANEXO 3: PLANOS DE DESLINDE DEL DPMT VIGENTE



INFORMACIÓN CARTOGRÁFICA

SISTEMA GEODÉSICO DE REFERENCIA: ETRS89

SISTEMA DE REPRESENTACIÓN CARTOGRÁFICA:U.T.M. - HUSO 30 N

ORIGEN DE ALTITUDES: NIVEL MEDIO DEL MAR EN ALICANTE

COORDENADAS U.T.M. ETRS89 EN MARCO DE HOJA

VUELO FOTOGRAMÉTRICO REALIZADO EN AGOSTO DE 2017

AEROTRIANGULACIÓN PROPIA DE ESTE LEVANTAMIENTO

APOYO DE CAMPO REALIZADO EN ENERO-MAYO DE 2018

RESTITUCIÓN Y EDICIÓN REALIZADO EN SEPT 2017-MARZO 2018

SIGNOS CONVENCIONALES PARTICULARES

- LÍNEA DE AGUA
- POLIGONAL DEL DESLINDE DEL D.P.M.T.
- LÍNEA DE RIBERA DEL MAR
- LÍMITE SERVIDUMBRE DE TRÁNSITO
- LÍMITE SERVIDUMBRE DE PROTECCIÓN
- POLIGONAL DEL DESLINDE DEL D.P.M.T. "PROVISIONAL"
- LÍMITE DE SERVIDUMBRE DE PROTECCIÓN "PROVISIONAL"
- LÍNEA DE OTROS DESLINDES
- LÍMITE DE PARCELAS COLINDANTES
- LÍMITE DE SUELO URBANO
- LÍMITE DE TÉRMINO MUNICIPAL
- LÍMITE DE PROVINCIA
- HITOS DESLINDE
- S.U. SUELO URBANO
- S.N.U. SUELO NO URBANIZABLE
- S.U.P. SUELO URBANIZABLE PROGRAMADO
- S.U.N.P. SUELO URBANIZABLE NO PROGRAMADO

NOTA: SI COINCIDE LA POLIGONAL DEL DESLINDE DE DPMT CON LA LÍNEA DE R.M. SÓLO SE GRAFÍA LA PRIMERA

SIGNOS CONVENCIONALES GENERALES

- ÁRBOL / PALMERA
- BOCA HIDROGRÁFICA / CASCADA / SIFÓN / SUMIDERO
- CAPTACIÓN / POZO
- FUENTE / SURGENCIA
- BUZÓN / CABINA TELEFÓNICA / BANCO
- CONTENEDOR / BOLARDO / IMBORNAL
- FAROLA / SEMÁFORO / POZO REGISTRO
- POSTE MADERA / POSTE METÁLICO / ANTENA
- PUNTO NAP / PUNTO NIVELACIÓN
- VÉRTICE REGENTE / REGIONAL / ROI
- VÉRTICE TOPOGRAFICO / PUNTO DE APOYO

ESCALA 1 / 5.000

-50 m 0 50 100 150 200 250

EQUIDISTANCIA CURVAS DE NIVEL 5m

ASISTENCIA TÉCNICA:

Tragsatec

MINISTERIO
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA
Y EL RETO DEMOGRÁFICO

DIRECCIÓN GENERAL DE LA COSTA Y EL MAR

Demarcación de Costas en Andalucía-Mediterráneo
(Málaga)

SERVICIO DE GESTIÓN DEL DOMINIO PÚBLICO

ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN DE LA COSTA PARA LA ESTIMACIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA Y DEL DPMT EN ESCENARIOS FUTUROS

CAMPING ALMANAT - PLAYA DE TORRE DEL MAR

TÉRMINO MUNICIPAL: VÉLEZ-MÁLAGA

PLANO Nº	HOJA Nº	PLANO:	REFERENCIA ANTIGUA	REFERENCIA
1	1 de 1	DESLINDE VIGENTE		

HOJAS MAPA TOPOGRÁFICO NACIONAL 1:50.000

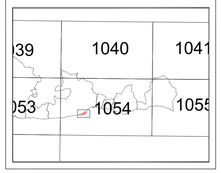
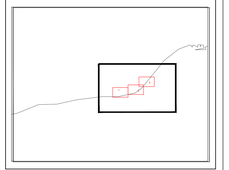


GRÁFICO DE DISTRIBUCIÓN DE HOJAS 1:5.000



EXAMINADO Y CONFORME

El Jefe de Servicio: Juan José Valero Guerra

Vº Bº el Jefe de la Demarcación: Ángel González Castiñeira

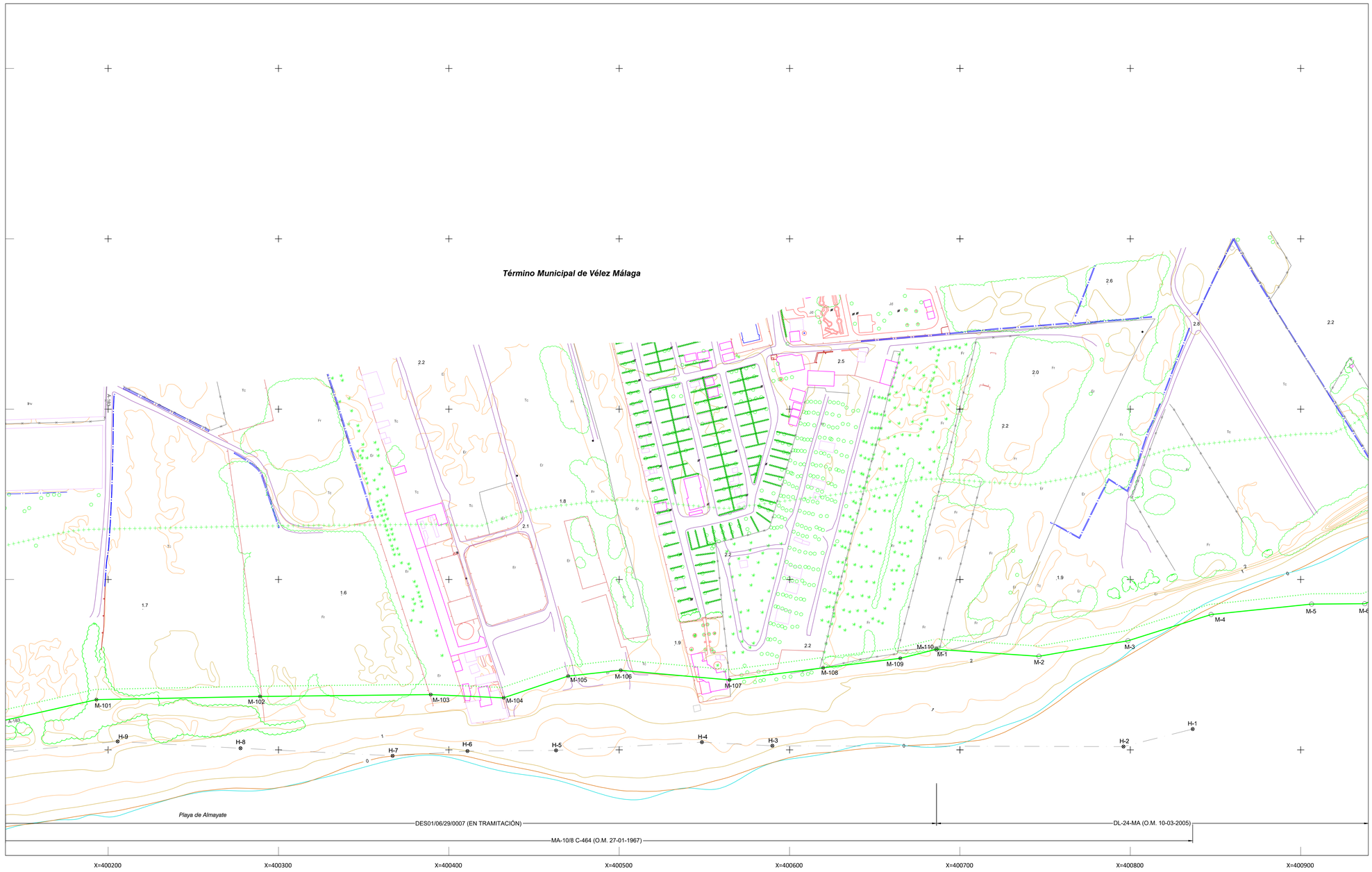
FECHA: la indicada en la firma electrónica

VÉRTICES POLIGONAL DEL DESLINDE

Vértice	X	Y	Z

VÉRTICES POLIGONAL DE LA RIBERA DEL MAR

Vértice	X	Y	Z



INFORMACIÓN CARTOGRÁFICA

SISTEMA GEODÉSICO DE REFERENCIA: ETRS89
SISTEMA DE REPRESENTACIÓN CARTOGRÁFICA:U.T.M. - HUSO 30 N
ORIGEN DE ALTITUDES: NIVEL MEDIO DEL MAR EN ALICANTE
COORDENADAS U.T.M. ETRS89 EN MARCO DE HOJA

VUELO FOTOGRAMÉTRICO REALIZADO EN AGOSTO DE 2017
AEROTRIANGULACIÓN PROPIA DE ESTE LEVANTAMIENTO
APOYO DE CAMPO REALIZADO EN ENERO-MAYO DE 2018
RESTITUCIÓN Y EDICIÓN REALIZADO EN SEPT 2017-MARZO 2018

SIGNOS CONVENCIONALES PARTICULARES

- LÍNEA DE AGUA
- POLIGONAL DEL DESLINDE DEL D.P.M.T.
- LÍNEA DE RIBERA DEL MAR
- LÍMITE SERVIDUMBRE DE TRÁNSITO
- LÍMITE SERVIDUMBRE DE PROTECCIÓN
- POLIGONAL DEL DESLINDE DEL D.P.M.T. "PROVISIONAL"
- LÍMITE DE SERVIDUMBRE DE PROTECCIÓN "PROVISIONAL"
- LÍNEA DE OTROS DESLINDES
- LÍMITE DE PARCELAS COLINDANTES
- TERRENOS INNECESARIOS Y DE POSIBLE DESAFECTACIÓN
- LÍMITE DE TÉRMINO MUNICIPAL
- LÍMITE DE PROVINCIA
- HITOS DESLINDE
- S.U. SUELO URBANO
- S.N.U. SUELO NO URBANIZABLE
- S.U.P. SUELO URBANIZABLE PROGRAMADO
- S.U.N.P. SUELO URBANIZABLE NO PROGRAMADO

NOTA: SI COINCIDE LA POLIGONAL DEL DESLINDE DE DPMT CON LA LÍNEA DE R.M. SÓLO SE GRAFÍA LA PRIMERA

SIGNOS CONVENCIONALES GENERALES

- ÁRBOL / PALMERA
- ROCA HIDROGRAFICA / CASCADA / SIFÓN / SUMIDERO
- CAPTACIÓN / POZO
- FUENTE / SURGENCIA
- BUZÓN / CABINA TELEFÓNICA / BANCO
- CONTENEDOR / BOLARDO / IMBORNAL
- FAROLA / SEMÁFOR / POZO REGISTRO
- POSTE MADERA / POSTE METÁLICO / ANTENA
- PUNTO NAP / PUNTO NIVELACIÓN
- VÉRTICE REGENTE / REGIONAL / ROI
- VÉRTICE TOPOGRÁFICO / PUNTO DE APOYO

ESCALA 1 / 1.000

-10 m 0 10 20 30 40 50

EQUIDISTANCIA CURVAS DE NIVEL 1m

ASISTENCIA TÉCNICA:

Tragsatec
Grupo Tragsa

MINISTERIO
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA
Y EL RETO DEMOGRÁFICO

DIRECCIÓN GENERAL DE LA COSTA Y EL MAR

Demarcación de Costas en Andalucía-Mediterráneo
(Málaga)

SERVICIO DE GESTIÓN DEL DOMINIO PÚBLICO

ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN DE LA COSTA PARA LA ESTIMACIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA Y DEL DPMT EN ESCENARIOS FUTUROS

CAMPING ALMANAT - PLAYA DE TORRE DEL MAR

TÉRMINO MUNICIPAL: VÉLEZ-MÁLAGA

PLANO Nº	HOJA Nº	PLANO:	REFERENCIA ANTIGUA	REFERENCIA
2	1 de 3	DESLINDE VIGENTE		

GRÁFICO DE DISTRIBUCIÓN DE HOJAS 1:5.000

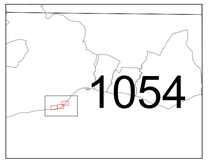
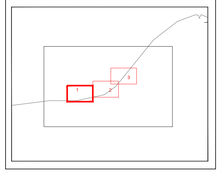


GRÁFICO DE DISTRIBUCIÓN DE HOJAS 1:1.000



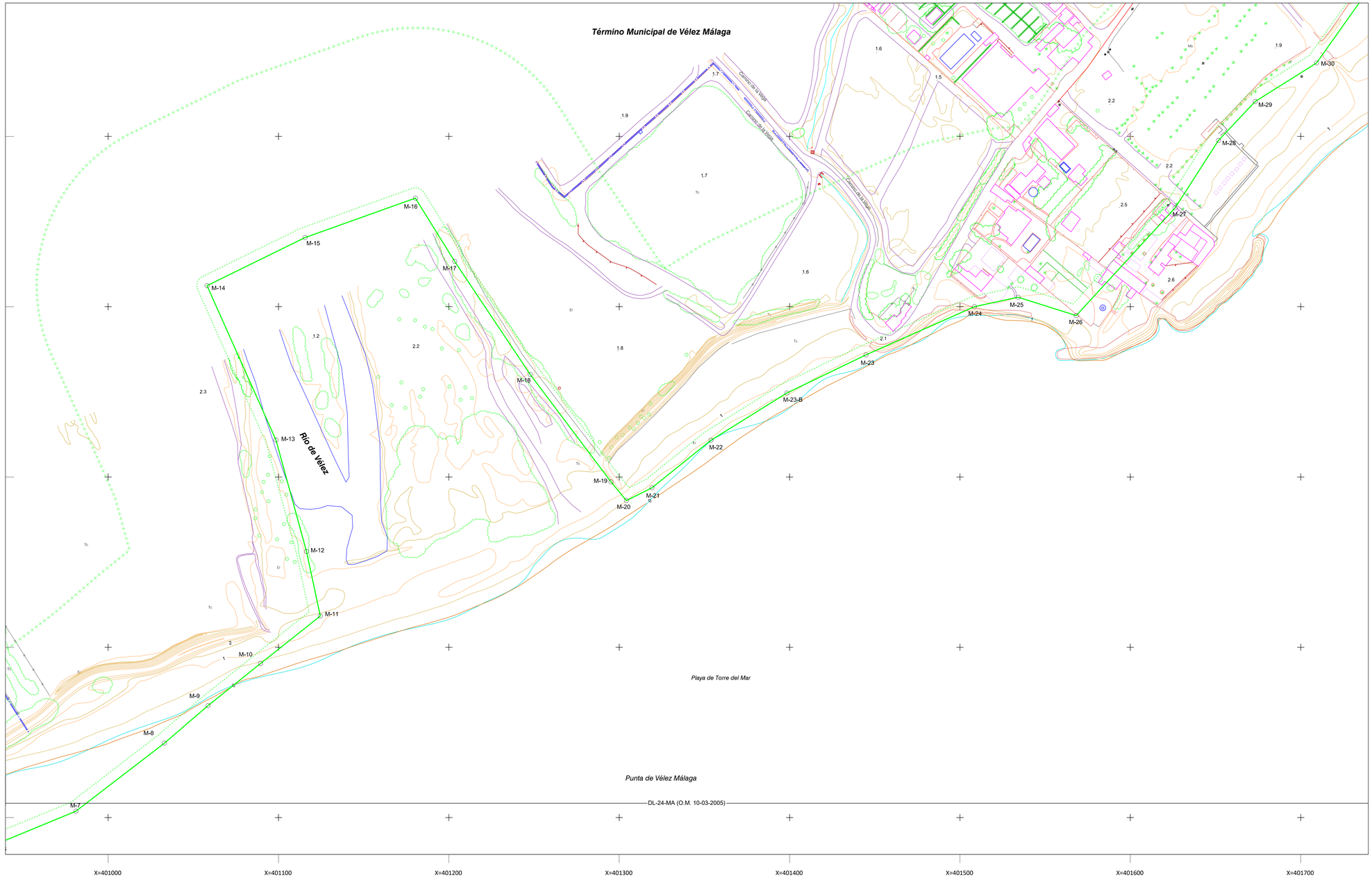
EXAMINADO Y CONFORME

El Jefe de Servicio: Juan José Valero Guerra

Vº Bº el Jefe de la Demarcación: Ángel González Castiñeira

FECHA: la indicada en la firma electrónica

VÉRTICES POLIGONAL DEL DESLINDE			VÉRTICES POLIGONAL DE LA RIBERA DEL MAR		
Vértice	X	Y	Vértice	X	Y



MINISTERIO
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA
Y EL RETO DEMOGRÁFICO

DIRECCIÓN GENERAL DE LA COSTA Y EL MAR

Demarcación de Costas en Andalucía-Mediterráneo
(Málaga)

SERVICIO DE GESTIÓN DEL DOMINIO PÚBLICO

ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN DE LA COSTA PARA LA ESTIMACIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA Y DEL DPMT EN ESCENARIOS FUTUROS

CAMPING ALMANAT - PLAYA DE TORRE DEL MAR

TÉRMINO MUNICIPAL: VÉLEZ-MÁLAGA

PLANO Nº	HOJA Nº	PLANO:	REFERENCIA ANTIGUA	REFERENCIA
2	2 de 3	DESLINDE VIGENTE		

GRÁFICO DE DISTRIBUCIÓN DE HOJAS 1:5.000

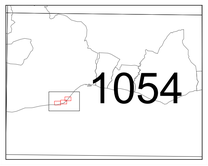
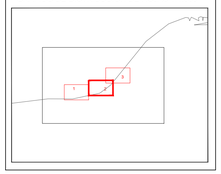


GRÁFICO DE DISTRIBUCIÓN DE HOJAS 1:1.000



EXAMINADO Y CONFORME

El Jefe de Servicio: Juan José Valero Guerra

Vº Bº el Jefe de la Demarcación: Ángel González Castiñeira

FECHA: la indicada en la firma electrónica

VÉRTICES POLIGONAL DEL DESLINDE

Vértice	X	Y

VÉRTICES POLIGONAL DE LA RIBERA DEL MAR

Vértice	X	Y

INFORMACIÓN CARTOGRÁFICA

SISTEMA GEODÉSICO DE REFERENCIA: ETRS89

SISTEMA DE REPRESENTACIÓN CARTOGRÁFICA:U.T.M. - HUSO 30 N

ORIGEN DE ALTITUDES: NIVEL MEDIO DEL MAR EN ALICANTE

COORDENADAS U.T.M. ETRS89 EN MARCO DE HOJA

VUELO FOTOGRAMÉTRICO REALIZADO EN AGOSTO DE 2017

AEROTRIANGULACIÓN PROPIA DE ESTE LEVANTAMIENTO

APOYO DE CAMPO REALIZADO EN ENERO-MAYO DE 2018

RESTITUCIÓN Y EDICIÓN REALIZADO EN SEPT 2017-MARZO 2018

SIGNOS CONVENCIONALES PARTICULARES

- LÍNEA DE AGUA
- POLIGONAL DEL DESLINDE DEL D.P.M.T.
- LÍNEA DE RIBERA DEL MAR
- LÍMITE SERVIDUMBRE DE TRÁNSITO
- LÍMITE SERVIDUMBRE DE PROTECCIÓN
- POLIGONAL DEL DESLINDE DEL D.P.M.T. "PROVISIONAL"
- LÍMITE DE SERVIDUMBRE DE PROTECCIÓN "PROVISIONAL"
- LÍNEA DE OTROS DESLINDES
- LÍMITE DE PARCELAS COLINDANTES
- TERRENOS INMEDIADOS Y DE PÚBLICA CONCURRENCIA
- LÍMITE DE TÉRMINO MUNICIPAL
- LÍMITE DE PROVINCIA
- HITOS DESLINDE
- S.U. SUELO URBANO
- S.N.U. SUELO NO URBANIZABLE
- S.U.P. SUELO URBANIZABLE PROGRAMADO
- S.U.N.P. SUELO URBANIZABLE NO PROGRAMADO

NOTA: SI COINCIDE LA POLIGONAL DEL DESLINDE DE DPMT CON LA LÍNEA DE R.M. SÓLO SE GRAFÍA LA PRIMERA

SIGNOS CONVENCIONALES GENERALES

- ÁRBOL / PALMERA
- BOCA HIDROGRAFICA / CASCADA / SIFÓN / SUMIDERO
- CAPTACIÓN / POZO
- FUENTE / SURGENCIA
- BUZÓN / CABINA TELEFÓNICA / BANCO
- CONTENEDOR / BOLARDO / IMBORNAL
- FAROLA / SEMÁFOR / POZO REGISTRO
- POSTE MADERA / POSTE METÁLICO / ANTENA
- PUNTO NAP / PUNTO NIVELACIÓN
- VÉRTICE REGENTE / REGIONAL / ROI
- VÉRTICE TOPOGRÁFICO / PUNTO DE APOYO

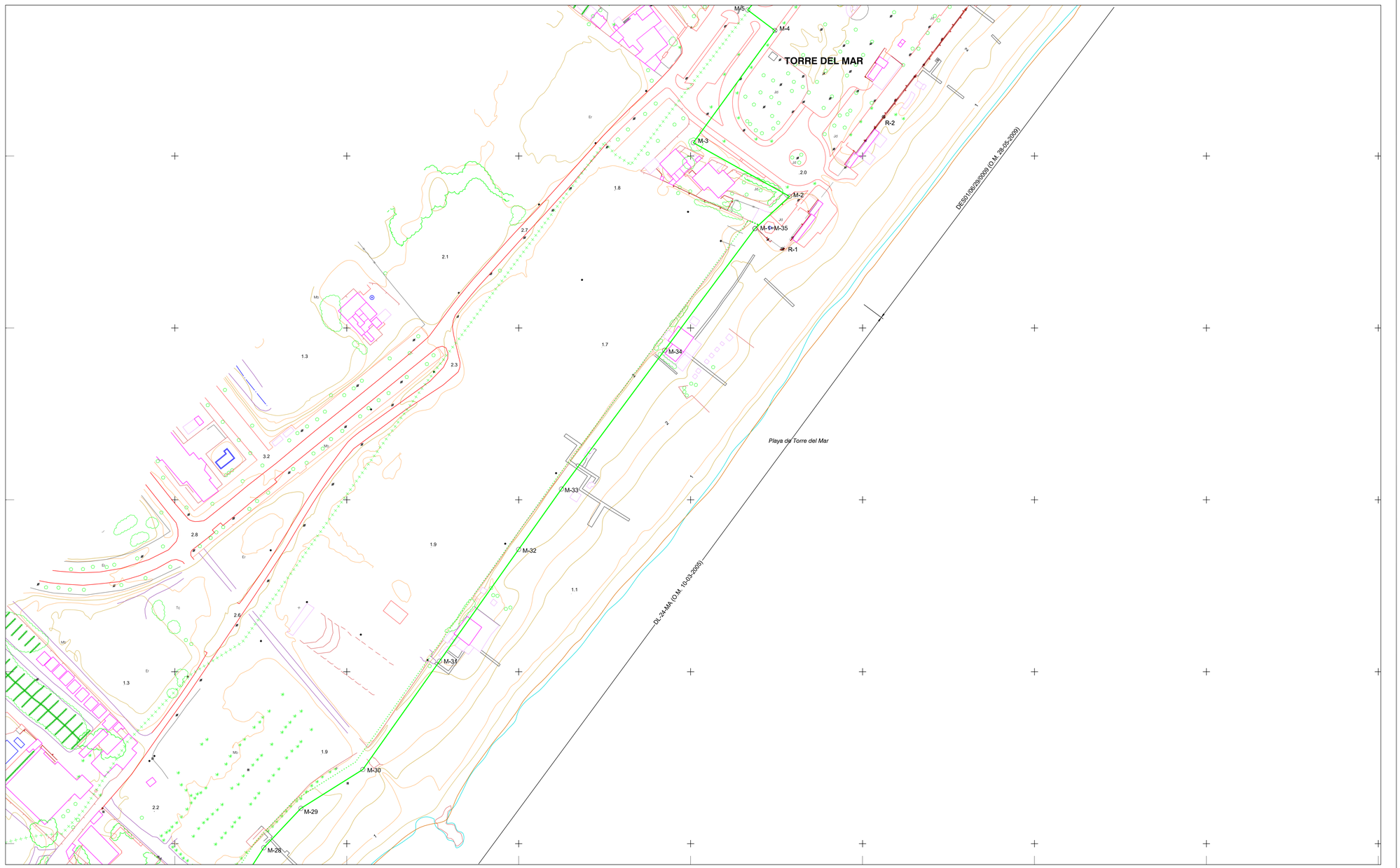
ESCALA 1 / 1.000

-10 m 0 10 20 30 40 50

EQUIDISTANCIA CURVAS DE NIVEL 1m

ASISTENCIA TÉCNICA:

Tragsatec



MINISTERIO
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA
Y EL RETO DEMOGRÁFICO

DIRECCIÓN GENERAL DE LA COSTA Y EL MAR

Demarcación de Costas en Andalucía-Mediterráneo
(Málaga)

SERVICIO DE GESTIÓN DEL DOMINIO PÚBLICO

ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN DE LA COSTA PARA LA ESTIMACIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA Y DEL DPMT EN ESCENARIOS FUTUROS

CAMPING ALMANAT - PLAYA DE TORRE DEL MAR

TÉRMINO MUNICIPAL: VÉLEZ-MÁLAGA

PLANO Nº	HOJA Nº	PLANO:	REFERENCIA ANTIGUA	REFERENCIA
2	3 de 3	DESLINDE VIGENTE		

GRÁFICO DE DISTRIBUCIÓN DE HOJAS 1:5.000

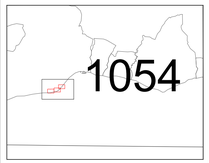
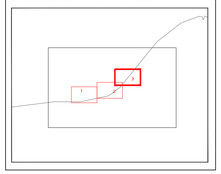


GRÁFICO DE DISTRIBUCIÓN DE HOJAS 1:1.000



EXAMINADO Y CONFORME

El Jefe de Servicio: Juan José Valero Guerra

Vº Bº el Jefe de la Demarcación: Ángel González Castiñeira

FECHA: la indicada en la firma electrónica

VÉRTICES POLIGONAL DEL DESLINDE

Vértice	X	Y

VÉRTICES POLIGONAL DE LA RIBERA DEL MAR

Vértice	X	Y

INFORMACIÓN CARTOGRÁFICA

SISTEMA GEODÉSICO DE REFERENCIA: ETRS89

SISTEMA DE REPRESENTACIÓN CARTOGRÁFICA:U.T.M. - HUSO 30 N

ORIGEN DE ALTITUDES: NIVEL MEDIO DEL MAR EN ALICANTE

COORDENADAS U.T.M. ETRS89 EN MARCO DE HOJA

VUELO FOTOGRAMÉTRICO REALIZADO EN AGOSTO DE 2017

AEROTRIANGULACIÓN PROPIA DE ESTE LEVANTAMIENTO

APOYO DE CAMPO REALIZADO EN ENERO-MAYO DE 2018

RESTITUCIÓN Y EDICIÓN REALIZADO EN SEPT 2017-MARZO 2018

SIGNOS CONVENCIONALES PARTICULARES

- LÍNEA DE AGUA
- POLIGONAL DEL DESLINDE DEL D.P.M.T.
- LÍNEA DE RIBERA DEL MAR
- LÍMITE SERVIDUMBRE DE TRÁNSITO
- LÍMITE SERVIDUMBRE DE PROTECCIÓN
- POLIGONAL DEL DESLINDE DEL D.P.M.T. "PROVISIONAL"
- LÍMITE DE SERVIDUMBRE DE PROTECCIÓN "PROVISIONAL"

NOTA: SI COINCIDE LA POLIGONAL DEL DESLINDE DE DPMT CON LA LÍNEA DE R.M. SÓLO SE GRAFÍA LA PRIMERA

- LÍNEA DE OTROS DESLINDES
- LÍMITE DE PARCELAS COLINDANTES
- TERRENOS INNECESARIOS Y DE POSIBLE DESAFECTACIÓN
- LÍMITE DE TÉRMINO MUNICIPAL
- LÍMITE DE PROVINCIA

- HITOS DESLINDE
- S.U. SUELO URBANO
- S.N.U. SUELO NO URBANIZABLE
- S.U.P. SUELO URBANIZABLE PROGRAMADO
- S.U.N.P. SUELO URBANIZABLE NO PROGRAMADO

SIGNOS CONVENCIONALES GENERALES

- ÁRBOL / PALMERA
- ROCA HIDROGRAFICA / CASCADA / SIFÓN / SUMIDERO
- CAPTACIÓN / POZO
- FUENTE / SURGENCIA
- BUZÓN / CABINA TELEFÓNICA / BANCO
- CONTENEDOR / BOLARDO / IMBORNAL
- FAROLA / SEMÁFOR / POZO REGISTRO
- POSTE MADERA / POSTE METÁLICO / ANTENA
- PUNTO NAP / PUNTO NIVELACIÓN
- VÉRTICE REGENTE / REGIONAL / ROI
- VÉRTICE TOPOGRÁFICO / PUNTO DE APOYO

ESCALA 1 / 1.000

-10 m 0 10 20 30 40 50

EQUIDISTANCIA CURVAS DE NIVEL 1m

ASISTENCIA TÉCNICA:

Tragsatec
Grupo Tragsa



MINISTERIO
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA
Y EL RETO DEMOGRÁFICO

DIRECCIÓN GENERAL DE LA COSTA Y EL MAR

Demarcación de Costas en Andalucía-Mediterráneo
(Málaga)

SERVICIO DE GESTIÓN DEL DOMINIO PÚBLICO

ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN DE LA COSTA PARA LA ESTIMACIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA Y DEL DPMT EN ESCENARIOS FUTUROS

CAMPING ALMANAT - PLAYA DE TORRE DEL MAR

TÉRMINO MUNICIPAL: VÉLEZ-MÁLAGA

PLANO Nº	HOJA Nº	PLANO:	REFERENCIA ANTIGUA	REFERENCIA
3	1 de 3	DESLINDE VIGENTE		

GRÁFICO DE DISTRIBUCIÓN DE HOJAS 1:5.000

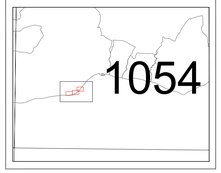
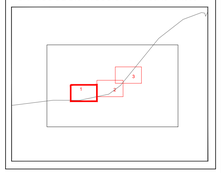


GRÁFICO DE DISTRIBUCIÓN DE HOJAS 1:1.000



EXAMINADO Y CONFORME

El Jefe de Servicio: Juan José Valero Guerra

Vº Bº el Jefe de la Demarcación: Ángel González Castiñeira

FECHA: la indicada en la firma electrónica

VÉRTICES POLIGONAL DEL DESLINDE

Vértice	X	Y

VÉRTICES POLIGONAL DE LA RIBERA DEL MAR

Vértice	X	Y

INFORMACIÓN CARTOGRÁFICA

SISTEMA GEODÉSICO DE REFERENCIA: ETRS89
SISTEMA DE REPRESENTACIÓN CARTOGRÁFICA U.T.M. - HUSO 30 N
ORIGEN DE ALTITUDES: NIVEL MEDIO DEL MAR EN ALICANTE
COORDENADAS U.T.M. ETRS89 EN MARCO DE HOJA

VUELO FOTOGRAMÉTRICO REALIZADO EN AGOSTO DE 2017
AEROTRIANGULACIÓN PROPIA DE ESTE LEVANTAMIENTO
APOYO DE CAMPO REALIZADO EN ENERO-MAYO DE 2018
RESTITUCIÓN Y EDICIÓN REALIZADO EN SEPT 2017-MARZO 2018

SIGNOS CONVENCIONALES PARTICULARES

- LÍNEA DE AGUA
- POLIGONAL DEL DESLINDE DEL D.P.M.T.
- LÍNEA DE RIBERA DEL MAR
- LÍMITE SERVIDUMBRE DE TRÁNSITO
- LÍMITE SERVIDUMBRE DE PROTECCIÓN
- POLIGONAL DEL DESLINDE DEL D.P.M.T. "PROVISIONAL"
- LÍMITE DE SERVIDUMBRE DE PROTECCIÓN "PROVISIONAL"
- LÍNEA DE OTROS DESLINDES
- LÍMITE DE PARCELAS COLINDANTES
- TERRENOS INNECESARIOS Y DE POSIBLE DESAFECTACIÓN
- LÍMITE DE TÉRMINO MUNICIPAL
- LÍMITE DE PROVINCIA
- HITOS DESLINDE
- S.U. SUELO URBANO
- S.N.U. SUELO NO URBANIZABLE
- S.U.P. SUELO URBANIZABLE PROGRAMADO
- S.U.N.P. SUELO URBANIZABLE NO PROGRAMADO

NOTA: SI COINCIDE LA POLIGONAL DEL DESLINDE DE DPMT CON LA LÍNEA DE R.M. SÓLO SE GRAFÍA LA PRIMERA

SIGNOS CONVENCIONALES GENERALES

- ÁRBOL / PALMERA
- BOCA HIDROGRAFICA / CASCADA / SIFÓN / SUMIDERO
- CAPTACIÓN / POZO
- FUENTE / SURGENCIA
- BUZÓN / CABINA TELEFÓNICA / BANCO
- CONTENEDOR / BOLARDO / IMBORNAL
- FAROLA / SEMÁFOR / POZO REGISTRO
- POSTE MADERA / POSTE METÁLICO / ANTENA
- PUNTO NAP / PUNTO NIVELACIÓN
- VÉRTICE REGENTE / REGIONAL / ROI
- VÉRTICE TOPOGRÁFICO / PUNTO DE APOYO

ESCALA 1 / 1.000

-10 m 0 10 20 30 40 50

EQUIDISTANCIA CURVAS DE NIVEL 1m

ASISTENCIA TÉCNICA:

Tragsatec
Grupo Tragsa



MINISTERIO
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA
Y EL RETO DEMOGRÁFICO

DIRECCIÓN GENERAL DE LA COSTA Y EL MAR

Demarcación de Costas en Andalucía-Mediterráneo (Málaga)

SERVICIO DE GESTIÓN DEL DOMINIO PÚBLICO

ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN DE LA COSTA PARA LA ESTIMACIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA Y DEL DPMT EN ESCENARIOS FUTUROS

CAMPING ALMANAT - PLAYA DE TORRE DEL MAR

TÉRMINO MUNICIPAL: VÉLEZ-MÁLAGA

PLANO Nº	HOJA Nº	PLANO:	REFERENCIA ANTIGUA	REFERENCIA
3	2 de 3	DESLINDE VIGENTE		

GRÁFICO DE DISTRIBUCIÓN DE HOJAS 1:5.000

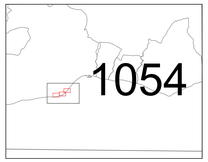
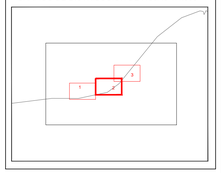


GRÁFICO DE DISTRIBUCIÓN DE HOJAS 1:1.000



EXAMINADO Y CONFORME

El Jefe de Servicio: Juan José Valero Guerra

Vº Bº el Jefe de la Demarcación: Ángel González Castiñeira

FECHA: la indicada en la firma electrónica

VÉRTICES POLIGONAL DEL DESLINDE

Vértice	X	Y

VÉRTICES POLIGONAL DE LA RIBERA DEL MAR

Vértice	X	Y

INFORMACIÓN CARTOGRÁFICA

SISTEMA GEODÉSICO DE REFERENCIA: ETRS89

SISTEMA DE REPRESENTACIÓN CARTOGRÁFICA:U.T.M. - HUSO 30 N

ORIGEN DE ALTITUDES: NIVEL MEDIO DEL MAR EN ALICANTE

COORDENADAS U.T.M. ETRS89 EN MARCO DE HOJA

VUELO FOTOGRAMÉTRICO REALIZADO EN AGOSTO DE 2017

AEROTRIANGULACIÓN PROPIA DE ESTE LEVANTAMIENTO

APOYO DE CAMPO REALIZADO EN ENERO-MAYO DE 2018

RESTITUCIÓN Y EDICIÓN REALIZADO EN SEPT 2017-MARZO 2018

SIGNOS CONVENCIONALES PARTICULARES

- LÍNEA DE AGUA
- POLIGONAL DEL DESLINDE DEL D.P.M.T.
- LÍNEA DE RIBERA DEL MAR
- LÍMITE SERVIDUMBRE DE TRÁNSITO
- LÍMITE SERVIDUMBRE DE PROTECCIÓN
- POLIGONAL DEL DESLINDE DEL D.P.M.T. "PROVISIONAL"
- LÍMITE DE SERVIDUMBRE DE PROTECCIÓN "PROVISIONAL"

NOTA: SI COINCIDE LA POLIGONAL DEL DESLINDE DE DPMT CON LA LÍNEA DE R.M. SÓLO SE GRAFÍA LA PRIMERA

- LÍNEA DE OTROS DESLINDES
- LÍMITE DE PARCELAS COLINDANTES
- TERRENOS INMERSOS/AISLADOS Y DE POSIBLE DESAFECTACIÓN
- LÍMITE DE TÉRMINO MUNICIPAL
- LÍMITE DE PROVINCIA

- HITOS DESLINDE
- S.U. SUELO URBANO
- S.N.U. SUELO NO URBANIZABLE
- S.U.P. SUELO URBANIZABLE PROGRAMADO
- S.U.N.P. SUELO URBANIZABLE NO PROGRAMADO

SIGNOS CONVENCIONALES GENERALES

- ÁRBOL / PALMERA
- BOCA HIDROGRAFICA / CASCADA / SIFÓN / SUMIDERO
- CAPTACIÓN / POZO
- FUENTE / SURGENCIA
- BUZÓN / CABINA TELEFÓNICA / BANCO
- CONTENEDOR / BOLARDO / IMBORNAL
- FAROLA / SEMÁFORO / POZO REGISTRO
- POSTE MADERA / POSTE METÁLICO / ANTENA
- PUNTO NAP / PUNTO NIVELACIÓN
- VÉRTICE REGENTE / REGIONAL / ROI
- VÉRTICE TOPOGRÁFICO / PUNTO DE APOYO

ESCALA 1 / 1.000

-10 m 0 10 20 30 40 50

EQUIDISTANCIA CURVAS DE NIVEL 1m

ASISTENCIA TÉCNICA:

Tragsatec



MINISTERIO
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA
Y EL RETO DEMOGRÁFICO

DIRECCIÓN GENERAL DE LA COSTA Y EL MAR

Demarcación de Costas en Andalucía-Mediterráneo
(Málaga)

SERVICIO DE GESTIÓN DEL DOMINIO PÚBLICO

ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN DE LA COSTA PARA LA ESTIMACIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA Y DEL DPMT EN ESCENARIOS FUTUROS

CAMPING ALMANAT - PLAYA DE TORRE DEL MAR

TÉRMINO MUNICIPAL: VÉLEZ-MÁLAGA

PLANO Nº	HOJA Nº	PLANO:	REFERENCIA ANTIGUA	REFERENCIA
3	3 de 3	DESLINDE VIGENTE		

GRÁFICO DE DISTRIBUCIÓN DE HOJAS 1:5.000

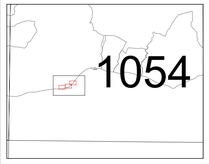
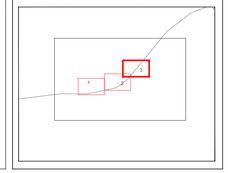


GRÁFICO DE DISTRIBUCIÓN DE HOJAS 1:1.000



EXAMINADO Y CONFORME

El Jefe de Servicio: Juan José Valero Guerra

Vº Bº el Jefe de la Demarcación: Ángel González Castiñeira

FECHA: la indicada en la firma electrónica

VÉRTICES POLIGONAL DEL DESLINDE

Vértice	X	Y

VÉRTICES POLIGONAL DE LA RIBERA DEL MAR

Vértice	X	Y

INFORMACIÓN CARTOGRÁFICA

SISTEMA GEODÉSICO DE REFERENCIA: ETRS89

SISTEMA DE REPRESENTACIÓN CARTOGRÁFICA:U.T.M. - HUSO 30 N

ORIGEN DE ALTITUDES: NIVEL MEDIO DEL MAR EN ALICANTE

COORDENADAS U.T.M. ETRS89 EN MARCO DE HOJA

VUELO FOTOGRAMÉTRICO REALIZADO EN AGOSTO DE 2017

AEROTRIANGULACIÓN PROPIA DE ESTE LEVANTAMIENTO

APOYO DE CAMPO REALIZADO EN ENERO-MAYO DE 2018

RESTITUCIÓN Y EDICIÓN REALIZADO EN SEPT 2017-MARZO 2018

SIGNOS CONVENCIONALES PARTICULARES

- LÍNEA DE AGUA
- POLIGONAL DEL DESLINDE DEL D.P.M.T.
- LÍNEA DE RIBERA DEL MAR
- LÍMITE SERVIDUMBRE DE TRÁNSITO
- LÍMITE SERVIDUMBRE DE PROTECCIÓN
- POLIGONAL DEL DESLINDE DEL D.P.M.T. "PROVISIONAL"
- LÍMITE DE SERVIDUMBRE DE PROTECCIÓN "PROVISIONAL"
- LÍNEA DE OTROS DESLINDES
- LÍMITE DE PARCELAS COLINDANTES
- TERRENOS INNECESARIOS Y DE POSIBLE DESAFECTACIÓN
- LÍMITE DE TÉRMINO MUNICIPAL
- LÍMITE DE PROVINCIA
- HITOS DESLINDE
- S.U. SUELO URBANO
- S.N.U. SUELO NO URBANIZABLE
- S.U.P. SUELO URBANIZABLE PROGRAMADO
- S.U.N.P. SUELO URBANIZABLE NO PROGRAMADO

NOTA: SI COINCIDE LA POLIGONAL DEL DESLINDE DE DPMT CON LA LÍNEA DE R.M. SÓLO SE GRAFÍA LA PRIMERA

SIGNOS CONVENCIONALES GENERALES

- ÁRBOL / PALMERA
- BOCA HIDROGRAFICA / CASCADA / SIFÓN / SUMIDERO
- CAPTACIÓN / POZO
- FUENTE / SURGENCIA
- BUZÓN / CABINA TELEFÓNICA / BANCO
- CONTENEDOR / BOLARDO / IMBORNAL
- FAROLA / SEMÁFOR / POZO REGISTRO
- POSTE MADERA / POSTE METÁLICO / ANTENA
- PUNTO NAP / PUNTO NIVELACIÓN
- VÉRTICE REGENTE / REGIONAL / ROI
- VÉRTICE TOPOGRÁFICO / PUNTO DE APOYO

ESCALA 1 / 1.000

-10 m 0 10 20 30 40 50

EQUIDISTANCIA CURVAS DE NIVEL 1m

ASISTENCIA TÉCNICA:

Tragsatec
Grupo Tragsa