

**INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)**

C/ Cañadilla 6, local 68, C. Comercial Coronado, Las Rozas de Madrid 28231, Madrid

Pza. de la Montañeta 4, entresuelo, 03001 Alicante

Tfno.: 918961731; Fax: 918903410; e-mail: idyma@idyma.es

**ESTUDIO DE INUNDACIÓN EN UN TRAMO DE COSTA DE COSTA DE PLAYA DE  
373 METROS APROXIMADAMENTE A LEVANTE DEL PUERTO DEPORTIVO, EN EL T.M.  
DE SALOU, TARRAGONA**



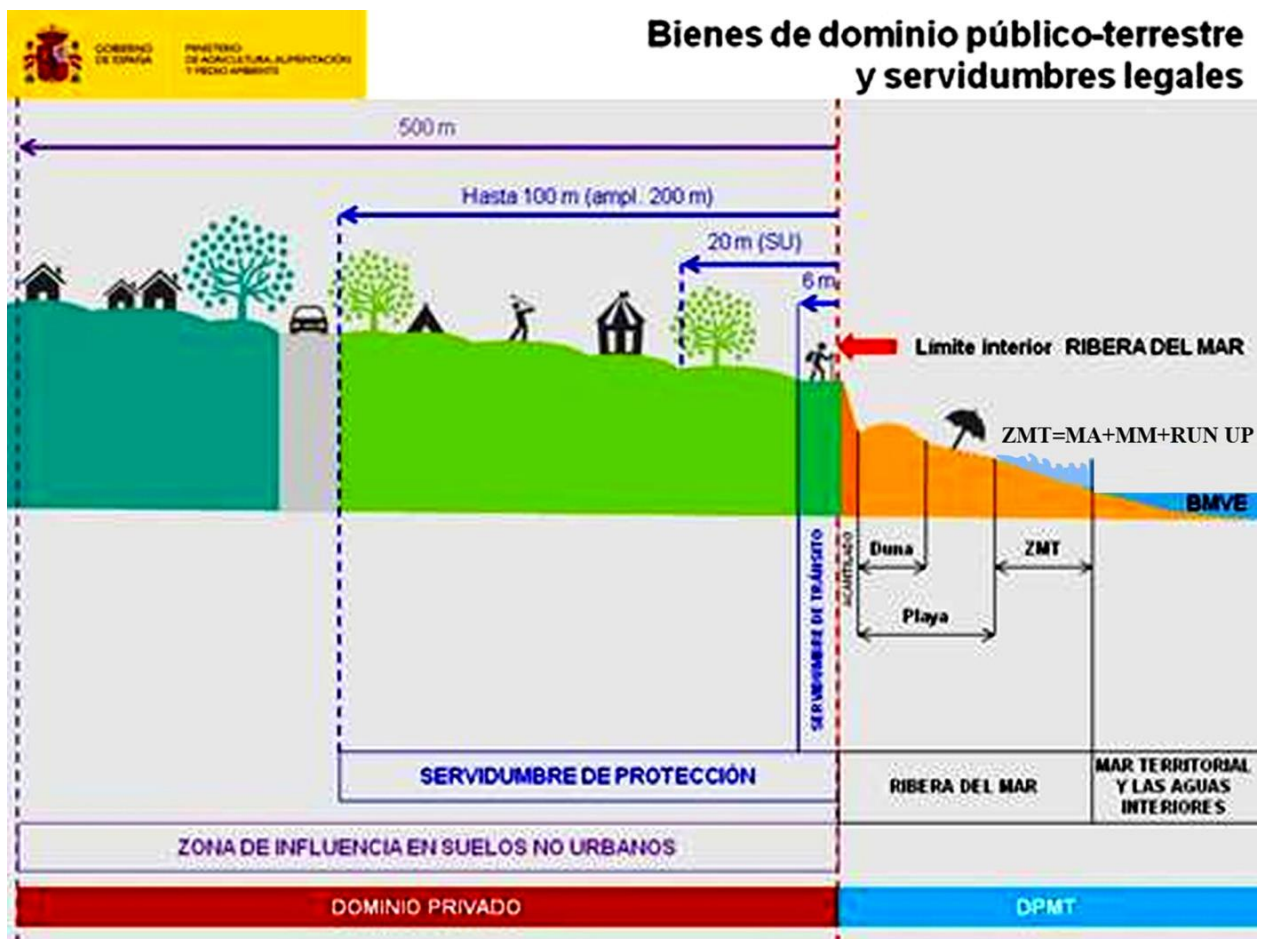
## **INDICE**

1. INTRODUCCIÓN: ZONA DE ESTUDIO Y ASPECTOS GENERALES DE LA METODOLOGÍA APLICADA.....	Pag 1
2. ANÁLISIS DE LOS DATOS DE LOS INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN PARA EL DISEÑO DEL TEMPORAL.....	Pag 9
2.1. ANÁLISIS DE DATOS DEL OLEAJE Y CLIMA MARÍTIMO.....	Pag 10
2.2. ANÁLISIS DE DATOS DE LOS MAREÓGRAFOS.....	Pag 26
3. PROPAGACIÓN DEL OLEAJE.....	Pag 32
3.1. PRIMERA FASE: DESDE LA BOYA O PUNTO GEOGRÁFICO FUENTE DE DATOS DE MODELOS NUMÉRICOS, HASTA PROFUNDIDADES INDEFINIDAS, SEGÚN LOS SECTORES PRINCIPALES DE INCIDENCIA.....	Pag 32
3.2. SEGUNDA FASE: DESDE PROFUNDIDADES INDEFINIDAS HASTA PIE DE COSTA.....	Pag 33
4. CÁLCULOS DE RUN-UP Y COTAS DE MÁXIMA INUNDACIÓN.....	Pag 101
5. PLANOS DE LOS RESULTADOS.....	Pag 111
ANEJO I: GRÁFICOS CORRESPONDIENTES A LOS 998 PERFILES OBTENIDOS SOBRE EL MDT TOPOBATIMÉTRICO.....	Pag 117
ANEJO II: CÁLCULOS DE INUNDACIÓN EJECUTADOS EN 998 PERFILES DE LA ZONA DE ESTUDIO SOBRE MDT TOPOBATIMÉTRICO, EN LOS 10 ESTADOS DE MAR SELECCIONADOS.....	Pag 158



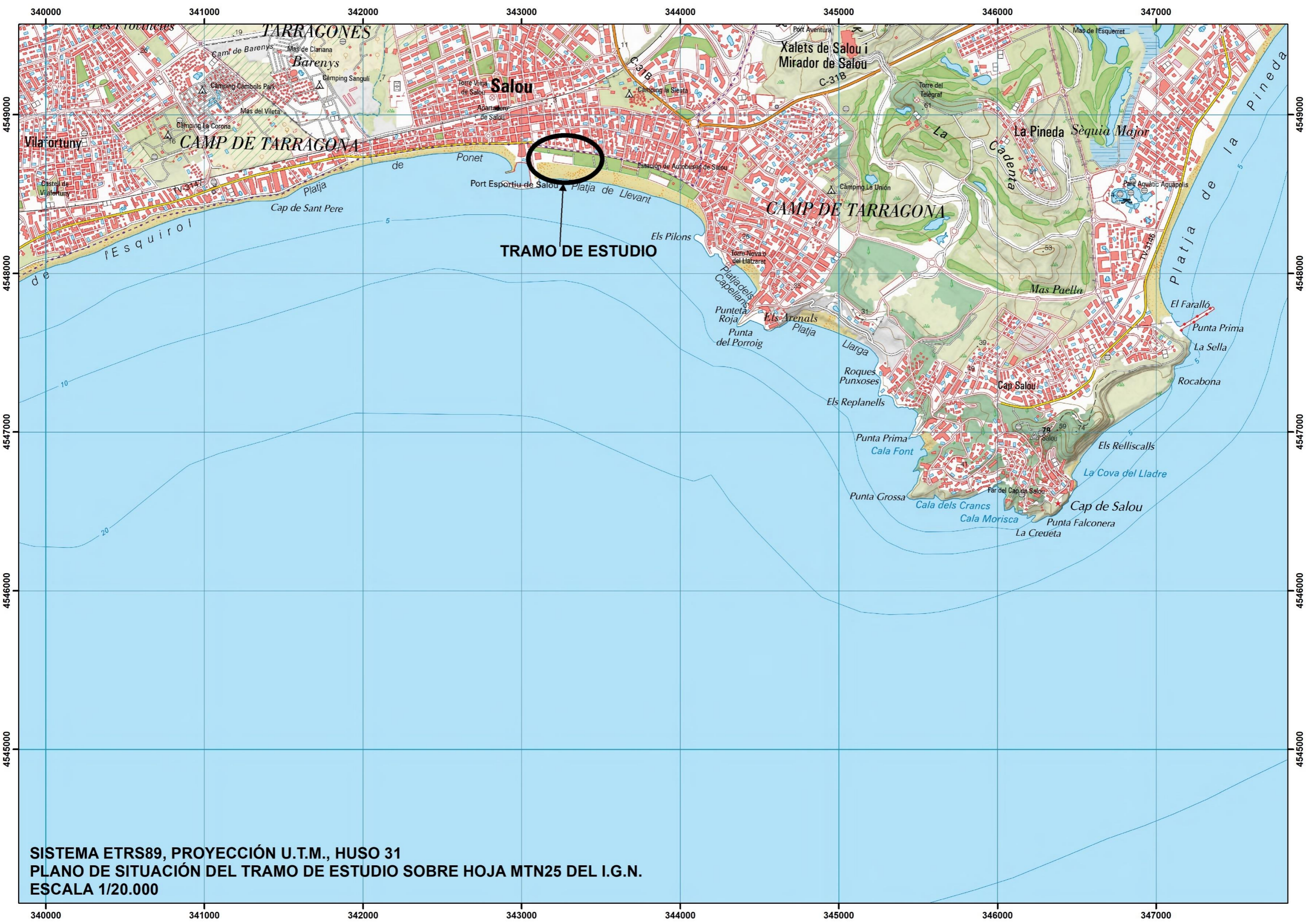
## 1. INTRODUCCIÓN: ZONA DE ESTUDIO Y ASPECTOS GENERALES DE LA METODOLOGÍA APLICADA

En el presente estudio se obtendrá el límite interior de la zona marítimo terrestre (en adelante Z.M.T.) con los nuevos criterios establecidos en los artículos 4.1.a y 4.1.b del Reglamento General de Costas modificado por el Real Decreto 668/2022, de 1 de agosto, en un tramo de costa de 373 metros aproximadamente correspondiente a la playa a levante del Puerto Deportivo de Salou, en el Término Municipal de Salou, (Tarragona).



En los siguientes planos a escala 1/20.000 y 1/10.000 se refleja la ubicación del tramo de costa de estudio sobre el Mapa MTN 25 del I.G.N. y sobre la ortofoto PNOA MA (año 2021) respectivamente.





SISTEMA ETRS89, PROYECCIÓN U.T.M., HUSO 31  
PLANO DE SITUACIÓN DEL TRAMO DE ESTUDIO SOBRE HOJA MTN25 DEL I.G.N.  
ESCALA 1/20.000





TRAMO DE ESTUDIO

SISTEMA ETRS89, PROYECCIÓN U.T.M., HUSO 31  
PLANO DE SITUACIÓN DEL TRAMO DE ESTUDIO SOBRE ORTOFOTO PNOA MA  
ESCALA 1/10.000



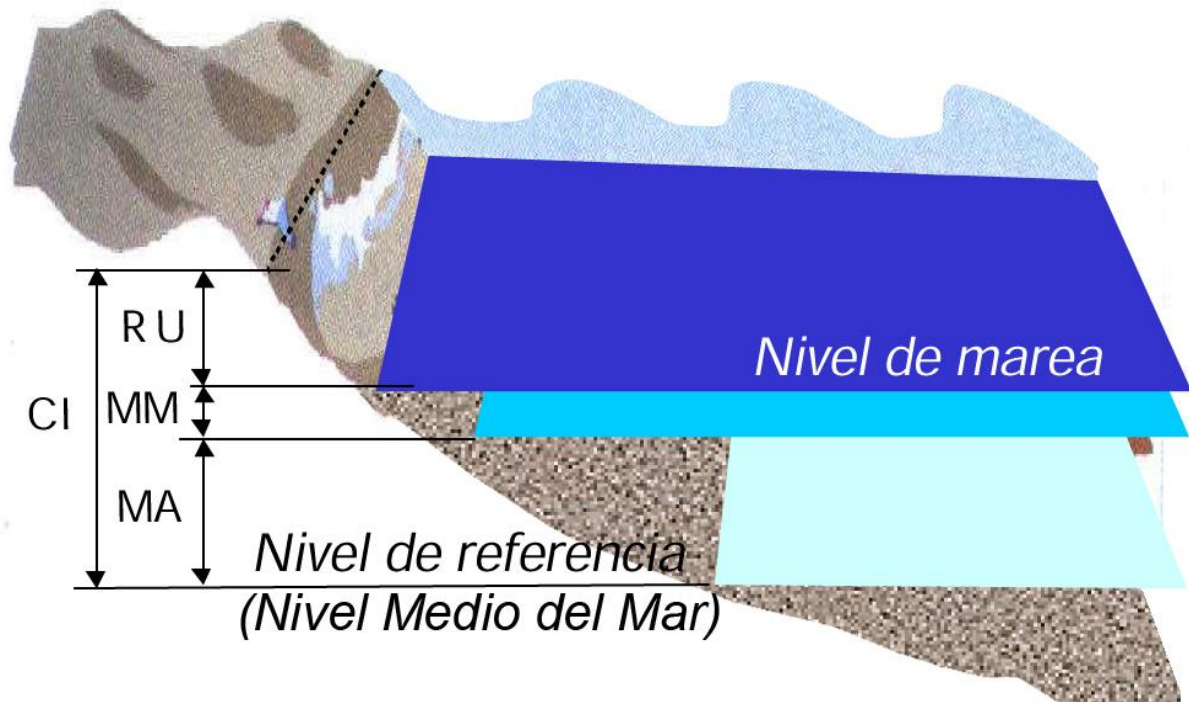


La determinación del nivel de alcance de oleajes en las distintas tipologías comunes de los frentes de costa, zonas de bajo relieve o playas, por acción de la dinámica marina y meteorológica, resulta un procedimiento complejo, tanto por el gran número de elementos que intervienen en el proceso de inundación, como por la interacción entre dichos elementos.

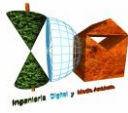
Sobre la base de los textos legales, Ley de Costas de 22/1988, de 28 de julio, modificada por la Ley 2/2013, de 29 de mayo, de protección y uso sostenible del litoral y de modificación de la Ley 22/1988, de 28 de julio, de Costas y del Reglamento General de Costas modificado por el Real Decreto 668/2022, de 1 de agosto, y teniendo en cuenta aspectos metodológicos elaborados por el anterior Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente en colaboración con el G.I.O.C. (Universidad de Cantabria) para la estimación del oleaje a pie del frente costero, se ha confeccionado un procedimiento con el que se han realizado los estudios para la determinación de la cota de máxima inundación en el tramo de costa de 373 metros aproximadamente de la playa a Levante del Puerto de Salou, en el Término Municipal de Salou, (Tarragona).

- Con carácter general, para el cálculo de cota de máxima inundación sobre el relieve costero ordinario, se considera que el frente de costa está caracterizado en un instante determinado por un nivel de marea (NM) compuesto por la marea astronómica y la marea meteorológica (MA+MM) y una batimetría. Sobre dicho nivel de marea se encuentra el oleaje que, en función de sus características y de la batimetría del frente del litoral, se propaga hacia la costa. Al alcanzar la costa, el oleaje rompe sobre la superficie morfológica del frente, produciéndose un movimiento de ascenso de la masa de agua a lo largo del perfil del elemento morfológico que encuentre en su avance tierra adentro por el perfil emergido que se denomina run-up (RU). Todos estos factores están relacionados entre sí, además de la interacción entre los elementos (oleaje-batimetría-nivel de marea-ascenso). El episodio de alcance de los oleajes y la determinación de dicho nivel en la superficie de las distintas variedades morfológicas de los frentes de costa, podría esquematizarse según el siguiente gráfico:

**MA:** Marea astronómica  
**MM:** Marea meteorológica  
**RU:** *Run-up*  
**CI:** Cota de inundación



- La cota de máximo alcance o cota de inundación CI, se evaluará a partir de los datos procedentes de medidas reales proporcionados por los instrumentos de medición de Puertos del Estado, de los mareógrafos pertenecientes a la Red REDMAR, de las boyas de la Red REDEXT de la costa de levantina según la disposición de los instrumentos de medición de Puertos del Estado.
- Los datos de los mareógrafos proporcionarán los niveles de marea astronómica y marea meteorológica (residuo), y los datos de las boyas proporcionarán los parámetros del suceso de oleaje a partir de los cuales se realizarán los cálculos para la estimación de la sobre elevación por oleaje debida al run-up.



- En cumplimiento de la legislación vigente, y en concreto de lo establecido en el Reglamento General de Costas modificado por el Real Decreto 668/2022, de 1 de agosto, la determinación del límite interior de la zona marítimo terrestre, deberá realizarse conforme a los siguientes criterios técnicos especificados en la nueva redacción del artículo 4:

*“«Artículo 4. Criterios técnicos para la determinación de la zona marítimo-terrestre y de la playa.*

*En la determinación de la zona marítimo-terrestre y de la playa, con arreglo a las definiciones contenidas en el artículo anterior, se tendrán en cuenta los siguientes criterios:*

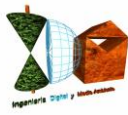
*a) Para fijar el límite hasta donde alcanzan las olas en los mayores temporales conocidos, se considerarán las variaciones del nivel del mar debidas a las mareas y el oleaje desde que existan registros de boyas o satélites, o datos oceanográficos o meteorológicos. Para calcular el alcance de un temporal se utilizarán las máximas olas registradas o calculadas con esos datos.*

*b) Las variaciones del nivel del mar debidas a las mareas incluirán los efectos de las astronómicas y de las meteorológicas. No se tendrán en cuenta las ondas de mayor periodo de origen sísmico o de resonancia cuya presentación no se produzca de forma secuencial.”*

- A efectos de cumplir con los anteriores criterios técnicos establecidos reglamentariamente, se deberán obtener los alcances de oleajes e inundaciones máximos en función de los registros de la máxima serie histórica disponible, a cuyo efecto se realizará un análisis de las series históricas de datos reales de oleajes de las boyas de la Red REDEXT y de los Puntos Simar más próximos a la zona de estudio, a partir de los cuales se obtendrán los datos para determinar el temporal que cumpla con este precepto legal de máximos. Para la determinación del máximo alcance (cota máxima), se realizarán los cálculos y estimaciones del run-up con los parámetros de los mayores temporales, a los que se sumarán los niveles mareales reales registrados por los mareógrafos de la Red REDMAR, determinándose el nivel máximo del período de estudio de datos disponibles.

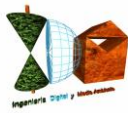


- A modo genérico, la propagación del oleaje calculado en los Puntos Simar se realizará en una única fase, a partir de los datos de las bases de datos de Puertos del Estado correspondientes a dichos Puntos: Una vez obtenido el régimen direccional en aguas profundas, se realizarán las propagaciones considerándose las direcciones principales de procedencia del oleaje respecto a la batimetría de las zonas de estudio para obtener así la caracterización del oleaje a pie de costa (en el comienzo de la zona de rompientes), a partir de la selección de los datos proporcionados por Puertos del Estado (instrumentos de medición y Puntos Simar) de los estados de mar que por sus parámetros de oleaje, tendrán mayor incidencia en la zona de estudio. Dicha propagación se realizará con simuladores informáticos basados en modelos numéricos, con el módulo Oluca-SP del programa MOPLA, del paquete informático SMC 2.5 del I.H. de la Universidad de Cantabria, con los siguientes fundamentos y condiciones de ejecución.
  - ◇ el oleaje asociado a un estado de mar se define a partir de un espectro bidimensional, el cual se localiza en el contorno exterior del dominio (mar adentro), componiéndose dicho espectro de un espectro frecuencial y una función de dispersión de dirección.
  - ◇ Las ecuaciones utilizadas en este modelo numérico informático para modelar la propagación del oleaje, consideran los siguientes fenómenos:
    - Asomeramiento
    - Refracción por fondo
    - Difracción
    - Presencia de corrientes
    - Disipación de energía (capa límite laminar, capa límite turbulenta en fondo, fondo poroso y disipación por rotura)
    - Rotura
    - Dispersión por amplitud.



- ◇ Para la ejecución de este software de simulación computacional del oleaje en su propagación basado en modelos numéricos, se debe disponer de una batimetría de la zona de estudio en formato digital, con la máxima resolución fundamentalmente en profundidades reducidas y zona de rompientes.
- En el caso concreto del presente estudio del tramo de costa de playa de aproximadamente 373 m. situado a levante del Puerto Deportivo de Salou, se tomarán los datos del Punto Simar 2098132, el de posición relativa más adecuada respecto al tramo de estudio, para valorar los estados de mar de los sectores S y E.
- Todos los trabajos han sido desarrollados sobre una base topobatimétrica-batimétrica de detalle, generada con un MDT de alta resolución obtenido a partir de los datos del vuelo del I.G.N. de fecha 2016-2017 con una densidad de 0,5 puntos por m<sup>2</sup>, a partir de los datos batimétricos del proveedor Navionics, Sonarchart (0,5 m. en profundidades reducidas e intermedias, 1-2 m. en intermedias e indefinidas) y con datos batimétricos de EMODNET para intermedias y profundas.
- A partir de dicho modelo topo-batimétrico el software de modelado ha realizado sus ejecuciones informáticas de propagación de oleaje, y asimismo a partir se han obtenido los distintos parámetros de la morfología del frente de playa y zona de rompientes, necesarios para los cálculos posteriores a las propagaciones basados en formulaciones semiempíricas de run-up.





## **2. ANÁLISIS DE DATOS DE LOS DATOS DE LOS INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN PARA EL DISEÑO DEL TEMPORAL**

Con el objetivo de cumplir con los nuevos preceptos legales establecidos en el nuevo Reglamento General de Costas modificado por el Real Decreto 668/2022, de 1 de agosto, en relación a la definición del alcance de los mayores temporales conocidos en la zona de estudio, del T.M. de Salou, establecidos en su artículo 4 en cuanto a los criterios técnicos para la determinación de la zona marítimo-terrestre

*“Tres. El artículo 4 queda redactado como sigue:*

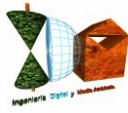
*«Artículo 4. Criterios técnicos para la determinación de la zona marítimo-terrestre y de la playa.*

*En la determinación de la zona marítimo-terrestre y de la playa, con arreglo a las definiciones contenidas en el artículo anterior, se tendrán en cuenta los siguientes criterios:*

*a) Para fijar el límite hasta donde alcanzan las olas en los mayores temporales conocidos, se considerarán las variaciones del nivel del mar debidas a las mareas y el oleaje desde que existan registros de boyas o satélites, o datos oceanográficos o meteorológicos. Para calcular el alcance de un temporal se utilizarán las máximas olas registradas o calculadas con esos datos.*

*b) Las variaciones del nivel del mar debidas a las mareas incluirán los efectos de las astronómicas y de las meteorológicas. No se tendrán en cuenta las ondas de mayor periodo de origen sísmico o de resonancia cuya presentación no se produzca de forma secuencial.”  
o meteorológicos”*

se han recopilado los datos históricos de las fuentes de Puertos del Estado tanto de oleaje como de mareas, a partir de los Puntos Simar con posicionamiento óptimo en función de las direcciones de procedencia con mayor incidencia en la zona de estudio, habiéndose obtenido niveles de marea astronómica y marea meteorológica (residuo) del mareógrafo de Barcelona 3758 de la Red REDMAR, así como los parámetros de la serie histórica de estados de mar del Punto Simar 2098132, todos ellos fuentes de Puertos del Estado para la obtención de los temporales que serán objeto de propagación y cálculo del nivel de inundación que cumple con la condición reglamentaria de máximo alcance en el máximo período conocido disponible de registros de datos de oleajes y mareas.

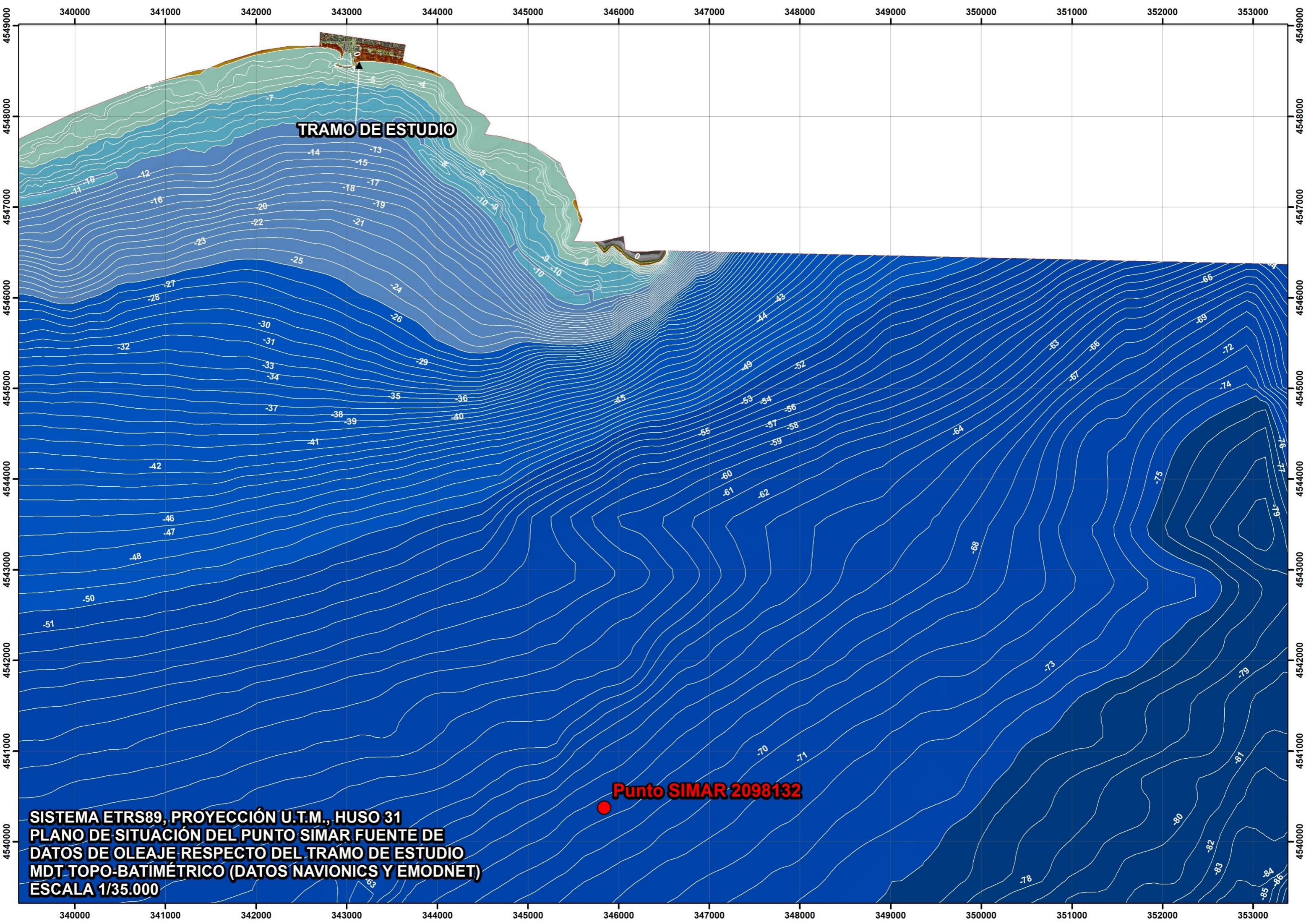


## **2.1. ANÁLISIS DE DATOS DEL OLEAJE Y CLIMA MARÍTIMO**

Se han tomado los datos del Punto Simar 2098132, dado que es la fuente de datos que cumple de una parte con la posición más idónea para valorar los estados de mar del sector S que son los que por la orientación de la playa de levante de Salou dado que se sitúa respecto al mismo en un vector direccional adecuado para valorar los oleajes de dicha dirección de procedencia y además cuenta con una longitud ligeramente escorada hacia el E respecto de dicha playa, por lo que resultará también adecuada su posición para la valoración de los estados de mar del E que por la refracción acabarán teniendo incidencia en el tramo de estudio al ir variando los frentes de oleaje en su avance en la propagación por su interacción con la batimetría (con la consiguiente pérdida de energía).

En el siguiente plano a escala 1/30.000, sobre el MDT topo-batimétrico generado, se ha posicionado el Punto Simar en relación al tramo de estudio.





**TRAMO DE ESTUDIO**

**Punto SIMAR 2098132**

**SISTEMA ETRS89, PROYECCIÓN U.T.M., HUSO 31  
PLANO DE SITUACIÓN DEL PUNTO SIMAR FUENTE DE  
DATOS DE OLAJE RESPECTO DEL TRAMO DE ESTUDIO  
MDT TOPO-BATIMÉTRICO (DATOS NAVIONICS Y EMODNET)  
ESCALA 1/35.000**





Los datos del Punto Simar 2098132 fuente de los datos del clima marítimo del período analizado (1993-2023) son los siguientes:

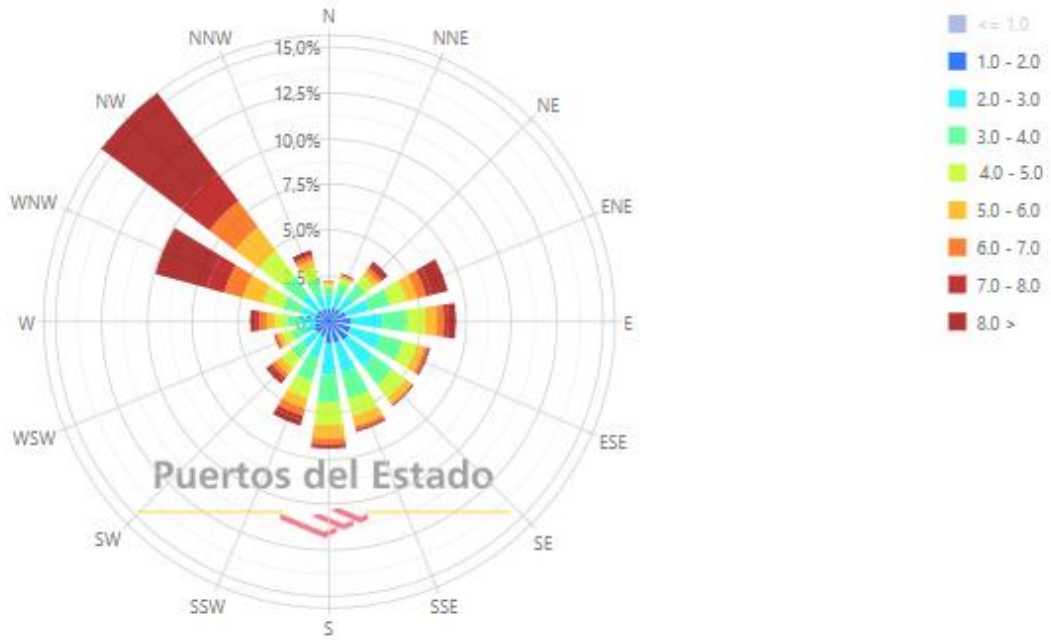
<b>PUNTO SIMAR 2098132</b>	
<b>Longitud</b>	1.17° E
<b>Latitud</b>	41.00° N
<b>Coordenadas U.T.M., ETRS89, H30</b>	X= 345838.18, Y= 4540375.18
<b>Código</b>	2098132
<b>Cadencia</b>	60 min
<b>Malla</b>	AIB
<b>Conjunto de datos</b>	Punto Simar
<b>Distancia a zona de estudio</b>	8,65 km.

En función de la orientación de la Playa de levante del Puerto de Salou y de la batimetría desde el punto de propagación, se debe realizar un análisis del clima marítimo y de las direcciones de procedencia del oleaje que incidirán en el punto de estudio, y en función de las mismas proceder al análisis de los datos de parámetros de temporales considerando el sector direccional con mayor repercusión. Por ello en primera instancia se realiza el análisis de las direcciones de procedencia de este Punto Simar mediante las Rosas de viento y Oleaje en el período máximo de disponibilidad de datos sincronizables con los datos del mareógrafo de Puertos del Estado (Barcelona), que comprende desde 1993 a la actualidad (fecha de disponibilidad de datos de niveles mareales del mareógrafo del Puerto de Barcelona).



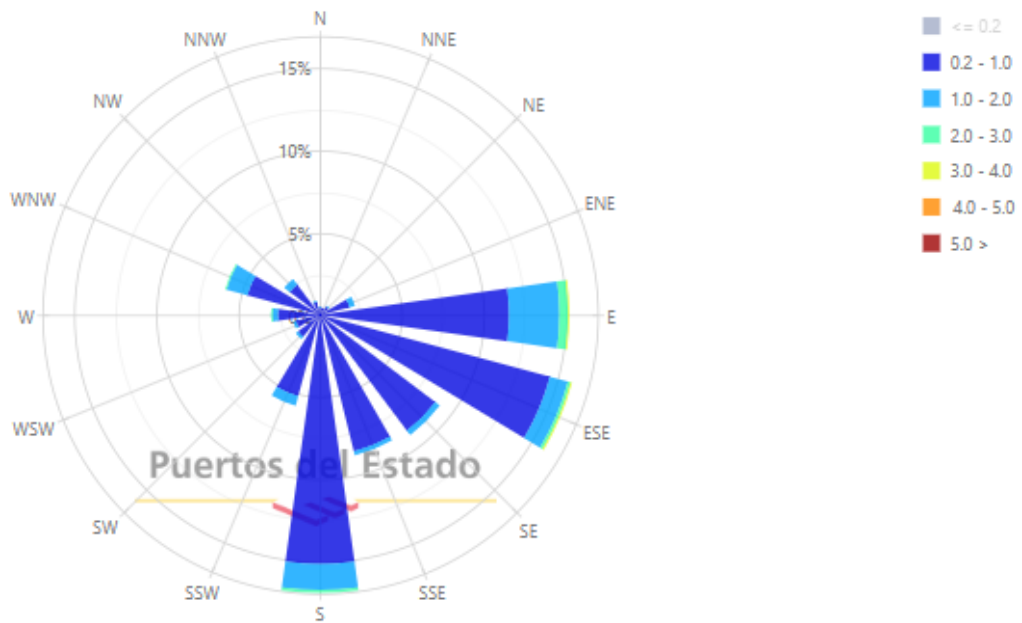
### Rosa de Velocidad Media (m/s) para Viento - Punto SIMAR 2098132

Periodo: 1993 - 2023 - Eficacia: 97.07%



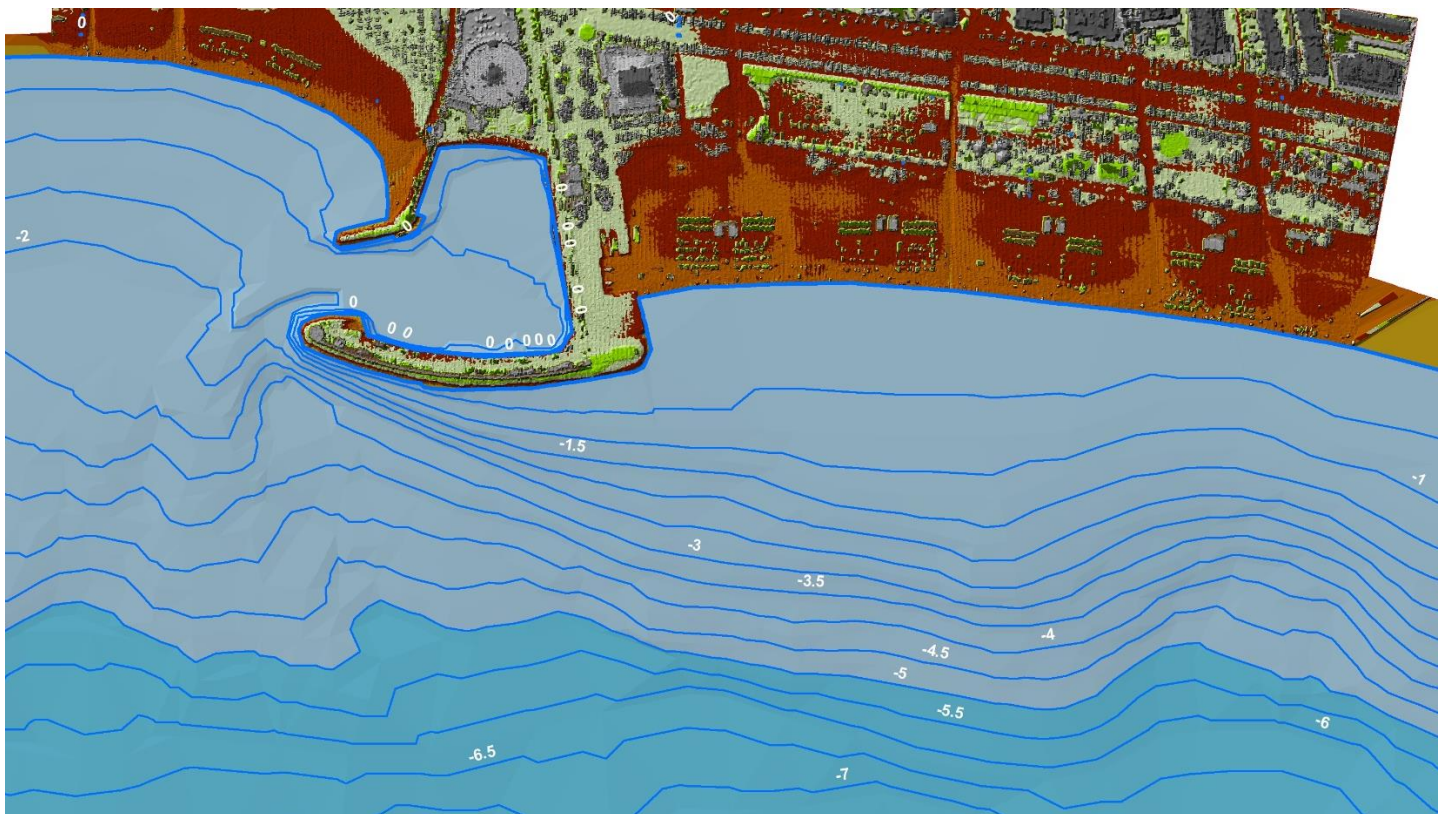
### Rosa de Altura Significante (m) para Oleaje - Punto SIMAR 2098132

Periodo: 1993 - 2023 - Eficacia: 97.02%



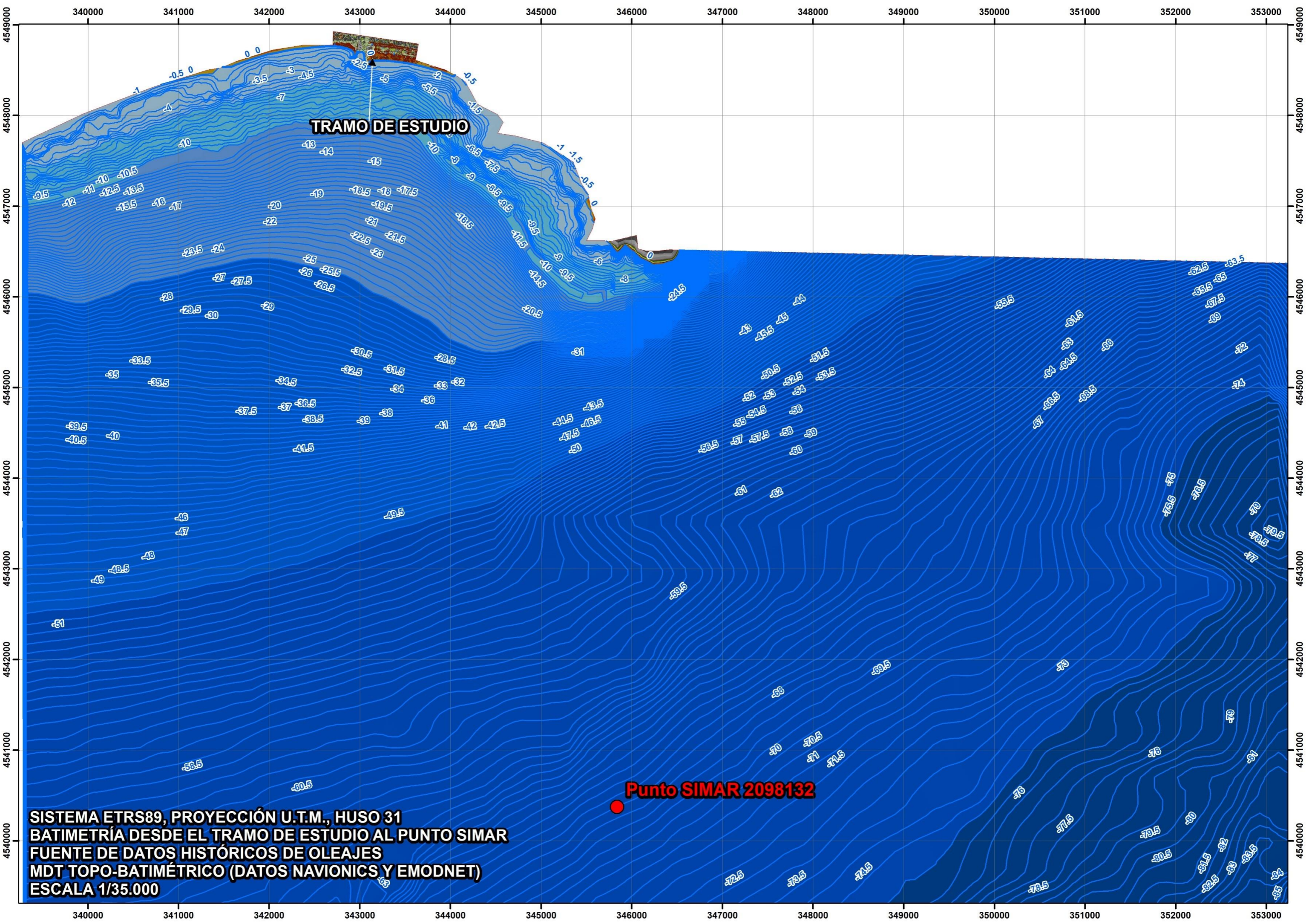
Tras un primer análisis de datos de estados de mar del Punto Simar 2098132, se comprueba que la dirección dominante del viento es la de NW, la cual no producirá oleaje significativo sobre el tramo de estudio dado que procede de tierra adentro y en consecuencia el fecht hasta la zona de estudio es muy reducido, lo cual queda reflejado en la rosa de oleaje, con magnitudes reducidas de ese sector direccional (NW-WNW). El segundo sector más significativo en el régimen de vientos se reparte desde ENE hasta SSW, que comprende direcciones que sí tendrán incidencia sobre el tramo de estudio, fundamentalmente las del entorno S, por la disposición de las batimétricas y orientación de la playa de Levante de Salou.

En las siguiente exportación se visualiza la orientación principal del tramo de estudio a la dirección de procedencia S, y la disposición y geometría de las batimétricas acordes a la de la playa con una normal eminentemente orientada al S (imagen orientada a N).



Asimismo en el siguiente plano se refleja la batimetría desde la zona de estudio hasta la posición del Punto Simar fuente de datos del estudio.





**TRAMO DE ESTUDIO**

**Punto SIMAR 2098132**

**SISTEMA ETRS89, PROYECCIÓN U.T.M., HUSO 31**  
**BATIMETRÍA DESDE EL TRAMO DE ESTUDIO AL PUNTO SIMAR**  
**FUENTE DE DATOS HISTÓRICOS DE OLEAJES**  
**MDT TOPO-BATIMÉTRICO (DATOS NAVIONICS Y EMODNET)**  
**ESCALA 1/35.000**





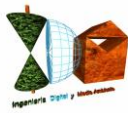
A la vista de la batimetría y su evolución desde profundidades reducidas hacia aguas profundas, con una transición desde la orientación principal a S en rompientes y hasta la profundidad de influencia (profundidad de cierre) hacia una orientación en el entorno de SE-ESE, y teniendo en cuenta el fenómeno de la refracción desde aguas profundas hasta pie de costa por el que los frentes de oleaje se irán alineando con las batimétricas con la consiguiente pérdida de energía, cabe considerar que además de las direcciones de procedencia del entorno de S, las direcciones de procedencia del entorno E-ESE desde aguas profundas y por el fenómeno de la refracción acabarán en su avance virando los frentes del oleaje hacia la disposición E-W (normal a S) y en consecuencia teniendo incidencia en el tramo de estudio.

Por tanto el régimen direccional principal en cuanto al alcance más diáfano sobre el tramo de estudio (con menor pérdida de energía) será el del entorno S, si bien también se considerarán en el estudio de clima marítimo los oleajes del entorno del sector E-ESE, para finalmente realizar la propagación con un simulador computacional (OLUCA-MOPLA) de los oleajes que justificadamente tengan el mayor potencial de inundación sobre el tramo de estudio, a efectos de tener con la mayor fidelidad posible los parámetros de los oleajes a pie de costa.

En el sentido anterior, incide la rosa de oleaje del Punto Simar 2098132 en la que el entorno del sector direccional E-ESE y del sector S concentran las mayores magnitudes y frecuencias de oleajes en función del parámetro altura de ola significativa, direcciones que tendrán incidencia en el tramo de estudio en función de la batimetría obtenida y analizada.

Para el estudio del clima marítimo y la determinación de los estados de mar causantes de los mayores alcances de oleajes, se ha procedido a analizar las series de datos del máximo período histórico disponible con datos horarios de estados de mar y niveles mareales, que se corresponde con el período comprendido entre 1993 y la actualidad, a partir de los datos del Punto Simar 2098132 y del mareógrafo 3758 de Barcelona (comienzo de medidas en 1993) con un total de 265.970 estados de mar analizados, del máximo período disponible con datos horarios sincronizables de oleajes y mareas, desde el año 1993 hasta la actualidad, de entre los cuales se han seleccionado aquéllos que por sus parámetros de oleaje podrían ser responsables de máximos alcances de niveles de mar en la zona específica de estudio, mediante iteraciones previas con los modelos semiempíricos de run-up de Nielsen-Hanslow y Stockdon, habiéndose valorado el potencial de inundación con dichos modelos que se han aplicado a cada estado de mar antes de la propagación, para la selección justificada de los estados de mar sincronizados con los niveles mareales horarios correspondientes que serán





los responsables de los mayores niveles de alcances de inundación y oleajes, y proceder a la propagación de dichos estados de mar para conocer los máximos niveles definitivos con datos del oleaje ya propagado con simulador a pie de costa.

Para constatar los alcances al tramo de estudio desde la dirección de procedencia E-ESE de forma significativa, se realizaron comprobaciones previas con el simulador de propagación de oleaje Oluca-SP espectral sobre las direcciones que inicialmente en profundidades indefinidas tienen una dirección de procedencia que no es la que a priori tiene una incidencia más franca sobre el tramo de estudio (dirección de procedencia S), habiéndose constatado con el mismo los efectos del fenómeno de refracción y los cambios de las orientaciones de los frentes de oleaje desde profundidades indefinidas de estados de mar de procedencia inicial E para irse alineando con isobatas de la batimetría de las orientaciones batimétricas principales del tramo de estudio en la zona de influencia y rompientes (disposición E-O, normal principal a dirección S), modificando el ángulo de procedencia original y en consecuencia posibilitando su afectación sobre el tramo de estudio.

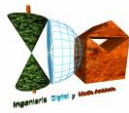
Una vez comprobado con simulador la incidencia de las direcciones de procedencia del sector E-ESE sobre el tramo de estudio, se realizó sobre los registros de datos horarios desde 1993 hasta la actualidad de oleajes (Punto Simar 2098132) y niveles mareales (mareógrafo 3758 Barcelona 2) con un total de 265.970 estados de mar sincronizados con sus correspondientes niveles mareales, una primera fase de tratamiento de las bases de datos con filtros de selección compuestos (teniendo en cuenta los parámetros direccionales y las combinaciones de las mayores magnitudes de estados de mar del resto de parámetros  $H_s$  y  $T_p$ ), y una segunda fase en combinación con iteraciones previas de inundación para estimar las combinaciones paramétricas del oleaje ( $H_s$ - $T_p$ - $\alpha$ ) que tendrán mayores efectos de inundación en el tramo de estudio, realizadas con las formulaciones semiempíricas de Nielsen-Hanslow y Stockdon. Se ha comprobado que en los 100 primeros estados de mar iterados antes de propagación, los primeros 41 según su potencial de inundación (modelo Nielsen-Hanslow) antes de propagación se corresponden a estados de mar del entorno del sector direccional de procedencia del E, si bien ya sabemos de antemano que los estados de mar de procedencia de este sector perderán energía en su avance a la costa por los distintos fenómenos de interacción con el fondo, pero en relación a los que proceden de direcciones con alcances más diáfanos sobre el tramo de playa a levante del Puerto de Salou, perderán mayor energía en el proceso de refracción, por lo que sólo tras realizar la simulación computacional de la propagación completa desde indefinidas hasta pie de costa, podremos saber cuál es el estado de mar con mayor repercusión de inundación sobre dicho tramo.



El primer estado de mar que aparece según las iteraciones realizadas con el modelo de Nielsen-Hanslow antes de propagación del sector direccional del entorno SSW-S aparece en el lugar número 42 antes de propagación, si bien estos estados de mar tendrán mucha menor pérdida de energía por la refracción, por lo que no se sabrá su alcance relativo en relación a los estados de mar de procedencias del sector E-ESE, hasta que no se realicen las propagaciones completas y se ejecuten los modelos de inundación.

En cualquier caso, a la vista de los resultados con las iteraciones con el modelo de Nielsen-Hanslow antes de propagación, de los 100 primeros estados de mar de los 265.970 iterados según su potencial de inundación (estimado antes de propagación, con los valores en aguas profundas), 90 estados de mar se corresponden con el entorno del sector de procedencia del E-ESE, y tan solo 10 se corresponden con el entorno del sector de procedencia S-SW, quedando de manifiesto la predominancia de los primeros frente a los segundos en frecuencia y magnitudes según sus parámetros en aguas profundas, si bien dada la orientación particular del tramo de estudio y su morfología batimétrica desde aguas profundas, deben estudiarse ambos sectores de procedencia dado que si bien las magnitudes en aguas profundas del sector direccional del entorno del S-SW son menores que las del sector E-ESE, las pérdidas de energía y en consecuencia de altura de ola en la propagación serán mucho menores en los estados de mar del sector direccional de procedencia del entorno S-SW. Con las iteraciones realizadas con el modelo de Stockdon, se obtienen conclusiones muy similares, que refutan las obtenidas con las iteraciones basadas en el modelo de Nielsen-Hanslow.

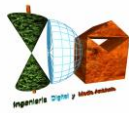
Las tablas adjuntas a continuación incluyen los distintos parámetros de caracterización del oleaje y su valoración previa con los modelos de Run-up de Stockdon et al (2006) y Nielsen y Hanslow (1991) con estimación de la potencia de inundación antes de propagación del oleaje según los parámetros de los estados de mar históricos (Punto Simar 2098132) con base en el mareógrafo de Barcelona para la zona de estudio. Por tanto en dichas tablas se han recogido los estados de mar y sus niveles mareales sincronizados en el orden de los 100 primeros niveles de inundación (un margen de selección que permite asegurar que el estado de mar responsable de la máxima inundación se encuentra en dicha selección) y alcance de oleajes, ordenados de mayor a menor por su potencia de inundación previa estimada antes de propagación, al objeto de seleccionar justificada y razonadamente cuáles serán los estados de mar que se propagarán hasta pie de playa porque puedan generar los mayores niveles de inundación en el tramo de estudio, en el período de registros horarios analizado disponible con posibilidad de sincronización de datos horarios de oleajes y mareas (mareógrafo de



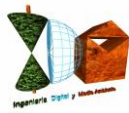
Barcelona 3758, Punto Simar 2098132), de 1993 a la actualidad (mayo 2023) antes de propagación.

La primera tabla corresponde a la ordenación de potencial de inundación según el modelo de inundación de Run-up Nielsen-Hanslow y la segunda a la de Stockdon.

<b>_FECHA/HORA</b>	<b>Marea m. (NMMA)</b>	<b>Dmd (°sex.)</b>	<b>H0 (m.)</b>	<b> Tp (seg.)</b>	<b>LO</b>	<b>Potencia Inundación según CI estimada antes de propagación Modelo Nielsen-Hanslow</b>
2020-01-21 19:00:00	0.267	90	6.51	12.11	228.74	1º
2020-01-21 18:00:00	0.292	90	6.37	12.11	228.74	2º
2020-01-21 17:00:00	0.307	91	6.04	12.11	228.74	3º
2020-01-20 21:00:00	0.222	83	6.26	12.11	228.74	4º
2020-01-21 01:00:00	0.252	82	6.09	12.11	228.74	5º
2020-01-21 05:00:00	0.367	83	5.62	12.11	228.74	6º
2020-01-20 20:00:00	0.243	82	6.03	12.11	228.74	7º
2020-01-21 20:00:00	0.255	91	5.97	12.11	228.74	8º
2020-01-20 18:00:00	0.284	83	5.84	12.11	228.74	9º
2020-01-20 17:00:00	0.293	83	5.79	12.11	228.74	10º
2020-01-20 19:00:00	0.269	82	5.85	12.11	228.74	11º
2020-01-21 02:00:00	0.291	82	5.7	12.11	228.74	12º
2020-01-20 16:00:00	0.3	83	5.59	12.11	228.74	13º
2020-01-20 22:00:00	0.213	83	5.89	12.11	228.74	14º
2020-01-20 15:00:00	0.294	83	5.43	12.11	228.74	15º
2020-01-21 00:00:00	0.226	82	5.67	12.11	228.74	16º
2020-01-21 04:00:00	0.344	81	5.12	12.11	228.74	17º
2020-01-20 12:00:00	0.267	85	5.41	12.11	228.74	18º
2020-01-20 14:00:00	0.29	84	5.31	12.11	228.74	19º
2020-01-21 16:00:00	0.303	90	6.32	11.01	189.07	20º
2020-01-20 13:00:00	0.285	84	5.29	12.11	228.74	21º
2020-01-21 03:00:00	0.321	82	5.09	12.11	228.74	22º
2020-01-21 15:00:00	0.301	90	6.23	11.01	189.07	23º
2020-01-20 23:00:00	0.212	82	5.45	12.11	228.74	24º
2020-01-20 11:00:00	0.253	86	5.26	12.11	228.74	25º
2020-01-21 21:00:00	0.242	93	5.23	12.11	228.74	26º
2020-01-21 13:00:00	0.277	88	6	11.01	189.07	27º
2020-01-21 14:00:00	0.287	89	5.93	11.01	189.07	28º
2020-01-21 08:00:00	0.359	82	5.59	11.01	189.07	29º
2020-01-21 06:00:00	0.371	82	5.52	11.01	189.07	30º
2020-01-21 07:00:00	0.364	82	5.54	11.01	189.07	31º
2020-01-21 12:00:00	0.29	87	5.82	11.01	189.07	32º
2020-01-20 10:00:00	0.249	86	4.9	12.11	228.74	33º
2020-01-21 09:00:00	0.339	83	5.46	11.01	189.07	34º
2020-01-21 11:00:00	0.302	86	5.58	11.01	189.07	35º



<b>_FECHA/HORA</b>	<b>Marea m. (NMMA)</b>	<b>Dmd (°sex.)</b>	<b>H0 (m.)</b>	<b>Tp (seg.)</b>	<b>L0</b>	<b>Potencia Inundación según CI estimada antes de propagación Modelo Nielsen-Hanslow</b>
2020-01-21 22:00:00	0.219	94	4.88	12.11	228.74	36º
2020-01-21 10:00:00	0.312	85	5.36	11.01	189.07	37º
2020-01-20 09:00:00	0.246	86	4.61	12.11	228.74	38º
2020-01-21 23:00:00	0.212	95	4.53	12.11	228.74	39º
2020-01-20 06:00:00	0.274	87	4.23	12.11	228.74	40º
2013-01-20 08:00:00	0.369	225	2.97	13.44	281.74	41º
2020-01-20 05:00:00	0.276	86	3.94	12.11	228.74	42º
2013-01-20 07:00:00	0.403	201	2.88	13.25	273.83	43º
2021-01-09 23:00:00	0.298	87	4.54	11.01	189.07	44º
2017-01-22 03:00:00	0.189	87	3.98	12.29	235.59	45º
2021-01-10 00:00:00	0.315	87	4.44	11.01	189.07	46º
2020-01-20 07:00:00	0.27	88	4.58	11.01	189.07	47º
2017-01-22 02:00:00	0.182	87	3.95	12.3	235.97	48º
2020-01-20 04:00:00	0.271	86	3.73	12.11	228.74	49º
2020-01-20 08:00:00	0.258	87	4.55	11.01	189.07	50º
2019-12-04 18:00:00	0.487	83	3.66	11.01	189.07	51º
2017-01-22 04:00:00	0.19	86	3.86	12.16	230.63	52º
2013-01-20 06:00:00	0.428	194	2.7	13.04	265.22	53º
2001-11-16 07:00:00	0.57	88	3.28	10.99	188.38	54º
2021-01-10 01:00:00	0.343	87	4.04	11.01	189.07	55º
2015-01-31 13:00:00	0.336	249	2.4	14.3	318.95	56º
2001-11-16 06:00:00	0.554	88	3.28	10.99	188.38	57º
2001-11-15 20:00:00	0.557	87	3.4	10.75	180.24	58º
2010-01-07 21:00:00	0.41	85	4.07	10.56	173.93	59º
2001-11-15 21:00:00	0.546	87	3.36	10.87	184.29	60º
2019-12-04 12:00:00	0.502	86	4.13	10.01	156.28	61º
2019-09-11 02:00:00	0.341	85	3.29	12.11	228.74	62º
2001-11-15 19:00:00	0.566	87	3.42	10.64	176.58	63º
2019-12-04 17:00:00	0.506	84	3.39	11.01	189.07	64º
2001-11-16 08:00:00	0.569	89	3.25	10.87	184.29	65º
2019-12-04 11:00:00	0.473	86	4.22	10.01	156.28	66º
2001-11-15 18:00:00	0.577	87	3.42	10.53	172.94	67º
2019-12-04 19:00:00	0.464	83	3.5	11.01	189.07	68º
2015-01-31 14:00:00	0.343	249	2.29	14.41	323.87	69º
2001-11-16 05:00:00	0.494	87	3.32	11.11	192.52	70º
2020-01-20 03:00:00	0.256	86	3.49	12.11	228.74	71º
2015-01-31 12:00:00	0.331	248	2.46	13.94	303.09	72º
2003-10-18 03:00:00	0.423	92	4.36	10	155.97	73º
2021-01-09 18:00:00	0.412	88	4.39	10.01	156.28	74º
2019-12-04 13:00:00	0.519	85	3.92	10.01	156.28	75º
2021-01-09 19:00:00	0.387	88	4.44	10.01	156.28	76º
2015-01-31 15:00:00	0.346	250	2.19	14.48	327.03	77º
2019-12-04 15:00:00	0.517	84	3.87	10.01	156.28	78º



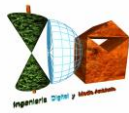
**INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)**

C/ Cañadilla 6, local 68, C. Comercial Coronado, Las Rozas de Madrid 28231, Madrid

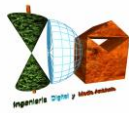
Pza. de la Montañeta 4, entresuelo, 03001 Alicante

Tfno.: 918961731; Fax: 918903410; e-mail: idyma@idyma.es

<b>_FECHA/HORA</b>	<b>Marea m. (NMMA)</b>	<b>Dmd (°sex.)</b>	<b>H0 (m.)</b>	<b>Tp (seg.)</b>	<b>L0</b>	<b>Potencia Inundación según CI estimada antes de propagación Modelo Nielsen-Hanslow</b>
2001-11-15 17:00:00	0.563	86	3.39	10.42	169.35	79º
2017-01-22 05:00:00	0.191	86	3.69	11.93	221.99	80º
2010-01-07 22:00:00	0.449	84	3.73	10.51	172.29	81º
2020-01-22 00:00:00	0.218	96	4.2	11.01	189.07	82º
2003-10-18 04:00:00	0.406	93	4.35	9.9	152.87	83º
2021-01-09 20:00:00	0.35	87	4.49	10.01	156.28	84º
2001-11-15 22:00:00	0.494	87	3.3	10.87	184.29	85º
2001-11-16 09:00:00	0.537	89	3.15	10.87	184.29	86º
2015-01-31 11:00:00	0.347	245	2.45	13.52	285.10	87º
2020-01-20 02:00:00	0.24	85	3.37	12.11	228.74	88º
2019-12-04 14:00:00	0.524	85	3.74	10.01	156.28	89º
2015-01-31 16:00:00	0.353	250	2.11	14.51	328.38	90º
2001-11-11 12:00:00	0.601	88	2.42	11.9	220.87	91º
2001-11-11 11:00:00	0.6	88	2.41	11.9	220.87	92º
2001-11-11 10:00:00	0.592	88	2.36	12.05	226.48	93º
2019-12-04 20:00:00	0.45	84	3.28	11.01	189.07	94º
2001-11-15 16:00:00	0.539	86	3.32	10.42	169.35	95º
2021-01-09 21:00:00	0.317	87	4.49	10.01	156.28	96º
2001-11-16 04:00:00	0.39	87	3.37	11.11	192.52	97º
2015-01-31 10:00:00	0.371	238	2.4	13.27	274.66	98º
2001-11-11 09:00:00	0.592	88	2.31	12.05	226.48	99º
2010-01-07 23:00:00	0.491	82	3.4	10.47	170.98	100º

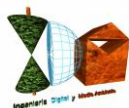


<b>_FECHA/HORA</b>	<b>Marea m. (NMMA)</b>	<b>Dmd (°sex.)</b>	<b>H0 (m.)</b>	<b>Tp (seg.)</b>	<b>L0</b>	<b>Potencia Inundación según CI estimada antes de propagación Modelo Stockdon</b>
2020-01-21 18:00:00	0.292	90	6.37	12.11	228.736	1º
2020-01-21 05:00:00	0.367	83	5.62	12.11	228.736	2º
2020-01-21 19:00:00	0.267	90	6.51	12.11	228.736	3º
2020-01-21 17:00:00	0.307	91	6.04	12.11	228.736	4º
2020-01-20 17:00:00	0.293	83	5.79	12.11	228.736	5º
2020-01-20 18:00:00	0.284	83	5.84	12.11	228.736	6º
2020-01-21 01:00:00	0.252	82	6.09	12.11	228.736	7º
2020-01-21 02:00:00	0.291	82	5.7	12.11	228.736	8º
2020-01-20 16:00:00	0.3	83	5.59	12.11	228.736	9º
2020-01-20 19:00:00	0.269	82	5.85	12.11	228.736	10º
2020-01-21 20:00:00	0.255	91	5.97	12.11	228.736	11º
2020-01-20 21:00:00	0.222	83	6.26	12.11	228.736	12º
2020-01-20 20:00:00	0.243	82	6.03	12.11	228.736	13º
2020-01-21 04:00:00	0.344	81	5.12	12.11	228.736	14º
2020-01-20 15:00:00	0.294	83	5.43	12.11	228.736	15º
2020-01-21 03:00:00	0.321	82	5.09	12.11	228.736	16º
2020-01-21 16:00:00	0.303	90	6.32	11.01	189.0692	17º
2020-01-20 14:00:00	0.29	84	5.31	12.11	228.736	18º
2020-01-20 13:00:00	0.285	84	5.29	12.11	228.736	19º
2020-01-21 15:00:00	0.301	90	6.23	11.01	189.0692	20º
2020-01-21 06:00:00	0.371	82	5.52	11.01	189.0692	21º
2020-01-20 12:00:00	0.267	85	5.41	12.11	228.736	22º
2020-01-21 08:00:00	0.359	82	5.59	11.01	189.0692	23º
2020-01-21 07:00:00	0.364	82	5.54	11.01	189.0692	24º
2020-01-20 22:00:00	0.213	83	5.89	12.11	228.736	25º
2020-01-21 00:00:00	0.226	82	5.67	12.11	228.736	26º
2020-01-20 11:00:00	0.253	86	5.26	12.11	228.736	27º
2020-01-21 09:00:00	0.339	83	5.46	11.01	189.0692	28º
2020-01-21 14:00:00	0.287	89	5.93	11.01	189.0692	29º
2020-01-21 13:00:00	0.277	88	6	11.01	189.0692	30º
2020-01-21 21:00:00	0.242	93	5.23	12.11	228.736	31º
2020-01-21 12:00:00	0.29	87	5.82	11.01	189.0692	32º
2020-01-20 23:00:00	0.212	82	5.45	12.11	228.736	33º
2001-11-16 07:00:00	0.57	88	3.28	10.99	188.3829	34º
2020-01-21 11:00:00	0.302	86	5.58	11.01	189.0692	35º
2003-10-31 17:00:00	0.717	180	3.09	9.26	133.7421	36º
2001-11-15 18:00:00	0.577	87	3.42	10.53	172.943	37º
2001-11-15 19:00:00	0.566	87	3.42	10.64	176.5751	38º
2001-11-16 08:00:00	0.569	89	3.25	10.87	184.2915	39º
2020-01-21 10:00:00	0.312	85	5.36	11.01	189.0692	40º
2001-11-16 06:00:00	0.554	88	3.28	10.99	188.3829	41º



<b>_FECHA/HORA</b>	<b>Marea m. (NMMA)</b>	<b>Dmd (°sex.)</b>	<b>H0 (m.)</b>	<b> Tp (seg.)</b>	<b>LO</b>	<b>Potencia Inundación según CI estimada antes de propagación Modelo Stockdon</b>
2001-11-15 20:00:00	0.557	87	3.4	10.75	180.245	42º
2020-01-20 10:00:00	0.249	86	4.9	12.11	228.736	43º
2001-11-15 21:00:00	0.546	87	3.36	10.87	184.2915	44º
2001-11-11 12:00:00	0.601	88	2.42	11.9	220.8717	45º
2001-11-11 11:00:00	0.6	88	2.41	11.9	220.8717	46º
2019-12-04 18:00:00	0.487	83	3.66	11.01	189.0692	47º
2003-10-31 16:00:00	0.719	180	3.07	8.93	124.3796	48º
2001-11-15 17:00:00	0.563	86	3.39	10.42	169.3486	49º
2001-11-11 10:00:00	0.592	88	2.36	12.05	226.475	50º
2001-11-11 09:00:00	0.592	88	2.31	12.05	226.475	51º
2019-12-04 17:00:00	0.506	84	3.39	11.01	189.0692	52º
2019-12-04 12:00:00	0.502	86	4.13	10.01	156.2839	53º
2001-11-11 08:00:00	0.596	87	2.26	12.05	226.475	54º
2001-11-11 07:00:00	0.606	87	2.2	12.05	226.475	55º
2020-01-21 22:00:00	0.219	94	4.88	12.11	228.736	56º
2019-12-04 13:00:00	0.519	85	3.92	10.01	156.2839	57º
2013-01-20 07:00:00	0.403	201	2.88	13.25	273.8281	58º
2003-10-31 18:00:00	0.667	180	3.05	9.35	136.3545	59º
2020-01-20 09:00:00	0.246	86	4.61	12.11	228.736	60º
2013-01-20 08:00:00	0.369	225	2.97	13.44	281.7376	61º
2001-11-16 09:00:00	0.537	89	3.15	10.87	184.2915	62º
2001-11-16 05:00:00	0.494	87	3.32	11.11	192.5193	63º
2001-11-11 06:00:00	0.609	87	2.13	12.05	226.475	64º
2019-12-04 15:00:00	0.517	84	3.87	10.01	156.2839	65º
2019-12-04 11:00:00	0.473	86	4.22	10.01	156.2839	66º
2019-12-04 14:00:00	0.524	85	3.74	10.01	156.2839	67º
2001-11-15 16:00:00	0.539	86	3.32	10.42	169.3486	68º
2013-01-20 06:00:00	0.428	194	2.7	13.04	265.217	69º
2019-12-04 19:00:00	0.464	83	3.5	11.01	189.0692	70º
2001-11-11 17:00:00	0.598	87	2.16	11.9	220.8717	71º
2020-01-20 06:00:00	0.274	87	4.23	12.11	228.736	72º
2001-11-15 22:00:00	0.494	87	3.3	10.87	184.2915	73º
2001-11-11 05:00:00	0.594	86	2.05	12.05	226.475	74º
2010-01-07 21:00:00	0.41	85	4.07	10.56	173.9298	75º
2020-01-21 23:00:00	0.212	95	4.53	12.11	228.736	76º
2010-01-07 22:00:00	0.449	84	3.73	10.51	172.2867	77º
2003-10-18 03:00:00	0.423	92	4.36	10	155.9718	78º
2010-01-07 23:00:00	0.491	82	3.4	10.47	170.9777	79º
2003-10-31 15:00:00	0.666	180	3.03	8.7	118.0551	80º
2021-01-09 18:00:00	0.412	88	4.39	10.01	156.2839	81º
2021-01-10 00:00:00	0.315	87	4.44	11.01	189.0692	82º
2010-10-12 21:00:00	0.595	81	2.91	9.79	149.4898	83º
2020-01-20 05:00:00	0.276	86	3.94	12.11	228.736	84º

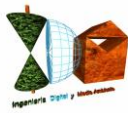




<b>_FECHA/HORA</b>	<b>Marea m. (NMMA)</b>	<b>Dmd (°sex.)</b>	<b>H0 (m.)</b>	<b>Tp (seg.)</b>	<b>L0</b>	<b>Potencia Inundación según CI estimada antes de propagación Modelo Stockdon</b>
2001-11-15 15:00:00	0.516	86	3.22	10.31	165.792	85º
2003-10-31 20:00:00	0.655	182	2.71	9.26	133.7421	86º
2021-01-09 23:00:00	0.298	87	4.54	11.01	189.0692	87º
2019-12-04 20:00:00	0.45	84	3.28	11.01	189.0692	88º
2003-10-31 19:00:00	0.63	181	2.91	9.26	133.7421	89º
2010-01-08 00:00:00	0.521	81	3.08	10.43	169.6738	90º
2019-12-04 16:00:00	0.51	84	3.43	10.01	156.2839	91º
2010-10-12 20:00:00	0.597	81	2.91	9.69	146.4515	92º
2001-11-11 14:00:00	0.602	87	2.36	10.64	176.5751	93º
2001-11-11 15:00:00	0.61	87	2.3	10.64	176.5751	94º
2001-11-11 13:00:00	0.592	88	2.41	10.64	176.5751	95º
2021-01-10 01:00:00	0.343	87	4.04	11.01	189.0692	96º
2021-01-09 19:00:00	0.387	88	4.44	10.01	156.2839	97º
2003-10-18 04:00:00	0.406	93	4.35	9.9	152.868	98º
2010-10-12 22:00:00	0.592	80	2.84	9.69	146.4515	99º
2001-11-11 16:00:00	0.607	87	2.24	10.64	176.5751	100º

En función de los resultados anteriores de los análisis de las series de datos realizadas con las combinatorias de datos de oleaje y mareas y hasta el máximo período disponible en función de los mismos entre 1993-2023 (mayo), los estados de mar del día 21 de enero de 2020 serían candidatos a ser los responsables del máximo nivel de inundación en la zona de estudio según las direcciones de procedencia del entorno del sector E-ESE, coincidiendo en dicha fecha ambas iteraciones (Nielsen-Hanslow y Stockdon antes de propagación) previas realizadas en sus distintas combinaciones de puntos de medición y rangos históricos de análisis de estados horarios, y coincidiendo además en 10 estados de mar de los 12 primeros máximos absolutos (antes de propagación) según ambos autores si bien con ordenaciones distintas, aunque muy similares, estando además los estados de mar de las horas UTC del día 21 de enero de 2020 de las 19:00, 18:00 y 17:00, en las cuatro primeras posiciones en ambos autores. En cuanto a las direcciones de procedencia con incidencia más directa del sector S-SW en el tramo de estudio, si bien con las magnitudes paramétricas de los oleajes inferiores respecto al sector E-ESE, ambos autores tienen a los estados de mar de dicho sector estimados antes de propagación en posiciones próximas al orden 40º, encontrándose el estado de mar del 20 de enero de 2013 a las 08:00 UTC como el primero en potencial de inundación entre los 100 primeros absolutos antes de propagación del sector S-SW (en el orden 41º absoluto) según Nielsen-Hanslow y el quinto según el modlo de Stockdon (en el puesto 61º absoluto) si bien con valores muy similares con los cuatro anteriores de este sector,





por lo que puede considerarse también compatibilidad de estimaciones para los estados de mar de procedencia del sector S-SW, al encontrarse entre los 100 primeros de los 265.970 analizados en posiciones absolutas similares ( $41^{\circ}$ - $61^{\circ}$ ) teniendo en cuenta el sesgo lógico derivado de utilizar formulaciones de distintos autores.

En consecuencia, se tomarán los estados de mar que sobre la base de este análisis previo, son los que cuentan con un potencial máximo previo antes de propagación de inundación sobre el tramo de estudio de cada uno de los sectores principales del oleaje, S-SW y E-ESE con incidencia en el tramo de estudio, según las iteraciones previas realizadas (antes de propagación) sobre las series completas de datos horarios de estados de mar y mareas, con resultados compatibles evaluados por dos autores con formulaciones distintas, al objeto de asegurar dicha selección. Se tomarán en consecuencia dos estados de mar para asegurar los resultados en cuanto a máxima inundación, uno del sector S-SW y otro del sector E-ESE, habida cuenta de que hasta que no se realizan las propagaciones a pie de playa, no se habrá hecho una valoración completa de todos los factores incidentes iniciales y de sus interacciones con el fondo durante el recorrido hasta pie de costa, y por tanto hasta ese momento no se puede conocer con exactitud cuál será el estado de mar responsable de la máxima inundación, hasta que no se realiza el proceso de cálculo completo incluyendo las propagaciones de los estados de mar junto con la ejecución de los modelos de inundación. Asimismo, al cruzar las iteraciones de orden de potencial de inundación estimado con valoración de dos modelos de inundación (run-up) de dos autores distintos, se dispone de una mayor seguridad de que los estados de mar seleccionados, se corresponden con los que causarán los máximos niveles de inundación, si bien se ha dado mayor peso al orden dado por las iteraciones realizadas con el modelo de inundación del autor Nielsen-Hanslow dado que éste será con el que se realizarán los cálculos finales, con un modelo modificado complementado según los factores correctores implementados por la IH de Cantabria (factores de percolación, rugosidad y pendiente).

En función del análisis realizado, los estados de mar que serán objeto de propagación tomados como los de máximo potencial de sus respectivos sectores de procedencia (S-SW y E-ESE) son los siguientes:

<b>FECHA/HORA U.T.C.</b>	<b>Hm0 (m.)</b>	<b>Tp (seg.)</b>	<b>Dir (º sex.)</b>
2020-01-21 19:00	6.51	12.11	90
2013-01-20 08:00	2.97	13.44	225



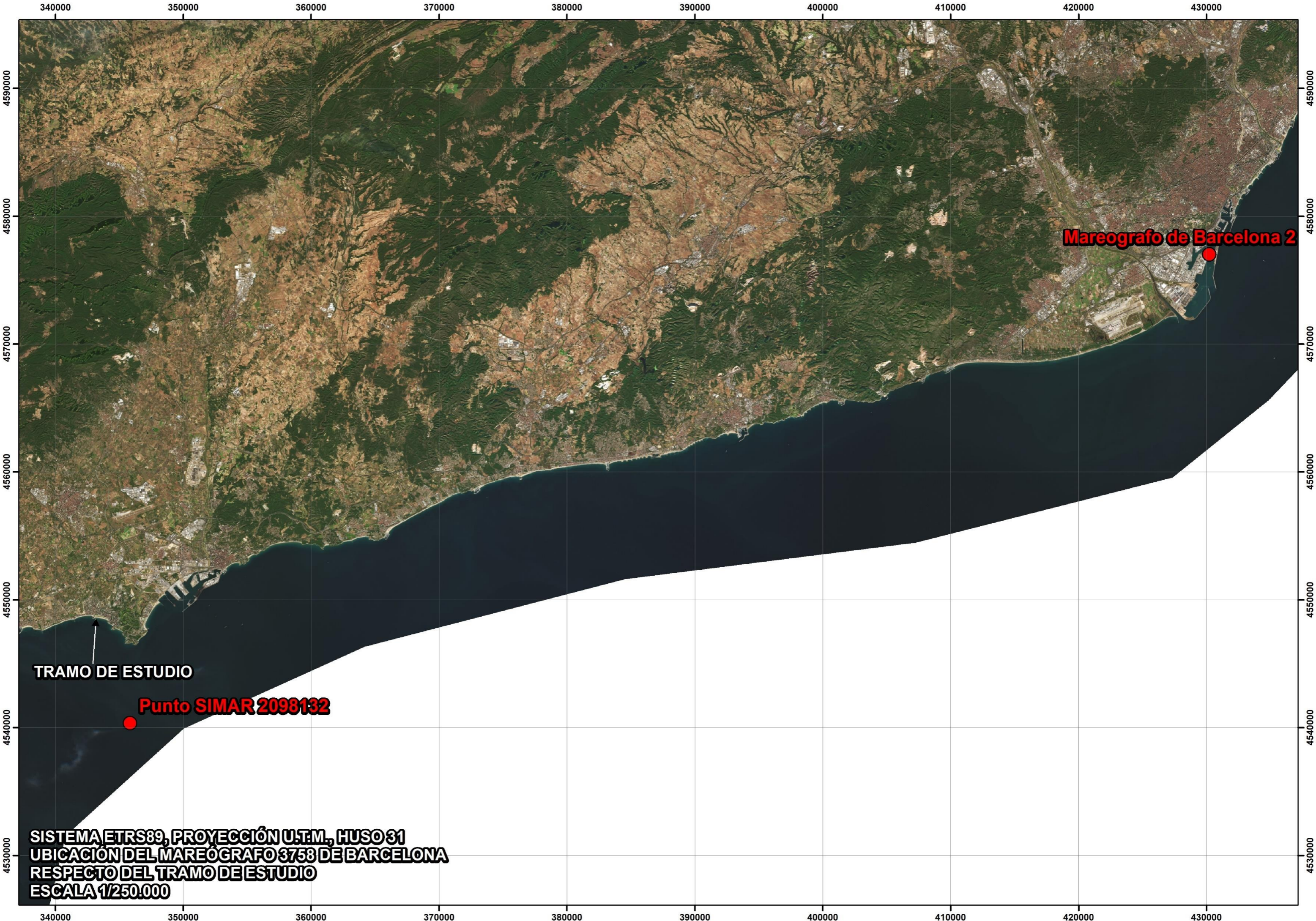
## **2.2. ANÁLISIS DE DATOS DE LOS MAREÓGRAFOS**

Para considerar la superposición completa de factores que pueden llegar a incidir en el nivel del mar en los episodios de los temporales considerados, se deberán sumar los incrementos debidos al remonte del oleaje (run-up) con los debidos a los efectos mareales, para la obtención de los máximos niveles alcanzados, habiéndose tomado a tal efecto los registros reales del mareógrafo 3758 de Barcelona 2, ubicado en el Puerto de Barcelona, perteneciente a la Red REDMAR, que considera tanto los componentes astronómicos, como los meteorológicos o residuales en sus mediciones. Debe señalarse a este respecto que el mareógrafo de Tarragona es de mayor proximidad al tramo de estudio, si bien tiene pendiente su nivelación respecto al cero del I.G.N., disponiéndose provisionalmente de la nivelación respecto al cero del sistema-datum WGS84, la cual hubiera precisado de una correlación precisa al plano  $z=0$  según el NMMA (medida con aparatos de topografía) para su utilización en el sistema ETRS89 Elipsoide GRS80 y Geoide EGM08, Proyección UTM, Huso 31, que ha sido el de referencia del modelo topo-batimétrico digital utilizado en el estudio para las propagaciones, las ejecuciones de los modelos de inundación y la obtención de los resultados finales de CI sobre el terreno emergido, por lo que no ha sido posible la utilización de sus datos en el presente estudio. Además de la anterior imposibilidad, la utilización del mareógrafo de Barcelona, ha permitido el estudio del clima marítimo de un período histórico (1993-2023) más amplio que el que se hubiera tenido con el mareógrafo de Tarragona (2011-2023).

Además de los niveles mareales con su componente astronómico y su componente residual o meteorológico, también los mareógrafos determinan el nivel medio del mar (NMM), que fija el plano altimétrico de comparación ( $z=0$ ) de referencia para la cota de máxima inundación que se calcule finalmente, habiendo sido así mismo referenciado a dicho plano, la cartografía y batimetría, a partir de las cuales se han realizado los cálculos y estimaciones, al objeto de elaborarse y proyectarse todos los resultados en una base altimétrica coherente y homogénea.

El origen de altitudes que el Instituto Geográfico Nacional utiliza en Murcia corresponde al Nivel Medio del Mar en Alicante (NMMA). Este organismo realizó la nivelación de todos los mareógrafos en el momento de su instalación. El IGN durante 1.998 llevó a cabo una compensación general de toda la red de nivelación nacional (Proyecto RNAP98), obteniendo para todas y cada una de las señales una nueva altitud homogénea con el resto de la red, y en 1999 proporcionó estas nuevas cotas. Así mismo el IGN efectuó nuevos recálculos del NMM en el año 2.008.





**TRAMO DE ESTUDIO**

**Punto SIMAR 2098132**

**Mareografo de Barcelona 2**

**SISTEMA ETRS89, PROYECCIÓN U.T.M., HUSO 31  
UBICACIÓN DEL MAREÓGRAFO 3758 DE BARCELONA  
RESPECTO DEL TRAMO DE ESTUDIO  
ESCALA 1/250.000**





De este modo, se han podido relacionar todos los datos de los niveles mareales de los registros de los mareógrafos analizados y en origen referidos al cero del Puerto, con el plano  $z=0$  correspondiente a la Red Geodésica ETRS89, para la vinculación y referenciación altimétrica con la base cartográfica (MDT topobatimétrico), así como con los datos de alturas de oleaje, referidos igualmente a los niveles medios del mar.

Por tanto, para el caso del presente estudio y de los resultados que se aportan de cotas de alcance de cota de máxima inundación marina en el tramo de costa de la playa a levante del Puerto de Salou, en el T.M. de Salou, según lo establecido en el nuevo Reglamento General de Costas RD 876/2014, modificado por el Real Decreto 668/2022, de 1 de agosto, la referencia altimétrica será el nivel medio del mar en Alicante (NMMA) según las nivelaciones proporcionadas por el mareógrafo de Barcelona 2, enlazado en procesos de nivelación y recálculos posteriores por el I.G.N. con el resto de la mayoría de los mareógrafos de la red REDMAR (salvo algunas excepciones pendientes como el de Tarragona), los últimos de los cuales han sido llevados a cabo en el año 2.008, para la obtención del valor  $z=0$  que establece la coordenada  $z$  ortométrica de su red geodésica ETRS89.

La información del mareógrafo 3758 de Barcelona 2 situado en la estación está situada en el muelle 140 de la Planta ENAGAS, de la Red REDMAR de Puertos del Estado, se recoge en la siguiente tabla:

<b>Longitud</b>	2.17° E
<b>Latitud</b>	41.34° N
<b>Cadencia</b>	1 Min
<b>Código</b>	3758
<b>Inicio de medidas</b>	1-1-1993
<b>Tipo de sensor</b>	Radar
<b>Modelo</b>	Miros
<b>Conjunto de datos</b>	REDMAR



Analizados los datos del mareógrafo en el horario (día-hora) correspondientes al período de estudio entre 1993 y 2023 (mayo), se capturaron los valores de los registros de niveles mareales sincronizados al horario UTC de los estados de mar según los datos de los Puntos Simar analizados, para asociar a cada uno de los mismos el incremento mareal con el que tuvo lugar, proceso que fue necesario llevar a cabo para el análisis histórico de los estados de mar y la ordenación de los mismos en cuanto a la estimación de su potencial previo de inundación (antes de propagación del oleaje) en función de los parámetros de los mismos.

Si bien los estados de mar de los Puntos Simar analizados se corresponden con el oleaje espectral de una hora, se consideró para estimar la marea a asociar a cada estado de mar la asignación de los parámetros del estado de mar a la hora UTC relacionada en cada estado, por lo que, como los datos de los oleajes están dados de hora en hora, fue tomado el dato de la media horaria del mareógrafo del horario UTC como valor asociado al oleaje del mareógrafo de Barcelona que proporciona Puertos del Estado, al objeto de sincronizar oleajes y mareas, habida cuenta que la celeridad de la onda (para valorar el tiempo que tardaría una ola de un temporal tipo similar a los seleccionados con un valor tipo de  $T_p = 12$  seg. en alcanzar el pie de playa desde la distancia del Punto Simar que se encuentra a 8.65 km. de distancia del tramo de estudio, estaría en el entorno de 16 m/s, y despreciando el efecto de fondo, alcanzaría la costa en menos de media hora, razón por la que se sincronizaron los registros horarios del mareógrafo (los promedios de una hora) con los estados de mar Simar con la misma hora UTC.

Los datos de los incrementos mareales dentro del horario en los que los estados de mar seleccionados alcanzaron la costa (calculando el promedio horario durante el desplazamiento desde profundidades indefinidas hasta pie de costa con la teoría de onda lineal, software SMC), referidos al cero del Puerto de Barcelona, fueron los siguientes:

<b>FECHA/HORA U.T.C.</b>	<b>NIVEL "0" PUERTO BARCELONA (m.)</b>
2020-01-21 19:00	0.446
2013-01-20 08:00	0.548

A partir de los parámetros de nivelación del mareógrafo que proporciona Puertos del Estado, se transformaron los niveles anteriores en niveles referidos al NMMA.

**Clavo de referencia:** Clavo "146". Sobre la esquina derecha de la base de hormigón del mareógrafo

**Cero REDMAR:** NMMA1995

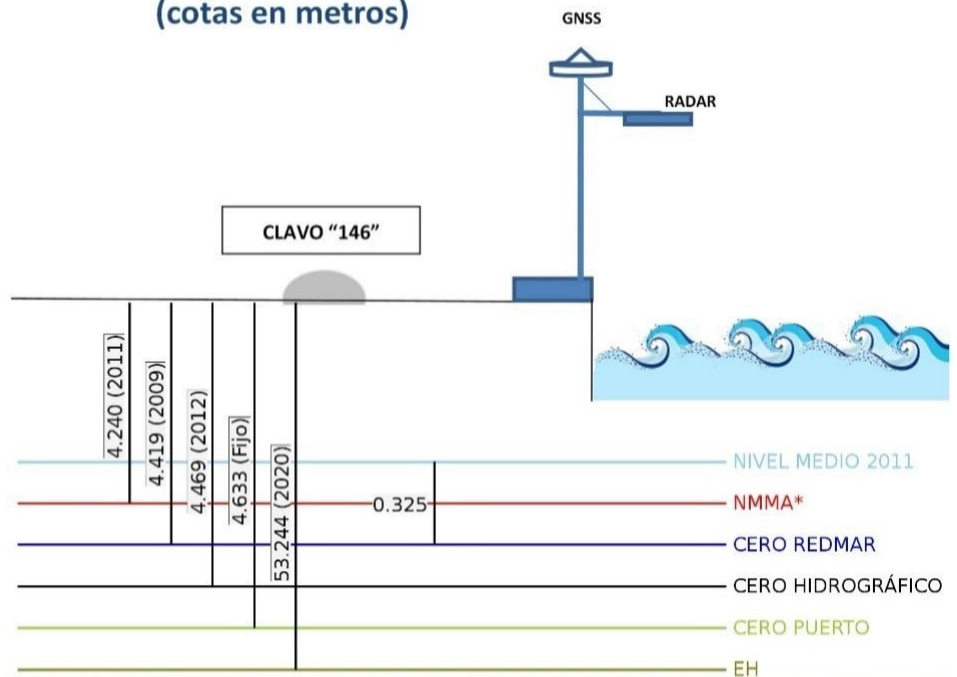
**Cota:** 4.42 m. bajo clavo de referencia



### ESQUEMA DATUM MAREÓGRAFO REDMAR BARCELONA2 (cotas en metros)



CLAVO "146"

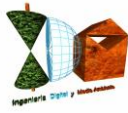


Clavo 146: sobre la esquina derecha de la base de la zapata de hormigón del mareógrafo, situado en las instalaciones de Enagas. Nivelado por el Instituto Cartográfico y Geológico de Cataluña (ICGC).

- Cero REDMAR, origen de las medidas, transferido a partir de datos simultáneos del mareógrafo antiguo (año 1995).
- \*NMMA: Nivel Medio del Mar en Alicante (año 2008). Cota ortométrica oficial Instituto Geográfico Nacional.
- Cero del puerto: utilizado por la A.P en sus batimetrías
- E.H.: altura elipsoidal (ETRS89, IGN/SONEL, 2020).

**IMPORTANTE:** cota ortométrica utilizada por la A.P., referida al geoido EGM08D595, del ICGC: 4.310 m (7 cm bajo NMMA)

**Nota:** La posición relativa de Clavo y Mareógrafo está simplificada.



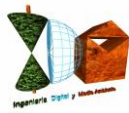
**INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)**

C/ Cañadilla 6, local 68, C. Comercial Coronado, Las Rozas de Madrid 28231, Madrid

Pza. de la Montañeta 4, entresuelo, 03001 Alicante

Tfno.: 918961731; Fax: 918903410; e-mail: idyma@idyma.es

<b>FECHA</b>	<b>Hora UTC</b>	<b>Nivel N.M.M.A. (m.)</b>
2020-01-21	19:00	0.267
2013-01-20	08:00	0.369



### **3. PROPAGACIÓN DEL OLEAJE**

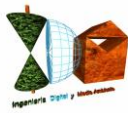
#### **3.1. PRIMERA FASE: DESDE LA BOYA O PUNTO GEOGRÁFICO FUENTE DE DATOS DE MODELOS NUMÉRICOS, HASTA PROFUNDIDADES INDEFINIDAS, SEGÚN LOS SECTORES PRINCIPALES DE INCIDENCIA**

No se procede a la realización de la primera propagación del oleaje, dado que se realizará la propagación computacionalmente con un simulador basado en modelos numéricos (MOPLA, del SMC de la IH de Cantabria) con mallas extendidas desde profundidades indefinidas pasando por el Punto Simar hasta el tramo de costa de estudio en la playa de Levante de Salou, tomando los datos del Puntos Simar siguiendo las recomendaciones de Puertos del estado, en cuanto a que para su para uso práctico, los datos de oleaje de los Puntos Simar deben interpretarse siempre como datos en aguas abiertas a profundidades indefinidas.

En consecuencia, los datos y parámetros de los estados de mar considerados en profundidades indefinidas y su dirección de procedencia según los datos obtenidos de los Puntos Simar seleccionados, serán los siguientes:

<b>FECHA/HORA U.T.C.</b>	<b>Hm0 (m.)</b>	<b> Tp (seg.)</b>	<b>Dir (º sex.)</b>
2020-01-21 19:00	6.51	12.11	90
2013-01-20 08:00	2.97	13.44	225





## 3.2. SEGUNDA FASE: DESDE PROFUNDIDADES INDEFINIDAS HASTA PIE DE COSTA

### 3.2.1. Propagación con el modelo Oluca SP (espectral) del módulo MOPLA, software SMC 2.5

Se realizará la propagación de los estados de mar seleccionados del Punto Simar 2098132 tras el análisis histórico de datos de clima marítimo desde 1993 hasta la actualidad, teniendo en cuenta su ubicación respecto al tramo de estudio y el comienzo de profundidades indefinidas para los estados de mar seleccionados hasta donde se ha extendido el MDT topobatimétrico generado, en direcciones desde el tramo de estudio hacia el sector E-ESE comprendiendo a lo largo de su recorrido dicho Punto Simar fuente de datos, así como desde el tramo de estudio hacia el sector S-SW comprendiendo igualmente a lo largo de su recorrido dicho Punto Simar, realizándose la propagación mediante el modelo numérico Oluca-SP basado en un modelo espectral de propagación de oleaje, que forma parte del Modelo Integral de Propagación de Oleaje, Corrientes y Morfodinámica en Playas, MOPLA, integrado en el software SMC 2.5 desarrollado por el I.H. de la Universidad de Cantabria.

Al propagarse el oleaje hasta zonas costeras de menor profundidad, se producen modificaciones importantes por la batimetría del fondo de forma que la refracción, el asomeramiento, la disipación de energía y la difracción entre otras, son manifestaciones de dichas interacciones, habiéndose profundizado los últimos años en el conocimiento de estos procesos físicos, lo cual ha permitido incorporar los conocimientos en modelos numéricos de propagación de oleaje.

El modelo Oluca-SP del módulo MOPLA del SMC 2.5, corresponde a un modelo de la categoría modelo espectral no dispersivo que resuelve la fase, MRF, que requiere como entrada en el contorno exterior (mar adentro), un estado de mar direccional, que está representado por un espectro bidimensional discretizado en componentes frecuenciales y direccionales, las cuales son propagadas de manera simultánea. Para la propagación de los componentes de energía, la aproximación parabólica incluye refracción-difracción con interacción oleaje-corriente (Kirby, 1986 a). El modelo predice las pérdidas de energía debido a la rotura del oleaje mediante la utilización de tres diferentes modelos estadísticos de disipación, dos de los cuales calculan la tasa media de disipación de energía asociada a un bore en movimiento (Battjes y Jansen, 1978; Thornton y Guza, 1983) y un tercero que asocia la tasa de disipación al gradiente entre el flujo de energía estable y local (Winyu y Tomoya, 1998).



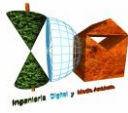
Desde que se presentaron los primeros modelos de refracción y difracción combinadas, se sigue investigando el desarrollo de estos modelos originales, basados en teoría lineal, para que den respuesta a varios fenómenos físicos reales no cubiertos todavía por dicha teoría.

Entre los fenómenos que son de particular importancia destaca la no linealidad de las ondas, que provoca un aumento de la celeridad por efecto de la dispersión debida a la amplitud, y no sólo debida a la frecuencia, como ocurre en ondas lineales. Se ha demostrado, Kirby and Dalrymple (1983a), (1984) que la consideración de fenómenos no lineales puede provocar una clara distorsión de los resultados a partir de unas pocas longitudes de onda. Para representar la no linealidad en los modelos de propagación se utilizan dos aproximaciones.

La primera aproximación, sugerida inicialmente por Booij (1981), consiste en utilizar una relación de dispersión empírica que modele la dispersión por amplitud en aguas someras y que tienda a la relación de dispersión frecuencial en aguas profundas. Esta técnica tiene la ventaja de tener, al menos, una descripción empírica del comportamiento en aguas someras, pero tiene el inconveniente de linealizar los resultados en aguas profundas. La segunda consiste en modificar el modelo lineal de Kirby and Dalrymple (1983a), incluyendo un término proporcional al cubo de la amplitud de la ola que representa la distorsión del número de onda resultante de los efectos de tercer orden en la teoría de Stokes. Esta aproximación presenta la ventaja de tener una base analítica válida, pero tiene el claro inconveniente de no ser adecuada para aguas poco profundas.

### **3.2.2. Fundamentos del Oluca SP: modelos MRF por componentes espectrales para propagación de oleaje**

Asumiendo que la superficie libre del agua es periódica en el tiempo y que la dependencia espacial se puede dividir en una fase que varía rápidamente y en una amplitud que varía lentamente, la elevación de la superficie libre del agua,  $h$ , puede ser representada como una suma de componentes frecuenciales y direccionales, así:



$$\eta = \sum_j \sum_l \eta_{jl} = R_e \left\{ \sum_{j=1}^{N_f} \sum_{l=1}^{N_\theta} A_{jl}(x, y) e^{i\psi_j} \right\}$$

$$\psi_j = i\bar{K}_j x - \sigma_j \quad (1)$$

$$\bar{K}_j = \frac{1}{B} \int_0^B K_j(x, y) dy$$

Donde:

$x, y$	=	Sistema de coordenadas, tal que el eje $x$ va en la dirección principal de propagación y el eje $y$ perpendicular a éste.
$j, l$	=	Índice que representan la frecuencia y dirección respectivamente.
$R_e(z)$	=	Parte real de un número complejo $z$ .
$A_{jl}(x, y)$	=	Amplitud de onda compleja para una componente frecuencial, $j$ y direccional, $l$ . Definida en un punto $(x, y)$ del dominio.
$N_f, N_\theta$	=	Número de discretizaciones en frecuencia y dirección, respectivamente.
$K_j(x, y)$	=	Número de onda para una componente con frecuencia angular, $j$ .
$\sigma_j$	=	Frecuencia angular para la componente $j$ .
$\bar{K}_j(x)$	=	Valor representativo del número de onda asociado a una frecuencia angular $j$ , en una coordenada $x$ .
$B$	=	ancho del dominio (en el eje $y$ ).

Cuando el campo de oleaje consiste en ondas planas,  $A_{jl}(x, y)$  puede ser representada en términos de una amplitud constante  $a_{jl}$  y una dirección  $\theta_{jl}$  como:

$$A_{jl}(x, y) = a_{jl} e^{i[(K_j \cos \theta_{jl} - \bar{K}_j)x + K_j \sin \theta_{jl}y]} \quad (2)$$

se asume que la refracción, difracción y asomeramiento de componentes de oleaje discretas, está gobernada por la aproximación parabólica oleaje-corriente de las ecuaciones de pendiente suave (Kirby, 1984 a). La ecuación que gobierna la amplitud compleja  $A_{jl}(x, y)$  en el Oluca-SP, es dada por (Kirby, 1986 a).



### 3.2.3. Ecuación de la pendiente suave

Asumiendo que la superficie libre del agua es periódica en el tiempo y que la dependencia espacial se puede dividir en una fase que varía rápidamente y en una amplitud que varía lentamente, la elevación de la superficie libre del agua,  $h$ , puede ser representada como una suma de componentes frecuenciales y direccionales, así:

El problema de la propagación de ondas sobre batimetría irregular es tridimensional e involucra complicadas condiciones de contorno no lineales. Por este motivo, existen muy pocas soluciones al problema tridimensional y todas ellas lo son para fondo plano horizontal. En dos dimensiones, los sofisticados modelos de Chu and Mei (1970) y Djordjevic and Redekopp (1978) predicen el comportamiento de ondas de Stokes sobre batimetría con variación suave. Para la simplificación del problema tridimensional, Berkhoff (1972), entre otros, hizo notar que la mayor parte de las propiedades de las ondas progresivas lineales podrían ser predichas mediante un modelo ponderado integrado verticalmente. La ecuación a la que llegó Berkhoff (1972) se conoce con el nombre de "mild slope equation" es decir, ecuación de pendiente suave. La ecuación puede escribirse en función del desplazamiento de la superficie libre,  $\eta(x, y)$ , mediante la utilización de un operador de gradiente horizontal como:

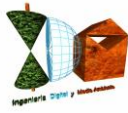
$$\vec{\nabla} \left( c c_g \vec{\nabla} \eta \right) + \sigma^2 \frac{c_g}{c} \eta = 0 \quad (3)$$

Donde:

$$\vec{\nabla} = \frac{\partial}{\partial x_j} \quad j = 1, 2$$

$$c = \sqrt{\left( \frac{g}{k} \right) \tanh kh} \quad = \text{Celeridad de la onda}$$

$$c_g = c \frac{\left( 1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right)}{2} \quad = \text{Celeridad de grupo}$$



Donde  $h(x,y)$  es la profundidad local de agua, y  $g$  la aceleración de la gravedad. El número de onda local  $k(x, y)$ , está relacionado con la frecuencia angular,  $\sigma$ , y la profundidad,  $h$ , mediante la relación de dispersión lineal:

$$\sigma^2 = g k \tanh kh \quad (4)$$

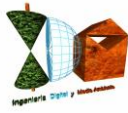
El perfil de la onda viene dado por:

$$\eta = A(x, y) e^{j\sigma t}$$

Donde,  $A(x, y)$  es la amplitud compleja con información sobre la fase y la amplitud real de la onda. Berkhoff (1972) fue el primero en obtener una ecuación de propagación para ondas de pequeña amplitud en zonas con profundidad suavemente variable. Posteriormente, dicha ecuación se amplió para incluir también los efectos de corrientes por Booij (1981) y Kirby (1983). Se han utilizado diferentes métodos matemáticos para obtener las ecuaciones para pendientes suaves. Mientras que Luke (1967), Booij (1981) y Kirby (1983) utilizaron un principio variacional, otros autores han aplicado métodos basados en perturbaciones.

Numerosos autores han aplicado la ecuación de la pendiente suave a diversos casos, principalmente utilizando técnicas de diferencias finitas, ver como ejemplos Jonsson and Skovgaard (1979), Bettles and Zienkiewicz (1977) y Houston (1981). Radder (1979) desarrolló para la ecuación de la pendiente suave una aproximación parabólica que tiene varias ventajas sobre la forma elíptica presentada por Berkhoff (1972). Primero, no son necesarias las condiciones de contorno en el extremo inferior del recinto de integración y, segundo, permite técnicas de resolución muy eficientes por medio de un modelo en diferencias finitas. Radder (1979) utilizó una técnica de partición de matrices, que implica la separación del campo de ondas en una onda propagándose hacia adelante y otra hacia atrás, despreciándose posteriormente esta segunda (lo que se justifica porque en la mayoría de las aplicaciones sólo tiene interés la onda que se propaga hacia adelante).

La aproximación de Radder (1979) para las derivadas transversales en la dirección normal a la de propagación, impone una restricción a su modelo parabólico: las ondas deben propagarse dentro de los  $\pm 45^\circ$  alrededor de la dirección principal de propagación. Booij (1981) desarrolló también un método para la partición de la matriz de la ecuación elíptica, pero su procedimiento incluye más términos en la aproximación de las derivadas transversales y, por



lo tanto, su método permite al modelo parabólico manejar ondas dentro del rango de  $\pm 50^\circ$  alrededor de la dirección supuesta.

Este procedimiento de Booij es el que se utiliza en el modelo de ondas monocromáticas Oluca-MC y el modelo espectral Oluca-SP. La aproximación parabólica débilmente no lineal a la ecuación de pendiente suave viene dada por:

$$c_g \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial y} + i(\bar{k} - k) c_g A + \frac{\sigma}{2} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{c_g}{\sigma} \right) A - \frac{i}{2\sigma} \frac{\partial}{\partial y} \left[ p \frac{\partial A}{\partial y} \right] - i\sigma k^2 D |A|^2 \frac{A}{2} = 0 \quad (6)$$

Donde

$$p = C c_g$$

$\bar{k}$  = Número de onda de referencia, tomado como la media a lo largo del eje  $y$ .

$D$  = Forma parte del término no lineal, y se define como:

$$D = \frac{(\cos h 4 kh + 8 - 2 \tan h^2 kh)}{8 \operatorname{sen} h^4 (kh)} \quad (7)$$

### 3.2.4. Modelos combinados de refracción/difracción

Los predecesores del Oluca-MC y el Oluca-SP fueron desarrollados por Kirby (1983) y Kirby and Dalrymple (1983a), el primero mediante una aproximación Lagrangiana y los segundos mediante una técnica de escalas múltiples. Estos modelos rellenaron el hueco entre los modelos no lineales de difracción y la ecuación lineal de la pendiente suave. Este modelo se puede escribir de diferentes maneras dependiendo de la aplicación.

Para aplicaciones dependientes del tiempo se utiliza la forma hiperbólica y para problemas estacionarios, la forma elíptica. Ambas requieren del uso de condiciones de contorno en todos los laterales del dominio del modelo. Estas condiciones son difíciles de establecer, puesto que la reflexión no es conocida a priori. Estos modelos tienen, sin embargo, la ventaja de que no presentan restricciones para la dirección del oleaje. Kirby and Dalrymple (1984a) muestran una comparación entre su modelo débilmente no lineal de (1983a) y datos de laboratorio. Los ensayos de laboratorio, realizados en el Delft Hydraulics Laboratory por



Berkhoff, Booij and Radder (1982), consistieron en la determinación de la amplitud de las ondas sobre un bajo en un fondo con pendiente.

Mientras los resultados predichos por Berkhoff, Booij and Radder (1982) mediante el trazado de los rayos resultaron ser una muy pobre aproximación a los ensayos, la predicción obtenida con el modelo de Kirby and Dalrymple (1984) fue excelente. Las comparaciones entre los modelos parabólicos lineales y no lineales demostraron la importancia de los términos no lineales dispersivos en las ecuaciones.

### 3.2.5. Modelos de interacción oleaje/corrientes

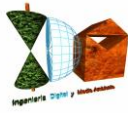
Utilizando una aproximación Lagrangiana, Booij (1981) desarrolló una versión de la ecuación de la pendiente suave que incluye los efectos de una corriente. En este modelo las corrientes se suponían débiles y cualquier producto entre velocidades de corriente era despreciado. Kirby (1984a) presentó la forma corregida de su modelo de la ecuación de pendiente suave para incluir corrientes.

El término no lineal fue añadido por Kirby and Dalrymple (1983b) y en este artículo presentaron los resultados de modificación de las ondas al atravesar un chorro de corriente. La ecuación de pendiente suave modificada para una corriente débil que presentaron es:

$$\begin{aligned}
 (c_g + U) A_x + V A_y + i(\bar{k} - k)(c_g + U) A + \frac{\sigma}{2} \left[ \left( \frac{c_g + U}{\sigma} \right)_x + \left( \frac{V}{\sigma} \right)_y \right] A \\
 - \frac{i}{2\sigma} (p - V^2) A_y - i\sigma \frac{k^2}{2} D |A|^2 A = 0
 \end{aligned} \quad (8)$$

Donde  $p = c c_g$  y  $\bar{k}$  = número de onda de referencia, tomando como el promedio del número de onda a lo largo del eje  $y$ ,  $U$  es la velocidad media de corriente en la dirección de la coordenada  $x$  y  $V$  en la dirección  $y$ . El término no lineal incluye  $D$ , que es:

$$D = \frac{(\cosh 4kh + 8 - 2 \tanh^2 kh)}{8 \operatorname{sen}^4(kh)}$$



Por último, Kirby and Dalrymple (1985) han desarrollado una versión no lineal del modelo parabólico que incluye corrientes fuertes, con base en una formulación Lagrangiana (principio variacional) descrita por Luke (1967), para un fluido no viscoso e irrotacional con una superficie libre:

$$\delta \int_t \int_{\bar{x}} L d\bar{x} dt = 0; \quad L = \int_{-h}^{\eta} \left[ \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} (\nabla \Phi)^2 + g z \right] dz \quad (9)$$

donde  $h$  es la profundidad local y  $\delta = \frac{\Delta h}{kh}$  es un parámetro adimensional relativo a la variación de la profundidad en una longitud de onda. Utilizando el peralte de la onda  $\varepsilon = k|A|$ , se puede expresar el potencial de velocidades  $\Phi$  y la superficie libre  $\eta$  mediante un desarrollo en serie como:

$$\Phi = \delta^{-1} \Phi_0(\delta x, \delta y, \delta t) + \varepsilon \Phi_1(x, y, z, t) + O(\varepsilon^2) \quad (10)$$

$$\eta = \eta_0(\delta x, \delta y, \delta t) + \varepsilon \eta_1(x, y, t) + O(\varepsilon^2) \quad (11)$$

asumiendo la existencia de corrientes  $U = O(1)$  y con  $\varepsilon \ll 1$ ,  $\delta \ll 1$  y  $\delta = O(\varepsilon)$

Aquí  $\Phi_0$  es el potencial para la corriente:

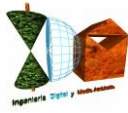
$$U = \nabla \Phi_0 \quad (12)$$

y  $\Phi_1$  viene dado por:

$$\Phi_1 = -\frac{ig}{2\sigma} A f(z) e^{i\theta} + \text{complejo conjugado} \quad (13)$$

Operando del modo descrito en Kirby & Dalrymple (1983b), se llega a la ecuación:





$$\begin{aligned} & \frac{D^2 \phi}{Dt^2} + (\bar{\nabla} \cdot \bar{U}) \frac{D\phi}{Dt} - \bar{\nabla} (c c_g \bar{\nabla} \phi) + (\sigma^2 - k^2 c c_g) \phi \\ & + 2\sigma \left[ \bar{k} \bar{\nabla} \phi_2 - \frac{k^2}{2\sigma \cos h^2 kh} \right] \phi + \sigma^2 k^2 D |A|^2 \phi + i\sigma \frac{\gamma}{2} \phi = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

donde  $\phi$  es el potencial en la superficie libre ( $\Phi(x, y, z, t) = \phi(x, y, t) f(z)$ ), el término no lineal  $\sigma^2 k^2 D |A|^2 \phi$  representa en cierto modo, la dispersión por amplitud. El término de disipación  $i\sigma \frac{\gamma}{2} \phi$ , se utiliza para modelar la disipación de energía por fricción y por rotura del oleaje, y  $\phi_2$  es el potencial para una onda larga, que se rige por la ecuación:

$$\begin{aligned} & \frac{D^2 \phi_2}{Dt^2} + (\bar{\nabla} \cdot \bar{U}) \frac{D\phi_2}{Dt} - g \bar{\nabla} (h \bar{\nabla} \phi_2 + \bar{U}) = \\ & - \frac{gk}{2 \sin h 2kh} \frac{D}{Dt} |A|^2 + \frac{g^2}{2} \bar{\nabla} \left[ \bar{k} \frac{|A|^2}{\sigma} \right] \end{aligned} \quad (15)$$

De acuerdo con Kirby and Dalrymple (1983a), para obtener la ecuación de la onda incidente, se debe despreciar el acoplamiento que produce la onda larga en el potencial  $\phi$ .

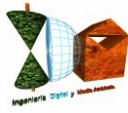
Por otro lado, para obtener la aproximación parabólica debe asumirse que el oleaje se propaga principalmente en dirección  $x$ , es decir:

$$\bar{k} \cong (k, 0)$$

y así, la relación de dispersión resulta:

$$\omega = \sigma + \bar{k} \bar{U} \cong \sigma + k \cdot U \quad (16)$$

Donde,  $\omega$ , es la frecuencia absoluta y,  $\sigma$ , la frecuencia intrínseca. La ecuación de la dispersión (4) que relaciona la frecuencia angular de la onda, la profundidad y el número de onda, es modificado para tener en cuenta el efecto Doppler debido a la corriente:



$$(\omega - kU)^2 = gk \tan h kh \quad (17)$$

Dado que los procesos de refracción y difracción pueden desviar la dirección de propagación de la dirección principal  $x$ , la amplitud de la onda  $A$ , debe ser una función compleja para que absorba las diferencias entre la fase real y la asumida. Si se toma el valor de  $\bar{k}$  y se sustituye en (13), la nueva expresión para el potencial en la superficie libre es:

$$\phi = -i \frac{g}{2\sigma} A(x, y) e^{i \int \bar{k} dx} + \text{complejo conjugado} \quad (18)$$

despreciando la influencia de la onda larga y la dependencia de  $A$  respecto del tiempo en la ecuación (14), se llega a la siguiente ecuación parabólica para la amplitud compleja:

$$\begin{aligned} & (c_g + U) \frac{\partial A}{\partial x} + V \frac{\partial A}{\partial y} + i(\bar{k} - k)(c_g + U)A + \frac{\sigma}{2} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{c_g + U}{\sigma} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{V}{\sigma} \right) \right] A \\ & - \frac{i}{2} \frac{\partial}{\partial y} \left[ (c_g - V^2) \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{A}{\sigma} \right) \right] + \frac{i}{2} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[ UV \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{A}{\sigma} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ UV \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{A}{\sigma} \right) \right] \right\} \\ & + \frac{1}{4k} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial}{\partial y} \left[ (c_g - V^2) \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{A}{\sigma} \right) \right] + 2i \frac{\partial}{\partial x} \left[ \sigma V \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{A}{\sigma} \right) \right] \right\} \\ & - \frac{\beta}{4} \left\{ 2i\omega U \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{A}{\sigma} \right) + 2i\sigma V \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{A}{\sigma} \right) - 2UV \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{A}{\sigma} \right) \right\} \\ & - \frac{\beta}{4} \frac{\partial}{\partial y} \left[ (c_g - V^2) \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{A}{\sigma} \right) \right] + \frac{i}{4k} \left[ \frac{\partial}{\partial y} (\omega V) + 3 \frac{\partial}{\partial x} (\omega U) \right] \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{A}{\sigma} \right) \\ & + \frac{\gamma A}{2} + \frac{i\sigma}{2} G(|A|, kh)A = 0 \quad (19) \end{aligned}$$

siendo:

$$\beta = \frac{1}{k^2} \frac{\partial k}{\partial x} + \frac{1}{2k^2(c c_g - U^2)} \frac{\partial}{\partial x} [k(c c_g - U^2)]$$

y donde  $A = A(x, y)$  es la función compleja de la amplitud de la onda,  $G(|A|, kh)$  es una función no lineal con la amplitud,  $Ur = (U, V)$  es el vector velocidad de la corriente,  $\omega$  es la frecuencia angular absoluta,  $\sigma$  es la frecuencia angular intrínseca,  $c$  es la celeridad de fase o de la onda,  $c_g$  es la celeridad de grupo,  $k$  es el número de onda y  $\bar{k}$  es el número de onda de referencia medio a lo largo del eje  $y$ . Esta ecuación es la discretizada en el modelo monocromático Oluca-MC. El desarrollo y las operaciones que se requieren para llegar hasta ella son muy extensos y no se ha creído apropiado describirlos detalladamente. Dicho desarrollo puede encontrarse en las referencias: Kirby and Dalrymple (1985), y Kirby (1986a).

Aplicando el principio "Minimax", la ecuación (19) ha sido extendida por Kirby (1986c), permitiendo ángulos de propagación mayores con respecto al eje  $x$ . La ecuación extendida que gobierna la refracción, difracción y asomeramiento de una componente discreta con frecuencia  $j$  y dirección  $l$ , es la siguiente:

$$\begin{aligned} & (C_{gj} + U)(A_{jl})_x - 2\Delta_1 V(A_{jl})_y + i(\bar{k}_j - a_0 k_j)(C_{gj} + U)A_{jl} \\ & + \left\{ \frac{\sigma_j}{2} \left( \frac{C_{gj} + U}{\sigma_j} \right)_x - \Delta_1 \sigma_j \left( \frac{V}{\sigma_j} \right)_y \right\} A_{jl} + i\Delta'_j \left[ \left( (CC_g)_j - V^2 \right) \left( \frac{A_{jl}}{\sigma_j} \right)_y \right]_y \\ & - i\Delta_1 \left\{ \left[ UV \left( \frac{A_{jl}}{\sigma_j} \right)_y \right]_x + \left[ UV \left( \frac{A_{jl}}{\sigma_j} \right)_x \right]_y \right\} \\ & + \frac{-b_1}{k_j} \left\{ \left[ \left( (CC_g)_j - V^2 \right) \left( \frac{A_{jl}}{\sigma_j} \right)_y \right]_{yx} + 2i \left( \sigma_j V \left( \frac{A_{jl}}{\sigma_j} \right)_y \right)_x \right\} \\ & + b_1 \beta_j \left\{ 2i\omega_j U \left( \frac{A_{jl}}{\sigma_j} \right)_x + 2i\sigma_j V \left( \frac{A_{jl}}{\sigma_j} \right)_y - 2UV \left( \frac{A_{jl}}{\sigma_j} \right)_{xy} + \left[ \left( (CC_g)_j - V^2 \right) \left( \frac{A_{jl}}{\sigma_j} \right)_y \right]_y \right\} \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
 & -\frac{i}{k_j} b_1 \left\{ (\omega_j V)_y + 3(\omega_j U_x) \right\} \left( \frac{A_{jl}}{\sigma_j} \right)_x - \Delta_2 \left\{ \omega_j U \left( \frac{A_{jl}}{\sigma_j} \right)_x + \frac{1}{2} \omega_j U_x \left( \frac{A_{jl}}{\sigma_j} \right) \right\} \\
 & + i k_j \omega_j U (a_0 - 1) \left( \frac{A_{jl}}{\sigma_j} \right) + \alpha A_{jl} + \frac{\gamma_i}{2} A_{jl} + \frac{i \sigma_j}{2} k_j^2 D_j |A_{jl}|^2 A_{jl} = 0 \quad (20)
 \end{aligned}$$

donde  $\alpha$  y  $\gamma$  son los coeficientes de disipación de energía por rotura del oleaje y fricción por el fondo respectivamente.

$$\sigma_j = \omega_j - k_j U; \quad \beta_j = \frac{(k_j)_x}{k_j^2} + \frac{(k_j ((CC_g)_j - U^2))_x}{2k_j^2 ((CC_g)_j - U^2)} \quad (21)$$

$$\Delta_1 = a_1 - b_1; \quad \Delta_2 = 1 + 2a_1 - 2b_1; \quad \Delta'_j = a_1 - b_1 \frac{\bar{k}_j}{k_j} \quad (22 \text{ a})$$

$$D_j = \frac{\cosh(4k_j h) + 8 - 2 \tanh^2(k_j h)}{8 \sinh^4(k_j h)} \quad (22 \text{ b})$$

Los coeficiente  $a_0$ ,  $a_1$  y  $b_1$  se escogen con base en el criterio de mínimo error aplicando el principio "Minimax". Siguiendo Greene (1984), Kirby (1986c) describe la aplicación del principio de "Minimax" en problemas de superficie de ondas, las tablas con resultados de los coeficientes pueden ser consultados en dicha referencia. Los coeficientes dependen de un ancho de apertura permitido dependiendo de la dirección de las olas. Algunos de estos coeficientes se definen como:

Tabla 1. Rango de coeficientes  $a_0$ ,  $a_1$  y  $b_1$  de acuerdo con aproximaciones parabólicas.

Aproximaciones parabólicas	$a_0$	$a_1$	$b_1$
Simple: Radder (1979)	1	-0.50	0.00
Padde (1,1): Booij (1981), Kirby (1986c)	1	-0.75	-0.25
Minimax 70: Kirby (1986c)	0.994733030	-0.890064831	-0.451640568



Kirby (1986c) encontró que para rangos máximos (Minimax 70°) se obtienen resultados razonables dentro de los ángulos que típicamente se utilizan, pero mantiene reservas en cuanto a su aplicación en modelos numéricos, dado que todavía esta aproximación no ha sido suficientemente comprobada. Kirby (1994), recomienda el uso de Padde (1,1) el cual se ha implementado en el modelo espectral Oluca-SP, obteniéndose resultados razonables dentro de los  $\pm 55^\circ$  con el eje x.

### **3.2.6. Dispersión del oleaje debida a la altura de ola significativa**

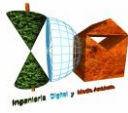
Desde que se presentaron los primeros modelos de refracción y difracción combinadas, se sigue investigando el desarrollo de estos modelos originales, basados en teoría lineal, para que den respuesta a varios fenómenos físicos reales no cubiertos todavía por dicha teoría. Entre los fenómenos que son de particular importancia destaca la no linealidad de las ondas, que provoca un aumento de la celeridad por efecto de la dispersión debida a la amplitud, y no sólo debida a la frecuencia, como ocurre en ondas lineales. Se ha demostrado, Kirby and Dalrymple (1983a), (1984) que la consideración de fenómenos no lineales puede provocar una clara distorsión de los resultados a partir de unas pocas longitudes de onda.

Para representar la no linealidad en los modelos de propagación se utilizan dos aproximaciones. La primera aproximación, sugerida inicialmente por Booij (1981), consiste en utilizar una relación de dispersión empírica que modele la dispersión por amplitud en aguas someras y que tienda a la relación de dispersión frecuencial en aguas profundas. Esta técnica tiene la ventaja de tener, al menos, una descripción empírica del comportamiento en aguas someras, pero tiene el inconveniente de linealizar los resultados en aguas profundas.

La segunda consiste en modificar el modelo lineal de Kirby and Dalrymple (1983a), incluyendo un término proporcional al cubo de la amplitud de la ola que representa la distorsión del número de onda resultante de los efectos de tercer orden en la teoría de Stokes. Esta aproximación presenta la ventaja de tener una base analítica válida, pero tiene el claro inconveniente de no ser adecuada para aguas poco profundas.

#### **3.2.6.1. Relación de dispersión empírica**

La teoría de Stokes para aguas profundas e intermedias ofrece la siguiente relación de dispersión:



$$\sigma^2 = gk(1 + \varepsilon^2 D) \tan h(kh) \quad (23)$$

donde:

$$\varepsilon = k|A| \quad \text{y} \quad D = \frac{\cosh(4kh) + 8 - 2 \tanh^2(kh)}{8 \sinh^4(kh)} \quad (24)$$

Esta formulación es válida para números de Ursell  $Ur < O(1)$  con  $Ur$  definido como:

$$Ur \equiv \frac{|A|}{h} \frac{1}{(kh)^2} \quad (25)$$

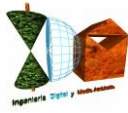
Dicha restricción no se cumple en aguas someras, donde  $kh \rightarrow 0$  con  $\frac{|A|}{h}$  pequeño pero finito. Además, la singularidad en  $D$  es muy grande e invalida los resultados en aguas poco profundas:

$$kh \rightarrow 0 \quad D \approx \frac{9}{8} \frac{1}{(kh)^4} \quad (26)$$

En aguas poco profundas, Hedges (1976) propuso una modificación de la relación de dispersión lineal para modelar la dispersión por amplitud:

$$\sigma^2 = gk \tan h[k(h + |A|)] \quad (27a)$$





que en aguas poco profundas y para  $\frac{|A|}{h}$  pequeño, tiende a:

$$\sigma^2 = g k^2 (h + |A|) \quad (27b)$$

o, lo que es equivalente, a:

$$c = \sqrt{g(h + |A|)} \quad (27c)$$

que representa la velocidad de propagación de una onda solitaria de altura  $H = |A|$ .

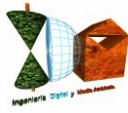
En aguas profundas, la relación de Hedges (1976) tiende a la relación lineal (4), ya que  $\frac{|A|}{h} \rightarrow 0$  debido al aumento de la profundidad.

La no adecuación de una relación de dispersión empírica en aguas someras para modelar efectos no lineales en aguas intermedias, unida a la invalidez de la teoría de Stokes en aguas poco profundas, condujo a Kirby & Dalrymple (1986b) a buscar una relación de dispersión que fuera capaz de predecir la celeridad de la onda desde aguas profundas a aguas someras. Con el fin de incorporarla en modelos de propagación de ondas, propusieron la siguiente relación de dispersión:

$$\sigma^2 = gk(1 + f_1 \varepsilon^2 D) \tanh(kh + f_2 \varepsilon) \quad (28)$$

donde  $f_1 = f_1(kh)$  y  $f_2 = f_2(kh)$  son dos funciones arbitrarias, y  $\varepsilon$  y  $D$  están definidos como en (24). El modelo presentado se construye escogiendo expresiones adecuadas para las funciones  $f_1$  y  $f_2$ . En particular se requiere que:

$$f_1(kh) \rightarrow 1 \text{ y } f_2(kh) \rightarrow 0 \text{ cuando } kh \rightarrow \infty \quad (29 a)$$



para recuperar la expresión del modelo de Stokes en aguas profundas e intermedias, mientras que en aguas someras se requiere que:

$$f_1(kh) = O[(kh)^5] \text{ y } f_2(kh) \rightarrow 1 \text{ cuando } kh \rightarrow 0 \quad (29 \text{ b})$$

para evitar la singularidad en  $D$ , de orden  $O|(kh)^{-4}|$ .

Por otro lado, la expresión de Hedges (1976) se obtiene haciendo  $f_1 = 0$  y  $f_2 = 1$  para cualquier valor de  $kh$ .

Con base en las exigencias anteriores, Kirby & Dalrymple (1986b) escogieron los valores de  $f_1$  y  $f_2$  como:

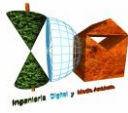
$$f_1(kh) = \tan h^5(kh) \quad (30)$$

$$f_2(kh) = \left[ \frac{kh}{\sin h(kh)} \right]^4 \quad (31)$$

La relación propuesta concuerda adecuadamente con ambas relaciones; la de Stokes en aguas profundas y la de Hedges, (1976) en aguas someras. La variación de la relación de dispersión  $\frac{\sigma^2}{gk}$ :

$$\frac{\sigma^2}{gk} = \frac{\frac{\sigma}{k}}{\frac{g}{\sigma}} = \frac{c}{c_0} \quad (32)$$

En función de  $kh$  para diferentes valores de  $\varepsilon$ , siendo  $c$  la celeridad de la ola y  $c_0$  la celeridad en aguas profundas.



Con el fin de incluir efectos no lineales en la propagación de componentes de energía de un estado de mar, Kirby et al. (1994) propone modificar las relaciones de dispersión aplicadas en ondas monocromáticas (Hedges, ecuación (27a) y modelo híbrido, ecuación (28)). Esta modificación se fundamenta en que los efectos no lineales incrementan su importancia cuando la rotura del oleaje es fuerte.

Dado que la altura de ola significativa  $H_s$ , es importante dentro de los modelos de rotura como se verá más adelante, ésta ha sido incluida en las modificaciones en las relaciones de dispersión.

El modelo Oluca-SP permite las siguientes opciones de ecuaciones de dispersión, para una frecuencia dada  $j$ :

$$\sigma_j^2 = gk_j(1 + \varepsilon_j^2 D_j) \tanh(k_j h) \quad \text{Stokes sin modificar} \quad (33)$$

$$\sigma_j^2 = gk_j \tanh(k_j h + \varepsilon_s) \quad \text{Hedges modificado} \quad (34)$$

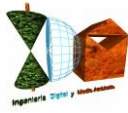
$$\sigma_j^2 = gk_j(1 + f_{1j}\varepsilon_j^2 D_j) \tanh(k_j h + f_{2j}\varepsilon_s) \quad \text{Modelo híbrido modificado, Kirby} \quad (35)$$

donde:

$$\begin{aligned} \varepsilon_j &= k_j |A|_{jl} \\ \varepsilon_s &= k_j H_s / 2 \end{aligned} \quad (36)$$

siendo  $h$  la profundidad en un punto dado del dominio, y  $D_j$ ,  $f_{1j}$  y  $f_{2j}$  los mismos definidos anteriormente, para una frecuencia  $j$ . De estas opciones la (35) cubre un mayor rango de profundidades de agua.





### 3.2.6.2. Modificación del modelo lineal, incluyendo un término en $|A^2|A$

Las ecuaciones parabólicas de Booij (1981) y Radder (1979) son ecuaciones basadas en la ecuación lineal de Berkhoff (1972) y, como tales, no son capaces de reproducir efectos no lineales dependientes de la amplitud de la ola. Los modelos lineales tienden, en general, a calcular por exceso las amplitudes de ola en las proximidades de zonas de concentración de olas y formación de cáusticos, donde el peralte aumenta rápidamente y los efectos no lineales llegan a ser importantes. Esta tendencia puede observarse en la verificación realizada por Berkhoff, Booij & Radder (1982).

Por esta razón, Kirby & Dalrymple (1983a) derivaron una ecuación parabólica para la propagación de ondas ligeramente no lineales "weakly-nonlinear waves" empleando un método de perturbación multiescalar. El desarrollo formal, que puede encontrarse en Kirby & Dalrymple (1983a), utiliza un desarrollo del tipo WKB (Wentzel-Kramers-Brillouin) para el potencial de onda en el contexto de la teoría de Stokes, muy similar al utilizado por Yue & Mei (1980) para el caso de profundidad constante.

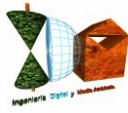
La aproximación parabólica que obtuvieron para la amplitud fue:

$$2ikc_g \frac{\partial A}{\partial x} + 2k(k - \bar{k})c_g A + i \frac{\partial(kc_g)}{\partial x} A + \frac{\partial}{\partial y} c_g \frac{\partial A}{\partial y} - kc_g K' |A|^2 A = 0 \quad (37)$$

con  $k' = k^3 \frac{c}{c_g} D$ ,  $D$  definido como en (24) y  $A$  una función compleja de la amplitud.

Esta ecuación es igual que la de Radder (1979) (sustituyendo  $\phi = i \frac{g}{\sigma} A e^{i\bar{k}x}$ ) excepto por el término no lineal:

$$- kc_g k' |A|^2 A$$



La aproximación realizada para incluir la no linealidad, utilizada en los modelos monocromático Oluca-RD y espectral Oluca-SP, fue objeto de una posterior verificación y sus resultados fueron ampliamente satisfactorios, Kirby & Dalrymple (1984). Un inconveniente que debe considerarse es que en aguas poco profundas la aproximación de Stokes de orden superior a uno no es utilizable ya que el término  $D$  no converge, independientemente de su falta de validez desde un punto de vista físico. Sin embargo, esta limitación se soluciona parcialmente con la relación de dispersión empírica (35).

### 3.2.7. Clima de Oleaje

El proceso de discretización del espectro bidimensional, permite definir componentes de energía a las cuales se les asocia una amplitud compleja  $A_{jl}$ , con una frecuencia  $f_j$  y un ángulo de incidencia  $\theta_l$ . Para determinar las pérdidas de energía asociadas a la rotura del oleaje (ver detalles en la siguiente sección), es necesario definir en cada punto del dominio una altura de ola estadística (altura de ola significativa,  $H_s$  o altura media cuadrática  $H_{rms}$ ). Asumiendo una distribución de alturas de ola de Rayleigh y utilizando la información de las componentes espectrales en cada punto  $(x, y)$  del dominio, la altura de ola significativa se puede estimar como:

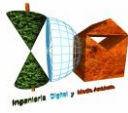
$$H_s(x, y) = \left( 8 \sum_{j=1}^{N_f} \sum_{l=1}^{N_\theta} |A_{jl}(x, y)|^2 \right)^{1/2} \quad (38)$$

y la altura de ola media cuadrática  $H_{rms}$ , como:

$$\sqrt{2} H_{rms}(x, y) = H_s(x, y) \quad (39)$$

También en cada punto  $(x, y)$  del dominio se puede definir el espectro frecuencial  $E(f)$ , como:

$$E(f_j) = \frac{\sum_{l=1}^{N_\theta} |A_{jl}(x, y)|^2}{2(\Delta f_j)} \quad (40)$$



Donde  $j = 1, \dots, N_f$  y  $\Delta f_j =$  ancho de incremento frecuencial para  $f_j$ .

Al objeto de definir el espectro bidimensional en un punto  $(x, y)$  del dominio, el espectro direccional se define dividiendo en 37 rangos de  $5^\circ$  entre  $[\theta = -92.5^\circ$  y  $\theta = 92.5^\circ]$ . Para cada frecuencia, las componentes propagadas poseen un ángulo el cual se ubica en alguno de los 37 rangos direccionales. Posteriormente, la energía es sumada para cada uno de los rangos. El espectro direccional se obtiene como:

$$S(f_j, \theta_k) = \frac{\sum_{l=1}^{z_{jk}} |A_{jl}(x, y)|^2}{2\Delta f_j \Delta \theta} \quad (41)$$

Donde  $k = 1, \dots, 37$ ;  $\Delta \theta = 5^\circ$ ;  $z_{jk} =$  número de componentes en la frecuencia  $j$  que se encuentran en el rango  $k$  de dirección.

La superficie libre  $\eta(x, y)$ , se puede obtener a partir del método de las fases aleatorias, tal como se muestra a continuación:

$$\eta(x, y) = \sum_{j=1}^{N_f} \sum_{l=1}^{N_\theta} \eta_{jl}(x, y) \quad (41 \text{ a})$$

$$\eta(x, y) = \sum_{j=1}^{N_f} \sum_{l=1}^{N_\theta} |A_{jl}(x, y)| \text{sen}(k_j x \cos \theta_{jl} + k_j y \text{sen} \theta_{jl} + \varepsilon_{jl}) \quad (41 \text{ b})$$

donde  $\varepsilon_{jl}$  es una fase aleatoria.

### 3.2.8. Modelado de la disipación de energía

En muchos casos, la simulación realista de la propagación de oleaje requiere la inclusión de efectos de disipación de energía, que introducen una ligera no linealidad. La presencia localizada de disipación de energía en el fondo o en algún punto de la columna de agua provoca la difracción del oleaje, así como su atenuación.





La inclusión de un término de disipación de energía en una ecuación de propagación fue estudiada por Skovgaard, Jonsson & Bertelsen (1975), quienes presentaron un modelo de disipación por fricción de fondo. Siguiendo esta idea, Booij (1981) y posteriormente Dalrymple, Kirby & Hwang (1984) desarrollaron modelos parabólicos incluyendo dicho término de disipación.

Dalrymple, Kirby & Hwang (1984), siguiendo el método empleado por Booij (1981), introdujeron un factor de disipación  $g$  en la ecuación de Berkhoff (1972):

$$\bar{\nabla} (c c_g \bar{\nabla} \phi) + (k^2 c c_g + i\sigma\gamma) \phi = 0 \quad (42)$$

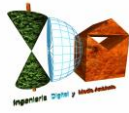
Siguiendo el razonamiento para la obtención de la ecuación parabólica de Radder (1979), separando las componentes incidente y reflejada, se llega a una ecuación parabólica con el término de disipación semejante al de (20):

$$+ \frac{\gamma_j}{2} A_{jl} \quad (43)$$

donde  $\gamma_j$ , es la disipación de la energía para la componente  $j$ , dividida por la energía (sus unidades son tiempo<sup>-1</sup>). Adopta diferentes expresiones dependiendo del origen de la disipación de energía. A continuación se muestran algunos modelos de disipación por superficie, fondo y rotura del oleaje:

#### 3.2.8.1. Capa límite laminar en superficie y fondo

En la superficie libre del agua y en el fondo, se forman sendas capas límite debidas a la acción de la viscosidad. En las superficies contaminadas (con origen natural o no), en las que se forma una película superficial, se produce un importante amortiguamiento del oleaje. Este amortiguamiento depende del valor de la viscosidad del fluido y su valor es, según Phillips (1966):



$$\begin{aligned} \gamma_j = \gamma_{sj} + \gamma_{fj} &= \frac{\sigma_j k_j \sqrt{\frac{\nu}{2\sigma_j}} (1-i)}{\tanh(k_j h)} + \frac{2\sigma_j k_j \sqrt{\frac{\nu}{2\sigma_j}} (1-i)}{\sinh(k_j h)} = \\ &= \frac{2\sigma_j k_j \sqrt{\frac{\nu}{2\sigma_j}} (1 + \cosh^2(k_j h))}{\sinh(2k_j h)} (1-i) \end{aligned} \quad (44)$$

Donde  $\nu = 1.3 \cdot 10^{-6} \cdot \text{m}^2/\text{s}$  es la viscosidad cinemática y  $\nu/2\sigma_j$  representa el espesor de la capa límite.

### 3.2.8.2. Capa límite turbulenta en el fondo

En el campo, las condiciones de oleaje son tales que la capa límite en el fondo es siempre turbulenta. En este caso, la disipación de energía se puede obtener utilizando el coeficiente de fricción de Darcy-Weisbach,  $f$ . Dean and Dalrymple (1984) demostraron que la disipación de energía para esta capa límite, viene dada por la expresión:

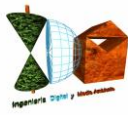
$$\gamma_j = \frac{2\sigma_j f k_j |A_{jl}| (1-i)}{3\pi \sinh(2k_j h) \sinh(k_j h)} \quad (45)$$

con  $f = 4 f_\omega$ , donde  $f_\omega = 0.01$  ( $f_\omega$  es el coeficiente de Darcy-Weisbach para olas).

### 3.2.8.3. Fondos porosos de arena

La mayoría de los fondos son porosos y el oleaje induce un flujo en el interior del lecho. El resultado es un amortiguamiento debido al flujo de Darcy en la arena. Para lechos caracterizados por un coeficiente de permeabilidad dado,  $C_p$ , se puede demostrar que el amortiguamiento viene dado por:

$$\gamma_j = \frac{g k_j C_p (1-i)}{\cosh^2(k_j h)} \quad (46)$$



El coeficiente de permeabilidad,  $C_p$ , tiene unidades de  $(m^2)$  y es del orden de  $4.5 \cdot 10^{-11} m^2$ . Liu and Dalrymple (1984), demostraron que para arenas muy permeables, la amortiguación está en relación inversa con  $C_p$  y que, por lo tanto, debe utilizarse una expresión diferente para  $\gamma$ . Sin embargo, este caso no se suele dar en la naturaleza.

#### 3.2.8.4. Rotura del oleaje

Sin duda, la rotura del oleaje es uno de los fenómenos más significativos de la hidrodinámica costera ya que afecta a diferentes procesos costeros naturales tales como las corrientes litorales y el transporte de sedimentos. La rotura del oleaje, que principalmente se produce en la zona de "surf" al disminuir el calado; también puede producirse en aguas más profundas por peraltamiento de la ola, siendo un fenómeno altamente no lineal y disipativo.

El análisis de la rotura del oleaje es fundamental para un modelo de propagación en zonas costeras y debe servir para determinar la pérdida de energía sufrida. En general, los modelos de disipación del oleaje en rotura pueden clasificarse en dos categorías:

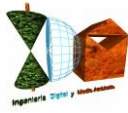
- modelos de disipación asociado a la propagación de bores;
- modelos que determinan la variación espacial de la energía de las olas o de la "acción de onda".

El modelo Oluca-SP permite seleccionar entre tres modelos, dos de la primera categoría (Battjes y Janssen, 1978 y Thornton y Guza, 1983) y otro de la segunda categoría (Winyu y Tomoya, 1998).

Cuando el oleaje se aproxima a profundidades reducidas cercanas a la zona de rotura, domina fundamentalmente el asomeramiento y la refracción debido al contorno del fondo. Se incrementan las velocidades y se genera disipación debido principalmente a la fricción del fondo y percolación.

Dadas las características aleatorias del oleaje en un estado de mar (diferentes amplitudes, períodos y fases), no existe un punto de rotura, sino una zona de rotura donde en cada punto existen olas rotas y no rotas, siendo la turbulencia el principal mecanismo de disipación. Con lo cual, el proceso de disipación de energía del oleaje asociado a un porcentaje de olas rompiendo en una profundidad dada, se encuentra ligado a las propiedades estadísticas del estado de mar en dicho punto (altura de ola significativa,  $H_s$  o altura de ola cuadrática media  $H_{rms}$ ).





El Oluca-SP resuelve numéricamente el sistema mediante avances espaciales en el dominio, en cada paso, propaga todas las componentes de energía, las cuales recompone linealmente para obtener  $H_s$  o  $H_{rms}$  (asociadas a un estado de mar). Siendo esta información estadística, la que se emplea como entrada al modelo de disipación de energía debido a la rotura. El Oluca-SP aplica una aproximación espectral al proceso de rotura del oleaje sin considerar la rotura individual de las componentes propagadas.

Si consideramos un modelo lineal de asomeramiento para una componente de ola de frecuencia  $j$  y dirección  $l$  (Chawla et al., 1998), tenemos:

$$C_{gj} \frac{\partial A_{jl}}{\partial x} + \frac{l}{2} \frac{\partial C_{gj}}{\partial x} A_{jl} = 0 \quad (47)$$

Si incluimos un término de amortiguamiento con el fin de simular la rotura de dicha ola, se obtiene la siguiente ecuación de evolución:

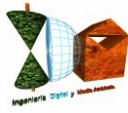
$$C_{gj} \frac{\partial A_{jl}}{\partial x} + \frac{l}{2} \frac{\partial C_{gj}}{\partial x} A_{jl} = -\alpha A_{jl} \quad (48)$$

obteniéndose la siguiente ecuación de energía:

$$\frac{\partial \left( C_{gj} |A_{jl}|^2 \right)}{\partial x} = -2\alpha |A_{jl}|^2 \quad (49)$$

Sumando componentes a lo largo de las frecuencias y direcciones, obtenemos:

$$\frac{\partial \left( \sum_{j=1}^{N_f} C_{gj} \sum_{l=1}^{N_\theta} |A_{jl}|^2 \right)}{\partial x} = -2\alpha \sum_{j=1}^{N_f} \sum_{l=1}^{N_\theta} |A_{jl}|^2 \quad (50)$$



Definiendo a partir de una distribución de altura de olas de Rayleigh, la altura de ola media cuadrática  $H_{rms}$ :

$$H_{rms}^2 = 4 \sum_{j=1}^{N_f} \sum_{l=1}^{N_\theta} |A_{jl}|^2 \quad (51)$$

Sustituyendo (51) en (50), obtenemos:

$$\frac{\partial \left( \sum_{j=1}^{N_f} C_{gj} \sum_{l=1}^{N_\theta} |A_{jl}|^2 \right)}{\partial x} = -\frac{1}{2} \alpha H_{rms}^2 \quad (52)$$

Por otro lado, como se verá más adelante, tanto los modelos de disipación de energía para ondas monocromáticas, como los modelos de oleaje, plantean un balance de flujo de energía de la siguiente forma:

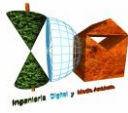
$$\frac{\partial EC_g}{\partial x} = -\bar{D} \quad (53)$$

Donde  $D$  es la tasa media temporal de disipación de energía por unidad de área, debido a la rotura del oleaje, y  $EC_g$  el flujo de energía expresado como:

$$EC_g = \frac{1}{2} \rho g \sum_{j=1}^{N_f} C_{gj} \sum_{l=1}^{N_\theta} |A_{jl}|^2 \quad (54)$$

Sustituyendo (54) en (53) y luego ésta en (52), se obtiene la siguiente relación:

$$\alpha = \frac{4\bar{D}}{\rho g H_{rms}^2} \quad (55)$$



Los modelos de disipación de energía del tipo (53), pueden ser incluidos dentro de las ecuaciones del modelo parabólico mediante el término  $\alpha A_{jl}$  en (20), aplicando la expresión de  $\alpha$  definida en (55).

### 3.2.8.5. Modelo de disipación de Battjes y Janssen, 1978 (MBJ)

Este modelo predice la transformación de la altura de ola media cuadrática  $H_{rms}$  debido a la disipación por rotura del oleaje. Se fundamenta en la hipótesis que la distribución de las alturas de ola, asociada a un  $H_{rms}$ , son del tipo Rayleigh. Dicha distribución de alturas de ola es truncada, a partir de una altura de ola máxima que permite una profundidad dada. Esta energía truncada permite calcular la tasa de energía media a ser disipada,  $\bar{D}$ .

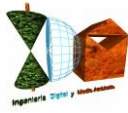
Dentro de este modelo deben distinguirse dos aspectos: La tasa de disipación por rotura de una sola onda independiente, y la probabilidad de ocurrencia de olas rompiendo de un estado de mar, en una profundidad dada. En cuanto a la primera, tal como lo plantean muchos autores (por ejemplo, Stoker, 1957; Le Méhauté, 1962; Battjes et al., 1978), la energía disipada en el proceso de rotura de una onda se asocia a la energía disipada por un "bore" en flujo uniforme. Esto permite definir una relación del orden de magnitud de la tasa de disipación de energía por unidad de área  $D$ :

$$D \approx 1/4 f \rho g \frac{H_b^3}{h_b} \quad (56)$$

Donde  $f$  es la frecuencia de la onda,  $\rho$  la densidad de masa del agua,  $g$  la aceleración de la gravedad,  $H_b$  la altura de ola (cresta-seno) cuando rompe y  $h_b$  la profundidad donde rompe la onda.

En cuanto al segundo aspecto, dado que la anterior tasa de disipación se aplica para una onda monocromática, su extensión a un oleaje (escrito como  $D$ ) debe tener en cuenta la aleatoriedad de las olas y el hecho de que no todas las olas que pasan por un punto rompen.





Por lo tanto, el modelo MBJ asume como hipótesis que:

1. La frecuencia de pico asociada al espectro de energía de entrada  $f_p$ , se usa como frecuencia  $f$  en (56). Lo que presupone que la disipación es independiente de la frecuencia.
2.  $H_b$  es la máxima altura de onda monocromática que pasa sin romper, en un punto con profundidad,  $h_b$ . El MBJ aplica una expresión del tipo Miche (1954) para definir  $(H_b/h_b)$ , como se verá más adelante.
3.  $H_b/h_b \sim 0$  (1) en la zona de rompientes.
4. La distribución de alturas de ola en la zona de rotura, se asume del tipo Rayleigh. Ésta al ser truncada para  $H > H_b$  permite definir una expresión para la fracción de olas rotas  $Q_b$ , en una determinada profundidad.
5. Todas las olas rotas tienen una altura de ola igual a  $H_b$ .
6. Solo se considera el balance de flujo de energía en la dirección  $x$  (53).
7. No tiene en cuenta la recomposición de olas en perfiles con barras.

Con lo cual, la tasa de disipación media de un oleaje  $D$  se plantea como:

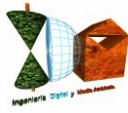
$$\bar{D} = \frac{\alpha_1}{4} Q_b f_p \rho g H_b^2 \quad (57)$$

Donde  $\alpha_1$  es una constante de orden uno. Si no tenemos en cuenta en (57)  $Q_b$ , ésta sería la disipación de una onda de altura  $H_b$ . Cuando se incluye  $Q_b$  ( $Q_b$  = número de olas rotas en un punto / número de olas totales), estamos obteniendo la disipación total dividida entre todas las componentes, con lo cual,  $\bar{D}$  es una disipación media asociada a cada una de las componentes del oleaje.

### 3.2.8.6. Altura de ola de rotura, $H_b$

El MBJ aplica el modelo de Miche (1954), con una ligera modificación al incluir el parámetro de rotura  $\gamma$ :

$$H_b = 0.88 k_p^{-1} \tanh \left( \frac{\gamma k_p h}{0.88} \right) \quad (58)$$



Donde  $k_p$  es el número de onda definido a partir de la relación de dispersión lineal, con la frecuencia pico inicial ( $f_p$ ),  $h$  es la profundidad local del agua y  $g$  la relación de altura de ola y profundidad del agua ( $\gamma=H_b/h$ ). Obsérvese en (58) que para profundidades muy reducidas ( $h$  pequeño,  $H_b \sim \gamma h$ ).

Battjes y Stive (1985) utilizando datos de campo y ensayos de laboratorio de pequeña y gran escala, calibraron el parámetro  $g$  en (58) que mejor ajustaba  $D$ , para esto fijaron  $\alpha_1 = 1$  en (57). La expresión que obtuvieron fue la siguiente:

$$\gamma = aa1 + bb1 \tanh(33S_o) \quad (59)$$

Nairn (1990) incluye una serie de datos de bajo peralte de ola, medidos en Leadbetter beach, California, obteniendo el siguiente ajuste:

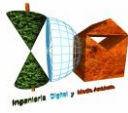
$$\gamma = 0.39 + 0.56 \tanh(33S_o) \quad (60)$$

En el capítulo 5 de validación del Oluca-SP, se prueban estas dos expresiones, obteniéndose resultados muy similares. A partir de estas pruebas, se ha dejado (60) como fija dentro del modelo.

#### 3.2.8.7. Fracción local de olas rotas, $Q_b$

Tal y como se ha indicado dijo anteriormente, el MBJ asume que la función de probabilidad de distribución de altura de olas (rotas o no rotas) en un punto dado, es del tipo Rayleigh. En aguas reducidas, la distribución de Rayleigh se trunca para  $H > H_b$ , siendo necesario asumir una distribución de probabilidad de la energía de olas rotas. Battjes y Janssen asumen como hipótesis que todas las olas rotas tienen una altura de ola igual a  $H_b$ , pero con una función delta en  $H_b$  que representa las olas rotas. Con esta hipótesis puede ser demostrado que la probabilidad de ocurrencia de olas rotas,  $Q_b$ , está relacionada con  $H_{rms}$  y  $H_b$  (ver detalles en Battjes y Janssen, 1978), obteniéndose la siguiente expresión:

$$\frac{1 - Q_b}{- \ln Q_b} = \left( \frac{H_{rms}}{H_b} \right)^2 \quad (61)$$



$Q_b$  puede ser resuelta en esta relación aplicando el método Newton-Raphson. En (61) cuando el oleaje representado por  $H_{rms}$  es muy pequeño con respecto a la altura de ola máxima local  $H_b$ , entonces  $Q_b \sim 0$  lo que indica que no hay olas rompiendo, caso que ocurre en grandes profundidades. Si por el contrario nos acercamos a profundidades muy reducidas,  $H_b$  es pequeño frente a  $H_{rms}$ , y entonces  $Q_b \sim 1$ , lo que significa que todas las olas rompen.

A efectos prácticos, sustituyendo (61) en (57), es posible sustituir  $H_b$  por  $H_{rms}$ , obteniéndose la siguiente expresión:

$$\bar{D} = \frac{\alpha_1}{4} f_p \rho g H_{rms}^2 \left( \frac{-\ln Q_b}{1 - Q_b} \right) Q_b \quad (62)$$

De nuevo si sustituimos esta expresión en (55), obtenemos el coeficiente  $\alpha$  de fricción que aplica el modelo parabólico, para cada una de las componentes de energía propagadas con (20), donde la expresión  $\alpha$  es:

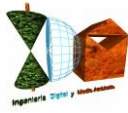
$$\alpha = \alpha_1 f_p \left[ \frac{-\ln Q_b}{1 - Q_b} \right] Q_b \quad (63)$$

Al ser  $\alpha \neq f(f)$ , implica que todas las componentes disipan por igual, hipótesis que se hace dado que el modelo no incluye interacción onda-onda. Algunos autores como (Kaihatu et al., 1995 y Kirby et al., 1996), han propuesto relaciones de  $\alpha$  como una función de la frecuencia al cuadrado, con el fin de incluir la interacción onda-onda. Dado que estas relaciones no han sido debidamente contrastadas, no han sido incluidas dentro del modelo.

El proceso de cálculo de la disipación es el siguiente:

1. Dada la frecuencia pico  $f_p$ , y una profundidad local, se determina  $H_b$  de (58).
2. Con  $H_{rms}$  recompuesta a partir de las componentes de energía aplicando (38) y (39) y  $H_b$ , se obtiene la fracción de olas rotas  $Q_b$  en (61).





3. Se calcula  $a$  de (63) y se reincorpora dentro del modelo parabólico (20), con el cual se propagan cada una de las componentes del espectro.

Junto a las hipótesis planteadas anteriormente, es necesario incluir algunas hipótesis que se asumieron al incorporar este modelo en el OLUCA.-SP:

1. El Oluca-SP asume que el coeficiente  $\alpha$  en (63) es constante para todas las frecuencias de las componentes de energía, debido a que el modelo Oluca-SP es lineal y no incluye la interacción onda-onda.
2. El Oluca-SP está orientado a la propagación de oleajes “swell”, dado que no se ha modificado el MBJ para tener en cuenta efectos direccionales, únicamente se considera el cambio de flujo de energía en la dirección principal de propagación  $x$ .
3. El MBJ no tiene en cuenta la recomposición de las olas en zonas posteriores a barras, sin embargo, en la práctica, un incremento en la profundidad del agua causa que la disipación decrezca.

#### 3.2.8.8. Modelo de disipación Thornton y Guza (1983) (MTG)

Este modelo es similar al MBJ, se fundamenta en la similitud de la disipación de energía debido a la rotura del oleaje con la disipación de un “bore”, y en que la distribución de alturas de ola en un punto es del tipo Rayleigh.

El MTG aplica una relación de  $D$  similar a la (56), la cual aplicada a una onda monocromática, aparece como:

$$D \approx \frac{1}{4} f \rho g \frac{(BH)^3}{h} \quad (64)$$

donde  $B$  es un parámetro del  $0(1)$  asociado al tipo de rotura ( $B \sim 1$  la rotura es similar a la disipación del “Bore”,  $B < 1$  rotura en Spilling, y  $B > 1$  rotura en voluta).



La extensión de esta relación de una onda monocromática a la disipación media por rotura en un oleaje aleatorio ( $\bar{D}$ ), supone las siguientes hipótesis:

1. La frecuencia en (64) es la asociada a  $f_p$ , asumiendo de nuevo que la disipación media de todas las componentes en un punto dado, es constante.
2. La distribución de alturas de ola en la zona de rotura es del tipo Rayleigh.
3. A diferencia del MBJ, este modelo propone una función empírica de distribución de alturas de olas rotas  $P_b(H)$ , la cual depende de  $H_{rms}$ ,  $h$  y  $\gamma=0.42$  (ver detalles en Thornton y Guza, 1983). Esta función permite definir una rotura y disipación diferente para cada componente (no todas las olas grandes están rompiendo como ocurría con el MBJ para  $H > H_b$ ) y por otro lado, no es necesario definir una altura de ola máxima de rotura  $H_b$ .
4. Solo considera balance de flujo de energía en la dirección  $x$  (53).
5. No tiene en cuenta la recomposición de olas cuando aumenta la profundidad en la dirección de la propagación.

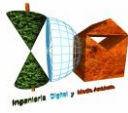
La expresión para ( $\bar{D}$ ) del MTG es:

$$\bar{D} = \frac{B^3}{4h} \rho g f_p \int_0^{\infty} H^3 P_b(H) dH \quad (65)$$

Desarrollando matemáticamente esta expresión, se obtiene:

$$\bar{D} = \frac{3\sqrt{\pi}}{16} \rho g \frac{B^3 f_p}{\gamma^4 h^5} H_{rms}^7 \quad (66)$$

Stive (1984) afirma que la disipación similar al bore subestima la disipación por rotura entre un 30% y 50%, y recomienda para ensayos de laboratorio  $B=0.8$  y campo  $B=1.5$ . Posteriormente, Mase y Kirby (1992), recomiendan para las constantes  $B$  y  $\gamma$  valores de 1 y 0.6 respectivamente. A partir de las pruebas del modelo en el capítulo 5, se concluyó que  $B = 1.0$  y  $\gamma = 0.6$  representan bastante bien la propagación en laboratorio y campo. Sustituyendo (66) en (55), se obtiene el parámetro de disipación  $\alpha$  aplicado en (20):



$$\alpha = \frac{3\sqrt{\pi}}{4} \frac{f_p B^3}{\gamma^4 h^5} H_{rms}^5 \quad (67)$$

Al igual que la implementación del MBJ en el Oluca-SP, el MTG asume las mismas tres hipótesis anteriormente expuestas.

### 3.2.8.9. Modelo de disipación de Winyu y Tomoya (1998) (MWT)

Este modelo a diferencia de los anteriores, no asume disipación de energía por rotura similar a la del “bore”. El MWT asume un modelo de disipación similar al de Dally (1992), donde  $D$  es proporcional a la diferencia entre el flujo de energía local de una ola rompiendo y el flujo de energía estable. La diferencia es que el MWT no aplica la disipación propagando ola a ola, dado que computacionalmente es inviable, en este modelo incorporan la fracción de olas rotas  $Q_b$  (la misma de Battjes et al., 1978).

La expresión para la disipación media de energía debido a la rotura del oleaje  $D$  se expresa como:

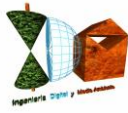
$$\bar{D} = \frac{K_5 Q_b C_p}{h} [E_m - E_s] \quad (68)$$

donde:

$$E_m = \frac{1}{8} \rho g H_{rms}^2 \quad (69)$$

$$E_s = \frac{1}{8} \rho g H_e^2 = \frac{1}{8} \rho g (\Gamma_e h)^2 \quad (70)$$

$K_5$  es una constante proporcional,  $C_p$  es la velocidad de fase asociada a la frecuencia pico  $f_p$  del espectro,  $h$  es la profundidad local del agua,  $E_m$  es el flujo medio de energía local,  $E_s$  es el flujo medio de energía estable,  $H_e$  es la altura de ola estable y  $\Gamma_e$  es el factor de estabilidad de ola para oleaje irregular.



Reemplazando (69) y (70) en (68), se obtiene la siguiente expresión:

$$\bar{D} = \frac{K_5 Q_b C_p \rho g}{8h} [H_{rms}^2 - (\Gamma_e h)^2] \quad (71)$$

Donde el factor  $\Gamma_e$  es definido de forma empírica, como:

$$\Gamma_e = \exp \left[ K_6 \left( -0.36 - 1.25 \frac{h}{\sqrt{L_p H_{rms}}} \right) \right] \quad (72)$$

$K_6$  es un coeficiente de ajuste,  $L_p$  es la longitud de onda asociada a la frecuencia pico  $f_p$ . Los límites para  $\Gamma_e$  se definen como: ( $\Gamma_e = 0.02$  para  $\frac{h}{\sqrt{L_p H_{rms}}} > 1,6$  y  $\Gamma_e = 0,52$  para  $\frac{h}{\sqrt{L_p H_{rms}}} < 0,04$ ).

La fracción de olas rotas  $Q_b$  se define como en (61), pero la altura de ola de rotura  $H_b$  es calculada aplicando el criterio de rotura de Goda (1970):

$$H_b = K_7 L_o \left\{ 1 - \exp \left[ -1.5 \frac{\pi h}{L_o} (1 + 15m^{4/3}) \right] \right\} \quad (73)$$

Donde  $K_7$  es un coeficiente de ajuste,  $L_o$  es la longitud de onda en profundidades indefinidas y asociada a  $f_p$ , y  $m$  la pendiente del fondo.

Winyu y Tomoya (1998) calibraron el modelo para determinar los valores óptimos  $K_5$ ,  $K_6$  y  $K_7$ . La calibración fue llevada a cabo con datos de 128 experimentos de gran escala del SUPERTANK (Kraus y Smith, 1994). Las pruebas indicaron que  $K_5 = 0.10$ ,  $K_6 = 1.60$  y  $K_7 = 0.10$  dan un buen ajuste entre las alturas de ola media cuadráticas medidas y calculadas. El modelo se verificó con éxito en modelos de pequeña escala (Smith y Kraus, 1990), datos de campo del proyecto DELILAH (Smith et al., 1993), datos de campo de Thornton y Guza (1986) y las pruebas realizadas que se detallarán más adelante en el apartado de comprobaciones sobre el modelo Oluca SP.



En cuanto a su implementación dentro del Oluca-SP, se asumieron las mismas hipótesis de los modelos previos. Reemplazando (71) en (55) se obtiene la expresión de  $\alpha$  en (20), como:

$$\alpha = \frac{K_5 C_p Q_b}{2h} \left[ 1 - \left\{ \frac{\Gamma_\epsilon h}{H_{rms}} \right\}^2 \right] \quad (74)$$

### 3.2.8.10. Zonas de tierra

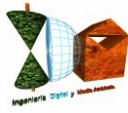
Las grandes islas que cortan la superficie libre y las costas que puedan tener zonas de rotura se tratan mediante la técnica de la “película delgada” de Dalrymple, Kirby y Mann (1984). Este procedimiento permite el cálculo sencillo de las alturas de ola alrededor de islas de forma arbitraria, reemplazando las islas por bajos extremadamente someros (1 mm). La rutina de disipación reduce las alturas de ola sobre el bajo a menos de un milímetro, de manera que la energía que pasa por encima del bajo para las distintas componentes de energía resulta despreciable. De esta manera, el Oluca-SP no distingue desde el punto de vista computacional las islas de las áreas de mayor profundidad, obteniéndose sin embargo como resultado la influencia de la isla sobre el oleaje.

### 3.2.9. Tensores de radiación debido al oleaje irregular

Los tensores de radiación debida a un oleaje irregular se calculan con base en los tensores que generan cada una de las componentes de energía. Dichas componentes se propagan a un ángulo  $\theta$  con el eje  $x$  y la suma lineal de todas éstas en un punto del dominio, determinaron las siguientes expresiones de tensores de radiación:

$$S_{xx}(x, y) = \frac{1}{2} \rho g \sum_{j=1}^{N_f} \sum_{l=1}^{N_\theta} |A_{jl}|^2 \left[ n_j (1 + \cos^2 \theta_{jl}) - \frac{1}{2} \right] \quad (75)$$

$$S_{yy}(x, y) = \frac{1}{2} \rho g \sum_{j=1}^{N_f} \sum_{l=1}^{N_\theta} |A_{jl}|^2 \left[ n_j (1 + \sin^2 \theta_{jl}) - \frac{1}{2} \right] \quad (76)$$



$$S_{xy}(x, y) = \frac{1}{4} \rho g \sum_{j=1}^{N_f} \sum_{l=1}^{N_\theta} |A_{jl}|^2 n_j \sin(2\theta_{jl}) \quad (77)$$

Donde  $S_{xx}$  es el tensor de radiación actuando en el plano  $x$  a lo largo del eje  $x$ ;  $S_{yy}$  es el tensor de radiación actuando en el plano  $y$  a lo largo del eje  $y$ ;  $S_{xy}$  es el tensor de radiación actuando sobre el plano  $y$  a lo largo del eje  $x$  (por simetría  $S_{xy} = S_{yx}$ );  $n_j$  es la relación de la velocidad de grupo  $C_{gj}$  con respecto a la velocidad de fase  $C_j$  de la componente frecuencial  $j$ ;  $n_j$  es dada en términos del número de onda  $K_j$  y la profundidad local de agua  $h$ , como:

$$n_j = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{2K_j h}{\sinh(2k_j h)} \right) \quad (78)$$

Con el fin de definir un ángulo medio  $\bar{q}$  del espectro en cada punto  $(x, y)$  del dominio, el Oluca-SP estima  $\bar{q}$  con base en la dirección media del tensor  $S_{xy}$  calculado con (77), la frecuencia pico y la altura de ola significativa en el punto. El ángulo  $\bar{\theta}$  se define como:

$$\bar{\theta} = \frac{1}{2} \arcsen \left( \frac{2S_{xy}}{E n_p} \right) \quad (79)$$

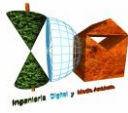
Donde  $n_p$  está asociada a la frecuencia pico  $f_p$ . Asumiendo una distribución de alturas de ola de Rayleigh, la altura de ola significativa  $H_s$  y la energía del oleaje se definen como:

$$H_s^2 = 8 \sum_{j=1}^{N_f} \sum_{l=1}^{N_\theta} |A_{jl}|^2 = 2H_{rms}^2 \quad (80)$$

$$E = \frac{1}{2} \rho g \sum_{j=1}^{N_f} \sum_{l=1}^{N_\theta} |A_{jl}|^2 \quad (81)$$

Reemplazando (80) en (81) se encuentra que:

$$E = \frac{1}{16} \rho g H_s^2 = \frac{1}{8} \rho g H_{rms}^2 \quad (82)$$



Que al sustituir esta expresión en (79), se obtiene la relación  $\theta$  que calcula el Oluca-SP:

$$\bar{\theta}(x, y) = \frac{1}{2} \arcsen \left[ \frac{32S_{xy}}{\rho g H_s^2 n_p} \right] \quad (83)$$

### 3.2.10. Espectro bidimensional de entrada

El oleaje asociado a un estado de mar se define a partir de un espectro bidimensional ( $S$ ), el cual se localiza en el contorno exterior del dominio (mar adentro), dicho espectro se compone de un espectro frecuencial ( $E$ ) y una función de dispersión dirección ( $D$ ), tal como se muestra a continuación:

$$S(f, \theta) = E(f, h) \cdot D(\theta) \quad (84)$$

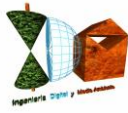
#### 3.2.10.1. Espectro frecuencial TMA (Bouws et al., 1985)

El modelo Oluca-SP permite dos maneras de definir el espectro frecuencial, una mediante la lectura de un archivo externo, y otra a partir de un espectro TMA (Texel Marsen Arsloe). El espectro TMA ( $E_{TMA}$ ) se aplica en zonas cercanas a la costa donde las profundidades son relativamente poco profundas y las olas son afectadas por el fondo, se define a partir de un espectro JONSWAP ( $E_{JON}$ ), el cual es modificado por una función adimensional de la profundidad  $F_k$  (Hughes, 1984), siendo su expresión como se muestra a continuación:

$$E_{TMA}(f, h) = E_{JON}(f) \cdot \Phi_k(\omega_h) \quad (85)$$

con:

$$E_{JON}(f) = E_p(f) \phi_{pm} \left( \frac{f}{f_p} \right) \phi_j(f, f_p, \gamma, \sigma) \quad (86)$$



$$E_p = \alpha g^2 (2\pi)^{-4} f^{-5}$$

$$\phi_{pm} = \exp \left[ \frac{-5}{4} \left( \frac{f}{f_p} \right)^{-4} \right]$$

$$\phi_j = \exp \left[ \ln(\gamma) \exp \left( - \frac{(f - f_p)^2}{2\sigma^2 f_p^2} \right) \right]$$

$$\sigma = \begin{cases} 0.07 & f \leq f_p \\ 0.09 & f > f_p \end{cases}$$

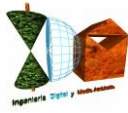
$$\Phi_k = \begin{cases} 0.5\omega_h^2 & \omega_h \leq 1 \\ 1.0 & \omega_h \geq 2 \\ 1 - 0.5(2 - \omega_h)^2 & 1 < \omega_h < 2 \end{cases} \quad (87)$$

donde  $f$  es la frecuencia (Hz),  $f_p$  la frecuencia pico,  $g$  es la aceleración de la gravedad,  $\alpha$  la constante de Phillips, que se escala para obtener la altura de ola media cuadrática,  $\gamma$  es un factor que define la anchura del espectro ( $\gamma \sim 10$  para oleajes Swell;  $\gamma = 2 \sim 4$  oleajes sea), y  $w_h$  es la frecuencia angular normalizada por la profundidad de agua  $h$ , y definida como:

$$\omega_h = 2\pi f \left( \frac{h}{g} \right)^{1/2} \quad (88)$$

La condición  $w_h \geq 2$  en (87), convierte el espectro TMA en un espectro JONSWAP, condición que se presenta en profundidades indefinidas.





### 3.2.10.2. Función de dispersión direccional normalizada (Borgman, 1984)

La distribución angular de ondas individuales de un espectro en el OlucaSP, se describe a partir de la siguiente función:

$$G(\theta) = \frac{1}{2\pi} + \frac{1}{\pi} \sum_{j=1}^J \left\{ \exp \left[ -\frac{(j\sigma_m)^2}{2} \right] \cos j(\theta - \theta_m) \right\} \quad (89)$$

Donde  $\theta_m$  es la dirección media del oleaje,  $J$  un número arbitrario de armónicos para representar la serie de Fourier (valor seleccionado en el Oluca-SP  $J = 100$ ) y  $\sigma_m$  el parámetro que determina el ancho de la dispersión direccional. Esta expresión que ha sido aplicada con buenos resultados por diferentes actores (Vicent et al., 1989; Panchang et al., 1990, Pae et al., 1992; Chawla et al., 1998).

### 3.2.10.3. Parámetros de entrada al espectro bidimensional

#### Espectro TMA:

$h$  = profundidad (m)

$H_s$  = altura de ola significativa (m)

$f_p$  = frecuencia pico (Hz)

$\gamma$  = factor de ensanchamiento del pico.

#### Función de dispersión direccional:

$\theta_m$  = dirección media del oleaje (grados),

$\sigma_m$  = ancho del espectro (grados).



### **3.2.11. Hipótesis del modelo de propagación**

#### 1. Fluido

- No viscoso
- Incompresible
- Densidad constante

#### 2. Flujo

- Irrotacional
- Estacionario

#### 3. Dinámicas

- Presión constante en la superficie libre
- No se considera la acción del viento
- No se considera la acción de Coriolis

#### 4. Contornos

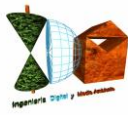
- Fondo de pendiente suave:

El desarrollo matemático de las ecuaciones del modelo, se plantean con la hipótesis de que las variaciones del fondo con las coordenadas horizontales, son pequeñas en comparación con la longitud de onda. Para el modelo lineal, Berkhoff (1982) realizó una comparación entre un modelo numérico exacto y el de la ecuación de pendiente suave para ondas propagándose sobre una playa. Encontró que hasta pendientes del fondo de 1:3 el modelo de la pendiente suave es exacto y que para pendientes mayores predice adecuadamente las tendencias.

#### 5. Propagación

- No linealidad débil:

Dependencia débil de la ecuación de dispersión con la altura de ola significativa (35); modelo no lineal Stokes-Hedges.



· Aproximación parabólica: Las componentes se propagan principalmente en una dirección ( $x$ ). Con lo cual se desprecian términos  $\left(\frac{\partial^2(\ )}{\partial x^2}\right)$ . La solución es tanto más aproximada cuanto menor variación haya en la dirección  $x$ .

Esta aproximación parabólica implica varias ventajas y desventajas:

*Ventajas:* (1) se ha mostrado como una ecuación de gobierno correcta para la propagación de componentes lineales sobre fondos de pendientes suaves, en presencia de corrientes; (2) es una ecuación de tipo parabólico y, como tal, no necesita condiciones en todo el contorno, sino que basta con una condición inicial en el contorno desde el que se va a propagar y condiciones en los contornos laterales. Además, es una herramienta muy útil para reducir el esfuerzo y el tiempo de computación, pues pueden utilizarse esquemas implícitos de seis puntos como el de Crank-Nicholson y obtener soluciones rápidas y estables.

*Desventajas:* (1) limitación del ángulo de propagación del oleaje a  $55^\circ$  con respecto al eje principal, ( $x$ ); (2) se desprecia el efecto de las ondas reflejadas; y (3) las soluciones son tanto más aproximadas cuanto menor variación haya respecto a esa dirección principal. El segundo inconveniente no es tan importante en la práctica, pues en la propagación del oleaje hacia la costa interesan sobre todo los efectos de la refracción y difracción.

Lee y Wang (1992), compararon cinco modelos de propagación, todos ellos basados en la ecuación para pendientes suaves: dos modelos son de tipo hiperbólico, dos de tipo elíptico y uno de tipo parabólico. Los parámetros que se evalúan en el citado trabajo son la exactitud de los resultados, el grado de dificultad computacional y su aplicabilidad práctica en función de la bondad para simular los diferentes fenómenos que tienen lugar durante la propagación del oleaje. Las ventajas del modelo parabólico son las ya comentadas: facilidad de programación, estabilidad numérica y ahorro de tiempo de computación; y sus inconvenientes son la imposibilidad de simular la reflexión del oleaje y una menor precisión de sus resultados.



Cabe destacar, como dato de referencia que no debe ser extrapolado a otros ensayos, que al analizar el experimento de Ito & Tanimoto (1972) en condiciones idénticas para los cinco modelos, el modelo parabólico, en la propagación de una onda invirtió aproximadamente 20 segundos de CPU, consumió 20 veces menos tiempo que uno de los modelos elípticos y alrededor de 50 veces menos tiempo de CPU que los modelos hiperbólicos, siendo los resultados del mismo grado de precisión para los cinco modelos.

#### 6. Modelo de disipación por rotura

Tal y como se indicó anteriormente, cada uno de los tres modelos de disipación propuestos se sustentan sobre una serie de hipótesis, resumiéndose las más importantes desde el punto de vista de la implementación de estos modelos en el Oluca-SP, como:

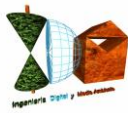
- La distribución de alturas de ola dentro de la zona de rompientes es del tipo Rayleigh.
- El balance de flujo de energía se realiza en la dirección principal de la propagación, eje  $x$ .
- No existe una interacción onda-onda dado el carácter lineal del modelo, por lo tanto la disipación se asume igual para todas las componentes frecuenciales.
- El modelo está orientado a propagaciones de oleaje de espectros no muy anchos direccionalmente ( $\pm 55^\circ$ ) (oleajes tipo del Swell). Esto es debido a las limitaciones de ángulo y también a que los modelos de disipación no presentan correcciones direccionales en los balances de flujo de energía.

#### **3.2.12. Ecuaciones del modelo**

En consecuencia de todo lo anterior, la ecuación utilizada en este modelo para modelar la propagación del oleaje considera los fenómenos de:

- (1) Asomeramiento,
- (2) refracción por fondo,
- (3) difracción,
- (4) presencia de corrientes,





- (5) disipación de energía,
- (6) rotura, y
- (7) dispersión por amplitud.

### **3.2.13. Comprobaciones sobre el modelo Oluca SP (MOPLA-SMC 2.5)**

El modelo Oluca-SP fue comprobado aplicándolo en casos de ensayos de modelos físicos en laboratorio y casos reales en playa, para lo cual se tomaron los datos de tres diferentes ensayos realizados en laboratorio: (1) Mase y Kirby (1992), quienes llevaron a cabo la propagación de un oleaje unidireccional sobre una playa de pendiente recta; (2) los ensayos de Chawla (1995), quien propagó diferentes espectros bidimensionales (anchos y estrechos) sobre un fondo horizontal con un bajo circular; y (3) los ensayos de Vincent y Briggs (1989), quienes generaron oleaje direccional sobre una batimetría de fondo plano y un bajo elíptico. Con esta finalidad, el modelo fue comprobado con datos del experimento de campo denominado DELILAH (Duck Experiment on Low-frequency and Incident-band Longshore and Across-shore Hydrodynamics), llevados a cabo por el Coastal Engineering Research Center field Research Facility in Duck, NC, en Octubre de 1991 (ver detalles de los ensayos en Birkemeier, 1991).

De esta forma, las comprobaciones realizadas mediante la aplicación del modelo numérico Oluca-SP, fueron llevadas a cabo en:

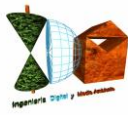
- (1) Los ensayos de propagación de oleaje sobre una pendiente constante de Mase y Kirby (1992)
- (2) Los ensayos sobre un bajo elíptico de Vincent y Briggs (1989)
- (3) Los ensayos de Chawla (1995) sobre un bajo circular
- (4) Los ensayos en campo del experimento DELILAH, Duck, NC.

Tras dichas comprobaciones, las conclusiones que se extrajeron fueron las siguientes:

- El modelo numérico Oluca-SP simula la evolución de un espectro de oleaje sobre un fondo variable. Representa de forma aproximada los fenómenos de asomeramiento, refracción, refracción-difracción y rotura del oleaje, expresados en términos de la altura de ola significativa y la evolución espacial del espectro bidimensional.



- Los tres modelos de disipación por rotura del oleaje: (1) Thornton y Guza (1983); (2) Battjes y Janssen (1978) y (3) Winyu y Tomoya (1998), representan de manera muy similar la propagación del oleaje. De acuerdo con las diferentes pruebas de calibración de parámetros, se han definido para el modelo (1):  $B = 1$  y  $g = 0.6$  (parámetros propuestos por sus autores). Para el modelo (2) la variación entre parámetros es pequeña, se han definido como fijos dentro del modelo  $aa1 = 0.39$ ,  $bb1 = 0.56$  y  $a1 = 1$ . Finalmente, el modelo (3) aunque disipa más energía que los dos anteriores, también presenta bastante bien la evolución del oleaje, definiéndose como parámetros fijos los propuestos por sus autores ( $K5 = 0.1$ ,  $K6 = 1.6$  y  $K7 = 0.1$ ).
- Se ha comprobado la hipótesis de asumir una distribución de alturas de ola del tipo Rayleigh, dado que la recomposición de la altura de ola significativa en cada punto del dominio, incluida la zona de rompiente, es bastante aproximada.
- Antes de un bajo sumergido donde predomina el asomeramiento, las variaciones de la altura de ola significativa dependen fundamentalmente de las características del espectro frecuencial de entrada, y muy poco de la función direccional.
- Sobre un bajo y la zona posterior a éste (donde predomina la refracción difracción), las variaciones de la altura de ola significativa dependen fundamentalmente de la función direccional inicial, más que el espectro frecuencial. Un oleaje del tipo “sea”, con una función direccional de entrada ancha, presenta una menor variación de  $H_s$  y mayor distribución de la energía en el dominio, en comparación con un oleaje del tipo “swell” o de banda direccional estrecha.
- Dado que el Oluca-SP es un modelo débilmente no lineal, no tiene en cuenta la transferencia de energía entre componentes, que unido a una disipación por rotura independiente de las frecuencias y direcciones, manifiesta pequeñas discrepancias en la altura de ola significativa en propagaciones con frentes cruzados o trenzados simultáneamente con rotura. Discrepancias no relevantes desde un punto de vista ingenieril, dada su pequeña magnitud.



### **3.2.14. Propagaciones hasta pie de playa de la zona de estudio**

Con el software Oluca-SP (espectral), módulo integrado en MOPLA, en el paquete informático SMC 2.5, se han realizado las propagaciones, desde profundidades indefinidas hasta el pie de playa del tramo de costa de estudio de la playa a levante del Puerto de Salou, en el T.M. de Salou, para cada uno de los distintos temporales preseleccionados, obteniéndose de este modo los parámetros que caracterizan el temporal con sus valores previos al fenómeno de rotura propagados a pie de playa; que notaremos con los subíndices  $H_{spp}$ ,  $T_p$  (se mantiene el período de pico en la propagación hasta pie de costa).

Dicho software de modelado numérico aplica los fundamentos teóricos especificados en los apartados anteriores para la propagación hasta la costa, sobre la batimetría obtenida a partir de los datos batimétricos procedentes de los datos batimétricos Sonarchart de Navionics y EMODNET e introducidos en el formato digital para MDT X, Y, Z, unidas a su vez con la topografía terrestre a partir de los datos del MDT obtenido a partir del vuelo LIDAR del IGN de 2016-2017. Previamente se ha realizado una homogeneización altimétrica, transformando los datos altimétricos digitales de Navionics referidos a la BMVE, al plano de comparación  $Z=0$  del I.G.N. con referencia al N.M.M.A., al igual que el levantamiento topográfico LIDAR del I.G.N., de forma que la referencia de todo el MDT final es la del N.M.M.A., lo cual ha de tenerse en cuenta a la hora de su importación desde MOPLA a la hora de establecer los niveles mareales durante las simulaciones de propagación del oleaje.

Para el proceso computacional de propagación del oleaje, se ha diseñado mediante el software dos concatenaciones de mallas de propagación que comprenden hasta la misma línea de orilla del tramo de costa de estudio de la playa de Levante de Salou, y procede desde las proximidades a la separación de profundidades indefinidas a intermedias (es decir, desde las proximidades del límite con aguas profundas en el entorno de la isobata -115 m.) de los temporales definidos por los estados de mar seleccionados correspondientes a los datos del Punto Simar 2098132, con respectivos ejes de avance de las mallas concatenadas en dirección a los sectores S-SW y E-ESE de forma que las direcciones de los oleajes que se propagan no difieren en más de  $55^\circ$  con dicha dirección principal de cada una de las concatenaciones de mallas, requisito necesario para poder realizar los cálculos, obteniéndose como resultado final los valores propagados del temporal para cada uno de los puntos de la última malla, la de mayor resolución y que comprende hasta pie de playa de la zona de estudio (en este caso notada como A1), con resultados anteriores y posteriores al proceso de rotura del oleaje.

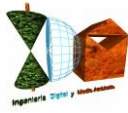


Se tomarán como valores finales del oleaje propagado a pie de playa los resultantes en nodos de dicha malla final de detalle que se encuentran en posiciones a las que corresponden profundidades por encima de las de rotura, al objeto de obtener los valores de altura de ola propagados a pie de playa, antes de rotura, como valores de entrada o imput para su posterior introducción en las formulaciones semiempíricas que proporcionarán los valores de run-up.

A continuación se recogen las exportaciones que genera el citado software del modelo numérico Oluca-SP, MOPLA, SMC 2.5 tras ejecutar las propagaciones con los parámetros de los oleajes que caracterizan los estados de mar seleccionados como los generadores del máximo nivel de inundación analizados los 265.970 estados de mar del período 1993-2023 (mayo), que reflejarán los resultados de la propagación desde el límite con profundidades indefinidas con las direcciones de procedencia hasta la playa a levante del Puerto de Salou objeto de estudio, en los nodos de las mallas concatenadas de propagación que comprenden en su dominio (extensión de filas x columnas) los dos sectores direccionales que integran las direcciones de procedencia de los estados de mar seleccionados desde aguas profundas hasta pie de playa, en forma de vectores direccionales cuya dirección es el resultado del ángulo propagado en el nodo, y la magnitud del módulo del vector se corresponde a una escala determinada en el gráfico con el valor de la Hs propagada en el mismo nodo. Los resultados corresponden a las mallas respectivas del último tramo de propagación, el que comprende la profundidad de cierre y la franja de rompientes, que son las mallas de mayor detalle y que contienen los nodos de propagación fundamentales en los cálculos de las CI (cotas de inundación). También se incluyen las exportaciones de MOPLA con la batimetría de cada una de las mallas de los respectivos encadenados de las dos series de mallas correspondientes a los dos sectores de procedencia correspondientes a los estados de mar seleccionados y propagados.

Previamente se incluyen las exportaciones de las dos series de concatenación de mallas de diseño de la propagación correspondientes al sector S-SW y E-ESE, sobre el MDT topo-batimétrico generado para el presente estudio, cargado en el módulo Oluca-SP espectral, integradas por una serie encadenada de 3 mallas, que van aumentando su resolución, desde las profundidades indefinidas hasta el frente de costa emergido.





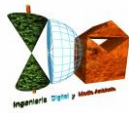
**INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)**

C/ Cañadilla 6, local 68, C. Comercial Coronado, Las Rozas de Madrid 28231, Madrid

Pza. de la Montañeta 4, entresuelo, 03001 Alicante

Tfno.: 918961731; Fax: 918903410; e-mail: idyma@idyma.es

Asimismo, se incluyen planos a la escala 1/85.000 en el que se recoge la extensión completa del MDT topobatimétrico elaborado sobre el que se ha ejecutado la propagación con Oluca-SP, un plano a escala 1/5.000 de detalle de la topobatimetría de alta densidad en la zona de rompientes hasta intermedias y costa emergida, con referencia al N.M.M.A. (con incremento mareal nulo), así como los planos a escala 1/3.000 con los resultados de la propagación del estado de mar seleccionado, con los vectores direccionales del oleaje y su módulo Hsp propagado (proporcional la longitud del vector al valor Hsp), calculados por Oluca-SP y obtenidos por dicho software a partir de los valores de Hsp propagados en los nodos de la malla "Detalle" (la que comprende el último tramo de propagación, con la franja de rompientes y profundidades reducidas) hasta pie de costa de la zona de estudio de la playa de Levante de Salou, todo ello en el sistema ETRS89, elipsoide GRS80, Proyección U.T.M., Huso 31, sobre el MDT topo-batimétrico generado.

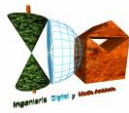


Archivo Cálculo Resultados Ayuda

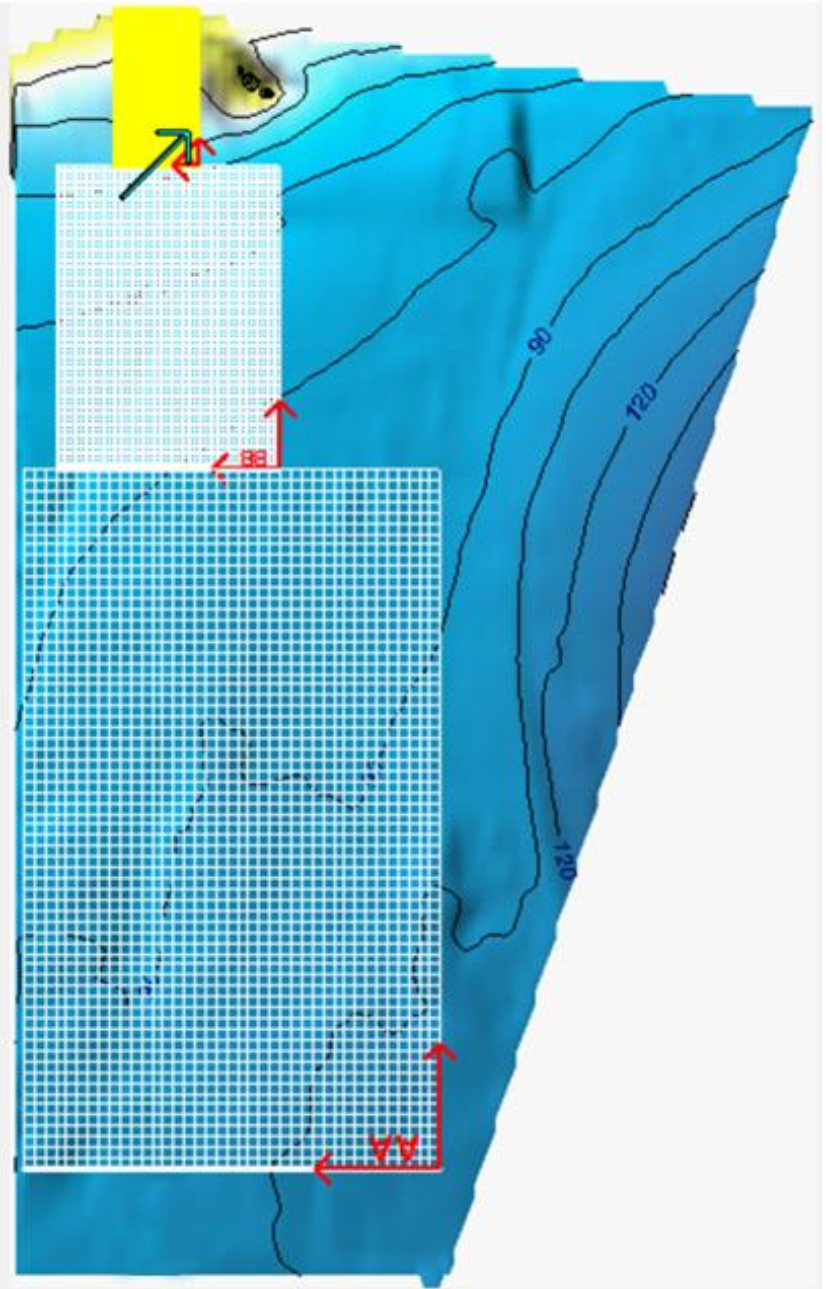


Malla: CC

Caso: 01

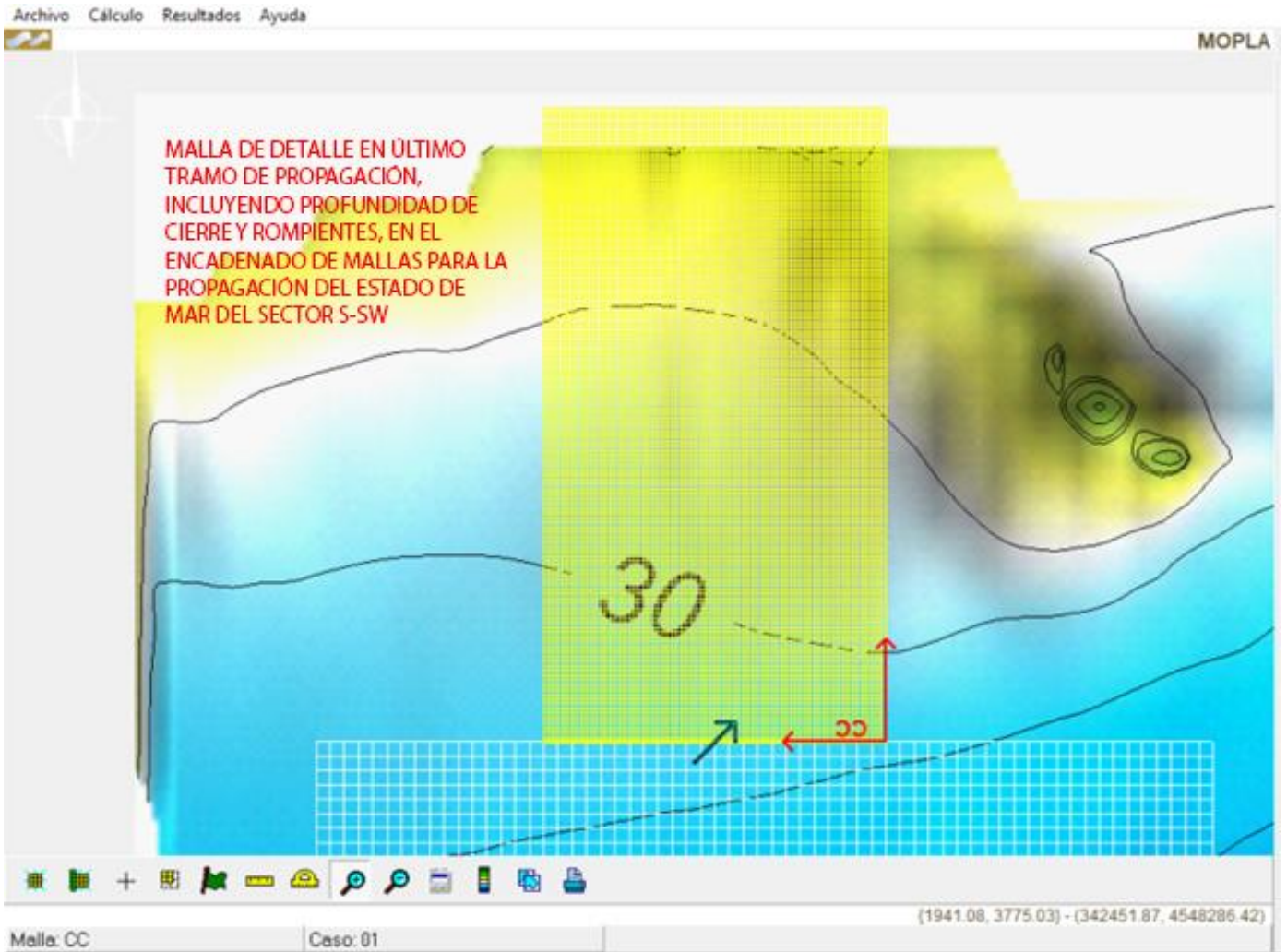


ENCADENADO DE MALLAS DE PROPAGACIÓN HACIA PROFUNDIDADES INDEFINIDAS DESDE EL TRAMO DE ESTUDIO, PASANDO POR EL PUNTO SIMAR FUENTE DE DATOS, PARA LA PROPAGACIÓN DEL ESTADO DE MAR DEL SECTOR S-SW, CON LA REJILLA DE NODOS DE CÁLCULOS DE PROPAGACIÓN.



Malla: CC

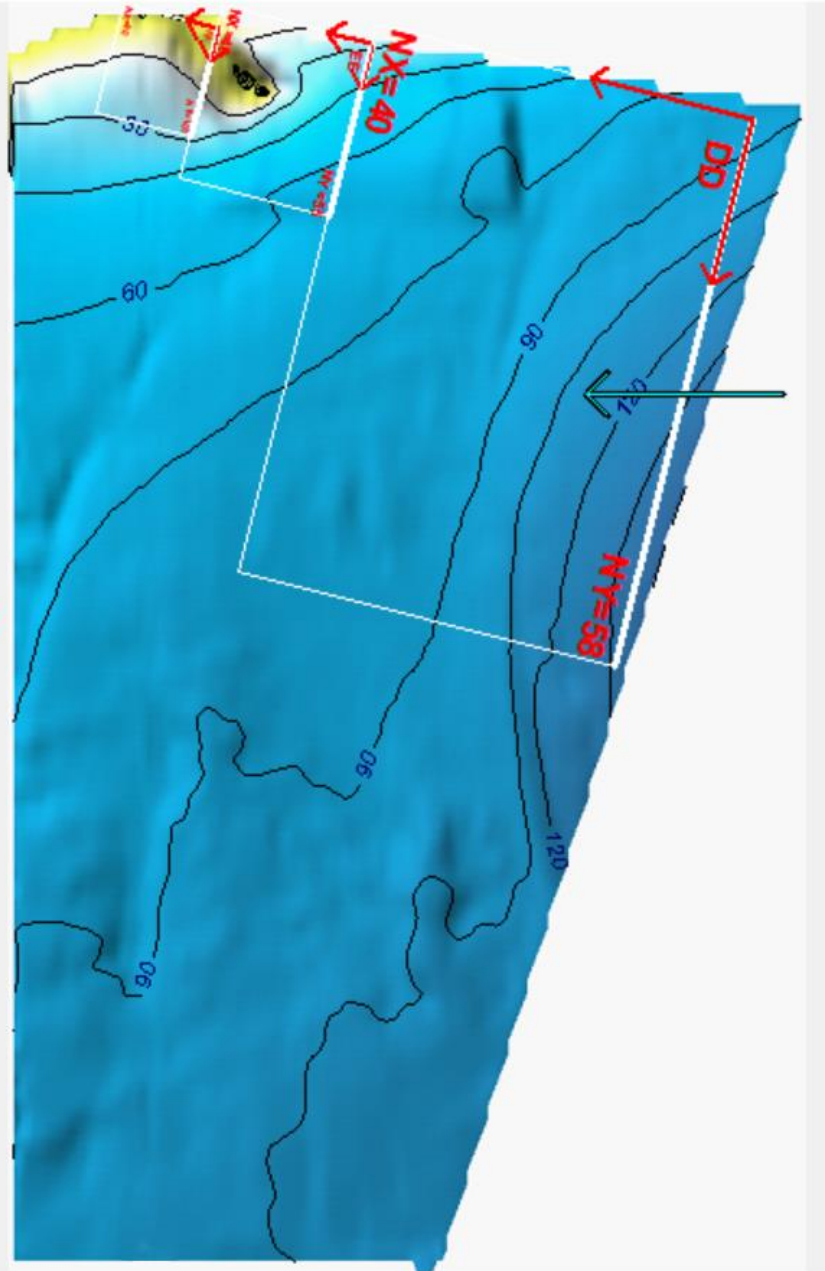
Caso: 01





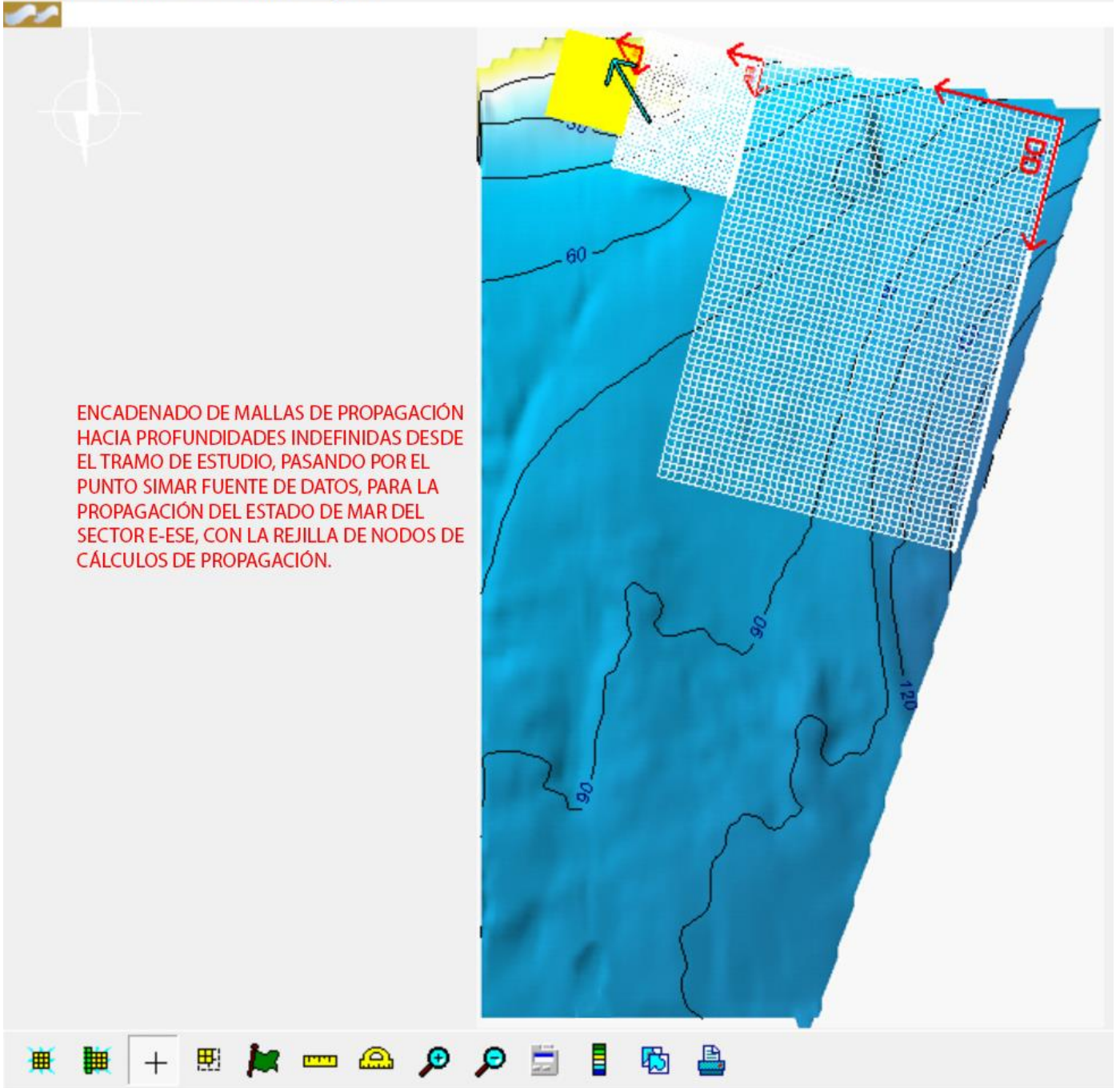


ENCADENADO DE MALLAS DE PROPAGACIÓN HACIA PROFUNDIDADES INDEFINIDAS DESDE EL TRAMO DE ESTUDIO, PASANDO POR EL PUNTO SIMAR FUENTE DE DATOS, PARA LA PROPAGACIÓN DEL ESTADO DE MAR DEL SECTOR E-ESE



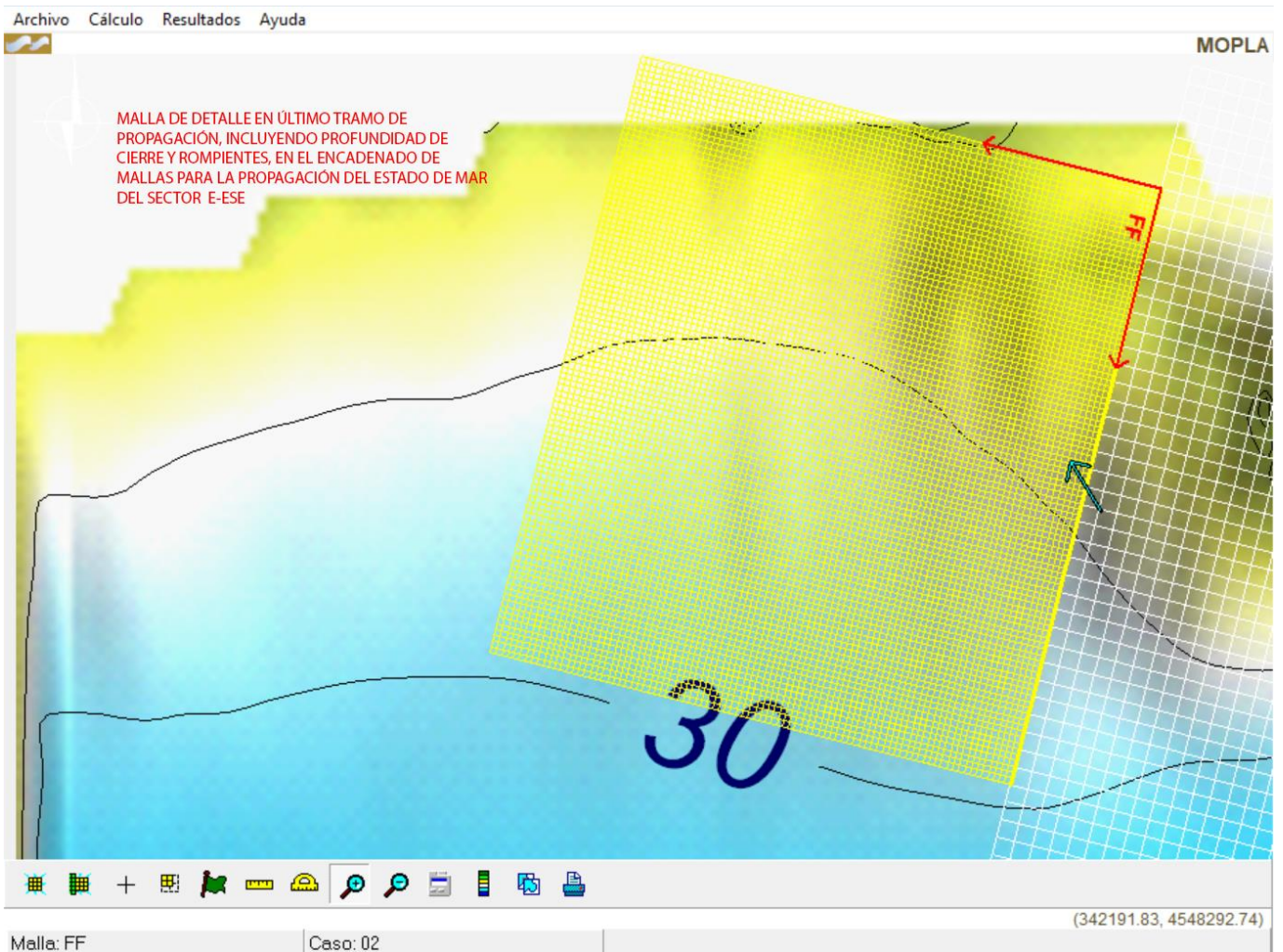
Malla: FF

Caso: 02



Malla: FF

Caso: 02





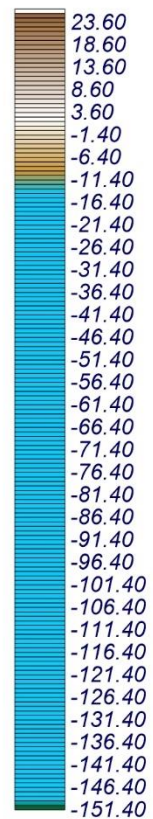
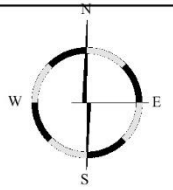
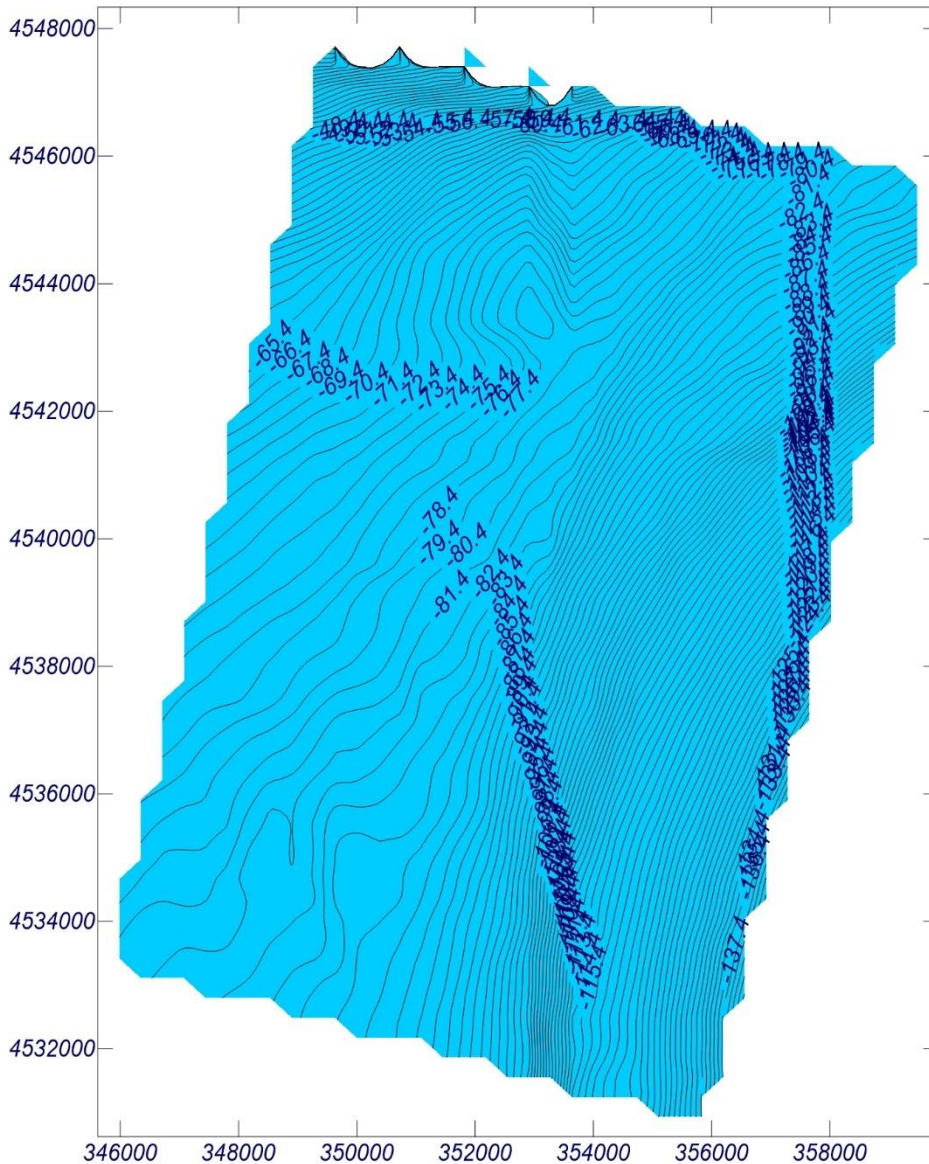
# Proyecto:

Gráfico: Topografía 2D

**DD:**

**BATIMETRÍA MALLA HASTA  
PROFUNDIDADES INDEFINIDAS EN  
ENCADENADO DE MALLAS DEL SECTOR  
DIRECCIONAL E-ESE**

Gráfico de topografía





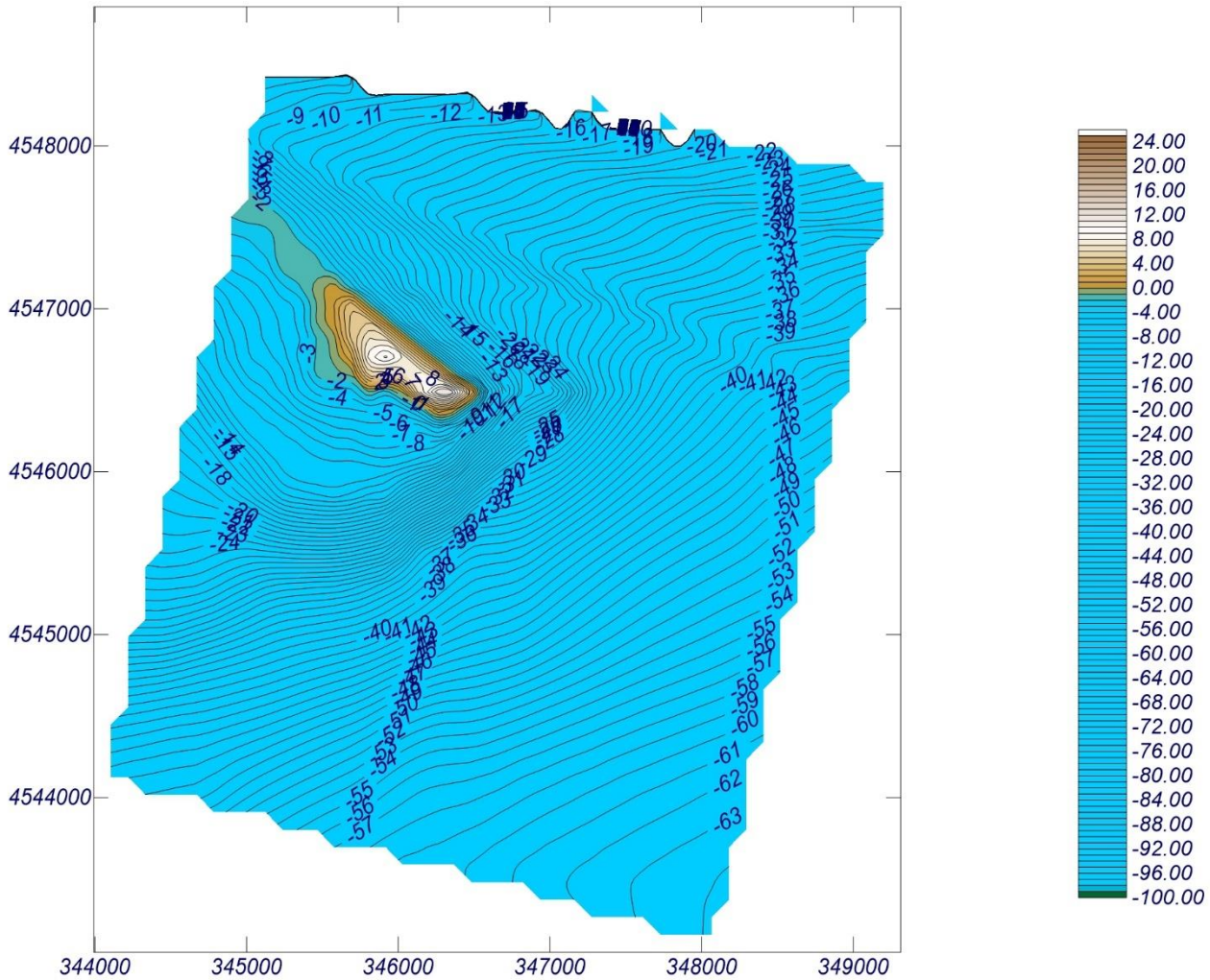
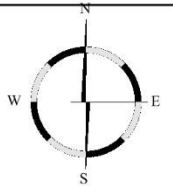
# Proyecto:

Gráfico: Topografía 2D

**EE:**

**BATIMETRÍA MALLA PROFUNDIDADES INTERMEDIAS EN ENCADENADO DE MALLAS DEL SECTOR DIRECCIONAL E-ESE**

Gráfico de topografía



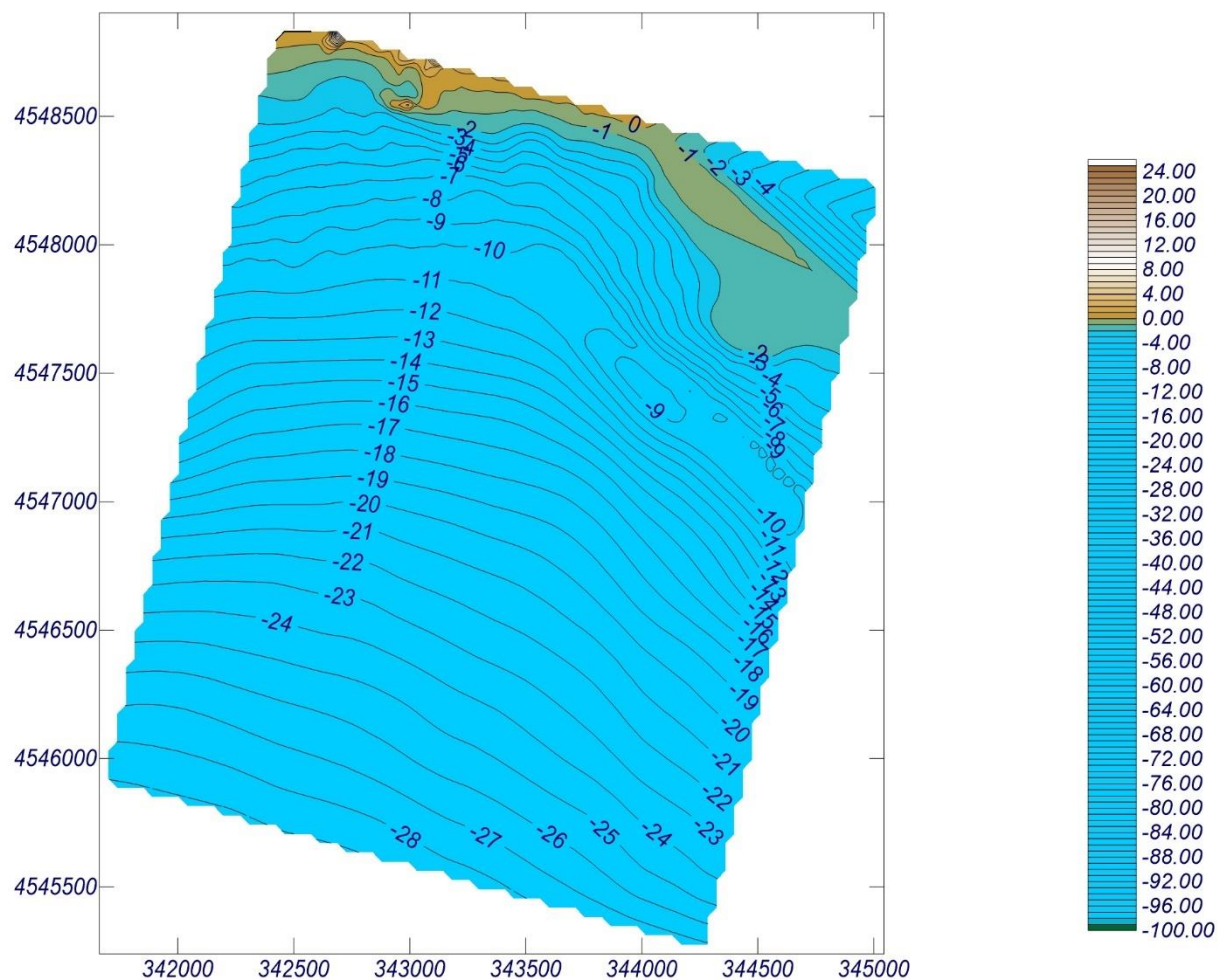
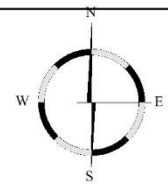
# Proyecto:

Gráfico: Topografía 2D

**FF:**

**BATIMETRÍA MALLA HASTA  
PROFUNDIDADES REDUCIDAS EN  
ENCADENADO DE MALLAS DEL SECTOR  
DIRECCIONAL E-ESE**

Gráfico de topografía





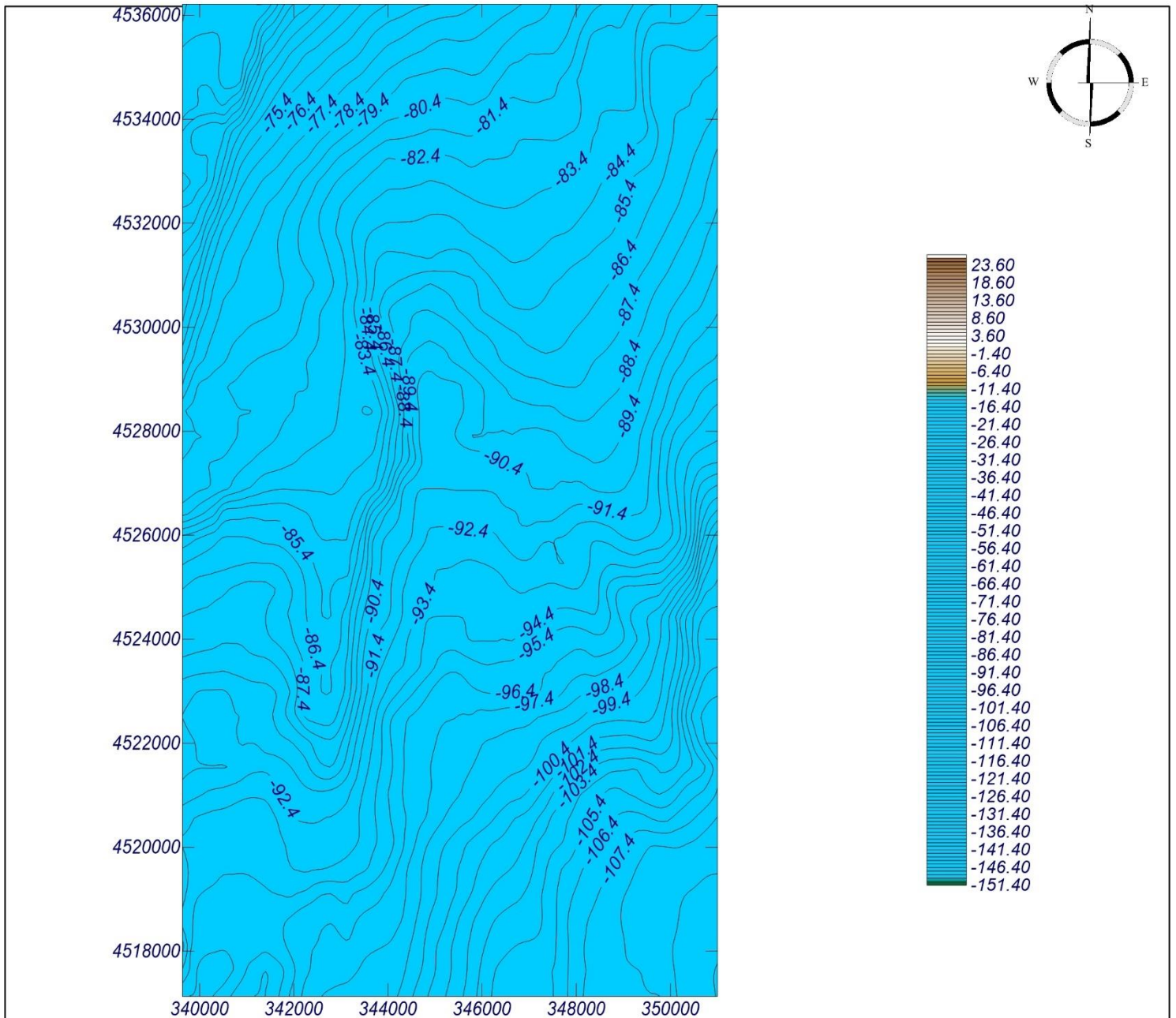
# Proyecto:

Gráfico: Topografía 2D

**AA:**

**BATIMETRÍA MALLA HASTA  
PROFUNDIDADES INDEFINIDAS EN  
ENCADENADO DE MALLAS DEL SECTOR  
DIRECCIONAL S-SW**

Gráfico de topografía



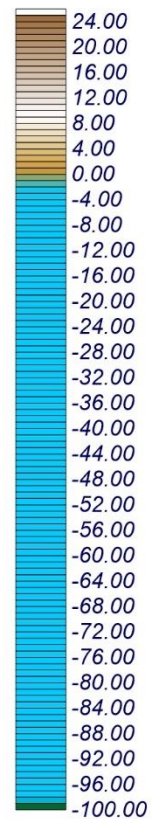
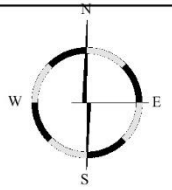
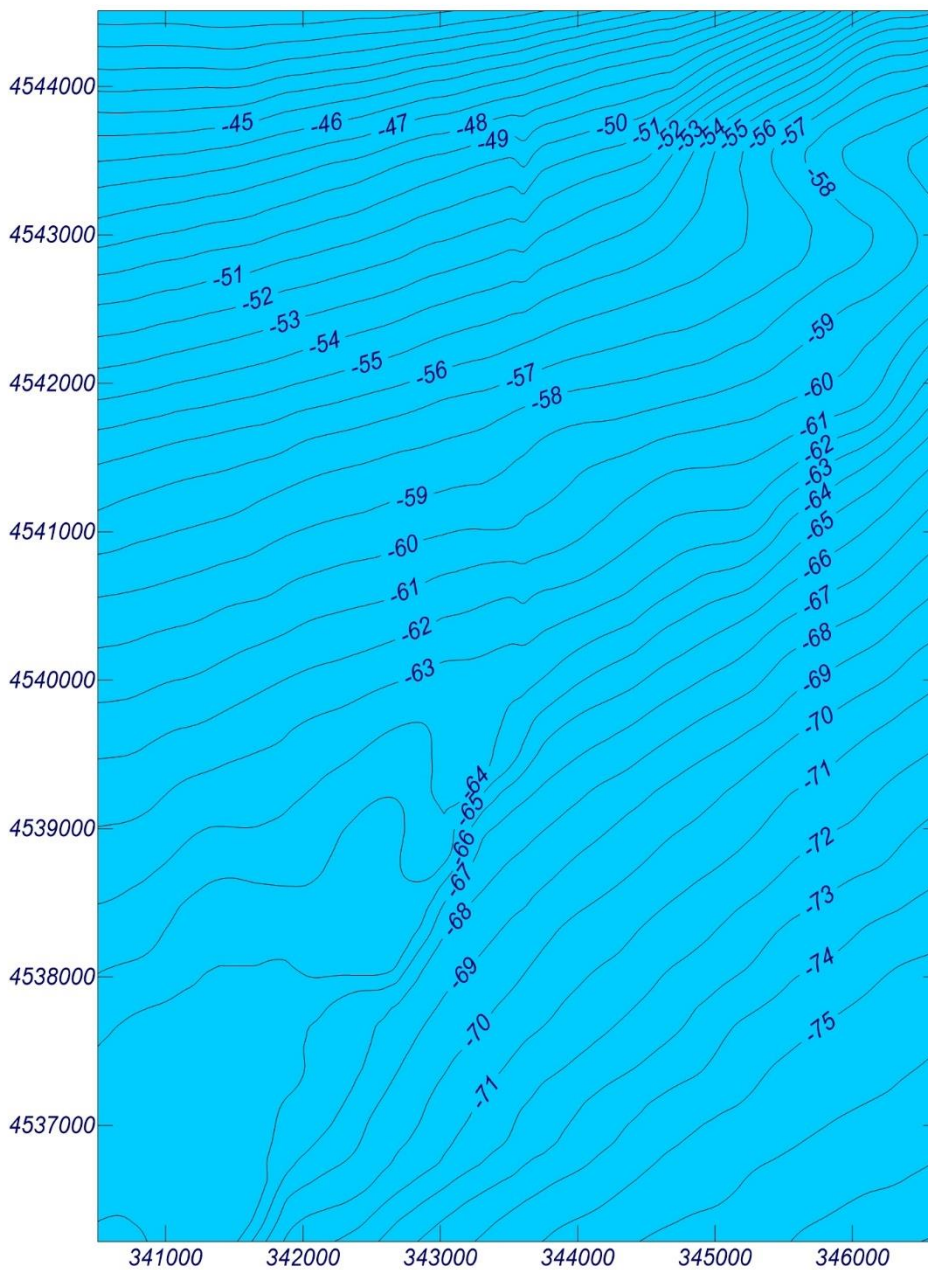
# Proyecto:

Gráfico: Topografía 2D

**BB:**

**BATIMETRÍA MALLA PROFUNDIDADES INTERMEDIAS EN ENCADENADO DE MALLAS DEL SECTOR DIRECCIONAL S-SW**

Gráfico de topografía





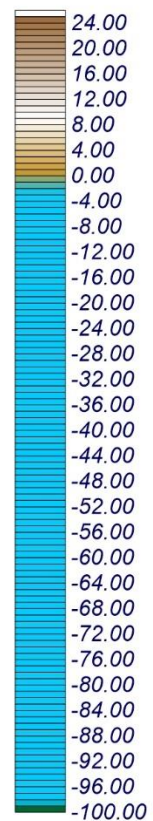
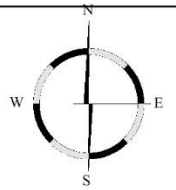
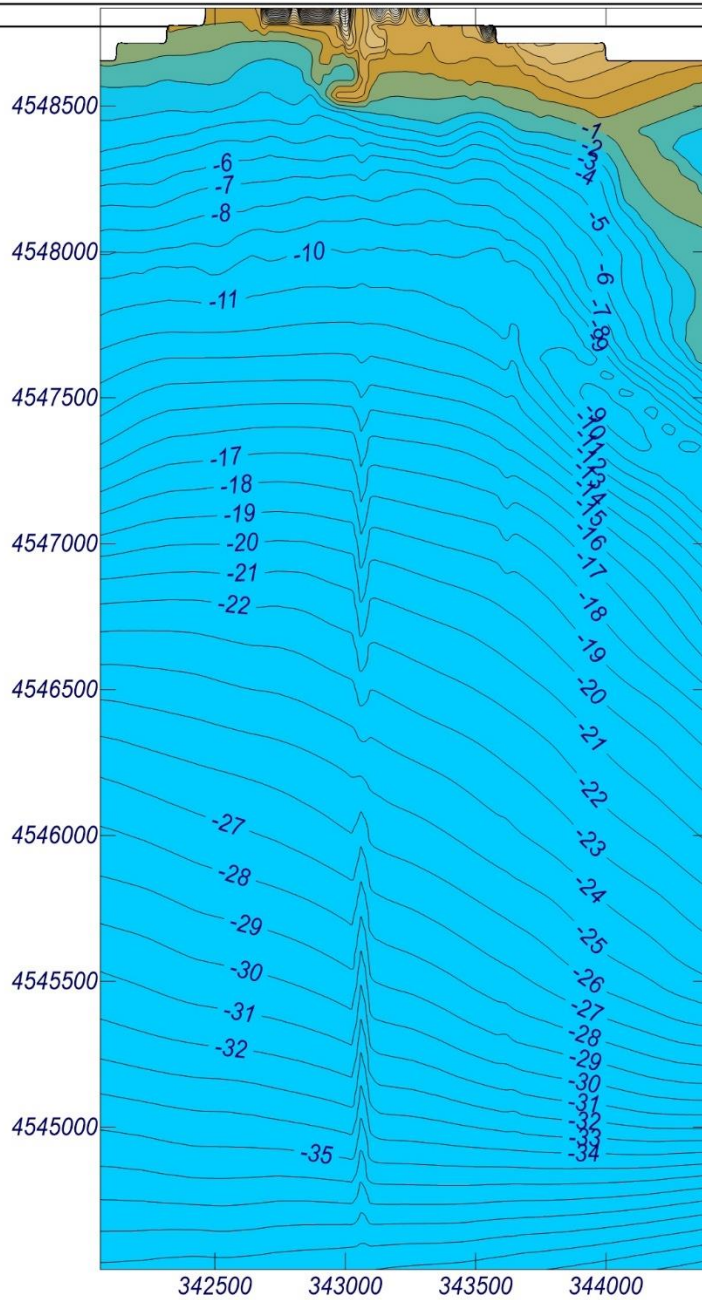
# Proyecto:

Gráfico: Topografía 2D

CC:

**BATIMETRÍA MALLA HASTA  
PROFUNDIDADES REDUCIDAS EN  
ENCADENADO DE MALLAS DEL SECTOR  
DIRECCIONAL S-SW**

Gráfico de topografía



# Proyecto:

## Gráfico: Altura de ola significativa

**Caso espectral:** CC01  
**CC:**  
**01:** 2013\_01\_20 08:00

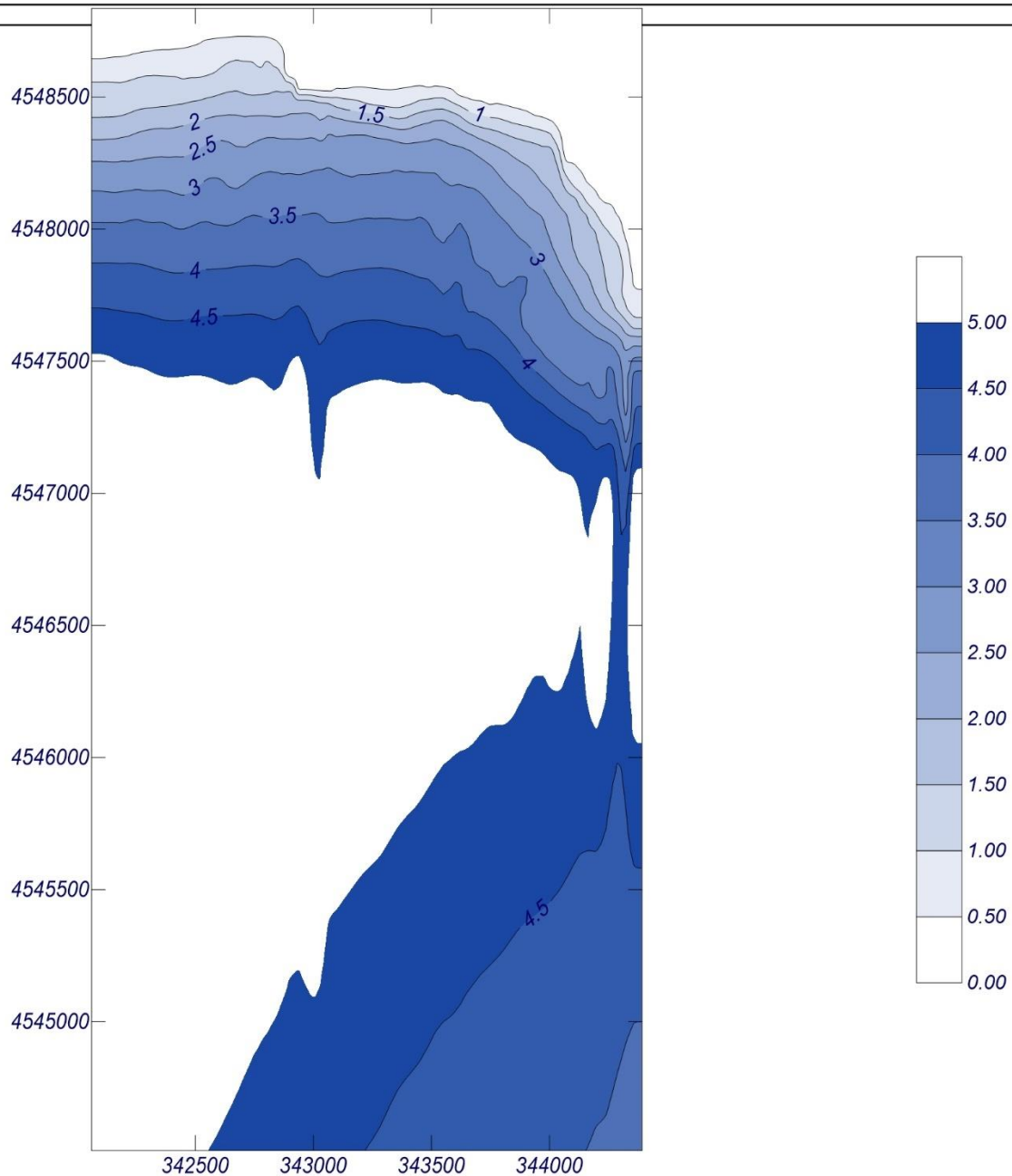
### Características de la simulación

#### OLUCA-SP

**Espectro frecuencial (TMA)**  
Hs: 2.971 m  
h: 100 m  
fp: 0.0744048 Hz (Tp: 13.44 s)  
 $\gamma$ : 10  
Nº Comp.: 20  
**Espectro direccional**  
 $\theta_m$ : -45° (S45.0W)  
 $\sigma$ : 10° - Nº Comp.: 20

#### COPLA-SP

#### MOPLA-SP



# Proyecto:

Gráfico: *Altura de ola significativa*

**Caso espectral:** FF02

**FF:**

**02:** 2020-01-21 19:00

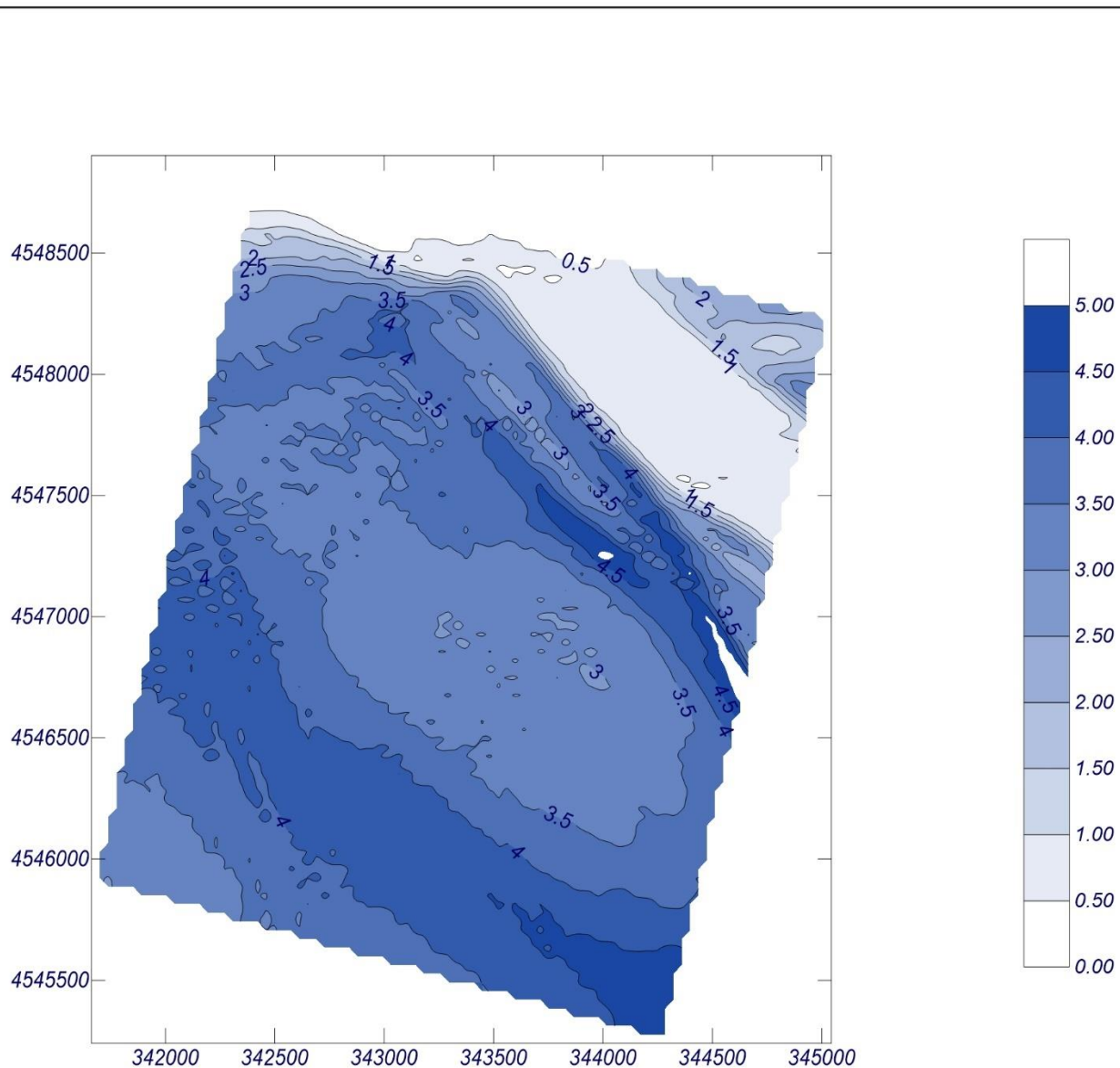
## Características de la simulación

### OLUCA-SP

*Espectro frecuencial (TMA)*  
Hs: 6.51 m  
h: 100 m  
fp: 0.0825764 Hz (Tp: 12.11 s)  
 $\gamma$ : 10  
Nº Comp.: 20  
*Espectro direccional*  
 $\theta_m$ : 14.25° (E)  
 $\sigma$ : 10° - Nº Comp.: 20

### COPLA-SP

### MOPLA-SP





# Proyecto:

## Gráfico: Vectores de la altura de ola significativa+Magnitud

**Caso espectral:** CC01  
**CC:**  
**01:** 2013\_01\_20 08:00

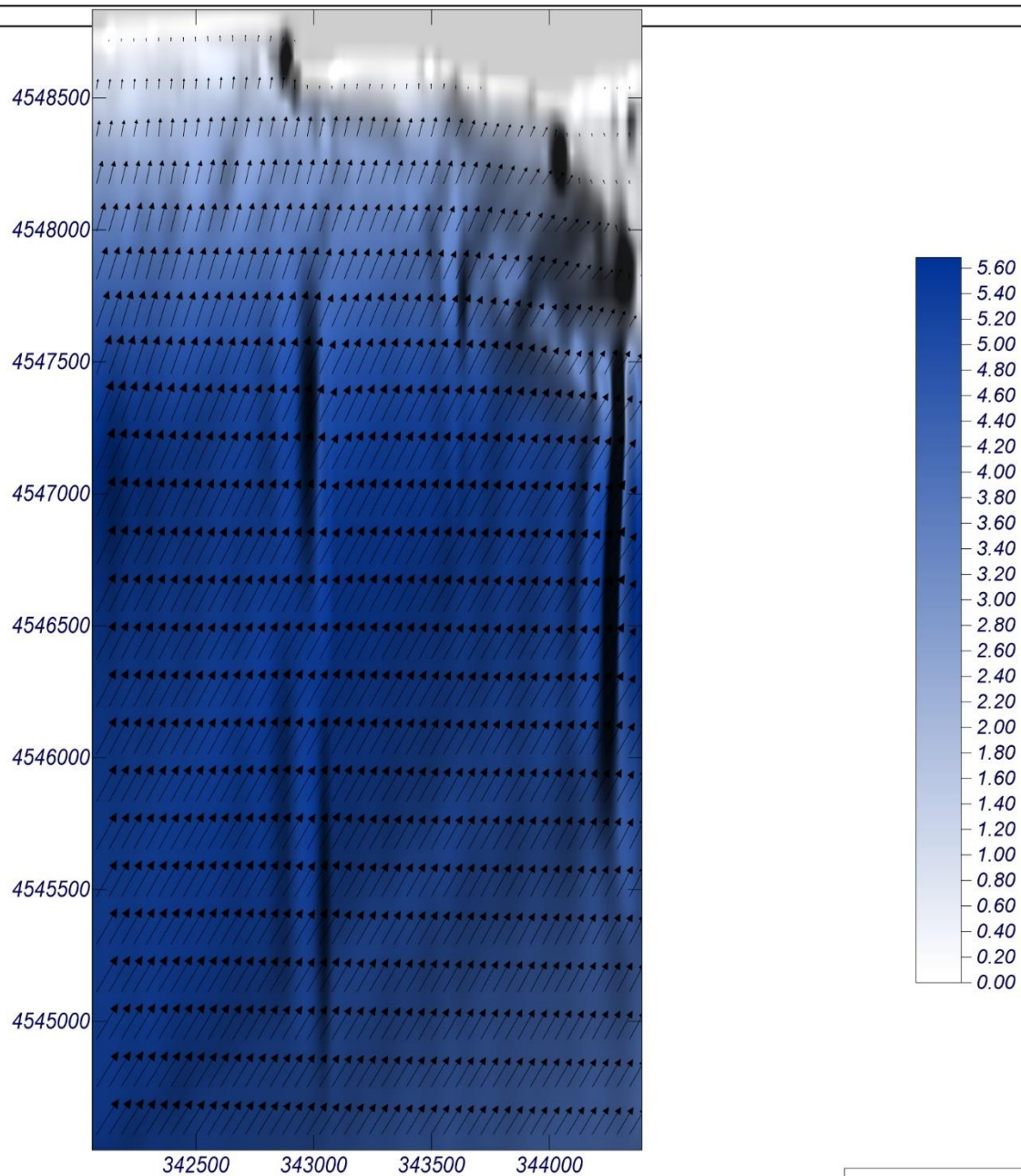
### Características de la simulación

#### OLUCA-SP

**Espectro frecuencial (TMA)**  
Hs: 2.971 m  
h: 100 m  
fp: 0.0744048 Hz (Tp: 13.44 s)  
 $\gamma$ : 10  
Nº Comp.: 20  
**Espectro direccional**  
 $\theta_m$ : -45° (S45.0W)  
 $\sigma$ : 10° - Nº Comp.: 20

#### COPLA-SP

#### MOPLA-SP



1 cm = 10.000 m

0 10



# Proyecto:

## Gráfico: Vectores de la altura de ola significativa+Magnitud

**Caso espectral: FF02**

**FF:**

**02: 2020-01-21 19:00**

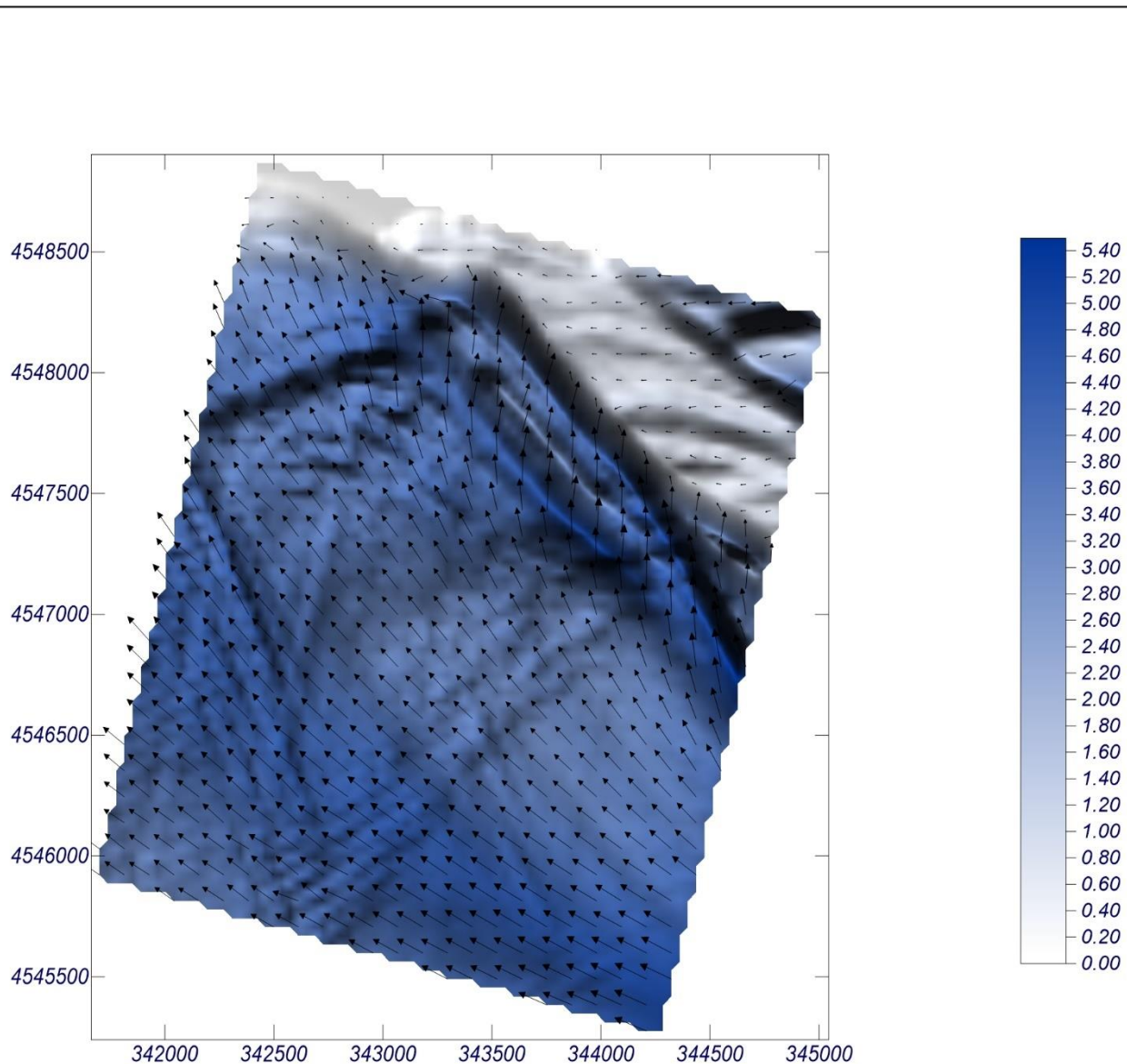
### Características de la simulación

#### OLUCA-SP

**Espectro frecuencial (TMA)**  
Hs: 6.51 m  
h: 100 m  
fp: 0.0825764 Hz (Tp: 12.11 s)  
 $\gamma$ : 10  
Nº Comp.: 20  
**Espectro direccional**  
 $\theta_m$ : 14.25° (E)  
 $\sigma$ : 10° - Nº Comp.: 20

#### COPLA-SP

#### MOPLA-SP



1 cm = 10.000 m

0 10

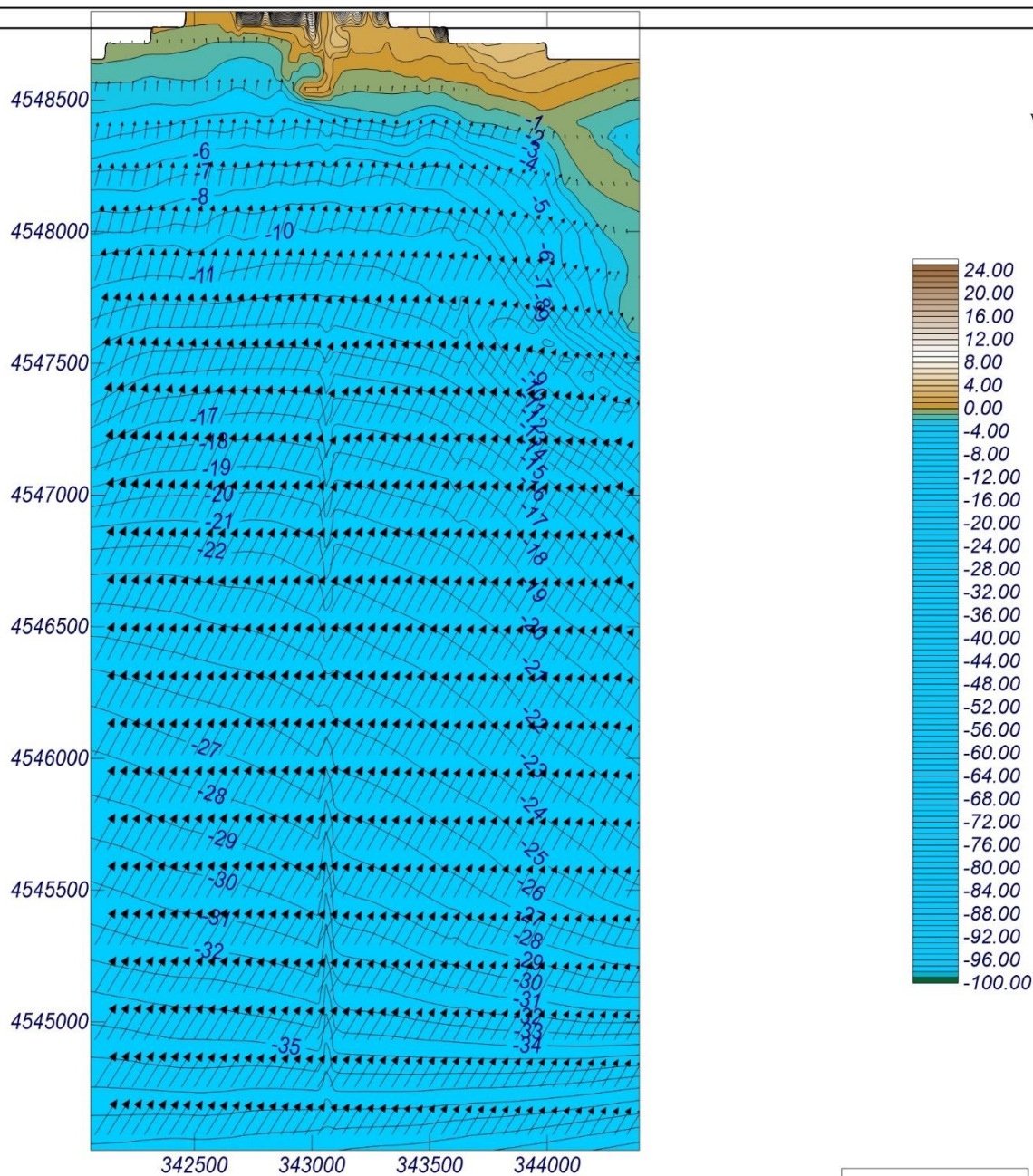
# Proyecto:

Gráfico: Gráfico combinado de topografía y vectores Hs

**Caso espectral: CC01**  
**CC:**  
**01: 2013\_01\_20 08:00**

## Características de la simulación

OLUCA-SP	COPLA-SP	MOPLA-SP
<b>Espectro frecuencial (TMA)</b>		
Hs: 2.971 m		
h: 100 m		
fp: 0.0744048 Hz (Tp: 13.44 s)		
γ: 10		
Nº Comp.: 20		
<b>Espectro direccional</b>		
θm: -45° (S45.0W)		
σ: 10° - Nº Comp.: 20		



1 cm = 10.000 m

0 10



# Proyecto:

Gráfico: Gráfico combinado de topografía y vectores Hs

**Caso espectral: FF02**

**FF:**

**02: 2020-01-21 19:00**

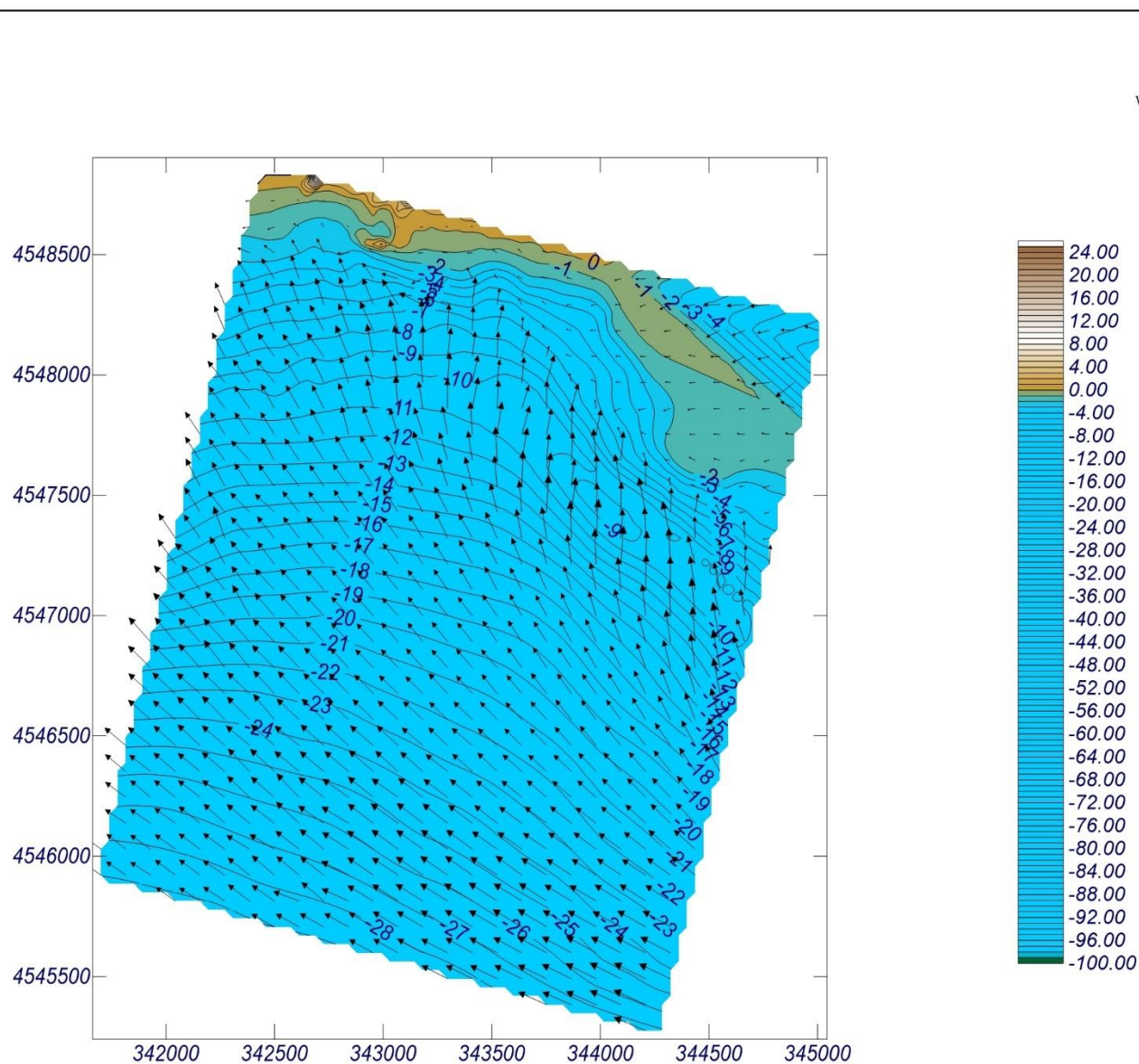
Características de la simulación

**OLUCA-SP**

**Espectro frecuencial (TMA)**  
Hs: 6.51 m  
h: 100 m  
fp: 0.0825764 Hz (Tp: 12.11 s)  
 $\gamma$ : 10  
Nº Comp.: 20  
**Espectro direccional**  
 $\theta_m$ : 14.25° (E)  
 $\sigma$ : 10° - Nº Comp.: 20

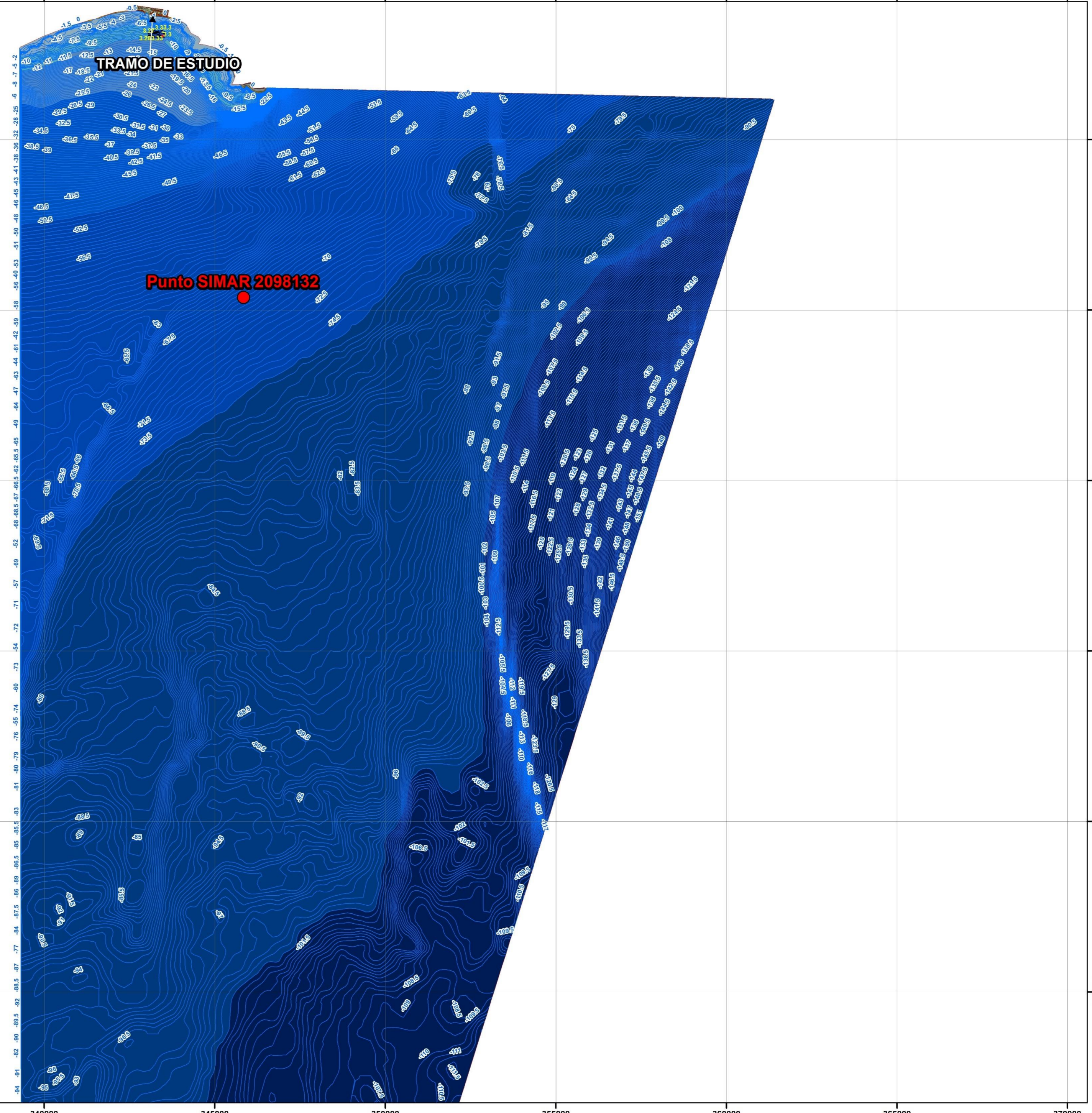
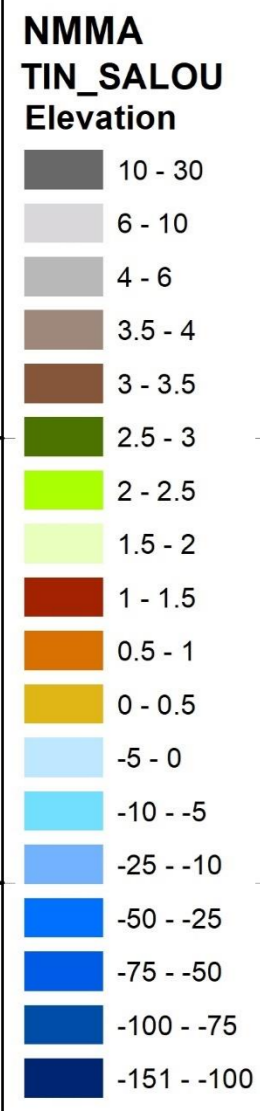
**COPLA-SP**

**MOPLA-SP**





SISTEMA ETRS89, PROYECCIÓN UTM, HUSO 31  
MDT TOPO-BATIMÉTRICO DIGITAL GENERADO A PARTIR DE  
DATOS LIDAR DEL IGN, Y PROVEEDORES DE DATOS  
BATIMÉTRICOS NAVIONICS Y EMODNET, BASE PARA  
LAS SIMULACIONES COMPUTACIONALES  
DE PROPAGACIÓN DEL OLEAJE  
CURVADO ISOBATAS EQUIDISTANCIA 0.5 M.  
PLANO A ESCALA 1/85.000



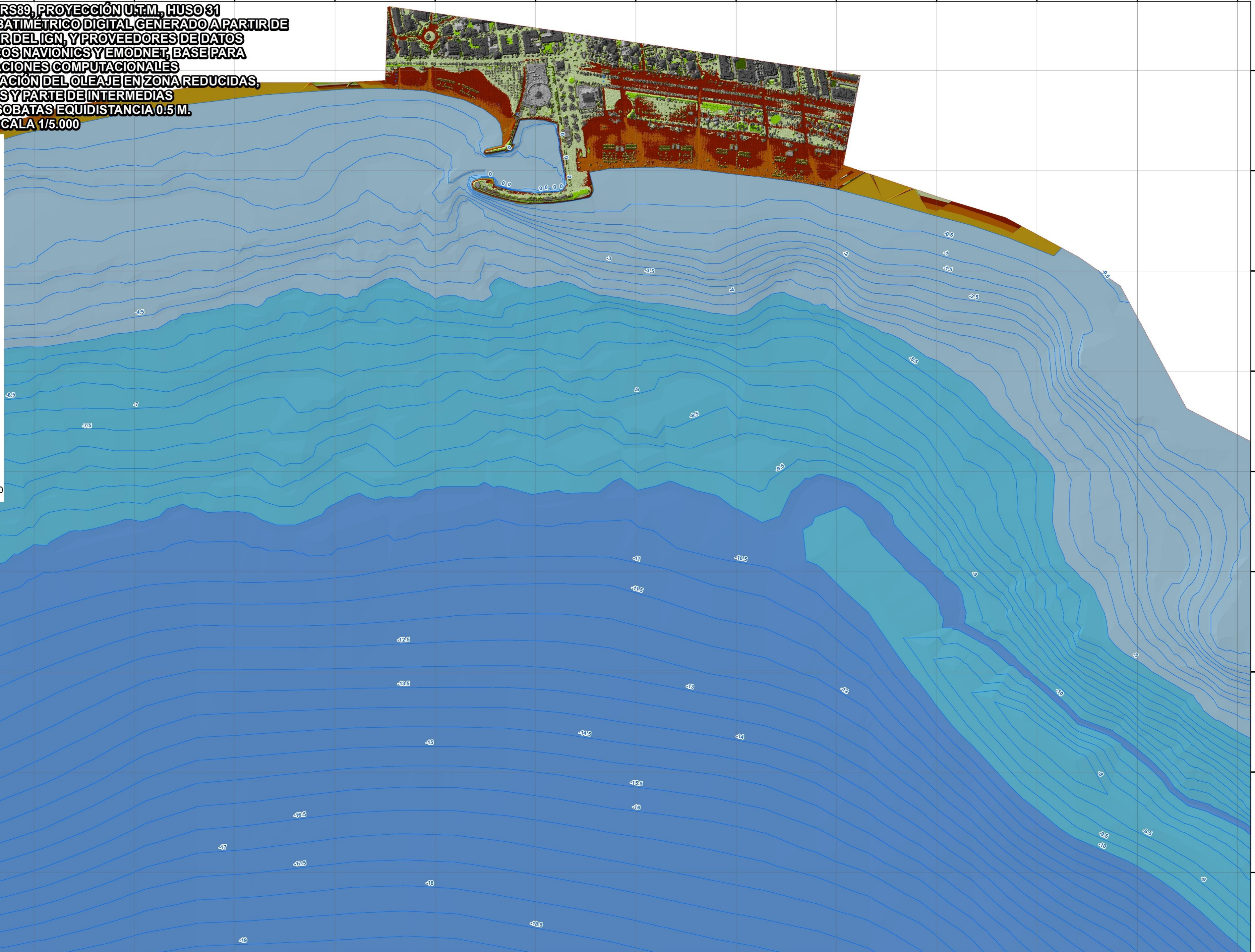


341800 342000 342200 342400 342600 342800 343000 343200 343400 343600 343800 344000 344200 344400

**SISTEMA ETRS89, PROYECCIÓN U.T.M., HUSO 31**  
**MDT TOPO-BATIMÉTRICO DIGITAL GENERADO A PARTIR DE**  
**DATOS LIDAR DEL IGN, Y PROVEEDORES DE DATOS**  
**BATIMÉTRICOS NAVIONICS Y EMO DNET, BASE PARA**  
**LAS SIMULACIONES COMPUTACIONALES**  
**DE PROPAGACIÓN DEL OLAJE EN ZONA REDUCIDAS,**  
**ROMPIENTES Y PARTE DE INTERMEDIAS**  
**CURVADO ISOBATAS EQUIDISTANCIA 0.5 M.**  
**PLANO A ESCALA 1/5.000**

**NMMA**  
**TIN\_SALOU**  
**Elevation**

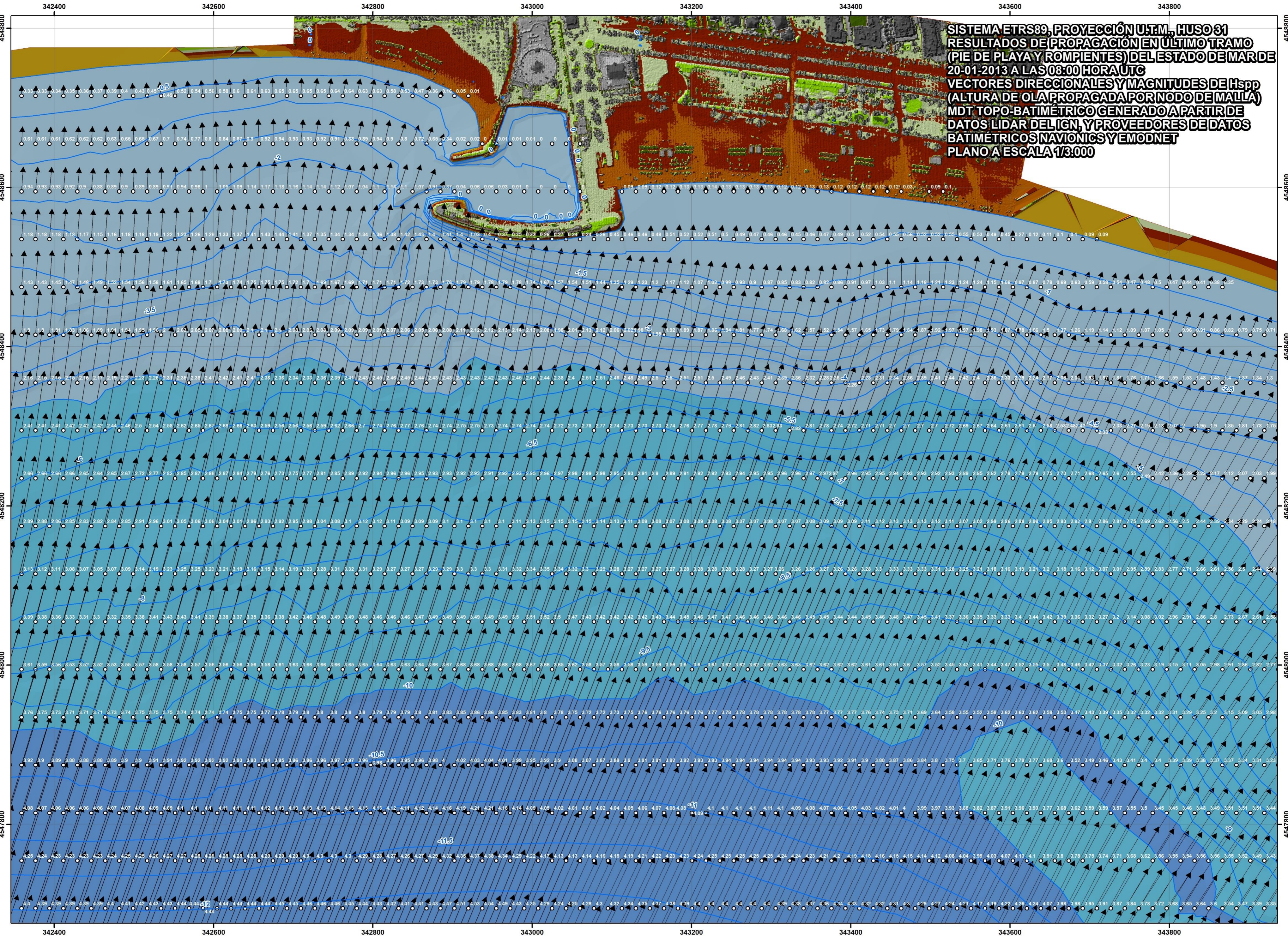
10 - 30
6 - 10
4 - 6
3.5 - 4
3 - 3.5
2.5 - 3
2 - 2.5
1.5 - 2
1 - 1.5
0.5 - 1
0 - 0.5
-5 - 0
-10 - -5
-25 - -10
-50 - -25
-75 - -50
-100 - -75
-151 - -100



341800 342000 342200 342400 342600 342800 343000 343200 343400 343600 343800 344000 344200 344400

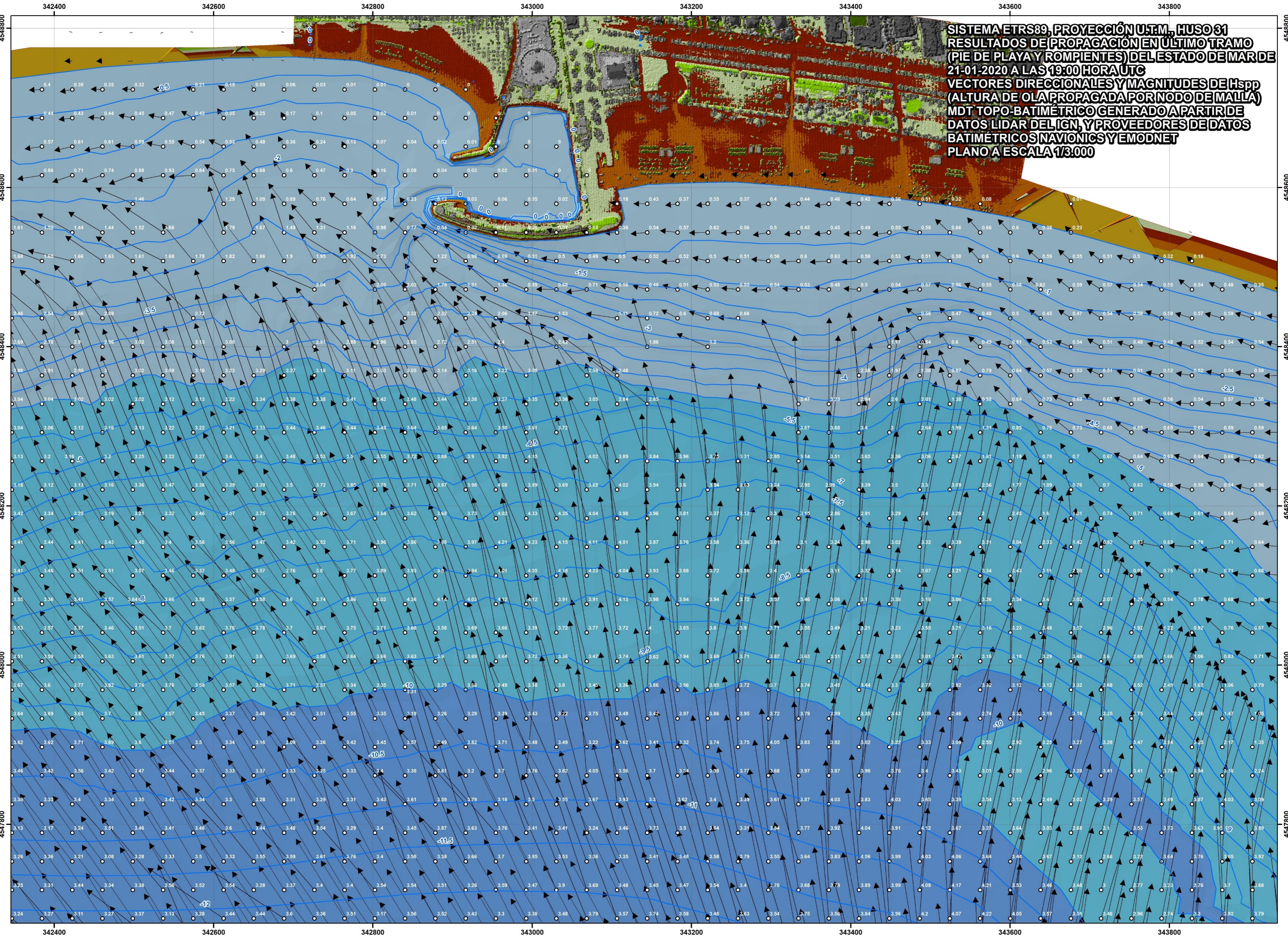


SISTEMA ETRS89, PROYECCIÓN U.T.M., HUSO 31  
RESULTADOS DE PROPAGACIÓN EN ÚLTIMO TRAMO  
(PIE DE PLAYA Y ROMPIENTES) DEL ESTADO DE MAR DE  
20-01-2013 A LAS 08:00 HORA UTC  
VECTORES DIRECCIONALES Y MAGNITUDES DE H<sub>spp</sub>  
(ALTURA DE OLA PROPAGADA POR NODO DE MALLA)  
MDT TOPO-BATIMÉTRICO GENERADO A PARTIR DE  
DATOS LIDAR DEL IGN, Y PROVEEDORES DE DATOS  
BATIMÉTRICOS NAVIONICS Y EMODNET  
PLANO A ESCALA 1/3.000

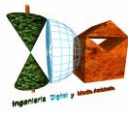




**SISTEMA ETRS89, PROYECCIÓN U.T.M., HUSO 31**  
**RESULTADOS DE PROPAGACIÓN EN ÚLTIMO TRAMO**  
**(PIE DE PLAYA Y ROMPIENTES) DEL ESTADO DE MAR DE**  
**21-01-2020 A LAS 19:00 HORA UTC**  
**VECTORES DIRECCIONALES Y MAGNITUDES DE H<sub>spp</sub>**  
**(ALTURA DE OLA PROPAGADA POR NODO DE MALLA)**  
**MDT TOPO-BATIMÉTRICO GENERADO A PARTIR DE**  
**DATOS LIDAR DEL IGN, Y PROVEEDORES DE DATOS**  
**BATIMÉTRICOS NAVIONICS Y EMODNET**  
**PLANO A ESCALA 1/3.000**







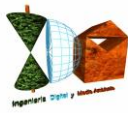
#### **4. CÁLCULOS DE RUN-UP Y COTAS DE MÁXIMA INUNDACIÓN**

El remonte del oleaje o run up es la sobreelevación debida a la cota que alcanza el oleaje al incidir sobre una superficie, respecto al nivel del mar en reposo, siendo uno de los principales factores de incidencia en la cota de máxima inundación a estimar. El problema principal general de los cálculos de run up reside en que no existe una ley única y general que cubra todas las situaciones posibles, por lo que su cálculo debe realizarse a partir de aproximaciones.

Se aplica en el presente estudio tratamiento general de perfil de playa para el cálculo de run-up, dado que se va a calcular la cota de máxima inundación en una zona de morfología de la playa de Levante de Salou, ubicada a levante del Puerto Deportivo de dicha localidad. Se trata de una unidad morfológica de playa urbana semiencajada con orientación principal (normal batimétricas) a S si bien las batimétricas van virando desde rompientes y reducidas hasta indefinidas hacia una orientación de normal principal a SE, lo que propicia tal y como se ha comprobado con las propagaciones de simuladores computacionales, que los estados de mar del sector E-ESE también tengan incidencia en dicha playa con la consiguiente pérdida de energía en el avance por la refracción, a pesar de la orientación nítida a S en la franja de rompientes y profundidad de cierre.

La playa de Levante objeto de estudio tiene el dique principal del Puerto Deportivo de Salou con el que limita, a poniente respecto de la misma, correspondiéndose la morfología costera de la zona con una bahía semiabierta definida por las Puntas Falconera y Grossa por el oeste y la Punta de la Riera de Riudoms por el este, si bien las batimétricas orientadas a S (normal principal) de la franja que comprende rompientes hasta la -10, se corresponden más con las de una playa abierta que con una morfología batimétrica de playa encajada en una bahía más cerrada.

El modelo aplicado para el cálculo del alcance del remonte, se basa en la formulación propuesta por Nielsen y Hanslow (1991) para la obtención de los run up, significativo, del 2% (es uno de los modelos implantados en el software SMC 2.5, módulo de Run-up en playas del TIC). Los estudios que dieron lugar a la formulación del modelo propuesto por Nielsen y Hanslow derivados de las observaciones de exhaustivas campañas de campo sobre seis playas del sudeste de la costa australiana, pusieron de manifiesto la independencia de los resultados del run-up de la pendiente de la playa en el caso de playas cuyo valor de pendiente  $m = \tan \alpha < 1/10$ , es decir, mientras que en playas más reflejantes, con el límite marcado por



la pendiente  $m = \tan \alpha > 1/10$  se confirma la dependencia del ángulo del talud y, por tanto, del número de Iribarren.

Este método de Nielsen y Hanslow para oleaje irregular, es en el que se basa el propuesto por el anterior Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente y por la Universidad de Cantabria en su estudio y publicación del “Atlas de Inundación del litoral peninsular español” para el cálculo del run-up en playas, e incorpora el factor de corrección de Van Der Meer y Janssen (1995) que permite determinar el run-up “Ru” en un perfil compuesto por dos alineaciones a y b conocido el run-up que tendría en la primera alineación  $R_{u0}$  (Nielsen y Hanslow), así como factores que tienen en cuenta las características de rugosidad y percolación de la segunda alineación (playa seca).

De los tres valores de run-up que puede proporcionar el método de Nielsen-Hanslow, en el presente estudio se aplicará el R2%, cuyo valor son superados en un porcentaje de tiempo del 2% del estado de mar, es decir, de modo que el valor de run-up que se tomará será en realidad superado (por el 2% de olas superiores excluidas por el run-up del 2%), asegurándose de este modo que la delimitación de Z.M.T. obtenida en virtud de los nuevos criterios reglamentarios, no incorpora terrenos que no sean alcanzados por los niveles marinos calculados según los citados criterios, dado que un 2% del tiempo del estado de mar habrá run-up que superen el run-up de cálculo empleado en el siguiente estudio.

Dicha formulación y modelo empleado de Nielsen-Hanslow con los coeficientes de adaptación a la morfología específica de cada playa o zona costera de bajo perfil introducidos por Van Der Meer y Janssen (doble pendiente), se esquematiza a continuación:

$$R_{2\%} = 1,98 * 0,04 * (H_{spp} L_0)^{1/2}, \text{ para pendientes } < 10\% (m < 0,1), \text{ y}$$

$$R_{2\%} = 1,98 * 0,47 * (H_{spp} L_0)^{1/2} * m, \text{ para pendientes } > 10\% (m > 0,1),$$

donde:

$R_{2\%}$  = Run-up cuyo valor es superado en un porcentaje de tiempo del 2% del temporal  
 $H_{spp}$  y  $L_0$  son la altura de ola significativa a pie de playa antes de rotura y  $L_0$  la longitud de onda del oleaje en profundidades indefinidas

Siendo:

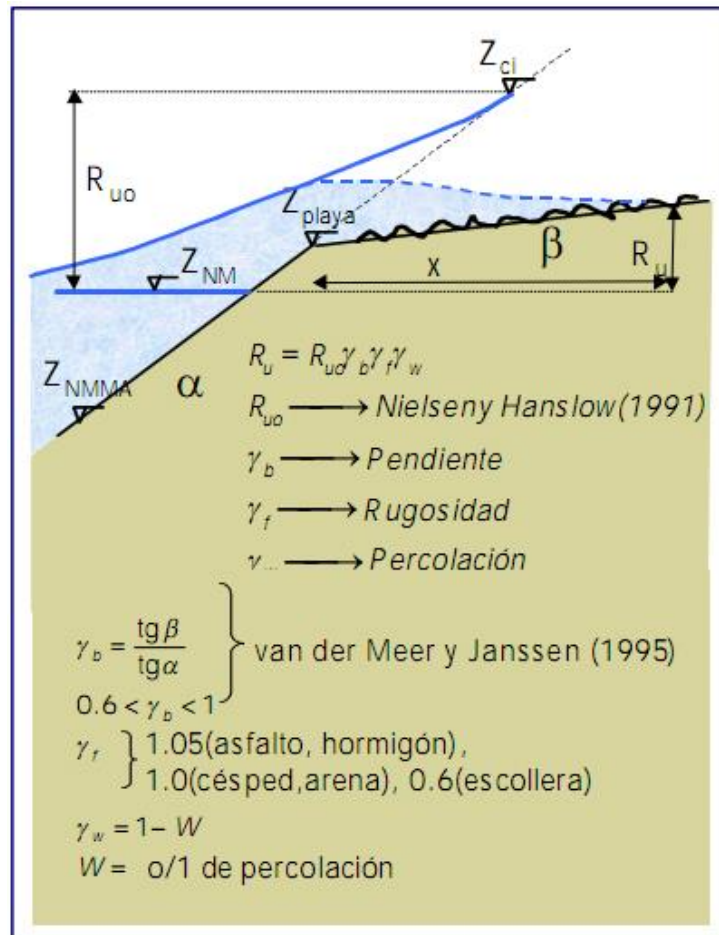
$$L_0 = gT_p^2 / 2\pi \quad (T_p = \text{período de pico})$$

$m = \tan \alpha$ , donde  $\alpha$  es el ángulo de la pendiente media del frente de playa.

siendo el número de Iribarren  $\mathcal{E} = m / (H_{spp} / L_0)^{1/2}$

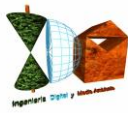


Los factores de corrección de Van Der Meer y Jansen y rugosidad y percolación, ponderan y matizan la formulación (IH Cantabria) a las condiciones más específicas de cada zona, ponderando la existencia de doble pendiente, rugosidad o percolación en la superficie de incidencia (playa seca), según se refleja en el siguiente gráfico:



**Gráfico ilustrativo de los factores de corrección**

Una vez propagados los valores direccionales del oleaje hasta pie de playa antes de rotura en el perfil batimétrico de la playa de Levante de Salou, y de esta forma obtenidos sus correspondientes escalares a pie de playa en el inicio de la zona de rompientes, además de depender de dichos valores calculados de  $H_{spp}$  y del  $T_p$ , el remonte del oleaje dependerá también de la pendiente del frente de playa (tanto en la zona de rompientes como de la playa emergida donde incide el oleaje), que han sido obtenidos del MDT generado a partir del levantamiento LIDAR de alta densidad (0,5 pto/m<sup>2</sup>) del IGN sobre la franja de costa emergida, y en la playa sumergida a partir de los datos batimétricos del proveedor Sonarchart de Navionics con equidistancia de isobatas de 0.5 m. ampliada en intermedias hasta indefinidas con los datos del proveedor EMODNET.



Para los cálculos de los perfiles de los frentes de playa en la zona de rompientes y playa emergida y en función de las profundidades de rotura que correspondería a las alturas de ola propagadas hasta pie de playa, se han tomado los perfiles comprendiendo la franja de rompientes desde una profundidad comprendida desde la isobata -9, hasta el fondo de playa e incluyendo terrenos bajos al trasdós, habiéndose definido a lo largo del tramo de estudio un total de 119 perfiles-transectos de incidencia atendiendo a la geometría de la línea de orilla y batimétricas finales de rompientes así como a las direcciones dominantes de vectores del oleaje en la propagación en dicha franja, sobre los cuales se han realizado los cálculos de run-up, que proporcionarán 119 valores de inundación por cada estado de mar propagado una vez incrementados en el nivel mareal correspondiente sincronizado a cada estado de mar a lo largo de dicho tramo de costa, para los estados de mar seleccionados a partir del análisis del clima marítimo sobre los datos de los parámetros históricos de series horarias de datos 1993-2023 según el Punto Simar, los cuales configurarán los resultados de inundación máximos que definirán el límite asociado.

Los perfiles-transectos sobre los que se han ejecutado los cálculos de run-up y el modelo de inundación a lo largo del tramo de estudio se han posicionado en el siguiente plano a escala 1/1.200 sobre el MDT topo-batimétrico generado, en coordenadas del sistema ETRS89, elipsoide GRS80, Proyección U.T.M., Huso 31. En el Anejo I se adjuntan asimismo los 119 gráficos correspondientes a dichos perfiles, obtenidos sobre el MDT topo-batimétrico.

Asimismo se han reflejado en dicho plano junto a cada perfil/transecto de ejecución, los puntos y magnitudes de H<sub>spp</sub> propagados hasta las posiciones de los mismos antes de rotura de cada estado de mar propagado que constituyen uno de los datos de entrada en el modelo de Nielsen-Hanslow con los factores del modelo modificado según la IH de Cantabria.



343100

343200

343300

343400

343500

SISTEMA ETRS89, PROYECCIÓN U.T.M., HUSO 31  
 Hsp ALTURAS DE OLA PROPAGADAS A PIE DE PLAYA ANTES DE ROTURA  
 Hsp ESTADO DE MAR 20-01-2013 08:00  
 Hsp ESTADO DE MAR 21-01-2020 19:00  
 PERFILES/TRANSECTOS DE EJECUCIÓN DEL MODELO DE INUNDACIÓN  
 NIELSEN HANSLOW - IH CANTABRIA CON IDENTIFICADOR DE PERFIL  
 ESCALA 1/1.200

4548600

4548600

4548500

4548500

4548400

4548400

4548300

4548300

4548200

4548200

4548100

4548100

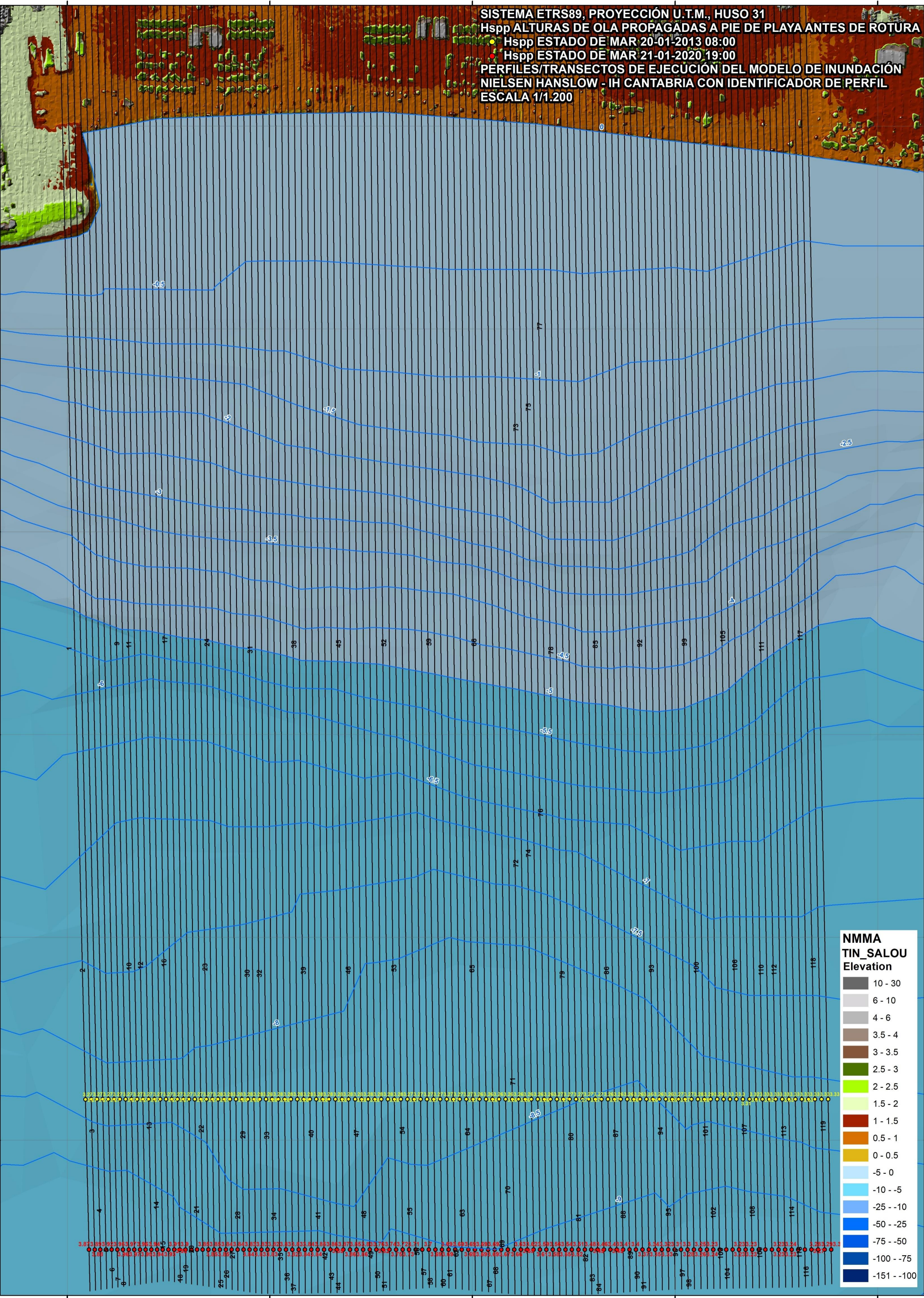
343100

343200

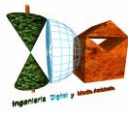
343300

343400

343500

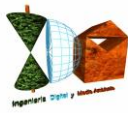






Asimismo los factores de pendiente y percolación  $\gamma_b$ ,  $\gamma_w$  han sido aplicados, sobre los 119 perfiles en los que se ha subdividido el tramo de estudio (aproximadamente una equidistancia de perfiles/transectos de 3,08 m.) en los que al ejecutar el modelo de inundación (run-up+marea) el valor de cota de inundación (CI) obtenido sobrepasa la cota de coronación de la berma de la playa (máxima cota de la playa comprendidas entre 1,2-1,4 m. NMMA) que en esta playa de Levante se alcanza en el fondo de playa, con terrenos al trasdós que mantienen mayoritariamente la cota del fondo de la playa e incluso tienen cotas inferiores, de forma que el punto de cota de inundación tomado sobre cada perfil, ha sido el punto que interseca el terreno al trasdós de la playa con el valor de inundación aplicado el factor de  $\gamma_b \cdot \gamma_w$  de 0.54, habida cuenta de que se ha aplicado el máximo factor reductor de Van Der Meer-Janssen por doble pendiente teniendo en cuenta que la pendiente emergida es inferior a la pendiente de la playa sumergida y en particular en los terrenos al trasdós del fondo de playa llega a ser nula o incluso negativa, de forma que se ha considerado  $\gamma_b = 0,6$ , con un factor de percolación  $\gamma_w = 0,9$  teniendo en cuenta que con el incremento por marea + set-up (incremento de nivel medio en la zona de rompientes) la mayor parte de la playa alcanzará la saturación en los episodios de temporal considerados, así como el ancho de playa variable entre 100 m. (extremo oeste) a 75 m. (extremo este).

En cuanto al factor de rugosidad, si bien en el tramo de costa de estudio no existen defensas de escollera en la playa de Levante que son los elementos en función de los cuales se aplican factores reductores por rugosidad normalizados, se ha aplicado un factor de rugosidad relativo al haberse considerado en el MDT emergido los elementos antrópicos como jardineras, bordillos o vegetación, es decir, al haberse considerado el MDS con dichos elementos sobre el terreno, que tendrán su incidencia obstativa a la inundación frenando el avance de la lámina de penetración marina sobre las superficies emergidas de incidencia con un factor de rugosidad equivalente comprendido en el rango entre  $\gamma_f = 1-0.85$ .



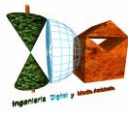
Por tanto se han aplicado los factores de corrección dado que las CI max. o R0u2% de alcance de la inundación máxima (sin factores de corrección) a lo largo del perfil superan las cotas altimétricas de la coronación de la playa y alcanzan los terrenos situados al trasdós de la misma, circunstancia por la cual se ha extendido la inundación por el perfil a los terrenos al trasdós, si bien disminuida por los citados factores que ponderan la reducción de la cota de máxima inundación alcanzada sobre la playa por pérdidas de carga al sobrepasar hasta terrenos bajos en posiciones interiores.

En consecuencia, la expresión final del Run up corregida por estos coeficientes en las ejecuciones de los modelos de inundación en los 119 perfiles, se corresponderá con el producto  $R_{u2\%} = R_{0u2\%} \cdot \gamma_f \cdot \gamma_b \cdot \gamma_w$  (factores de corrección morfológica de rugosidad, pendiente y percolación).

Cabe señalar en relación a la reducción por aplicación de factores (percolación y cambio de pendiente y rugosidad en su caso) en la cota de inundación sobre aquellos perfiles correspondientes a zonas de playa con terrenos bajos al trasdós, que la aplicación de la cota de inundación obtenida sobre dichos terrenos bajos sin la consideración de dichos factores (como realizan algunas metodologías tendentes a la máxima seguridad en cuanto a riesgos de inundación), hubiera generado superficies de inundación sustancialmente superiores en cuanto a su alcance interior que las finalmente obtenidas al haberse aplicado los mismos, habiéndose procedido por tanto en el presente estudio desde el lado de la seguridad (de las propiedades no demaniales), con un factor conjunto de percolación, pendiente y en su caso, de rugosidad.

A partir de los resultados de propagación exportados en una malla de detalle de nodos extendida hasta el tramo objeto de estudio en la playa de Levante de Salou, (en cada uno de los cuales el software Oluca-SP espectral proporcionó los valores de los parámetros del oleaje hasta la posición de cada nodo), se han seleccionado los nodos a pie de playa con los valores de altura de ola propagada antes del inicio de la rotura a lo largo de una franja que comprende los 119 perfiles-transectos para los estados de mar seleccionados que se han reflejado en el plano anterior a escala 1/1.200 (uno por perfil/transecto) con sus correspondientes identificadores por perfil, sobre los que se ha ejecutado el modelo de Nielsen y Hanslow con los factores de corrección descritos, todo ello mediante una aplicación informática diseñada y programada en plataforma GIS que comprende un paquete de herramientas interactivas que aplicarán dicho modelo semiempírico para el cálculo de las líneas de inundación sobre el MDT, realizando las siguientes operaciones:





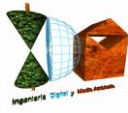
1. Cálculo de la pendiente del frente de playa sobre el MDT topobatimétrico de cada uno de los 119 perfiles de playa (playa sumergida y emergida), obtenida como la pendiente de la recta ajustada a los puntos de cada perfil por el método de mínimos cuadrados.
2. A partir de una línea previa de rotura semiempírica que calcula la aplicación con los modelos-criterios de Sunamura y Horikawa (1974) y Sunamura (1980), (con  $H_b$  = altura de ola en rotura,  $d_b$ = profundidad de rotura,  $L_0$  longitud de onda en aguas profundas y  $m$ =pte. del frente de playa)

$$\frac{H_b}{H_0} = m^{0.2} \left( \frac{H_0}{L_0} \right)^{-0.25} \quad \frac{H_b}{h_b} = 1.1 m^{1/6} \left( \frac{H_0}{L_0} \right)^{-1/12}$$

que comprenderá la extensión de los perfiles,

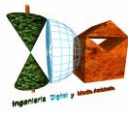
la aplicación seleccionará los nodos más próximos de la malla de propagación de detalle sobre la franja batimétrica previa a la línea de rotura inicialmente estimada, con las mayores alturas de ola propagada frente a cada perfil antes de rotura, para tomar los valores de  $H_s$  propagados por el Oluca-SP espectral, que serán datos imput para la ejecución de los cálculos de run-up.

3. Ejecución de los cálculos de run-up sobre cada uno de los 119 perfiles-transectos para los estados de mar seleccionados, teniendo en cuenta los perfiles correspondientes a zonas con escollera, mediante el factor de rugosidad.
4. Adición del nivel mareal sincronizado correspondiente al horario de cada estado de mar , al resultado de run-up, obteniendo una cota de inundación en cada uno de los 119 perfiles, para cada estado de mar calculado.



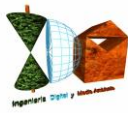
5. Cálculo de la intersección de las cotas de inundación de los estados de mar calculados, obtenidas sobre cada perfil como la intersección de las mismas sobre el MDT emergido (incluidos los factores de corrección), generando una cobertura de puntos con sus coordenadas de georreferenciación x, y, z=cota de inundación, en el sistema ETRS89, Huso 31, y en aquellos perfiles en los que la cota de inundación supera a la de los terrenos al trasdós de la playa, extensión del alcance hacia el interior hasta la cota de inundación afectada por los coeficientes de pendiente (Van Der Meer y Janssen) y percolación, y en su caso de rugosidad.
6. Generación de la geometría de los puntos de inundación solución de cada estado de mar calculado sobre el MDS, resultantes sobre cada uno de los perfiles.
7. Selección de los puntos solución de inundación por perfil según los criterios del R.G.C. (modificado por el Real Decreto 668/2022, de 1 de agosto), como los puntos de máxima cota de inundación de entre las soluciones de los estados de mar propagados y calculados, que habían sido seleccionados mediante el análisis del clima marítimo en un período histórico comprendido entre 1993 y la actualidad (para determinar cuáles serían los potenciales generadores de la máxima inundación del período analizado).
8. Generación de la poligonal solución a partir de los puntos solución obtenidos, como la unión de los puntos de cada perfil de máxima inundación sobre el MDT topobatimétrico generado (MDS en la franja emergida, para considerar todos los elementos antrópicos que puedan obstaculizar el oleaje).





En el Anejo II, se incluyen las tablas que recogen los resultados de los puntos solución que se corresponden con los obtenidos en la zona de estudio con la metodología descrita en sus perfiles de cálculo, a partir de la ejecución del modelo de inundación sobre los nodos propagados a pie de playa de los estados de mar que por su dirección de procedencia y parámetros de oleaje, tras el análisis de los estado de mar horarios del período 1993-2023 (mayo), resultaron tener el máximo potencial de inundación sobre el tramo de estudio.

En consecuencia, el resultado final de la línea de inundación en el tramo de costa de 373 metros aproximadamente de la playa de Levante de Salou ubicada a levante del Puerto Deportivo de Salou, en el T.M. de Salou, Tarragona, ha sido obtenido en cumplimiento de lo establecido en la Ley 2/2013, de 29 de mayo, de Protección y Uso Sostenible del Litoral y de Modificación de la Ley 22/1988, de 28 de julio, de Costas y con el artículo 4 a del Reglamento General de Costas (Real Decreto 876/2014) modificado por el Real Decreto 668/2022, de 1 de agosto, con la base metodológica y teórica desarrollada anteriormente, con las formulaciones descritas, así como con los paquetes y herramientas informáticas de SMC versión 2.5 desarrolladas por el GIOC de la Universidad de Cantabria y el anterior Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente para la simulación de la propagación del oleaje mediante modelos numéricos computacionales (MOPLA, Oluca-SP espectral), en combinación con una aplicación informática que opera en plataforma GIS sobre el MDT topobatimétrico generado (MDS en la franja emergida), aplicando los modelos descritos (run-up + incremento mareal) y proporcionando la línea de inundación solución, como la que une la máxima cota de inundación obtenida para cada uno de los 119 perfiles en los cálculos ejecutados a partir de los datos de oleaje del período comprendido entre 1993 y la actualidad analizado a partir de los datos horarios de estados de mar del Punto Simar 2098132, y del mareógrafo de Barcelona 3758.





## **5. PLANOS DE LOS RESULTADOS**

Se incluyen a continuación planos sobre el MDT topo-batimétrico y sobre ortofotografía, a escala 1/1.000, en coordenadas del sistema ETRS89, elipsoide GRS80, Proyección U.T.M., Huso 31, referencia altimétrica al N.M.M.A., en los que se refleja la línea de inundación solución obtenida uniendo los puntos de máxima cota de inundación por perfil obtenidos a partir de la ejecución del modelo de inundación aplicado sobre el estado de mar seleccionado de entre los 265.970 registros horarios de estados de mar y mareas analizados de los instrumentos de medición de Puertos del Estado en la zona de estudio (Punto Simar 2098132, y del mareógrafo de Barcelona 3758), una vez analizado y comprobado su mayor potencial de inundación sobre el resto de registros de estados de mar y mareas (sincronizados) correspondientes al máximo período posible de registros conjunto de mareas, y realizada su propagación desde profundidades indefinidas hasta pie de playa de Levante de Salou.

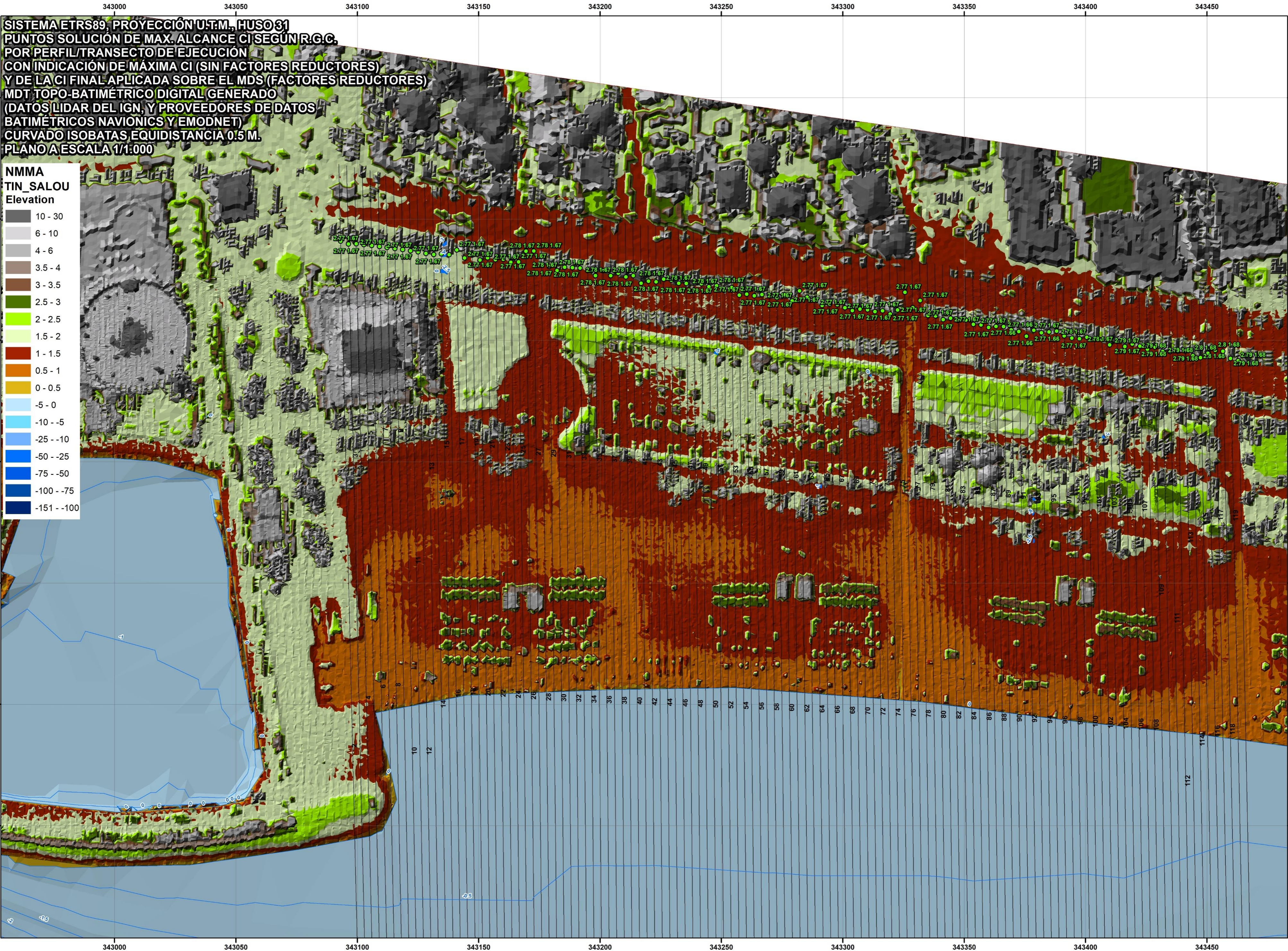
Se indican en los planos con los puntos solución sobre los perfiles/transectos de ejecución, tanto las CI máximas sin aplicación de los factores reductores, como las cotas intersecadas sobre el terreno que se corresponden con las CI una vez aplicados los factores reductores en el modelo de run-up. En las tablas del Anejo II, se recogen también los valores de CI max. por perfil, así como las cotas intersecadas sobre el MDT resultantes de la CI máxima reducida con los factores descritos (percolación, pendiente y rugosidad).

MADRID, MAYO DE 2023, LA EMPRESA CONSULTORA

  
  
INGENIERIA DIGITAL Y  
MEDIO AMBIENTE S.L.  
CIF: B83278283

INGENIERÍA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)





SISTEMA ETRS89, PROYECCIÓN U.T.M., HUSO 31  
PUNTOS SOLUCIÓN DE MAX. ALCANCE CI SEGUN R.G.C.  
POR PERFIL/TRANSECTO DE EJECUCIÓN  
CON INDICACIÓN DE MÁXIMA CI (SIN FACTORES REDUCTORES)  
Y DE LA CI FINAL APLICADA SOBRE EL MDS (FACTORES REDUCTORES)  
MDT TOPO-BATIMÉTRICO DIGITAL GENERADO  
(DATOS LIDAR DEL IGN, Y PROVEEDORES DE DATOS  
BATIMÉTRICOS NAVIONICS Y EMODNET)  
CURVADO ISOBATAS EQUIDISTANCIA 0.5 M.  
PLANO A ESCALA 1/1.000

NMMA	
TIN_SALOU	
Elevation	
10 - 30	Dark Grey
6 - 10	Light Grey
4 - 6	Medium Grey
3.5 - 4	Brown
3 - 3.5	Dark Green
2.5 - 3	Light Green
2 - 2.5	Yellow-Green
1.5 - 2	Light Yellow
1 - 1.5	Red
0.5 - 1	Orange
0 - 0.5	Yellow
-5 - 0	Light Blue
-10 - -5	Medium Blue
-25 - -10	Dark Blue
-50 - -25	Very Dark Blue
-75 - -50	Dark Blue
-100 - -75	Dark Blue
-151 - -100	Dark Blue

10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30 32 34 36 38 40 42 44 46 48 50 52 54 56 58 60 62 64 66 68 70 72 74 76 78 80 82 84 86 88 90 92 94 96 98 100 102 104 106 108 110 112 114 116 118







SISTEMA ETRS89, PROYECCIÓN U.T.M., HUSO 31  
PUNTOS SOLUCIÓN DE MAX. ALCANCE CI SEGUN R.G.C.  
POR PERFIL/TRANSECTO DE EJECUCIÓN  
ORTOFOTOPNOA MA (AÑO 2021)  
PLANO A ESCALA 1/1.000



343000 343050 343100 343150 343200 343250 343300 343350 343400 343450

343000 343050 343100 343150 343200 343250 343300 343350 343400 343450

4548550 4548600 4548650 4548700 4548750 4548800 4548850

4548550 4548600 4548650 4548700 4548750 4548800 4548850



SISTEMA ETRS89, PROYECCIÓN U.T.M., HUSO 31  
PUNTOS SOLUCIÓN DE MÁX. ALCANCE CI SEGÚN R.G.C.  
Y LÍNEA SOLUCIÓN RESULTANTE  
ORTOFOTOPNOA MA (AÑO 2021)  
PLANO A ESCALA 1/1.000





SISTEMA ETRS89, PROYECCIÓN U.T.M., HUSO 31  
LÍNEA SOLUCIÓN MAX. ALCANCE C/ SEGÚN R.G.C.  
ORTOFOTOPNOAMA (AÑO 2021)  
PLANO A ESCALA 1/11.000



4548850

4548800

4548750

4548700

4548650

4548600

4548550

343000

343050

343100

343150

343200

343250

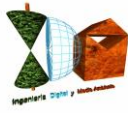
343300

343350

343400

343450





**INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)**

C/ Cañadilla 6, local 68, C. Comercial Coronado, Las Rozas de Madrid 28231, Madrid

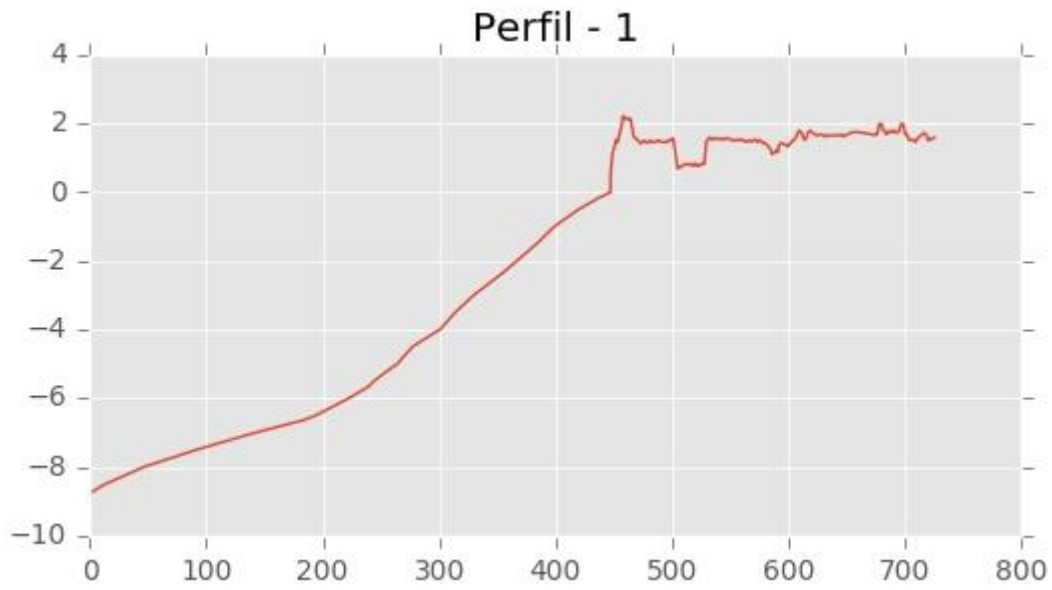
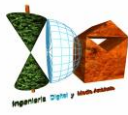
Pza. de la Montañeta 4, entresuelo, 03001 Alicante

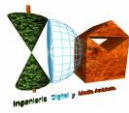
Tfno.: 918961731; Fax: 918903410; e-mail: idyma@idyma.es

## **ANEJO I**

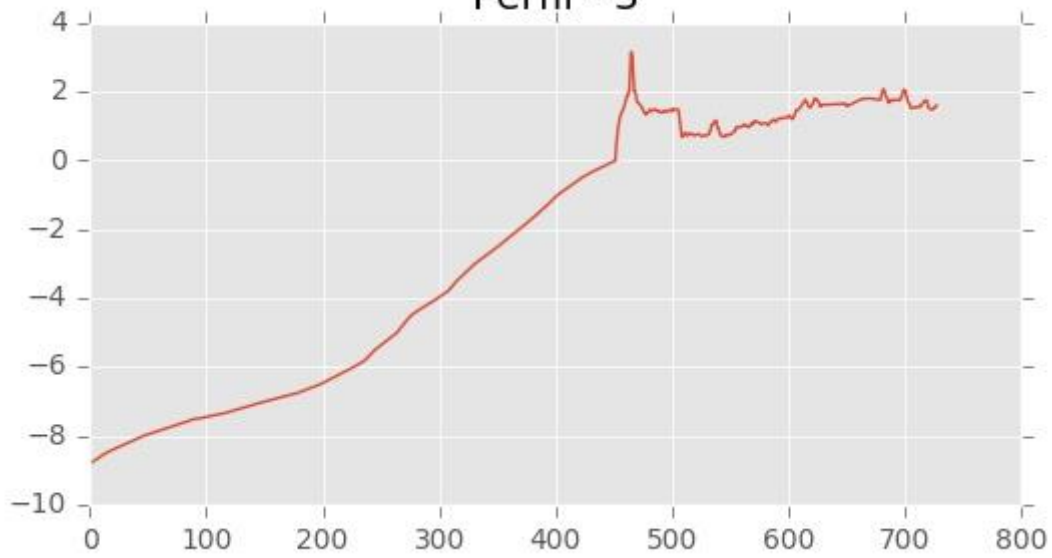
**GRÁFICOS CORRESPONDIENTES A LOS 119 PERFILES OBTENIDOS SOBRE EL MDT  
TOPO-BATIMÉTRICO**



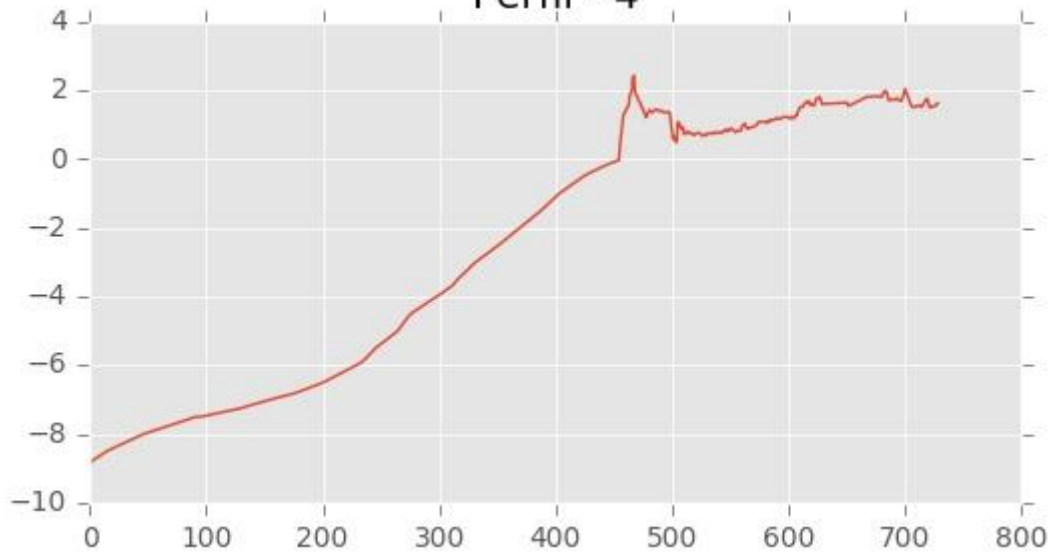




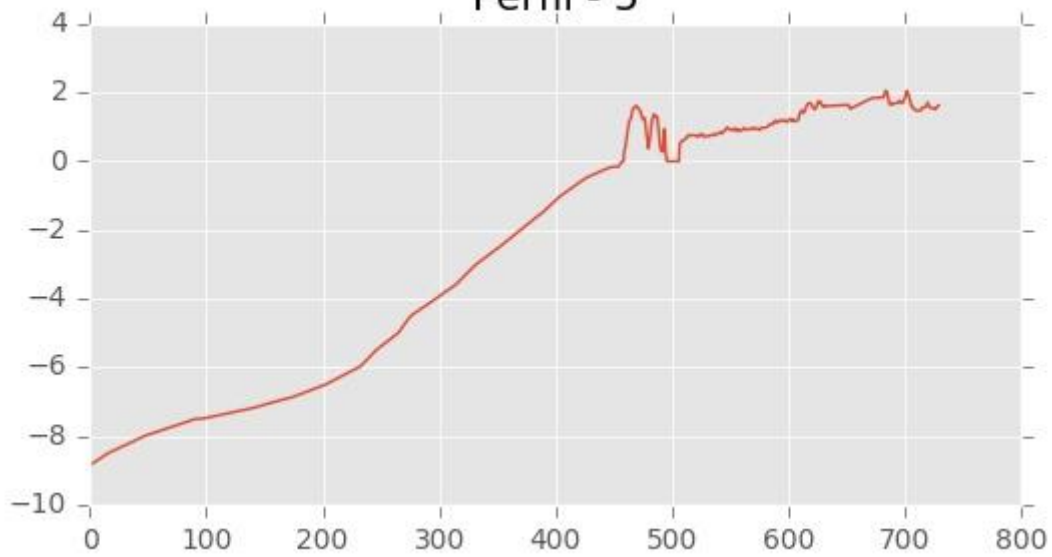
**Perfil - 3**



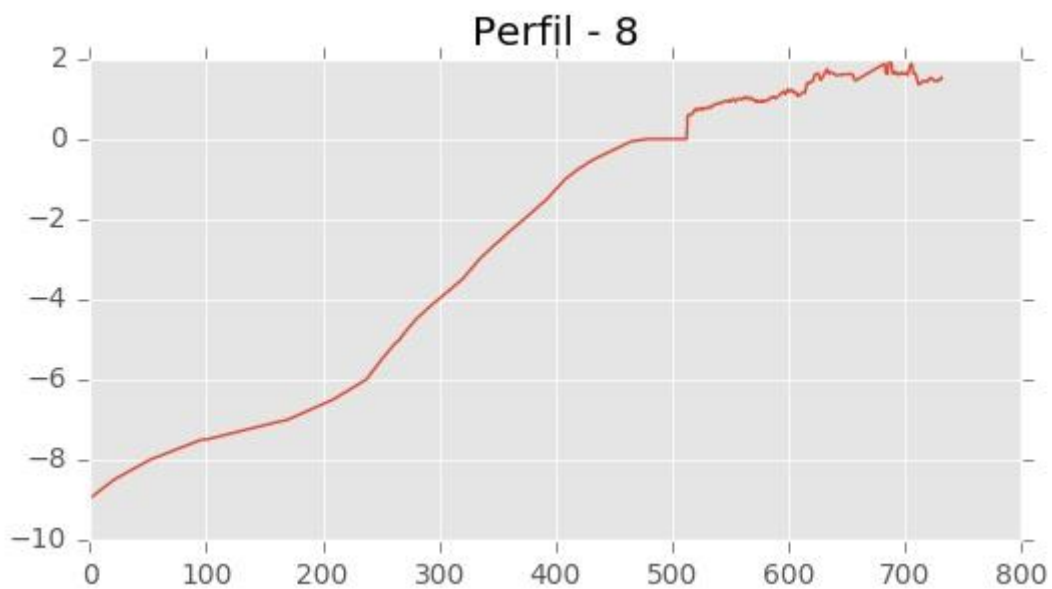
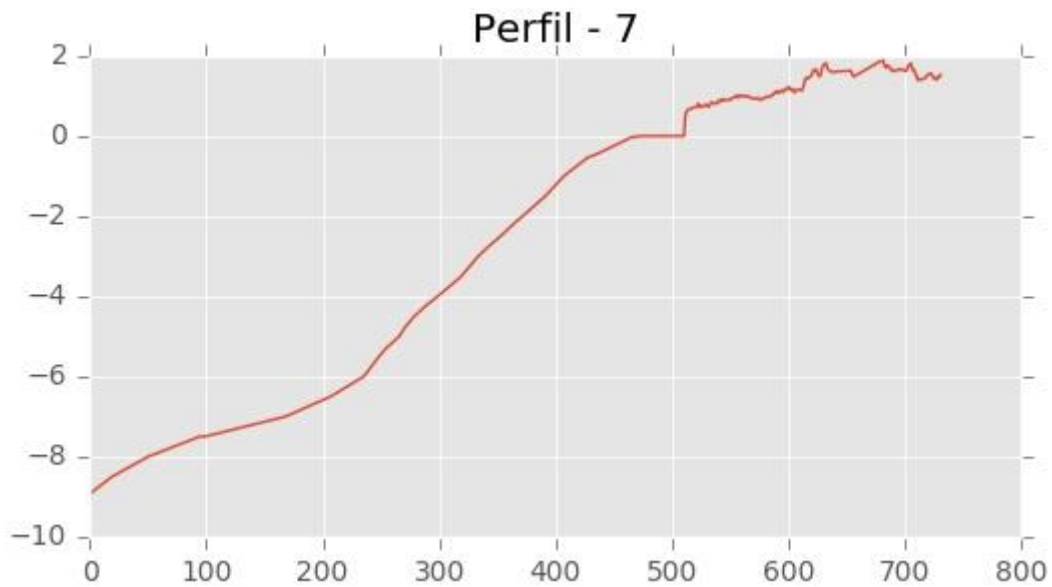
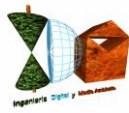
**Perfil - 4**

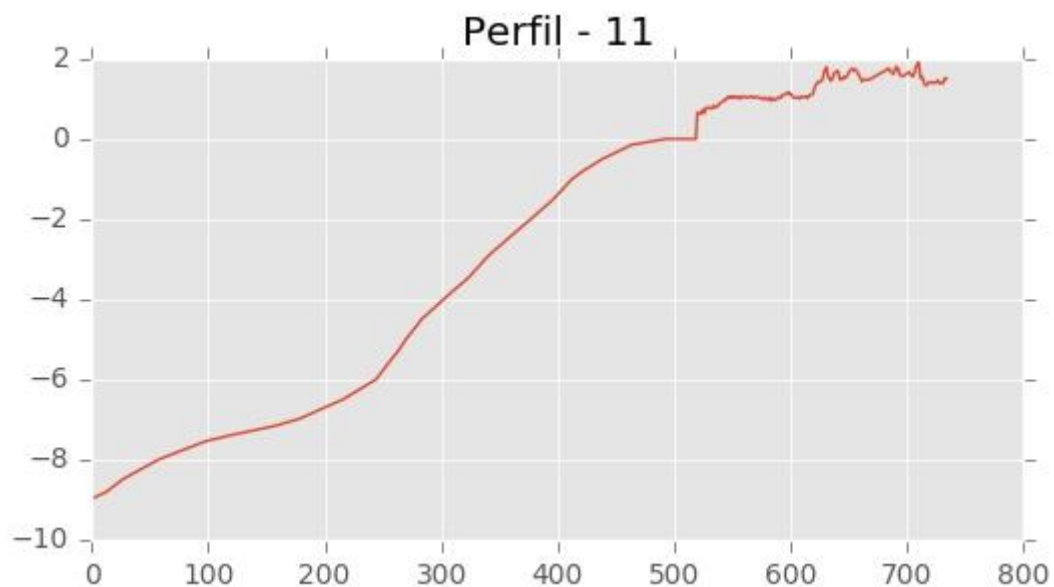
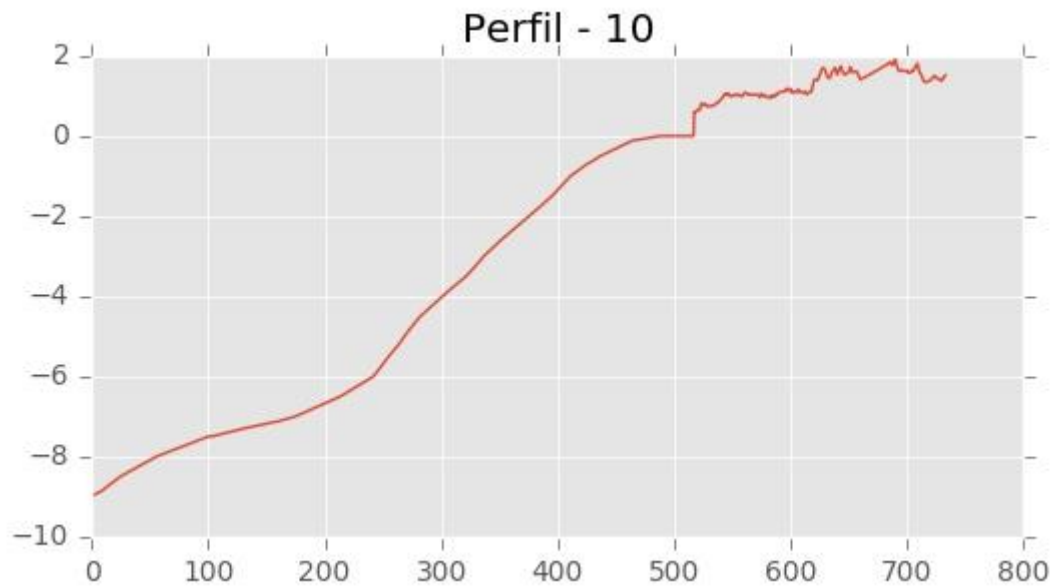
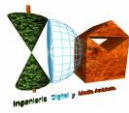


**Perfil - 5**

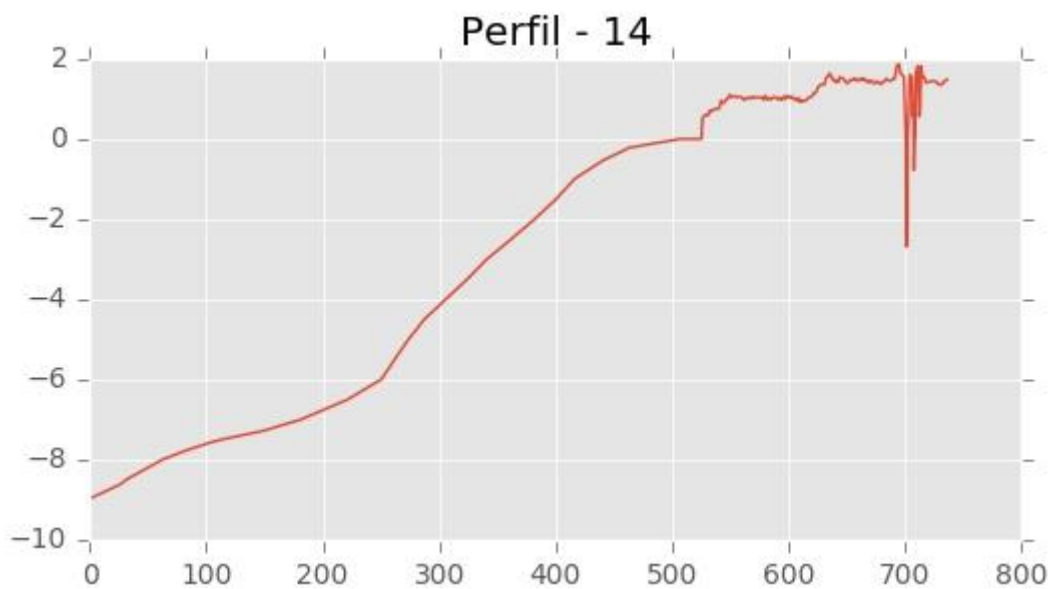
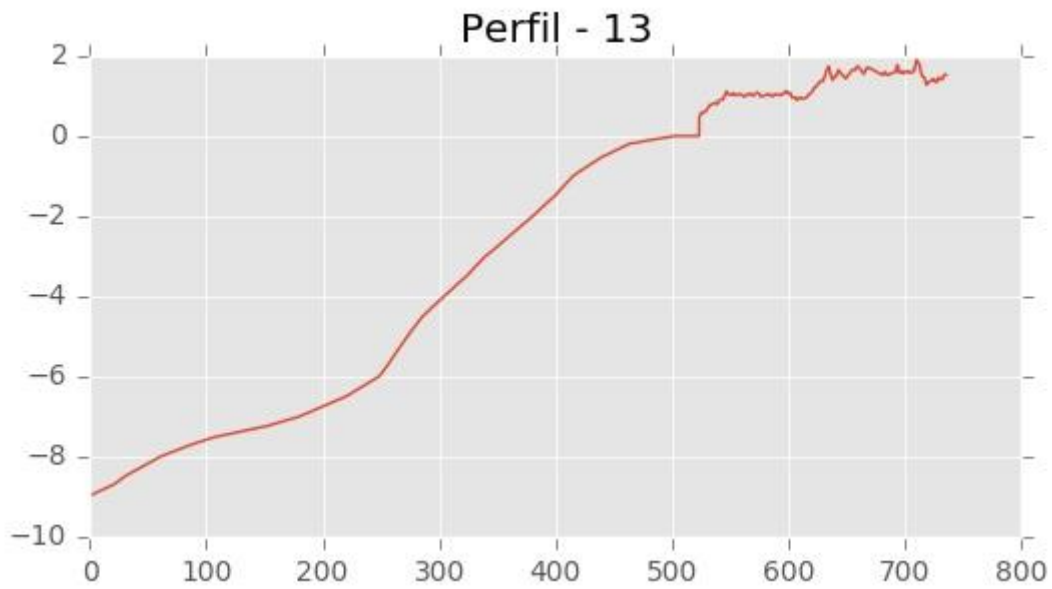
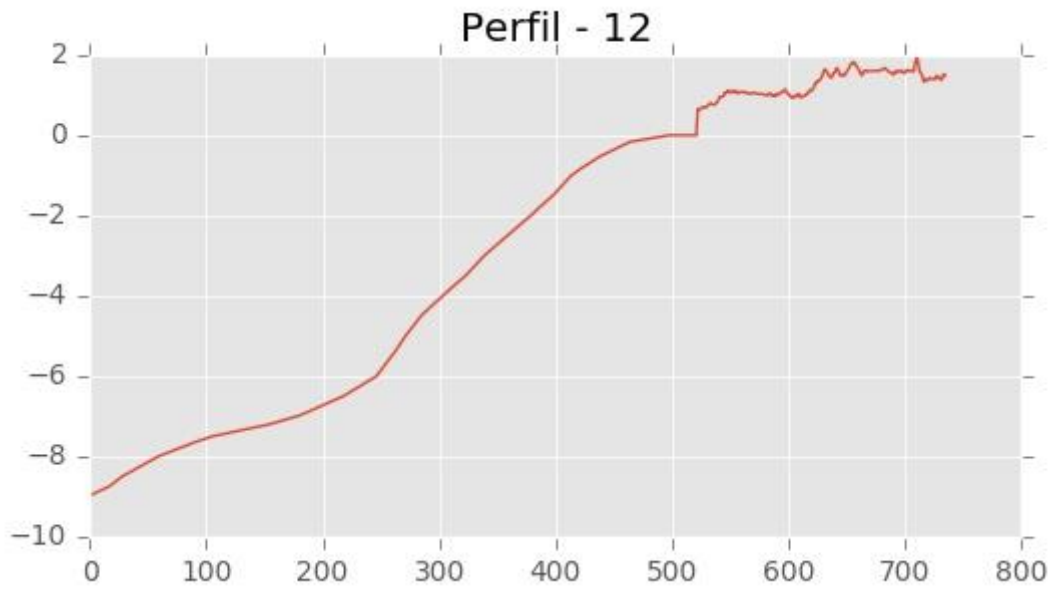
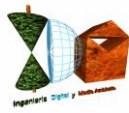


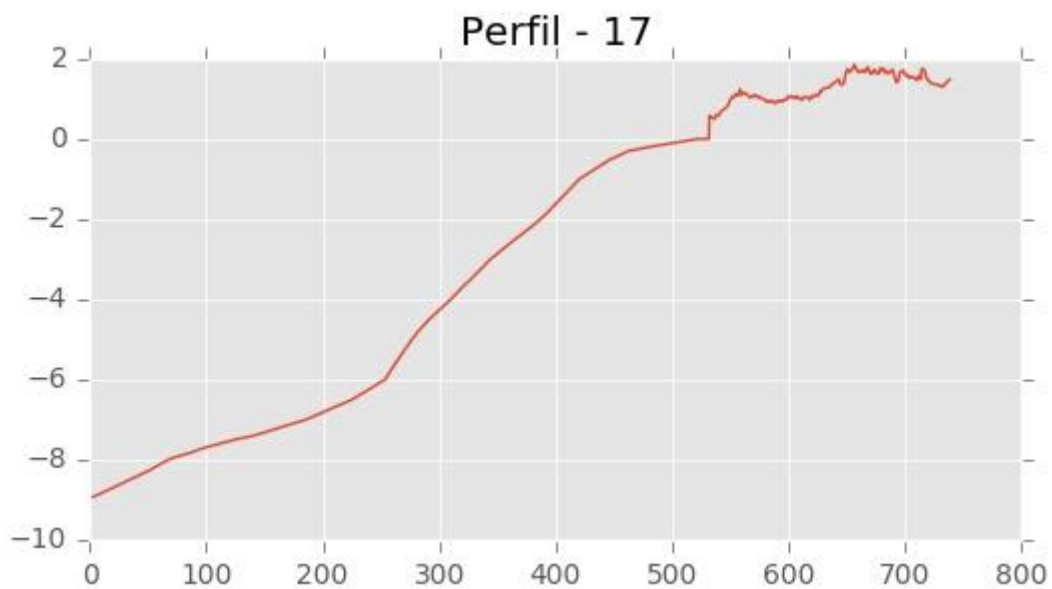
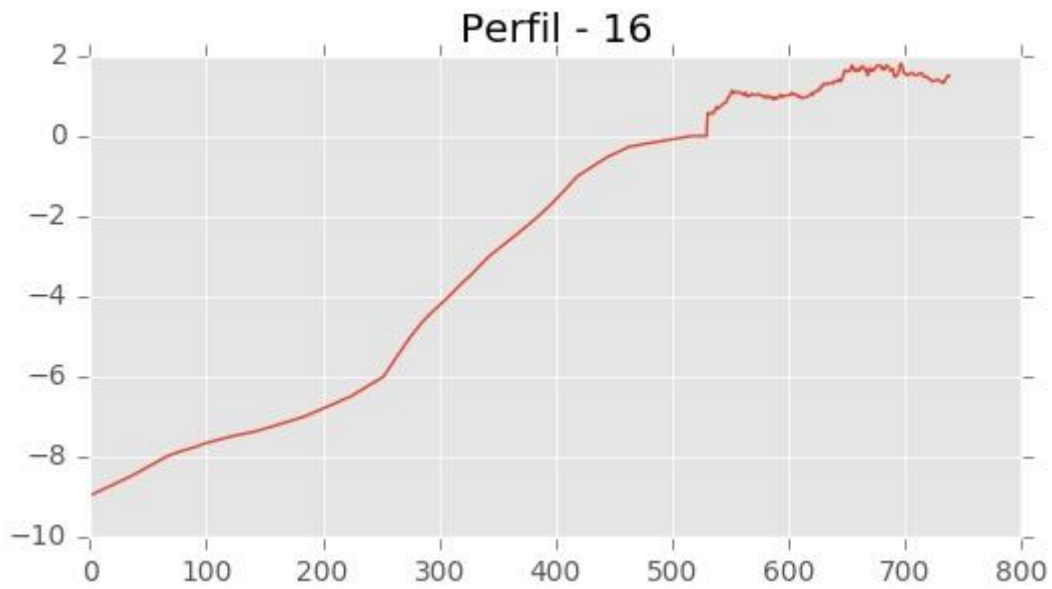
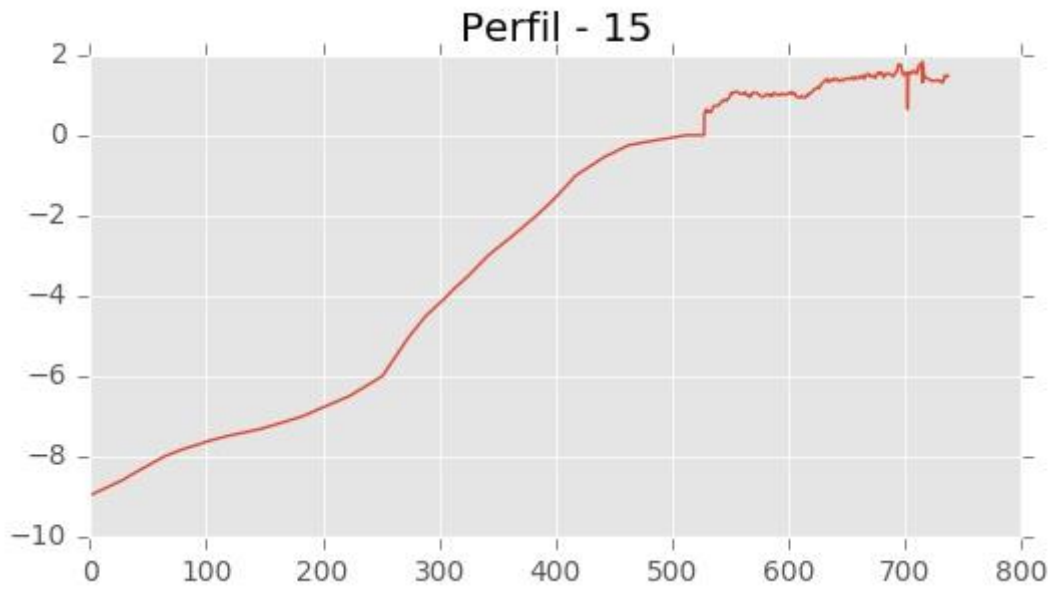
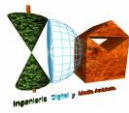




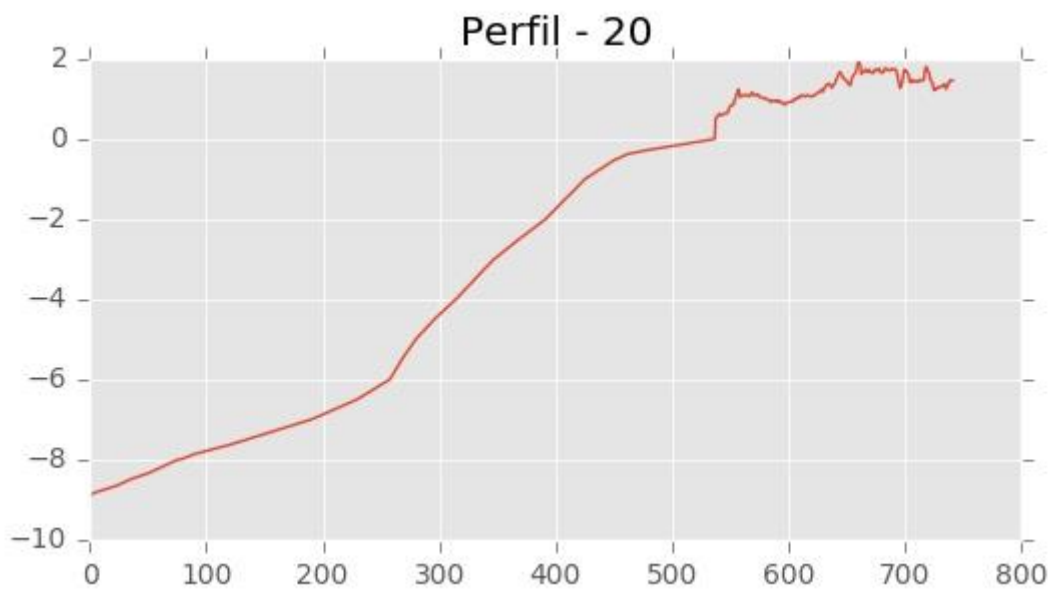
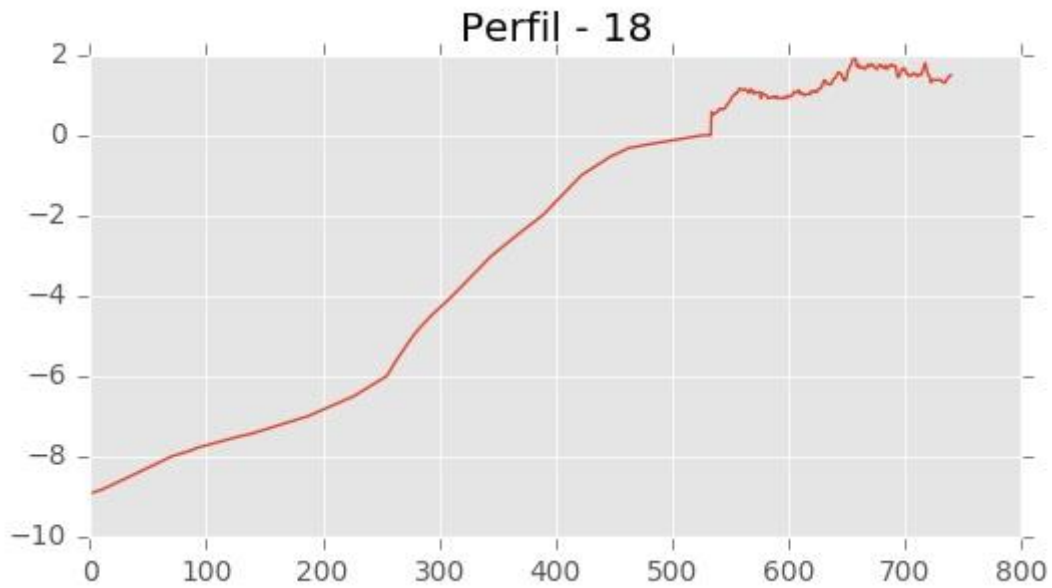
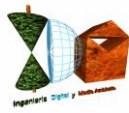


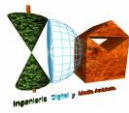




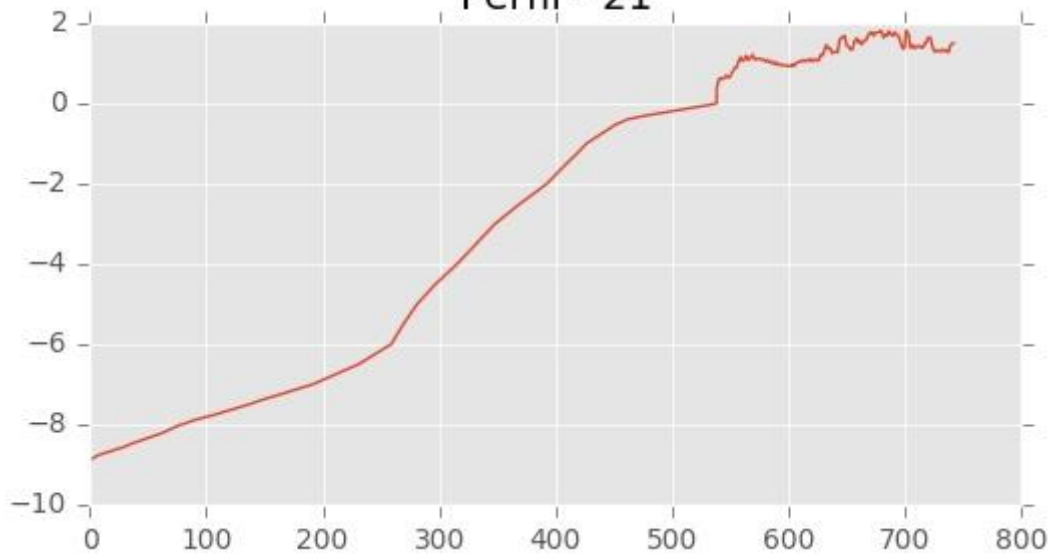




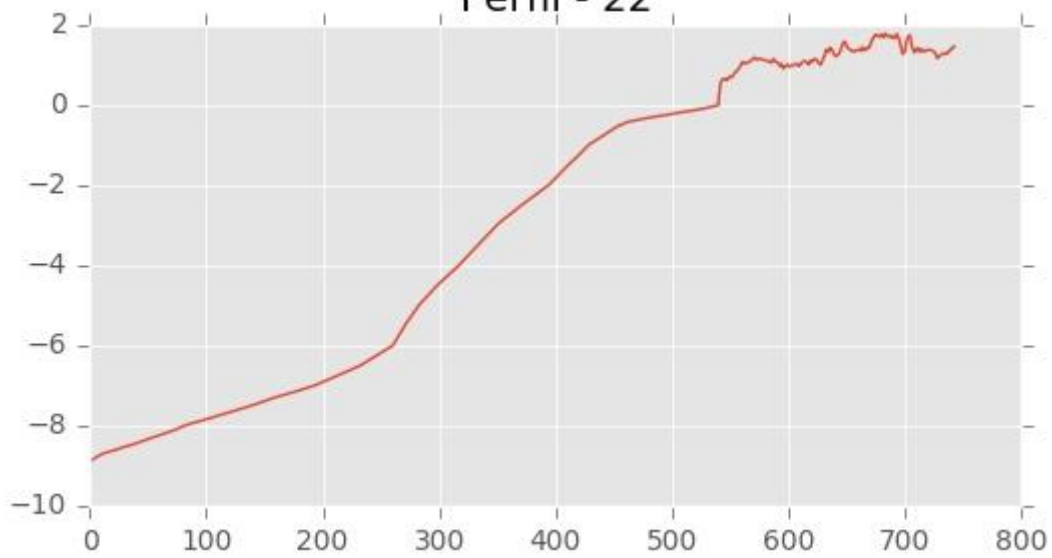




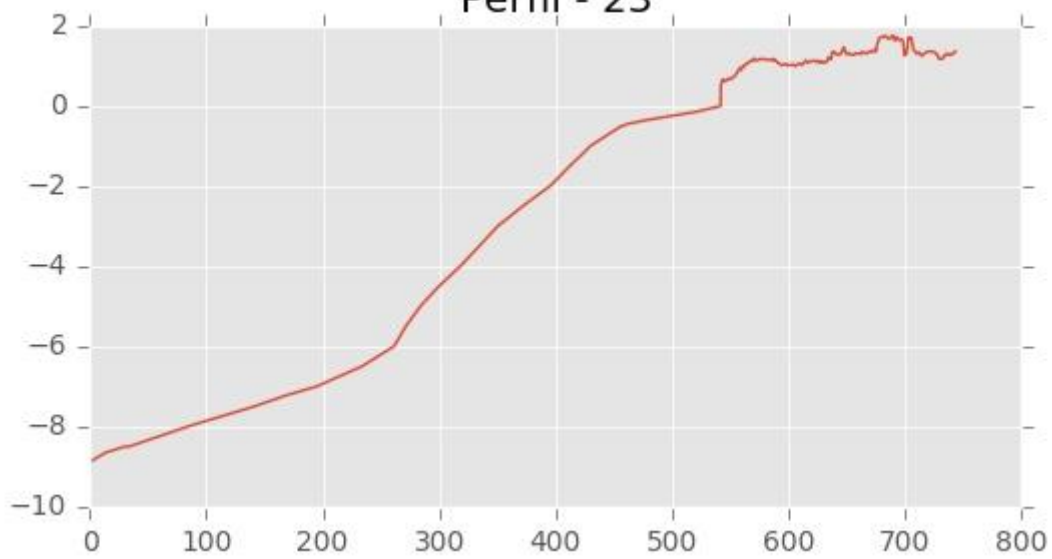
**Perfil - 21**



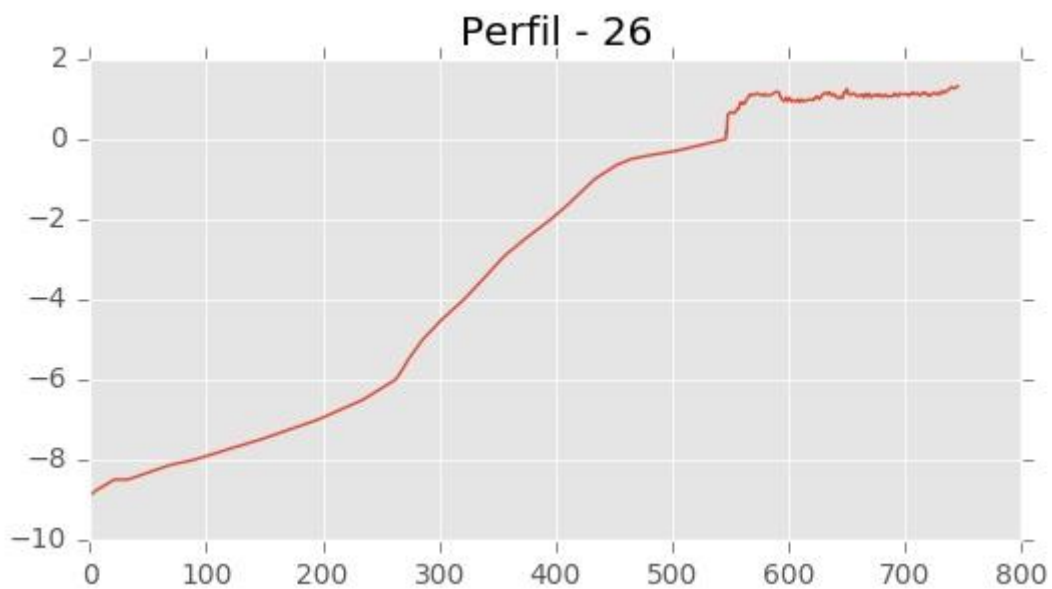
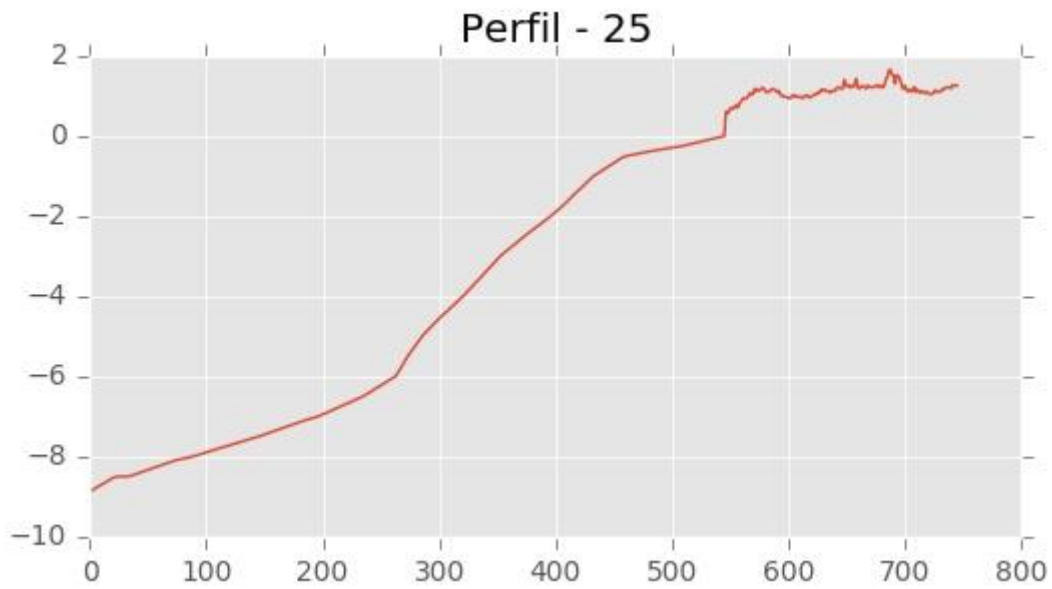
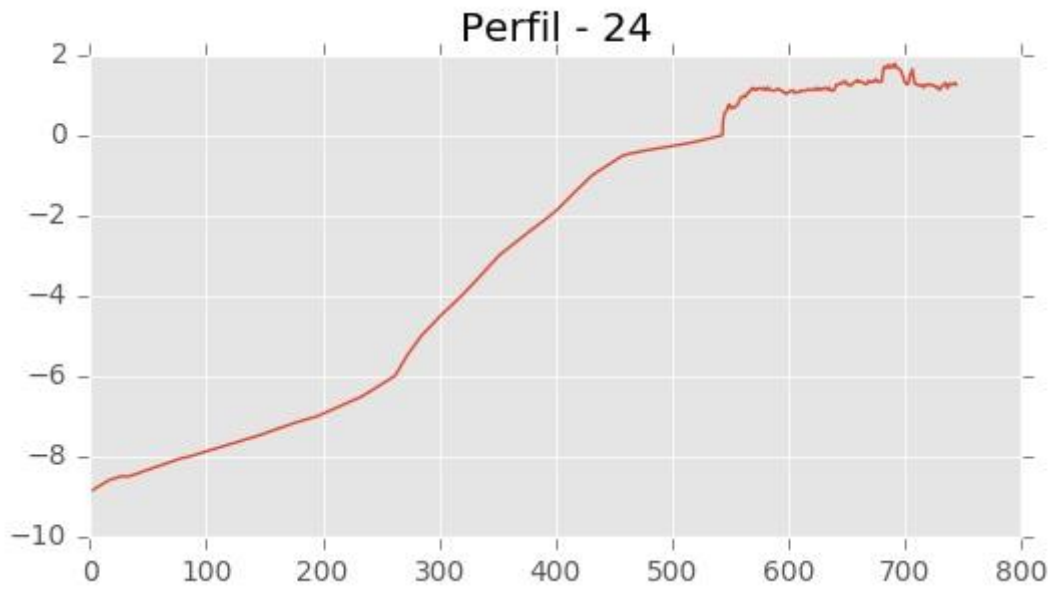
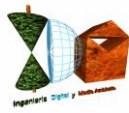
**Perfil - 22**

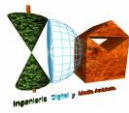


**Perfil - 23**

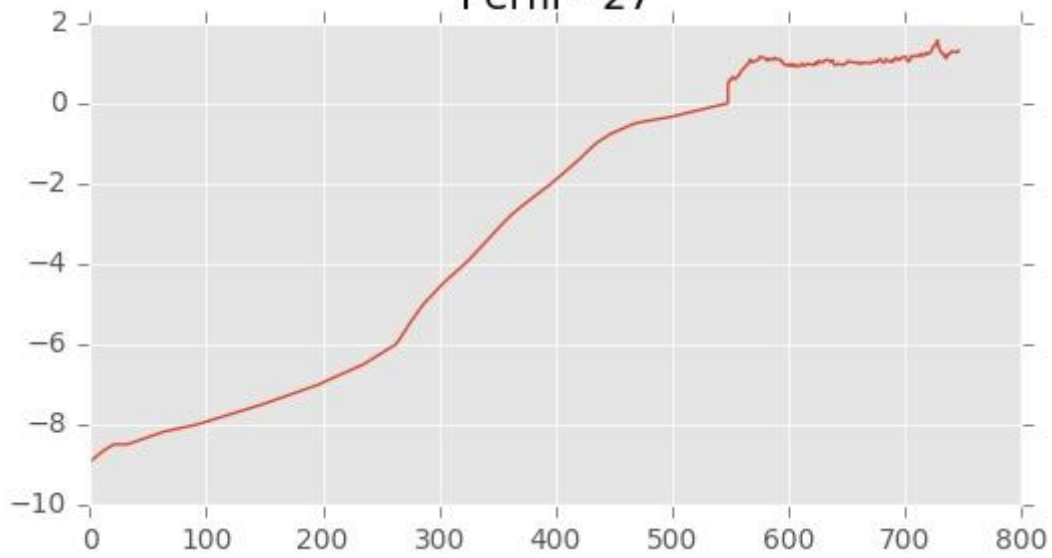




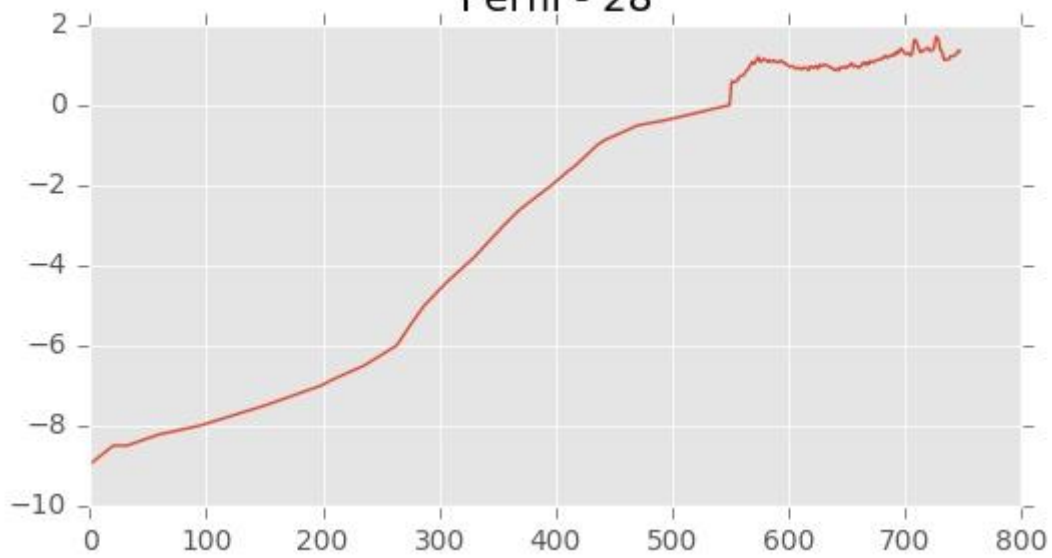




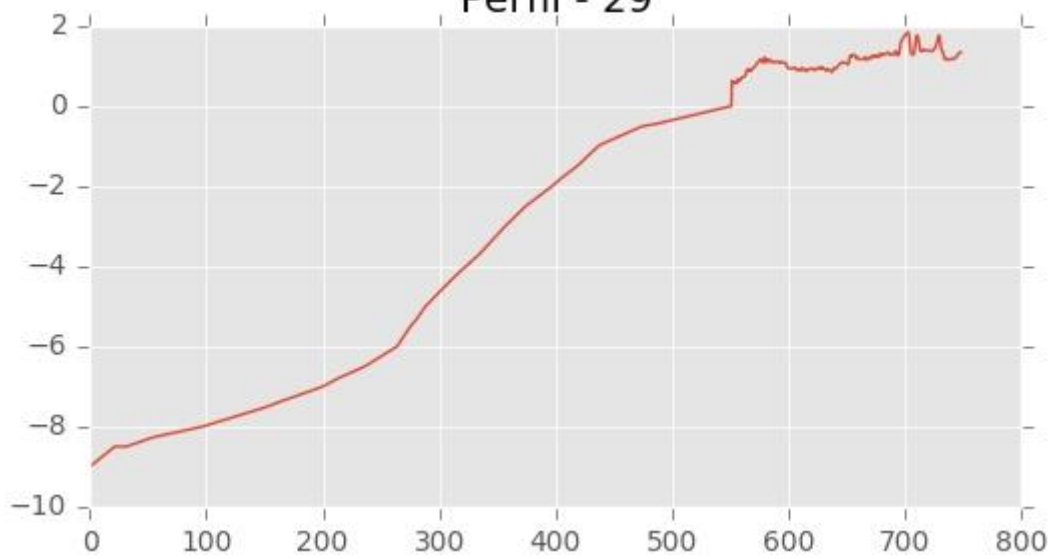
**Perfil - 27**



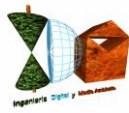
**Perfil - 28**



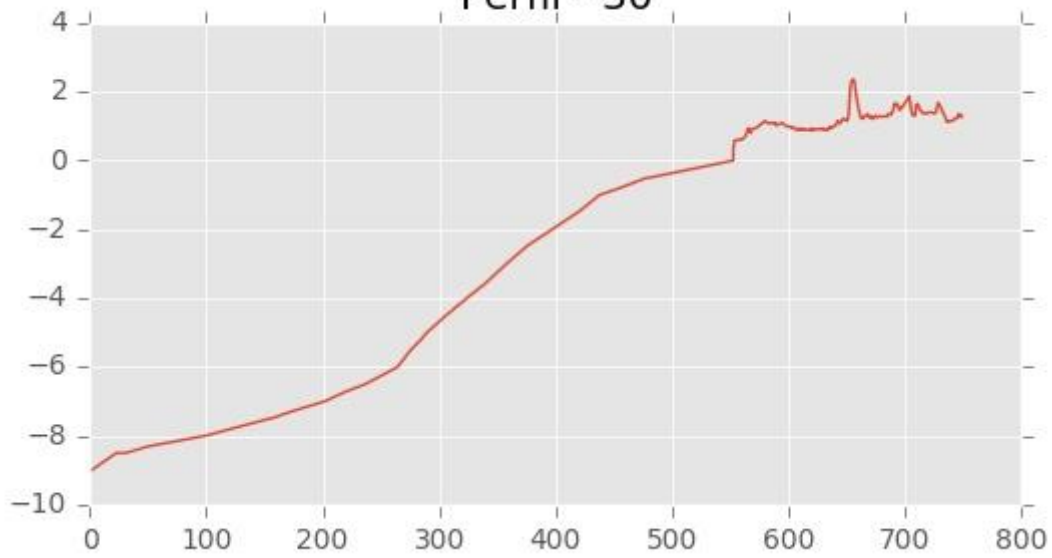
**Perfil - 29**



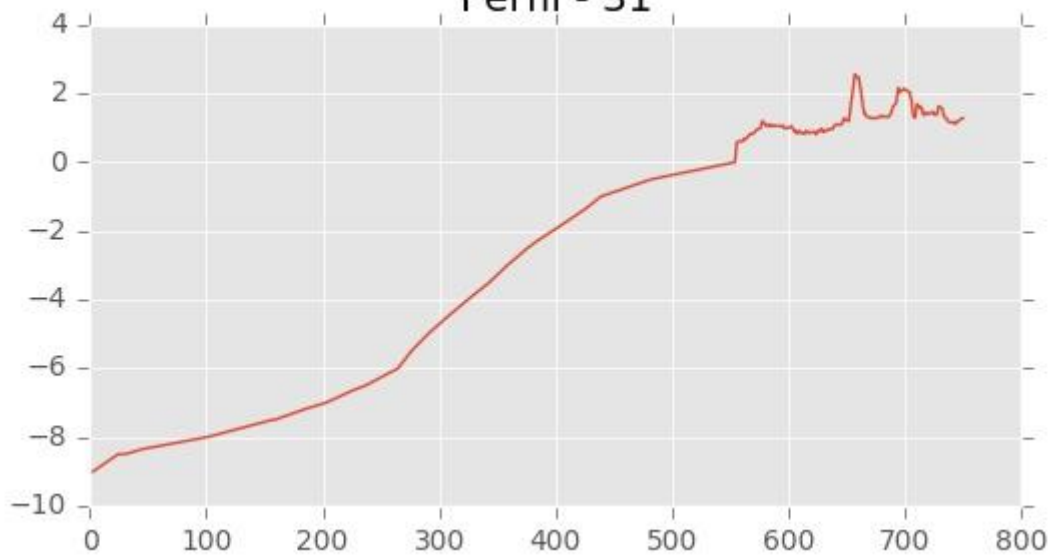




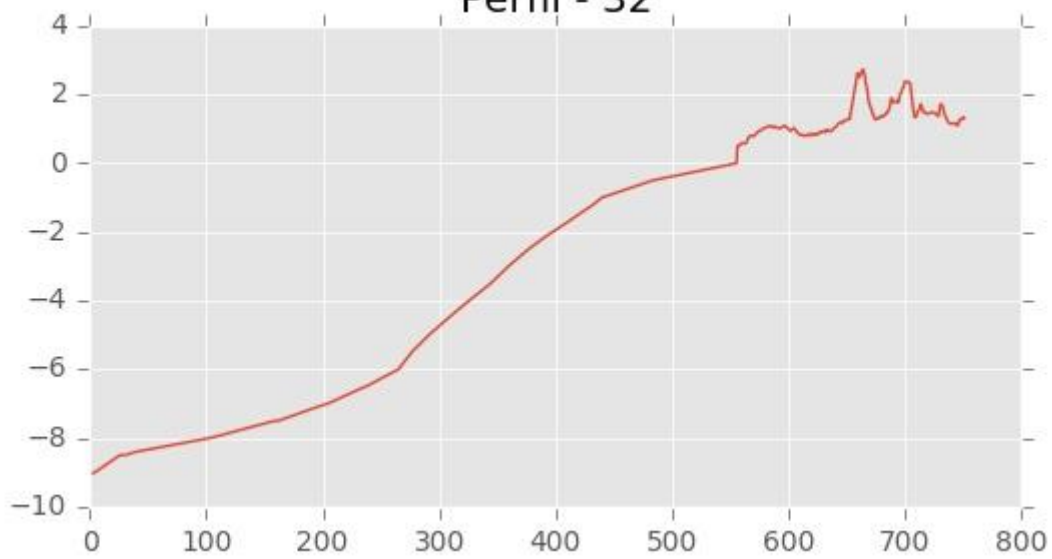
**Perfil - 30**

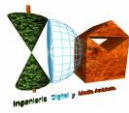


**Perfil - 31**

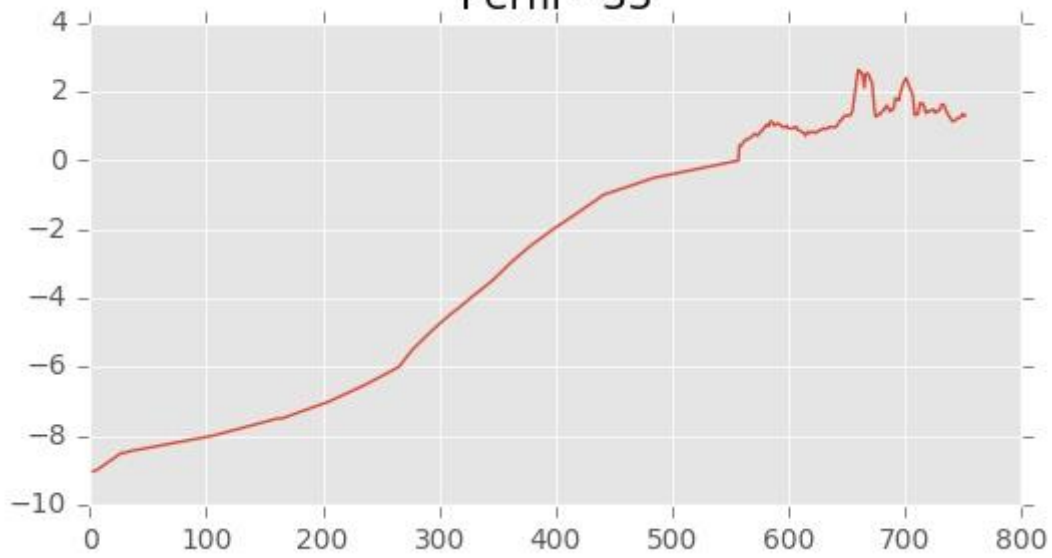


**Perfil - 32**

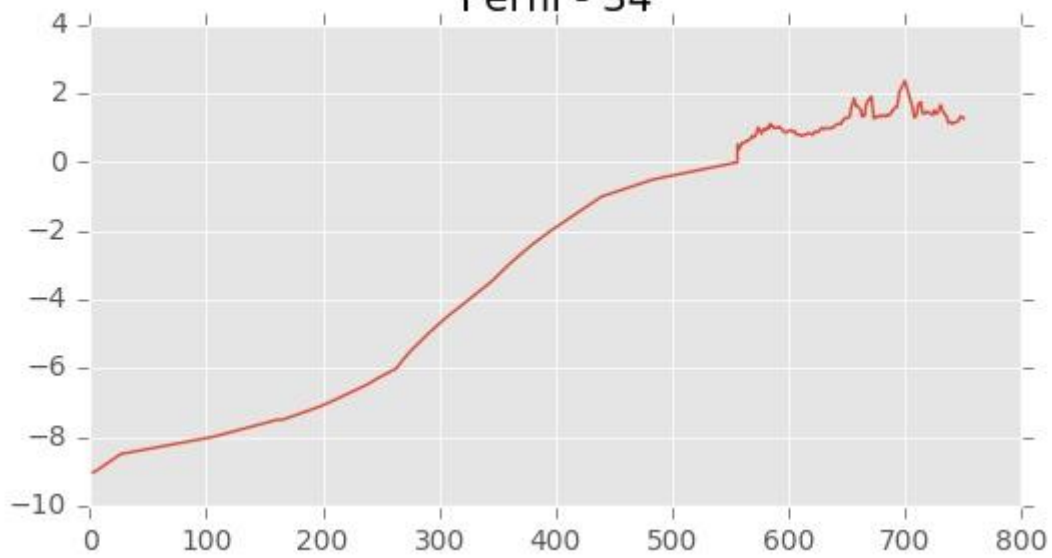




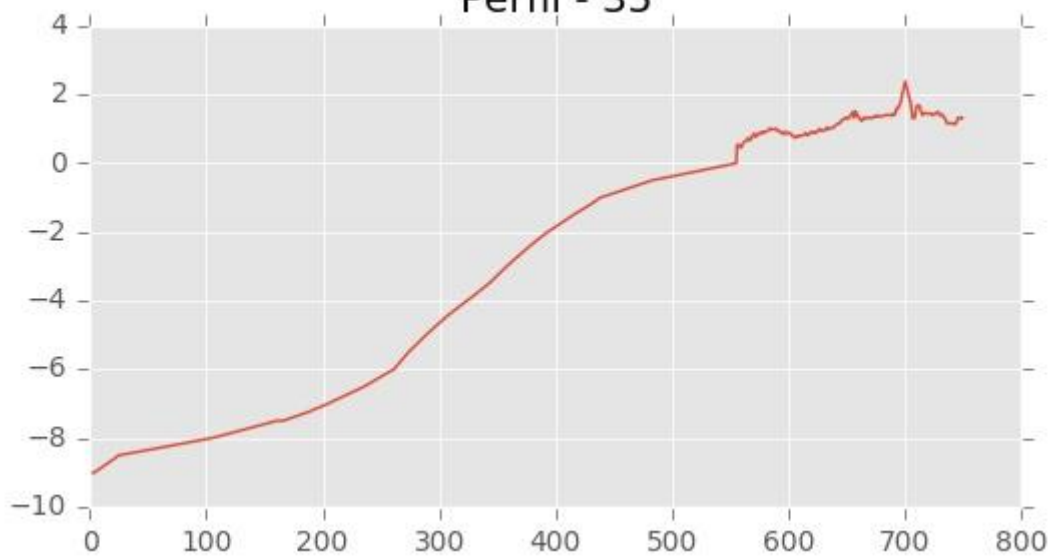
**Perfil - 33**



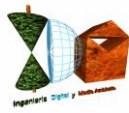
**Perfil - 34**



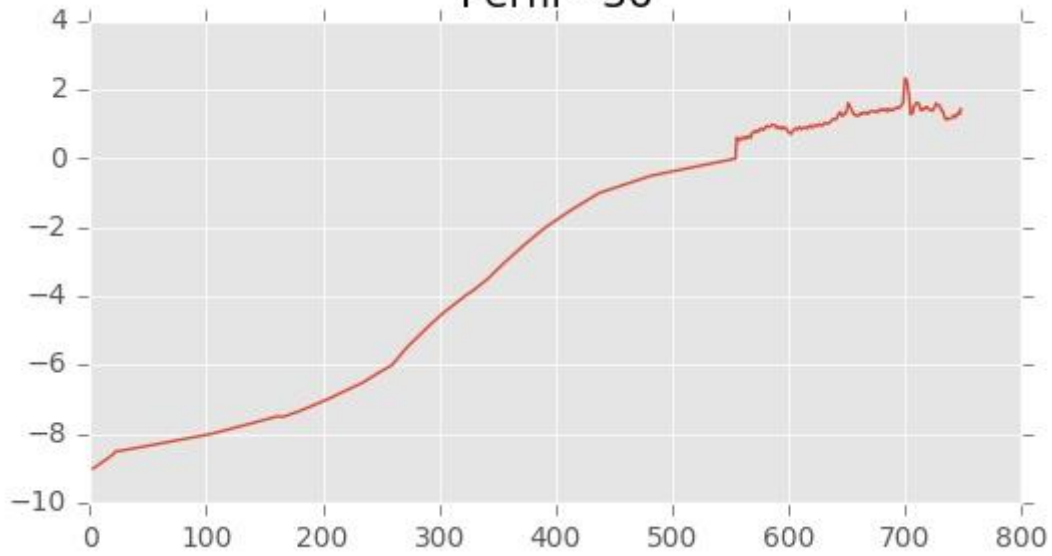
**Perfil - 35**



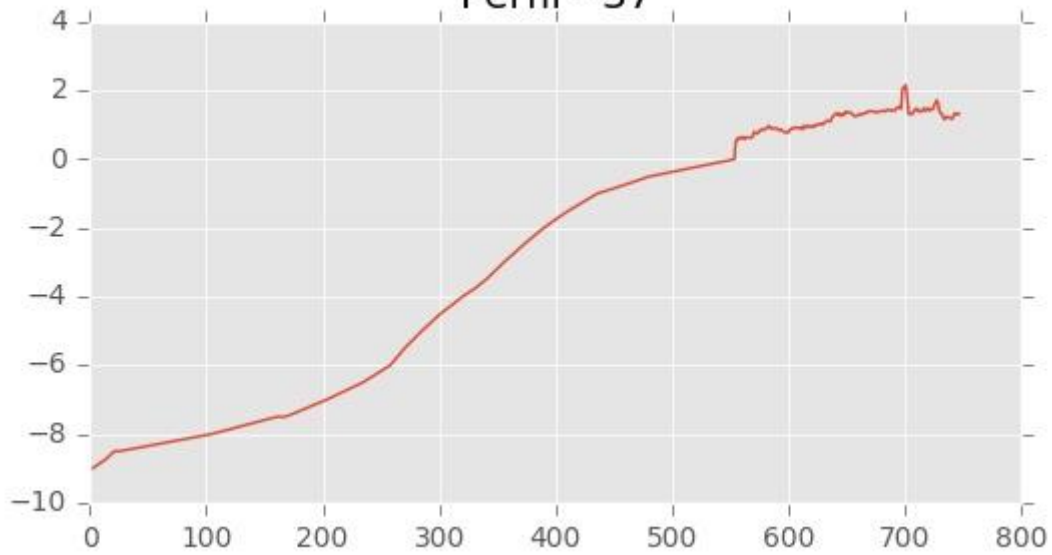




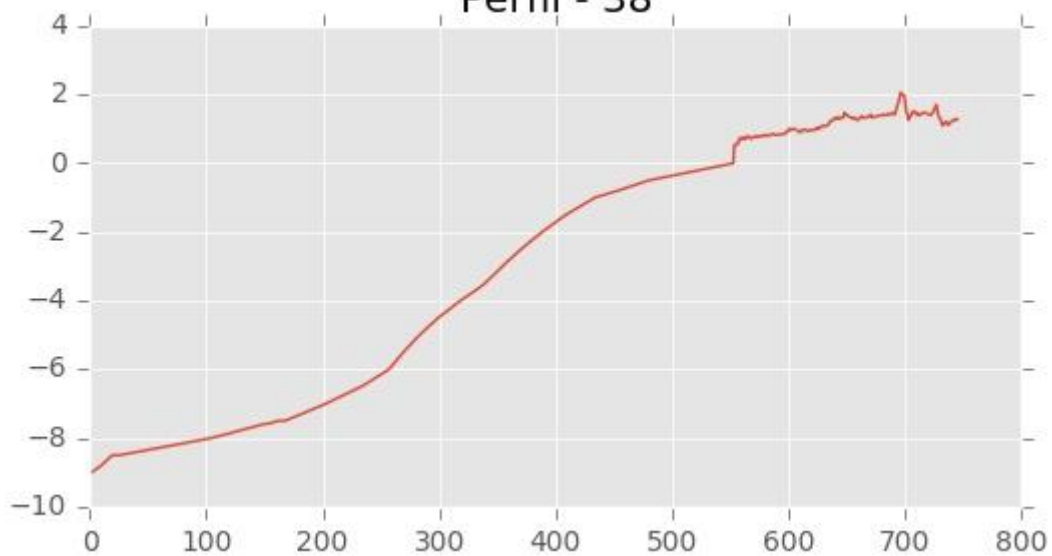
**Perfil - 36**

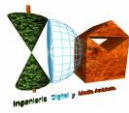


**Perfil - 37**

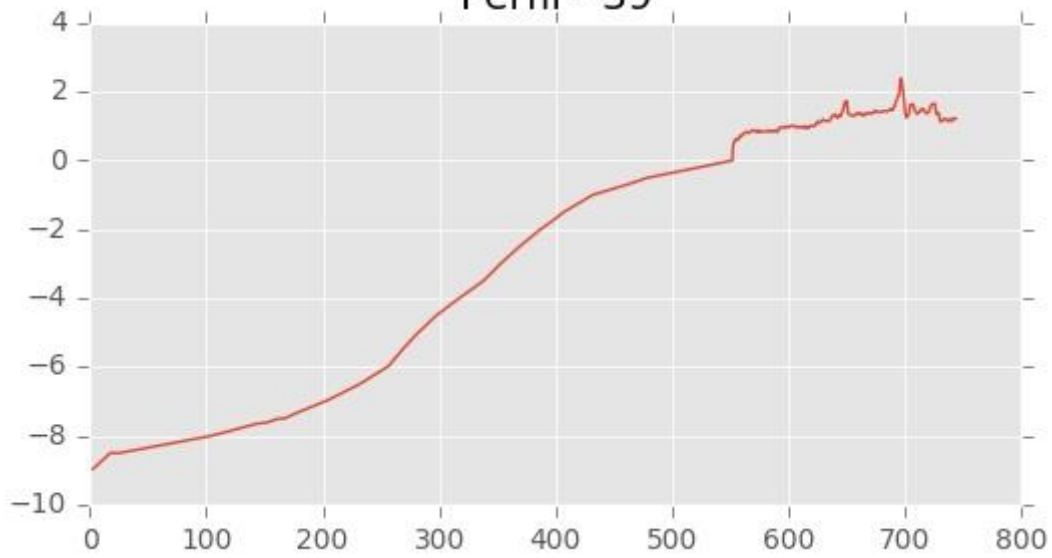


**Perfil - 38**

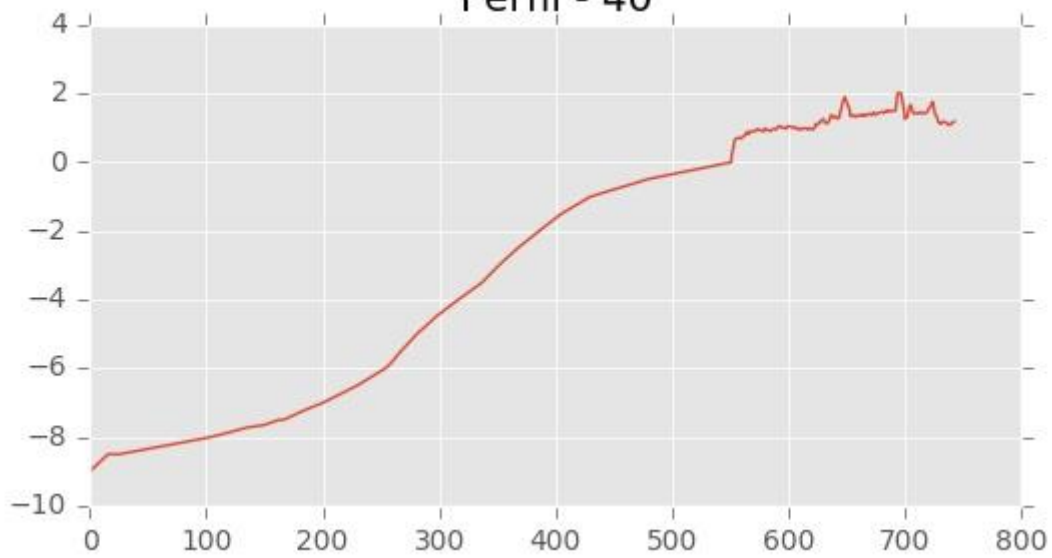




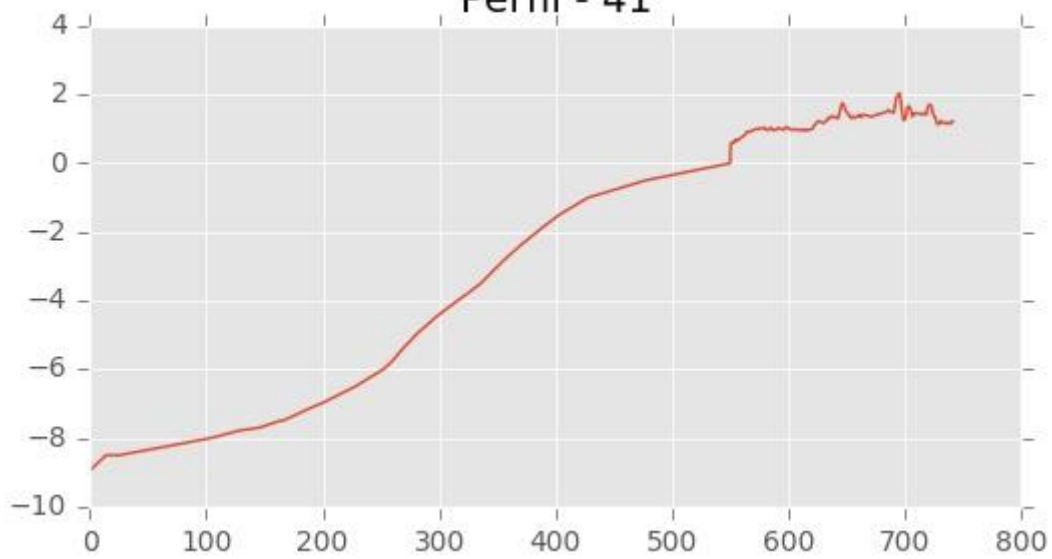
**Perfil - 39**



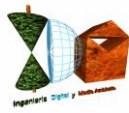
**Perfil - 40**



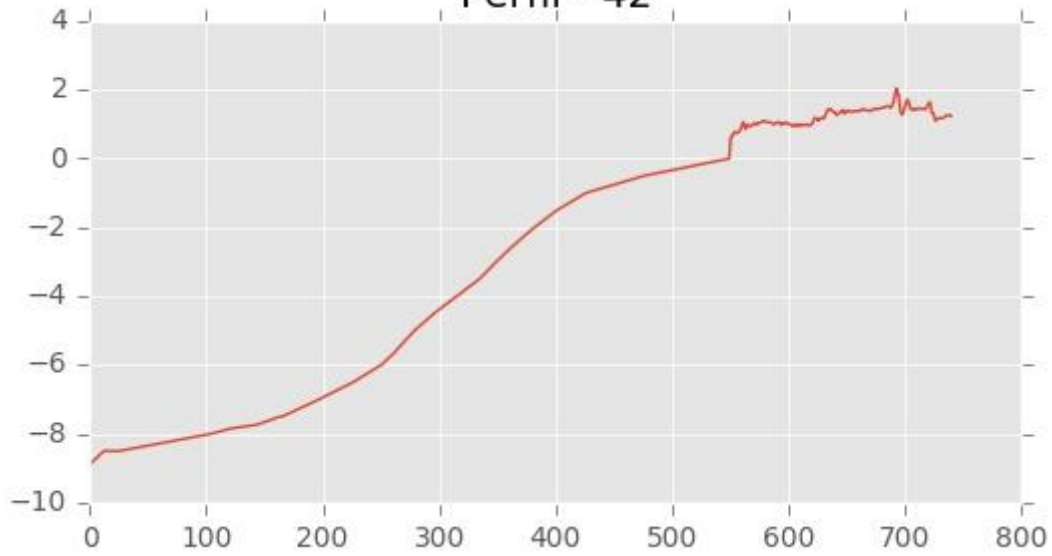
**Perfil - 41**



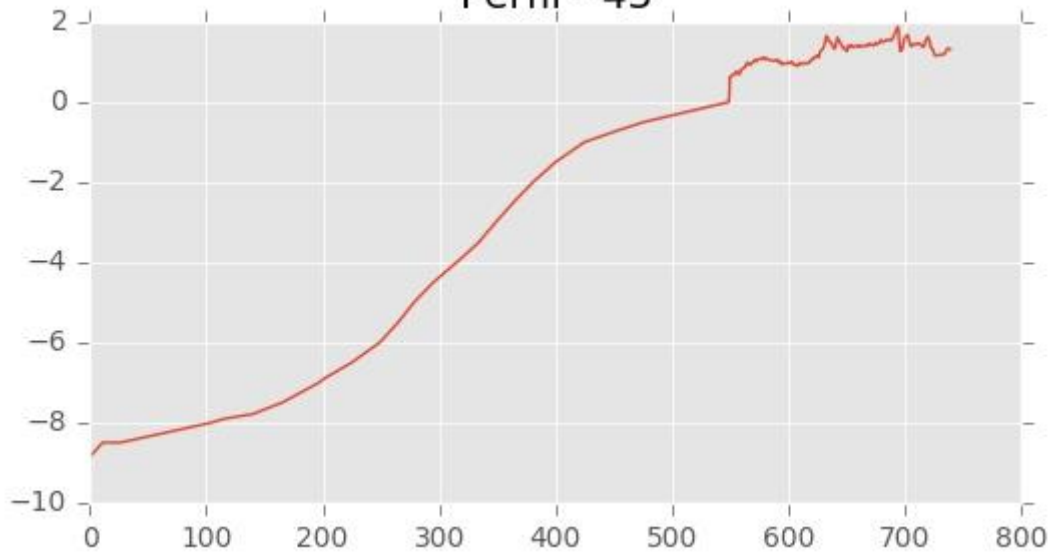




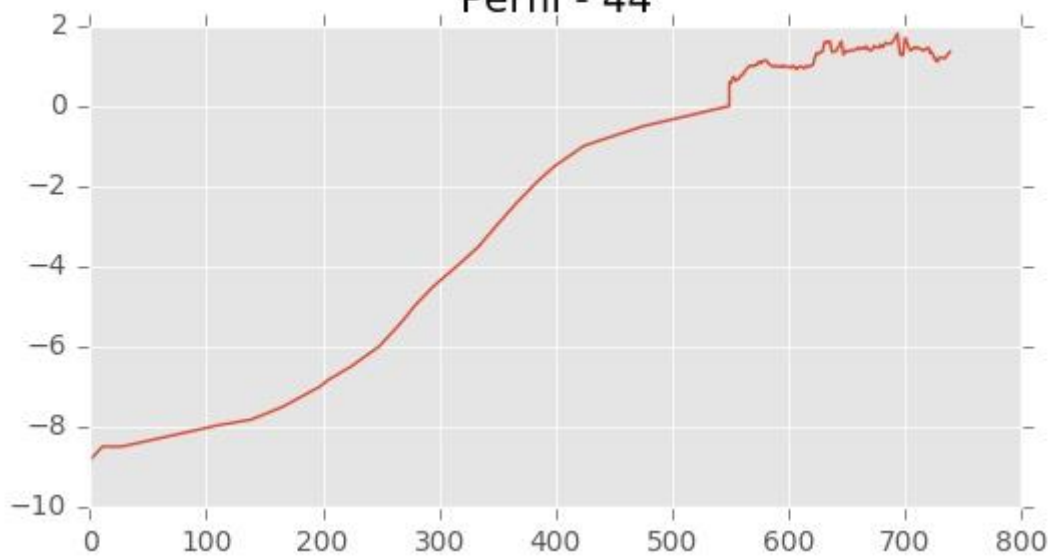
**Perfil - 42**

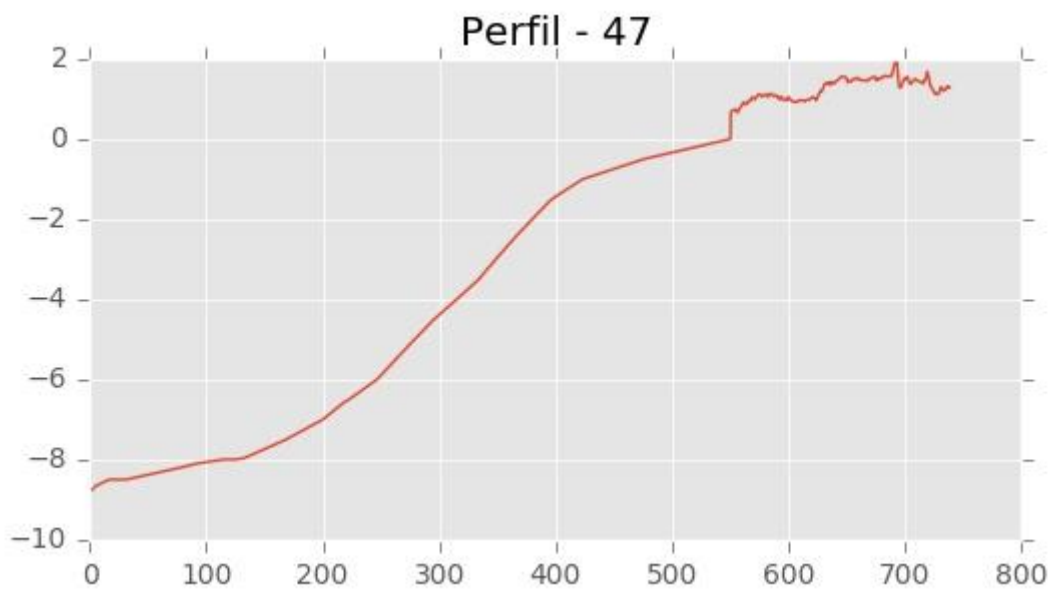
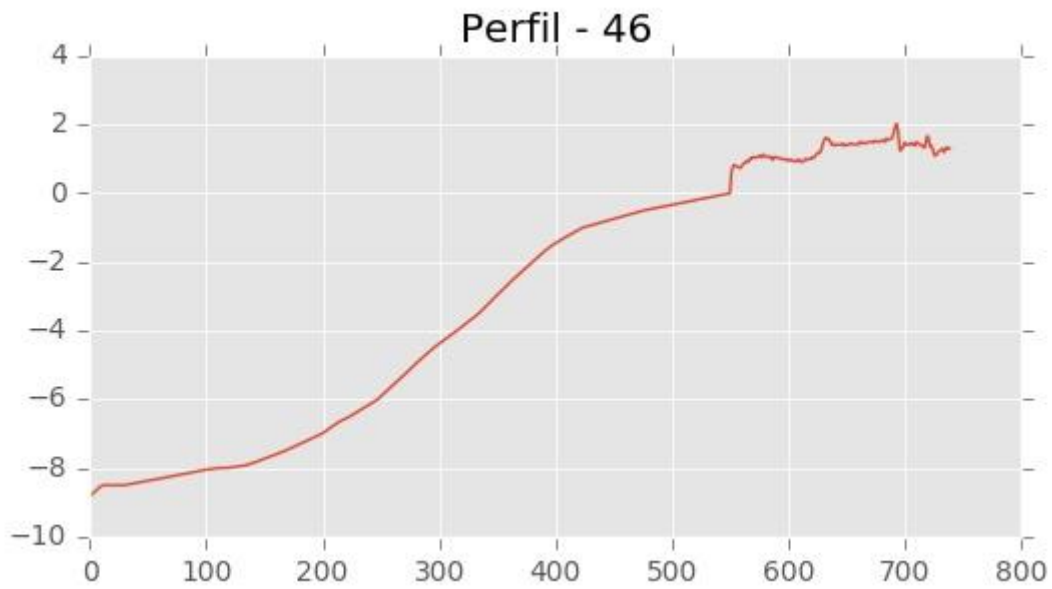
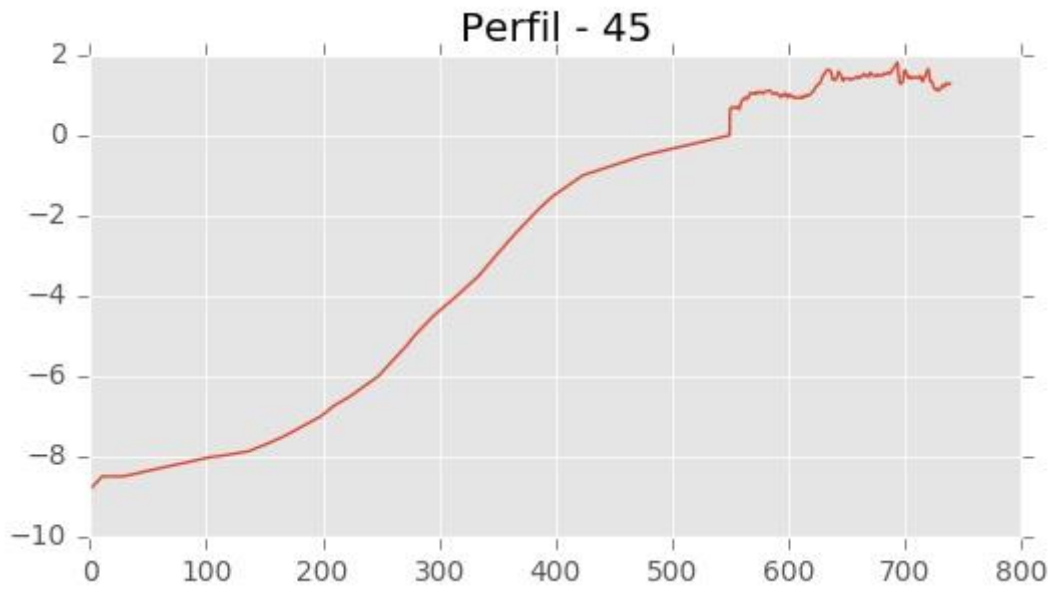
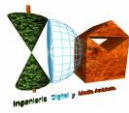


**Perfil - 43**

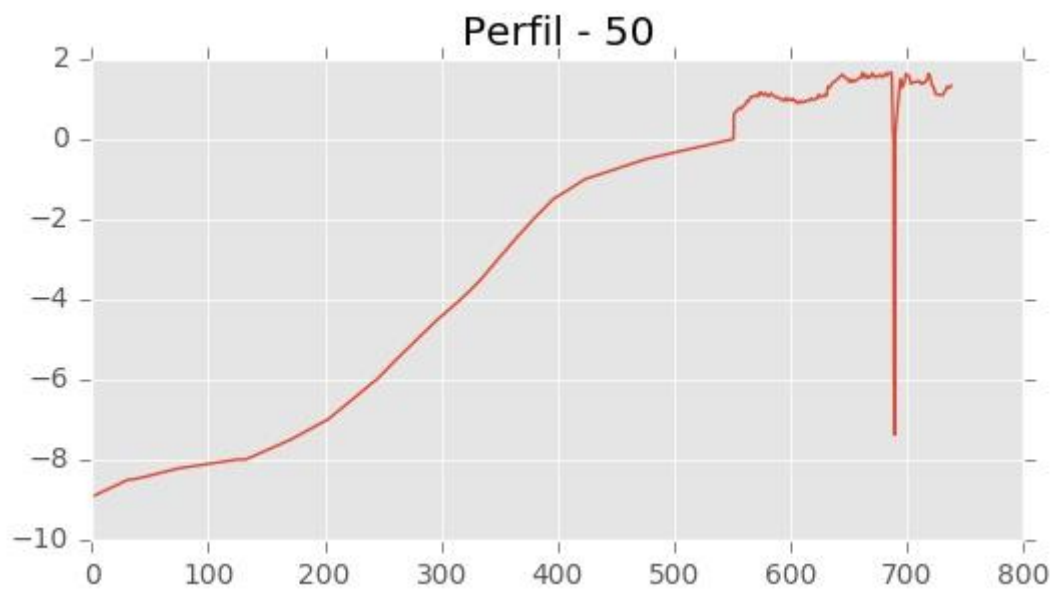
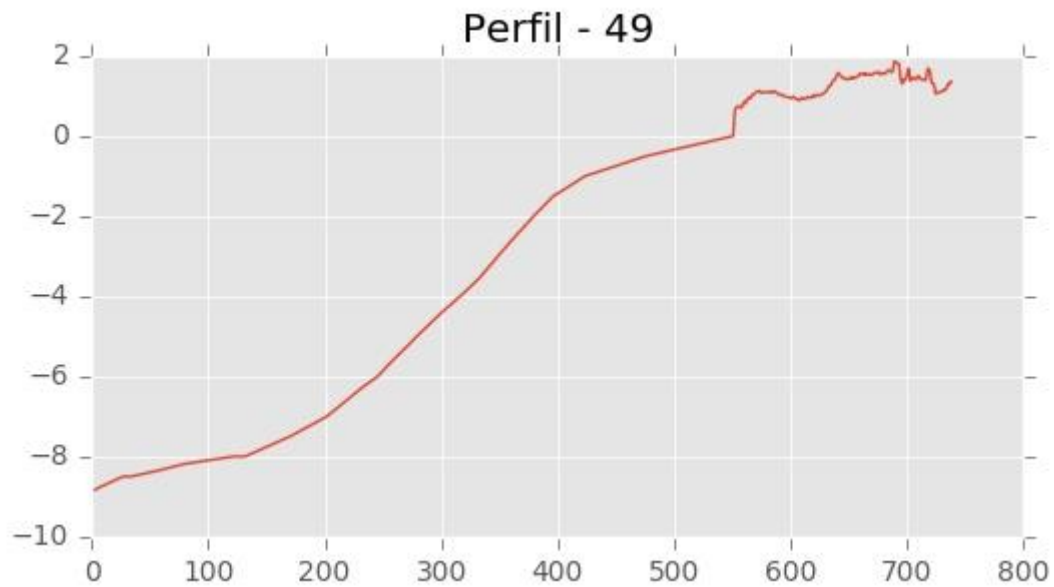
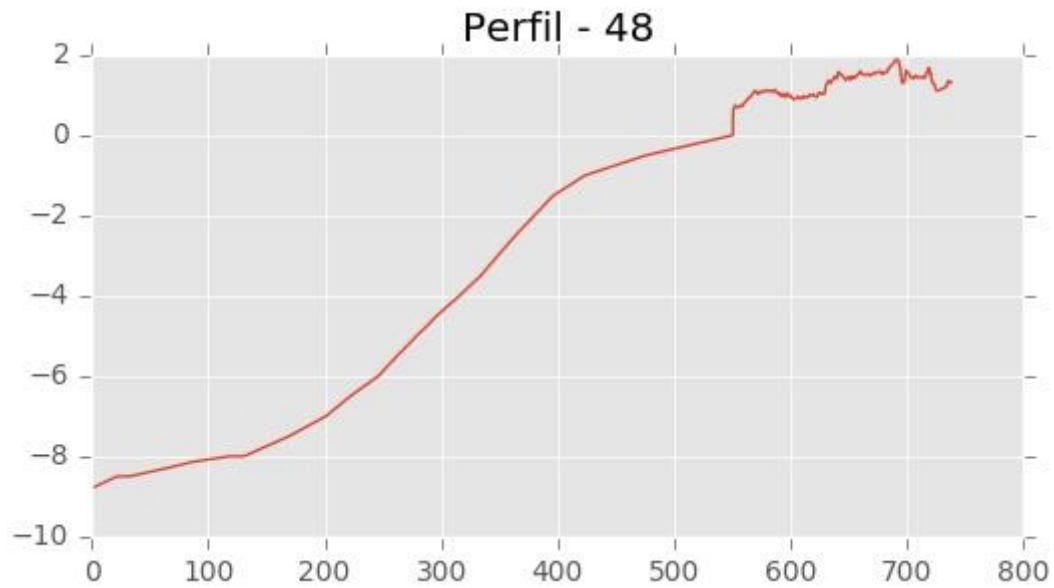
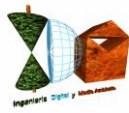


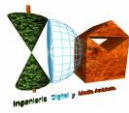
**Perfil - 44**



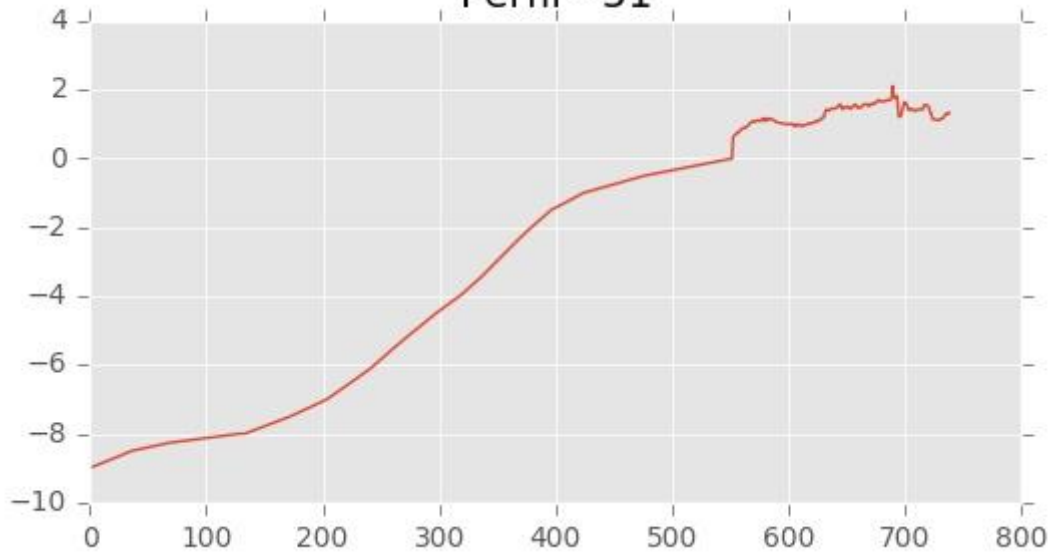




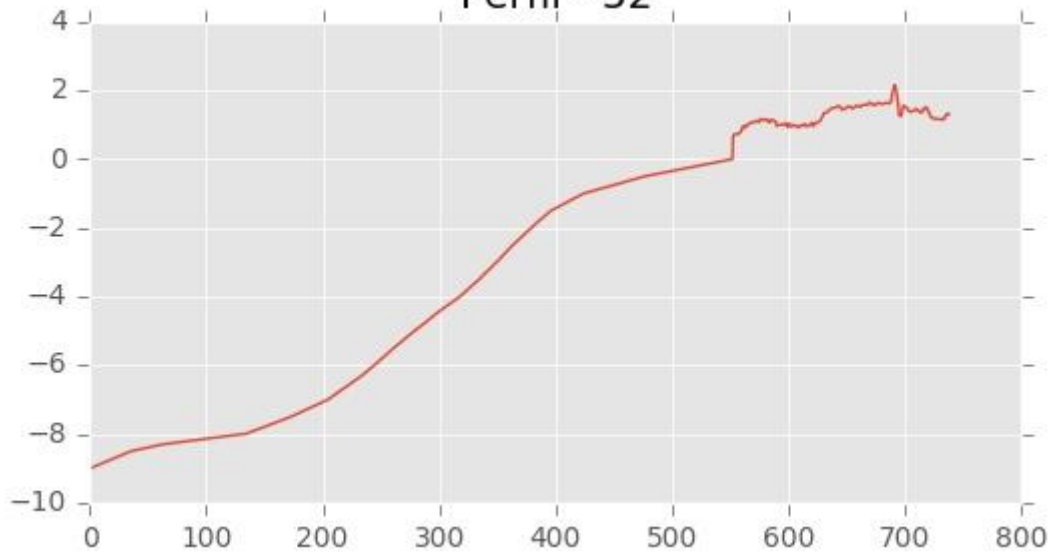




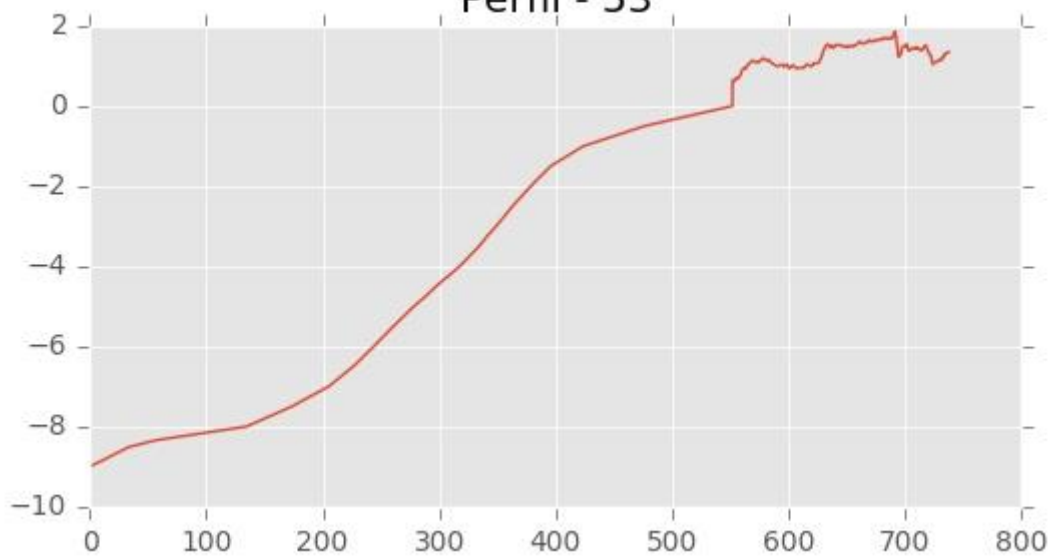
**Perfil - 51**



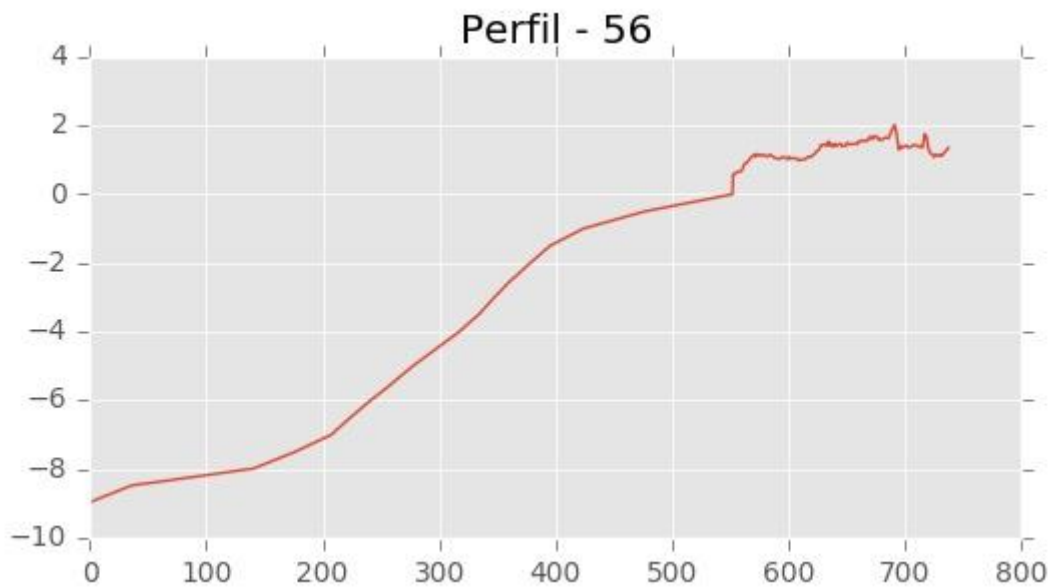
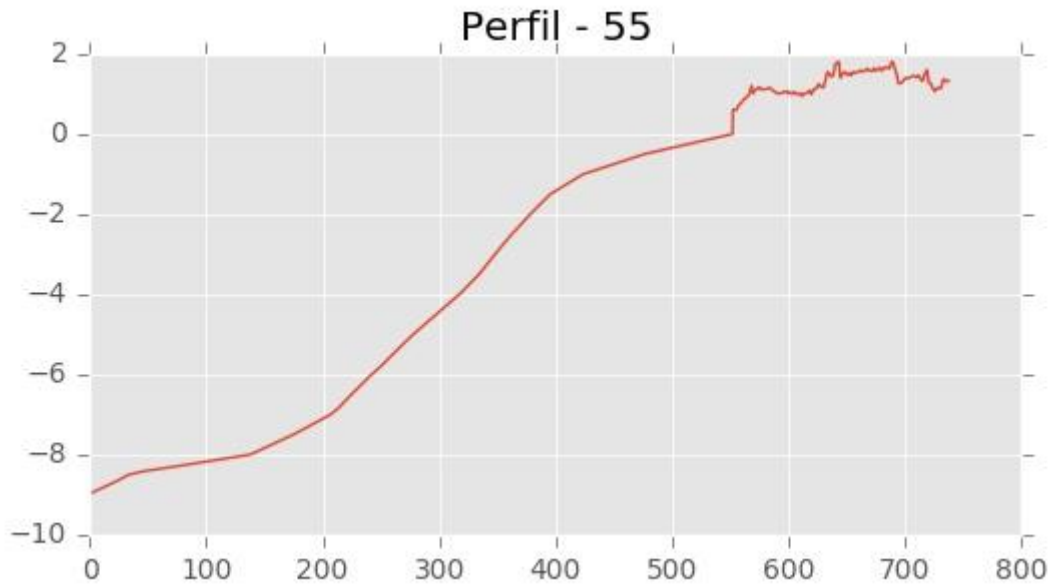
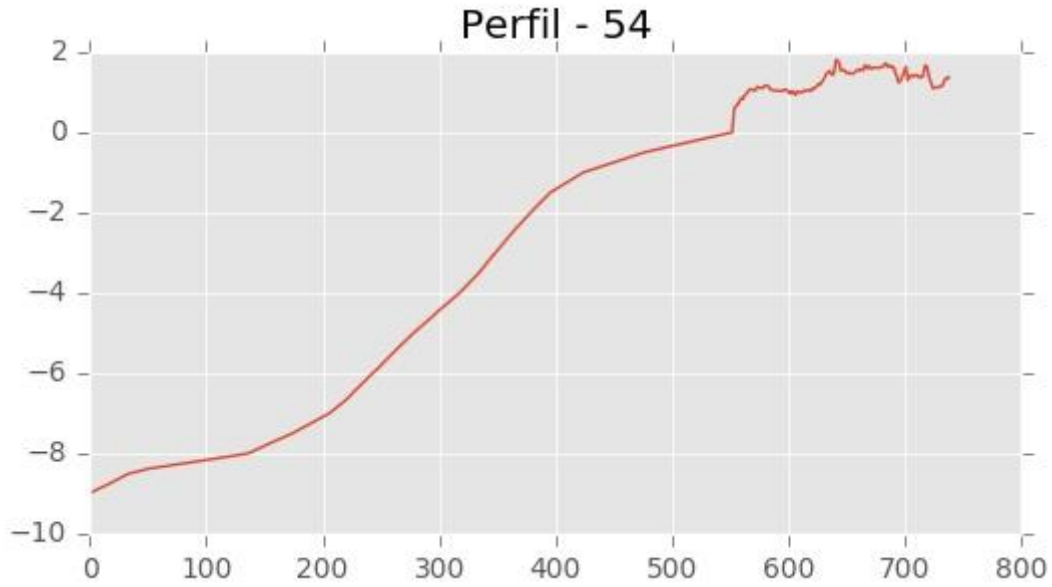
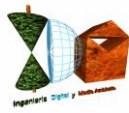
**Perfil - 52**

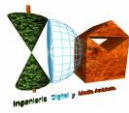


**Perfil - 53**

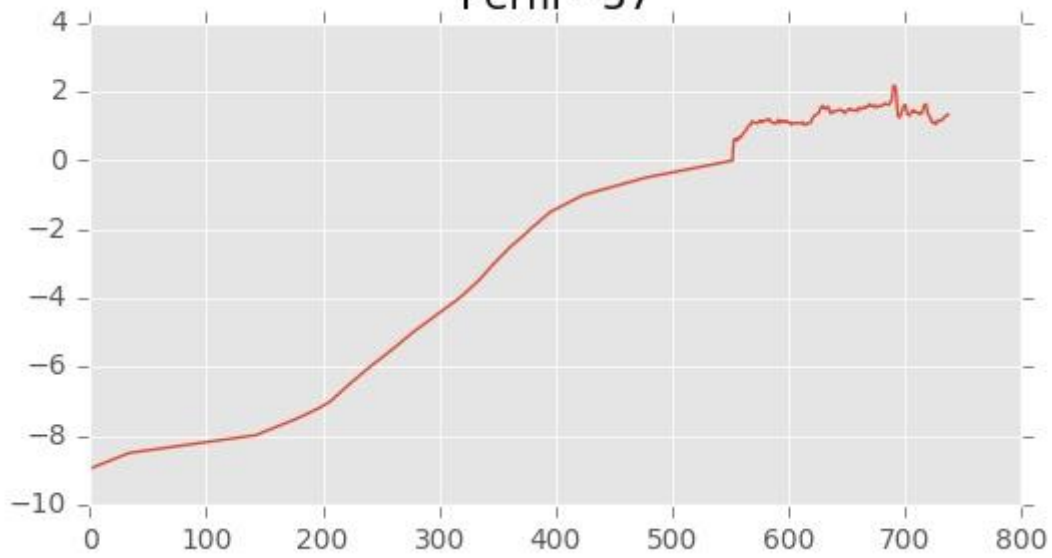




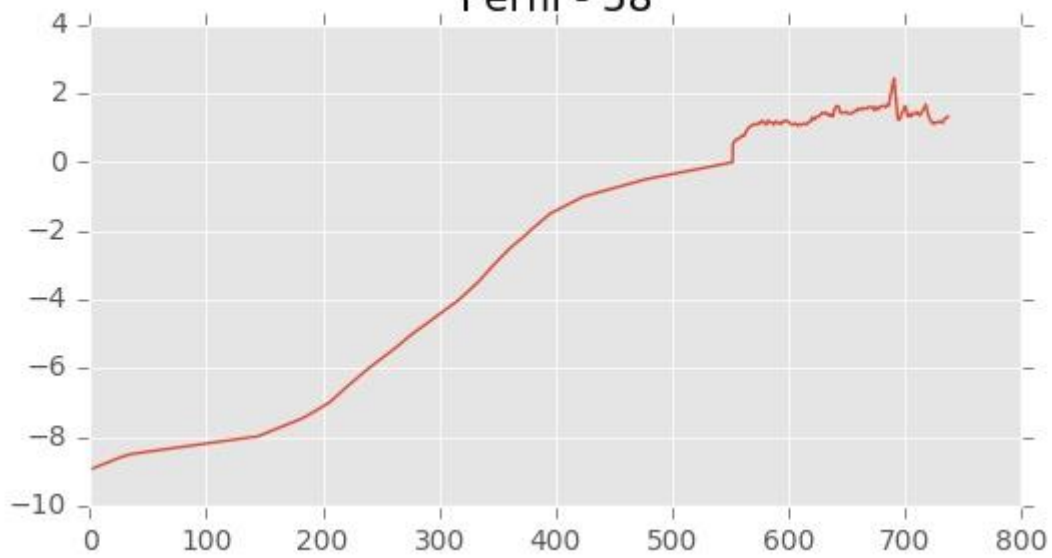




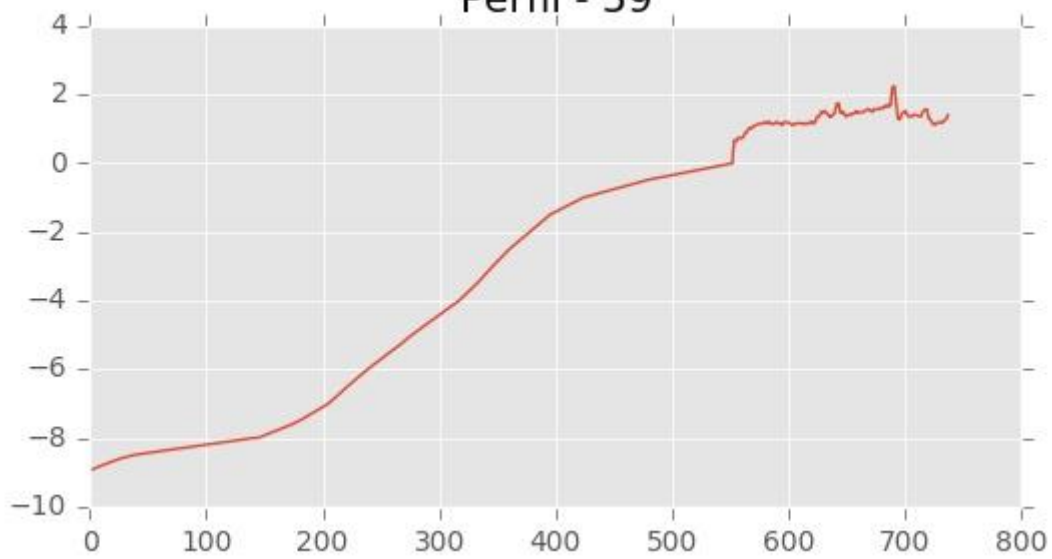
**Perfil - 57**



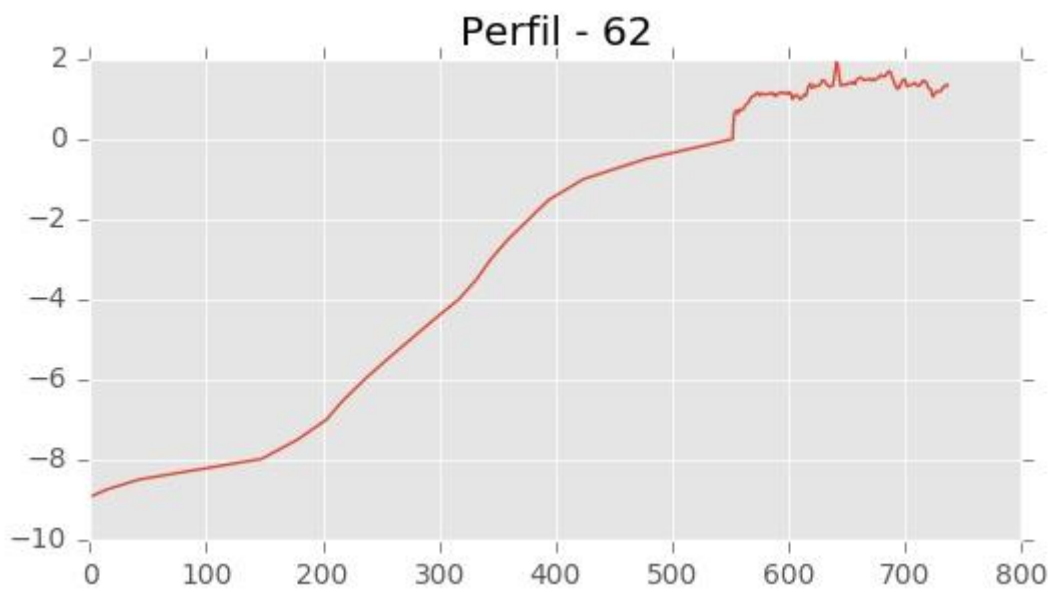
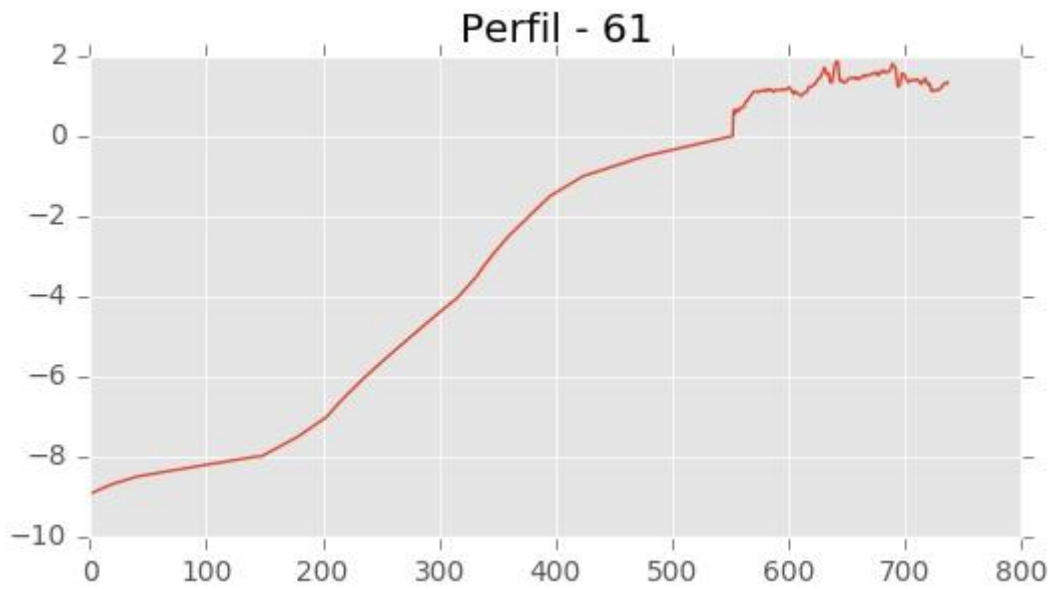
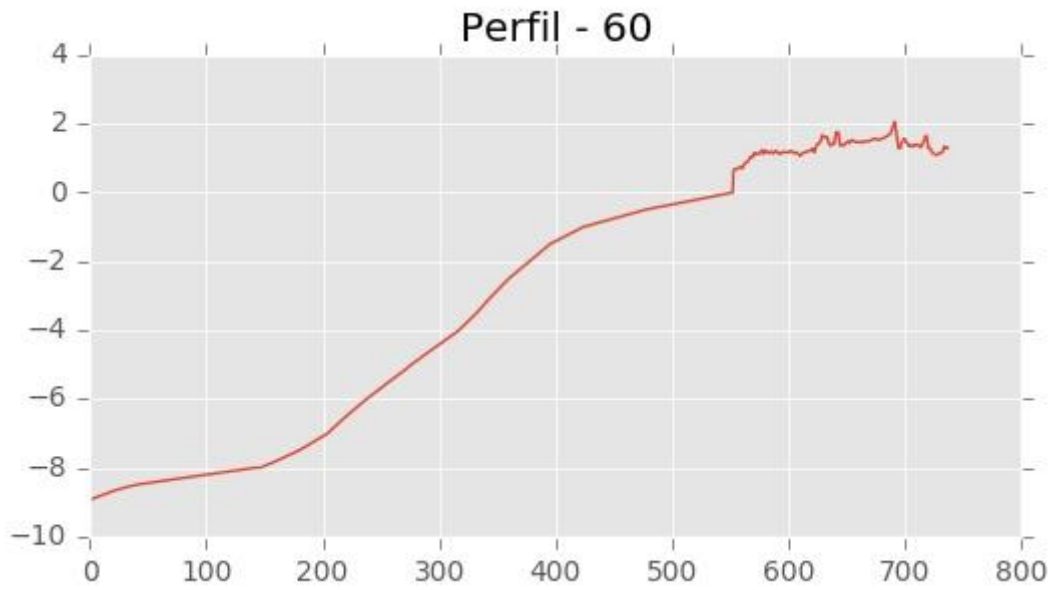
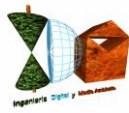
**Perfil - 58**

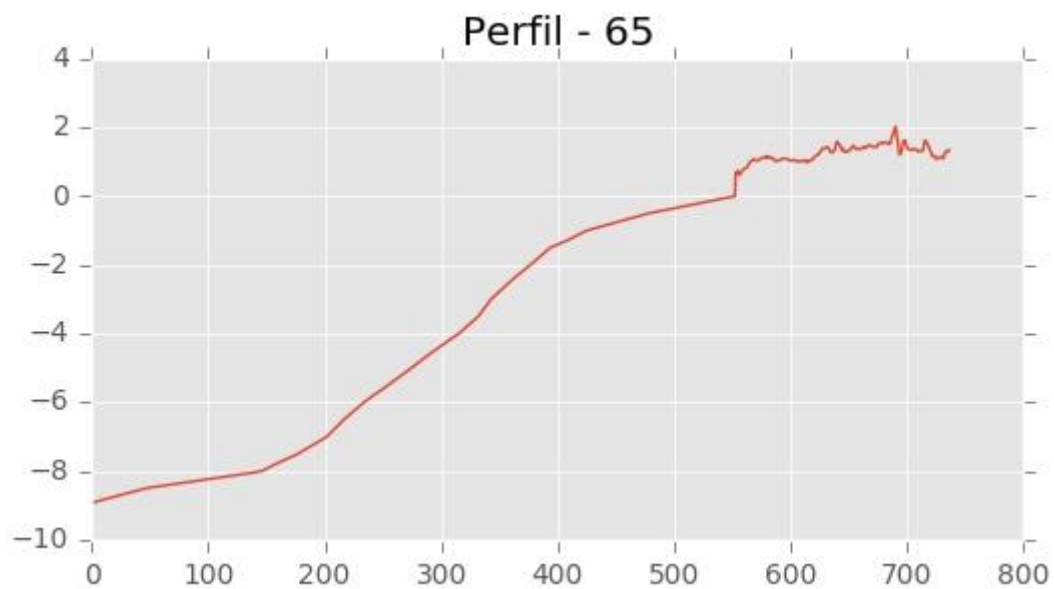
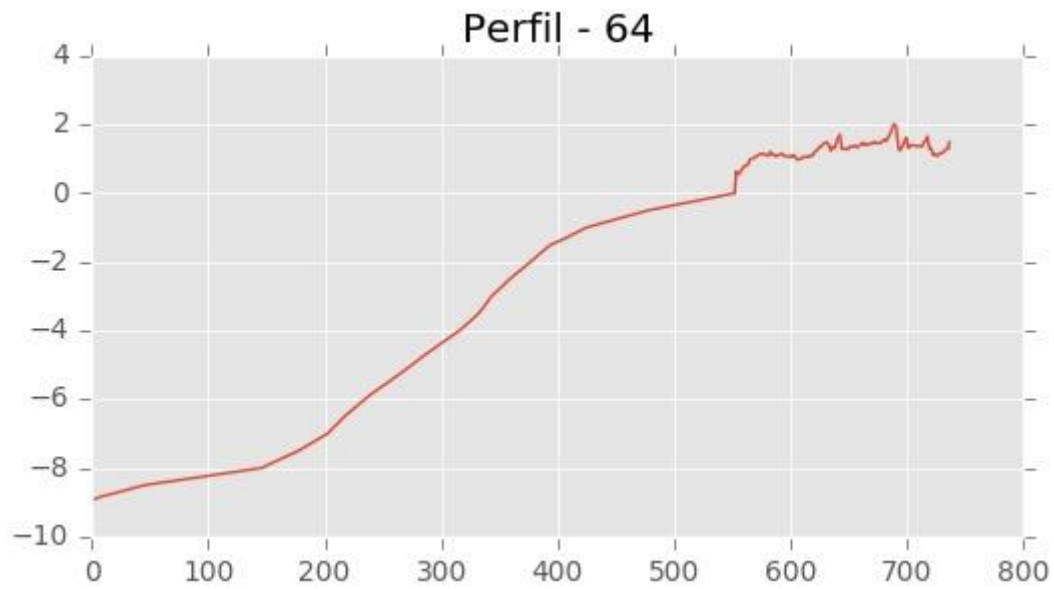
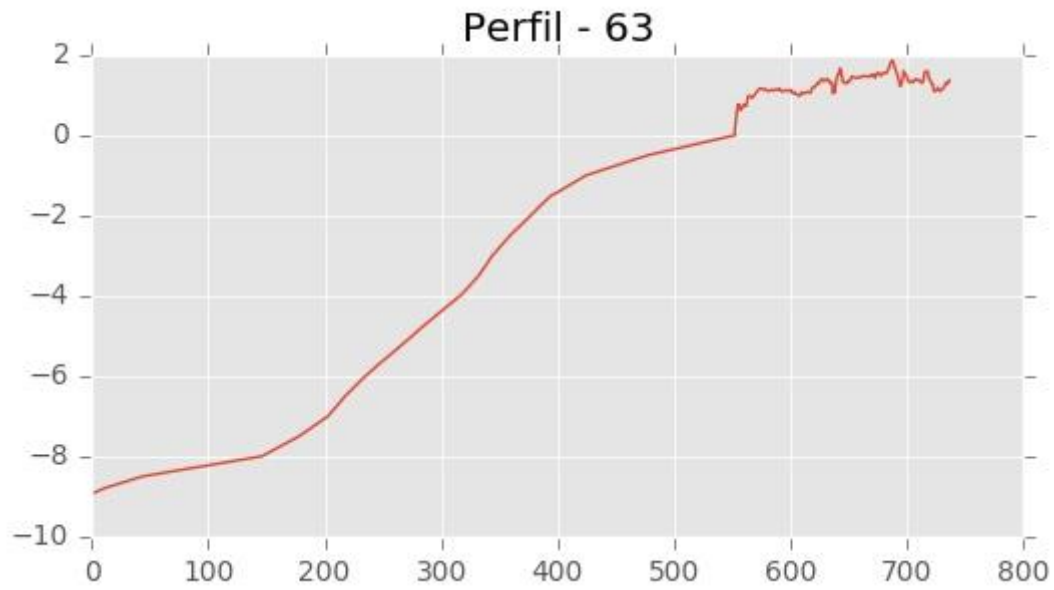
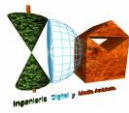


**Perfil - 59**

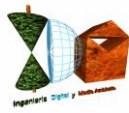




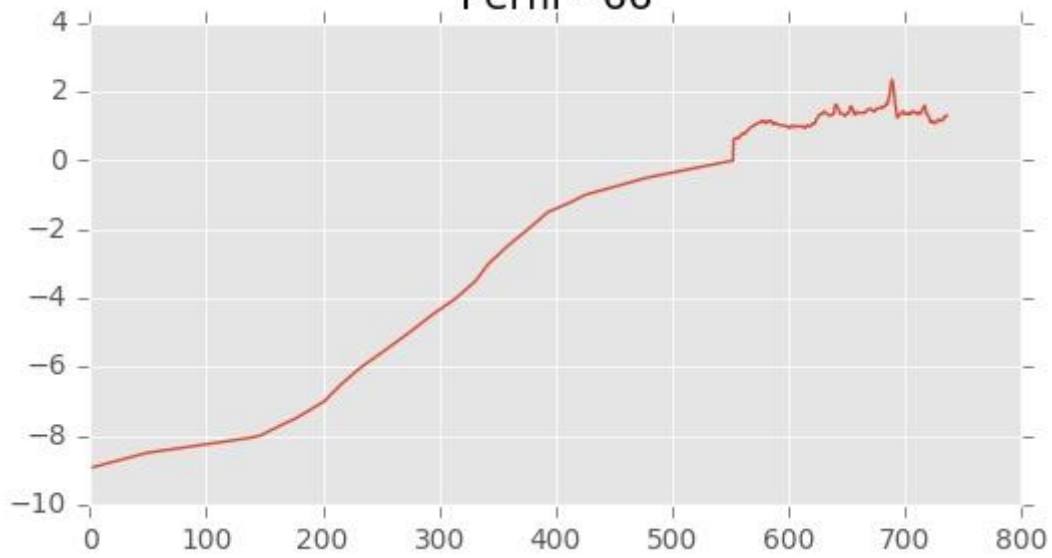




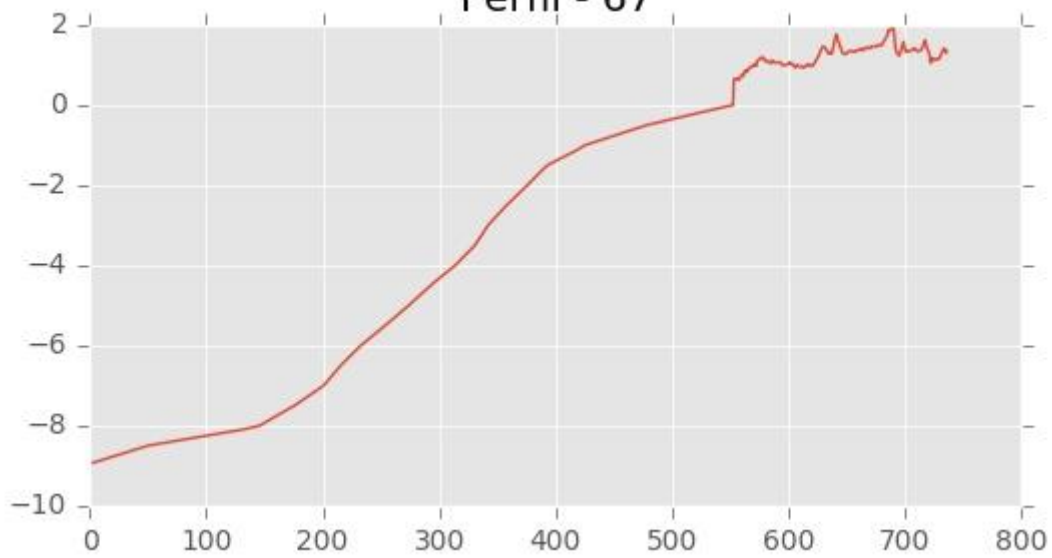




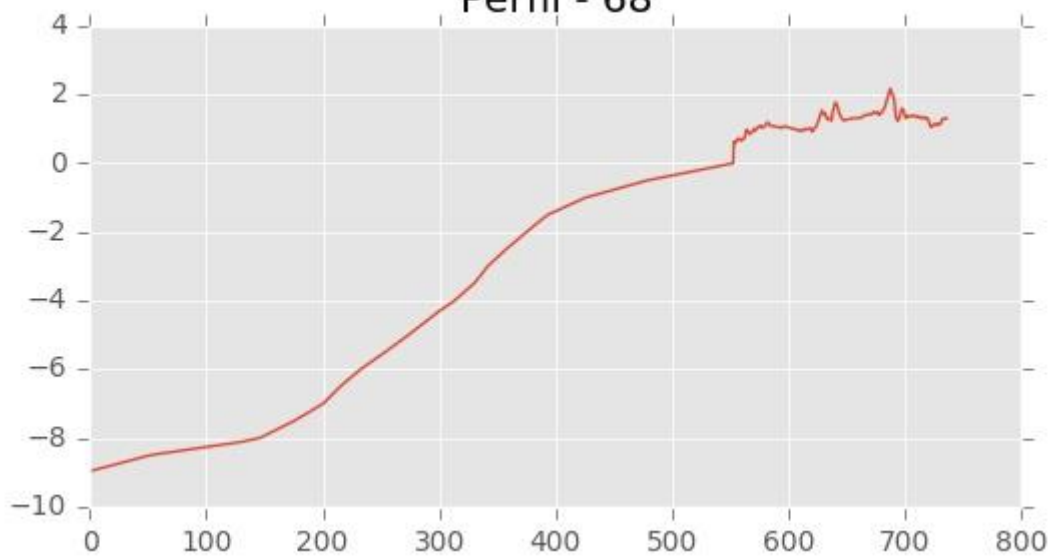
**Perfil - 66**

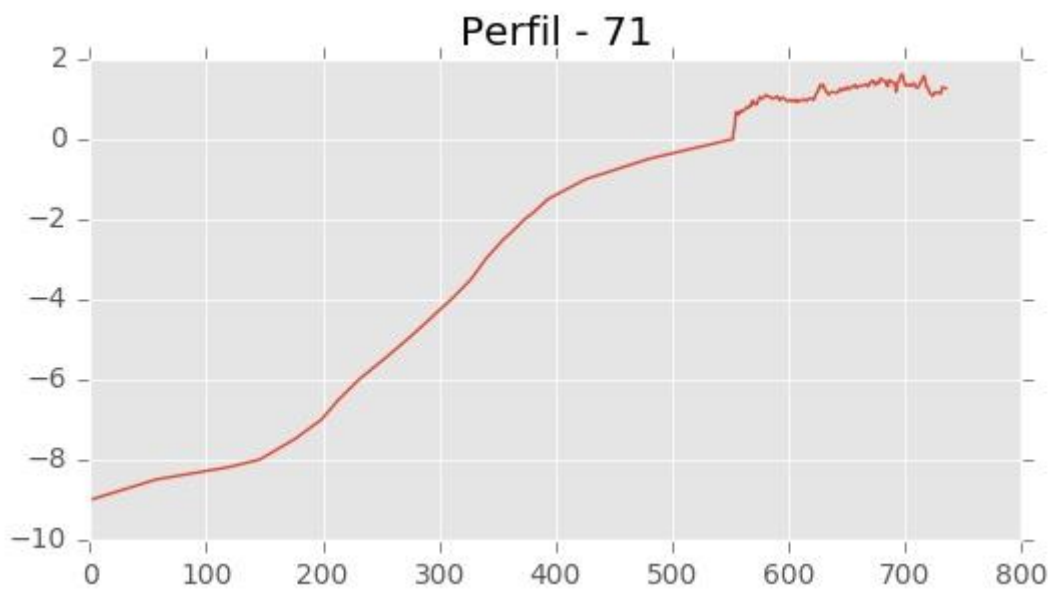
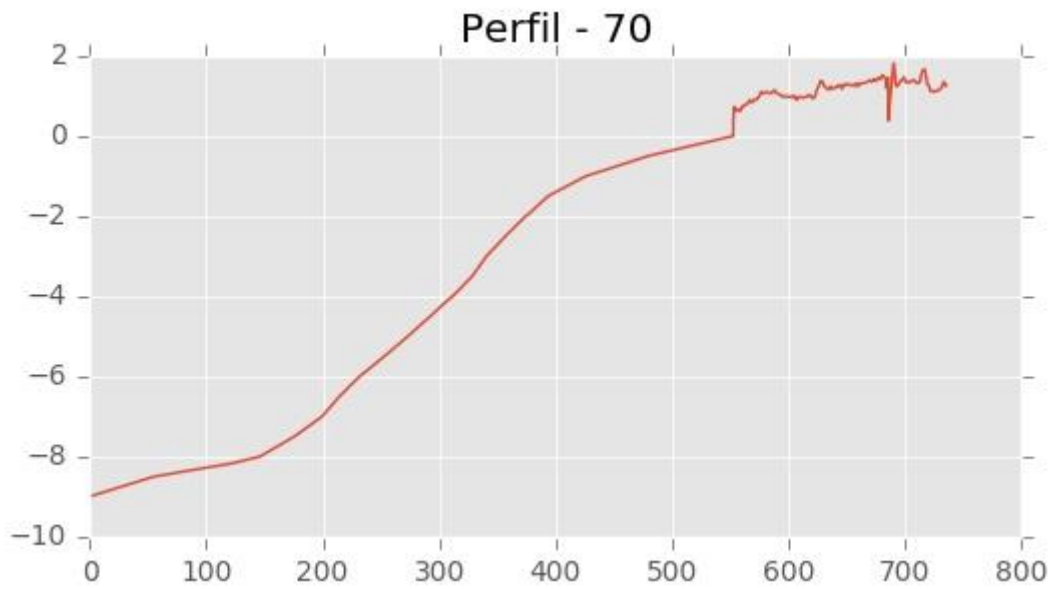
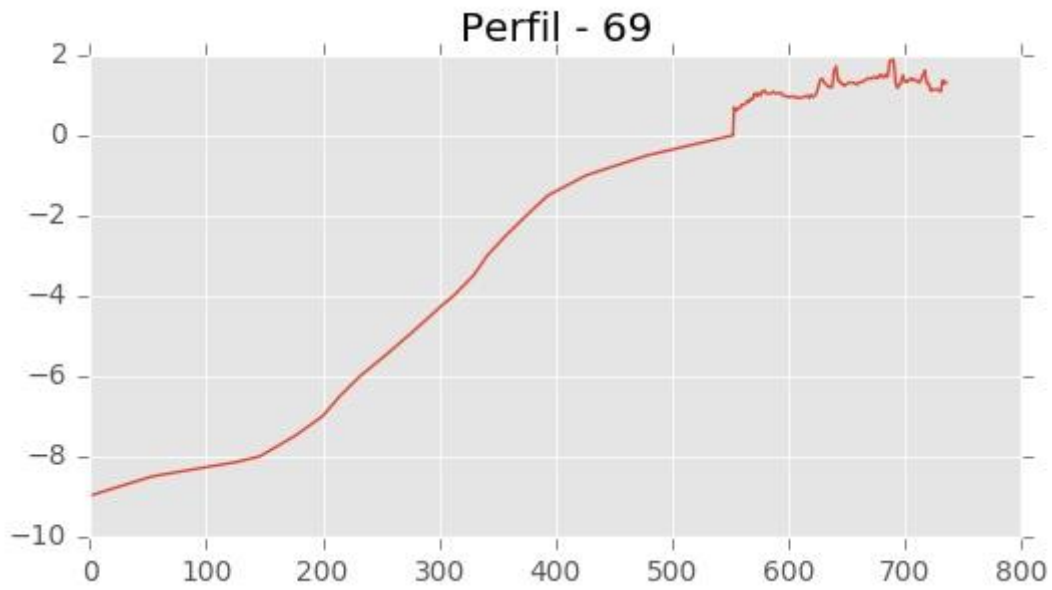
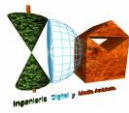


**Perfil - 67**

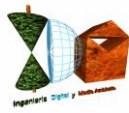


**Perfil - 68**

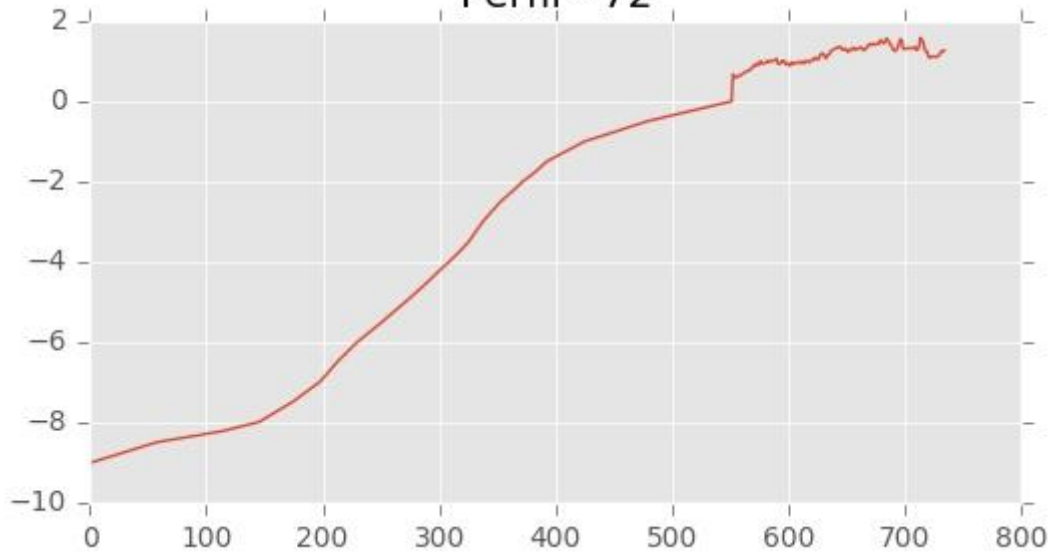




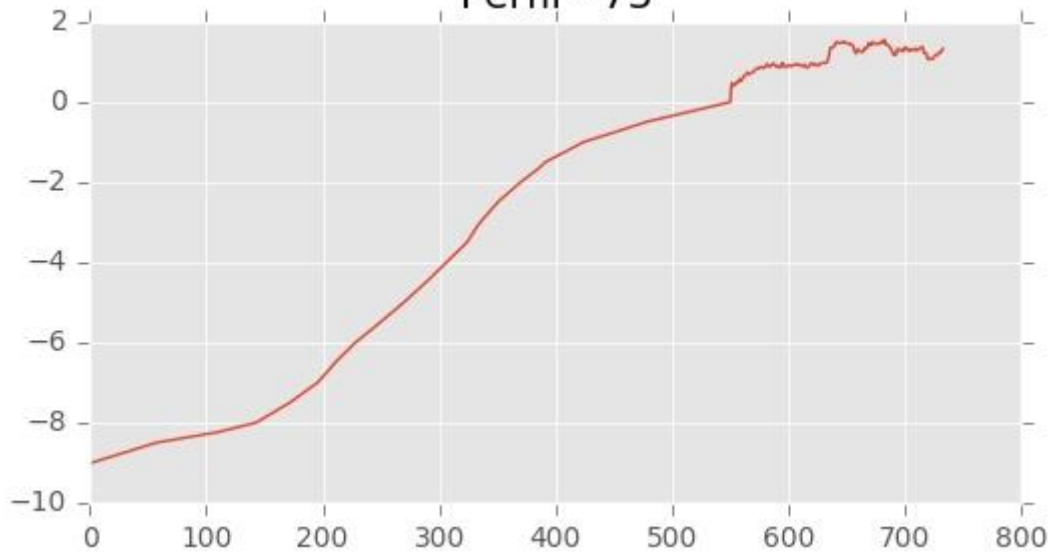




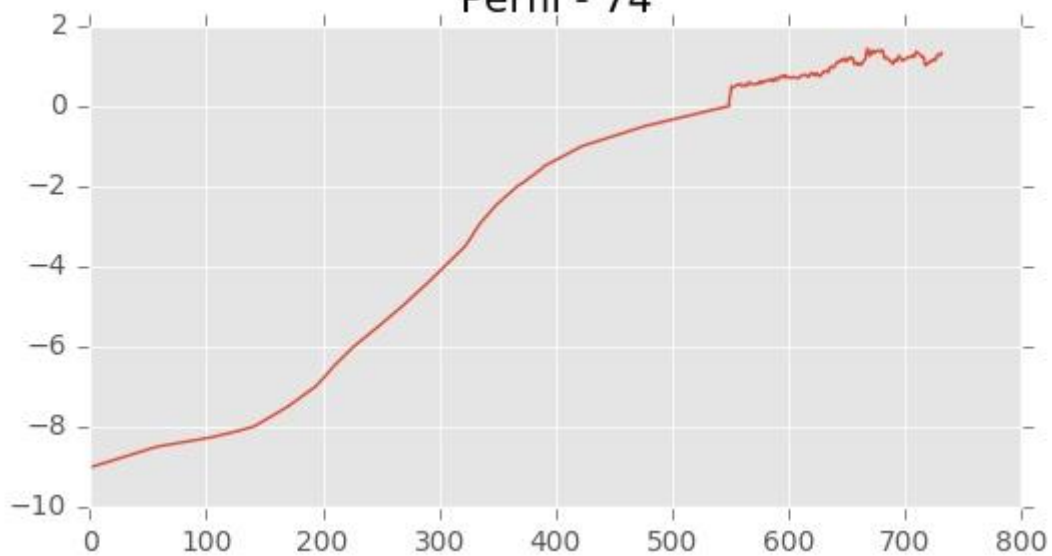
**Perfil - 72**

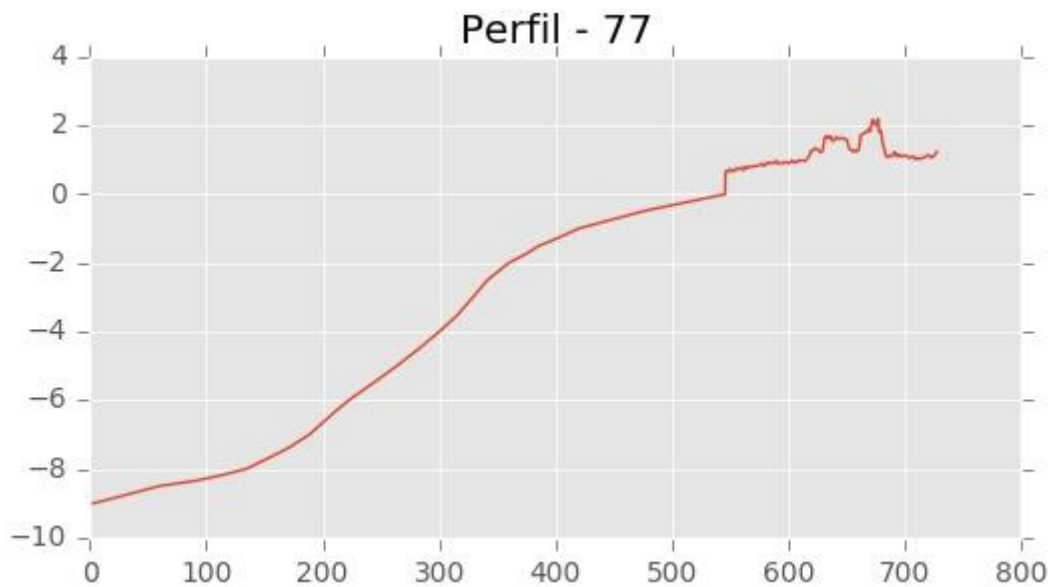
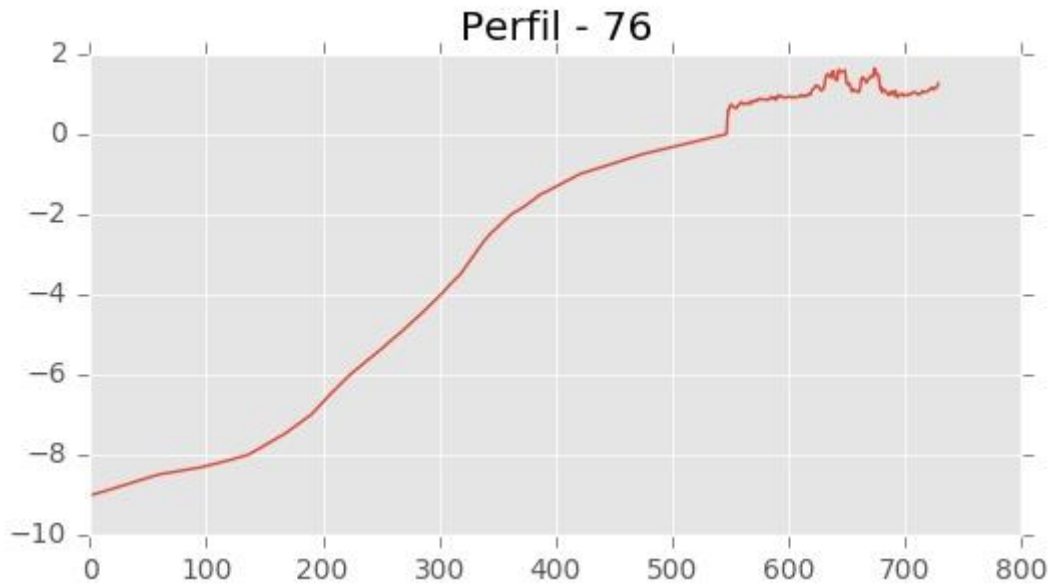
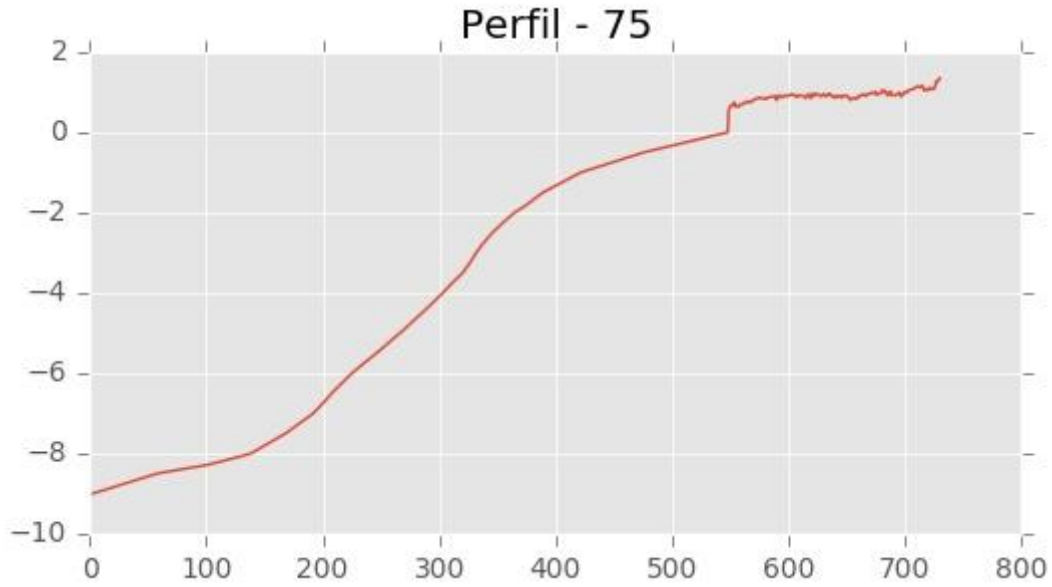
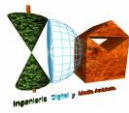


**Perfil - 73**

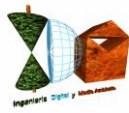


**Perfil - 74**

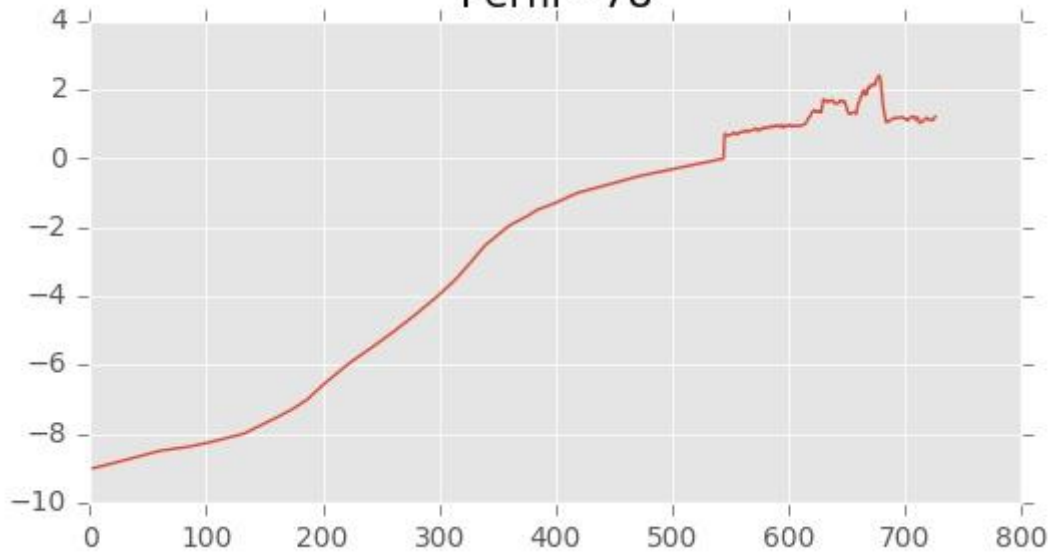




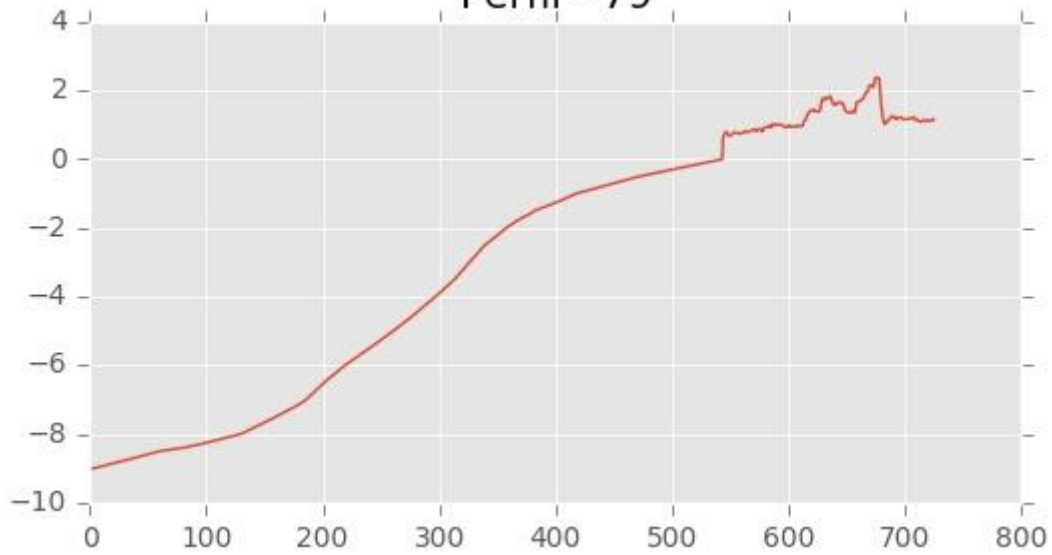




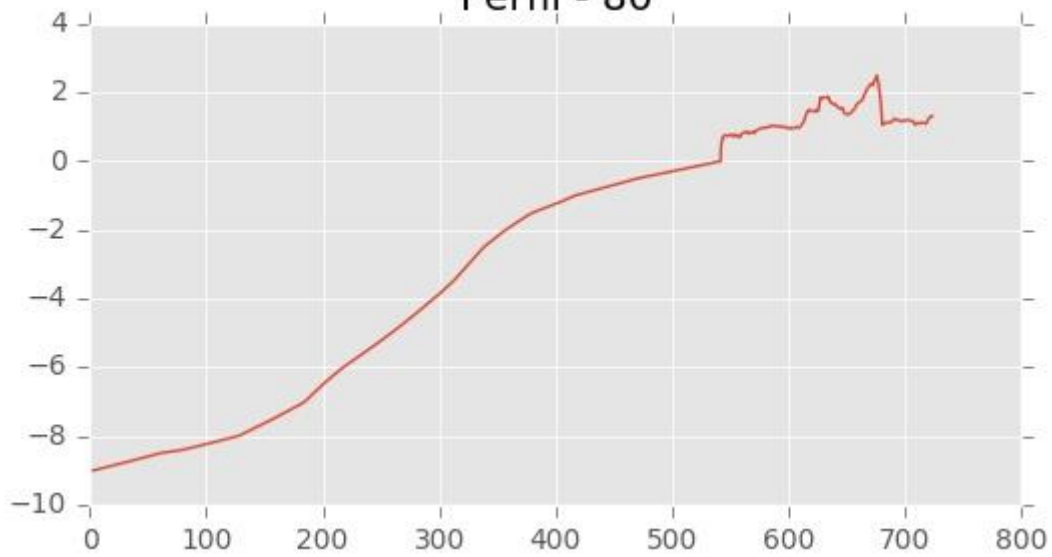
**Perfil - 78**

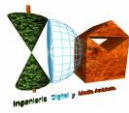


**Perfil - 79**

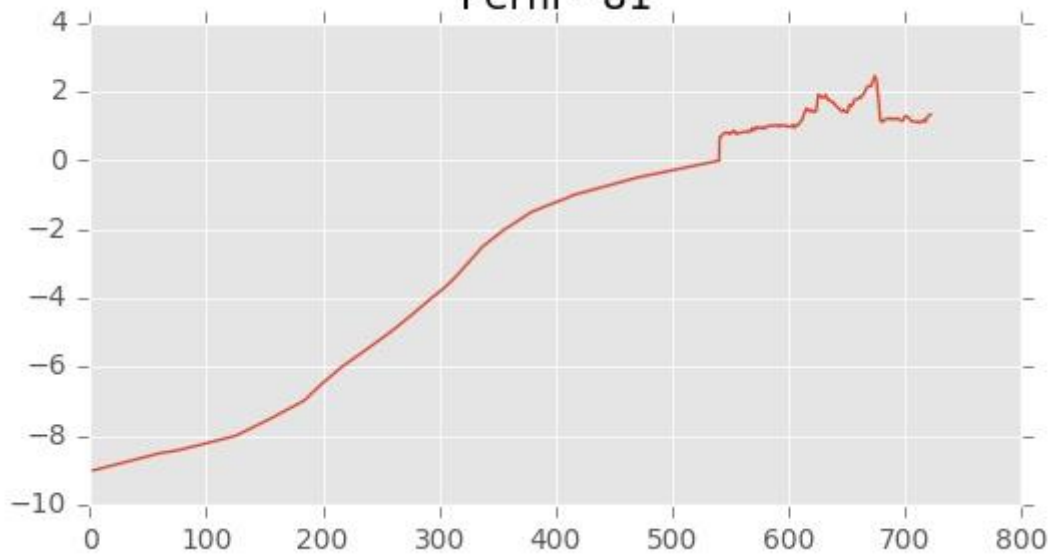


**Perfil - 80**

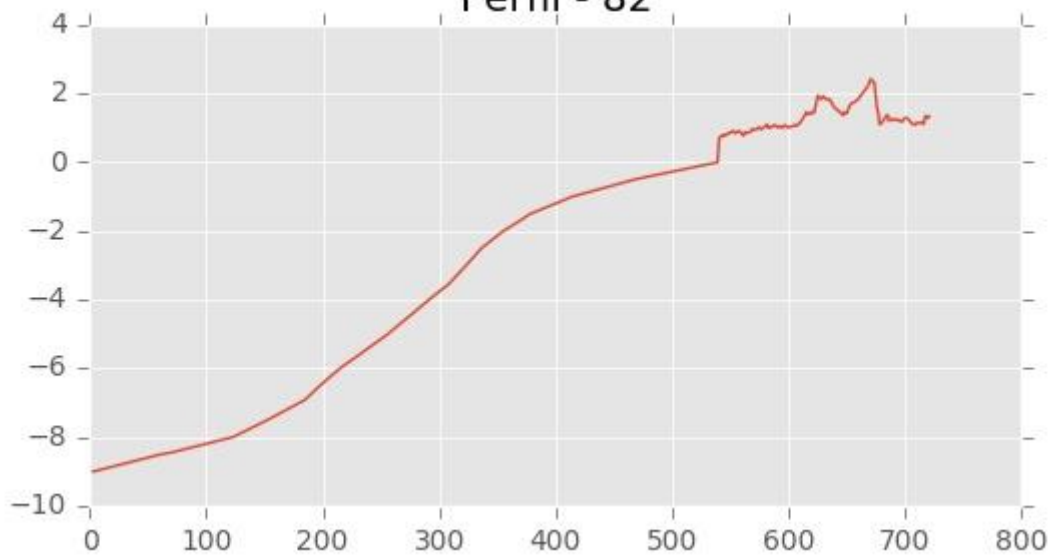




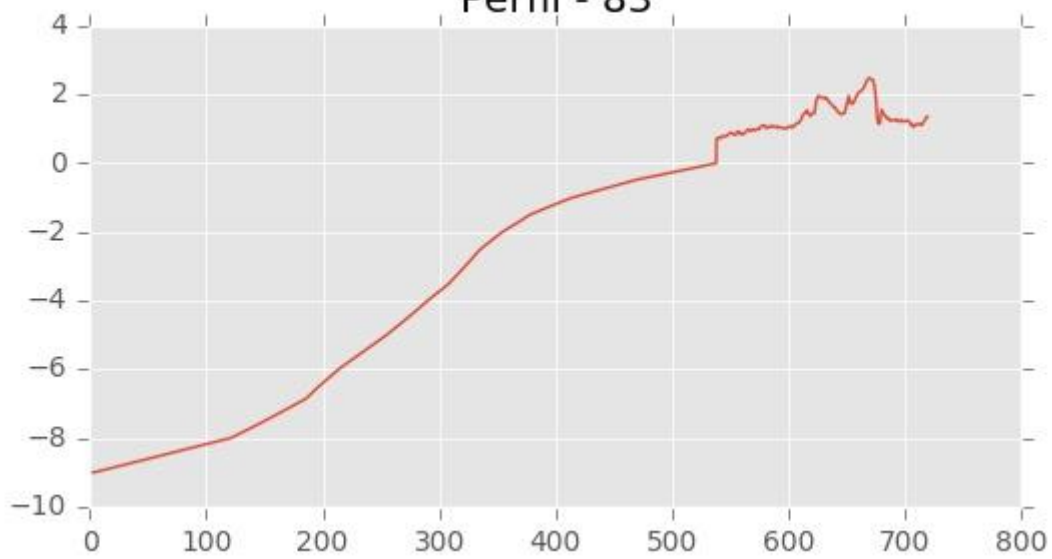
**Perfil - 81**



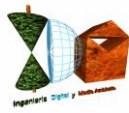
**Perfil - 82**



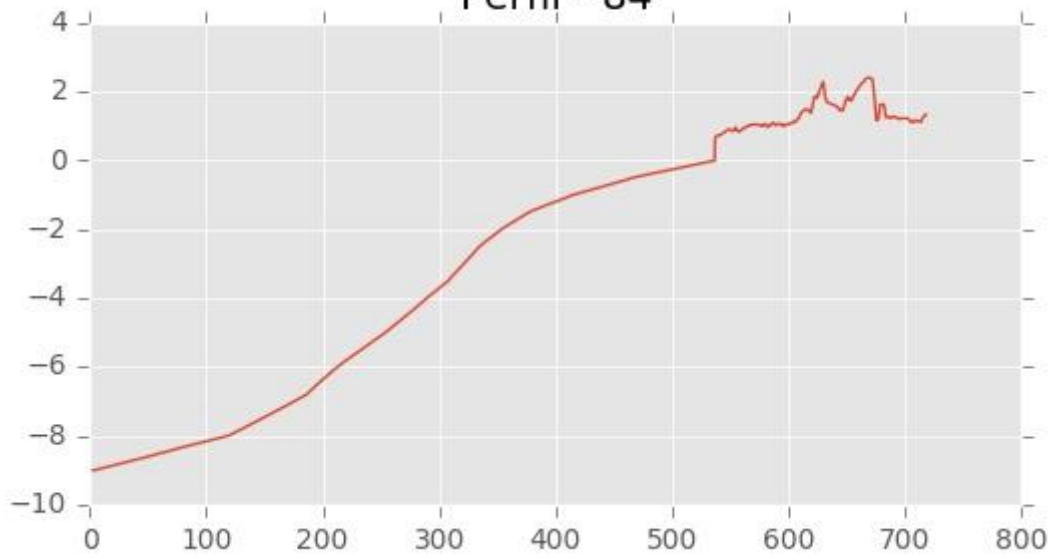
**Perfil - 83**



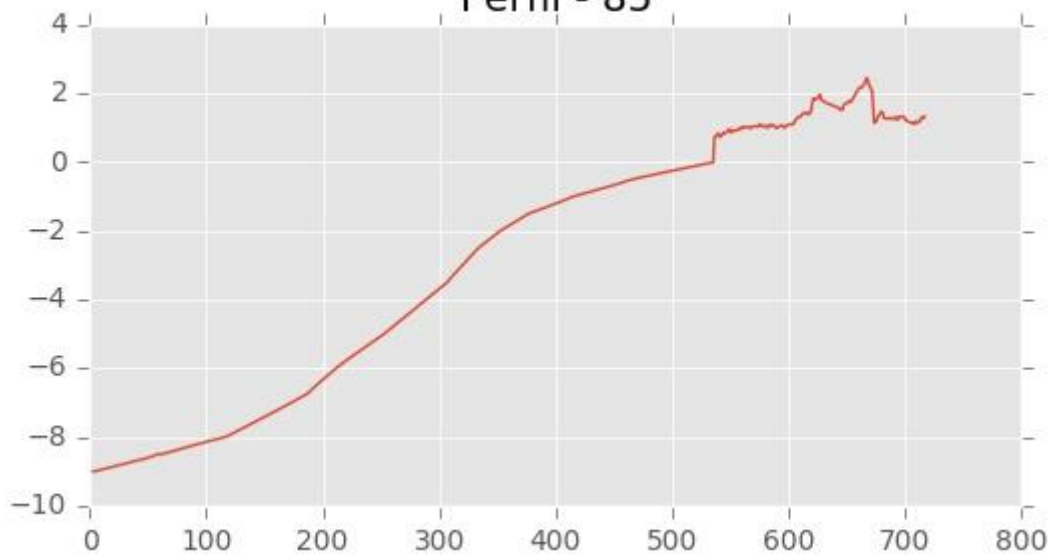




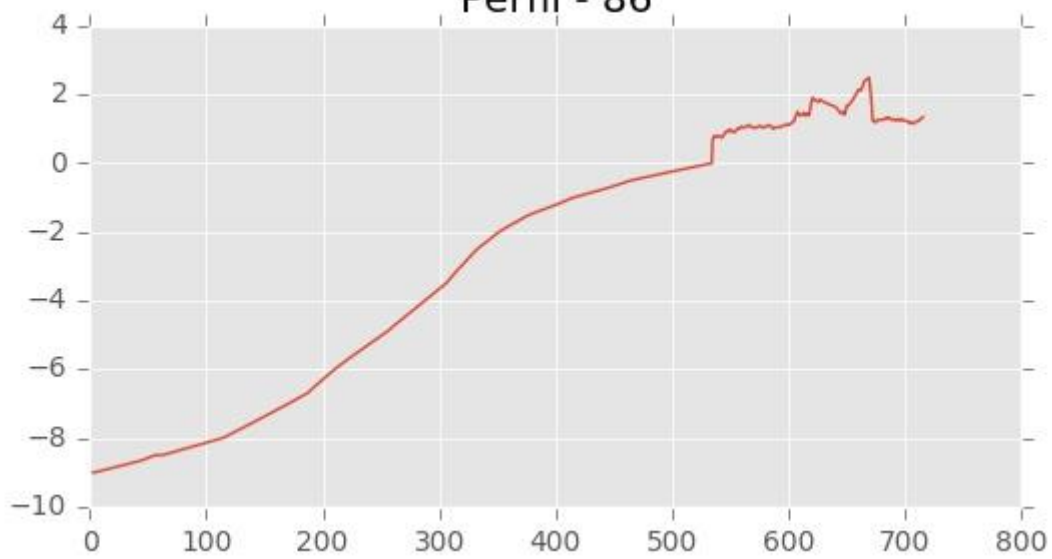
**Perfil - 84**

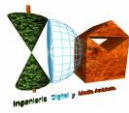


**Perfil - 85**

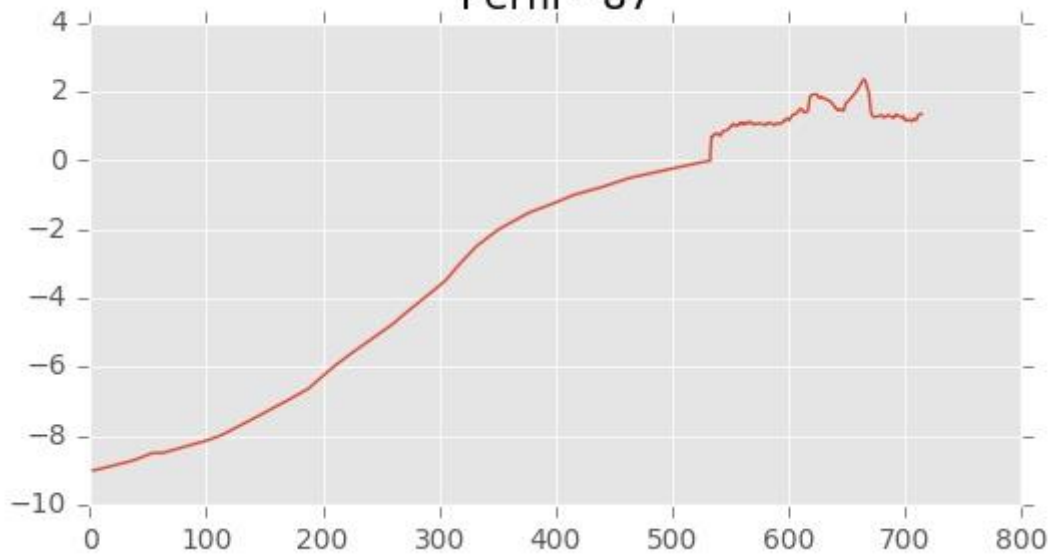


**Perfil - 86**

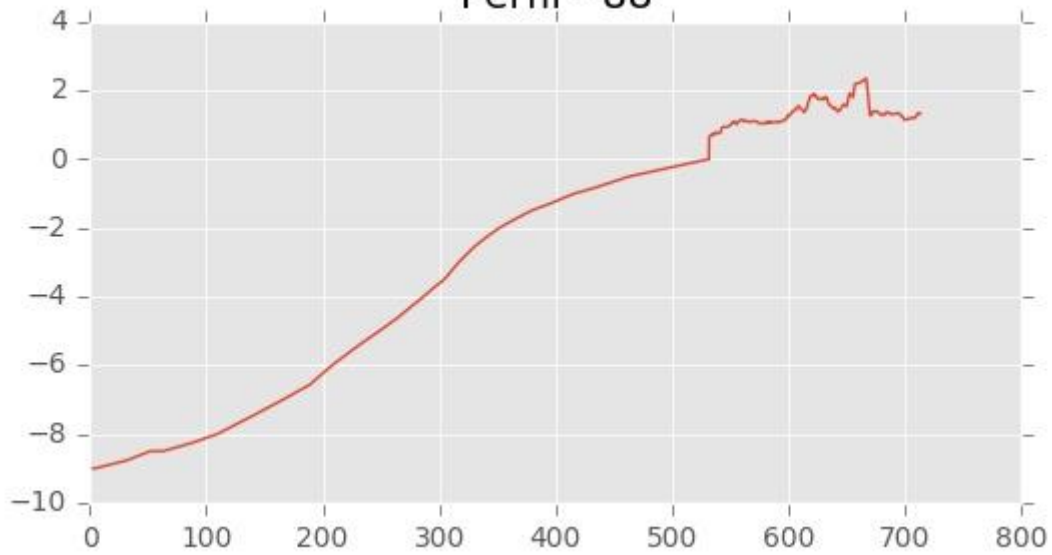




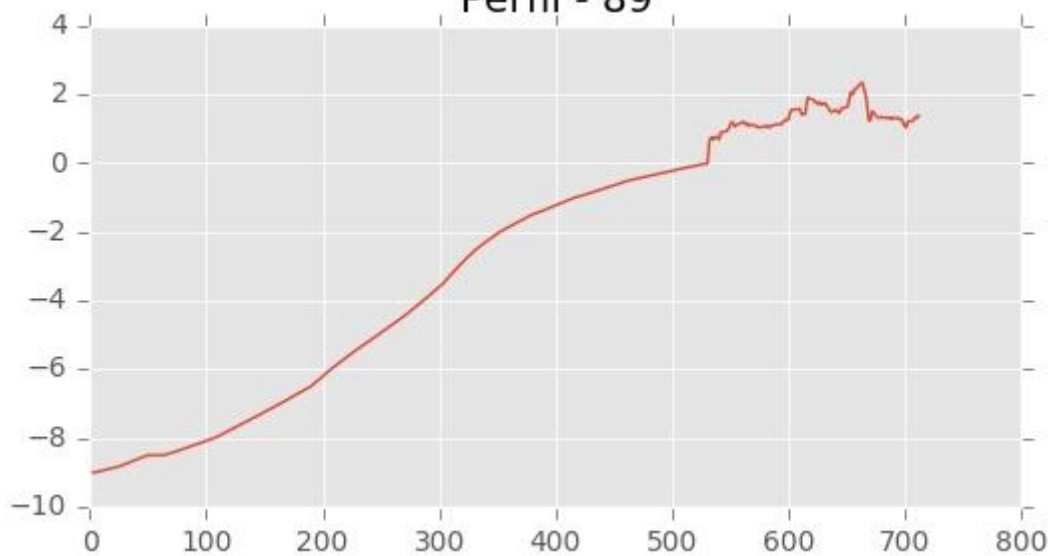
**Perfil - 87**



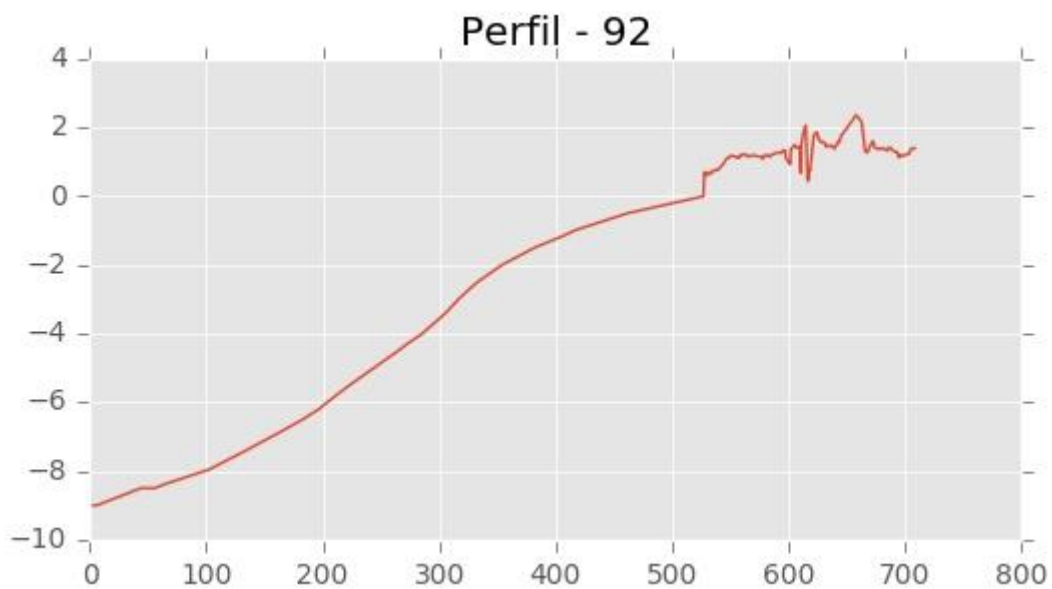
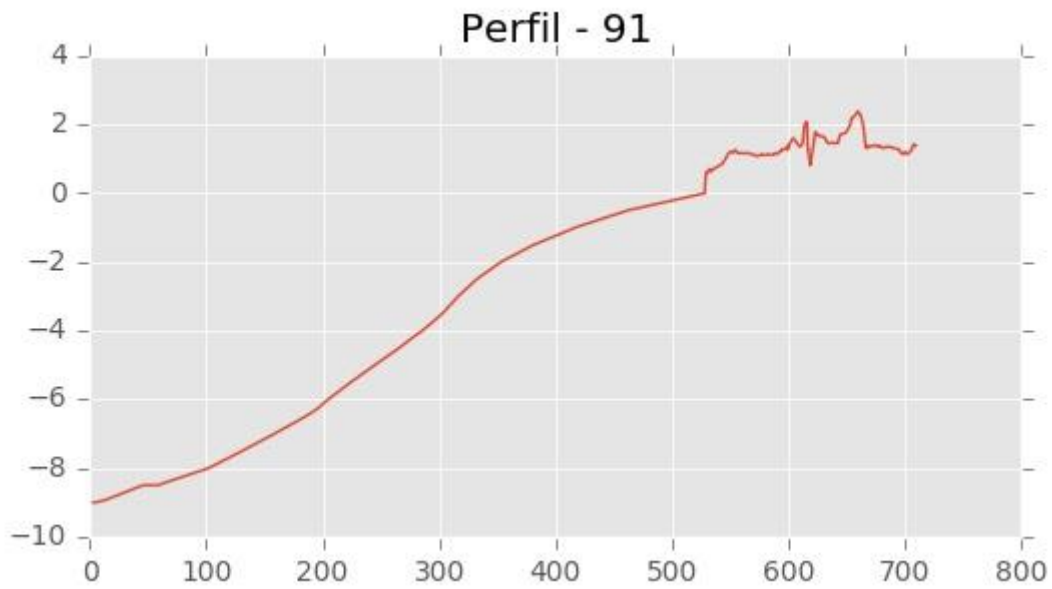
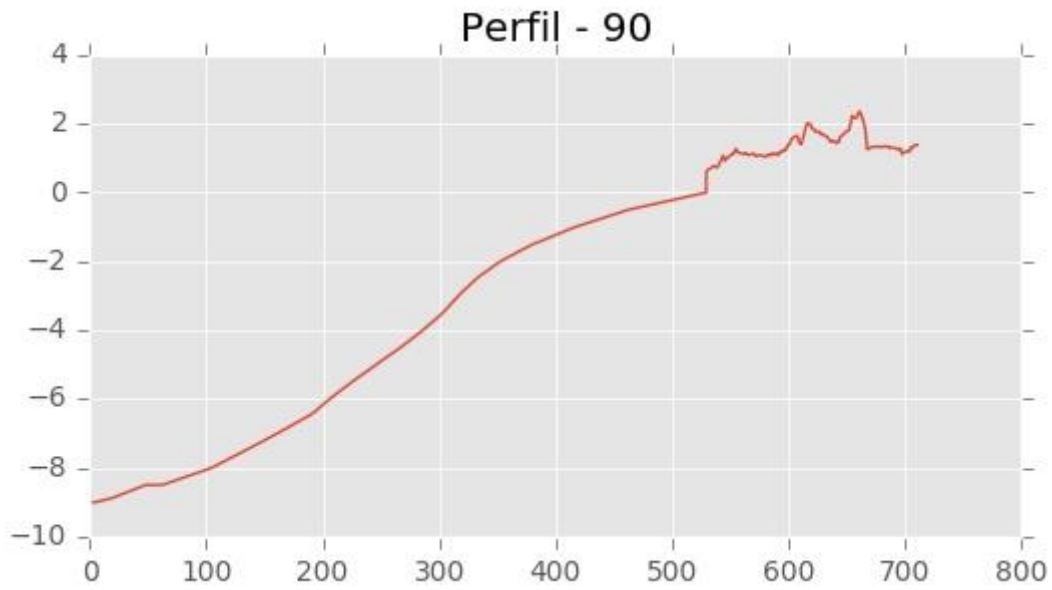
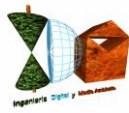
**Perfil - 88**

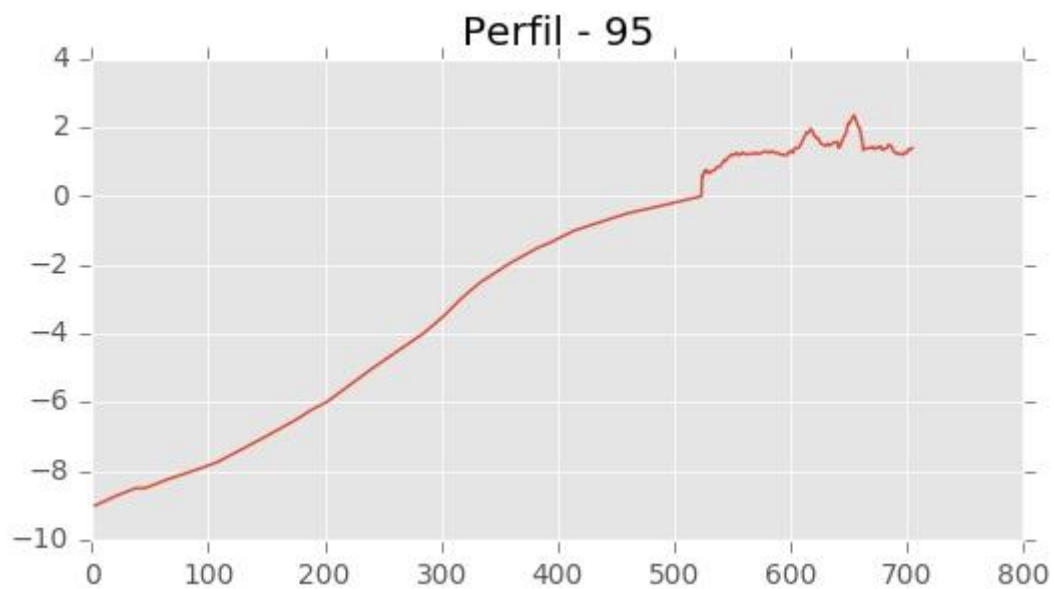
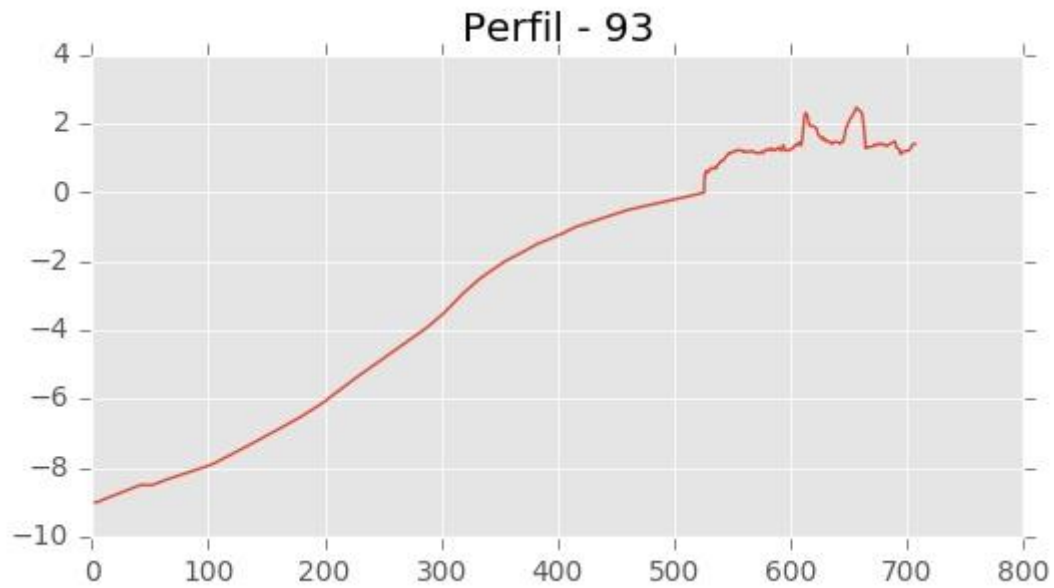
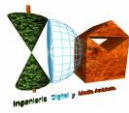


**Perfil - 89**

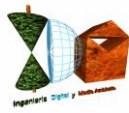




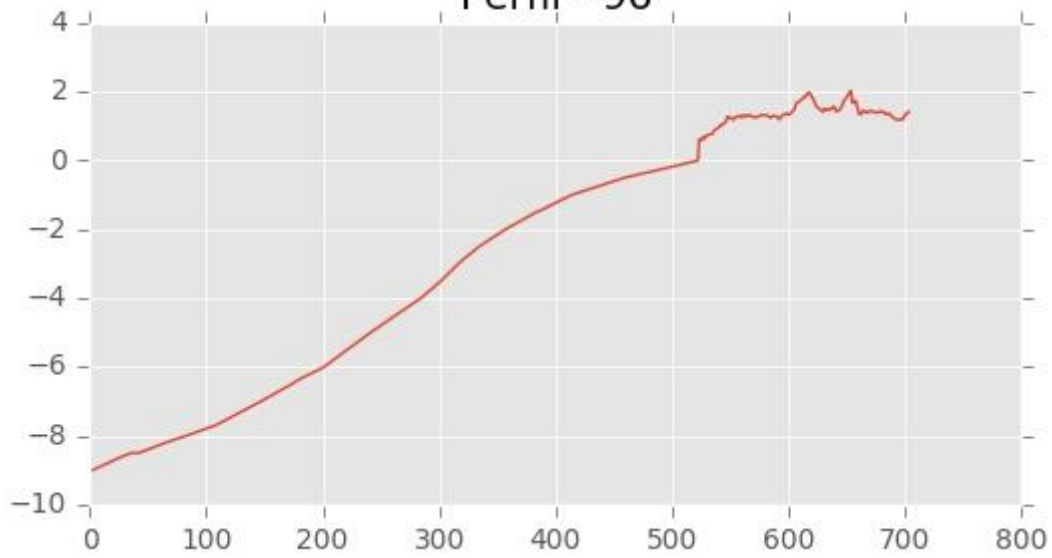




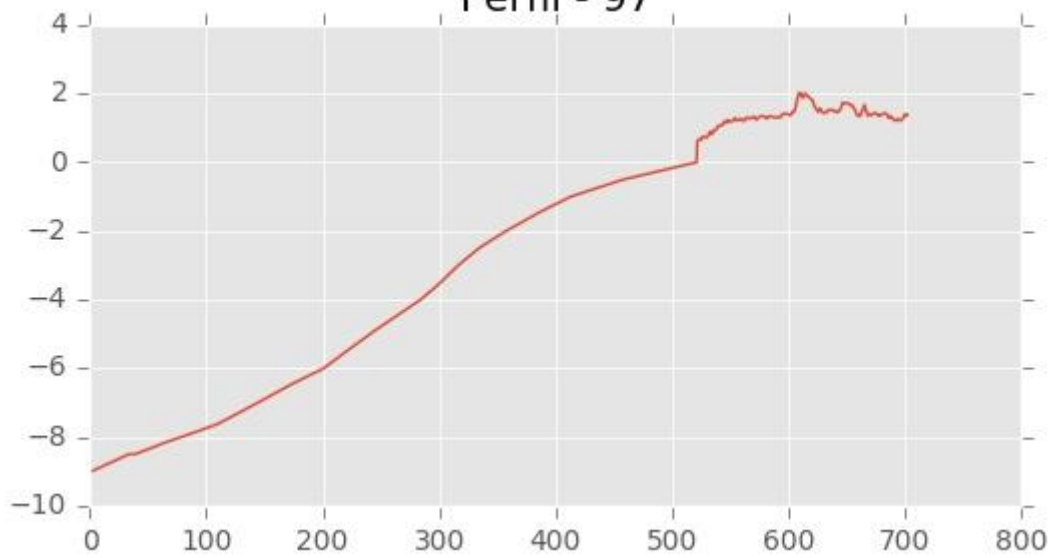




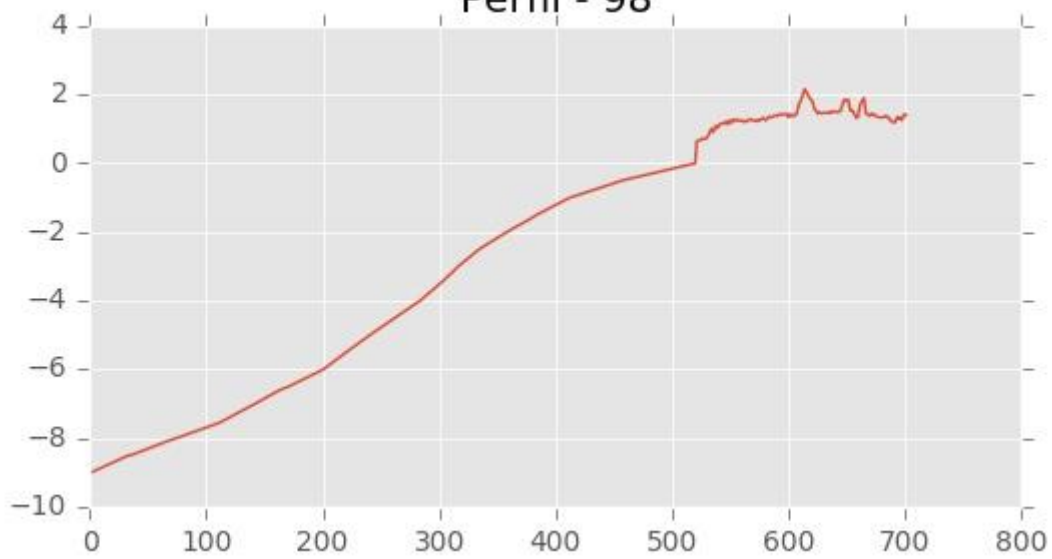
**Perfil - 96**

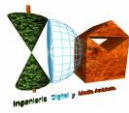


**Perfil - 97**

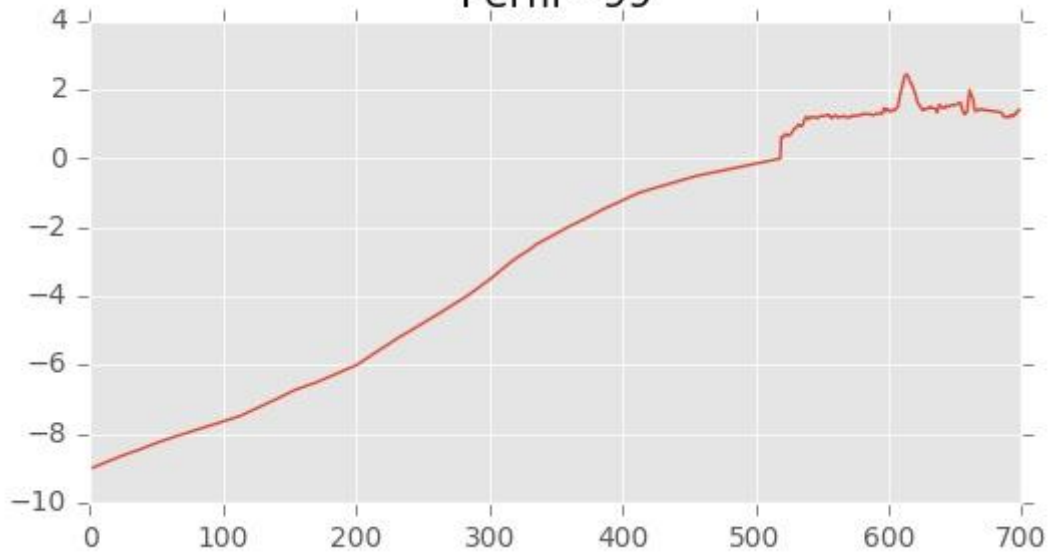


**Perfil - 98**

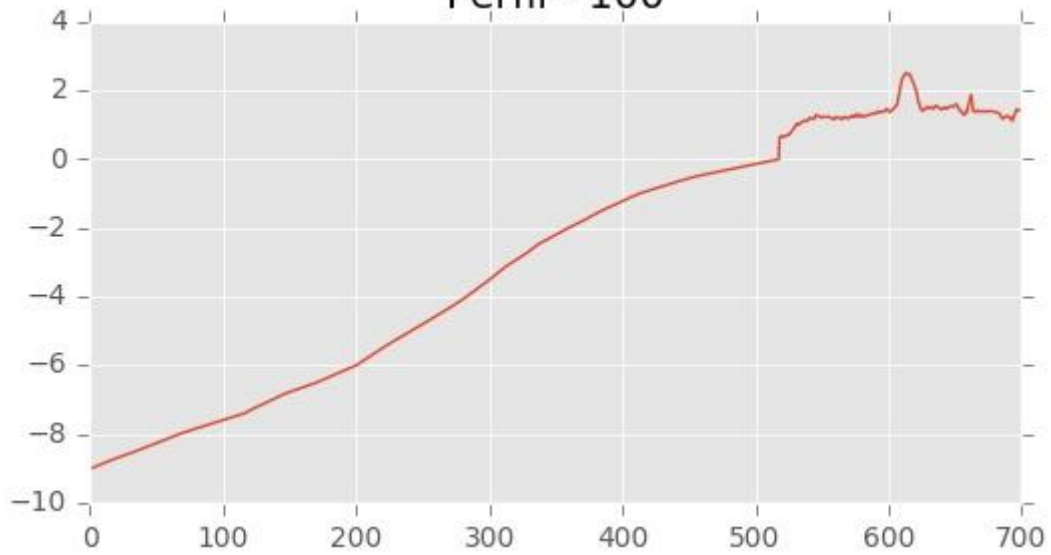




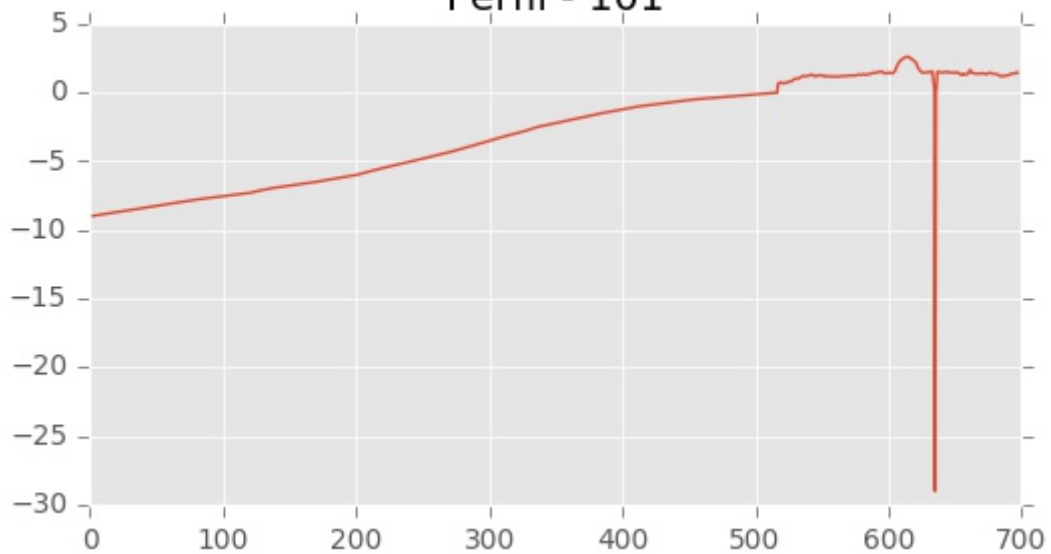
**Perfil - 99**



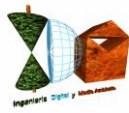
**Perfil - 100**



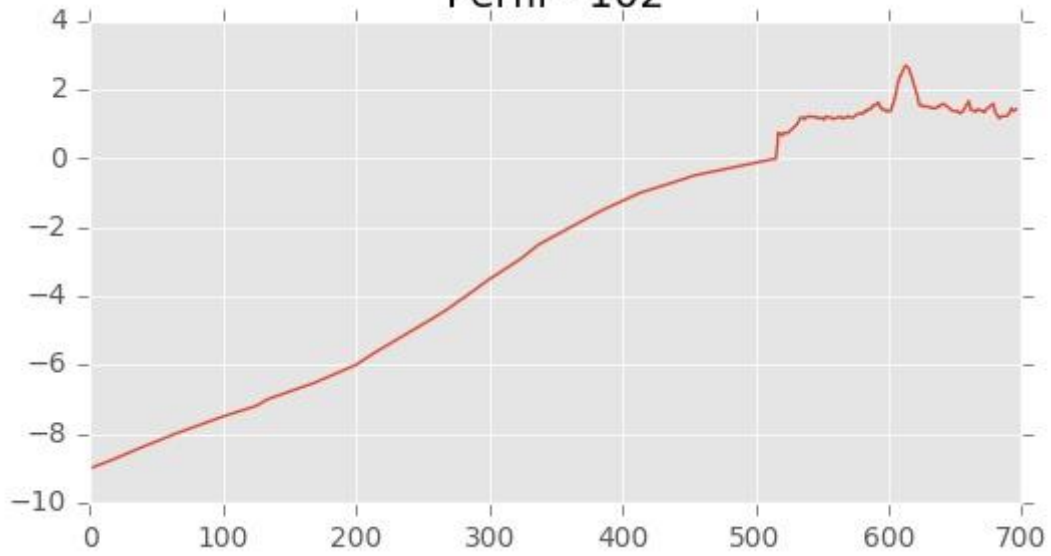
**Perfil - 101**



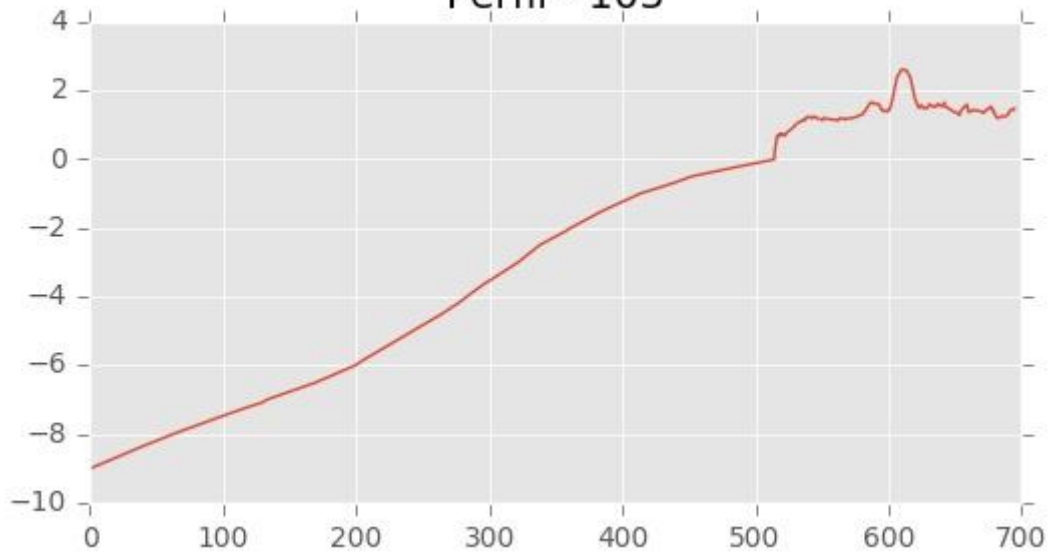




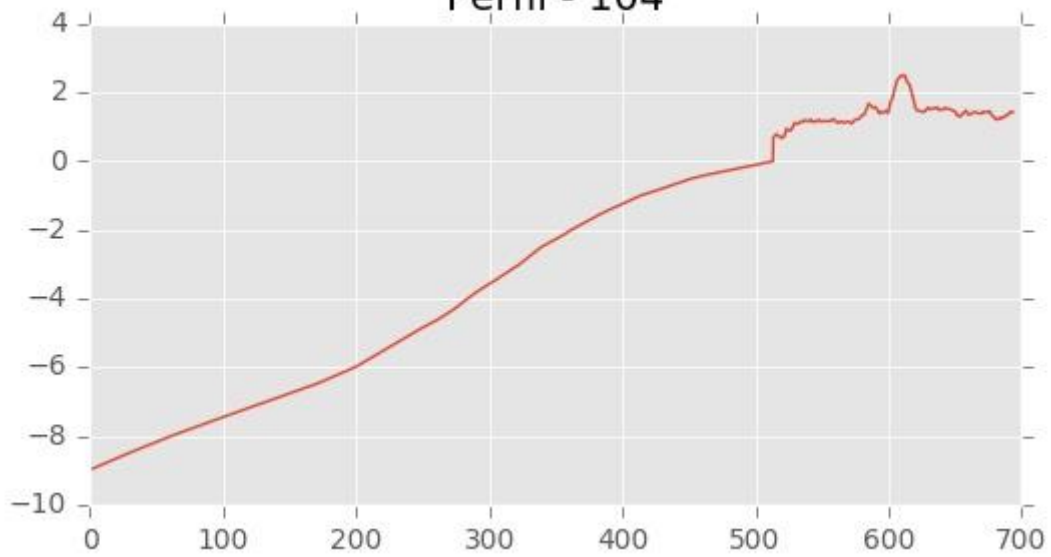
**Perfil - 102**

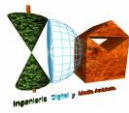


**Perfil - 103**

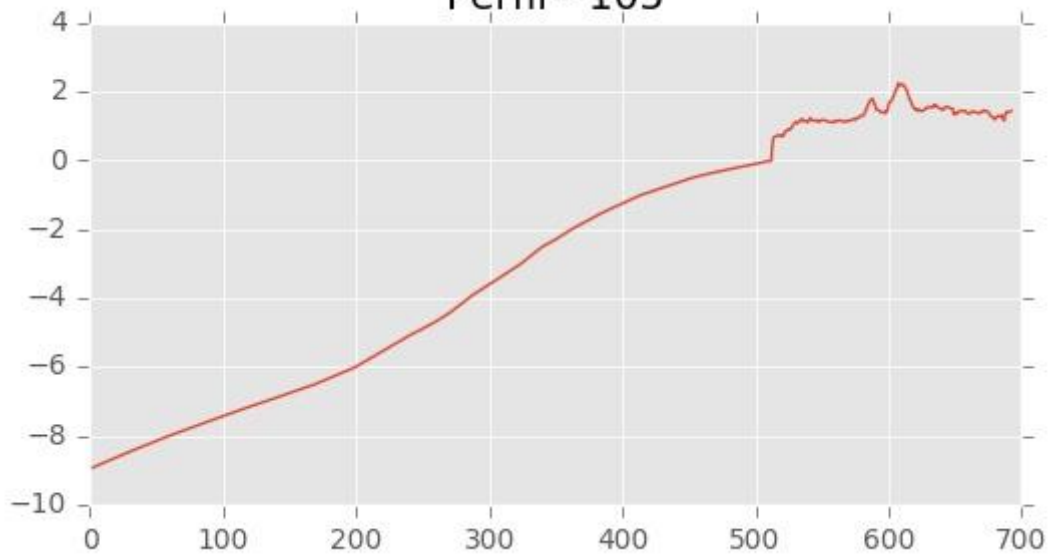


**Perfil - 104**

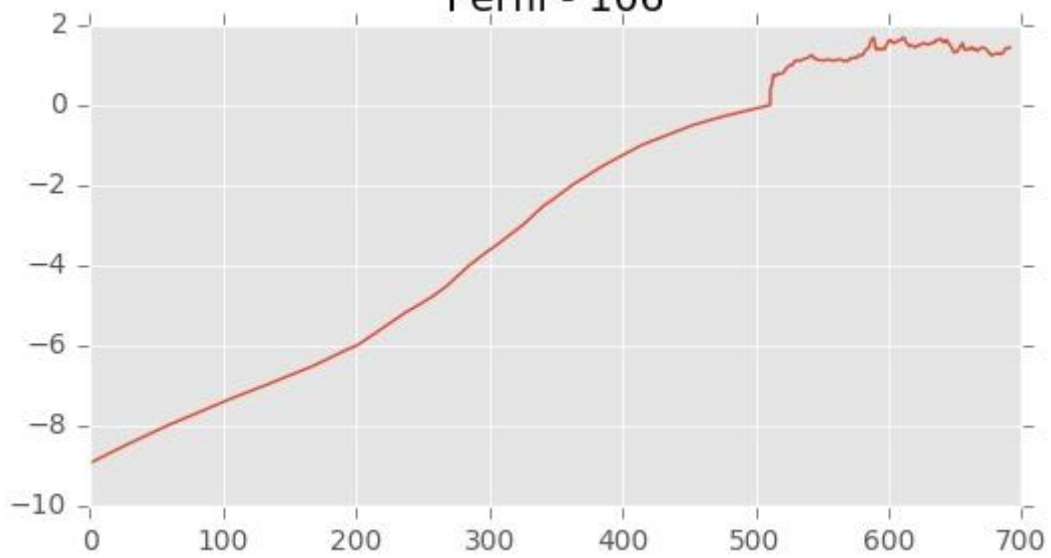




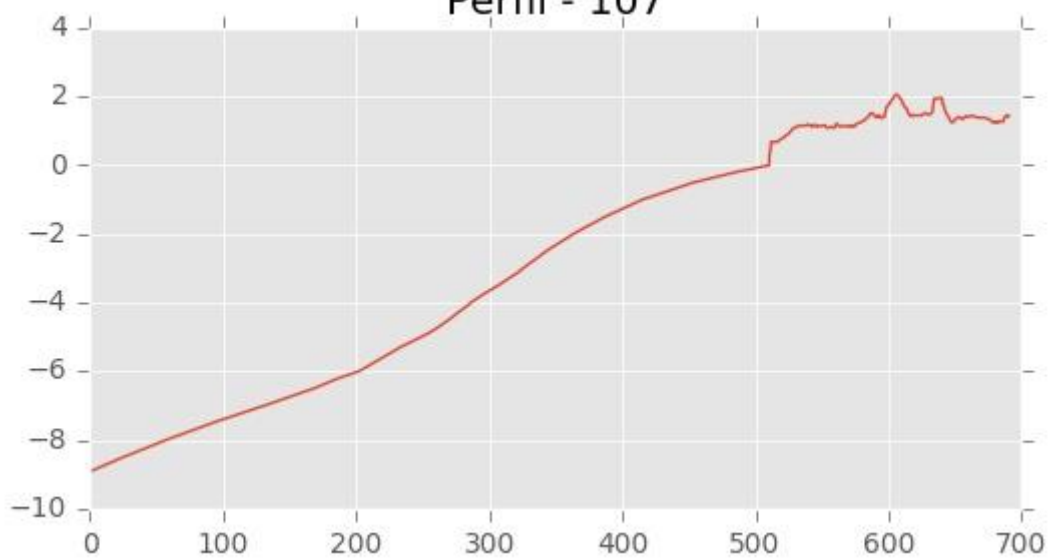
**Perfil - 105**



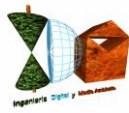
**Perfil - 106**



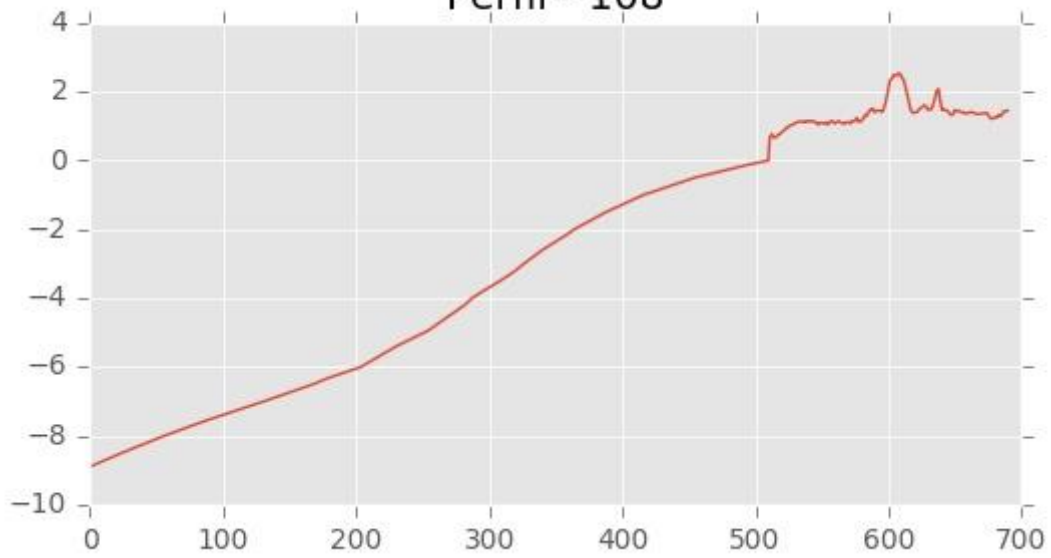
**Perfil - 107**



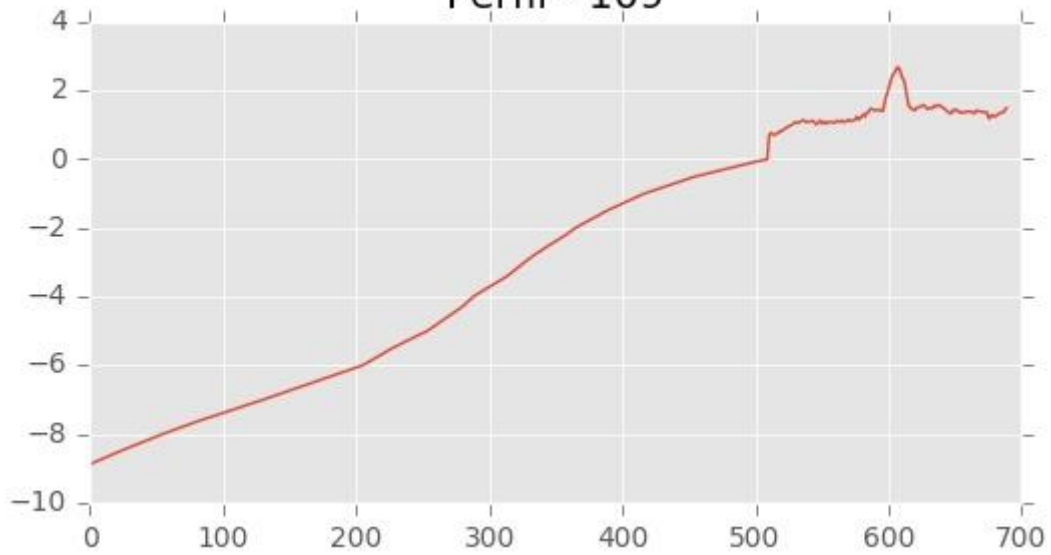




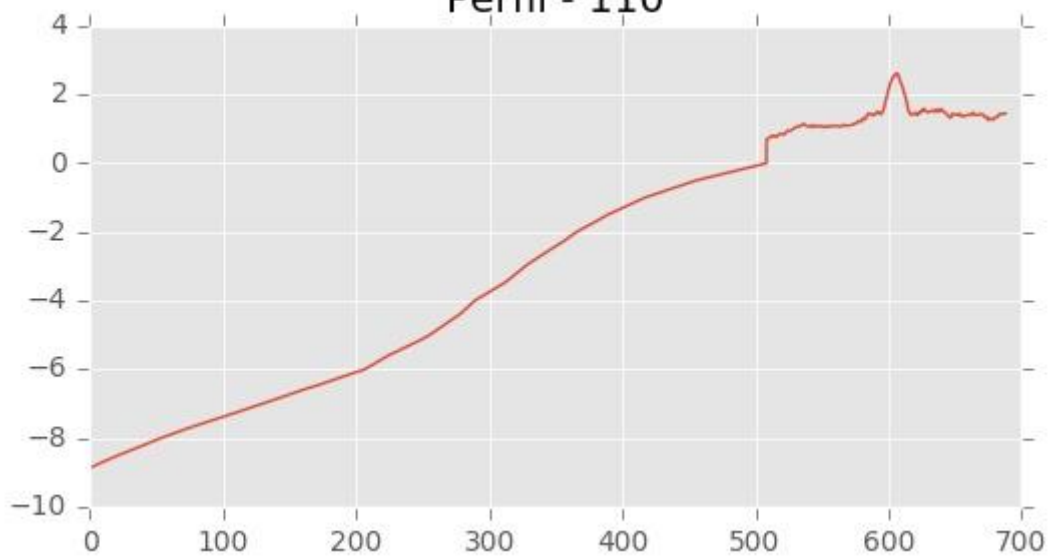
**Perfil - 108**

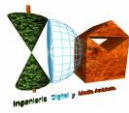


**Perfil - 109**

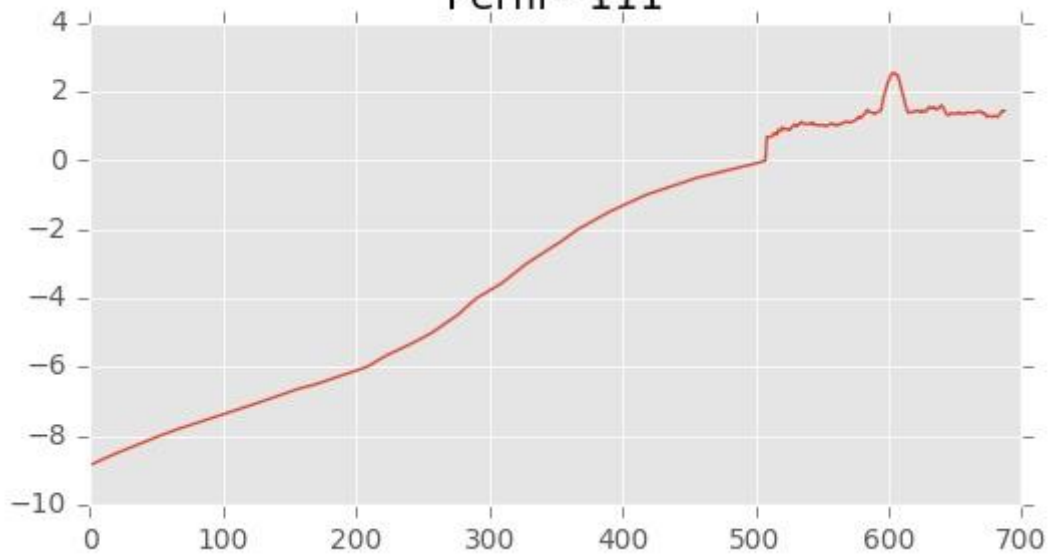


**Perfil - 110**

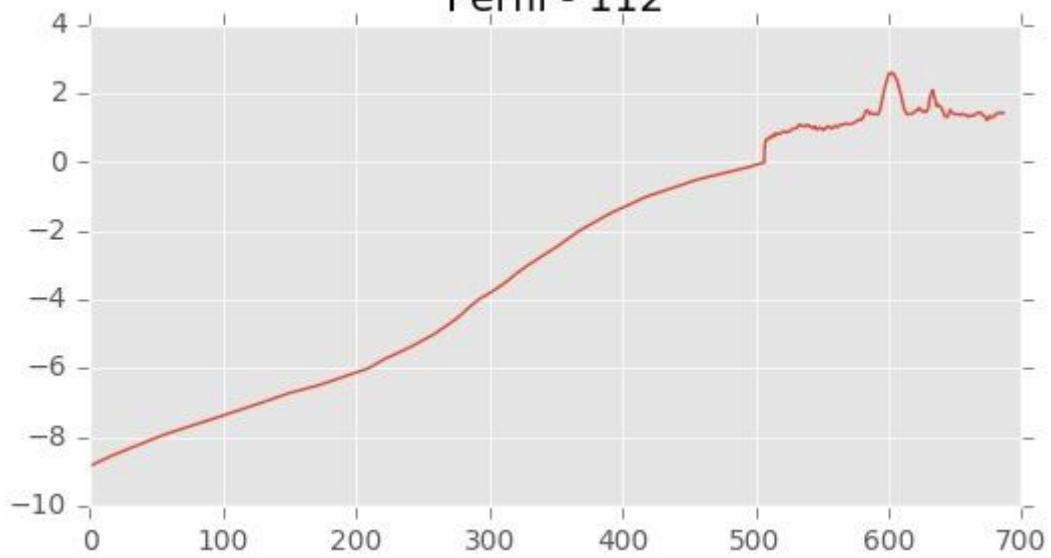




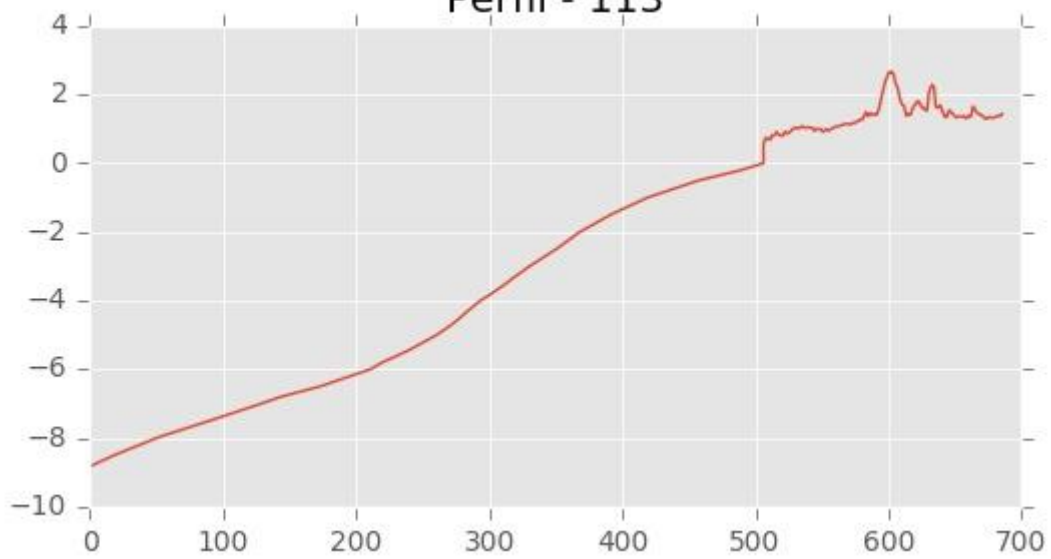
**Perfil - 111**



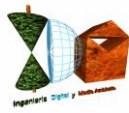
**Perfil - 112**



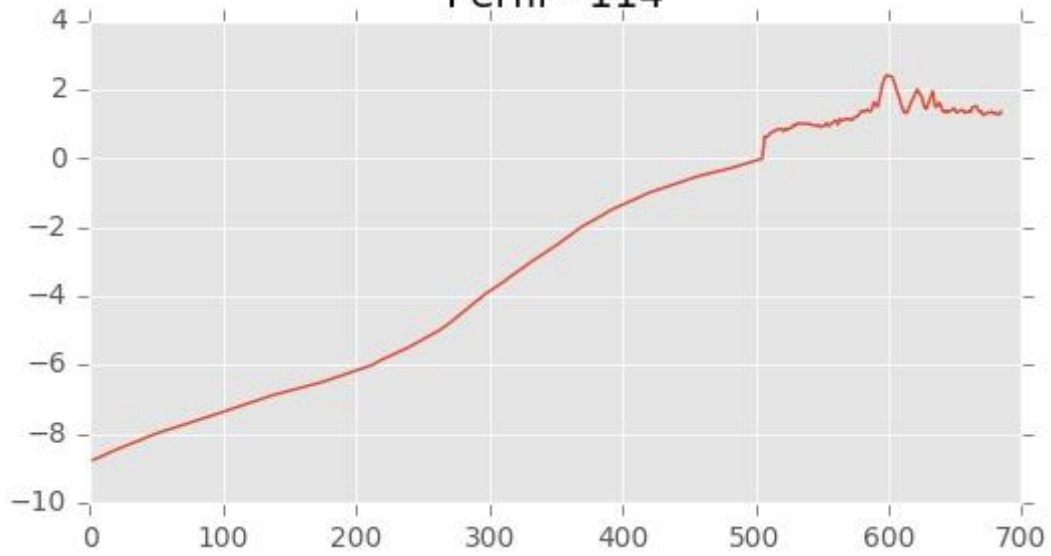
**Perfil - 113**



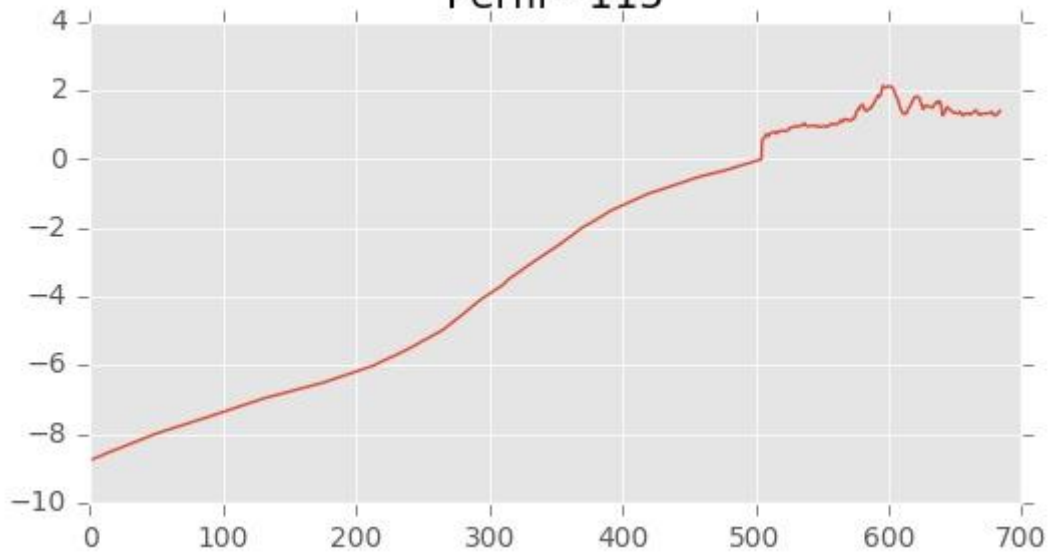




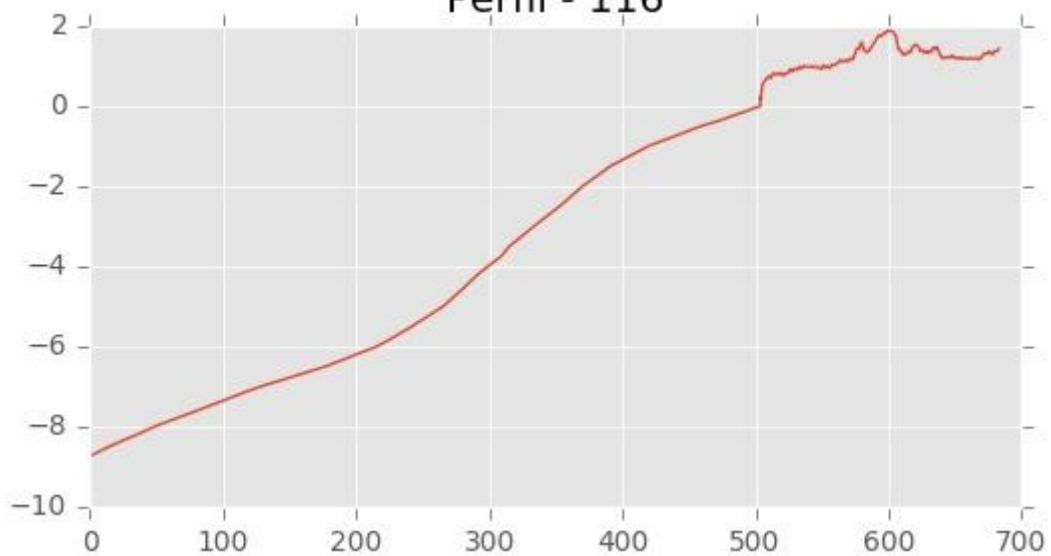
**Perfil - 114**

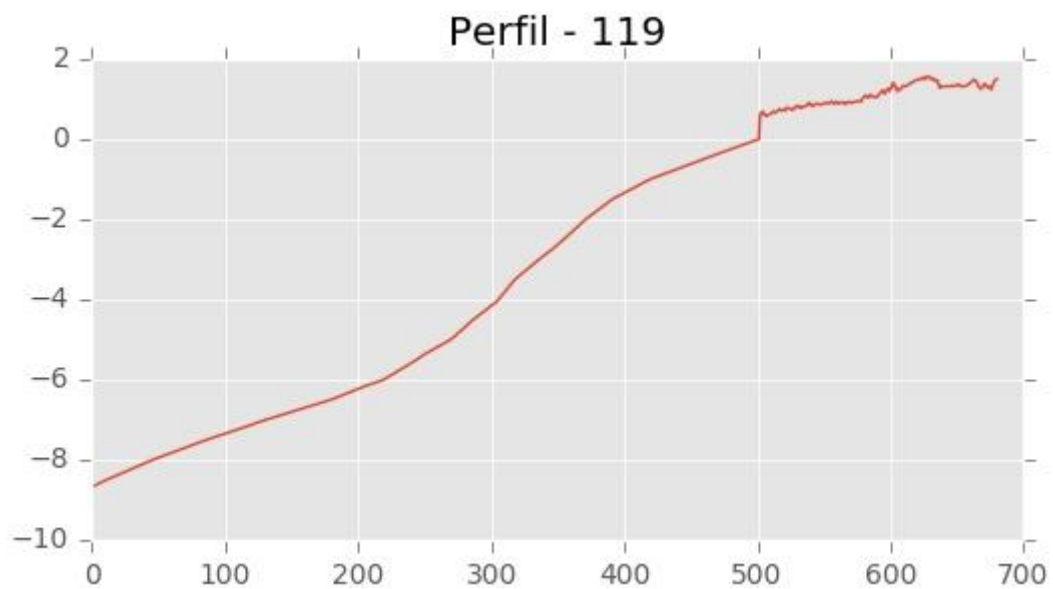
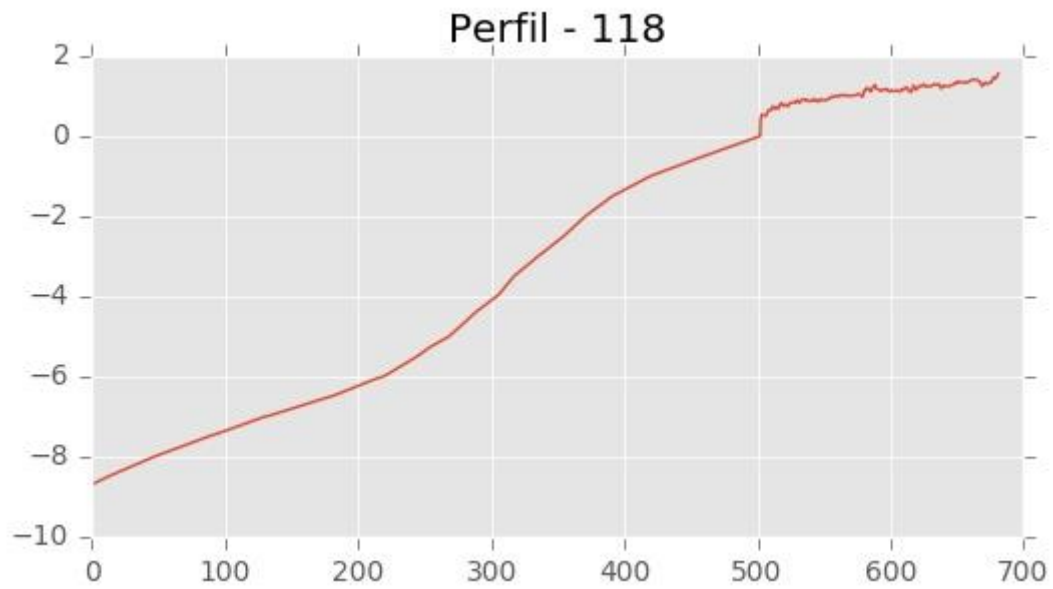
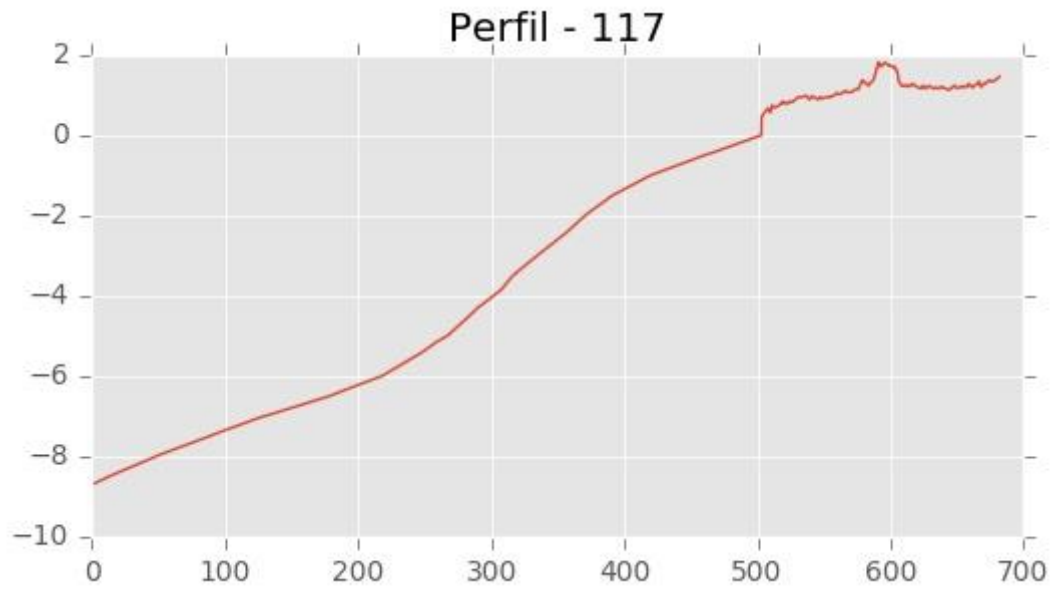
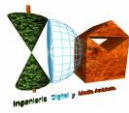


**Perfil - 115**

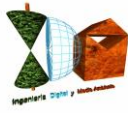


**Perfil - 116**









**INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)**

C/ Cañadilla 6, local 68, C. Comercial Coronado, Las Rozas de Madrid 28231, Madrid

Pza. de la Montañeta 4, entresuelo, 03001 Alicante

Tfno.: 918961731; Fax: 918903410; e-mail: idyma@idyma.es

## **ANEJO II**

**CÁLCULOS DE LA MÁXIMA INUNDACIÓN A PARTIR DE LOS PERFILES DE EJECUCIÓN  
QUE CUBREN LA ZONA DE ESTUDIO SOBRE EL MDT TOPO-BATIMÉTRICO GENERADO**


**INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)**

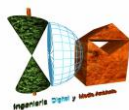
C/ Cañadilla 6, local 68, C. Comercial Coronado, Las Rozas de Madrid 28231, Madrid

Pza. de la Montañeta 4, entresuelo, 03001 Alicante

Tfno.: 918961731; Fax: 918903410; e-mail: idyma@idyma.es

PERFIL	Fecha/Hora Estado de mar máxima CI por perfil/transecto	Hspp (m.)	Tp (seg.)	H0 indef. (m.)	Nivel Mareal (m. NMMA)	Z_Hspp (m. NNMA)	Pendiente Playa promedio min. Cuad. (sumerg. Y emerg.)	Nº Ir	Ru02% (m.)	CI max. (m.)	CI Intersecada (factores reducción $\gamma_f^* \gamma_b^* \gamma_w$ ) (m. NMMA)
1	2013/01/20-08:00	3.274	13.44	2.97	0.3690	-8.317	0.0224	0.2074	2.405	2.774	1.668
2	2013/01/20-08:00	3.273	13.44	2.97	0.3690	-8.286	0.0218	0.2019	2.405	2.774	1.668
3	2013/01/20-08:00	3.272	13.44	2.97	0.3690	-8.256	0.0183	0.1695	2.405	2.774	1.667
4	2013/01/20-08:00	3.271	13.44	2.97	0.3690	-8.226	0.0154	0.1428	2.404	2.773	1.667
5	2013/01/20-08:00	3.269	13.44	2.97	0.3690	-8.204	0.0168	0.1563	2.404	2.773	1.667
6	2013/01/20-08:00	3.268	13.44	2.97	0.3690	-8.208	0.0173	0.1611	2.403	2.772	1.667
7	2013/01/20-08:00	3.267	13.44	2.97	0.3690	-8.211	0.0180	0.1673	2.403	2.772	1.667
8	2013/01/20-08:00	3.266	13.44	2.97	0.3690	-8.215	0.0177	0.1645	2.402	2.771	1.666
9	2013/01/20-08:00	3.266	13.44	2.97	0.3690	-8.219	0.0201	0.1869	2.402	2.771	1.666
10	2013/01/20-08:00	3.266	13.44	2.97	0.3690	-8.223	0.0189	0.1756	2.403	2.772	1.666
11	2013/01/20-08:00	3.267	13.44	2.97	0.3690	-8.226	0.0184	0.1710	2.403	2.772	1.667
12	2013/01/20-08:00	3.268	13.44	2.97	0.3690	-8.230	0.0182	0.1686	2.403	2.772	1.667
13	2013/01/20-08:00	3.268	13.44	2.97	0.3690	-8.234	0.0179	0.1664	2.403	2.772	1.667
14	2013/01/20-08:00	3.269	13.44	2.97	0.3690	-8.238	0.0190	0.1764	2.404	2.773	1.667
15	2013/01/20-08:00	3.269	13.44	2.97	0.3690	-8.241	0.0177	0.1641	2.404	2.773	1.667
16	2013/01/20-08:00	3.270	13.44	2.97	0.3690	-8.245	0.0175	0.1625	2.404	2.773	1.667
17	2013/01/20-08:00	3.270	13.44	2.97	0.3690	-8.249	0.0175	0.1626	2.404	2.773	1.667
18	2013/01/20-08:00	3.270	13.44	2.97	0.3690	-8.253	0.0181	0.1683	2.404	2.773	1.667
19	2013/01/20-08:00	3.270	13.44	2.97	0.3690	-8.256	0.0223	0.2073	2.404	2.773	1.667
20	2013/01/20-08:00	3.270	13.44	2.97	0.3690	-8.252	0.0222	0.2058	2.404	2.773	1.667
21	2013/01/20-08:00	3.271	13.44	2.97	0.3690	-8.228	0.0213	0.1979	2.404	2.773	1.667
22	2013/01/20-08:00	3.272	13.44	2.97	0.3690	-8.205	0.0215	0.1992	2.405	2.774	1.667
23	2013/01/20-08:00	3.273	13.44	2.97	0.3690	-8.200	0.0208	0.1926	2.405	2.774	1.668
24	2013/01/20-08:00	3.274	13.44	2.97	0.3690	-8.200	0.0195	0.1809	2.406	2.775	1.668
25	2013/01/20-08:00	3.276	13.44	2.97	0.3690	-8.200	0.0175	0.1627	2.406	2.775	1.668



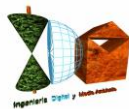

**INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)**

C/ Cañadilla 6, local 68, C. Comercial Coronado, Las Rozas de Madrid 28231, Madrid

Pza. de la Montañeta 4, entresuelo, 03001 Alicante

Tfno.: 918961731; Fax: 918903410; e-mail: idyma@idyma.es

PERFIL	Fecha/Hora Estado de mar máxima CI por perfil/transecto	Hspp (m.)	Tp (seg.)	H0 indef. (m.)	Nivel Mareal (m. NNMA)	Z_Hspp (m. NNMA)	Pendiente Playa promedio min. Cuad. (sumerg. Y emerg.)	Nº Ir	Ru02% (m.)	CI max. (m.)	CI Intersecada (factores reducción $\gamma_f^* \gamma_b^* \gamma_w$ ) (m. NNMA)
26	2013/01/20-08:00	3.277	13.44	2.97	0.3690	-8.200	0.0173	0.1603	2.406	2.775	1.669
27	2013/01/20-08:00	3.278	13.44	2.97	0.3690	-8.200	0.0166	0.1542	2.407	2.776	1.669
28	2013/01/20-08:00	3.279	13.44	2.97	0.3690	-8.200	0.0167	0.1551	2.407	2.776	1.669
29	2013/01/20-08:00	3.280	13.44	2.97	0.3690	-8.200	0.0167	0.1545	2.408	2.777	1.669
30	2013/01/20-08:00	3.281	13.44	2.97	0.3690	-8.200	0.0167	0.1550	2.408	2.777	1.669
31	2013/01/20-08:00	3.282	13.44	2.97	0.3690	-8.200	0.0181	0.1676	2.408	2.777	1.670
32	2013/01/20-08:00	3.283	13.44	2.97	0.3690	-8.200	0.0195	0.1805	2.409	2.778	1.670
33	2013/01/20-08:00	3.284	13.44	2.97	0.3690	-8.200	0.0174	0.1609	2.409	2.778	1.670
34	2013/01/20-08:00	3.284	13.44	2.97	0.3690	-8.200	0.0201	0.1864	2.409	2.778	1.670
35	2013/01/20-08:00	3.284	13.44	2.97	0.3690	-8.200	0.0172	0.1591	2.409	2.778	1.670
36	2013/01/20-08:00	3.283	13.44	2.97	0.3690	-8.200	0.0169	0.1565	2.409	2.778	1.670
37	2013/01/20-08:00	3.283	13.44	2.97	0.3690	-8.200	0.0180	0.1670	2.409	2.778	1.670
38	2013/01/20-08:00	3.283	13.44	2.97	0.3690	-8.200	0.0173	0.1606	2.409	2.778	1.670
39	2013/01/20-08:00	3.282	13.44	2.97	0.3690	-8.200	0.0170	0.1572	2.408	2.777	1.670
40	2013/01/20-08:00	3.282	13.44	2.97	0.3690	-8.200	0.0183	0.1696	2.408	2.777	1.669
41	2013/01/20-08:00	3.281	13.44	2.97	0.3690	-8.200	0.0176	0.1628	2.408	2.777	1.669
42	2013/01/20-08:00	3.281	13.44	2.97	0.3690	-8.200	0.0177	0.1637	2.408	2.777	1.669
43	2013/01/20-08:00	3.281	13.44	2.97	0.3690	-8.200	0.0200	0.1855	2.408	2.777	1.669
44	2013/01/20-08:00	3.280	13.44	2.97	0.3690	-8.200	0.0210	0.1942	2.408	2.777	1.669
45	2013/01/20-08:00	3.280	13.44	2.97	0.3690	-8.200	0.0178	0.1654	2.408	2.777	1.669
46	2013/01/20-08:00	3.280	13.44	2.97	0.3690	-8.200	0.0205	0.1898	2.407	2.776	1.669
47	2013/01/20-08:00	3.279	13.44	2.97	0.3690	-8.200	0.0228	0.2112	2.407	2.776	1.669
48	2013/01/20-08:00	3.279	13.44	2.97	0.3690	-8.200	0.0181	0.1682	2.407	2.776	1.669
49	2013/01/20-08:00	3.279	13.44	2.97	0.3690	-8.200	0.0176	0.1630	2.407	2.776	1.669
50	2013/01/20-08:00	3.278	13.44	2.97	0.3690	-8.200	0.0192	0.1784	2.407	2.776	1.669
51	2013/01/20-08:00	3.277	13.44	2.97	0.3690	-8.200	0.0186	0.1727	2.407	2.776	1.669


**INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)**

C/ Cañadilla 6, local 68, C. Comercial Coronado, Las Rozas de Madrid 28231, Madrid

Pza. de la Montañeta 4, entresuelo, 03001 Alicante

Tfno.: 918961731; Fax: 918903410; e-mail: idyma@idyma.es

PERFIL	Fecha/Hora Estado de mar máxima CI por perfil/transecto	Hspp (m.)	Tp (seg.)	H0 indef. (m.)	Nivel Mareal (m. NMMA)	Z_Hspp (m. NNMA)	Pendiente Playa promedio min. Cuad. (sumerg. Y emerg.)	Nº Ir	Ru02% (m.)	CI max. (m.)	CI Intersecada (factores reducción $\gamma_f^* \gamma_b^* \gamma_w$ ) (m. NMMA)
52	2013/01/20-08:00	3.276	13.44	2.97	0.3690	-8.200	0.0189	0.1755	2.406	2.775	1.668
53	2013/01/20-08:00	3.276	13.44	2.97	0.3690	-8.200	0.0179	0.1663	2.406	2.775	1.668
54	2013/01/20-08:00	3.275	13.44	2.97	0.3690	-8.200	0.0190	0.1760	2.406	2.775	1.668
55	2013/01/20-08:00	3.274	13.44	2.97	0.3690	-8.200	0.0182	0.1688	2.405	2.774	1.668
56	2013/01/20-08:00	3.273	13.44	2.97	0.3690	-8.200	0.0178	0.1652	2.405	2.774	1.668
57	2013/01/20-08:00	3.272	13.44	2.97	0.3690	-8.207	0.0186	0.1728	2.405	2.774	1.667
58	2013/01/20-08:00	3.271	13.44	2.97	0.3690	-8.219	0.0220	0.2043	2.404	2.773	1.667
59	2013/01/20-08:00	3.270	13.44	2.97	0.3690	-8.231	0.0195	0.1812	2.404	2.773	1.667
60	2013/01/20-08:00	3.269	13.44	2.97	0.3690	-8.243	0.0181	0.1676	2.403	2.772	1.667
61	2013/01/20-08:00	3.268	13.44	2.97	0.3690	-8.256	0.0222	0.2063	2.403	2.772	1.667
62	2013/01/20-08:00	3.267	13.44	2.97	0.3690	-8.268	0.0229	0.2124	2.403	2.772	1.667
63	2013/01/20-08:00	3.266	13.44	2.97	0.3690	-8.280	0.0199	0.1844	2.403	2.772	1.666
64	2013/01/20-08:00	3.265	13.44	2.97	0.3690	-8.292	0.0210	0.1949	2.402	2.771	1.666
65	2013/01/20-08:00	3.265	13.44	2.97	0.3690	-8.305	0.0204	0.1897	2.402	2.771	1.666
66	2013/01/20-08:00	3.264	13.44	2.97	0.3690	-8.317	0.0178	0.1657	2.402	2.771	1.666
67	2013/01/20-08:00	3.263	13.44	2.97	0.3690	-8.329	0.0196	0.1820	2.401	2.770	1.666
68	2013/01/20-08:00	3.262	13.44	2.97	0.3690	-8.341	0.0202	0.1879	2.401	2.770	1.666
69	2013/01/20-08:00	3.261	13.44	2.97	0.3690	-8.354	0.0175	0.1628	2.401	2.770	1.665
70	2013/01/20-08:00	3.261	13.44	2.97	0.3690	-8.366	0.0178	0.1659	2.400	2.769	1.665
71	2013/01/20-08:00	3.260	13.44	2.97	0.3690	-8.378	0.0181	0.1681	2.400	2.769	1.665
72	2013/01/20-08:00	3.261	13.44	2.97	0.3690	-8.390	0.0173	0.1608	2.400	2.769	1.665
73	2013/01/20-08:00	3.261	13.44	2.97	0.3690	-8.402	0.0174	0.1615	2.401	2.770	1.665
74	2013/01/20-08:00	3.262	13.44	2.97	0.3690	-8.414	0.0162	0.1510	2.401	2.770	1.666
75	2013/01/20-08:00	3.263	13.44	2.97	0.3690	-8.426	0.0167	0.1553	2.401	2.770	1.666
76	2013/01/20-08:00	3.264	13.44	2.97	0.3690	-8.437	0.0196	0.1824	2.402	2.771	1.666
77	2013/01/20-08:00	3.265	13.44	2.97	0.3690	-8.449	0.0171	0.1591	2.402	2.771	1.666



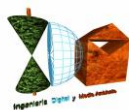

**INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)**

C/ Cañadilla 6, local 68, C. Comercial Coronado, Las Rozas de Madrid 28231, Madrid

Pza. de la Montañeta 4, entresuelo, 03001 Alicante

Tfno.: 918961731; Fax: 918903410; e-mail: idyma@idyma.es

PERFIL	Fecha/Hora Estado de mar máxima CI por perfil/transecto	Hspp (m.)	Tp (seg.)	H0 indef. (m.)	Nivel Mareal (m. NMMA)	Z_Hspp (m. NNMA)	Pendiente Playa promedio min. Cuad. (sumerg. Y emerg.)	Nº Ir	Ru02% (m.)	CI max. (m.)	CI Intersecada (factores reducción $\gamma_f^* \gamma_b^* \gamma_w$ ) (m. NMMA)
78	2013/01/20-08:00	3.266	13.44	2.97	0.3690	-8.461	0.0174	0.1616	2.403	2.772	1.666
79	2013/01/20-08:00	3.267	13.44	2.97	0.3690	-8.473	0.0174	0.1615	2.403	2.772	1.667
80	2013/01/20-08:00	3.268	13.44	2.97	0.3690	-8.485	0.0188	0.1744	2.403	2.772	1.667
81	2013/01/20-08:00	3.269	13.44	2.97	0.3690	-8.497	0.0192	0.1782	2.404	2.773	1.667
82	2013/01/20-08:00	3.271	13.44	2.97	0.3690	-8.509	0.0185	0.1721	2.404	2.773	1.667
83	2013/01/20-08:00	3.269	13.44	2.97	0.3690	-8.520	0.0178	0.1652	2.404	2.773	1.667
84	2013/01/20-08:00	3.268	13.44	2.97	0.3690	-8.529	0.0189	0.1752	2.403	2.772	1.667
85	2013/01/20-08:00	3.266	13.44	2.97	0.3690	-8.538	0.0177	0.1647	2.402	2.771	1.666
86	2013/01/20-08:00	3.264	13.44	2.97	0.3690	-8.547	0.0181	0.1680	2.402	2.771	1.666
87	2013/01/20-08:00	3.262	13.44	2.97	0.3690	-8.556	0.0227	0.2109	2.401	2.770	1.666
88	2013/01/20-08:00	3.260	13.44	2.97	0.3690	-8.564	0.0201	0.1870	2.400	2.769	1.665
89	2013/01/20-08:00	3.260	13.44	2.97	0.3690	-8.573	0.0233	0.2168	2.400	2.769	1.665
90	2013/01/20-08:00	3.259	13.44	2.97	0.3690	-8.582	0.0190	0.1767	2.400	2.769	1.665
91	2013/01/20-08:00	3.258	13.44	2.97	0.3690	-8.553	0.0219	0.2034	2.400	2.769	1.665
92	2013/01/20-08:00	3.258	13.44	2.97	0.3690	-8.519	0.0224	0.2086	2.399	2.768	1.665
93	2013/01/20-08:00	3.257	13.44	2.97	0.3690	-8.485	0.0182	0.1693	2.399	2.768	1.665
94	2013/01/20-08:00	3.259	13.44	2.97	0.3690	-8.451	0.0183	0.1706	2.400	2.769	1.665
95	2013/01/20-08:00	3.263	13.44	2.97	0.3690	-8.417	0.0213	0.1978	2.401	2.770	1.666
96	2013/01/20-08:00	3.267	13.44	2.97	0.3690	-8.383	0.0218	0.2028	2.403	2.772	1.666
97	2013/01/20-08:00	3.270	13.44	2.97	0.3690	-8.349	0.0203	0.1880	2.404	2.773	1.667
98	2013/01/20-08:00	3.274	13.44	2.97	0.3690	-8.315	0.0196	0.1817	2.405	2.774	1.668
99	2013/01/20-08:00	3.278	13.44	2.97	0.3690	-8.321	0.0187	0.1738	2.407	2.776	1.669
100	2013/01/20-08:00	3.282	13.44	2.97	0.3690	-8.321	0.0183	0.1694	2.408	2.777	1.670
101	2013/01/20-08:00	3.287	13.44	2.97	0.3690	-8.309	0.0195	0.1801	2.410	2.779	1.670
102	2013/01/20-08:00	3.291	13.44	2.97	0.3690	-8.296	0.0204	0.1892	2.412	2.781	1.671
103	2013/01/20-08:00	3.295	13.44	2.97	0.3690	-8.284	0.0226	0.2093	2.413	2.782	1.672


**INGENIERIA DIGITAL Y MEDIO AMBIENTE S.L. (IDYMA)**

C/ Cañadilla 6, local 68, C. Comercial Coronado, Las Rozas de Madrid 28231, Madrid

Pza. de la Montañeta 4, entresuelo, 03001 Alicante

Tfno.: 918961731; Fax: 918903410; e-mail: idyma@idyma.es

PERFIL	Fecha/Hora Estado de mar máxima CI por perfil/transecto	Hspp (m.)	Tp (seg.)	H0 indef. (m.)	Nivel Mareal (m. NMMA)	Z_Hspp (m. NNMA)	Pendiente Playa promedio min. Cuad. (sumerg. Y emerg.)	Nº Ir	Ru02% (m.)	CI max. (m.)	CI Intersecada (factores reducción $\gamma_f^* \gamma_b^* \gamma_w$ ) (m. NMMA)
104	2013/01/20-08:00	3.300	13.44	2.97	0.3690	-8.271	0.0200	0.1847	2.415	2.784	1.673
105	2013/01/20-08:00	3.304	13.44	2.97	0.3690	-8.259	0.0195	0.1798	2.416	2.785	1.674
106	2013/01/20-08:00	3.309	13.44	2.97	0.3690	-8.246	0.0189	0.1746	2.418	2.787	1.675
107	2013/01/20-08:00	3.313	13.44	2.97	0.3690	-8.233	0.0187	0.1720	2.420	2.789	1.676
108	2013/01/20-08:00	3.318	13.44	2.97	0.3690	-8.221	0.0186	0.1710	2.421	2.790	1.677
109	2013/01/20-08:00	3.323	13.44	2.97	0.3690	-8.208	0.0183	0.1686	2.423	2.792	1.678
110	2013/01/20-08:00	3.327	13.44	2.97	0.3690	-8.196	0.0184	0.1690	2.425	2.794	1.678
111	2013/01/20-08:00	3.328	13.44	2.97	0.3690	-8.185	0.0185	0.1699	2.425	2.794	1.678
112	2013/01/20-08:00	3.329	13.44	2.97	0.3690	-8.174	0.0184	0.1696	2.425	2.794	1.679
113	2013/01/20-08:00	3.330	13.44	2.97	0.3690	-8.163	0.0186	0.1708	2.426	2.795	1.679
114	2013/01/20-08:00	3.331	13.44	2.97	0.3690	-8.153	0.0195	0.1793	2.426	2.795	1.679
115	2013/01/20-08:00	3.332	13.44	2.97	0.3690	-8.142	0.0205	0.1882	2.426	2.795	1.679
116	2013/01/20-08:00	3.331	13.44	2.97	0.3690	-8.138	0.0206	0.1894	2.426	2.795	1.679
117	2013/01/20-08:00	3.330	13.44	2.97	0.3690	-8.133	0.0218	0.2007	2.426	2.795	1.679
118	2013/01/20-08:00	3.329	13.44	2.97	0.3690	-8.127	0.0181	0.1669	2.426	2.795	1.679
119	2013/01/20-08:00	3.329	13.44	2.97	0.3690	-8.121	0.0193	0.1777	2.425	2.794	1.679