

Universidad de Costa Rica  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Civil

Estimación del factor pico del espectro frecuencial JONSWAP para la costa  
Pacífico, con base en mediciones de oleaje en Puerto Caldera y Cabo Blanco

Trabajo de Graduación

Que para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil

Presenta:

Luis Fernando López Arias

Director de Proyecto de Graduación:

Ing. Alberto Serrano Pacheco, Ph. D.

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

Costa Rica

Setiembre, 2016

## Hoja de aprobación



Luis Fernando López Arias

**Autor del proyecto**



Ing. Alberto Serrano Pacheco, Ph.D.

**Director del proyecto**



Ing. Georges Govaere Vicarioli, Ph.D.

**Asesor del proyecto**



Ing. Henry Alfaro Chavarría, M.Sc

**Asesor del proyecto**

2016, Setiembre 14

El suscrito, Luis Fernando López Arias, cédula 1-1497-0399, estudiante de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, con número de carné B03498, manifiesta que es autor del Proyecto Final de Graduación Estimación del factor pico del espectro frecuencial JONSWAP para la costa Pacífico, con base en mediciones de oleaje en Puerto Caldera y Cabo Blanco, bajo la Dirección del Ph.D. Alberto Serrano Pacheco, quien en consecuencia tiene derechos compartidos sobre los resultados de esta investigación.

Asimismo, hago traspaso de los derechos de utilización del presente trabajo a la Universidad de Costa Rica, para fines académicos: docencia, investigación, acción social y divulgación.

Nota: De acuerdo con la Ley de Derechos de Autor y Derechos Conexos N°6683, Artículo **(versión actualizada el 02 de julio de 2001)**; **“no podrá suprimirse el nombre del autor en las publicaciones o reproducciones, ni hacer en ellas interpolaciones, sin una conveniente distinción entre el texto original y las modificaciones o adiciones editoriales”**. Además, el autor conserva el derecho moral sobre la obra, Artículo 13 de esta ley, por lo que es obligatorio citar la fuente de origen cuando se utilice información contenida en esta obra.

## Dedicatoria

*A mis padres, Luis Fernando López y María Honoria Arias, definitivamente han sido un pilar en este proceso que termina, y que abre otras puertas. Su amor, apoyo y comprensión me han llevado hasta aquí, para ustedes es todo este esfuerzo y dedicación de estos años universitarios, ustedes han sido mi inspiración. Gracias por confiar en mí y guiarme en este viaje llamado vida.*

*A mi abuela Eloína, tu ejemplo de lucha en la vida me ha inspirado, mujer valiente, fuerte y positiva.*

## Agradecimientos

A Dios, por Él es que estoy acá. Gracias por permitirme llegar hasta donde estoy, gracias por la sabiduría y fuerzas dadas para seguir adelante y superar todo obstáculo.

A mis padres, ustedes han sido mi inspiración y mi ejemplo a seguir. Gracias por confiar en mí y apoyarme a lo largo de estos 24 años de vida. Gracias por el amor dado, su educación y formarme como la persona que soy, soy bendecido por tenerlos.

A mi abuela, gracias por apoyarme, amarme y siempre hacerme sentir que estás orgullosa de tu primer nieto.

A Daniel y Esteban, mis hermanos, ustedes han sido un pilar en mi vida y más en este proceso universitario. Gracias por ser un verdadero ejemplo de amistad.

A Adrián, Mario, Charlie y Mau, ustedes saben el esfuerzo que le pusimos para llegar hasta aquí, gracias por ese gran apoyo que fueron en esta etapa universitaria.

A Henry Alfaro y Georges Govaere por guiarme en este trabajo, enseñarme con paciencia y confiar en mí, mucho de esta investigación es por ustedes.

A Alberto Serrano por abrirme las puertas tanto en este trabajo como en la práctica profesional.

Al personal de IMARES porque siempre estuvieron dispuestos a ayudarme en lo que necesitara.

Finalmente, a todas las personas que de alguna u otra manera fueron parte de este proceso universitario, siempre les estaré agradecido.

# Tabla de Contenidos

Capítulo 1. Introducción -----	1
<b>1.1. Justificación -----</b>	<b>1</b>
1.1.1. Problema específico -----	1
1.1.2. Importancia -----	3
1.1.3. Antecedentes -----	6
<b>1.2. Objetivos -----</b>	<b>7</b>
1.2.1. Objetivo General -----	7
1.2.2. Objetivos Específicos -----	8
<b>1.3. Delimitación del problema -----</b>	<b>8</b>
1.3.1. Alcance -----	8
1.3.2. Limitaciones -----	9
<b>1.4. Metodología -----</b>	<b>10</b>
Capítulo 2. Marco teórico -----	14
<b>2.1. Introducción a la teoría de ondas -----</b>	<b>14</b>
<b>2.2. Descripción básica de oleaje -----</b>	<b>16</b>
<b>2.3. Análisis de oleaje -----</b>	<b>18</b>
<b>2.4. Parámetros espectrales -----</b>	<b>25</b>
<b>2.5. Funciones teóricas de densidades espectrales -----</b>	<b>28</b>
<b>2.6. Parámetros de bondad de ajuste de modelos -----</b>	<b>28</b>
<b>2.7. Modelo de propagación de oleaje espectral, Simulating Waves Nearshore (SWAN) -----</b>	<b>29</b>
Capítulo 3. Información básica -----	32
<b>3.1. Descripción del lugar -----</b>	<b>32</b>
<b>3.2. Equipo utilizado para medición -----</b>	<b>34</b>

3.2.1. Aquadopp -----	34
3.2.2. Awac -----	35
<b>3.3. Ubicación de los equipos de medición -----</b>	<b>36</b>
Capítulo 4. Análisis y resultados de los datos de oleaje -----	38
<b>4.1. Análisis de sensibilidad de la función teórica JONSWAP modificada por Goda -----</b>	<b>38</b>
4.1.1. Caso I (Hs y $\gamma$ varían, Tp se mantiene con 18 s) -----	43
4.1.2. Caso II (Tp y $\gamma$ varían, Hs se mantiene con 1m) -----	45
4.1.3. Caso III ( $\gamma$ varía, Tp y Hs se mantienen constante) -----	49
<b>4.2. Suavizado de espectro (resolución espectral) -----</b>	<b>50</b>
<b>4.3. Caracterización de los datos de oleaje medidos -----</b>	<b>54</b>
<b>4.4. Ajuste del <math>\gamma</math> para los estados de mar de un pico -----</b>	<b>57</b>
Capítulo 5. Propagación de oleaje mediante el modelo SWAN -----	76
Capítulo 6. Conclusiones y Recomendaciones -----	84
<b>6.1. Conclusiones -----</b>	<b>84</b>
<b>6.2. Recomendaciones -----</b>	<b>85</b>
Referencias bibliográficas -----	86
APÉNDICES -----	88
<b>APÉNDICE I -----</b>	<b>88</b>

## Tabla de Cuadros

Cuadro 1.1. Evaluación de empresarios a los puertos de su país .....	4
Cuadro 2.1. Clasificación de teorías según la profundidad relativa. ....	16
Cuadro 2.2. Tipos de ondas con sus mecanismos generadores, periodo y longitud, así como las fuerzas que las controlan. ....	17
Cuadro 3.1. Ubicación de los equipos de medición. ....	36
Cuadro 4.1. Parámetros de bondad de ajuste del modelo teórico JONSWAP al observado en campo. ....	63
Cuadro 5.1. Casos estacionarios que se simularon en SWAN. ....	77
Cuadro 5.2. Resultados de alturas significantes obtenidas en Cabo Blanco y Caldera tras la propagación numérica. ....	78



## Tabla de Figuras

Figura 1.1. Puerto de Caldera en Costa Rica. ....	2
Figura 1.2. Playa Caldera, evidencia de entrada del mar a la Ruta 23. ....	5
Figura 1.3. Metodología por seguir en el trabajo de investigación. ....	13
Figura 2.1. Parámetros asociados a una onda. ....	14
Figura 2.2. Registro de oleaje de un estado de mar para Cabo Blanco, sin marea. ....	19
Figura 2.3. Descripción gráfica del oleaje como suma de ondas sinusoidales. ....	20
Figura 2.4. Espectros de energía teóricos para oleaje totalmente desarrollado. ....	22
Figura 2.5. Cambio de la forma del espectro dependiendo de la resolución del espectro. ....	23
Figura 2.6. Espectros de energía para un mismo registro de oleaje. ....	24
Figura 2.7. Aproximación de una integral mediante el área bajo los tres segmentos de línea recta. ....	26
Figura 3.1. Ubicación de Cabo Blanco y Puerto Caldera. ....	32
Figura 3.2. Ejemplo de propagación de oleaje en el Pacífico arribando a Costa Rica para agosto del 2016. ....	33
Figura 3.3. Equipo de medición de oleaje Aquadopp. ....	34
Figura 3.4. Equipo de medición de oleaje AWAC con su base de fijación. ....	35
Figura 3.5. Ubicación de los equipos de medición de oleaje, Aquadopp y Awac. ....	37
Figura 4.1. Espectro teórico JONSWAP modificado por Goda, con $\Delta f=0,001$ Hz. ....	39
Figura 4.2. Espectro teórico JONSWAP modificado por Goda, con $\Delta f=0,01$ Hz. ....	40
Figura 4.3. Variación de la energía máxima en espectros con $\Delta f=0,001$ Hz, conforme aumenta $T_p$ y $\gamma$ . ....	41
Figura 4.4. Variación de la energía máxima en espectros con $\Delta f=0,01$ Hz, conforme aumenta $T_p$ y $\gamma$ . ....	42
Figura 4.5. Variación del espectro teórico JONSWAP para un $T_p=18$ s, $H_s=3,5$ m y $\gamma$ de 1 a 10. ....	43
Figura 4.6. Variación del espectro teórico JONSWAP para un $T_p=18$ s, $\gamma=7$ y $H_s$ de 1 m a 3,5 m. ....	44
Figura 4.7. Variación de la altura significativa espectral ( $H_{m0}$ ) dependiendo del $\gamma$ . ....	45
Figura 4.8. Variación del espectro teórico JONSWAP para un $T_p=22$ s, $H_s=1$ m y $\gamma$ de 1 a 10. ....	46
Figura 4.9. Variación del espectro teórico JONSWAP para un $H_s=1$ m, $\gamma=7$ y $T_p$ de 15 s, ....	47
Figura 4.10. Variación de la altura significativa espectral ( $H_{m0}$ ) dependiendo del $\gamma$ , al variar $T_p$ . ....	48
Figura 4.11. Variación de la energía máxima del espectro teórico conforme aumenta $\gamma$ . ....	49

Figura 4.12. Espectro de energía frecuencial obtenido el 19 de Mayo de 2014 a las 21:00:00 horas en Puerto Caldera, obtenido a partir del software QuickWave.....	51
Figura 4.13. Espectro de energía frecuencial obtenido el 19 de Mayo de 2014 a las 21:00:00 horas en Puerto Caldera, a partir de los datos de presión.....	52
Figura 4.14. Comparación de espectros entre el dado por el QuickWave y el obtenido a partir de los datos de presión. ....	53
Figura 4.15. Comparación entre las distintas resoluciones para un mismo espectro.....	54
Figura 4.16. Parámetros de oleaje para las mediciones realizadas en Puerto Caldera y Cabo Blanco en el 2014. ....	55
Figura 4.17. Parámetros espectrales obtenidos de las mediciones de oleaje realizadas en Puerto Caldera y Cabo Blanco.....	56
Figura 4.18. Ejemplo de espectro de un pico, obtenido en Puerto Caldera el 19 de mayo del 2014 a las 21:00:00 horas. ....	58
Figura 4.19. Ejemplo de espectro de dos picos, obtenido en Cabo Blanco el 22 de julio del 2014 a las 21:00:00 horas. ....	59
Figura 4.20. Ejemplo de espectro de varios picos, obtenido en Cabo Blanco el 01 de febrero del 2014 a las 18:00:00 horas.....	60
Figura 4.21. Ajuste del espectro teórico JONSWAP al espectro obtenido el 19 de mayo del 2014 a las 21:00:00 horas en Puerto Caldera.....	61
Figura 4.22. Ajuste del espectro teórico JONSWAP al espectro obtenido el 23 de mayo del 2014 a las 00:00:00 horas en Cabo Blanco. ....	62
Figura 4.23. Hm0 obtenido de espectro JONSWAP ajustado contra Hm0 de espectro medido en campo para Puerto Caldera.....	64
Figura 4.24. Hm0 obtenido de espectro JONSWAP ajustado contra Hm0 de espectro medido en campo para Cabo Blanco. ....	65
Figura 4.25. Parámetros de los espectros utilizados para el ajuste de JONSWAP en Puerto Caldera para el año 2014.....	66
Figura 4.26. Parámetros de los espectros utilizados para el ajuste de JONSWAP en Cabo Blanco para el año 2014. ....	67
Figura 4.27. Hm0 contra $\gamma$ para los espectros ajustados por JONSWAP en Puerto Caldera. ...	68
Figura 4.28. Tp contra $\gamma$ para los espectros ajustados por JONSWAP en Puerto Caldera. ....	69
Figura 4.29. Hm0 contra $\gamma$ para los espectros ajustados por JONSWAP en Cabo Blanco.....	70
Figura 4.30. Tp contra $\gamma$ para los espectros ajustados por JONSWAP en Cabo Blanco.....	71
Figura 4.31. Histograma de $\gamma$ para el oleaje incidente en Puerto Caldera y Cabo Blanco. ....	72
Figura 4.32. Gráfico de probabilidad acumulada de $\gamma$ . ....	73
Figura 4.33. Ejemplo de ajuste JONSWAP con un $\gamma$ alto de 64. ....	74
Figura 4.34. Relación entre $\gamma$ y Qp para los espectros analizados. ....	75
Figura 5.1. Batimetría del Golfo de Nicoya utilizada en el modelo.....	76

Figura 5.2. Espectros obtenidos para Cabo Blanco y Caldera con marea de 0 m. ....	79
Figura 5.3. Espectros obtenidos para Cabo Blanco y Caldera con marea de 1,5 m. ....	80
Figura 5.4. Espectros obtenidos para Cabo Blanco y Caldera con marea de 3 m. ....	81
Figura 5.5. Altura de ola (m) y dirección del oleaje obtenido a partir de la propagación de oleaje para una marea de 0 m y un $\gamma=3,3$ . ....	82
Figura 5.6. Altura de ola (m) y dirección del oleaje obtenido a partir de la propagación de oleaje para una marea de 0 m y un $\gamma=3,3$ , detalle de Puerto Caldera. ....	83

López Arias, Luis Fernando

Estimación del factor pico del espectro frecuencial JONSWAP para la costa Pacífico, con base en mediciones de oleaje en Puerto Caldera y Cabo Blanco

Proyecto de Graduación-Ingeniería Civil-San José. C.R.:

L. López A., 2016

xi, 87, [16]h; ils. col.-21 refs.

## RESUMEN

Se busca estimar el factor pico ( $\gamma$ ) del espectro frecuencial JONSWAP (*The Joint North Sea Wave Project*) modificado por Goda con base en las mediciones de oleaje realizadas durante el año 2014 en Cabo Blanco y Puerto Caldera, en la costa Pacífico de Costa Rica. De esta manera se pretende caracterizar el oleaje incidente en estas zonas, específicamente con el  $\gamma$ , y aplicarlo en el diseño y operación de obras marítimas. Es importante estimar el  $\gamma$  correspondiente a las mediciones de oleaje realizadas, evaluar su relación con la altura significativa espectral ( $H_m0$ ) y el periodo pico ( $T_p$ ), así como su contribución a la forma espectral teórica JONSWAP y por ende la implicación de la variación de este parámetro en las simulaciones numéricas de propagación de oleaje para la obtención de variables necesarias para el desarrollo de obras marítimas costeras.

Las campañas de mediciones realizadas fueron en el año 2014 mediante dos equipos de medición como lo son Aquadopp (Puerto Caldera) y Awac (Cabo Blanco). Se obtuvieron un total de 2927 estados de mar medidos de los cuales 658 fueron los analizados debido a que correspondían a espectros de un pico, apropiados para el ajuste del espectro teórico.

Para ajustar JONSWAP a los espectros de los estados de mar medidos en campo se varió el factor pico y se obtuvo que más del 65% de estados de mar fueron representados por valores de  $\gamma$  entre 4 y 10 y el de mayor ocurrencia fue un  $\gamma$  igual a 7. Por otro lado, no se encontró relación del  $\gamma$  con parámetros como  $H_m0$  y  $T_p$ . Sí se encontró una relación con el parámetro de apuntamiento de Goda ( $Q_p$ ). L.F.L.A.

PALABRAS CLAVES: ESPECTRO JONSWAP; CARACTERIZACIÓN DE OLAJE; COSTA PACÍFICO DE COSTA RICA; INGENIERÍA MARÍTIMA

Ing. Alberto Serrano Pacheco, Ph. D.

Escuela de Ingeniería Civil

# Capítulo 1. Introducción

---

## 1.1. Justificación

### 1.1.1. Problema específico

Costa Rica es un país que consta de costas en el océano Pacífico y en el mar Caribe, por lo tanto, tiene un gran potencial de desarrollo costero y también es propenso a amenazas naturales producto de agentes ambientales como el oleaje. Debido a estas condiciones, la medición, análisis del oleaje y entender su complejo comportamiento es de gran importancia.

El oleaje puede afectar a pueblos costeros al inundar las playas y provocar cambios en la línea de costa producto de la erosión y sedimentación. Además, la infraestructura construida a orillas de la costa, la operación de puertos, marinas y atracaderos se ven directamente influidos por este agente marítimo ambiental.

El oleaje es considerado el principal parámetro en el diseño y construcción de estructuras marítimas como rompeolas y puertos, también para malecones usados para la protección de orillas, así como plataformas para la extracción de petróleo (Goda, 2000) , caso que no existe en Costa Rica. En la Figura 1.1 se aprecia una de las principales estructuras marítimas del país, el Puerto de Caldera, siendo un pilar en la economía costarricense.

Igualmente, el poder caracterizar el oleaje y simular su comportamiento en las costas mediante simulaciones de propagación de oleaje, permite que se asegure el buen diseño y funcionamiento de infraestructura y actividades que se desarrollen en estas zonas costeras.

El análisis del oleaje se puede abordar a partir del conocimiento de ciertos parámetros como lo son la dirección ( $\sigma$ ), el periodo pico ( $T_p$ ), la altura de ola significativa ( $H_s$ ) y el factor pico ( $\gamma$ ), esto en el caso del espectro frecuencial de JONSWAP (*The Joint North Sea Wave Project*). Dichos parámetros se obtienen a partir de procedimientos teóricos o mediciones obtenidas en el campo mediante equipo especializado.



Figura 1.1. Puerto de Caldera en Costa Rica.

La Unidad de Ingeniería Marítima, de Ríos y de Estuarios (IMARES) de la Universidad de Costa Rica (UCR) colocó equipos de medición en Puerto Caldera y Cabo Blanco a partir del 2014, ya que surge la necesidad de estudiar y caracterizar el oleaje medido en estas zonas, y así obtener los parámetros necesarios para el diseño de obras marítimas.

Este trabajo de investigación buscará obtener el factor pico,  $\gamma$ , a partir de los registros obtenidos en el año 2014 por los equipos de medición, ya que estos proporcionan el periodo pico y la altura de ola significativa, así como la dirección en algunos casos.

### 1.1.2. Importancia

Costa Rica cuenta con dos costas, en el océano Pacífico y mar Caribe, que han sido utilizadas para el desarrollo de actividades costeras como la pesca, turismo, actividades portuarias, entre otros. Además, dichas zonas son fuentes de vida, ya que presentan gran diversidad de flora y fauna.

Las ventas al exterior, tanto de bienes como de servicios han representado una amplia proporción de la producción costarricense, tal es el caso que en el 2005 esas exportaciones de bienes y servicios representaron un 48% del Producto Interno Bruto y en el 2014 un 36% (XXI Informe Estado de la Nación, 2014). Muchas de estas exportaciones se realizan por medio de embarcaciones en los principales puertos de nuestro país.

Al ser una parte fundamental en la economía del país, se busca que estos puertos siempre tengan un funcionamiento eficiente que permita la movilización de la mayor cantidad de contenedores por hora. Es aquí donde se encuentra el principal problema, ya que en Costa Rica se cuenta con infraestructura portuaria deficiente.

La calificación que dan los empresarios costarricenses a los puertos de Costa Rica es de 2,4, donde 1 es muy poco desarrollado y 7 es extensa y eficiente para los estándares internacionales, tal y como se observa en el Cuadro 1.1 (*The Global Competitiveness Report*, 2012). Por lo que se hace necesaria mayor inversión en los puertos costarricenses y, por ende, mayor inversión en infraestructura portuaria.

Adicionalmente, el fenómeno de agitación y sobre amplificación en los niveles de la superficie libre, debido a la interacción entre el oleaje y el periodo natural de oscilación de la configuración geométrica del puerto, es un factor importante en la buena operación de estos. El poder obtener el  $\gamma$  y conocer la forma espectral del oleaje que entra al recinto portuario, ayuda a analizar y dar criterios en cuanto a la forma y problemas que se podrían suscitar debido a este fenómeno.

Cuadro 1.1. Evaluación de empresarios a los puertos de su país

Así se ven nuestros puertos	
¿Cómo evalúan los empresarios los puertos de su país? En una escala del 1 al 7, dónde 1=muy poco desarrollado, 7= extensa y eficiente para los estudiantes internacionales, este fue el promedio obtenido por país:	
País	Calificación
Panamá	6,4
Honduras	4,6
Guatemala	4,0
El Salvador	3,9
Nicaragua	3,2
Costa Rica	2,4
Fuente: Banco Mundial. The Global Competitiveness Report 2012-2013	

Fuente: Montero, 2013. Modificado por López, 2016.

Por otro lado, el 4 de julio del 2014, alrededor de 70 vecinos de Caldera en la costa Pacífico de Costa Rica, se vieron afectados por inundaciones debido a un oleaje de gran magnitud, al igual como sucedió el 3 de julio del 2012 (Garita, 2014) En la Figura 1.2 se evidencia cómo el mar rebasó la acera al costado de la playa Caldera y llegó a la carretera de la Ruta 23, esto se aprecia debido a la cantidad de arena presente en la zona. Entre las soluciones a este tipo de problemas se encuentra el construir obras de protección que prevengan estas situaciones.



Por los problemas mencionados, es de vital importancia la creación de infraestructura en estas zonas marítimas así como el estudio del impacto que producen, tanto ambiental, social y económico. Aquí es donde el campo de la ingeniería marítima interviene con el estudio de las variables hidrodinámicas como el oleaje para luego utilizar esta información en el diseño de obras costeras y estudio del impacto ambiental de estas obras sobre la estabilidad de la playa, su morfología y variación a través del tiempo.



Figura 1.2. Playa Caldera, evidencia de entrada del mar a la Ruta 23.

A partir de las mediciones de oleaje realizadas, se obtienen parámetros como lo son la altura significativa, periodo pico y dirección. Con la ayuda de estos y con el fin de complementar la caracterización del oleaje, se obtienen otros parámetros como lo es el factor pico.

IMARES ha hecho mediciones del oleaje en las zonas de Puerto Caldera y Cabo Blanco, por lo que el trabajo que sigue es el análisis y estudio de dichos datos, siendo el presente trabajo de importancia para obtener el parámetro de factor pico que mejor describa el espectro frecuencial JONSWAP del oleaje medido, y así utilizar los resultados para poder simular de forma adecuada el oleaje incidente en la costa Pacífica, especialmente en las zonas donde se realizó la medición.

Por otro lado, el contar con un valor de  $\gamma$  confiable, permitirá evaluar las implicaciones directas de este factor en el costo, funcionalidad y seguridad de las infraestructuras marítimas como por ejemplo los rompeolas, regeneración de playas, mejoramiento de niveles de operación en los puertos, entre otros, debido a que el diseño de estas está en función de la altura significativa, periodo de las olas y el factor pico.

El ingeniero japonés Yoshimi Goda realizó un análisis de oleaje en Costa Rica donde, a partir de 49 registros de máximo 30 minutos cada uno, obtuvo un valor entre ocho y nueve del factor pico, a partir del espectro de apuntamiento de Goda ( $Q_p$ ), pero solo para olas de alturas considerables. A parte de ese análisis para oleaje agrupado con grandes recorridos realizado por Goda, en Costa Rica no se tiene investigación para la determinación de dicho factor pico del espectro que caracteriza a un estado de mar. Por lo que la investigación obtenida data del año 1983 sin recientes actualizaciones.

Por último, es importante determinar el valor del  $\gamma$ , o el rango en qué varía para la costa Pacífico de Costa Rica, compararlo con los valores obtenidos por Goda y con los valores que se utilizan en otros lugares como el Mar del Norte que es de 3,3. Además ver la importancia de su variación en simulaciones numéricas de propagación de oleaje, específicamente, en la zona de estudio.

### 1.1.3. Antecedentes

En 1978, en Costa Rica se realizaron mediciones de oleaje en Puerto Caldera, específicamente a una distancia de 1,7 km de la costa. Se instalaron equipos de medición de oleaje de tipo eco sonda invertida a una profundidad de 15,5 m por debajo del nivel de referencia.

En 1981, Goda analizó los datos dados por los equipos en mayo de ese año, ya que tuvo éxito en encontrar registros de olas de mar de fondo (*swells*) de alturas considerables. Las primeras mediciones fueron del 6 al 7 de mayo con una altura de 2,8 m y un periodo de 17,8 s, las segundas mediciones fueron del 19 al 20 de ese mismo mes con una altura de 2,7 y un periodo de 15,1 s y por último, fueron los días del 20 al 21 donde se tuvo una altura de 3,6 m y un periodo de 17,5 s (Goda, 1983).

Las mediciones realizadas del 6 al 7 de mayo fueron hechas 3 horas continuas, mientras que para el tercer caso que corresponde a los días entre el 20 y 21 de mayo, fueron 14 horas de medición continua. Para el primer caso se dividieron en mediciones de 30 minutos,

obteniéndose 6 estados de mar y para el tercer caso se obtuvieron 27. Además de estos, se agregaron a los datos de análisis 6 registros de datos regulares de 20 minutos de longitud para el primer caso, para el segundo caso 9 mediciones regulares de igual 20 minutos y para el tercero solo una medición regular de igual longitud. Para un total registrado de 49 estados de mar.

En su estudio, Goda se concentraba en el análisis de agrupamiento de oleaje y espectros de oleaje de mar de fondo de grandes recorridos con base en las mediciones hechas en Costa Rica. Por lo tanto, como parte de esta investigación, obtuvo que el  $\gamma$  para el espectro JONSWAP para dichas mediciones se encontraba entre los valores ocho y nueve, esto debido a la relación que existe entre el espectro de apuntamiento de Goda ( $Q_p$ ) y el  $\gamma$  dado por Su et al. (1982).

**Según Goda en “*Random Seas and Design of Maritime Structure*”,** el factor pico para el espectro JONSWAP tiene un rango entre tres y diez, dependiendo de la distancia recorrida de la ola de mar de fondo, esto para aplicaciones ingenieriles. Siendo un rango amplio en el que puede variar dicho parámetro.

En cuanto a **investigaciones realizadas fuera de Costa Rica, se tiene que en el artículo “*On the fitting of JONSWAP spectra to measured sea states*” Mansard y Funke (1988)** proponen técnicas para obtener la frecuencia pico, el factor pico y la altura de ola significativa. Especialmente se enfocan en una nueva metodología para obtener la frecuencia pico pero aplicado solamente a oleaje en aguas profundas. Además, en sus conclusiones proponen investigar más en mejorar la estimación del factor pico de JONSWAP y los efectos de la resolución espectral.

## 1.2. Objetivos

### 1.2.1. Objetivo General

Ajustar el factor pico del espectro teórico JONSWAP, modificado por Yoshimi Goda, con base en las mediciones de oleaje realizadas por IMARES en Puerto Caldera y Cabo Blanco en el año 2014.

### 1.2.2. Objetivos Específicos

- Determinar la resolución del espectro medido recomendable para el análisis y estimación del factor pico.
- Ajustar el parámetro  $\gamma$  para cada estado de mar hasta encontrar el que mejor ajuste al espectro teórico JONSWAP modificado por Goda a las mediciones realizadas.
- Definir valores recomendados para el parámetro de factor pico del espectro teórico de JONSWAP modificado por Goda.
- Realizar simulaciones numéricas de propagación de oleaje de aguas profundas a los puntos de ubicación de los equipos de medición, para distintos valores de  $\gamma$ , recomendados por la investigación y por la teoría.

### 1.3. Delimitación del problema

#### 1.3.1. Alcance

Se tienen registros de oleaje de dos zonas específicas en la costa Pacífica de Costa Rica, Puerto Caldera y Cabo Blanco. Los registros de Puerto Caldera van del 16 de mayo del 2014 a las 12:00:00 horas al 28 de agosto del 2014 a las 9:00:00 horas, por otro lado, los datos de Cabo Blanco van del 23 de enero del 2014 a las 15:00:00 horas al 29 de octubre del 2014 a las 6:00:00 horas. Estos son los datos que se analizaron para obtener el factor pico.

Los registros obtenidos de Puerto Caldera provienen de equipos de medición tipo ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*), denominados Aquadopp de la marca Nortek. Los datos medidos en Cabo Blanco provienen de un equipo de medición de tipo AST (*Acoustic Surface Tracking*), denominado AWAC, de la marca Nortek. Su colocación fue realizada por profesionales de IMARES en lugares donde se pudiera obtener información representativa de oleaje incidente en la costa Pacífico costarricense.

La frecuencia pico utilizada es la frecuencia asociada a la energía espectral máxima registrada y la altura significativa se obtiene a partir del espectro. Mediante estos parámetros obtenidos se ajustan los estados de mar de un pico con el espectro de JONSWAP, modificado por Goda, para así obtener resultados sobre los valores del factor pico que caractericen el oleaje incidente en las zonas de estudio y poder compararlos con la investigación realizada por Goda.

Para el ajuste solamente se varía el  $\gamma$ , es decir, este va a ser el parámetro por ajustar sin variar otros términos de la ecuación de JONSWAP, modificada por Goda, con excepción del  $T_p$  y  $H_s$ , que dependen de cada estado de mar.

La propagación de oleaje de aguas profundas a los puntos de interés que son las ubicaciones de los equipos de medición (Awac y Aquadopp) se realiza con el programa SWAN (*Simulating Waves Nearshore*). Se utiliza batimetría del Golfo de Nicoya proporcionada por IMARES, además se realiza el cálculo mediante diferencias divididas. Es una propagación numérica con fines de comparar resultados entre distintos valores de factor pico obtenidos por este trabajo de investigación.

### 1.3.2. Limitaciones

- Los instrumentos de medición siempre son una limitación debido a que estos pueden llegar a fallar y dar registros de oleaje no confiables, por lo que se debe revisar los datos generados.
- Los equipos de medición presentan incertidumbre.
- Para este trabajo se tiene periodos de mediciones de siete meses consecutivos (esto en Puerto Caldera) y de diez meses en Cabo Blanco, siendo mediciones puntuales.
- Solo se van a analizar los estados de mar que generen espectros de un solo pico, omitiéndose todos los demás.
- Los únicos parámetros que se variarán dentro de la ecuación teórica JONSWAP serán los de altura significativa, periodo pico y factor pico, el valor de  $\sigma$  no se variará debido a que se encuentra fuera del alcance de este documento.
- Los resultados obtenidos serán representativos de los sectores donde se realizó la medición, Puerto Caldera y Cabo Blanco, además, el oleaje a lo largo de la costa Pacífico es similar.
- La propagación del oleaje de aguas profundas a los puntos de interés tiene la limitación en cuánto al modelo de propagación utilizado para realizarlo, en este caso SWAN (sus respectivas limitaciones se encuentran en el marco teórico).

## 1.4. Metodología

Primero, se realizó una revisión bibliográfica del tema, específicamente sobre el análisis del oleaje en corto tiempo que permita tener un conocimiento adecuado para desarrollar el trabajo de investigación. **En esta revisión se le dio principal relevancia a los artículos "Analysis of Wave Grouping and Spectra of Long-travelled Swell" y "Statistical Variability of Sea Parameters as a Function of Wave Spectrum"** realizados por Goda, ya que estos describen el trabajo realizado en Puerto Caldera con los registros de oleaje.

Una vez realizada la revisión bibliográfica se procedió a realizar un análisis de sensibilidad de la función teórica JONSWAP modificada por Goda, para así entender cuál es el comportamiento de esta ecuación al variarle los parámetros  $T_p$ ,  $H_s$  y  $\gamma$ . Se realizaron varias pruebas, donde se analizaron los siguientes escenarios:

- Se varió  $H_s$  (1 m, 1,5 m, 2 m, 2,5 m, 3 m) y  $\gamma$  (1 a 10), se mantenía  $T_p=18$  s.
- Se varió  $T_p$  (15 s, 18 s, 20 s, 22 s) y  $\gamma$  (1 a 10), se mantenía  $H_s=1$  m.
- Se varió  $\gamma$  y  $H_s$  y  $T_p$  se mantuvieron constante.

Antes de procesar los datos de presión dados por lo equipos, se procedió a eliminar los datos erróneos medidos por estos. Se identificaron presiones que físicamente no eran posibles con el equipo midiendo a 15 m de profundidad y se eliminaron.

Seguidamente, se procesaron los datos de presión de los equipos que se utilizaron en la medición de oleaje, Aquadopp y Awac, para poder obtener los espectros frecuenciales. Para procesarlos se utilizó el programa Matlab 7.11.0, mediante rutinas de cálculo programadas.

El procesamiento de datos se realizó en los siguientes pasos:

- Se obtuvieron las energías para cada estado de mar a partir de los datos de presión.
- Se escogió el espectro con la resolución espectral adecuada para el ajuste de  $\gamma$  y así poder compararlo con los resultados obtenidos por Goda (1981).
- Se eliminaron las energías relacionadas con periodos menores a cinco segundos, ya que estos corresponden a oleaje local, y los periodos mayores a treinta segundos correspondientes a ondas infragravatorias.

Una vez procesados los datos, se eligieron, de manera visual, los estados de mar correspondientes a espectros un pico. Para así poder ajustar el espectro teórico de JONSWAP modificado por Goda.

Mediante rutinas de cálculo programadas de Matlab se procedió a estimar para cada espectro de energía frecuencial la altura significativa espectral ( $H_{m0}$ ) y el periodo pico ( $T_p$ ). También se calculó los parámetros espectrales y se caracterizaron los espectros del oleaje incidente en ambos lugares.

Para ajustar el espectro teórico se procedió a variar el  $\gamma$  de 1 a 100 para cada estado de mar y encontrar el mejor ajuste del factor pico mediante la obtención del mayor coeficiente de determinación ( $R^2$ ), considerando dos cifras significativas, y por ende que la raíz del error cuadrático medio (RMS) fuera mínima, así como el sesgo (BIAS).

Finalmente, obtenidos los distintos  $\gamma$  para cada estado de mar, se estimó un rango de valores que mejor ajustaron al espectro JONSWAP modificado por Goda con los datos medidos.

Para complementar los resultados obtenidos, se procedió a realizar simulaciones numéricas de propagación de oleaje, mediante el programa de cómputo *Simulating Waves Nearshore* (SWAN), con los valores de  $\gamma$  recomendados por la investigación realizada y otros valores vistos en referencias bibliográficas. Para comparar los resultados obtenidos en términos de alturas de ola.

Para la propagación numérica se contó con batimetría del Golfo de Nicoya aportada por IMARES. Hasta los 2 km a partir de la costa, aproximadamente, la malla es cada 40 m, un poco más hacia aguas profundas hasta los 10 km de la costa es de 80 m y finalmente en aguas profundas es de cada 100 m. La malla de cálculo utilizada fue de  $\Delta x=180$  m y  $\Delta y=180$  m, con una malla detalle en el Puerto Caldera con  $\Delta x=15$  m y  $\Delta y=15$  m.

El cálculo fue realizado mediante diferencias divididas y se contó con un sólo punto de entrada de oleaje en las coordenadas CRTM05 401837,93 Longitud Oeste y 1050535,67 Latitud Norte. Los datos que se introdujeron en dicho punto fueron:

- Hs de diseño=5 m
- $T_p= 15$  s

- Dirección de oleaje=  $202,5^{\circ}$
- Factor direccional= 32

Ahora bien, se realizaron 15 casos de propagación en modo estacionario. Se varió el nivel de marea (0 m, 1,5 m, 3m) y los valores de factor pico (3,3, 5, 7, 10, 15) y se realizaron todas las combinaciones posibles con dichas variables. De esta manera, se obtuvo resultados de altura significativa en los puntos de interés (las ubicaciones del Awac y Aquadopp) y se comparó los resultados obtenidos.

En la Figura 1.3 se puede observar el esquema que se seguirá como metodología, es una metodología lineal donde no se pueden realizar dos tareas a la vez.



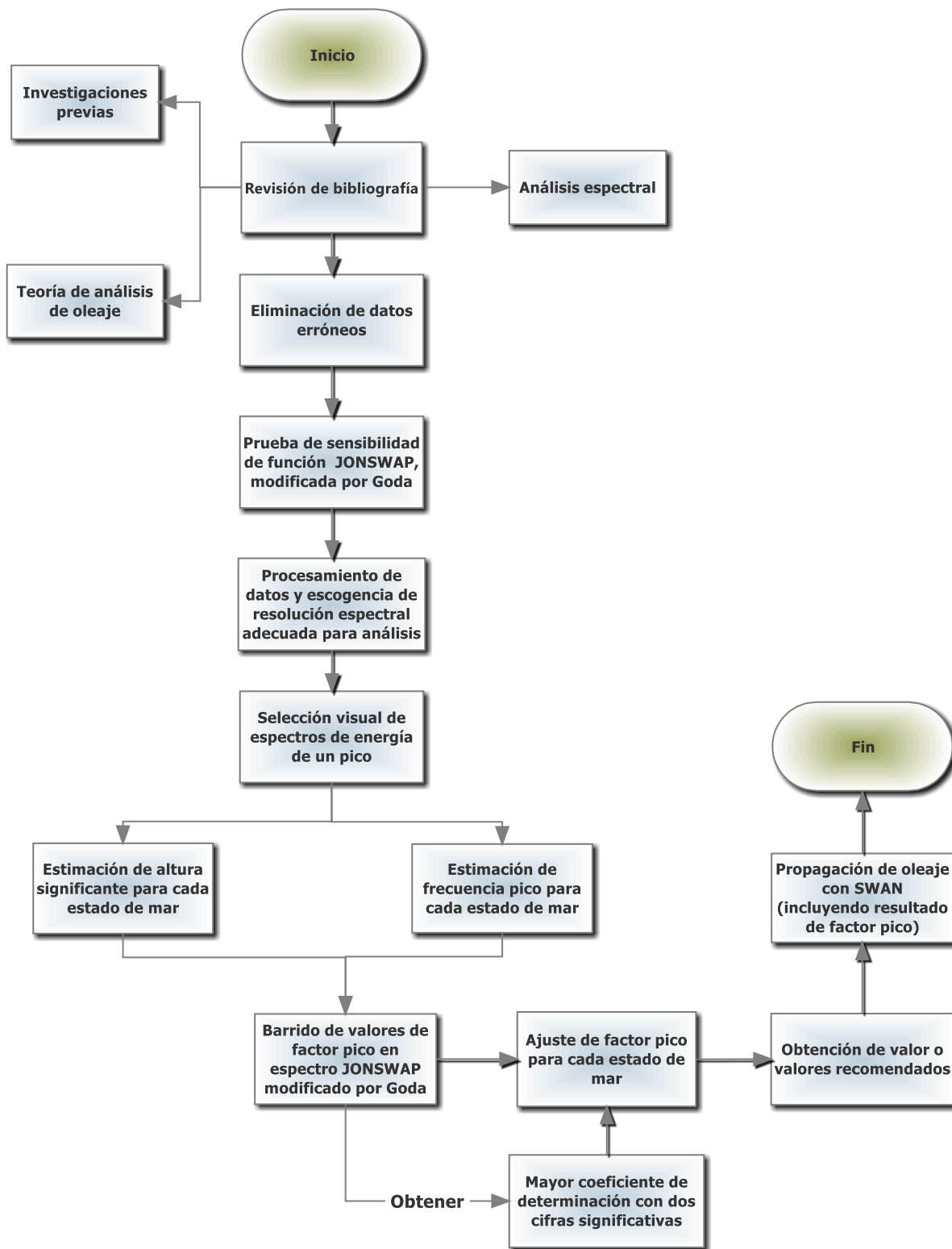


Figura 1.3. Metodología por seguir en el trabajo de investigación.

## Capítulo 2. Marco teórico

### 2.1. Introducción a la teoría de ondas

“Las ondas son oscilaciones uniformes y periódicas de la superficie del agua” (Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas, 2000). Existen dos tipos de ondas, las ondas progresivas que son las que se propagan a profundidad constante, manteniendo su forma, y las estacionarias que no se propagan. Existen ciertos parámetros que definen una onda de mar y estos se pueden observar en la Figura 2.1.

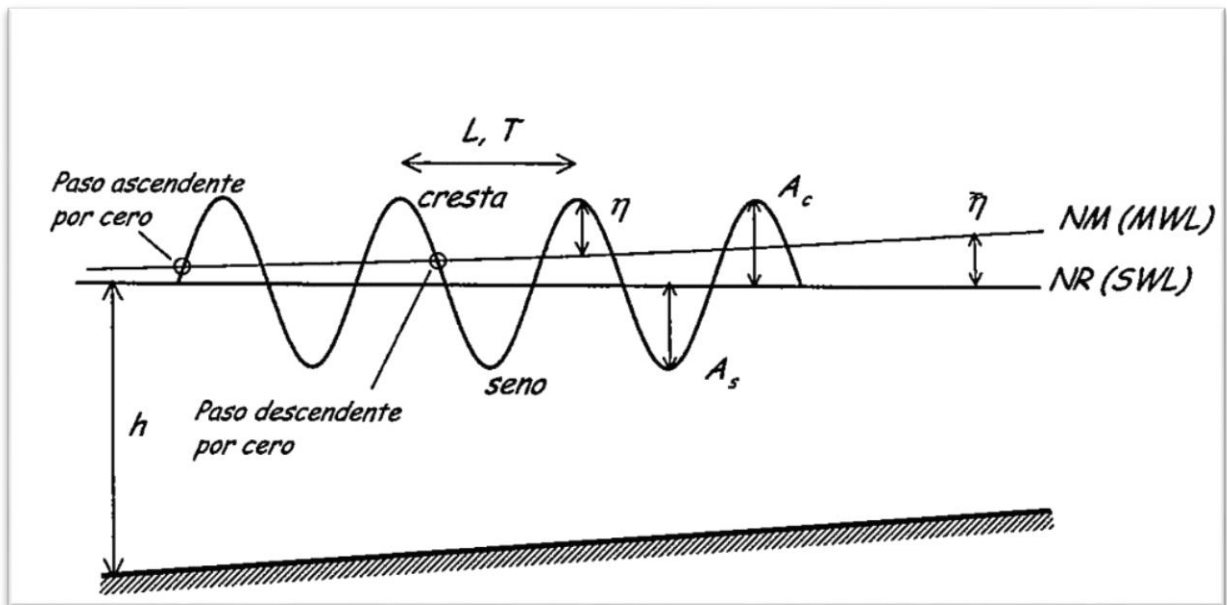


Figura 2.1. Parámetros asociados a una onda.

Fuente: Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas, 2000.

Donde:

- NM (MWL) [m]: nivel medio del fluido.
- NR (SWL) [m]: nivel de referencia
- T [s]: periodo de onda
- L [m]: longitud de onda
- $\eta$  [m]: desplazamiento de la superficie libre

- $A_s$ [m]: amplitud del seno
- $A_c$ [m]: amplitud de la cresta
- $H$  [m]: altura de la onda ( $A_s + A_c$ )
- $H$  [m]: profundidad o calado

También a partir de estos parámetros se pueden obtener otros que ayudan a caracterizar a las olas:

- $k$ : número de onda

$$k = \frac{2\pi}{L} [1/m] \quad (1)$$

- $\omega$ : frecuencia angular

$$\omega = \frac{2\pi}{T} [1/s] \quad (2)$$

- $C$ : celeridad

$$C = \frac{L}{T} [m/s] \quad (3)$$

- $f$ : frecuencia

$$f = \frac{1}{T} [Hz] \quad (4)$$

Además de estos señalados, también existen otros que son adimensionales:

- $\varepsilon$ : peralte de onda

$$\varepsilon = \frac{H}{L} = kH \quad (5)$$

- $\delta$ : altura relativa de la onda

$$\delta = \frac{H}{h} \quad (6)$$

- $\mu$ : profundidad relativa

$$\mu = \frac{h}{L} \quad (7)$$

Para efectos prácticos, se clasificarán las ondas en dos regímenes (Cuadro 2.1) para su estudio matemático: el régimen de Stokes (teoría lineal de ondas) o régimen de onda larga. Se trabajará dentro del régimen de Stokes, específicamente en la teoría de lineal de ondas aunque no se profundizará en dicha teoría.

Cuadro 2.1. Clasificación de teorías según la profundidad relativa.

Régimen	$kH$ o $h/L$
Stokes	$\geq 1$
Onda larga	$< < 1$

Fuente: Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas, 2000.

**Además, desde el punto de vista matemático, "el oleaje se puede describir como un proceso estocástico, que se ajusta a una distribución gaussiana de media nula, y estacionaria, en el que las condiciones estadísticas no varían significativamente durante un cierto periodo de tiempo"** (Muñoyerro, 2005)

## 2.2. Descripción básica de oleaje

En la interfase agua-atmósfera existen ondas que ponen de manifiesto la propagación de energía mecánica a lo largo de la superficie oceánica. Este conjunto de ondas se pueden distinguir según su periodo y longitud, según su fuerza generadora y las fuerzas que las controlan. En el Cuadro 2.2 se muestra los tipos de ondas y las características que las gobiernan.

Para problemas de ingeniería en las costas los tipos de ondas de importancia son las ondas gravitatorias que son generadas por el viento y rondan los periodos entre 1 s y 30 s. Estas olas empiezan a generarse cuando el viento transfiere energía al océano y se transforma en movimiento.

Los trenes de olas generados al inicio son relativamente caóticos, con direcciones de propagación variables y con alturas y periodos con poca correlación entre ellos, este tipo de oleaje es llamado mar de viento o *sea*. Conforme avanza estos trenes de ondas tienden a ser más estables debido a fenómenos de dispersión radial y angular, además, pierden su aspecto caótico, esto forma un oleaje disperso y más regular, por lo que recibe el nombre de mar de

fondo, mar tendida, mar de leva o *swell*. Generalmente en un estado de mar se puede encontrar ambos tipos de oleaje.

Cuadro 2.2. Tipos de ondas con sus mecanismos generadores, periodo y longitud, así como las fuerzas que las controlan.

Movimiento	Periodo y/o longitud	Fuerzas generadoras	Fuerzas de control	Ejemplos
Corrientes oceánicas	1000 km	Gradientes de densidad; viento	Fricción, coriolis, gravedad	Corriente del golfo
Corrientes costeras	10 km	Viento, corrientes oceánicas, mareas astronómicas	Fricción, coriolis, gravedad	Afloramientos
Corrientes de rotura	100 m	Ondas gravitatorias	Fricción, gravedad	Corrientes rítmicas de playa
Corrientes de marea en estuarios	1 km	Marea astronómica	Fricción, gravedad	Bahías y estuarios
Ondas capilares	0,1s/ 1cm	Viento	Tensión superficial, gravedad	Rizado de una charca por el viento
Ondas ultragravitatorias	0,1 a 1 s/1 cm a 1 m	Viento	Gravedad	Ondas de viento en una charca
Ondas gravitatorias	1 a 30s /1 a 1000 m	Viento y oleaje de viento	Gravedad y fricción	<i>Sea y swell</i>
Ondas infragravitatorias	30s a 5min / 1 a 100 km	Oleaje	Fricción, Coriolis, gravedad	Oscilaciones de largo periodo en playas.
Ondas largas	5 min a 1 día/10 <sup>2</sup> -10 <sup>5</sup> km	Viento, presión atmosférica, terremotos.	Fricción, Coriolis, gravedad	Maremotos
Ondas de mareas astronómicas	12 a 24h/10 <sup>5</sup> km	Rotación Tierra/atracción Luna, Sol	Fricción, Coriolis, gravedad	Marea astronómica
Ondas transmareales	24h/10 <sup>7</sup> m	Órbita solar/gravit.	Fricción, Coriolis, gravedad	marea meteorológica
Ondas internas	4min a 24h/1 a 100 km	Borrascas, ondas de gravedad	Fricción, Coriolis, gravedad	Ondas de densidad en la pycnoclina

Fuente: Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas (GIOC) de la Universidad de Cantabria, 2000.

En Costa Rica, específicamente en la costa del Pacífico, en su mayoría se da oleaje tipo *swell*. Este tipo de oleaje es generado en el Océano Pacífico Sur, en las cercanías de Nueva Zelanda y recorre aproximadamente 9000 km hasta llegar a la costa costarricense (Goda, 1983).

## 2.3. Análisis de oleaje

El análisis del oleaje se realiza mediante el estudio de una serie de parámetros que ayudan a describir lo que se llama estado de mar, que es influenciado por la zona donde se realizan las mediciones y el periodo de tiempo en que se realice pero que debido a las características estadísticas del campo de oleaje no varían de forma apreciable.

**“Dentro de cada estado de mar, las propiedades estadísticas del oleaje vienen definidas por los momentos estadísticos obtenidos del proceso estacionario y ergódico en lo que se denomina *análisis de oleaje a corto plazo*”** (Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas, 2000). Estos parámetros estadísticos varían en el tiempo y forman la curva de estados de mar, por lo que el análisis que se realiza con esta curva se denomina análisis de oleaje a largo plazo o regímenes de oleaje. El análisis realizado en este trabajo se enfoca en el análisis de oleaje a corto plazo.

Se utilizan dos enfoques para realizar el análisis del oleaje: análisis estadístico (dominio del tiempo) y análisis espectral (en el dominio de las frecuencias). Ambos buscan caracterizar los estados de mar y obtener parámetros escalares como alturas de olas, periodos, entre otros.

El análisis estadístico utiliza distintos métodos para obtener las olas individuales a partir de un registro, entre ellos están el método de paso ascendente por ceros y el análisis de crestas. Entre los parámetros más comunes que se obtienen son: altura máxima, altura media, altura significativa, periodo medio, periodo máximo, periodo significativo. En la Figura 2.2 se presenta un ejemplo de registro de oleaje.

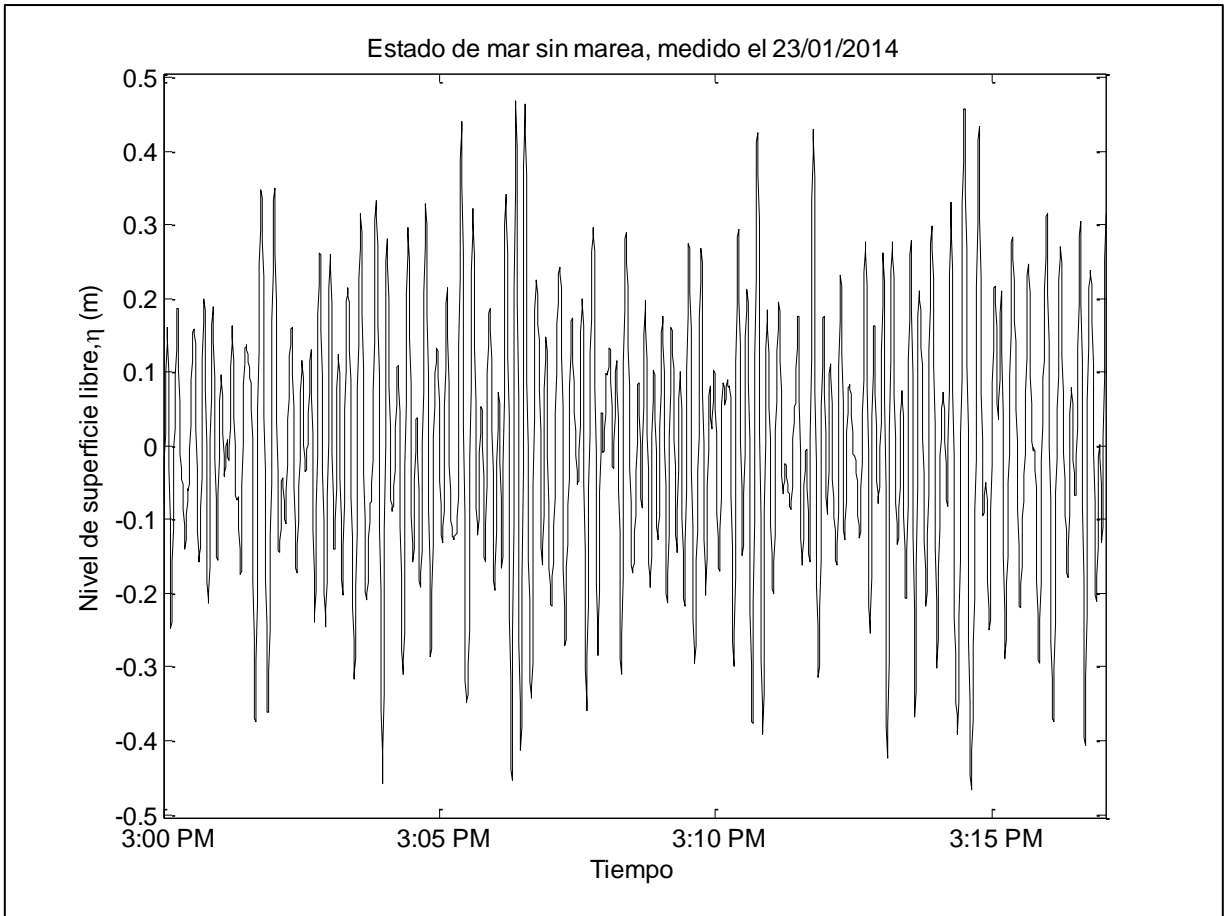


Figura 2.2. Registro de oleaje de un estado de mar para Cabo Blanco, sin marea.

Este trabajo se enfoca en el análisis espectral de los estados de mar. Viendo el oleaje como una suma de ondas sinusoidales con distintas direcciones, tal y como lo muestra la Figura 2.3.

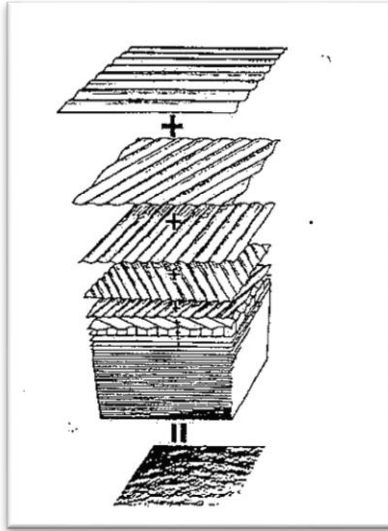


Figura 2.3. Descripción gráfica del oleaje como suma de ondas sinusoidales.

Fuente: Muñoyerro, 2005.

La distribución de la energía con respecto a la frecuencia es llamada el espectro frecuencial, y la energía distribuida según la frecuencia y la dirección recibe el nombre de espectro direccional de oleaje. Se utilizará espectros bidimensionales de frecuencia y energía en la investigación.

De acuerdo a Kamphius en su libro "*Introduction to Coastal Engineering and Management*" para expresar la señal de superficie libre  $\eta$  en términos de componentes discretos de frecuencias, conocido como la Transformada Discreta de Fourier (TDF), se tiene la siguiente ecuación:

$$\eta_j = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n e^{i[2\pi(f_n t_j)]} \quad (8)$$

Donde  $C_n$  es un coeficiente complejo. Como los registros de oleaje no son infinitamente largos ni continuos entonces la ecuación (8) resultaría en:

$$\eta_j = \sum_{n=0}^{N-1} F_n e^{i[2\pi(f_n t_j)]} \quad (9)$$



Seguidamente, la variable compleja  $F_n$  puede expresarse como:

$$F_n = |F_n|e^{-i\theta_n} \quad (10)$$

Donde,

$$|F_n| = \frac{1}{2}\sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad \text{y} \quad \theta_n = \tan^{-1}\left(-\frac{b_n}{a_n}\right)$$

Por lo tanto usando la relación de Euler, sabiendo que solo se tienen frecuencias positivas y que  $\eta_j$  es real, se combinan las ecuaciones (9) y (10) y se pueden reescribir como:

$$\eta_j = \sum_{n=0}^{N/2} |A_n| \cos(2\pi ft - \theta_n) \quad (11)$$

$$|A_n| = 2|F_n|$$

Donde  $|A_n|$  es la amplitud del espectro y  $\theta_n$  la fase. En el análisis estándar del espectro de oleaje solo la amplitud es calculada. Utilizando el teorema de Parseval se puede calcular la varianza a partir de la amplitud del espectro porque:

$$\sigma^2 = \sum_{n=0}^{N/2} \frac{1}{2} |A_n|^2 \quad (12)$$

Por lo tanto la varianza en cualquier frecuencia se expresa como:

$$S(f_n) = \frac{1}{2df} |A_n|^2 \quad (13)$$

Siendo  $S(f_n)$  la función de densidad espectral o el espectro de energía del oleaje. En la Figura 2.4 se observa tres tipos de espectros teóricos utilizados para la caracterización del oleaje.

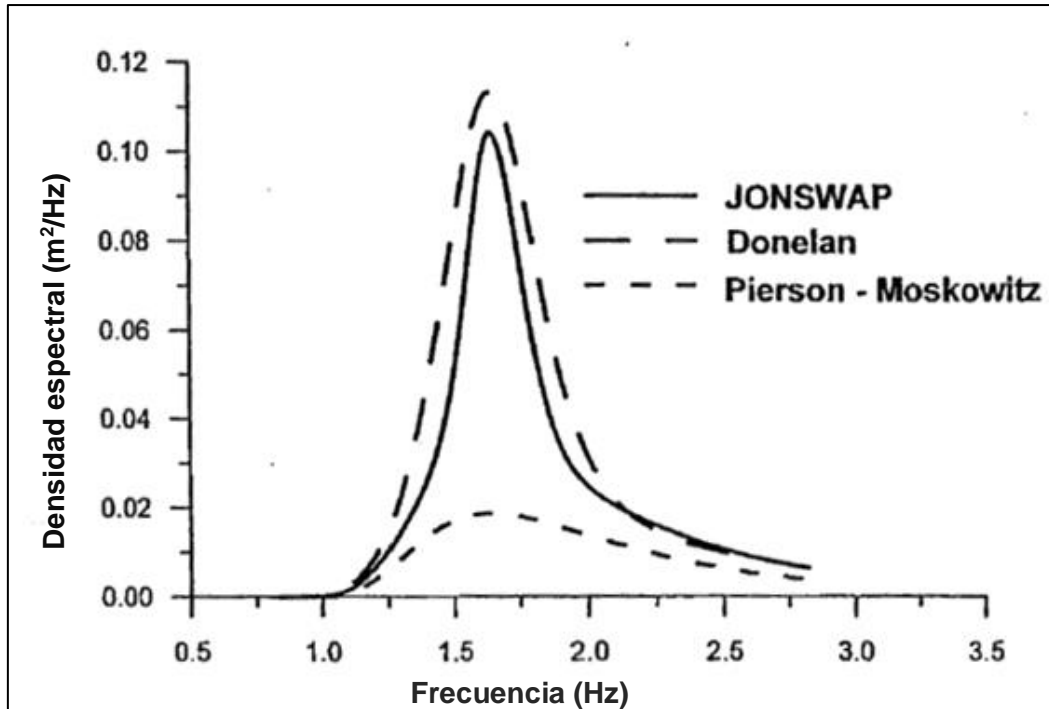


Figura 2.4. Espectros de energía teóricos para oleaje totalmente desarrollado.

Fuente: G.I.O.C., 2000. Modificado por López, 2016.

Para poder analizar espectros, es necesario suavizarlos de manera que los parámetros obtenidos a partir de estos sean confiables. La resolución espectral debe ser acorde a lo que se quiere analizar.

Goda (1983) al tener registros de oleaje de horas continuas indica que existen problemas al determinar la longitud del registro por analizar y la resolución espectral, ya que cómo se muestra en la Figura 2.5 la forma del espectro cambia con la resolución espectral utilizada. Se observa cómo el parámetro espectral  $Q_p$  (posteriormente se definirá) incrementa de 2,7 a 8,4, conforme los grados efectivos de libertad ( $N_{df}$ ) disminuyen de 84 a 4,6, o mejor dicho, disminuye de una resolución espectral de 0,0156 Hz a 0,00098 Hz. Goda estableció para su análisis una resolución espectral de 0,0039 Hz tomando en consideración recomendaciones dadas por Rye (1982) y resultados tomados en análisis realizados por él.

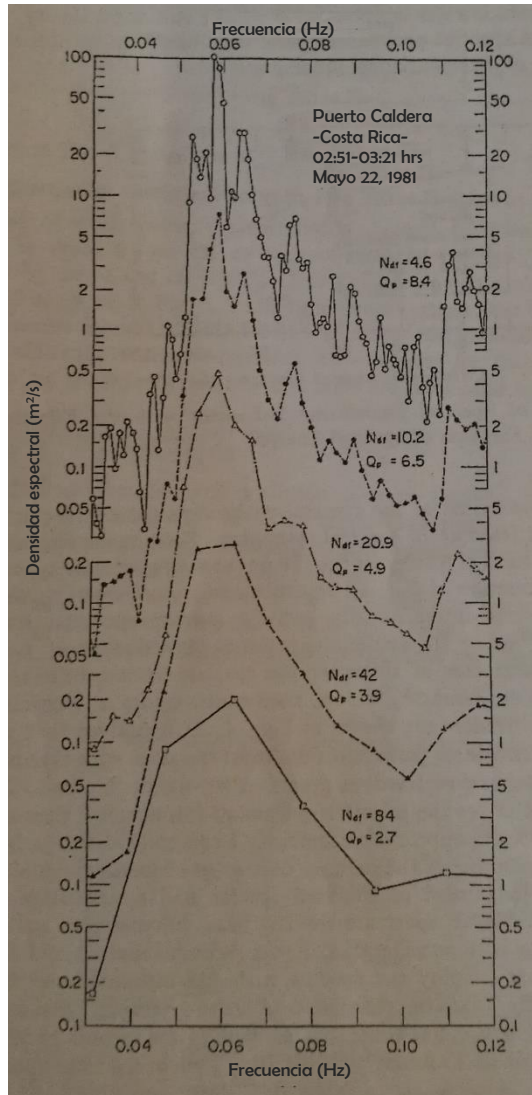


Figura 2.5. Cambio de la forma del espectro dependiendo de la resolución del espectro.

Fuente: Goda, 1983. Modificado por López, 2016.

Por otro lado Kamphius (2000), muestra que en la Figura 2.6.a se tiene una resolución  $\Delta f = 0.00083$  Hz y contiene muchos picos de concentraciones locales de energía, los cuales no son posibles físicamente, por ende se realiza un suavizado del espectro promediando la energía a través de intervalos de frecuencias como lo demuestra la ecuación 14.

$$S(f) = \frac{1}{df'} \sum_{m=-M/2}^{m=M/2} |A_{n+m}|^2 \quad \text{donde } df' = M_f \Delta f \quad (14)$$

Siendo  $df'$  la resolución del espectro y  $M_f$  la cantidad de valores  $\Delta f$  que son promediados. En la Figura 2.6.b y Figura 2.6.c se puede apreciar el suavizado realizado al espectro de la Figura 2.6.a para  $M_f$  de 6 y 12 y una resolución de 0.005 Hz y 0.01 Hz, respectivamente. Dependiendo del uso al que se le quiera dar al espectro se puede utilizar la Figura 2.6.b o Figura 2.6.c. Kamphius (2000) sugiere que se requiere una impresión del oleaje en el campo se utilice el espectro c), pero si se ocupa identificar frecuencias específicas un espectro como el b) puede ser el más apropiado. En cambio, el espectro d) proviene de otro tipo de suavizado que consiste en dividir el registro de oleaje en intervalos y promediar sus respectivos espectros.

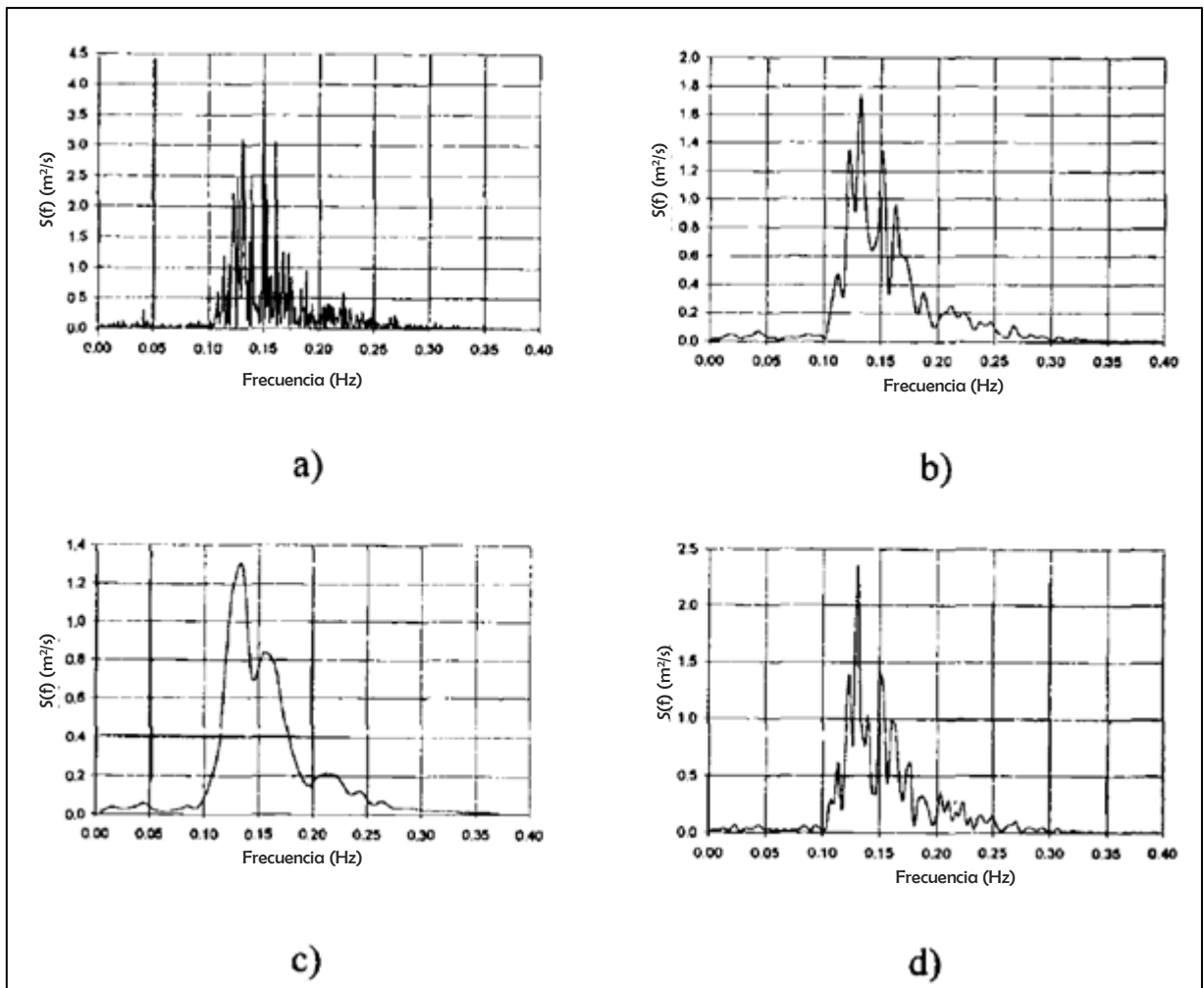


Figura 2.6. Espectros de energía para un mismo registro de oleaje.

Fuente: Kamphius, 2000. Modificado por López, 2016.

Existen otros métodos para analizar y obtener los espectros frecuenciales de energía para las mediciones de oleaje realizadas, así como formas de realizar un suavizado de estos. En esta investigación la ecuación (14) fue la utilizada para obtener el suavizado requerido.

## 2.4. Parámetros espectrales

A partir del espectro frecuencial de energía se pueden obtener los momentos espectrales que a su vez ayudan a estimar parámetros espectrales que caracterizan el oleaje. Los momentos de orden  $k$ ,  $m_k$ , vienen dados por la expresión:

$$m_k = \int f^k S(f)df \quad (15)$$

Para el cálculo de los momentos se utilizan métodos la como integración numérica, ya que estos momentos corresponden al área bajo la curva del espectro de energía frecuencial. El método del trapecio (Figura 2.7) es una de las fórmulas cerradas de integración de Newton-Cotes y viene dada por la ecuación (16):

$$I = \text{Área bajo la curva} = (b - a) \frac{f(a) + f(b)}{2} \quad (16)$$

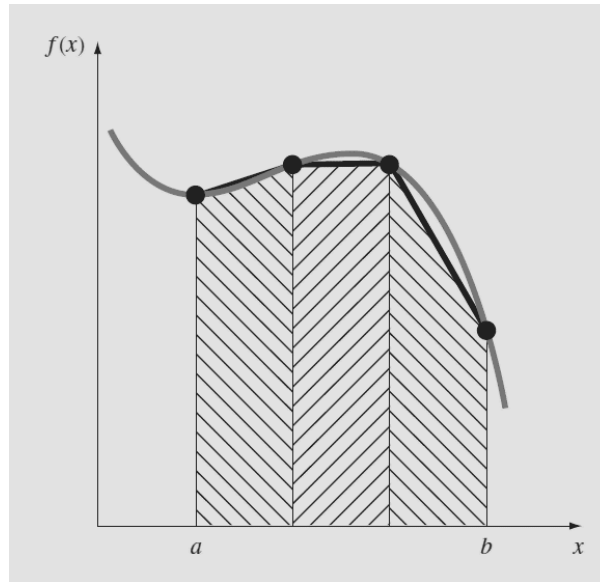


Figura 2.7. Aproximación de una integral mediante el área bajo los tres segmentos de línea recta.

Fuente: Chapra & Canale, 2011.

Entre los parámetros espectrales se encuentran:

- Anchura espectral de Longuet Higgins ( $\nu$ ), 1957: es una medida de anchura espectral, cuando la energía está dispersa en muchas frecuencias  $\nu$  se incrementa, y se aproxima al valor de uno, cuando está concentrada en una sola frecuencia tiende a cero.

$$\nu^2 = \frac{m_0 m_2}{m_1^2} - 1 \quad (17)$$

- Anchura espectral de Cartwright y Longuet-Higgins ( $\epsilon$ ), 1956: es una medida de anchura espectral, cuando los espectros tienden a ser de banda estrecha,  $\epsilon$  tiende a cero.

$$\epsilon^2 = \frac{m_0 m_4 - m_2^2}{m_0 m_4} \quad (18)$$

- Apuntamiento espectral de Goda ( $Q_p$ ): Aumenta cuanto más estrecho es el espectro, si la anchura espectral aumenta, el apuntamiento espectral de Goda disminuye.

$$Q_p = \frac{2}{m_0^2} \int_0^{\infty} f S^2(f) df \quad (19)$$

Del mismo modo existen otros parámetros que caracterizan el oleaje y son importantes entender para este trabajo de investigación:

- Altura significativa espectral ( $H_{m0}$ ): se refiere a la raíz del área bajo la curva del espectro multiplicada por 4, y es el parámetro más extendido a la hora de describir un estado de mar, viene dado por:

$$H_{m0} = 4,004\sqrt{m_0} \quad (20)$$

- Altura significativa ( $H_s$ ): se refiere a la media aritmética del tercio de olas de mayor altura del registro, y es el parámetro más utilizado a la hora de describir un estado de mar. Este parámetro es aproximado al valor de  $H_{m0}$  y tienden a considerarse como parámetros similares.
- Periodo significativo ( $T_{1/3}$ ): media de los periodos del tercio de olas más altas.
- Frecuencia pico ( $f_p$ ): este parámetro tiene diversas formas de estimarse ya que debido a la variabilidad espectral, es muy poco estable. Se consideran, según Mansard and Funke (1988), cinco algoritmos para la estimación de dicho parámetro. El método más sencillo para el cálculo es considerar la frecuencia pico relacionada con la mayor energía espectral, aunque esta forma presenta mucho sesgo a través del tiempo.
- Periodo pico ( $T_p$ ):

$$T_p = \frac{1}{f_p} \quad (21)$$

También existen mediciones a partir de las cuáles se puede obtener las inclinaciones o desplazamientos respecto al eje Norte y al eje Sur, mediante una boya direccional y por ende la densidad espectral direccional, que al igual que el espectro de energía, permite el cálculo de parámetros como: la dirección media del oleaje, dirección del oleaje en el pico espectral, dispersión angular en el pico espectral, entre otros.

## 2.5. Funciones teóricas de densidades espectrales

Tanto el espectro de energía frecuencial como el direccional se pueden ajustar a funciones teóricas desarrolladas para caracterizar distintos estados de mar. Entre las principales funciones se tienen: espectro de Pierson-Moskovitz, espectro JONSWAP, espectro TMA y espectro Wallops. Para este trabajo de investigación se utilizó el espectro de JONSWAP modificado por Goda que viene dado por:

$$S(f) = \beta_j H_s^2 T_p^{-4} f^{-5} \exp \left[ -1,25 (T_p f)^{-4} \right] \gamma \exp \left[ -(T_p f - 1)^2 / 2\sigma^2 \right] \quad (22)$$

Donde:

$$\beta_j = \frac{0,0624}{0,230 + 0,0336\gamma - 0,185(1,9 + \gamma)^{-1}} [1,094 - 0,01915 \ln \gamma] \quad (23)$$

$$\sigma = \begin{cases} \sigma_a: f < f_p \\ \sigma_b: f \geq f_p \end{cases}$$

$$\gamma = 3 \sim 10, \quad \sigma_a \cong 0,07, \quad \sigma_b \cong 0,09$$

Por lo que  $\gamma$  será el valor por calibrar con el oleaje medido en Puerto Caldera y Cabo Blanco.

Cabe destacar que estas funciones teóricas fueron calibradas para espectros de un solo pico tal y como se observa en la Figura 2.4.

## 2.6. Parámetros de bondad de ajuste de modelos

Al realizar el ajuste del modelo teórico a los datos medidos, se tomaron en cuenta los siguientes parámetros estadísticos para determinar el mejor ajuste:

- Error cuadrático medio (ECM): es un parámetro que indica la bondad del ajuste dado por un estimador, mediante el promedio del error (diferencia entre lo que se estima y estimador) al cuadrado. También ECM es la suma de la varianza del estimador y el cuadrado del sesgo del estimador.



$$ECM = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{Y}_i - Y_i)^2 \quad (24)$$

- Raíz del error cuadrático medio (RMSE por sus siglas en inglés): este parámetro es la raíz del ECM y tiene las unidades del estimador.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{Y}_i - Y_i)^2} \quad (25)$$

- Coeficiente de determinación ( $R^2$ ): este coeficiente mide la bondad de ajuste del modelo utilizado basado en la varianza de los residuos ( $\sigma_r^2$ ) y por la varianza de la variable dependiente ( $\sigma^2$ ), "es una medida de la proporción de la variabilidad explicada por el modelo ajustado" (Walpole, Myers, Myers, & Ye, 2012).

$$R^2 = 1 - \frac{\sigma_r^2}{\sigma^2} \quad (26)$$

- BIAS: este parámetro mide la diferencia entre el parámetro estimado y el estimador, entre menor sea el valor BIAS, menor es el valor residual y por lo tanto existe un mejor ajuste.

$$BIAS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - O_i) \quad (27)$$

## 2.7. Modelo de propagación de oleaje espectral, Simulating Waves Nearshore (SWAN)

"SWAN (Simulating Waves Nearshore) es un modelo de propagación de oleaje espectral que simula la energía contenida en las ondas en su propagación desde superficies oceánicas hasta

**zonas costeras”** (López, 2014). Es un modelo de tercera generación creado para obtener parámetros de oleaje en áreas costeras, lagos y estuarios. Fue desarrollado por la Universidad de Delft, Holanda, y su principal objetivo es resolver la ecuación espectral de balance de energía, ecuación (29). Esta ecuación representa los efectos de propagación espacial, refracción, generación, asomeramiento, disipación y la interacción no lineal entre ondas (The SWAN team, 2015).

De acuerdo a Homoródi (2012), el modelo SWAN usa el espectro de densidad de acción en vez del espectro de densidad de energía. Esto se debe a que al describir el estado de agua, el primero, se conserva con la presencia de corrientes, en cambio el espectro de densidad de energía no. La relación que existe entre ambos es dada por la ecuación (28):

$$N(f, \theta) = E(f, \theta)/f \quad (28)$$

Con  $f$  como la frecuencia relativa y  $\theta$  la dirección del oleaje.

Por lo tanto, la propagación del espectro del oleaje a través del tiempo y del espacio es descrito, en el SWAN, mediante la ecuación espectral de balance de energía, tal y como lo muestra la ecuación (29).

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial c_x N}{\partial x} + \frac{\partial c_y N}{\partial y} + \frac{\partial c_f N}{\partial f} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S}{f} \quad (29)$$

Donde el primer término de la izquierda se refiere al cambio del espectro de densidad de acción a través del tiempo, el segundo y tercer término a la variación a través del espacio geográfico de la densidad de acción y el cuarto y quinto término a la propagación del espectro a través del espacio debido a la profundidad, corrientes y propagación debido a dirección.

Según el documento técnico de SWAN los procesos de propagación de oleaje representados son:

- Propagación a través del espacio geográfico.
- Refracción debido a las variaciones batimétricas y de corrientes.
- Difracción.

- Asomeramiento debido a variaciones en la batimetría y en las corrientes.
- Bloqueo y reflexiones por corrientes opuestas.
- Transmisión de la reflexión debido al bloqueo por obstáculos

Además, los procesos de generación y disipación representados son:

- Generación por viento.
- Disipación por decrestamiento o "whitecapping".
- Disipación por rotura.
- Disipación por fricción.
- Interacción de onda a onda en aguas profundas y no profundas.

Según Alfaro (2009) entre las limitaciones que tiene el modelo están:

- No produce corrientes generadas por el oleaje en la zona de rotura.
- Para casos donde exista difracción debido a obstáculos no es adecuado su uso debido a que resuelve parcialmente y para casos particulares.

## Capítulo 3. Información básica

### 3.1. Descripción del lugar

Los sitios de análisis como se ha mencionado anteriormente corresponden a Puerto Caldera y Cabo Blanco, localizados en la costa Pacífico de Costa Rica. Como se muestra en la Figura 3.1, Puerto Caldera se ubica en la costa este del Golfo de Nicoya y Cabo Blanco en el sur de la Península de Nicoya. La ubicación exacta de los equipos se dará posteriormente.

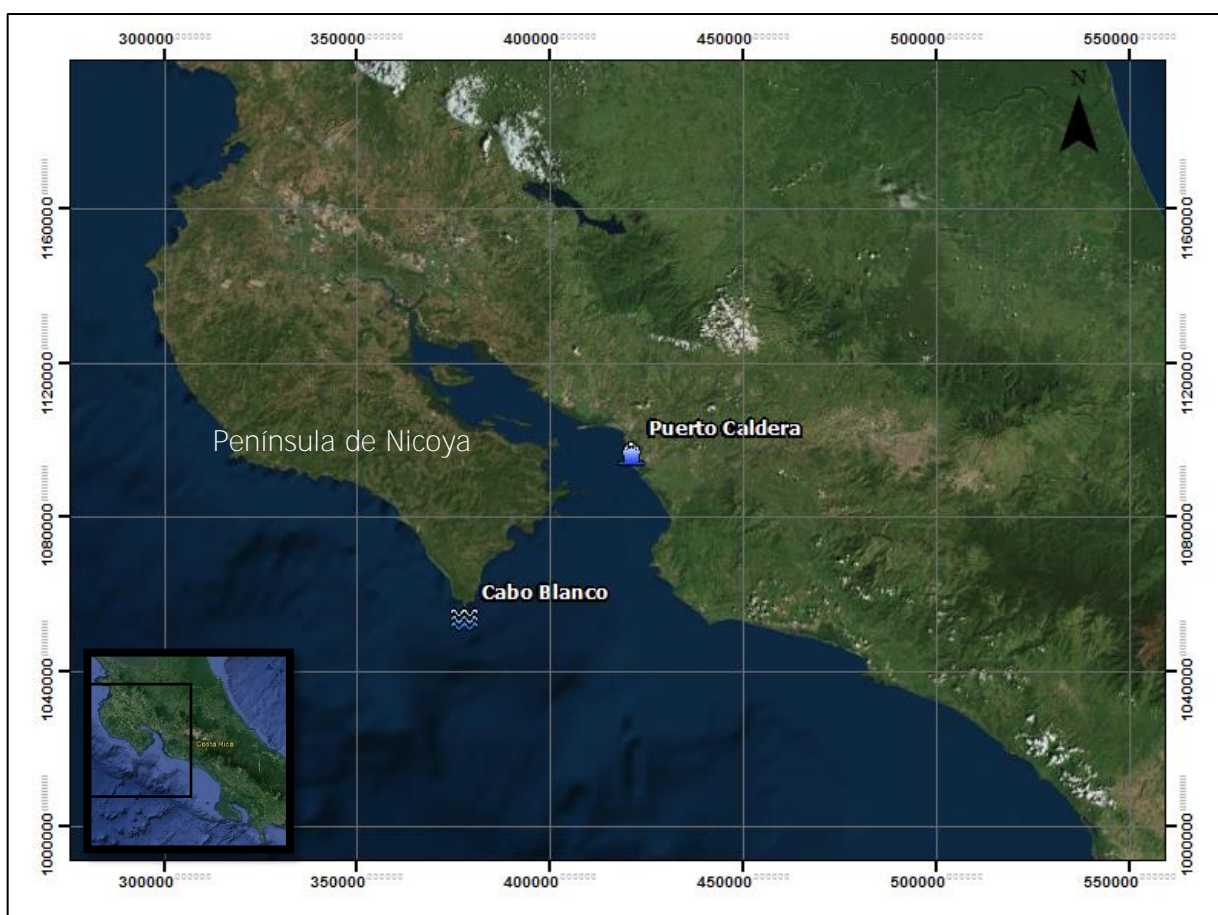


Figura 3.1. Ubicación de Cabo Blanco y Puerto Caldera.

Fuente: ESRI, 2016. Modificado por López, 2016.

De acuerdo a Goda, el oleaje incidente en la costa Pacífico, y por ende en estos puntos donde se realizan las mediciones, son de tipo *swell* en su mayoría, con combinación de oleaje local de periodos cortos en el caso de las afueras de Puerto Caldera. Estas olas energéticas tienen

su origen en tormentas generadas en Nueva Zelanda en el invierno austral, viajan aproximadamente una distancia de 7000 a 9000 km y duran viajando entre 5 y 7 días para arribar al Golfo de Nicoya.

En la Figura 3.2 se puede apreciar como el Pacífico de Costa Rica se ubica en una zona a la "sombra" de las Islas Galápagos (como la flecha morada lo indica) y por ende modelados numéricos que se generan a partir de series históricas por medio de retroanálisis de más de cincuenta años limita la fiabilidad de esos datos. Además, se observa como el oleaje incidente viene del sur-suroeste.

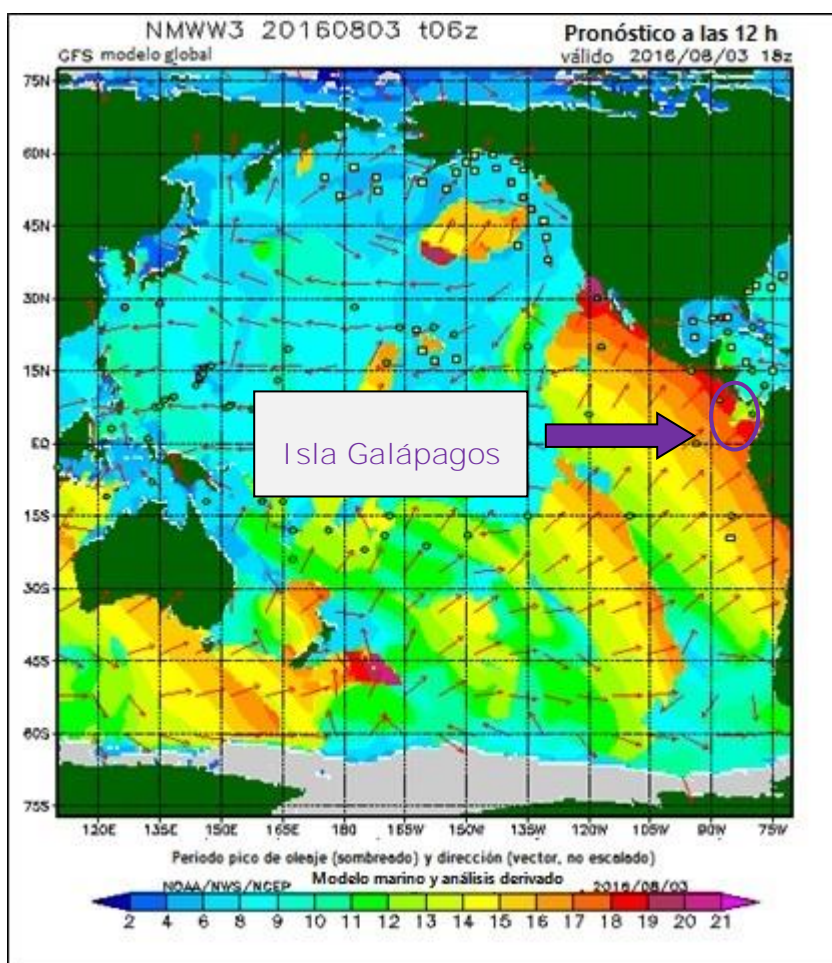


Figura 3.2. Ejemplo de propagación de oleaje en el Pacífico arribando a Costa Rica para agosto del 2016.

Fuente: NOAA, 2016. Modificado por López, 2016.

## 3.2. Equipo utilizado para medición

### 3.2.1. Aquadopp

Este equipo utilizado en las afueras de Puerto Caldera es de la marca Nortek y de tipo ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler), tiene una precisión al medir la altura del centímetro y para el tiempo es del segundo. En la Figura 3.3 se observa el equipo utilizado.



Figura 3.3. Equipo de medición de oleaje Aquadopp.

Fuente: Nortek AS, 2014.

Este equipo tiene una masa de 3,5 kg y 55 cm de largo, con un diámetro de 7,5 cm. Mide hasta una profundidad de 20 metros y utiliza baterías alcalinas de 100 Wh y 13,5 V. Tiene una memoria de 78 Mb.

Para la campaña de medición que va del 16 de mayo del 2014 al 12 de agosto del 2014, se utilizaron dos equipos Aquadopp desfasados entre ellos cada 3 horas. Se decide configurar cada equipo un periodo de tiempo de 17 minutos con 4 segundos con una frecuencia de medición de 1 Hz, lo equivalente a 1024 datos.

### 3.2.2. Awac

Este equipo utilizado en Cabo Blanco es de la marca Nortek y es de tipo AST (Acoustic Surface Tracking), denominado AWAC. Su precisión al medir la altura de ola es del centímetro y para el tiempo es de medio segundo. En la Figura 3.4 se observa el equipo.



Figura 3.4. Equipo de medición de oleaje AWAC con su base de fijación.

Fuente: IMARES, 2014.

Este equipo mide “la altura de ola por medio de una detección acústica de la superficie mediante un transductor vertical (haz acústico en posición vertical)” (IMARES, 2014). Este equipo tiene una masa de 6,1 kg, cuenta con cuatro haces acústicos, uno vertical y tres en un ángulo de 45°. Puede medir hasta una profundidad de 35 metros y utiliza baterías alcalinas de 9-18 V. Además, cuenta con memoria de 4 Gb.

La configuración utilizada para recolección de datos fue de cada 3 horas con un tiempo de 17 minutos y 4 segundos, con una frecuencia de 0,5 Hz, siendo en total 2048 datos.

### 3.3. Ubicación de los equipos de medición

La ubicación aproximada de los equipos, tanto los dos Aquadopps como el Awac, se tiene en el Cuadro 3.1.

Cuadro 3.1. Ubicación de los equipos de medición.

Equipo	Sistema de proyección	Este	Norte	Profundidad (m)*
Aquadopps	CRTM05	419570,566	1095747,391	12 y 15
Awac	CRTM05	377709,991	1054760,226	15

\*Referido al Nivel Medio de Bajamares de Sicigia

Fuente: IMARES, 2014.

A continuación se muestra la ubicación de cada equipo.



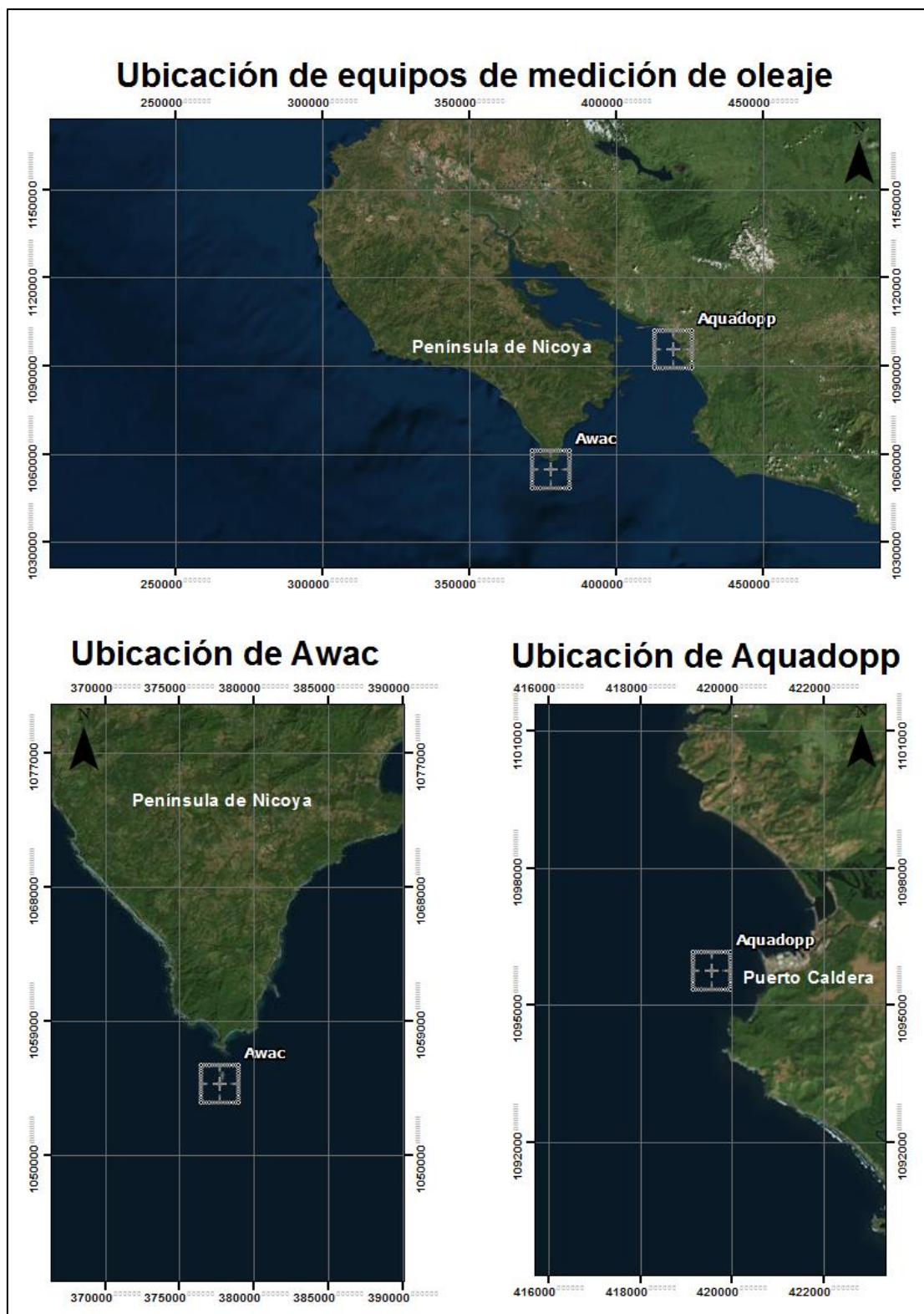


Figura 3.5. Ubicación de los equipos de medición de oleaje, Aquadopp y Awac.

Fuente: ESRI, 2016. Modificado por López, 2016.

## Capítulo 4. Análisis y resultados de los datos de oleaje

---

### 4.1. Análisis de sensibilidad de la función teórica JONSWAP modificada por Goda

Antes de analizar los espectros de energía frecuenciales medidos en campo y ajustar la función de JONSWAP a estos, es importante entender cómo se comporta el espectro teórico. Los parámetros de los que depende la ecuación mostrada son  $H_s$ ,  $T_p$ ,  $\sigma$  y  $\gamma$ . Para este análisis de sensibilidad se va a considerar únicamente el comportamiento al variar  $H_s$ ,  $T_p$  y  $\gamma$ . El valor de  $\sigma$  representa la forma en las colas del espectro teórico y para efectos de esta investigación no se tomará en cuenta su variación debido a que sólo se quiere considerar la importancia del  $\gamma$ , por lo tanto se mantendrán los valores de 0,07 y 0,09.

$$S(f) = \beta_j H_s^2 T_p^{-4} f^{-5} \exp \left[ -1,25 (T_p f)^{-4} \right] \gamma^{\exp \left[ -(T_p f - 1)^2 / 2\sigma^2 \right]}$$

Donde:

$$\beta_j = \frac{0,0624}{0,230 + 0,0336\gamma - 0,185(1,9 + \gamma)^{-1}} [1,094 - 0,01915 \ln \gamma]$$

$$\sigma = \begin{cases} \sigma_a: f < f_p \\ \sigma_b: f \geq f_p \end{cases}$$

$$\gamma = 3 \sim 10, \quad \sigma_a \cong 0,07, \quad \sigma_b \cong 0,09$$

Varios casos se tomaron en cuenta, específicamente tres, que son:

- Caso I: se varió  $H_s$  (1 m, 1,5 m, 2m, 2,5 m, 3 m) y  $\gamma$  (1 a 10), se mantuvo  $T_p=18$  s.
- Caso II: se varió  $T_p$  (15 s, 18 s, 20 s, 22 s) y  $\gamma$  (1 a 10), se mantuvo  $H_s=1$  m.
- Caso III:  $\gamma$  varió y  $T_p$  y  $H_s$  se mantienen constante.

Se realizaron estos casos porque se consideraban las alturas y periodos picos típicos que se observan en la costa Pacífico de Costa Rica.

Antes de realizar el análisis, por ejemplo, en la Figura 4.1 se tiene un espectro teórico JONSWAP con una resolución espectral ( $\Delta f$ ) igual a 0,001 Hz. Como se observa es un espectro de un solo pico, en el que el  $T_p$  es de 18 s, la altura significativa de un 1 m, y un  $\gamma$  de 5. En cambio, en la Figura 4.2 se muestra un mismo espectro teórico con  $T_p=18$  s,  $H_s=1$  m y  $\gamma=5$ , pero con un  $\Delta f=0,01$  Hz. Se puede observar como el pico de energía disminuye de aproximadamente 4,6  $m^2/Hz$  a 2,6  $m^2/Hz$ , siendo una disminución de alrededor del 40%. Con este resultado se evidencia la influencia que tiene la resolución espectral a la hora de trabajar con espectros de energía frecuenciales. **Goda (1983)** en su artículo "*Analysis of Wave Grouping and Spectra of Long-travelled Swell*" cita de igual manera que la resolución espectral es una variable que es difícil de determinar, por lo que él utiliza una resolución frecuencial de 0,0039 Hz. Este tema se profundizará, en este capítulo, más adelante.

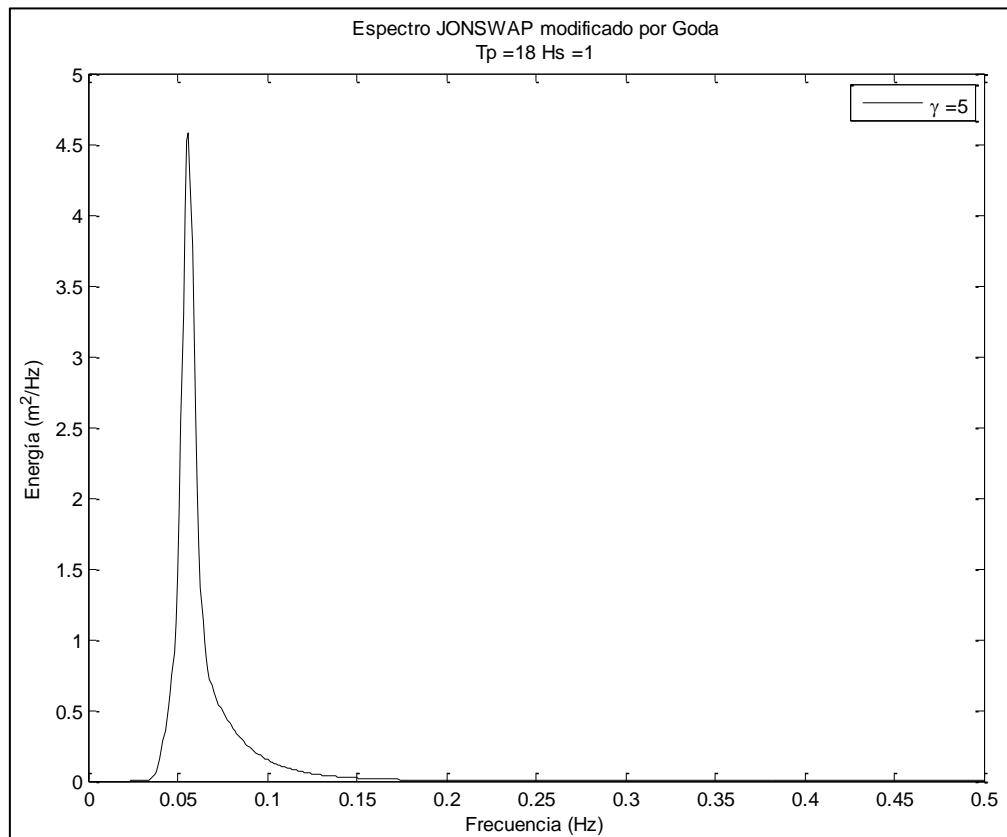


Figura 4.1. Espectro teórico JONSWAP modificado por Goda, con  $\Delta f=0,001$  Hz.

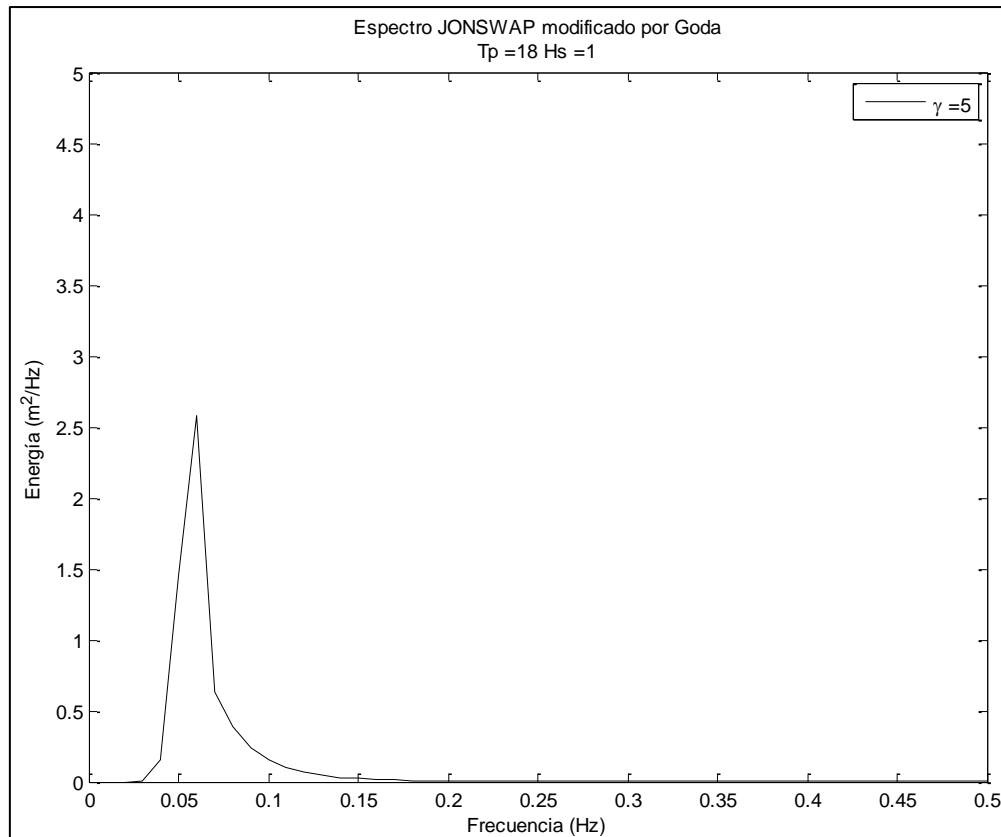


Figura 4.2. Espectro teórico JONSWAP modificado por Goda, con  $\Delta f=0,01$  Hz.

Para el análisis de sensibilidad se eligió un  $\Delta f=0,001$  Hz, esto debido a que al principio se realizó con un  $\Delta f=0,01$  Hz y los resultados obtenidos demostraban que el espectro teórico no tendía a comportarse conforme a lo que se espera, un aumento de la energía pico conforme el  $\gamma$  aumenta.

En la Figura 4.3, se grafica la energía máxima pico de un espectro teórico como el visto en la Figura 4.1 contra su periodo pico correspondiente, esto para distintos valores de  $T_p$  y de  $\gamma$ . Se observa como con un  $\Delta f=0,001$  Hz el pico de energía de cada espectro va aumentando conforme se aumenta el periodo pico y el factor pico, esto para una altura significativa de un metro. En cambio, en la Figura 4.4 con un  $\Delta f=0,01$  Hz, se observa como dicho pico de energía oscila conforme aumenta el  $T_p$  y el  $\gamma$ , llegando a un punto donde la energía máxima obtenida con un  $T_p$  de 29 s y un  $\gamma$  de 10 es menor a la de un  $\gamma$  de uno, lo que no tiene algún sentido físico.

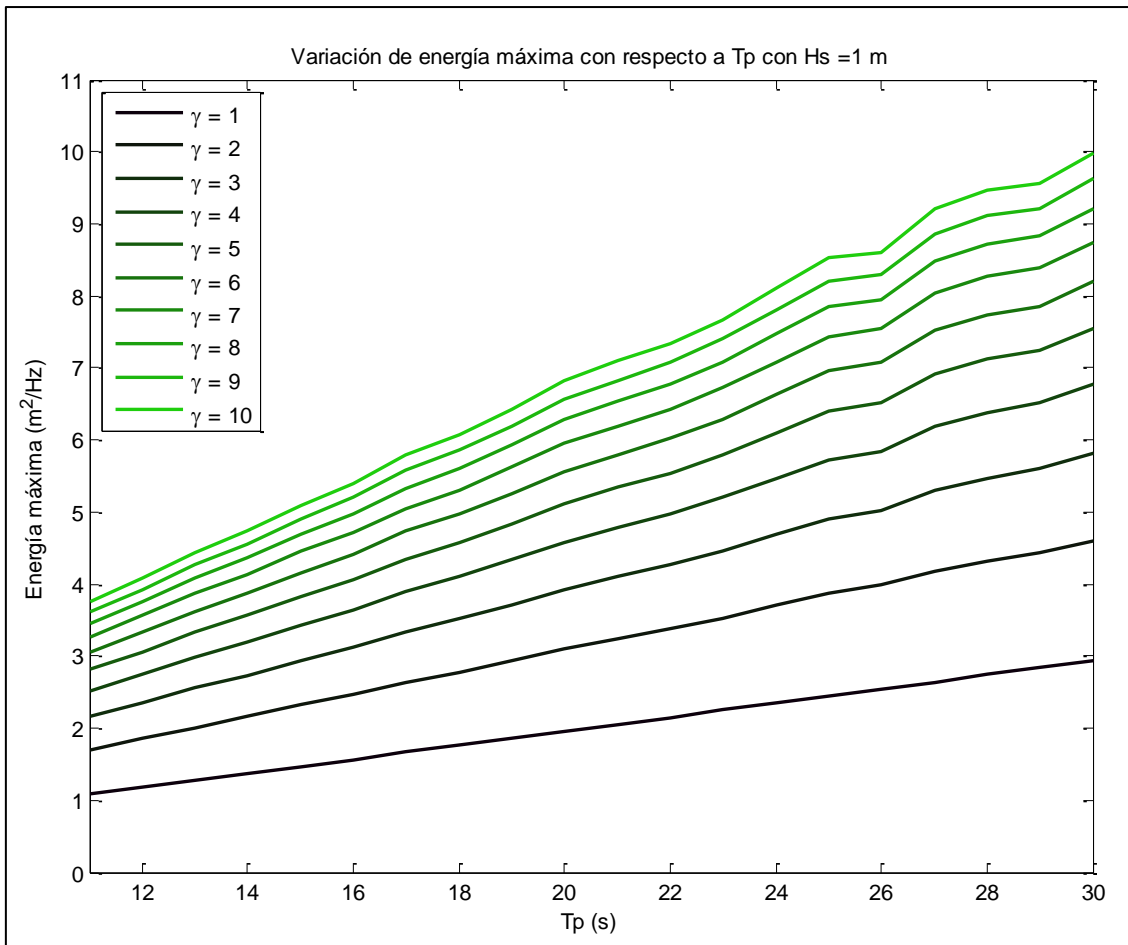


Figura 4.3. Variación de la energía máxima en espectros con  $\Delta f = 0,001$  Hz, conforme aumenta  $T_p$  y  $\gamma$ .

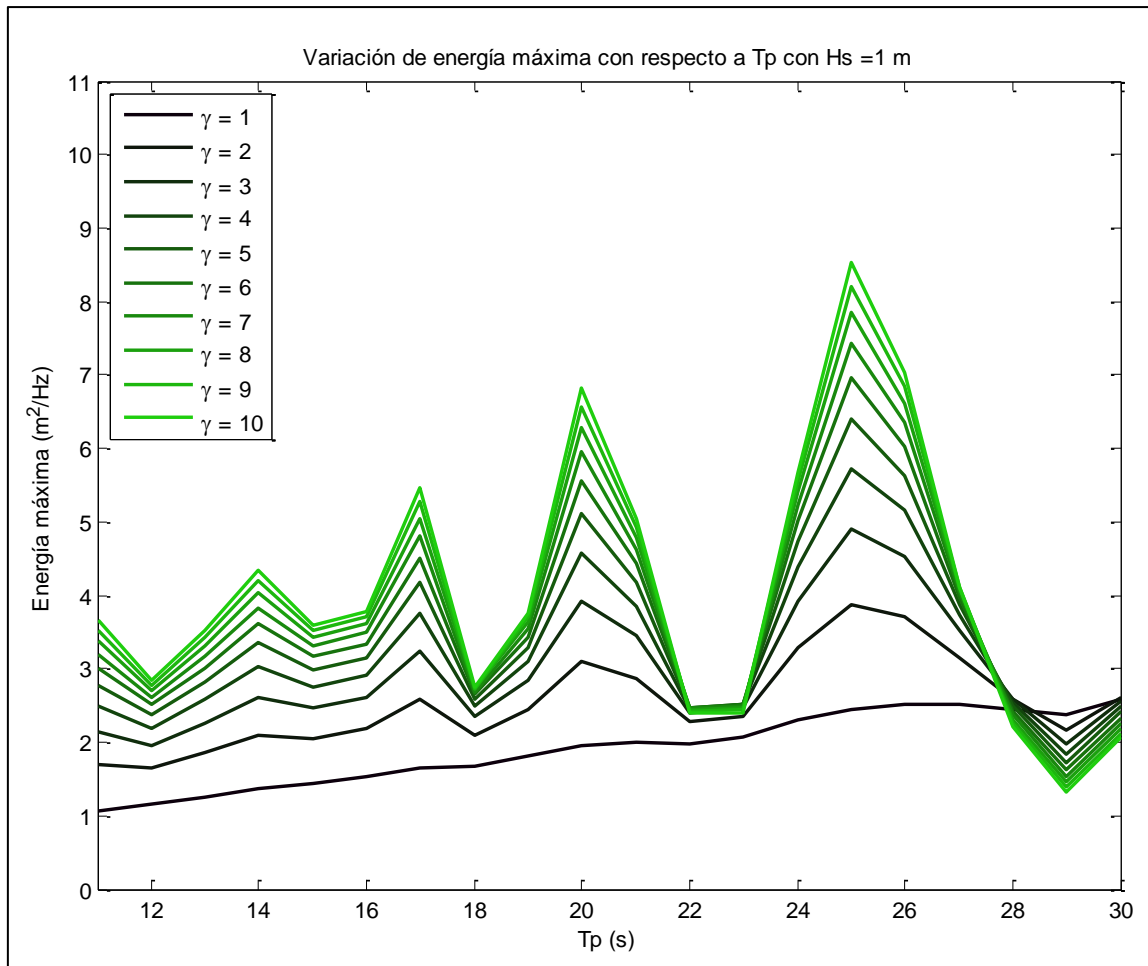


Figura 4.4. Variación de la energía máxima en espectros con  $\Delta f = 0,01$  Hz, conforme aumenta  $T_p$  y  $\gamma$ .

El comportamiento de la energía pico máxima conforme se aumenta el  $T_p$  y el  $\gamma$  entre las dos resoluciones espectrales analizadas es distinto, por lo tanto para este análisis de sensibilidad se utilizó un  $\Delta f = 0,001$  Hz.

Ahora bien, a continuación se expondrán los casos estudiados que se consideraron adecuados para entender el comportamiento de la función JONSWAP modificada por Goda.

#### 4.1.1. Caso I (Hs y $\gamma$ varían, Tp se mantiene con 18 s)

Para este caso, se varió Hs de 1 a 3,5 metros cada 0,5 metros y el  $\gamma$  de 1 a 10 con un intervalo de una unidad. En las Figuras 4.5 y 4.6 se observan los resultados obtenidos.

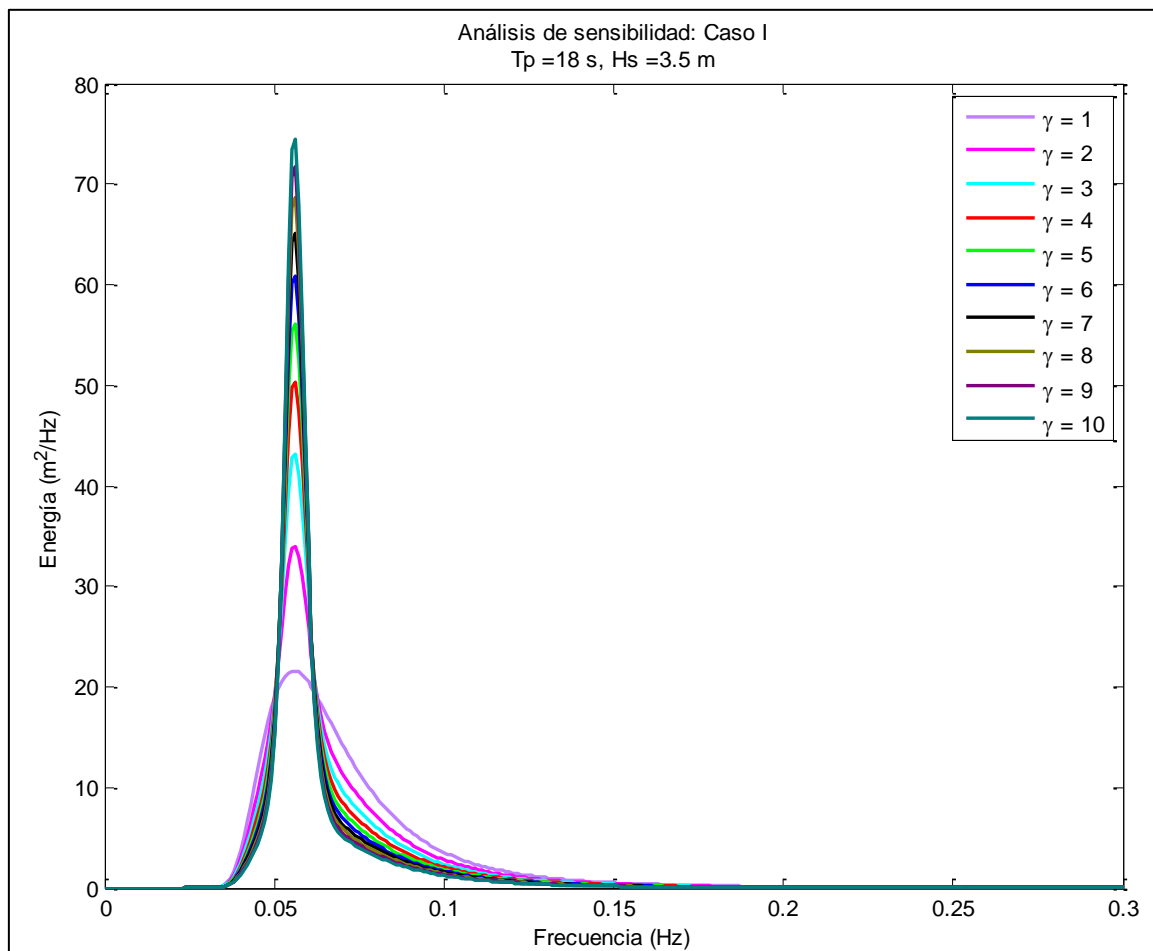


Figura 4.5. Variación del espectro teórico JONSWAP para un Tp=18 s, Hs=3,5 m y  $\gamma$  de 1 a 10.

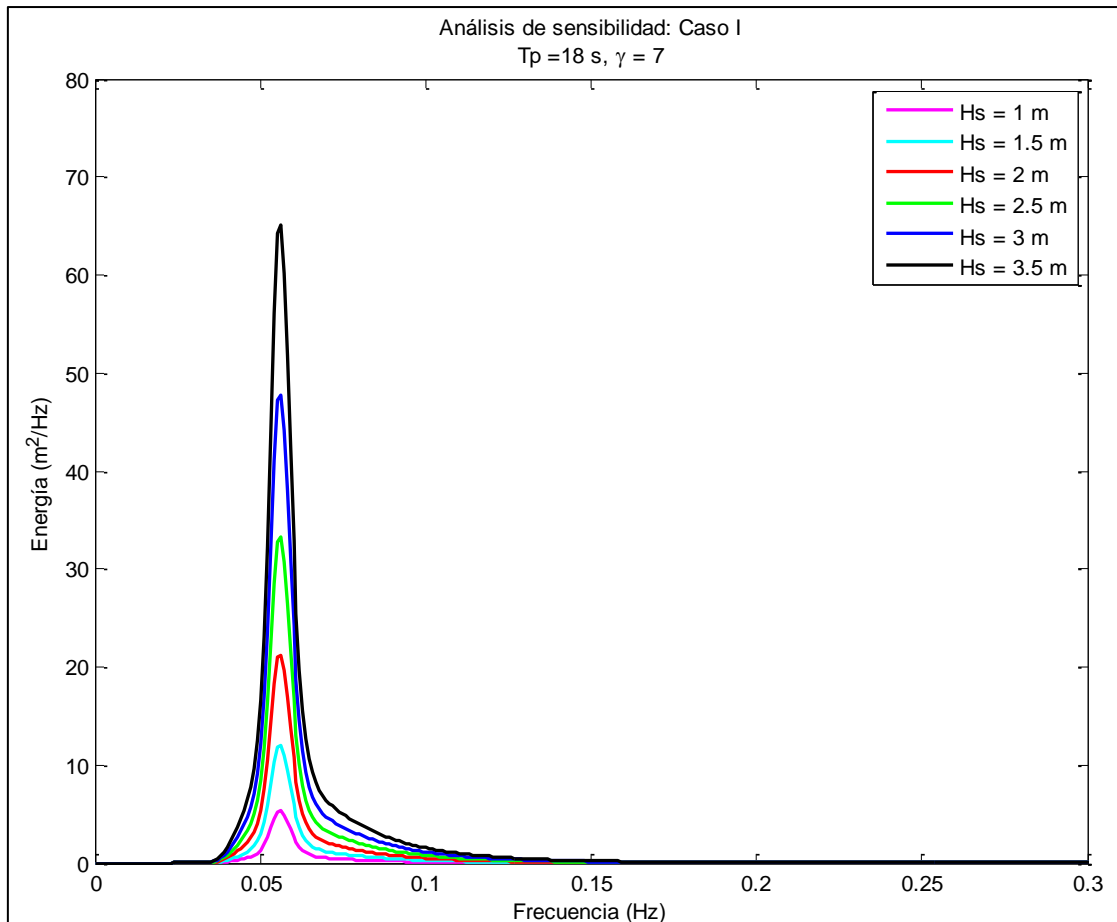


Figura 4.6. Variación del espectro teórico JONSWAP para un  $T_p=18$  s,  $\gamma=7$  y  $H_s$  de 1 m a 3,5 m.

Como se observa en las figuras anteriores, la energía pico máxima aumenta conforme la altura aumenta. Además, aumenta de manera significativa de una ola de 1 m a una de 3,5 m, se da un aumento de aproximadamente 15 veces la inicial. También se observa como al aumentar el factor pico, de igual forma aumenta la energía máxima del espectro y el espectro tiende a concentrarse en menos frecuencias siendo más angosto. Por lo que es un comportamiento esperado ya que la energía está en función del  $H_s$  al cuadrado en el espectro teórico JONSWAP.

En la Figura 4.7 se evalúa cómo cambia  $H_{m0}$  del espectro teórico conforme aumenta el valor del factor pico. Se observa que al aumentar  $\gamma$ , el área bajo el espectro disminuye y se aproxima más al valor  $H_s$  dado en la ecuación que es el que se quiere representar. Estas diferencias se pueden deber al error que se arrastra al determinar el área bajo la curva del espectro teórico



mediante los métodos numéricos, en este caso se utilizó el método del trapecio como integración numérica.

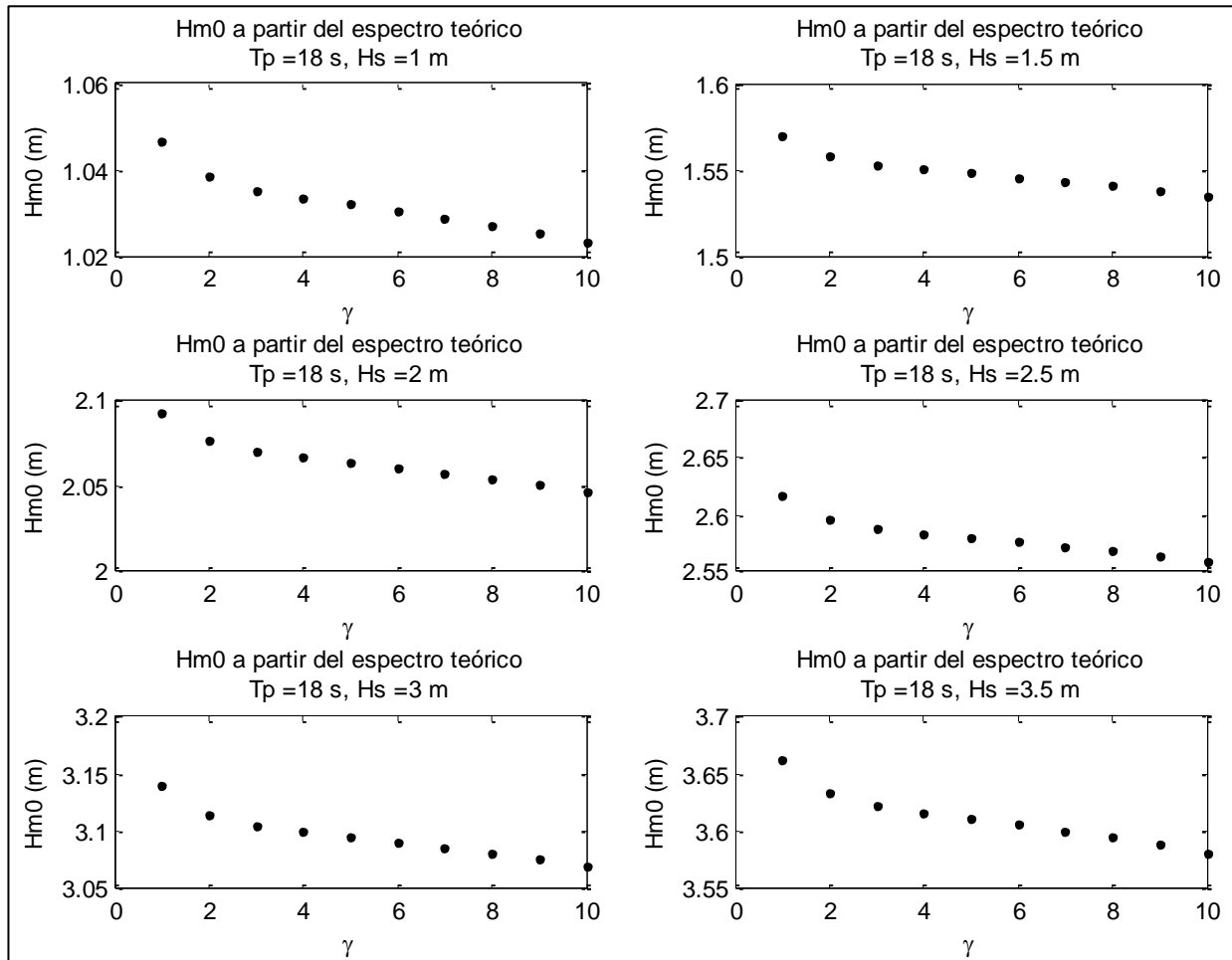


Figura 4.7. Variación de la altura significativa espectral ( $H_{m0}$ ) dependiendo del  $\gamma$ .

#### 4.1.2. Caso II ( $T_p$ y $\gamma$ varían, $H_s$ se mantiene con 1m)

Para este caso el  $T_p$  se varió en 15 s, 18 s, 20 s y 22s, por su parte el  $\gamma$ , de igual manera que el caso anterior, tomó valores que variaron de 1 a 10. Se buscó evaluar cómo cambia la energía máxima conforme se aumenta el periodo pico y si tiende a comportarse de igual manera que al variar  $H_s$ . En las Figuras 4.8 y 4.9 se muestran los resultados obtenidos.

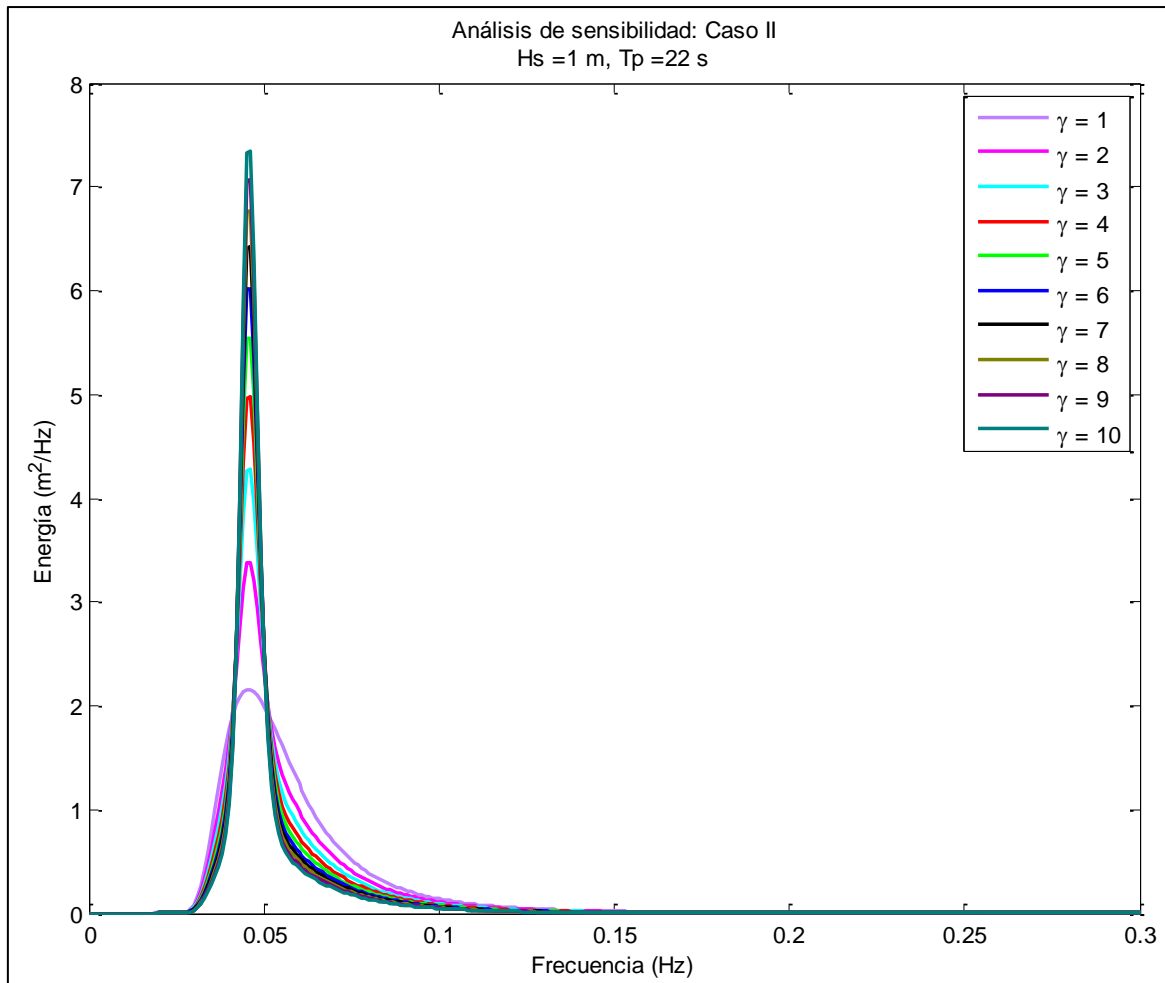


Figura 4.8. Variación del espectro teórico JONSWAP para un  $T_p=22$  s,  $H_s=1$  m y  $\gamma$  de 1 a 10.

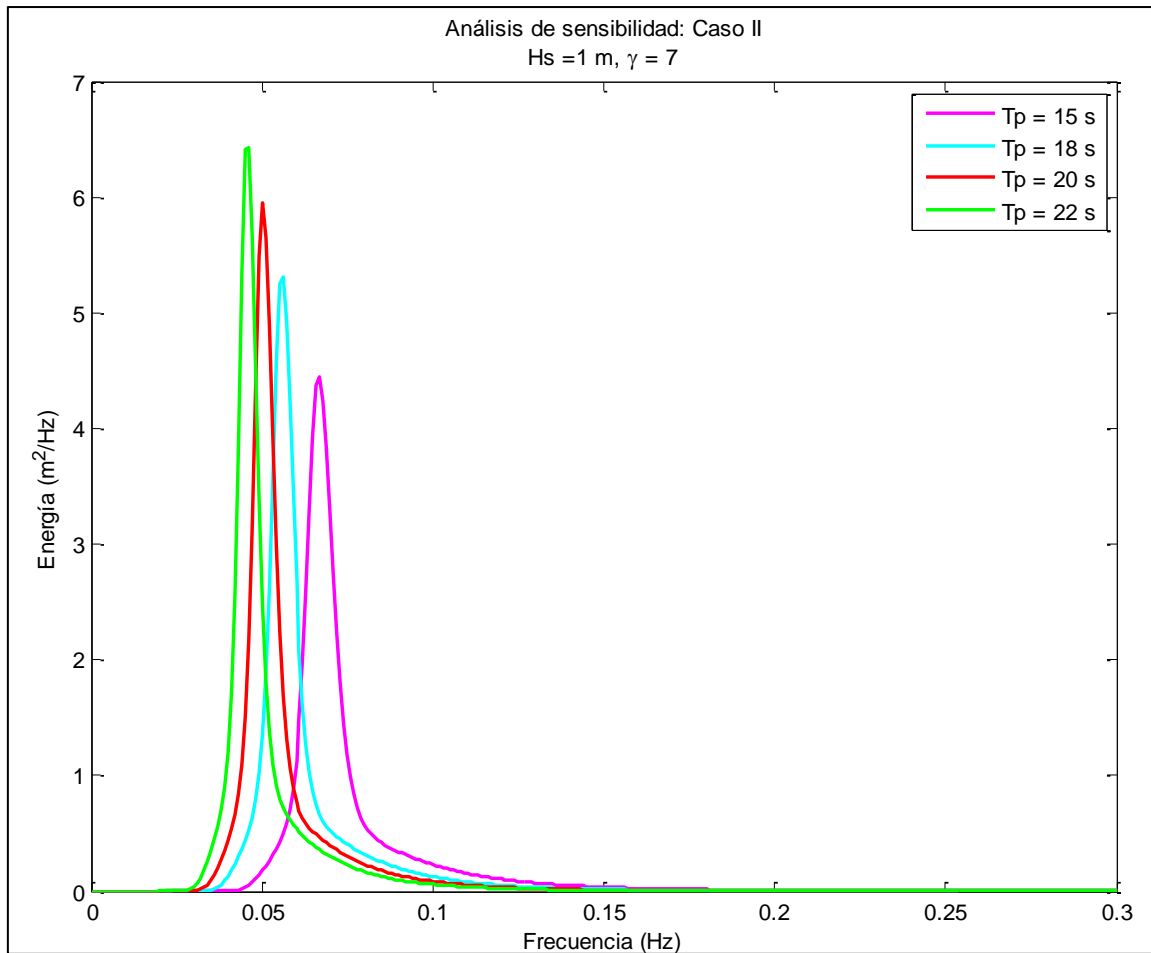


Figura 4.9. Variación del espectro teórico JONSWAP para un  $H_s=1$  m,  $\gamma=7$  y  $T_p$  de 15 s, 18 s, 20 s y 22 s.

Como se observa, la energía máxima aumenta conforme  $\gamma$  y  $T_p$  aumenta, siendo un resultado esperable ya que el  $T_p$  es proporcional a la energía. Después, como se aprecia, la energía máxima para los distintos periodos picos no tiende a aumentar tanto como al variar la altura de ola. Cuando se pasa de un  $T_p$  de 15 s a un  $T_p$  de 22 s con un factor pico de 10, la energía máxima aumenta aproximadamente de  $5 \text{ m}^2/\text{Hz}$  a  $7,5 \text{ m}^2/\text{Hz}$ , es decir, 1,5 veces. El  $T_p$  influye en la posición de la energía máxima con respecto a la frecuencia. En la Figura 4.3 se tiene otra forma de ver el comportamiento del espectro al aumentar el  $T_p$  y se evidencia lo descrito anteriormente.

Ahora bien, de la misma forma que se realizó para el primer caso, en la Figura 4.10 se tiene cómo varía  $H_{m0}$  para cada factor pico y periodo pico. Los cuatro gráficos son iguales, lo que

indica que el aumento de  $T_p$  no varía el área bajo la curva del espectro. Por otro lado, se evidencia cómo al igual que en el Caso I,  $H_{m0}$  disminuye conforme se aumenta el  $\gamma$  y se aproxima más al  $H_s$  insertado en la ecuación para su ajuste. La disminución de  $H_{m0}$  es de aproximadamente 2,5 centímetros para todos los casos.

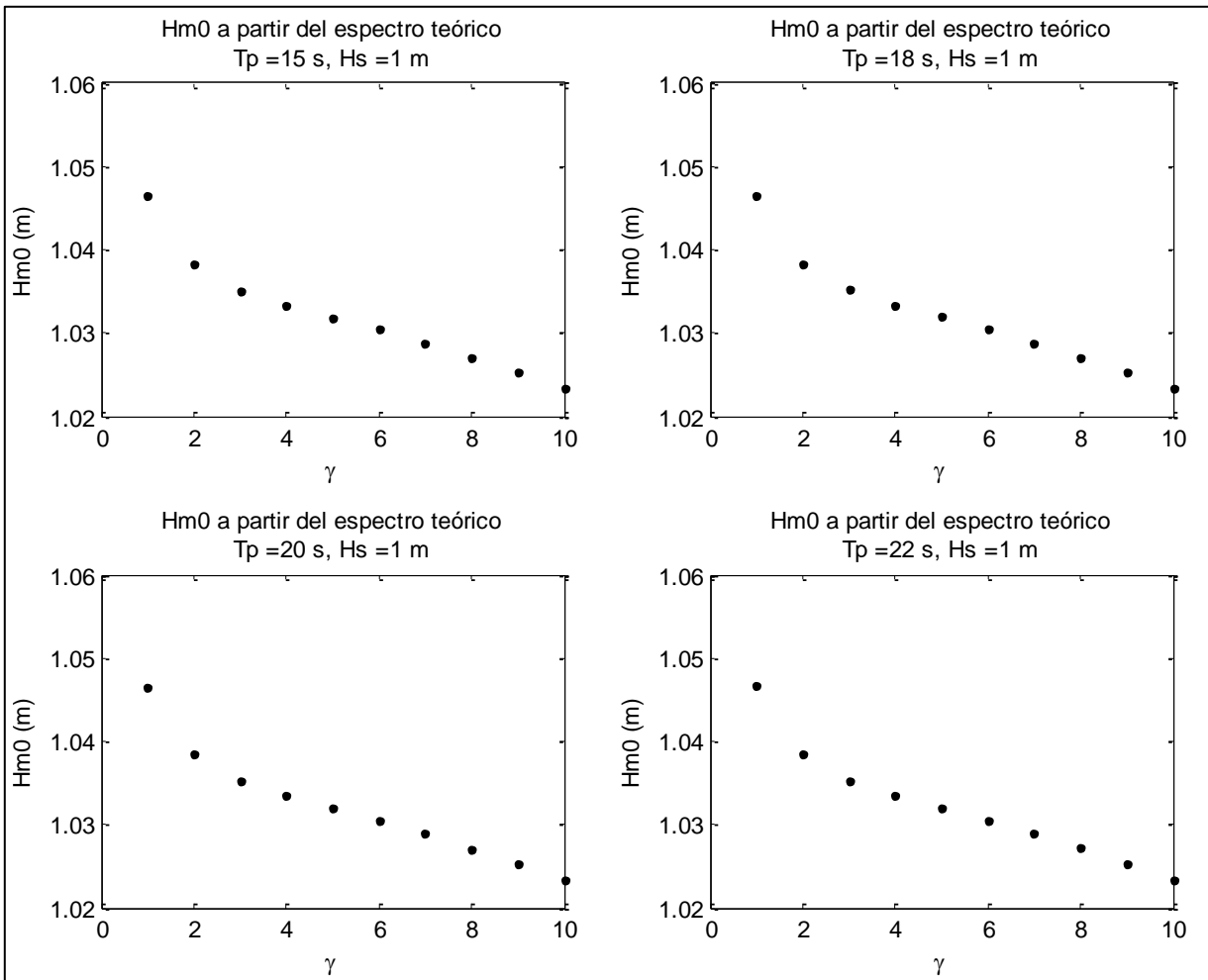


Figura 4.10. Variación de la altura significativa espectral ( $H_{m0}$ ) dependiendo del  $\gamma$ , al variar  $T_p$ .

#### 4.1.3. Caso III ( $\gamma$ varía, $T_p$ y $H_s$ se mantienen constante)

Por último, se analizó un caso simple donde se mantuvo constante el periodo pico y la altura significativa pero se varió el factor pico hasta un valor de 400, así poder observar cómo es el comportamiento de la energía máxima en el espectro teórico JONSWAP modificado por Goda.

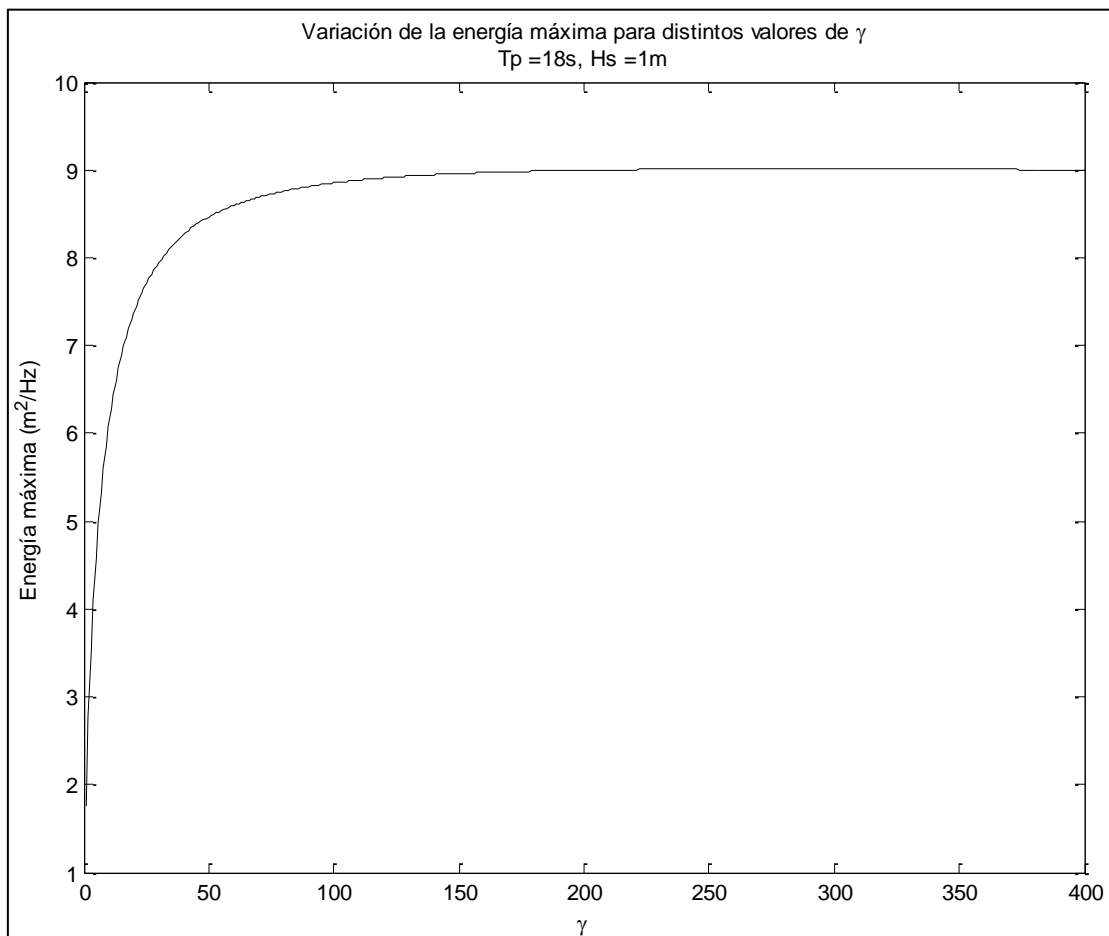


Figura 4.11. Variación de la energía máxima del espectro teórico conforme aumenta  $\gamma$ .

El  $H_s$  utilizado fue 1 m y el  $T_p$  fue 18 s. Al variar el  $\gamma$  la energía máxima pico tiende a crecer rápidamente hasta un valor aproximado del factor pico de 25 y llega a estabilizarse aproximadamente a partir de un valor de 100, tal y cómo se observa en la Figura 4.11. Se analizaron otros espectros con  $H_s$  y  $T_p$  distintos a los mostrados y el comportamiento tendía a ser similar, por lo que para el ajuste de los  $\gamma$  se utilizaron valores de 1 a 100 viendo que a partir de ese límite superior la energía máxima no va a tender a crecer de manera importante.

## 4.2. Suavizado de espectro (resolución espectral)

La resolución espectral es uno de los principales temas por tratar a la hora de realizar el ajuste del factor pico. Los resultados obtenidos serán función de la resolución del espectro utilizado **en el análisis, tal y como Mansard & Funke (1990) lo describen en su artículo "On the fitting of JONSWAP spectra to measured sea states"**. De la misma manera, como se observó en el marco teórico, Goda (1983) demuestra como  $Q_p$  tiende a aumentar conforme la resolución espectral se vuelve más fina, lo mismo sucede con el  $\gamma$ . Además, Kamphius (2000) igual muestra que la resolución debe ser apropiada para el análisis por realizar.

Ahora bien, a partir del software Quickwave de los equipos Aquadopp y Awac se pueden obtener espectros con un  $\Delta f = 0,01$  Hz. En la Figura 4.12 se observa un espectro obtenido el 19 de mayo del 2014 a las 21:00:00 horas en Puerto Caldera a partir del software mencionado. Como se analizó en la sección 4.1, este espectro no va a ser analizado con la resolución presentada, debido a que la función teórica JONSWAP modificada por Goda no se comporta de la forma esperada, tal y como se observa en la Figura 4.4. Por esta razón, conviene para este análisis utilizar otra resolución espectral y así comparar los resultados obtenidos por Goda.

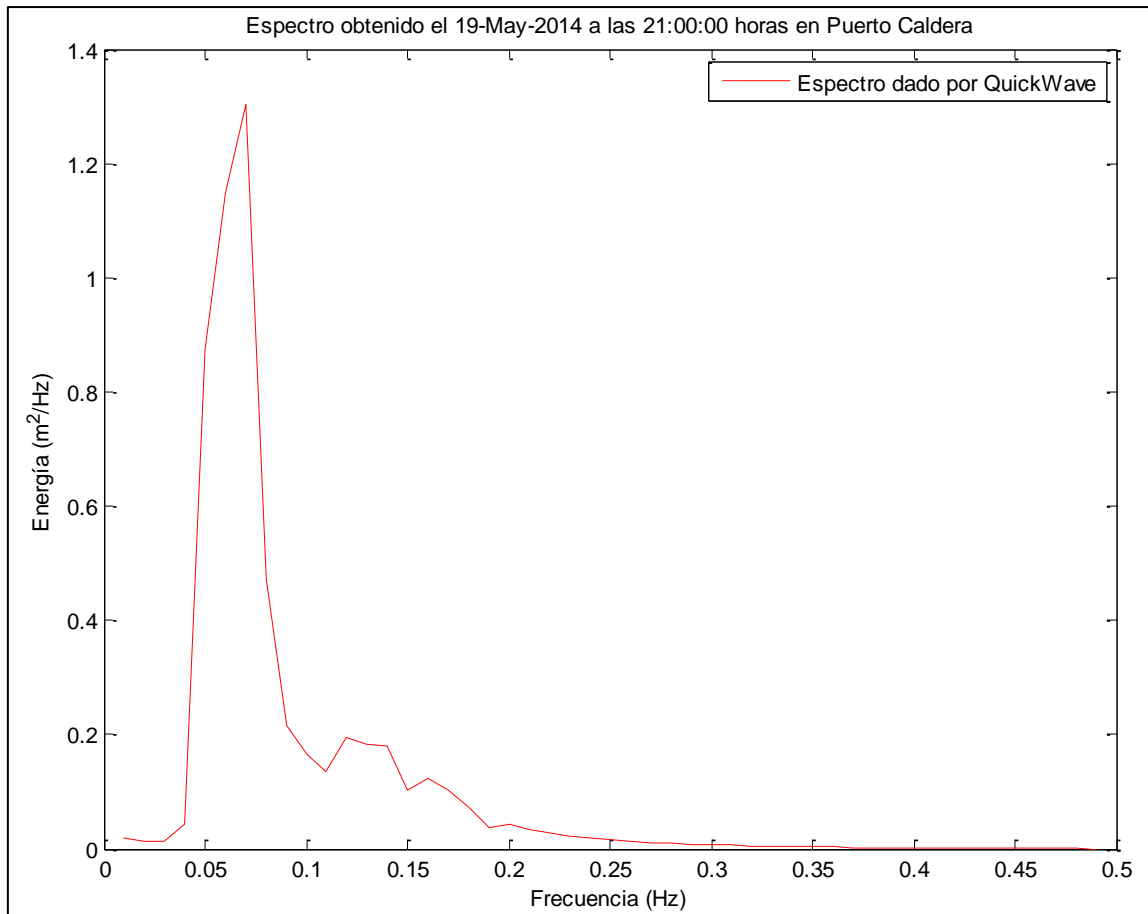


Figura 4.12. Espectro de energía frecuencial obtenido el 19 de Mayo de 2014 a las 21:00:00 horas en Puerto Caldera, obtenido a partir del software QuickWave.

Al descartar la opción anterior, se decidió utilizar los datos de presión obtenidos a partir de los equipos de medición y utilizar una rutina de cálculo en el programa Matlab realizada para transformar dichas presiones a energías y así crear espectros con una resolución más fina. La resolución obtenida a partir de los datos de presión fue de un  $\Delta f=0,00098$  Hz. Se le llamó espectro original ya que a partir de este se aplicó la ecuación (14) para suavizar el espectro y obtener el  $\Delta f$  adecuado para el análisis.

En la Figura 4.13 se presenta el resultado obtenido del caso ejemplificado para un  $\Delta f=0,00098$  Hz. Se observa cómo se obtuvo un espectro más discretizado que el mostrado en la Figura 4.12, en donde la energía máxima obtenida es de aproximadamente  $7 \text{ m}^2/\text{Hz}$ , cinco veces más que la máxima obtenida por el QuickWave. Además se muestran picos de energía locales, esto

se puede atribuir a ruido que es generado por el equipo al realizar la medición. La comparación entre ambos espectros se aprecia en la Figura 4.14.

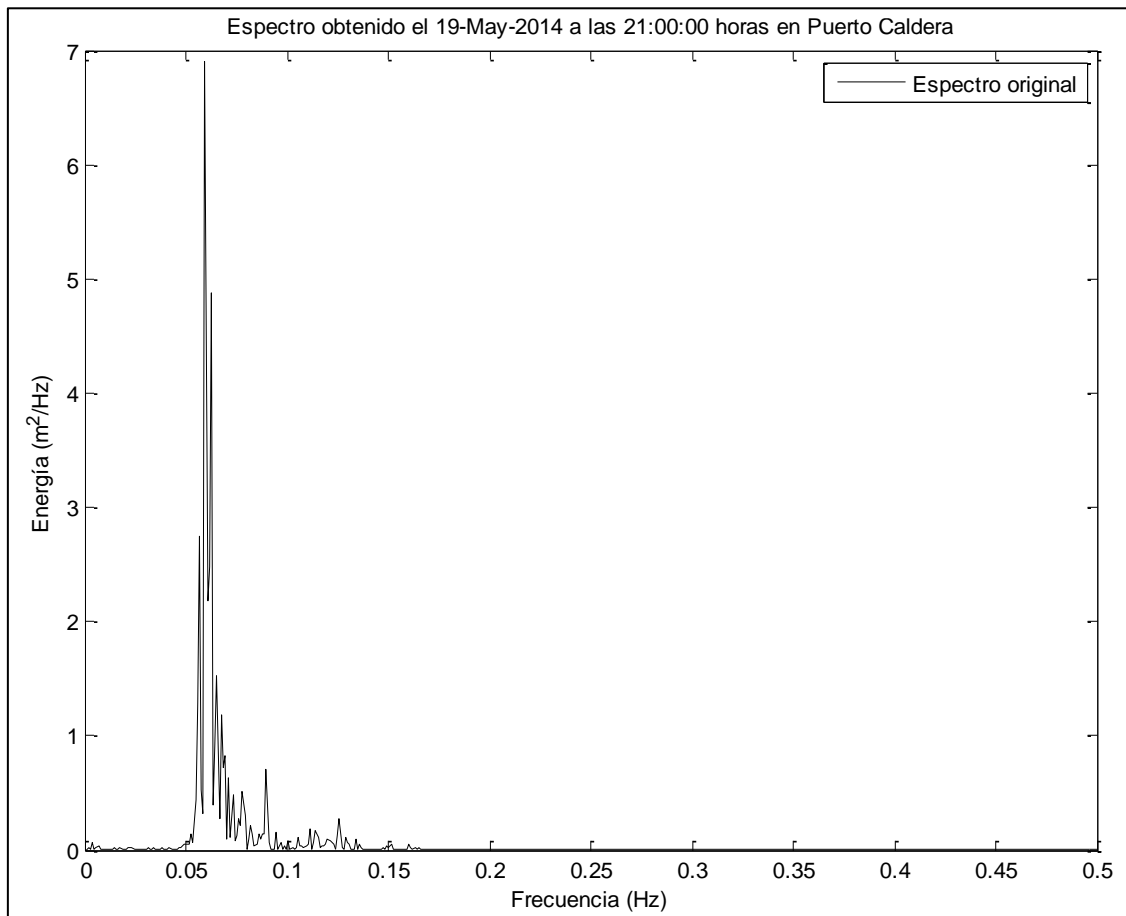


Figura 4.13. Espectro de energía frecuencial obtenido el 19 de Mayo de 2014 a las 21:00:00 horas en Puerto Caldera, a partir de los datos de presión.



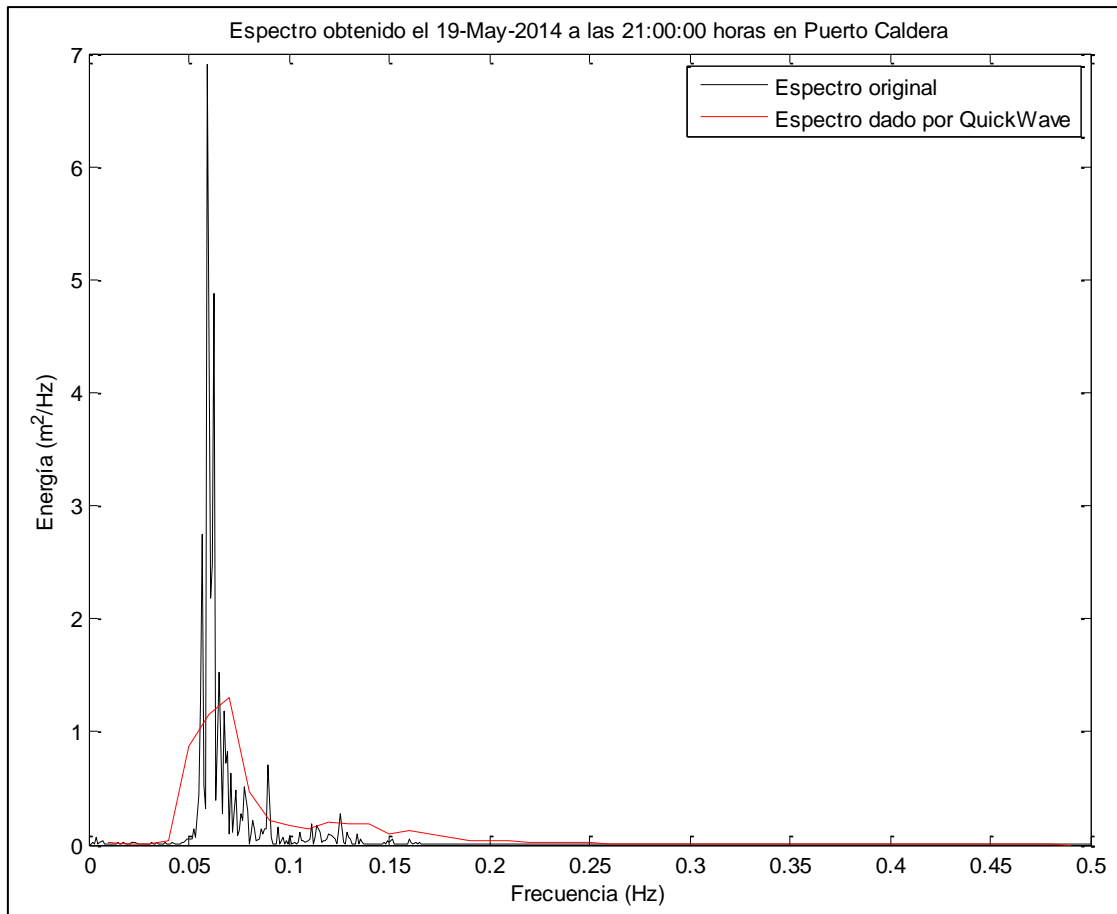


Figura 4.14. Comparación de espectros entre el dado por el QuickWave y el obtenido a partir de los datos de presión.

Seguidamente, se procedió a suavizar los espectros originales para llegar a obtener la resolución espectral adecuada. Se probaron varias resoluciones con intervalos  $\Delta f$  de 0,0029 Hz, 0,0039 Hz, 0,0058 Hz y 0,0088 Hz. Este suavizado se realizó mediante la ecuación (14) dada por Kamphius (2000) donde las resoluciones se definían según el  $M_f$ , la cantidad de  $\Delta f$  promediados, utilizando grupos de 3, 4, 6 y 9 respectivamente. En la Figura 4.15 se presentan los distintos espectros para un mismo estado de mar, se puede observar cómo el  $Q_p$  disminuye conforme el  $\Delta f$  aumenta, tal y cómo lo describe Goda (1983).

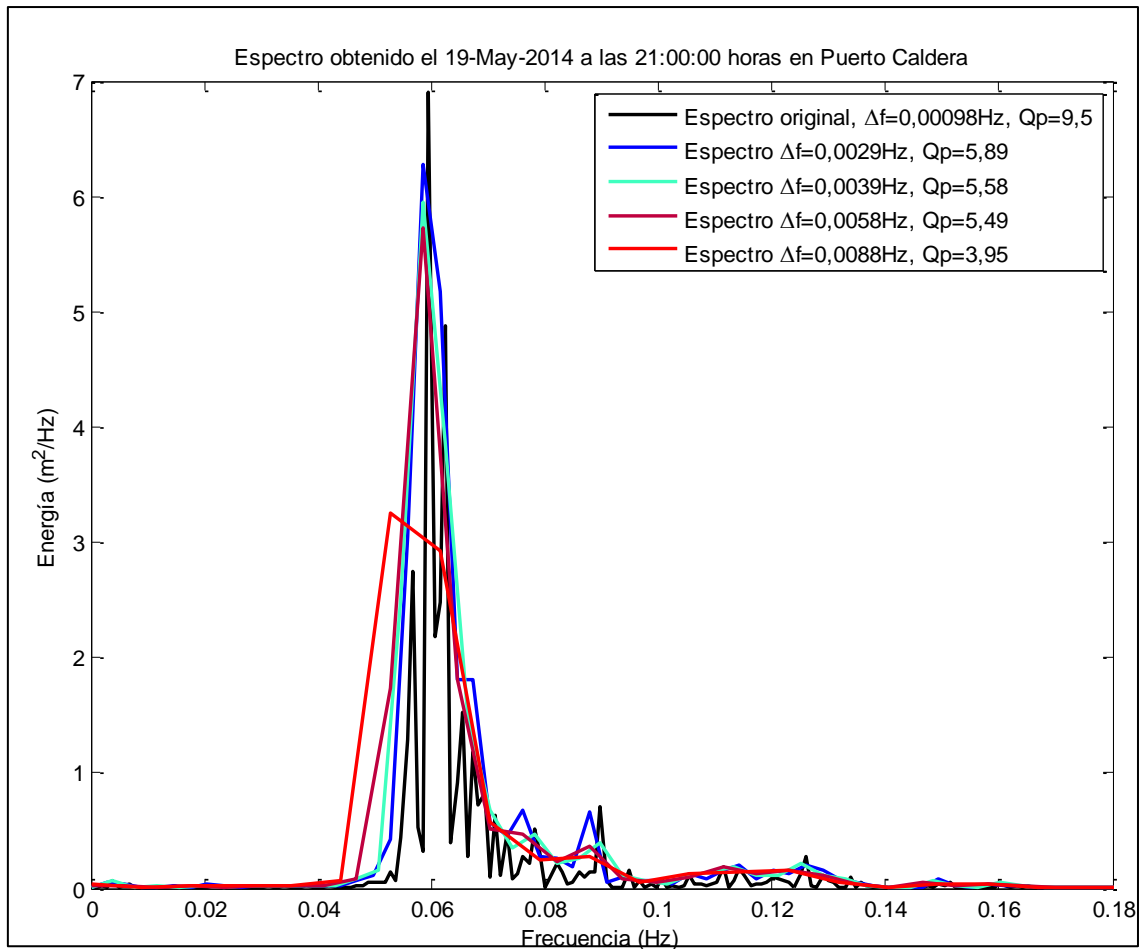


Figura 4.15. Comparación entre las distintas resoluciones para un mismo espectro.

Con el propósito de poder comparar los resultados obtenidos en esta investigación con los dados por Goda (1983), se procedió a utilizar un  $\Delta f=0,0039\text{ Hz}$ , que es la misma resolución utilizada por él en la discusión del agrupamiento de oleaje en su artículo “*Analysis of Wave Grouping and Spectra of Long-travelled Swell*”, donde utilizó datos de oleaje de Puerto Caldera.

### 4.3. Caracterización de los datos de oleaje medidos

Una vez obtenida la resolución espectral que se considera adecuada para el análisis y sabiendo cómo se comporta la función JONSWAP modificada por Goda, se procede a caracterizar el oleaje para luego ajustar el parámetro espectral  $\gamma$ .

En Puerto Caldera se cuentan con 704 estados de mar obtenidos durante la campaña de medición del 16 de mayo del 2014 al 12 de agosto del 2014. Por otro lado, en Cabo Blanco se

obtuvieron 2223 estados de mar, para las fechas del 23 de enero del 2014 al 29 de octubre del 2014. En la Figura 4.16 se muestran los parámetros de oleaje como  $H_{m0}$ ,  $T_{m02}$  y  $T_p$  para todos los estados de mar medidos.

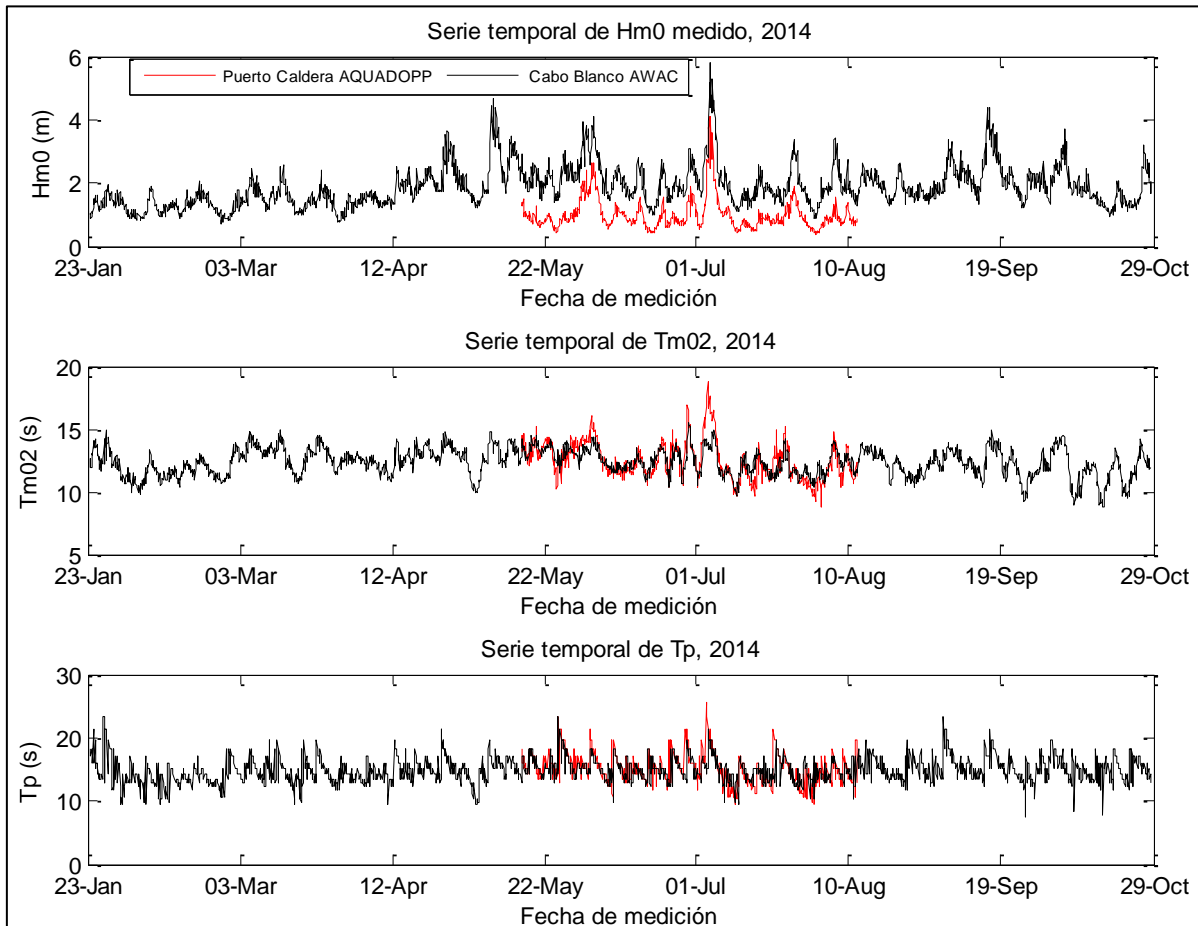


Figura 4.16. Parámetros de oleaje para las mediciones realizadas en Puerto Caldera y Cabo Blanco en el 2014.

En la figura anterior se puede observar como a partir de mediados de mayo, las alturas de oleaje en Cabo Blanco tienden a aumentar sobre los dos metros, habiendo mayor energía y siendo la época donde empieza el invierno austral. Se puede apreciar en Caldera cómo las alturas tienden a ser menores que las observadas en Cabo Blanco y tienen una correlación entre ambas. La razón de esto es que en Caldera el oleaje *swell* llega desde el sur-suroeste y no incide directamente, como si sucede en Cabo Blanco, debido que se da disipación de energía por efectos de los procesos de propagación como difracción y refracción. En cuanto a  $T_{m02}$  y  $T_p$ , se aprecia una correlación entre ellos, pero no tan evidente con  $H_{m0}$ .

Con respecto a los parámetros espectrales del oleaje medido, en la Figura 4.17 se puede apreciar que el valor de  $Q_p$  se aproxima a un intervalo entre 4 y 7, valores similares a los estimados por Goda (1983). Con respecto a la anchura espectral  $\nu$ , se observa que el promedio es de aproximadamente 0,3, siendo un valor cercano a cero por lo que sugiere que la energía tiende a ser poco distribuida en varias frecuencias. Por último,  $\varepsilon$  tiende a estar en un valor de 0,5. Goda (1974) indica que este parámetro  $\varepsilon$  está relacionado con la resolución de la toma de datos por considerar los momentos de orden dos y cuatro, por eso definió  $Q_p$  ya que solo depende del momento de orden cero.

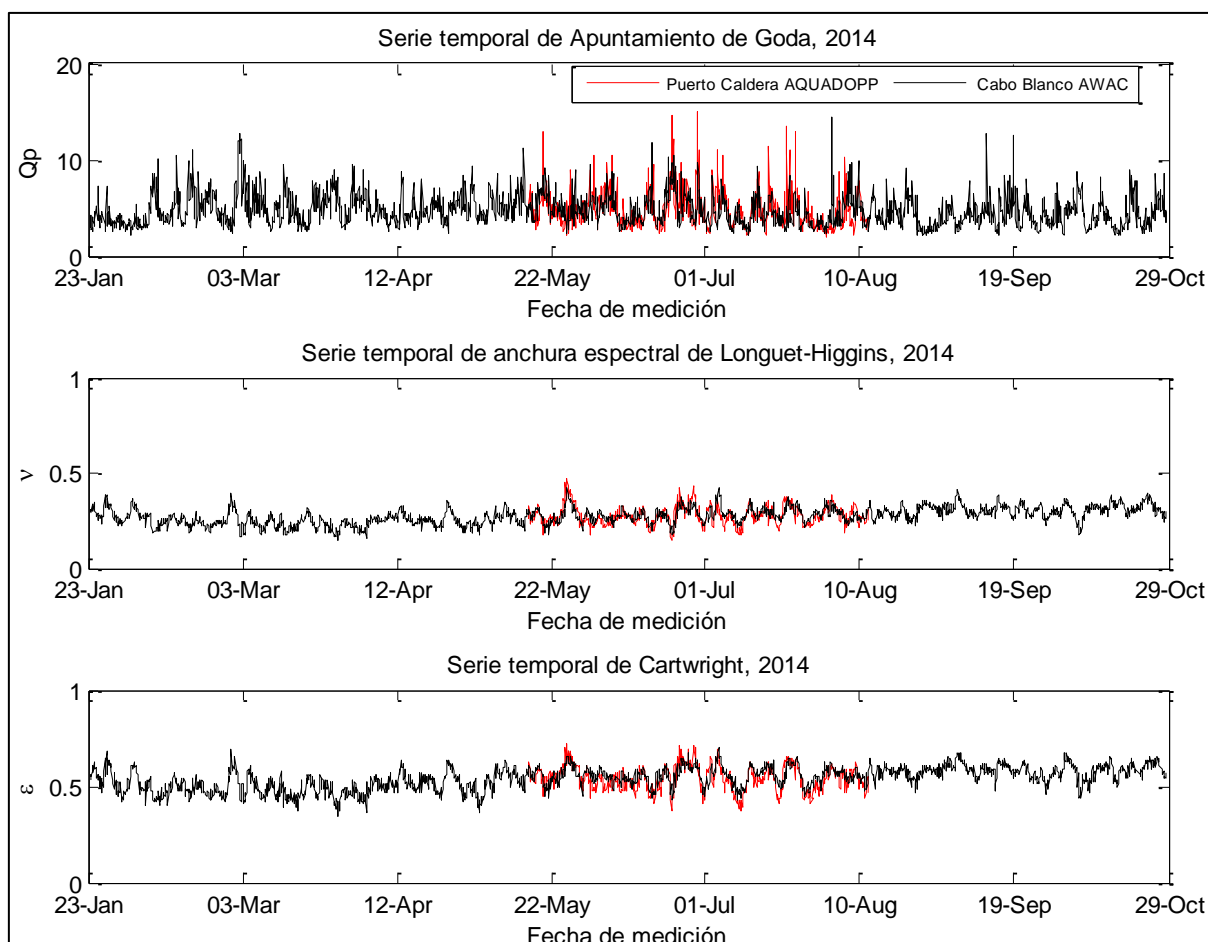


Figura 4.17. Parámetros espectrales obtenidos de las mediciones de oleaje realizadas en Puerto Caldera y Cabo Blanco.

#### 4.4. Ajuste del $\gamma$ para los estados de mar de un pico

Para realizar el ajuste del parámetro  $\gamma$  a los estados de mar medidos, se procedió a eliminar la energía correspondiente a periodos mayores de 30 s, es decir, una frecuencia menor a 0,033 Hz, ya que estos corresponde a oleaje infragravitatorio de periodos largos y se eliminó también la energía relacionada a periodos menores a 5 s (frecuencias mayores a 0,2 Hz), debido a que corresponden mayormente a oleaje de viento local.

Entre los 2927 estados de mar obtenidos a partir de los equipos de medición en ambos lugares, se tienen estados de mar de un pico (Figura 4.18), dos picos (Figura 4.19), así como de varios picos (Figura 4.20). Debido a que la función teórica JONSWAP fue creada para espectros de oleaje tipo *swell* de un solo pico, se procedió a una inspección visual de los estados de mar y se seleccionó los estados de mar de un solo pico. Esto dio como resultado un total de 187 estados de mar elegidos para Caldera y 471 para Cabo Blanco. Siendo el 22,5% del total de estados de mar registrados.

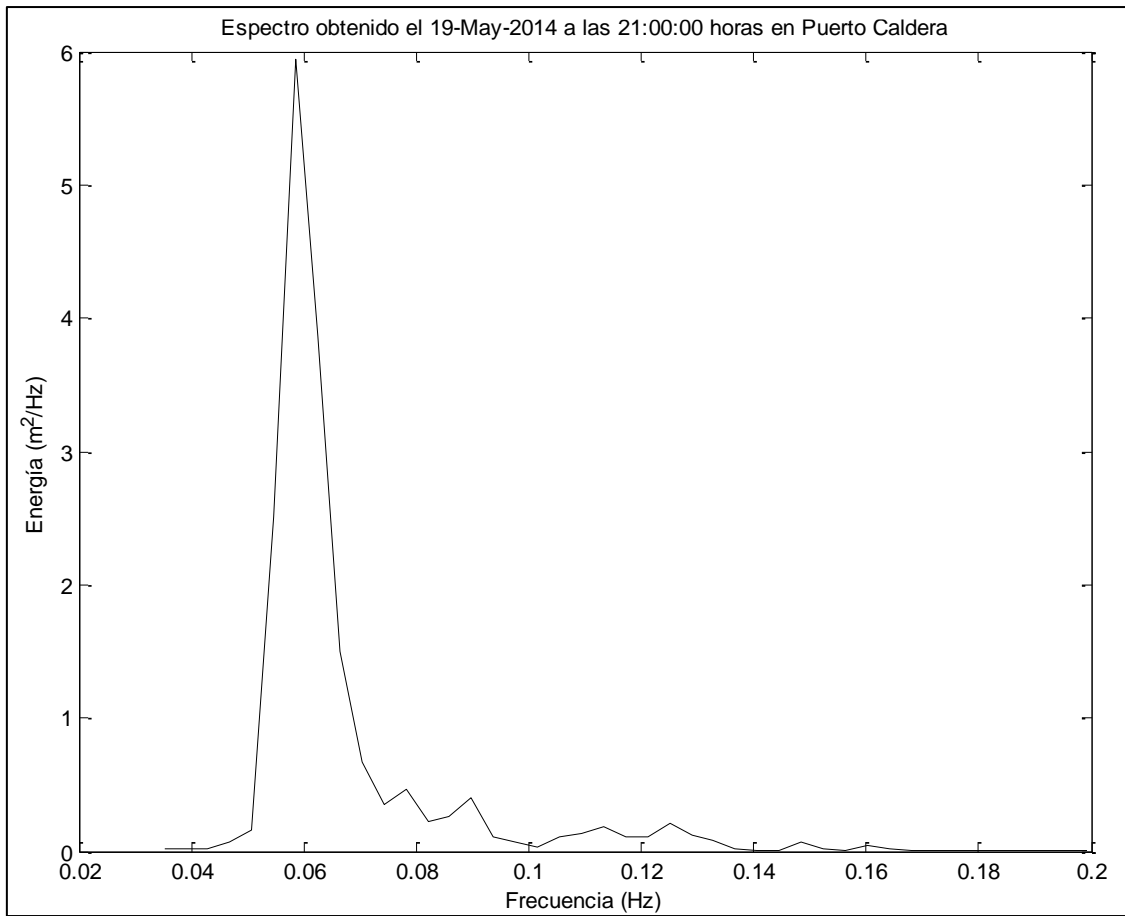


Figura 4.18. Ejemplo de espectro de un pico, obtenido en Puerto Caldera el 19 de mayo del 2014 a las 21:00:00 horas.

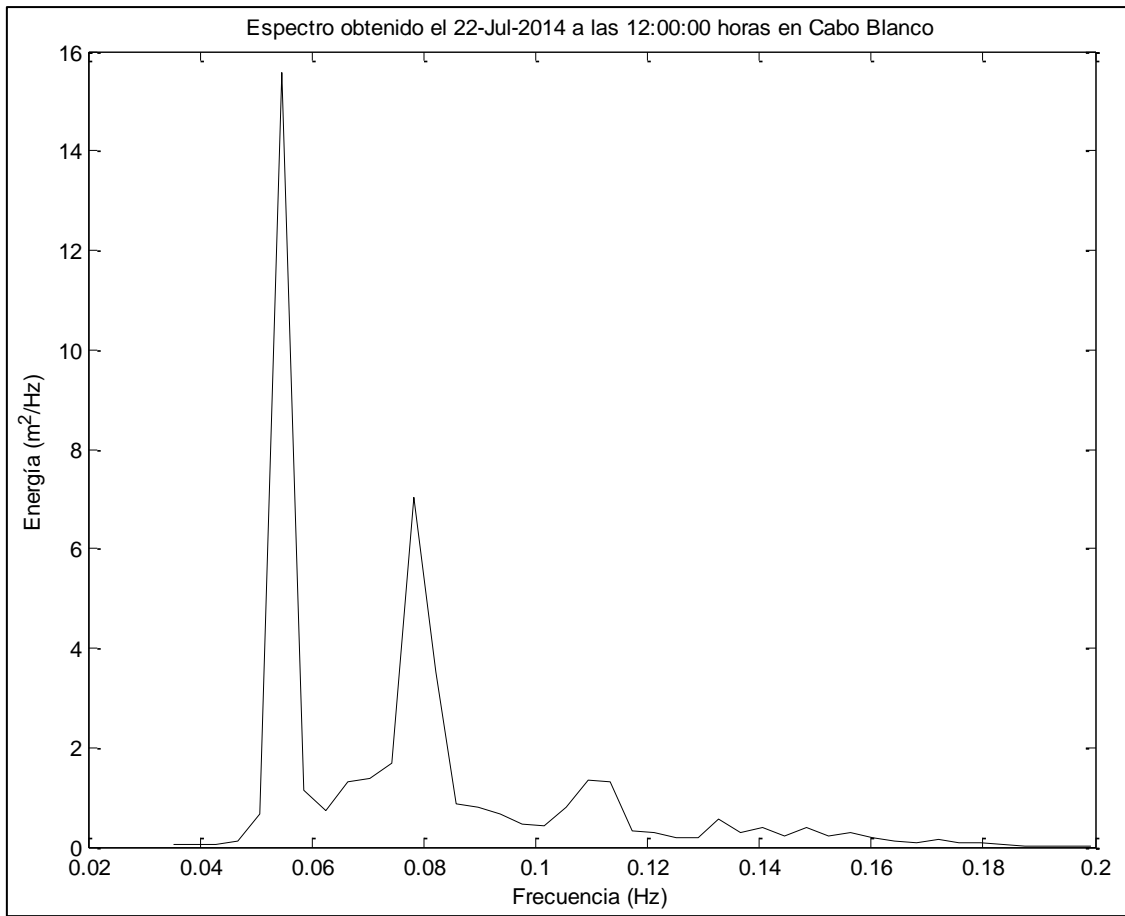


Figura 4.19. Ejemplo de espectro de dos picos, obtenido en Cabo Blanco el 22 de julio del 2014 a las 21:00:00 horas.

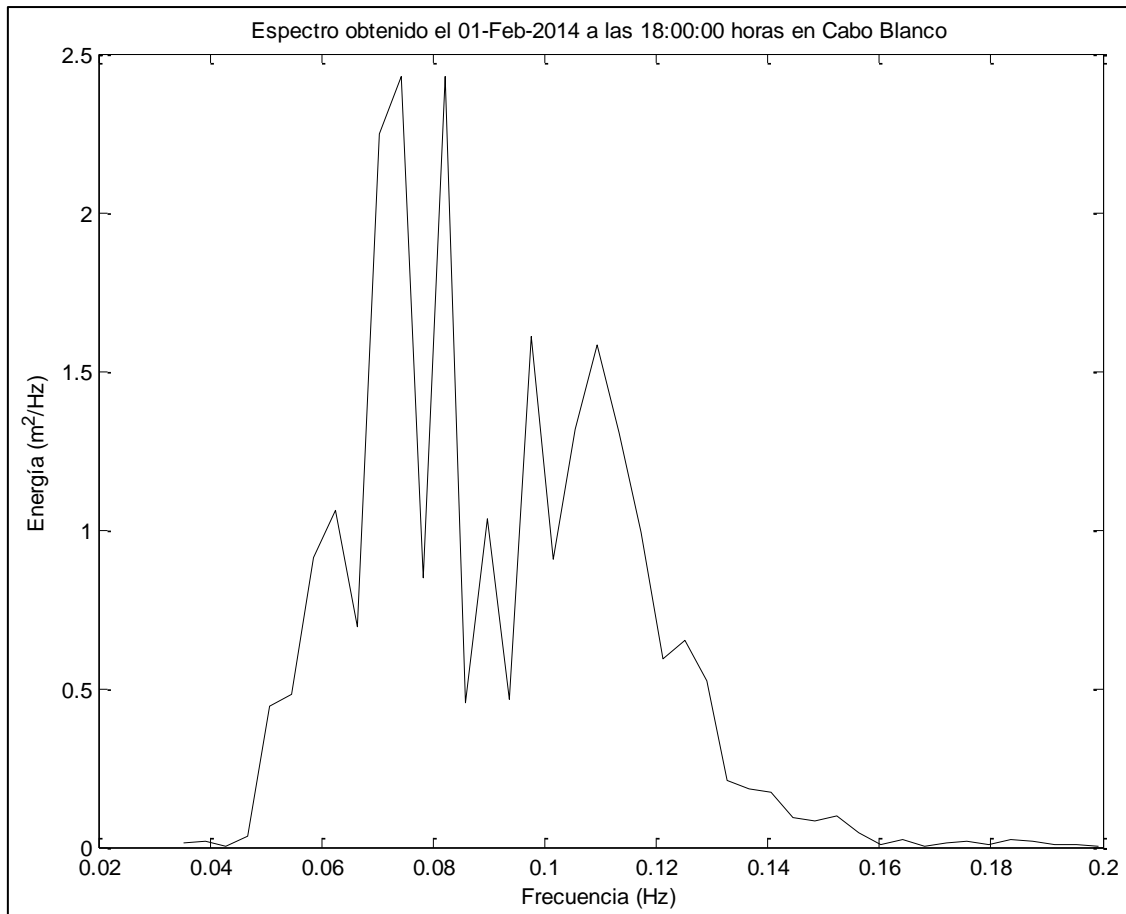


Figura 4.20. Ejemplo de espectro de varios picos, obtenido en Cabo Blanco el 01 de febrero del 2014 a las 18:00:00 horas.

Cabe destacar que los espectros de dos picos se pueden analizar separando el primer pico del segundo, esto se debe a que el segundo pico corresponde a una tormenta pasada y el primer pico a una tormenta que recién llegó. El oleaje tipo *swell* que llega a nuestras costas recorre grandes distancias, por lo tanto mientras se está disipando una tormenta ya viene el oleaje con periodos altos de otra tormenta que vienen a mayor velocidad dándose el registro de ambos picos de energía. Las tormentas pueden llegar a registrarse durante varios días.

Una vez obtenidos los estados de mar correspondientes para el análisis, se procedió a escoger el parámetro  $\gamma$  que mejor ajustara los espectros. Este ajuste se realizó variando únicamente el factor pico, dejando todas las demás variables fijas, como lo son  $\sigma_a \cong 0,07$  y  $\sigma_b \cong 0,09$ . El  $T_p$  corresponde al periodo donde se da la energía máxima y el  $H_s$  corresponde a  $H_{m0}$ , es decir, el resultado dado por la ecuación (20).



Se realizó una rutina de cálculo en Matlab donde para cada estado de mar se calculara el  $T_p$  y el  $H_m0$ , así como se barrierá el parámetro  $\gamma$  de 1 a 100 debido a lo obtenido en el análisis de sensibilidad. Esta misma rutina de cálculo daría como resultado el factor pico que mejor ajustara el espectro medido mediante el  $R^2$  más alto, utilizando dos cifras significativas. Paralelamente se calculó la raíz del error cuadrático medio y como se observa en los espectro ejemplificados entre mayor  $R^2$ , menor es el RMSE, lo que indica un buen ajuste del espectro JONSWAP a los datos medidos.

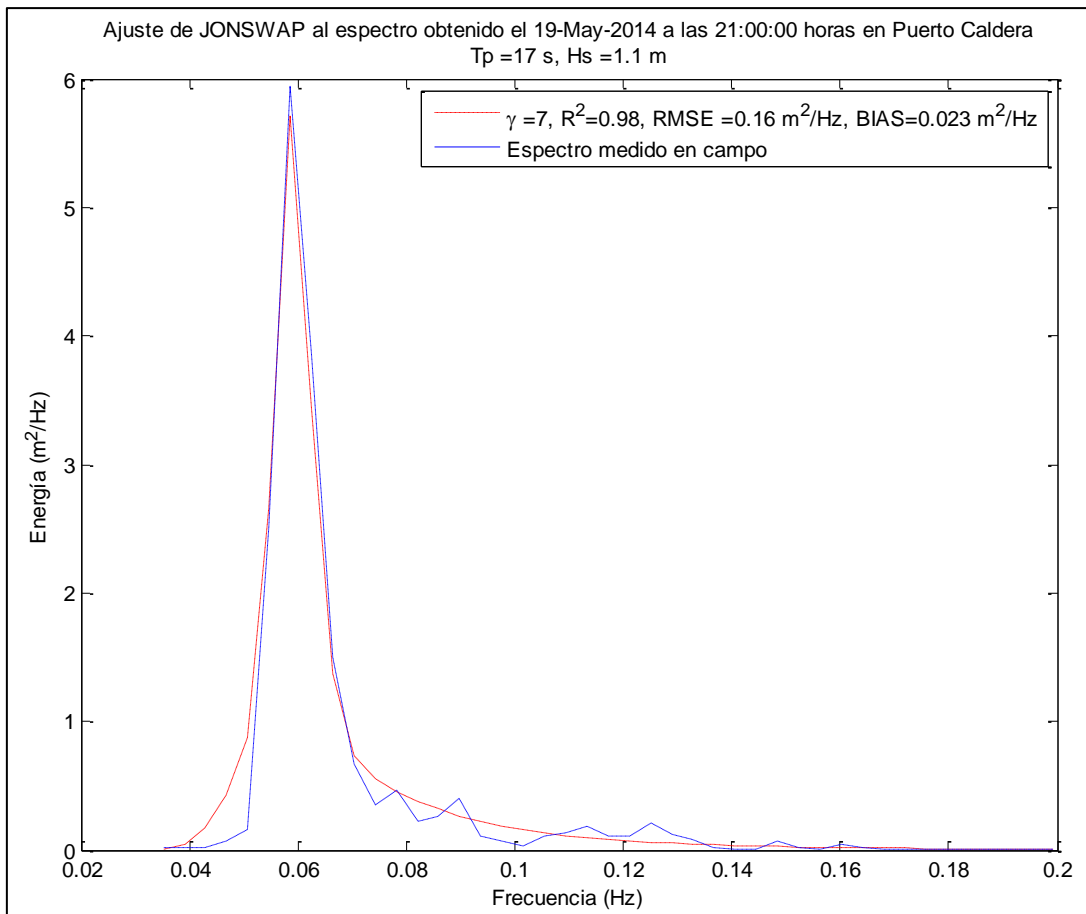


Figura 4.21. Ajuste del espectro teórico JONSWAP al espectro obtenido el 19 de mayo del 2014 a las 21:00:00 horas en Puerto Caldera.

En la Figura 4.21 se muestra un buen ajuste realizado del espectro JONSWAP a un estado de mar medido en Caldera, se muestra un buen ajuste con un  $R^2=0,98$  para un  $\gamma=7$ . Por otro lado, en la Figura 4.22 se ejemplifica de igual forma para Cabo Blanco, donde se tiene un  $R^2=0,96$  y un  $\gamma=10$ .

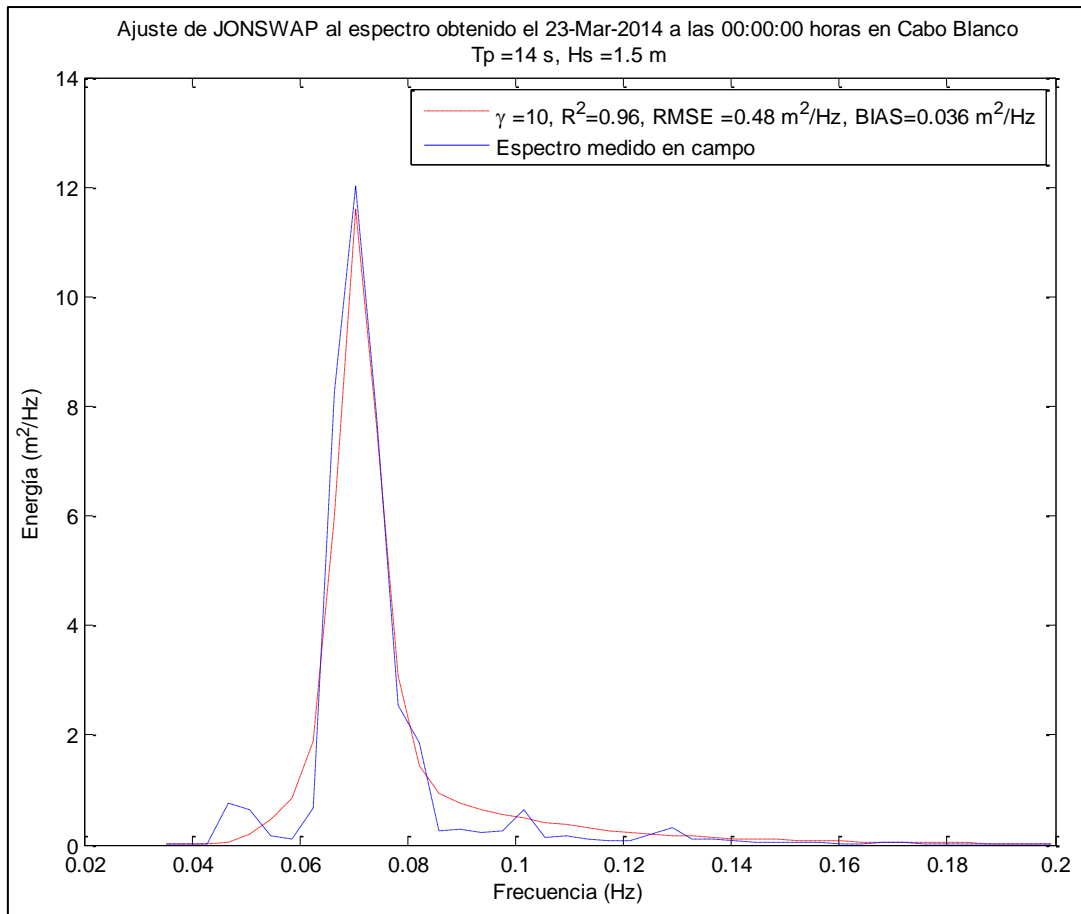


Figura 4.22. Ajuste del espectro teórico JONSWAP al espectro obtenido el 23 de mayo del 2014 a las 00:00:00 horas en Cabo Blanco.

En el Cuadro 4.1 se muestran los resultados obtenidos de los parámetros de bondad de ajuste del espectro teórico al medido en el campo, se ven los valores mínimos, los máximos y los promedios. En cuanto al BIAS, el promedio de 0,056 m<sup>2</sup>/Hz refleja un ajuste donde los espectros teóricos tienden a ser un poco más energéticos que los espectros medidos en el campo.

Además, en cuánto a RMSE se observa un promedio de 1,428 m<sup>2</sup>/Hz, y con un valor máximo que llama la atención de 14,641 m<sup>2</sup>/Hz. Al buscar el espectro con este valor de RMSE se observa que su máximo de energía es aproximadamente 210 m<sup>2</sup>/Hz, correspondiendo la magnitud del RMSE a un 6,97% de ese pico de energía, siendo un valor aceptable. Por último, el R<sup>2</sup> tiene un valor mínimo de 0,664 y un máximo de 0,99 lo que indica el buen ajuste de dichos modelos teóricos a los medidos en campo.

Cuadro 4.1. Parámetros de bondad de ajuste del modelo teórico JONSWAP al observado en campo.

<b>Parámetro</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Promedio</b>
BIAS (m <sup>2</sup> /Hz)	-0,451	0,672	0,056
RMSE (m <sup>2</sup> /Hz)	0,069	14,641	1,428
R <sup>2</sup>	0,664	0,99	0,883

Una vez realizado los ajustes del espectro teórico JONSWAP a los medidos en el campo, se procedió a su análisis y buscar relaciones entre variables cómo lo son el Hm0 y Tp, además observar si existe algún comportamiento del  $\gamma$  a través del tiempo.

En las Figuras 4.23 y 4.24 se muestran las alturas obtenidas tanto por el espectro teórico como el obtenido en las mediciones realizadas en Puerto Caldera y Cabo Blanco respectivamente. De esta manera se comprueba que se aplicó de una manera correcta la función teórica espectral a los datos medidos, ya que esta siempre va a tender a igualar energías y por lo tanto a igualar alturas significantes.

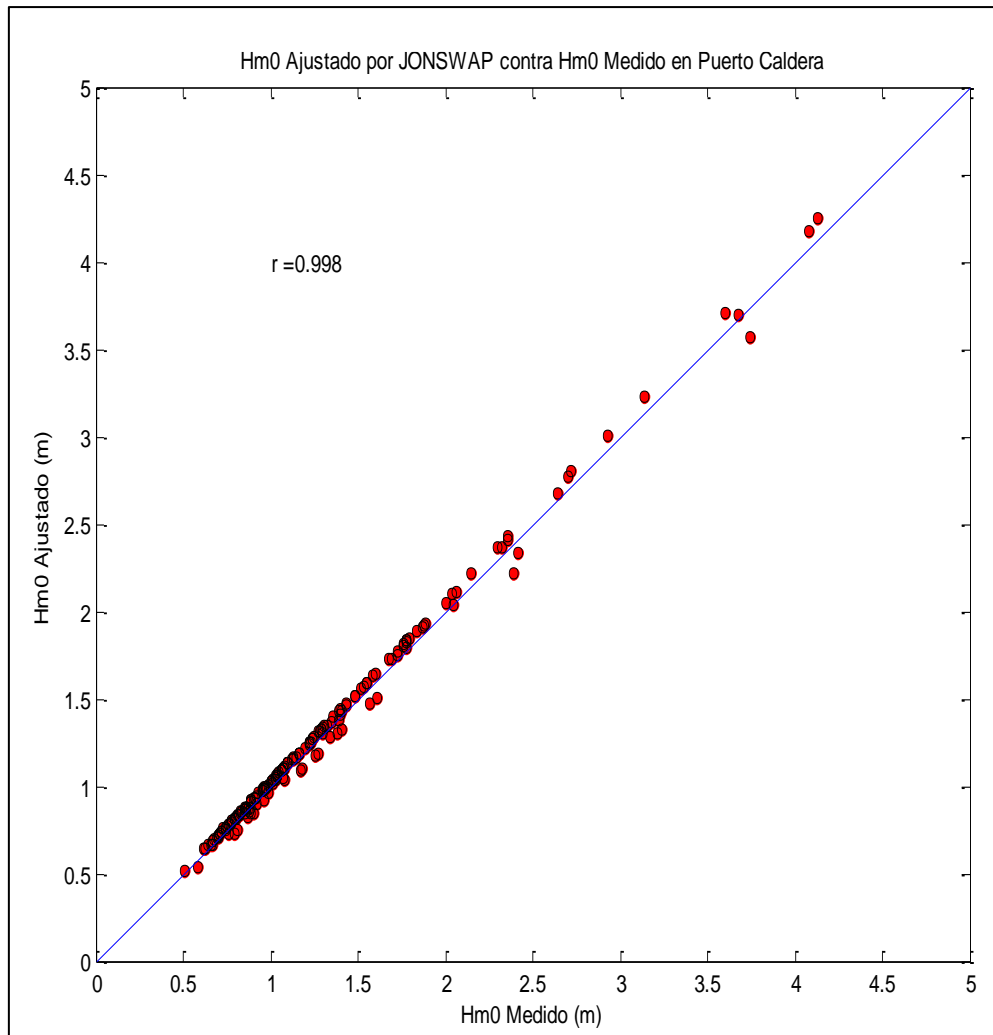


Figura 4.23. Hm0 obtenido de espectro JONSWAP ajustado contra Hm0 de espectro medido en campo para Puerto Caldera.

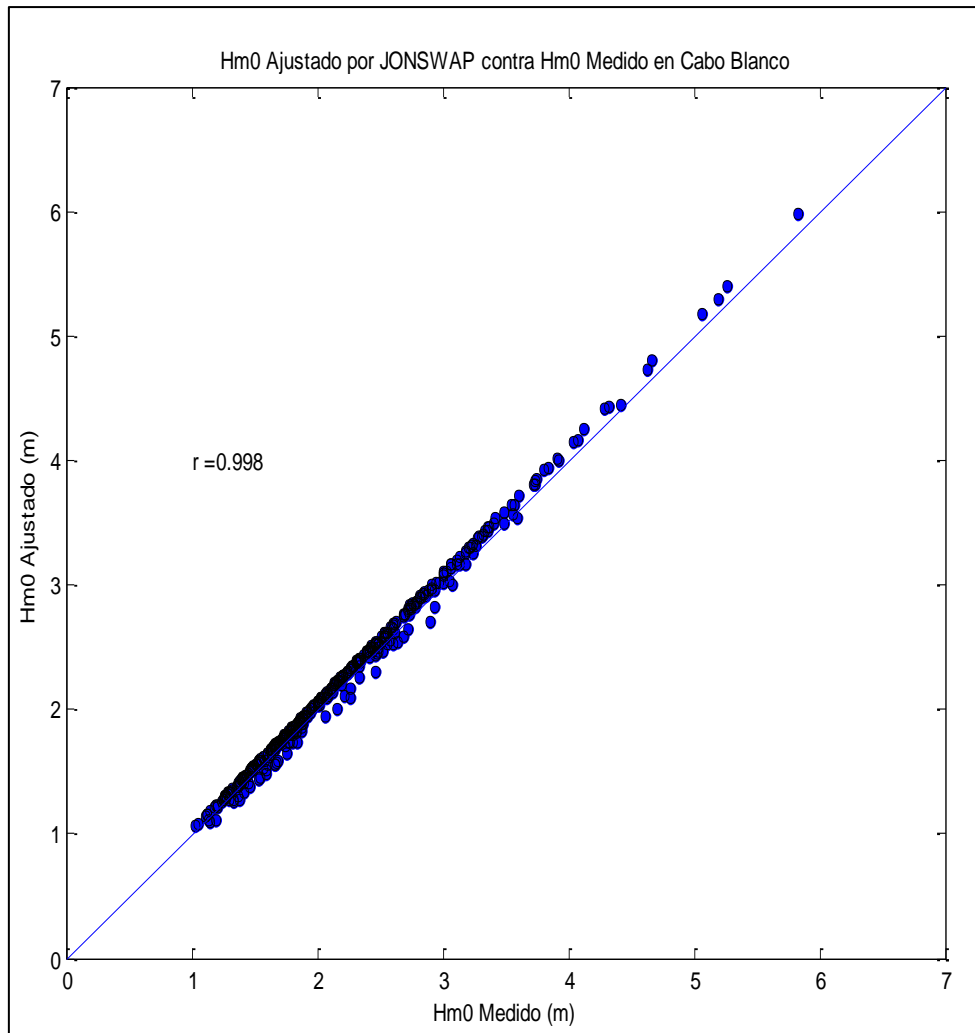


Figura 4.24. Hm0 obtenido de espectro JONSWAP ajustado contra Hm0 de espectro medido en campo para Cabo Blanco.

Otra forma de visualizar el ajuste realizado a los 658 espectros de un pico se presenta en la Figura 4.25 para Puerto Caldera y la Figura 4.26 para Cabo Blanco. Los puntos rojos son los estados de mar escogidos para el análisis. Se puede observar que altas alturas no son siempre descritos por espectros de un pico, igualmente sucede con los periodos pico, periodos picos altos no se relacionan con espectros de un pico.

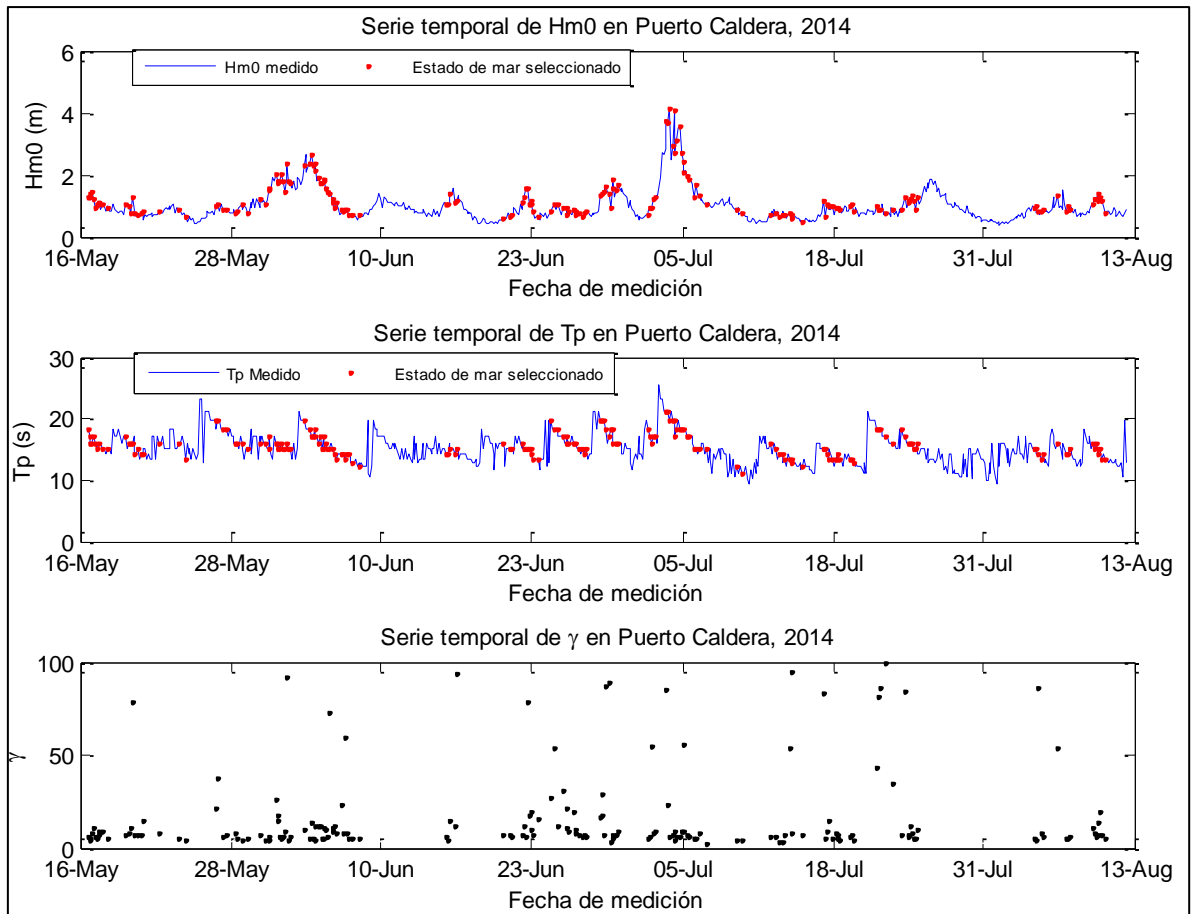


Figura 4.25. Parámetros de los espectros utilizados para el ajuste de JONSWAP en Puerto Caldera para el año 2014.

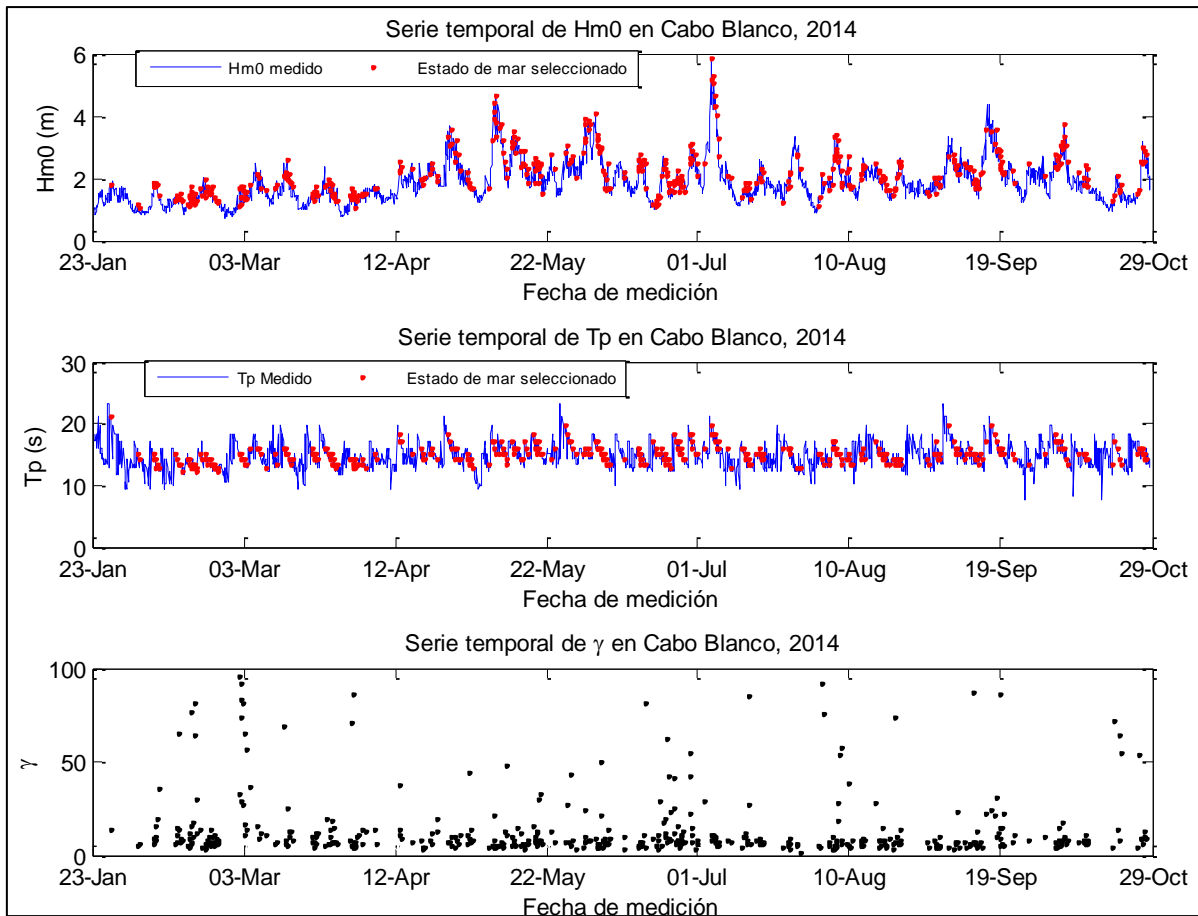


Figura 4.26. Parámetros de los espectros utilizados para el ajuste de JONSWAP en Cabo Blanco para el año 2014.

Como se observa en los gráficos de serie temporal de  $T_p$ , existe un valor pico que luego va descendiendo hasta que da un salto a otro valor pico de  $T_p$ , siendo un comportamiento presente a lo largo de toda la serie. Esto demuestra la llegada de otra tormenta con un mayor periodo pico.

Al marcar con rojo los estados elegidos, se tiene que estos corresponden a los estados de mar después de que la tormenta ha llegado. Esto se debe a que cuando llega, la energía de ella y la tormenta anterior está presente y por lo tanto se vuelve un espectro de dos picos o más, en cambio, conforme pasan los días, la tormenta que llegó de primero va perdiendo energía y solo queda la recién registrada por lo que se vuelve espectro de un pico. Un comportamiento que debe seguirse investigando y que no se profundizará en este trabajo.

Por otro lado, en las figuras anteriores no se muestra una relación del parámetro  $\gamma$  con el tiempo, es decir, se da en un rango de valores, aproximadamente entre 3 a 15 en todo el año. Ahora bien, se busca una relación del  $\gamma$  con la altura significativa o el periodo pico.

Para poder determinar si existe una relación del factor pico con los parámetros  $H_{m0}$  y  $T_p$ , se realizaron los gráficos de las Figuras 4.27 y 4.28 para Puerto Caldera y en las Figuras 4.29 y 4.30 para Cabo Blanco.

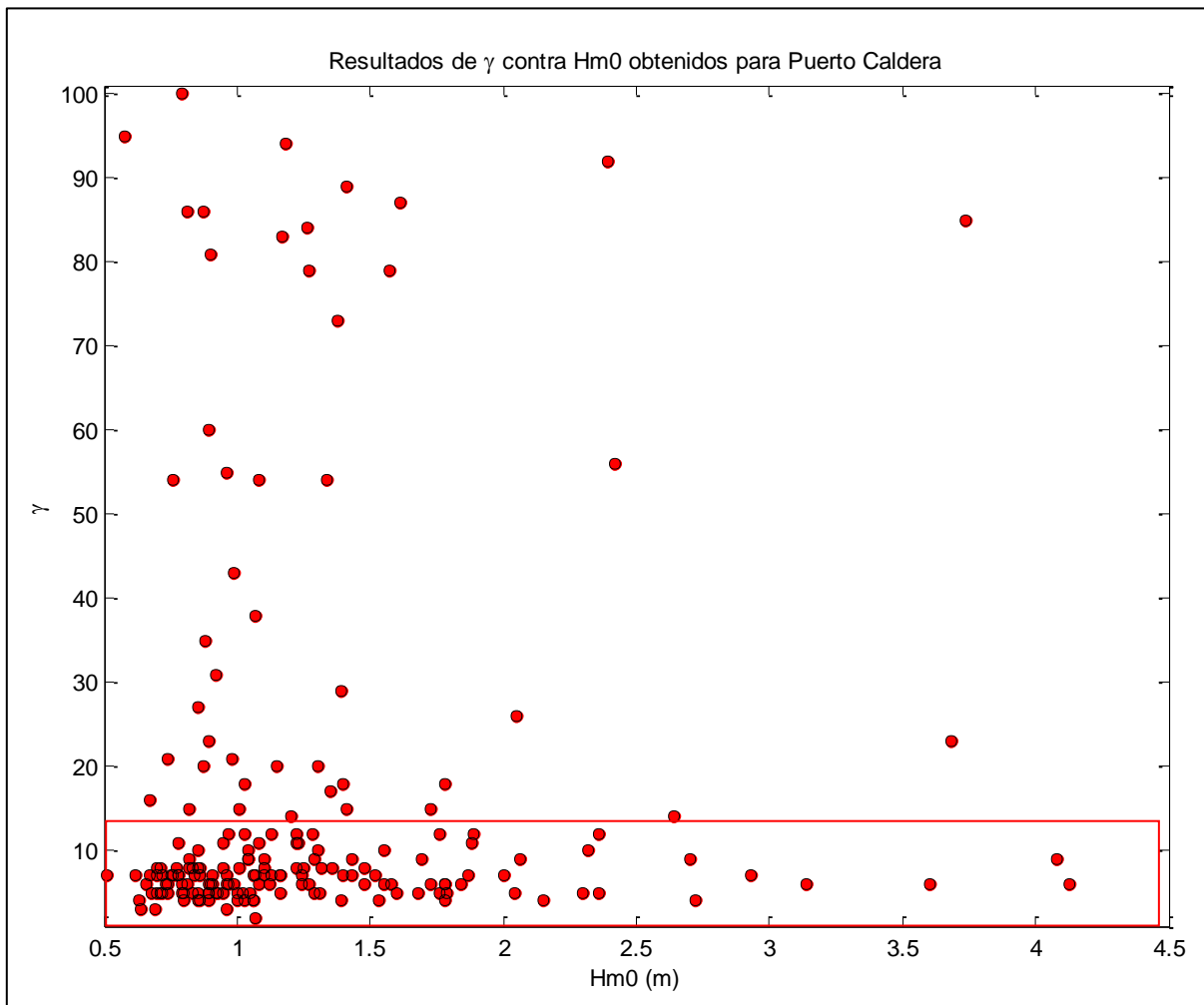


Figura 4.27.  $H_{m0}$  contra  $\gamma$  para los espectros ajustados por JONSWAP en Puerto Caldera.

Se puede observar cómo existe una gran dispersión de  $\gamma$  y no se muestra una tendencia a un comportamiento que relacione este parámetro con  $H_{m0}$ . Cuando  $H_{m0}$  aumenta se aprecia como  $\gamma$  tiende a variar poco, contrario a alturas pequeñas donde existe una gran dispersión de



este parámetro. En el rectángulo rojo señalado se muestra dónde se ubica la mayoría de valores de  $\gamma$ .

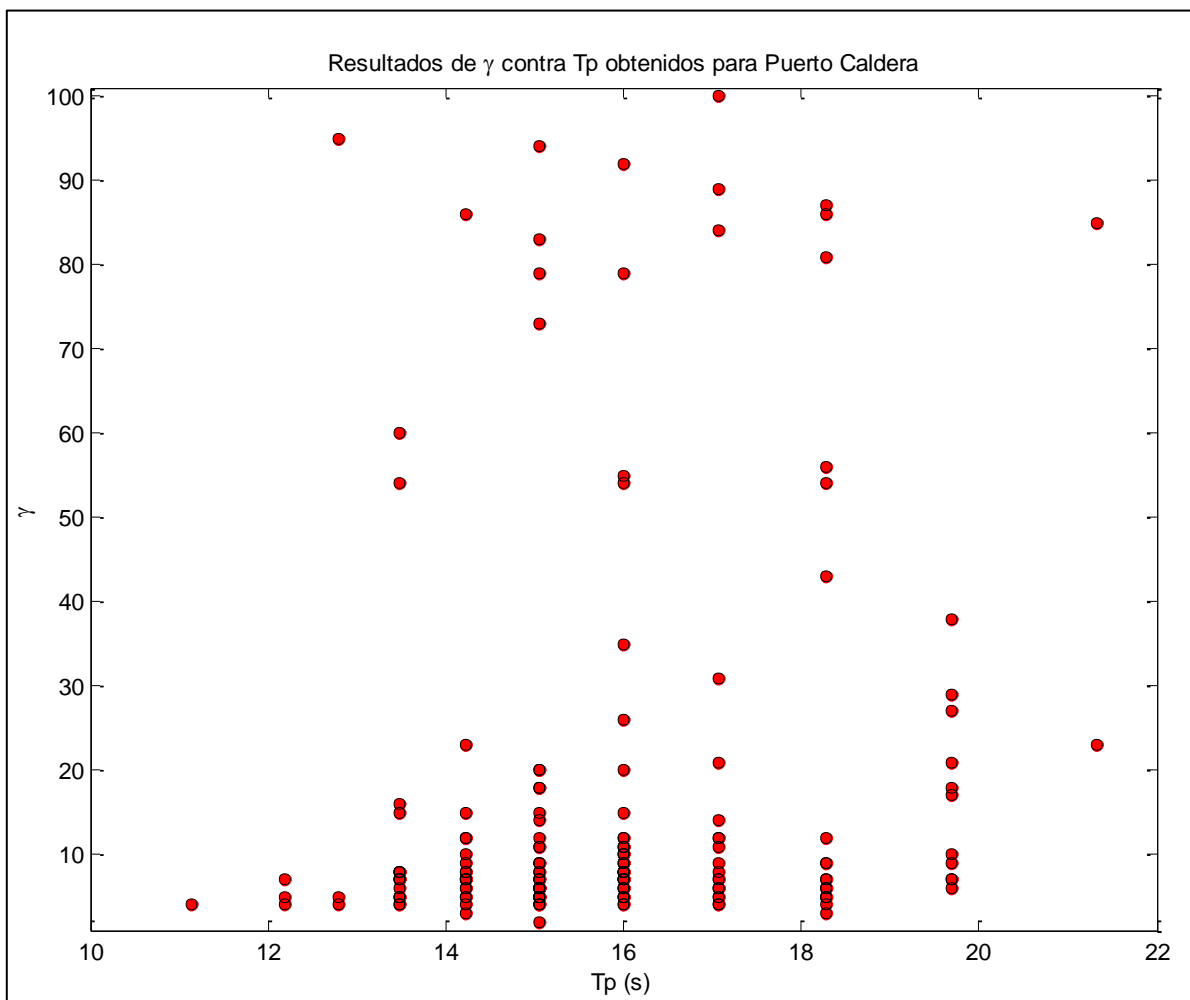


Figura 4.28.  $T_p$  contra  $\gamma$  para los espectros ajustados por JONSWAP en Puerto Caldera.

En cuanto a la relación con el periodo pico, no existe relación alguna con esta. Existe una gran dispersión del  $\gamma$  con respecto a  $T_p$  y no se puede deducir algún comportamiento que relacione ambas variables.

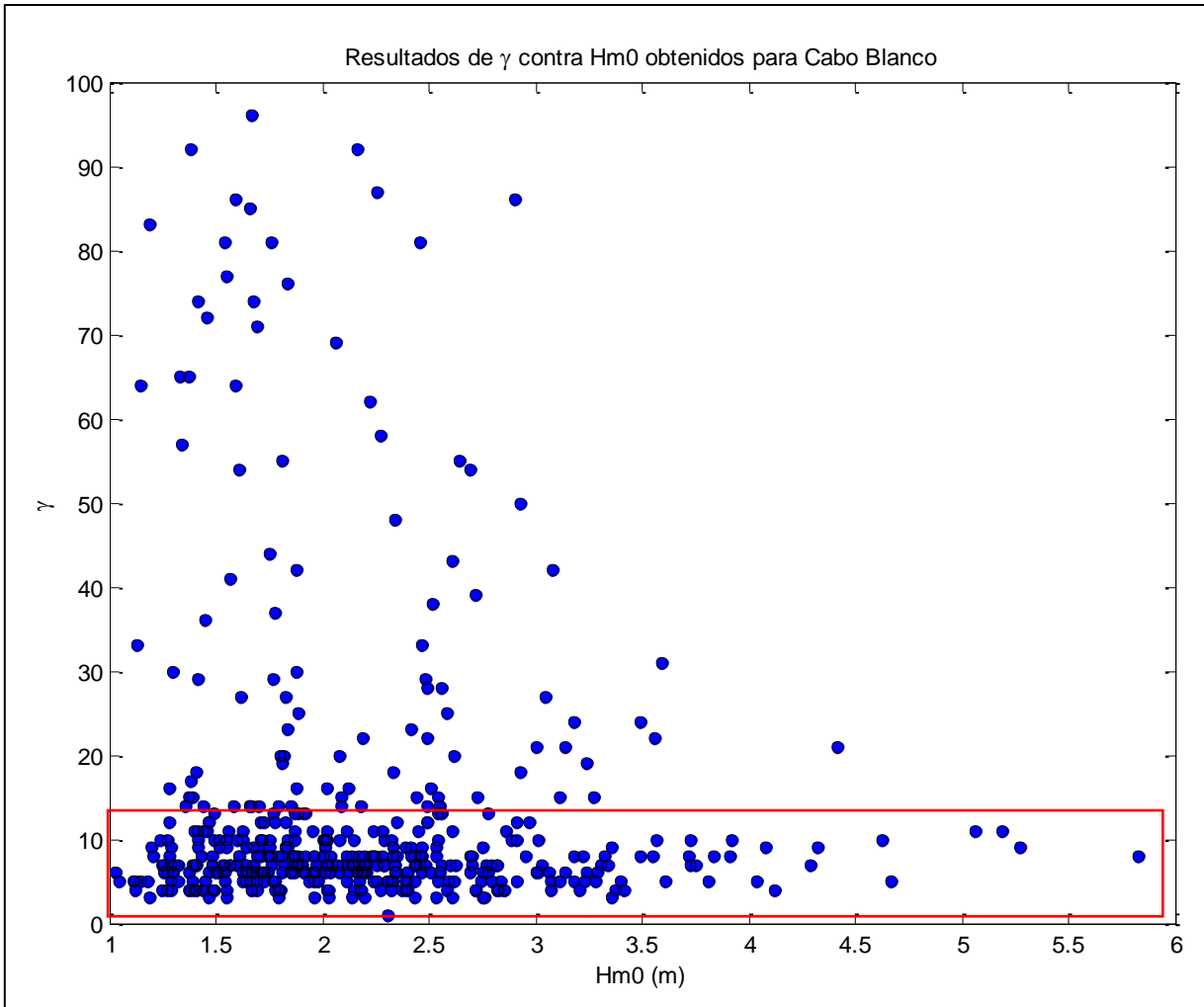


Figura 4.29.  $H_m0$  contra  $\gamma$  para los espectros ajustados por JONSWAP en Cabo Blanco.

Para Cabo Blanco se obtuvieron resultados similares a los mostrados para Puerto Caldera. No se encontró una relación entre  $H_m0$  y  $\gamma$  y se refuerza el comportamiento de que a menor altura existe mayor dispersión del factor pico. Para alturas de gran altura se aprecia que el  $\gamma$  ronda los valores entre 3 y 12 aproximadamente.

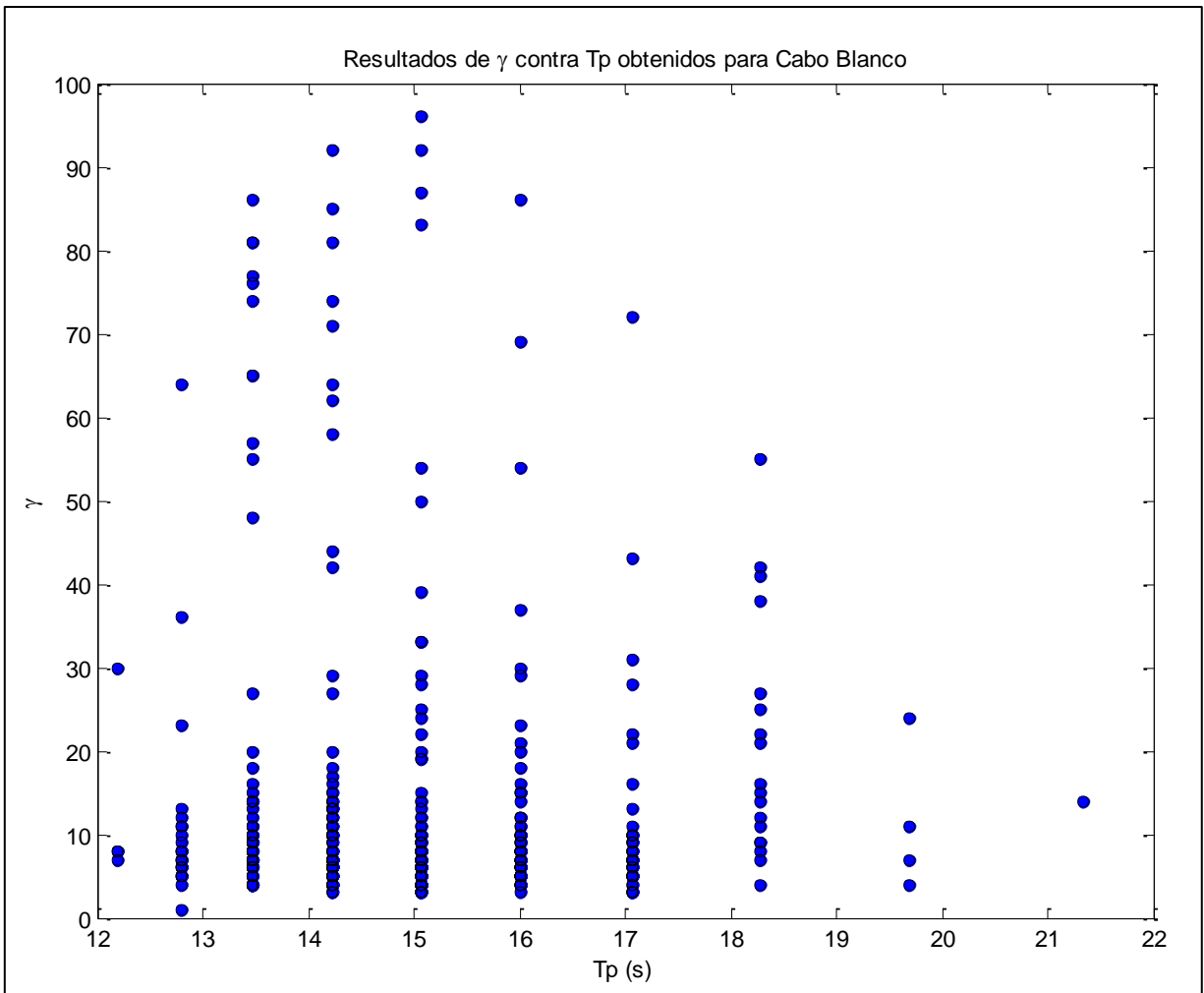


Figura 4.30.  $T_p$  contra  $\gamma$  para los espectros ajustados por JONSWAP en Cabo Blanco.

Al igual que lo mostrado en Puerto Caldera, no existe una relación  $\gamma$  y  $T_p$ . Existe una gran dispersión, de manera que se puede concluir que no se encuentra algún comportamiento típico entre ambas variables.

Al ver que no existe relación entre las variables  $T_p$ ,  $H_{m0}$  y  $\gamma$ , se procedió a analizar el conjunto de valores obtenidos del parámetro espectral en estudio. En la Figura 4.31 se tiene el histograma del  $\gamma$  para los espectros analizados y en la Figura 4.32 el gráfico de probabilidad acumulada.

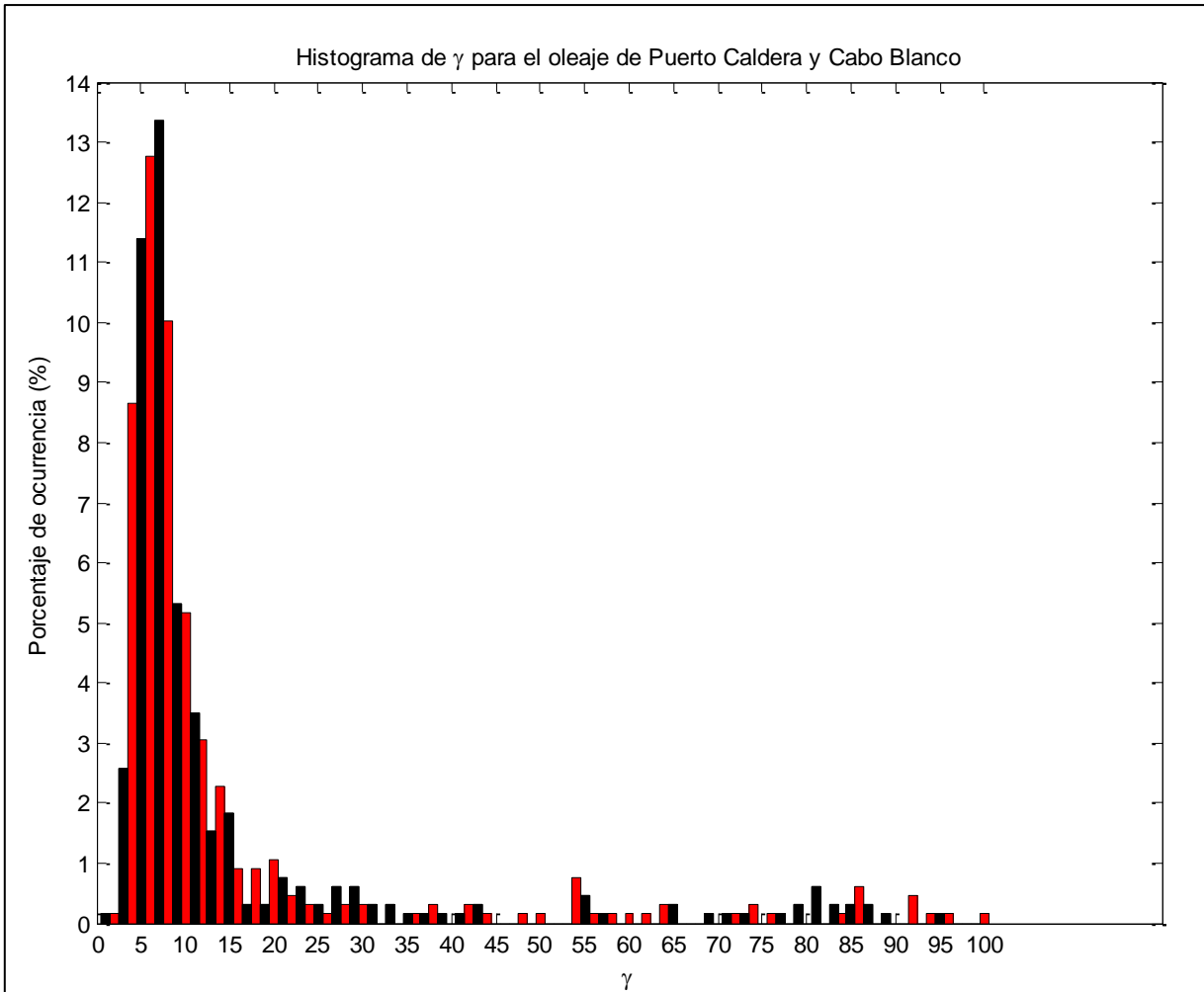


Figura 4.31. Histograma de  $\gamma$  para el oleaje incidente en Puerto Caldera y Cabo Blanco.

Aproximadamente más del 65 % de los valores obtenidos se encuentran entre el rango de 4 a 10. El valor que más se presenta es el de  $\gamma=7$ , con un 13,4 %, es decir, ajusta un total de 88 espectros.

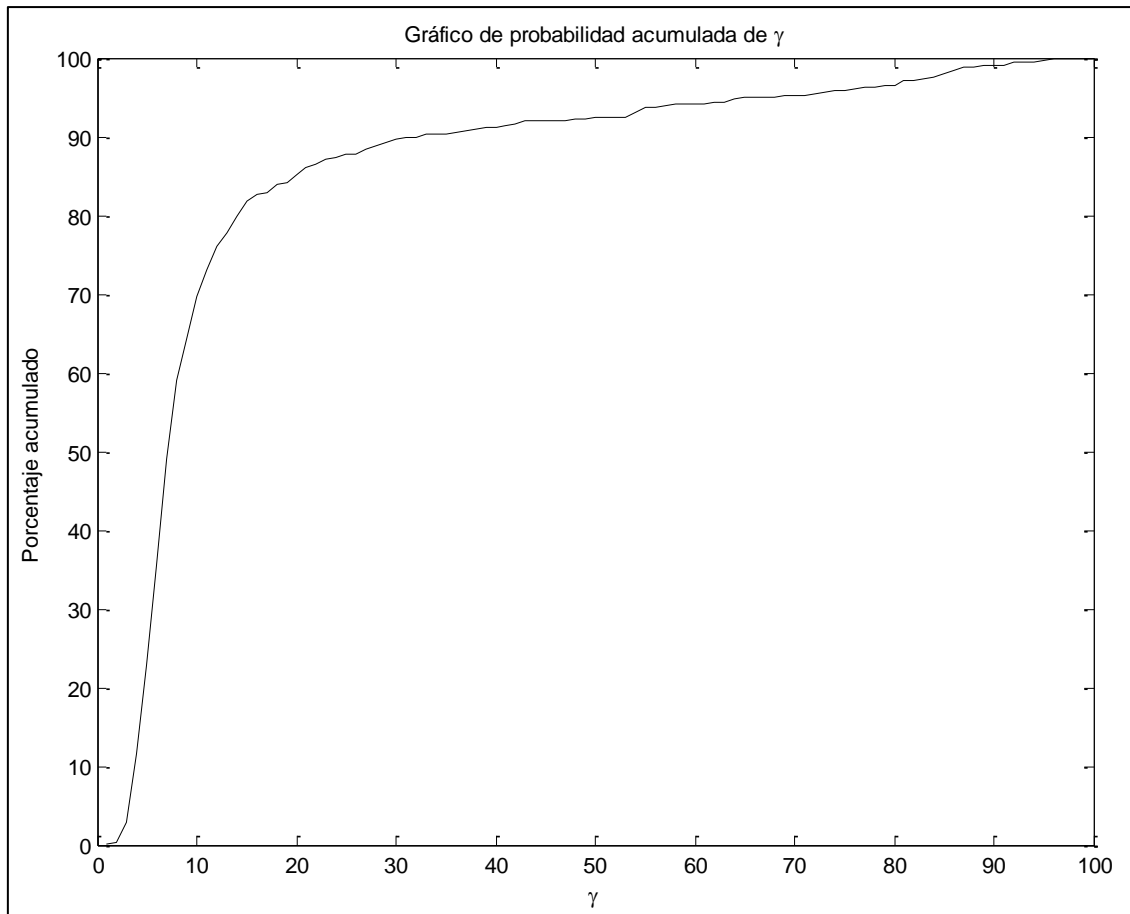


Figura 4.32. Gráfico de probabilidad acumulada de  $\gamma$ .

Es interesante observar valores altos de  $\gamma$  y ver cómo ajustan de bien los espectros medidos en campo. Esto se debe a que son espectros con una energía pico alta o la energía está distribuida en pocas frecuencias que junto con los valores de  $T_p$  y  $H_{m0}$  hacen que se tengan  $\gamma$  como el observado en la Figura 4.33.

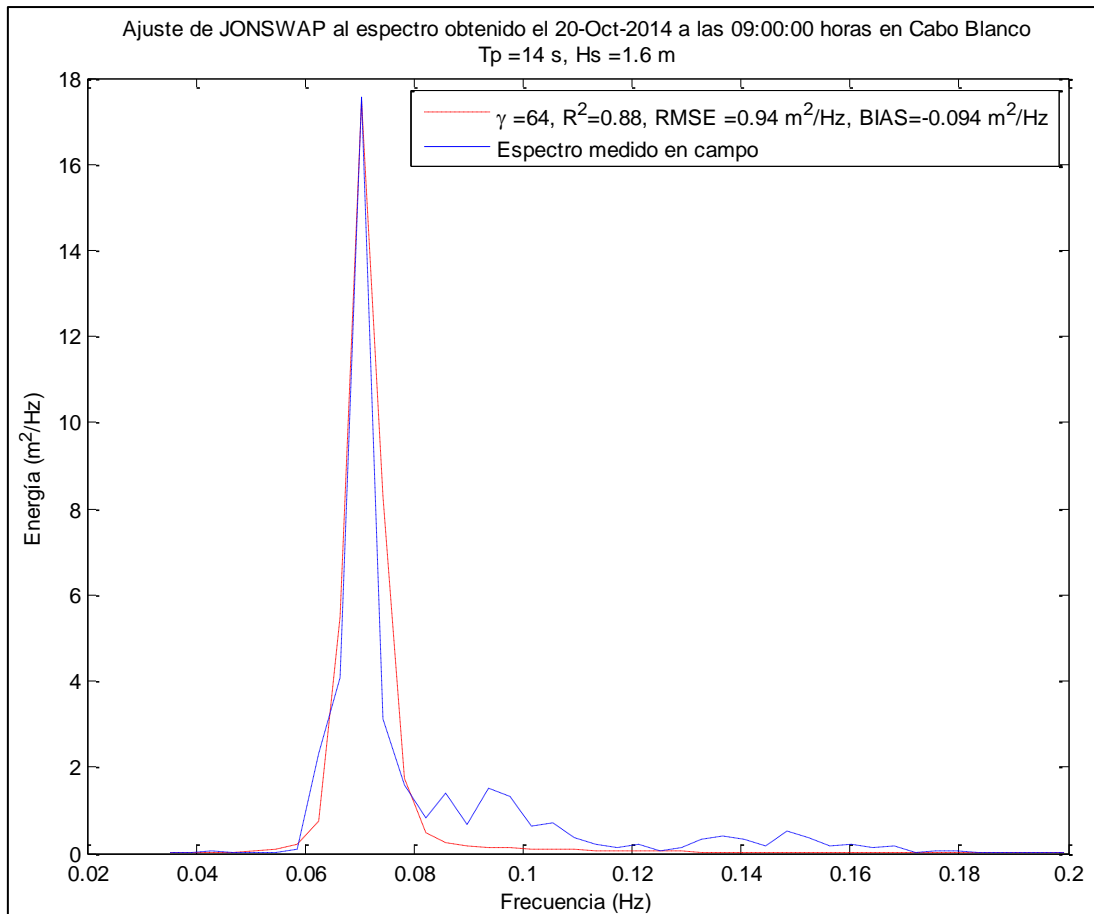


Figura 4.33. Ejemplo de ajuste JONSWAP con un  $\gamma$  alto de 64.

Cabe destacar que la función JONSWAP modificada por Goda es sensible al cambio de  $H_{m0}$  como se observó en la sección 4.1, por lo tanto un pequeño cambio de este valor puede hacer que el valor del parámetro espectral  $\gamma$  varíe y tienda a aumentar o disminuir de forma significativa.

Por último, Goda (1983) indica que existe una relación entre  $\gamma$  y  $Q_p$ , basado en que Ming-Yang Su (1982) notó una relación lineal entre estos parámetros. Al relacionar estos parámetros con los resultados obtenidos, se puede observar en la Figura 4.34 un ajuste exponencial que describe dicha relación con un  $R^2$  de 0,83, y no una relación lineal.

Es evidente que entre mayor es el factor pico, el apuntamiento de Goda tiene una mayor dispersión, contrario a lo que se observa en el rectángulo azul visto en el gráfico. Con valores de  $Q_p$  menores a 9 y de  $\gamma$  menores a 20, el ajuste exponencial describe de una buena manera la relación existente entre ambos.

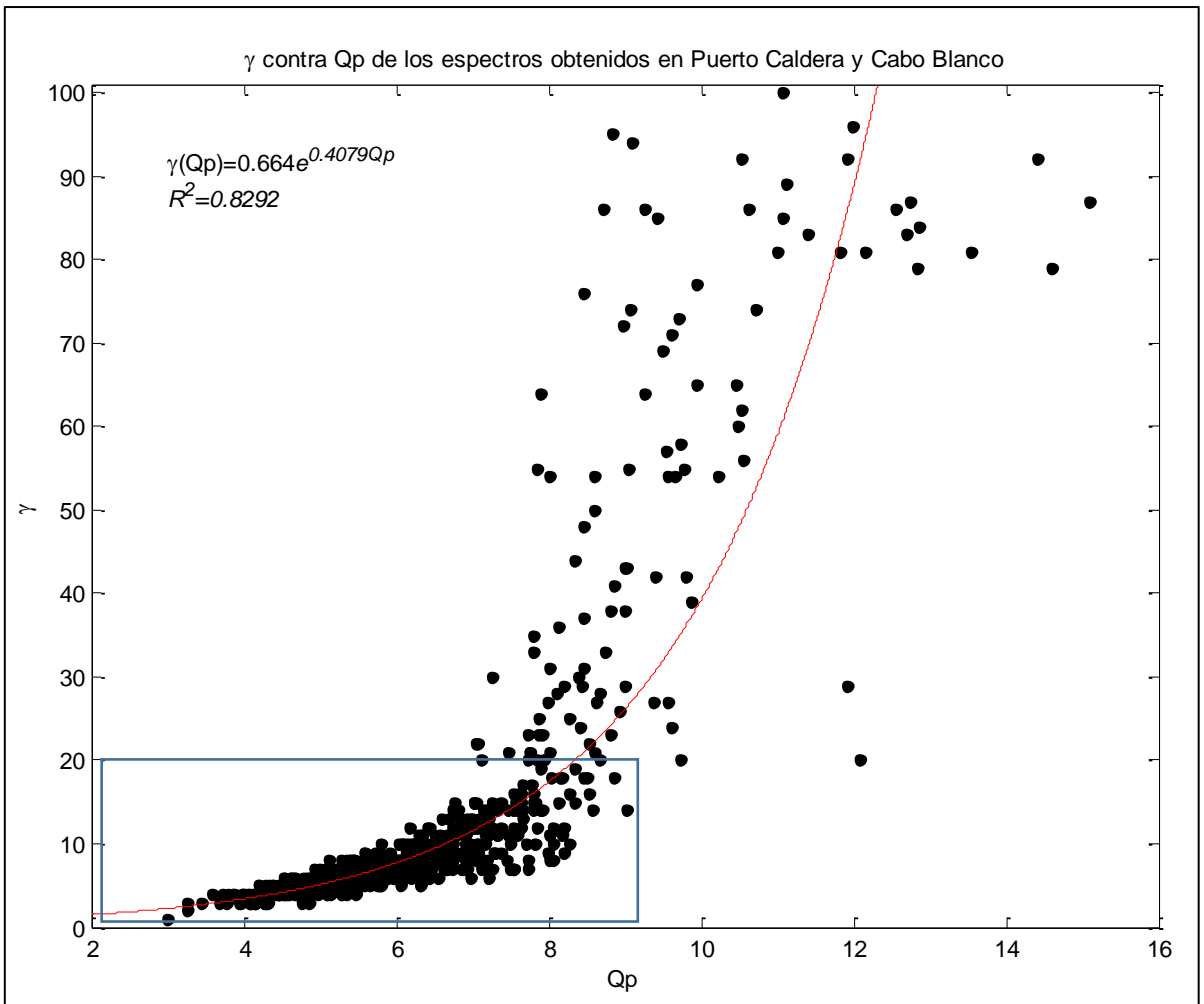


Figura 4.34. Relación entre  $\gamma$  y  $Qp$  para los espectros analizados.

## Capítulo 5. Propagación de oleaje mediante el modelo SWAN

Una vez analizado los valores ajustados dados de  $\gamma$ , se procedió a aplicar los resultados obtenidos a propagaciones numéricas de oleaje mediante el modelo SWAN. Para poder utilizar el modelo se introdujo como variables la batimetría del golfo de Nicoya dada por IMARES, como se muestra en la Figura 5.1 . La malla de batimetría es cada 40 m, 2 km a partir de la costa, de 80 m a partir de los 10 km, aproximadamente, y de 100 m en aguas profundas.

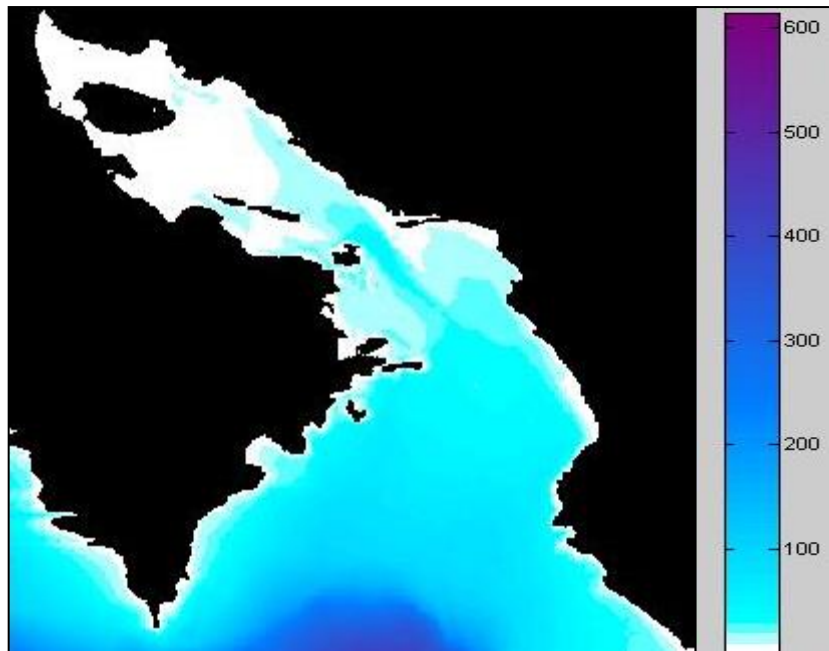


Figura 5.1. Batimetría del Golfo de Nicoya utilizada en el modelo.

Se introdujo dos mallas de cálculo para el proceso de diferencias divididas que se realizó, una malla de cálculo gruesa de  $\Delta x=180$  m y  $\Delta y=180$  m, con una malla detalle en el Puerto Caldera con  $\Delta x=15$  m y  $\Delta y=15$  m. Para originar el oleaje por propagar se utilizó un punto de referencia en las siguientes coordenadas CRTM05: 401837,93 Longitud Oeste y 1050535,67 Latitud Norte. En ese punto se introdujeron los siguientes 15 casos:



Cuadro 5.1. Casos estacionarios que se simularon en SWAN.

Tp (s)	Dir (°)	Marea (m)	$\gamma$	$\sigma$
15	202,5	0	3,3	32
15	202,5	0	5	32
15	202,5	0	7	32
15	202,5	0	10	32
15	202,5	0	15	32
15	202,5	1,5	3,3	32
15	202,5	1,5	5	32
15	202,5	1,5	7	32
15	202,5	1,5	10	32
15	202,5	1,5	15	32
15	202,5	3	3,3	32
15	202,5	3	5	32
15	202,5	3	7	32
15	202,5	3	10	32
15	202,5	3	15	32

Los puntos de interés fueron las posiciones donde se localizan los equipos de medición, donde se obtuvieron resultados como dirección del oleaje, su altura, periodos entre otros. Para el provecho de esta investigación se obtuvieron las alturas correspondientes para cada caso, así como la dirección del oleaje y los espectros frecuenciales y direccionales.

Para realizar la propagación numérica de oleaje de una altura significativa de 5 m se utilizaron los valores de  $\gamma$  de 3,3, 5, 7, 10 y 15. El valor de 3,3 corresponde al recomendado para el Mar del Norte y 7 el que se obtuvo con mayor ocurrencia en los espectros ajustados. Los demás valores complementan el análisis para observar cómo influye el cambio del factor pico en la propagación numérica.

Las alturas obtenidas en los puntos de interés se muestran en el Cuadro 5.2. Para sea cuál sea la marea dada se muestra cómo Hs disminuye 8 cm del  $\gamma$  3,3 al 15 en Cabo Blanco, en cambio, en Caldera disminuye entre 2 cm y 1 cm, siendo no significativo el valor de factor pico que se introduzca.

Cuadro 5.2. Resultados de alturas significantes obtenidas en Cabo Blanco y Caldera tras la propagación numérica.

Marea (m)	$\gamma$	Cabo Blanco	Caldera
		Hs (m)	Hs (m)
0	3,3	4,75	2,28
	5	4,73	2,28
	7	4,71	2,27
	10	4,69	2,27
	15	4,67	2,27
1,5	3,3	4,76	2,31
	5	4,73	2,30
	7	4,71	2,30
	10	4,70	2,29
	15	4,68	2,29
3	3,3	4,77	2,34
	5	4,74	2,33
	7	4,72	2,33
	10	4,70	2,32
	15	4,69	2,32

Ahora bien, en las Figuras 5.2, 5.3 y 5.4 se muestran los espectros obtenidos tanto para el punto en Cabo Blanco y Caldera para los distintos valores de  $\gamma$  utilizados.

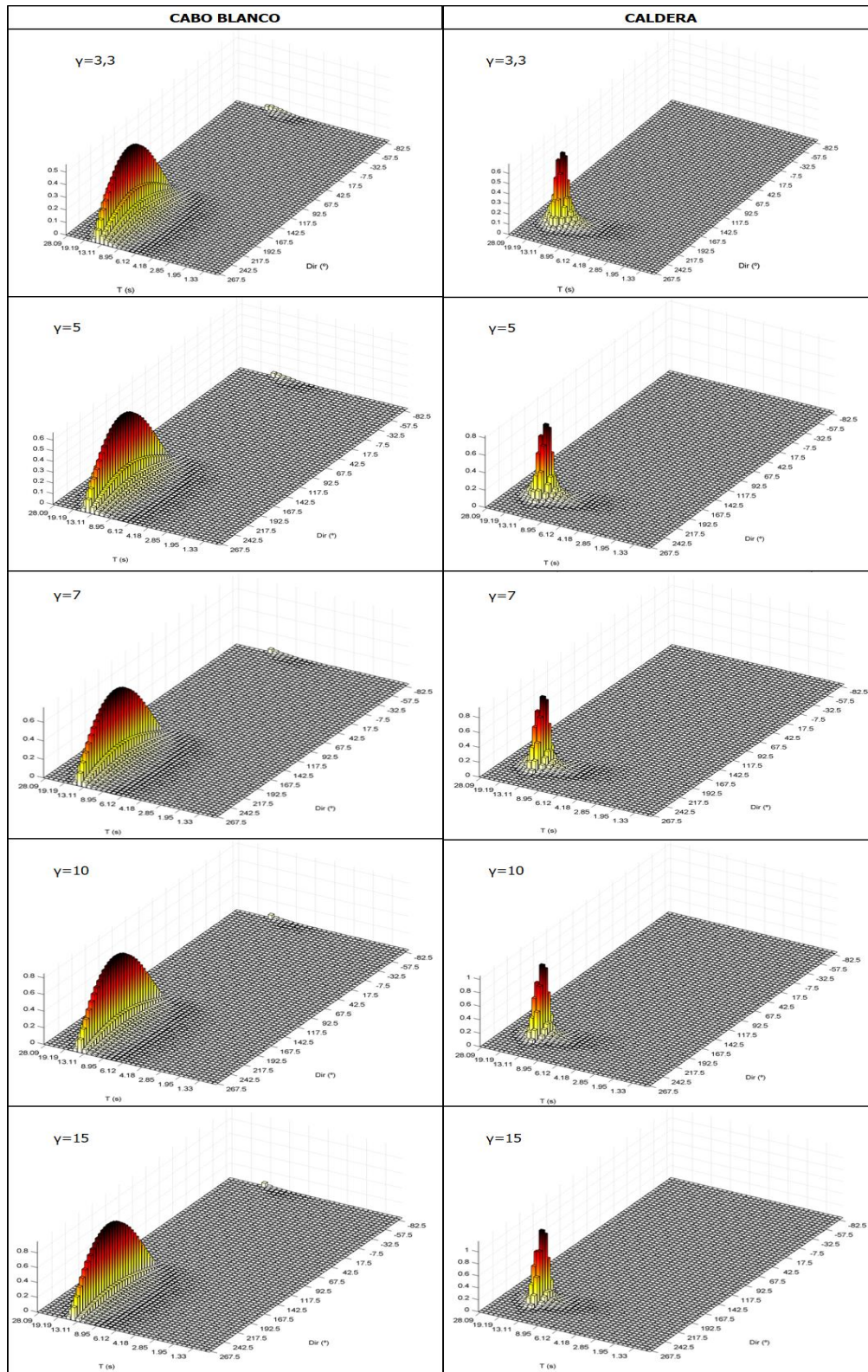


Figura 5.2. Espectros obtenidos para Cabo Blanco y Caldera con marea de 0 m.

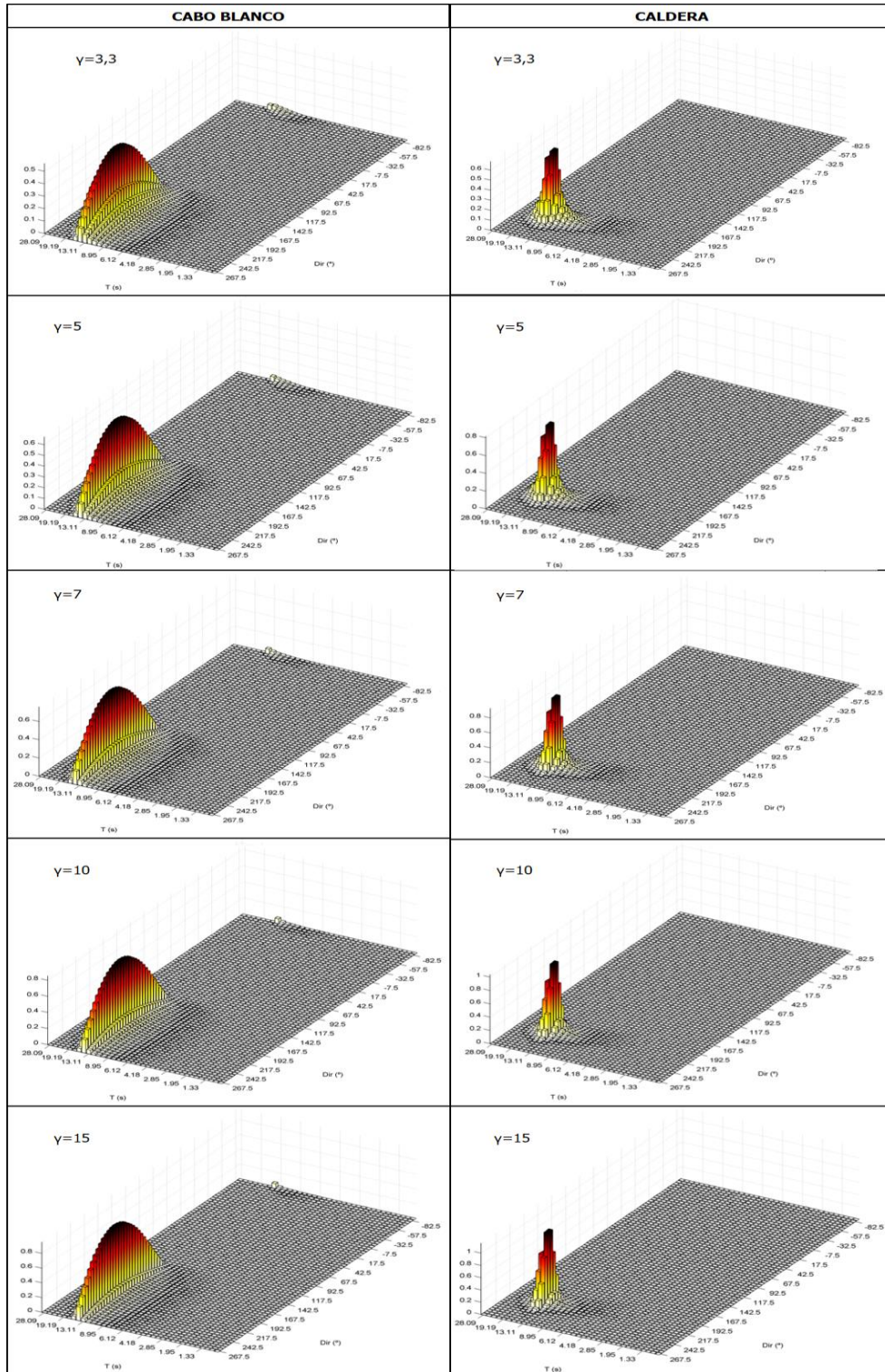


Figura 5.3. Espectros obtenidos para Cabo Blanco y Caldera con marea de 1,5 m.

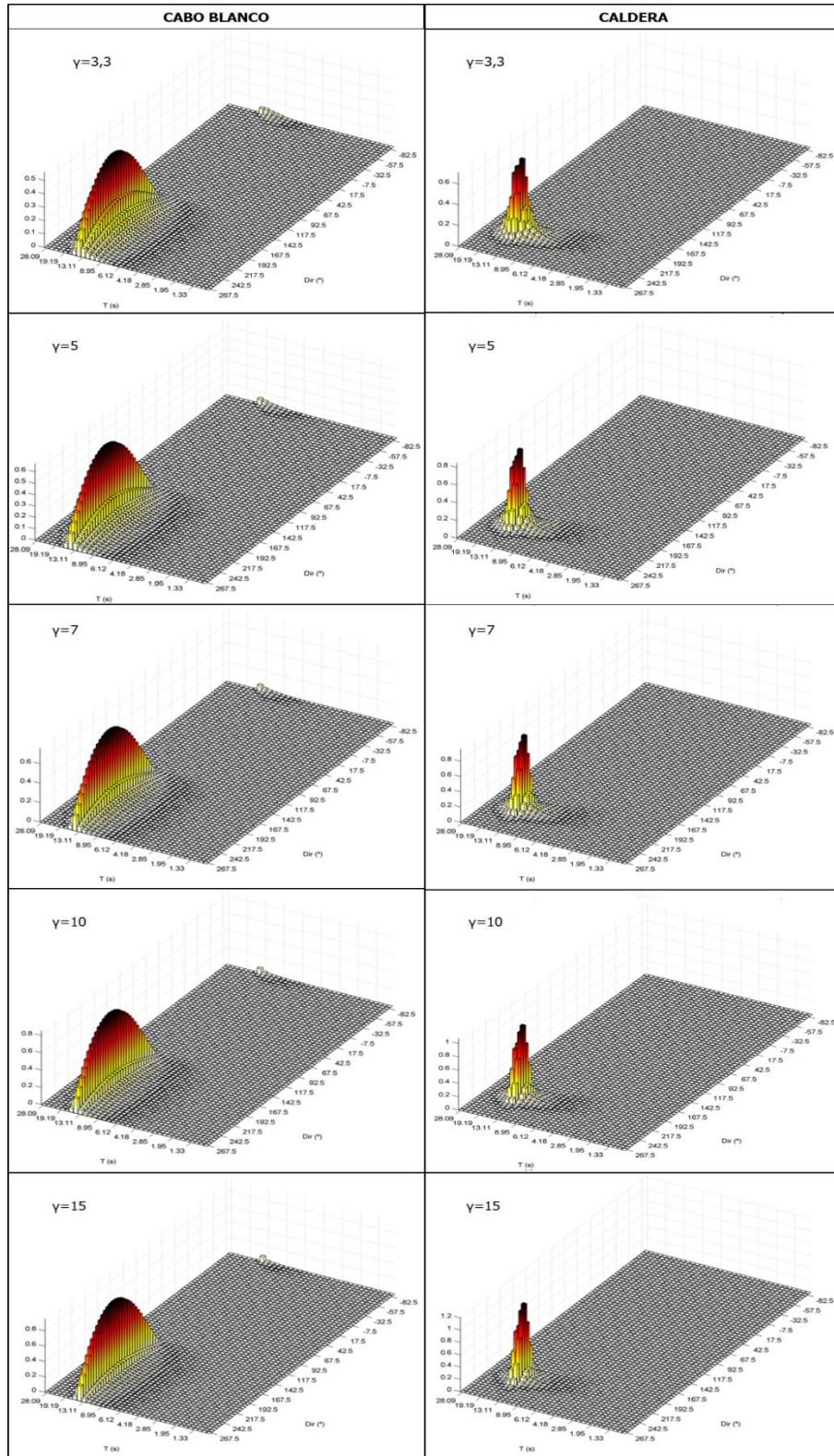


Figura 5.4. Espectros obtenidos para Cabo Blanco y Caldera con marea de 3 m.

En las figuras anteriores se puede observar como los espectros, más evidente en Cabo Blanco, tienden a mostrar el comportamiento descrito en el análisis de sensibilidad en donde conforme aumenta el  $\gamma$  los espectros tienden a ser más concentrados en pocos periodos y su energía máxima tiende a aumentar, pero que al ver su respectiva altura según el Cuadro 5.2, esta tiende a disminuir, esto para cualquier caso de marea. Además, se concluye que no importa la forma del espectro teórico que se le introduzca al programa, el resultado será muy similar debido a los efectos de disipación de energía que se producen en la entrada al Golfo de Nicoya.

Por último, se muestran los resultados de las alturas y direcciones del oleaje obtenido a partir de la propagación realizada para el Golfo de Nicoya. Se aprecia alturas de más de 3,5 m para los alrededores de Cabo Blanco, Figura 5.5, con dirección sur-suroeste.

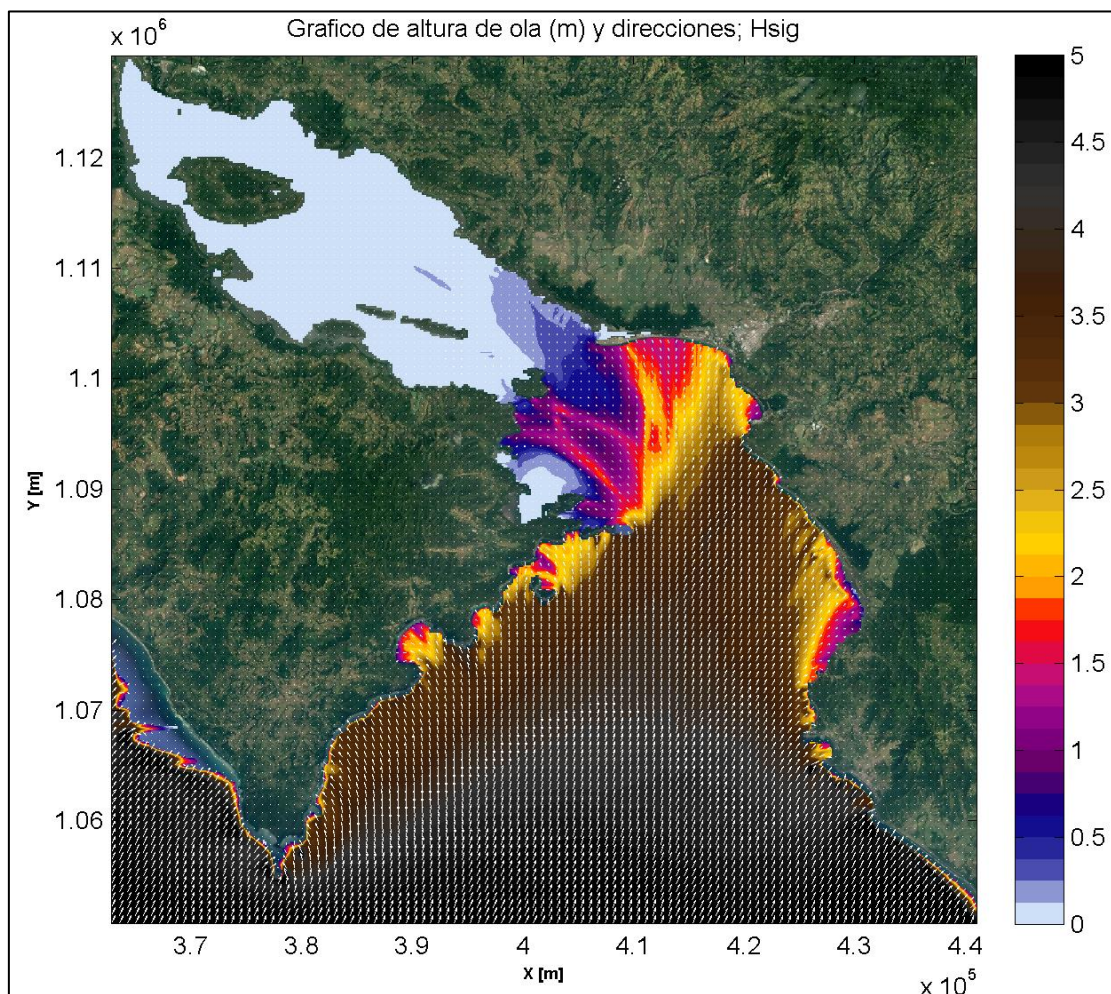


Figura 5.5. Altura de ola (m) y dirección del oleaje obtenido a partir de la propagación de oleaje para una marea de 0 m y un  $\gamma=3,3$ .

En la Figura 5.6 se observa con mayor detalle las alturas para Puerto Caldera, donde son menores a un metro, siendo un oleaje de poca energía y regular, como se observó en el Cuadro 5.2.

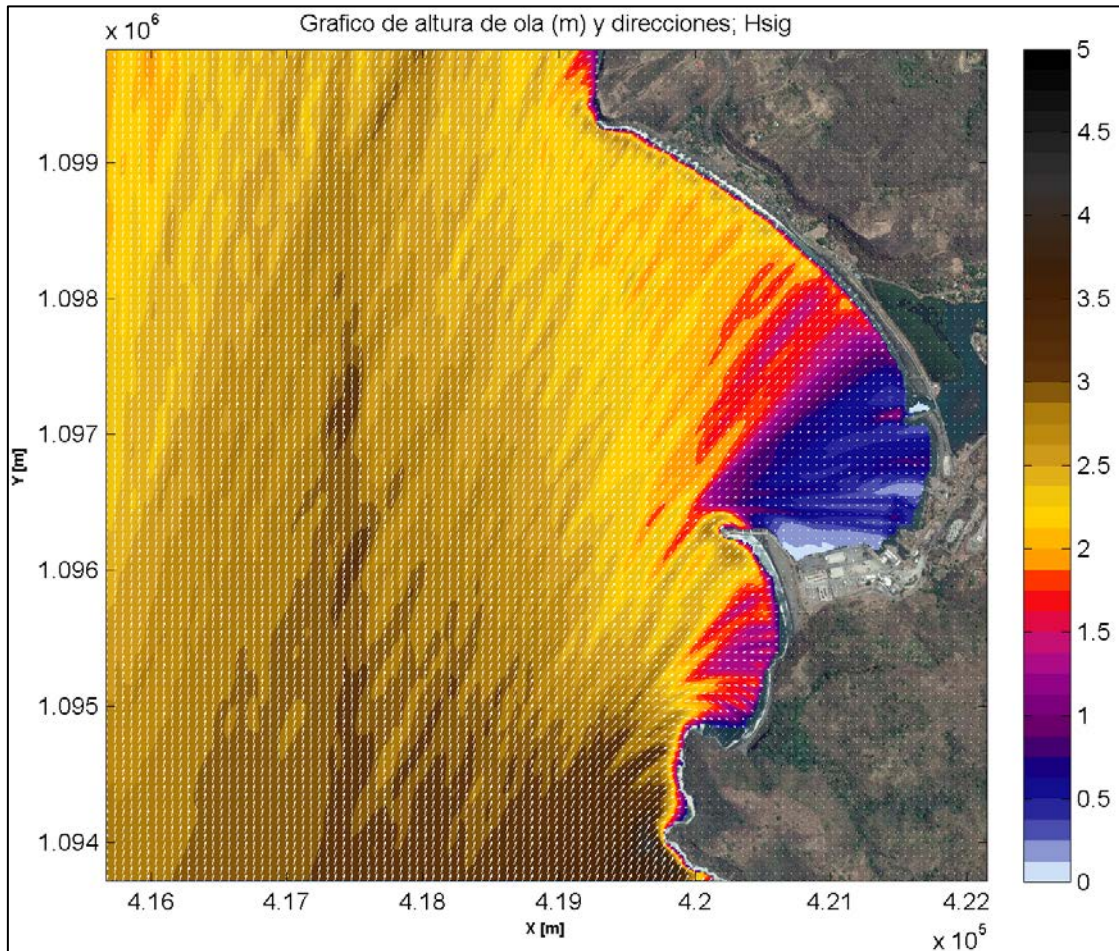


Figura 5.6. Altura de ola (m) y dirección del oleaje obtenido a partir de la propagación de oleaje para una marea de 0 m y un  $\gamma=3,3$ , detalle de Puerto Caldera.

Los gráficos resultantes de altura y dirección de oleaje para los distintos casos se adjuntan en el Apéndice I.

En conclusión, el valor de  $\gamma$  no influye de manera significativa en el cambio de alturas desde el punto de vista de propagación de oleaje, tal y como lo demuestra los resultados obtenidos. Siendo una zona donde se puede introducir cualquier forma de espectro teórico y que aun así mantendrá como resultados alturas significantes similares, esto debido a efectos de disipación de energía que se dan en el Golfo de Nicoya.

## Capítulo 6. Conclusiones y Recomendaciones

---

### 6.1. Conclusiones

- Se comprueba que la función teórica es más sensible al cambio de  $H_s$  que de  $T_p$ , tal y como lo demuestra la función del espectro teórico de JONSWAP modificada por Goda al ser la energía directamente proporcional a la altura significativa al cuadrado y al periodo pico.
- La variación del  $\gamma$  indica cuan dispersa está la energía en las frecuencias, entre menor  $\gamma$ , hay mayor dispersión de energía en varias frecuencias, por lo que al aumentar  $\gamma$  el espectro se vuelve más estrecho y por intentar igualar energía tiende a incrementar su pico de energía.
- El valor del parámetro espectral se ve influenciado por la resolución espectral utilizada durante el análisis de los espectros, en esta investigación se consideró apropiado un valor de 0,0039 Hz para poder comparar con los resultados obtenidos por Goda.
- Los espectros frecuenciales de un pico no corresponden a alturas espectrales significantes altas o periodos picos altos.
- Se observa una tendencia de espectros doble pico que se debe al registro de dos tormentas, una tormenta recién llegando y otra que ya ha pasado, pero que aún conserva energía que se ve reflejada en el espectro medido.
- De 2927 estados de mar medidos en Puerto Caldera y Cabo Blanco, únicamente 658 corresponden a espectros de un pico que pueden ser representados por la función teórica JONSWAP, es decir, aproximadamente  $\frac{1}{4}$  parte del total.
- Los valores del parámetro espectral  $\gamma$  tienen mayor ocurrencia entre los valores de 4 a 10, siendo 7 el valor más frecuente con un 13,37%.
- Existen valores altos de  $\gamma$  (mayores a 20) que ajustan a espectros obtenidos tanto en Cabo Blanco como Puerto Caldera, lo que evidencia un oleaje muy energético que se debe seguir investigando.
- No existe relación alguna del  $\gamma$  con la altura espectral significativa, el periodo pico o alguna tendencia de este con el tiempo, pero sí existe una relación con  $Q_p$ , de tipo exponencial.



- Al simular la propagación de oleaje mediante el modelo numérico del Golfo de Nicoya en el SWAN, se evidenció que al variar el parámetro  $\gamma$  entre 3,3 y 15, la diferencia de la altura de ola significativa es de 7 cm, en Cabo Blanco y de 2 cm en Puerto Caldera, por lo que no es significativo la variación de la magnitud de las alturas.

## 6.2. Recomendaciones

- Comparar otras metodologías para la obtención del parámetro  $\gamma$ , así como de espectros y su resolución espectral, de manera que se puedan contrastar con los obtenidos por este trabajo.
- Seguir investigando acerca de los espectros de doble pico o más y así caracterizarlos, ya que corresponden a la mayoría de estados de mar medidos en campo.
- Utilizar otras funciones de espectros teóricos para ajustar los estados de mar medidos y comparar con el JONSWAP modificado por Goda.
- Continuar con la caracterización del oleaje en Costa Rica desde el ámbito de ingeniería marítima para así aplicar dichos conocimientos a obras y estudios marítimos costeros que se quieran realizar.

## Referencias bibliográficas

---

- Alfaro Chavarría, H. (2009). Estudio de Dinámica Litoral de la Playa Piñuela en Osa, Costa Rica, para el Emplazamiento de un Puerto Mixto. Santander, España: Universidad de Cantabria.
- Alfaro Chavarría, H. (2016). *Diseño de Obras Costeras, Dique en Talud no Rebasables II Parte, Programa de Posgrado en Ingeniería Civil*. San José.
- Alonso-Muñoyerro, M. (2005). Caracterización estadística del oleaje I: Análisis a corto término. Em *Master en ingeniería de puertos y costas* (pp. 177-202). Madrid: Ministerio de Medio Ambiente.
- Chapra, S., & Canale, R. (2007). *Métodos numéricos para ingenieros, 5ta edición*. México: McGraw-Hill.
- Gamboa Soto, F. (2015). *Análisis del dinamismo de las exportaciones de bienes de Costa Rica, evolución durante la última década*. San José: Vigesimoprimer Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible 2014.
- Garita, A. (04 de Julio de 2014). Marea alta inunda viviendas en Caldera. San José, Costa Rica.
- Goda, Y. (1983). Analysis of Wave Grouping and Spectra of Long-travelled Swell. *Report of the Port and Harbour Research Institute, Vol 22., No. 1*, 3-41.
- Goda, Y. (1988). Statistical variability of sea state parameters as a function of wave spectrum. *Coastal Engineering in Japan, Vol. 31, No. 1*, 39-52.
- Goda, Y. (2000). *Random seas and design of maritime structures (2nd Edition)*. Londres: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.
- Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas. (2000). *Documento de Referencia*. Cantabria.
- Homoródi, K. (2012). *Investigation and Modelling of Wind Induced Waves in Shallow Waters*. Budapest.

- Kamphius, W. (2000). Short-Term Wave Analysis. Em *Introduction to Coastal Engineering and Management* (pp. 51-79). Londres: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.
- Koopman, & Hermans, L. (1974). *The Spectral Analysis of Time Series*. Albuquerque: Academic Press, Inc.
- Lara, J., Martín, F., & Losada, I. (2002). Análisis Experimental de Ondas Largas en la Bocana del Puerto de Gijón. *Ingeniería del Agua, Vol 9. No. 4*, 437-451.
- López, A. (2014). Propagación de oleaje con SWAN. *Ingeniería de Costas*. Granada, España: Universidad de Granada.
- Mansard, & Funke. (1990). On the Fitting of JONSWAP Spectra to Measured Sea States. *Coastal Engineering*, 464-477.
- Montero, M. (2013). Informe sobre puertos de la región 2013: un débil eslabón. *Mercados y Tendencias*, 38-65.
- Nortek AS. (2014). *Aquadopp, medidor de corrientes: Manual de usuario*. Sandvika.
- The SWAN team. (2015). *SWAN Scientific and Technical Documentation*. Delft: Delft University of Technology.
- Tsai, L.-H., Tseng, I.-F., Chien, H., & Kao, C.-C. (2001). Estimation of JONSWAP Spectral Parameters by Using Dependent-Variables Analysis. *Ocean Wave Measurement and Analysis*, 328-337.
- Walpole, R., Myers, R., Myers, S., & Ye, K. (2012). *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. México: Pearson.

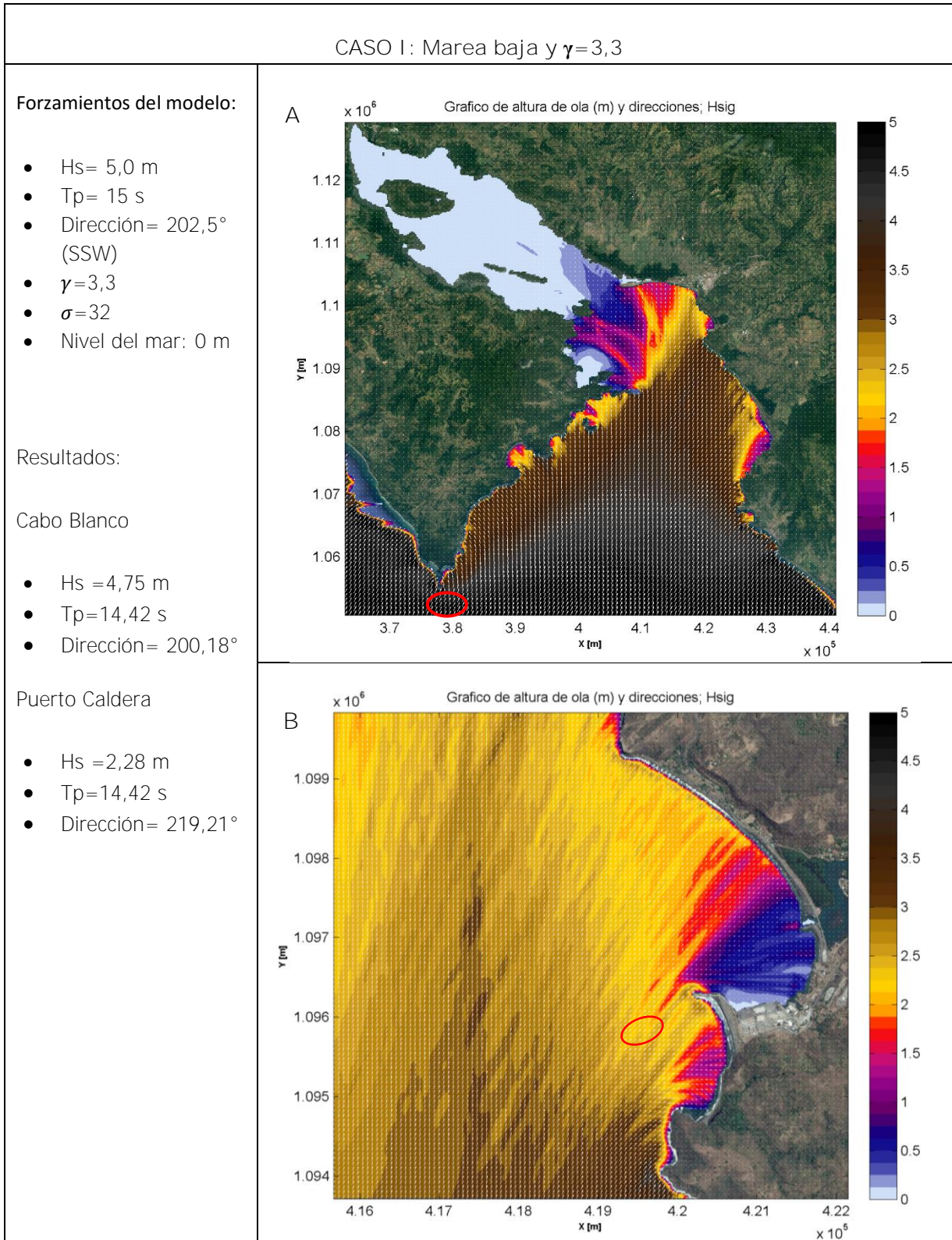
# APÉNDICES

---

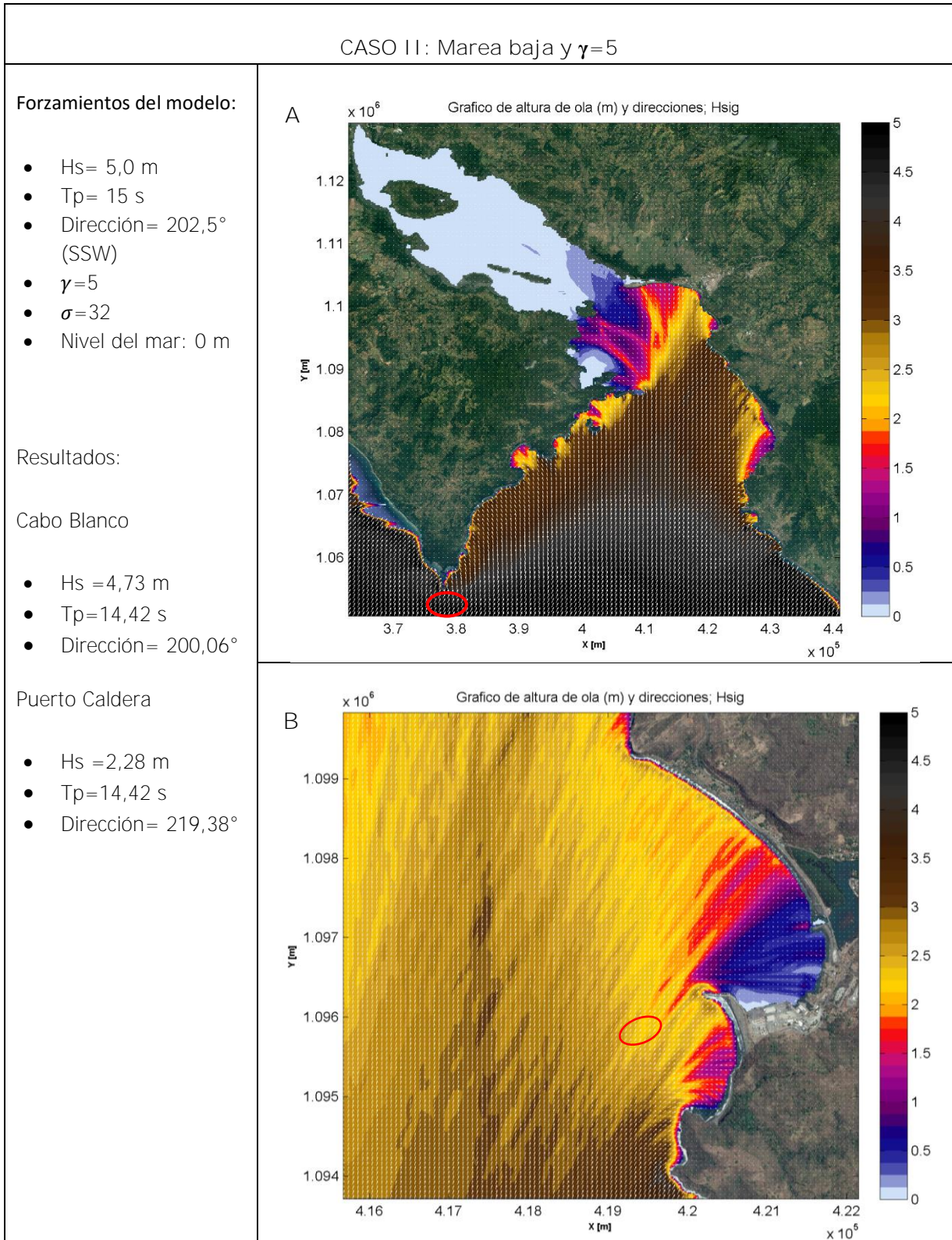
## APÉNDICE I

Resultados de propagación de oleaje

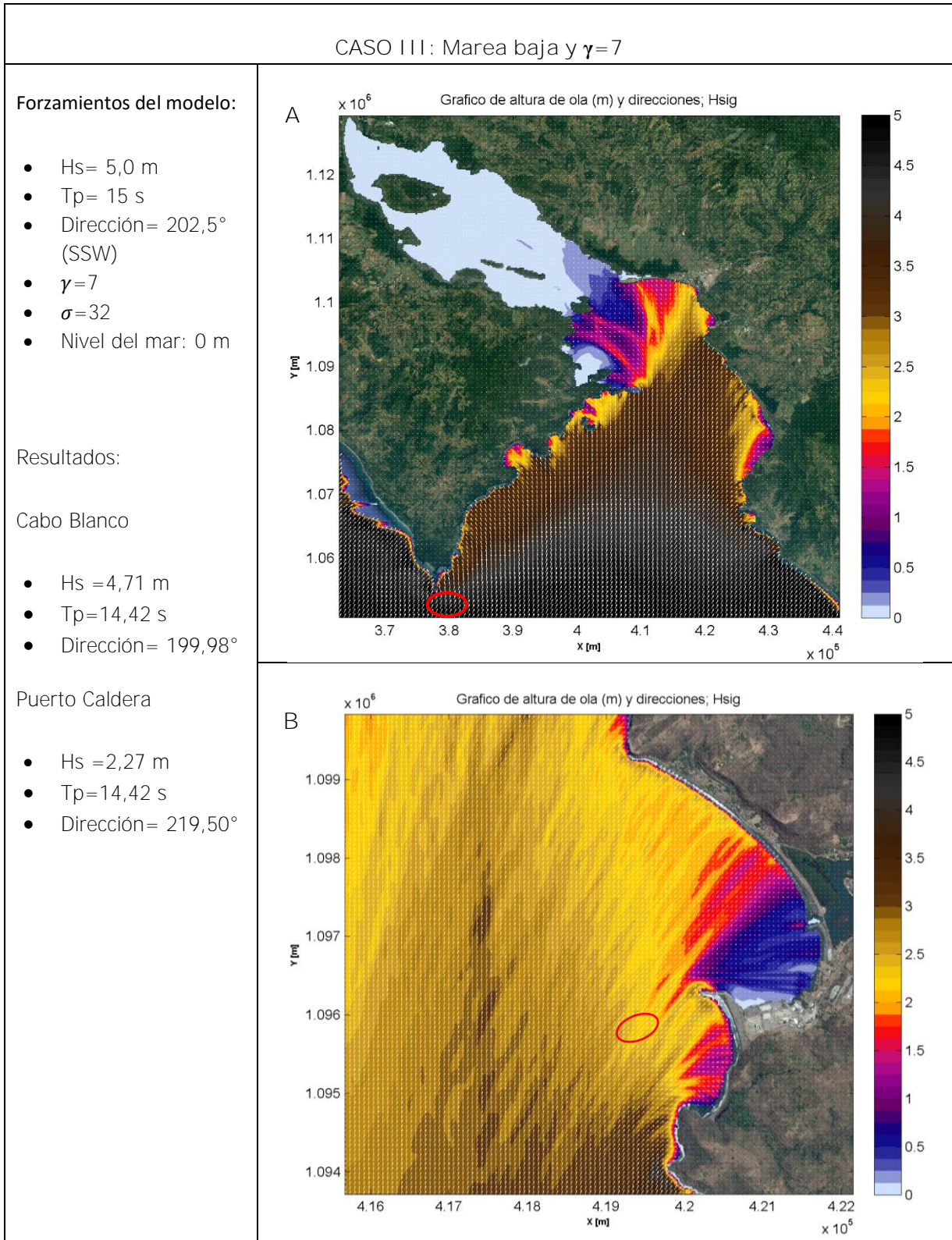
Cuadro A.I-1. Resultados de Hs y dirección de la propagación de oleaje para el mallado general (A) en Cabo Blanco y el mallado detalle (B) en Puerto Caldera.



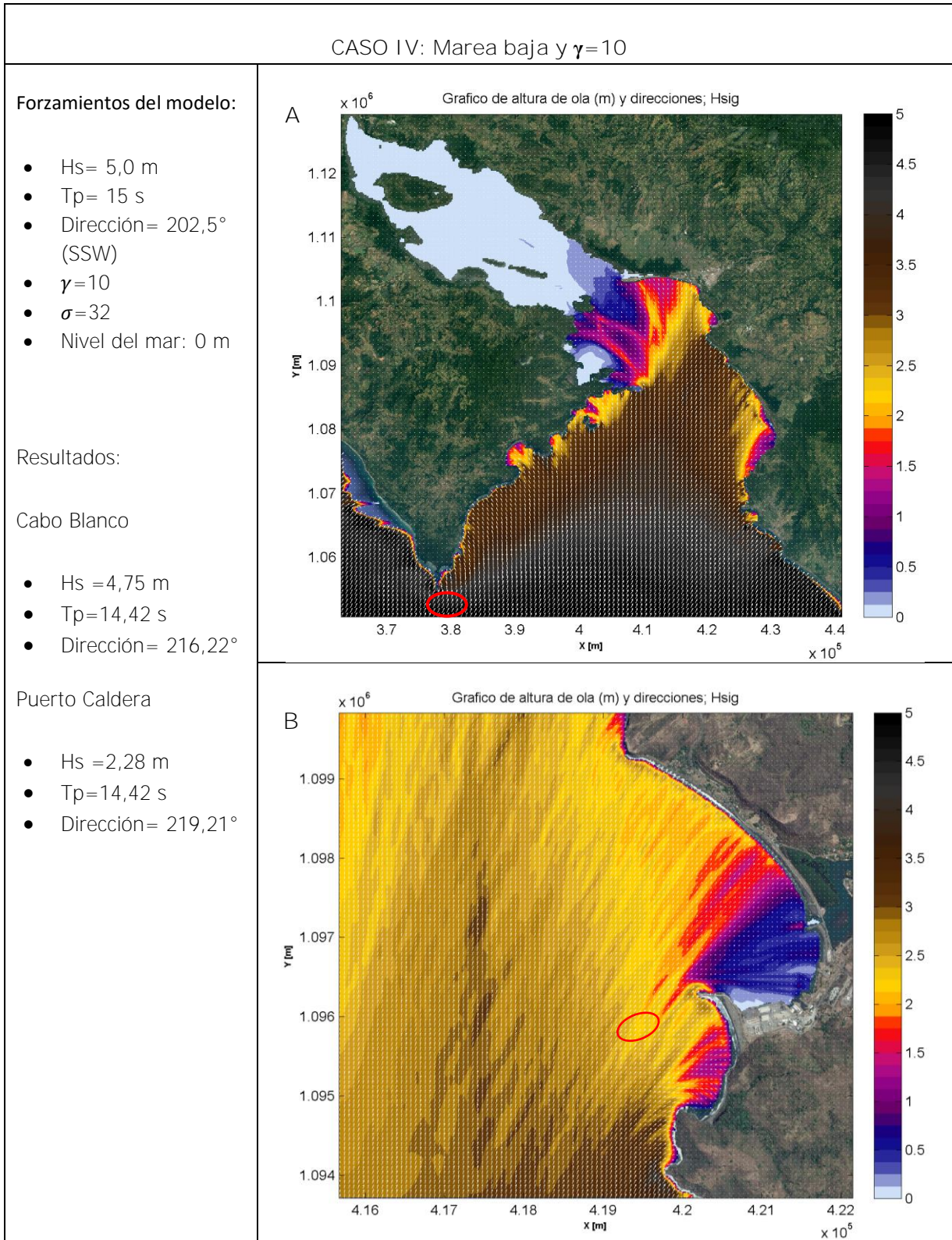
Cuadro A.1-2. Resultados de Hs y dirección de la propagación de oleaje para el mallado general (A) en Cabo Blanco y el mallado detalle (B) en Puerto Caldera.



Cuadro A.1-3. Resultados de  $H_s$  y dirección de la propagación de oleaje para el mallado general (A) en Cabo Blanco y el mallado detalle (B) en Puerto Caldera.

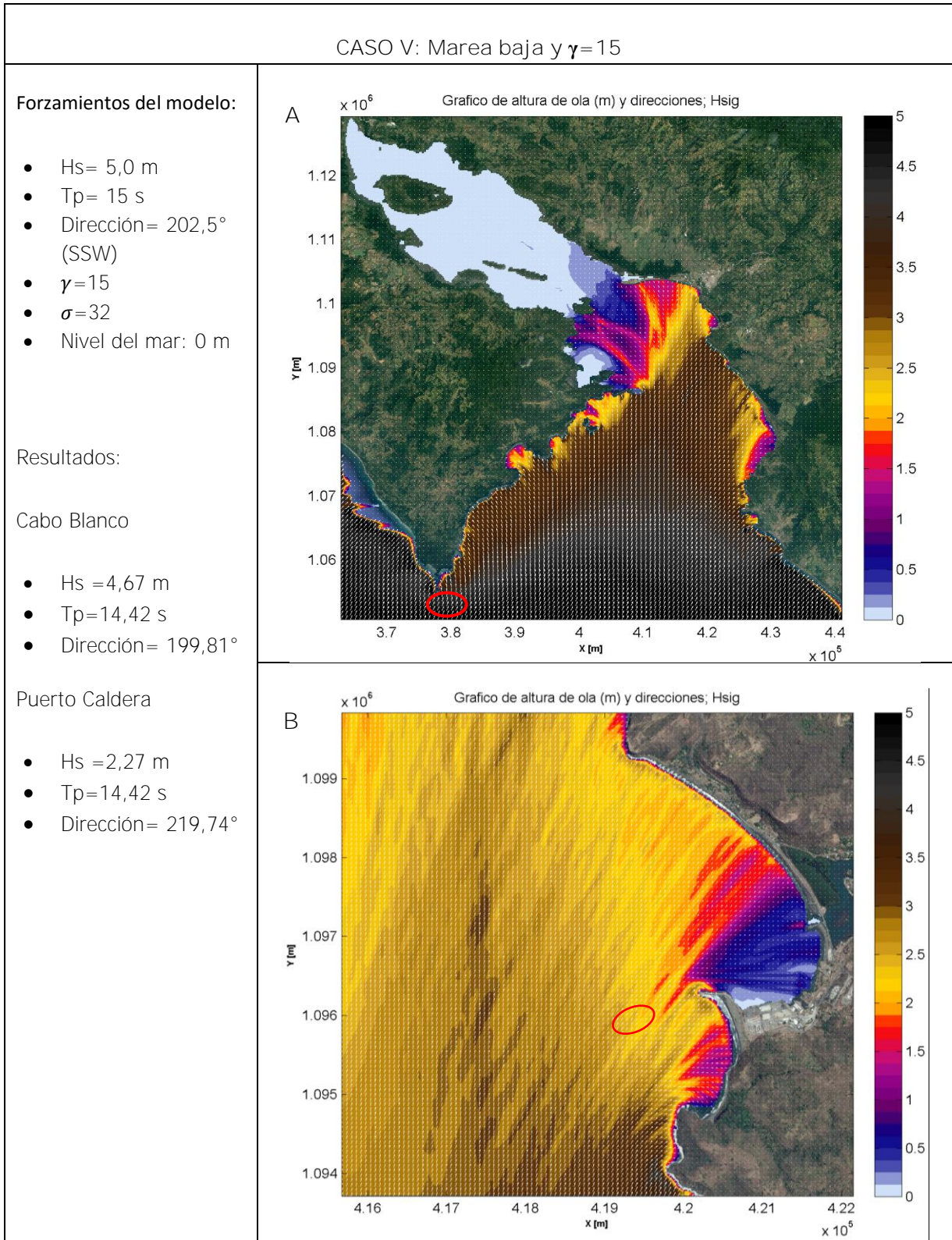


Cuadro A.I-4. Resultados de Hs y dirección de la propagación de oleaje para el mallado general (A) en Cabo Blanco y el mallado detalle (B) en Puerto Caldera.

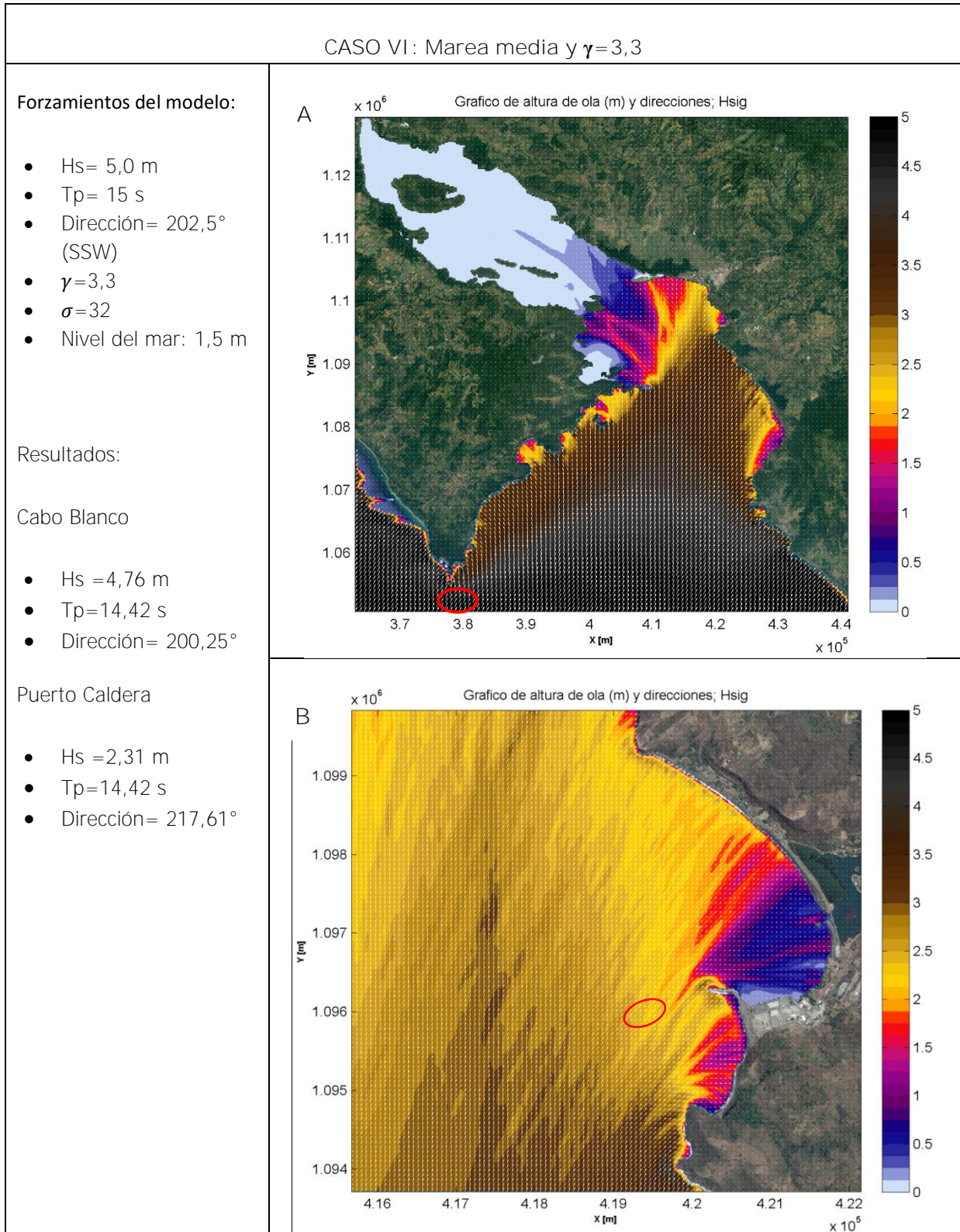




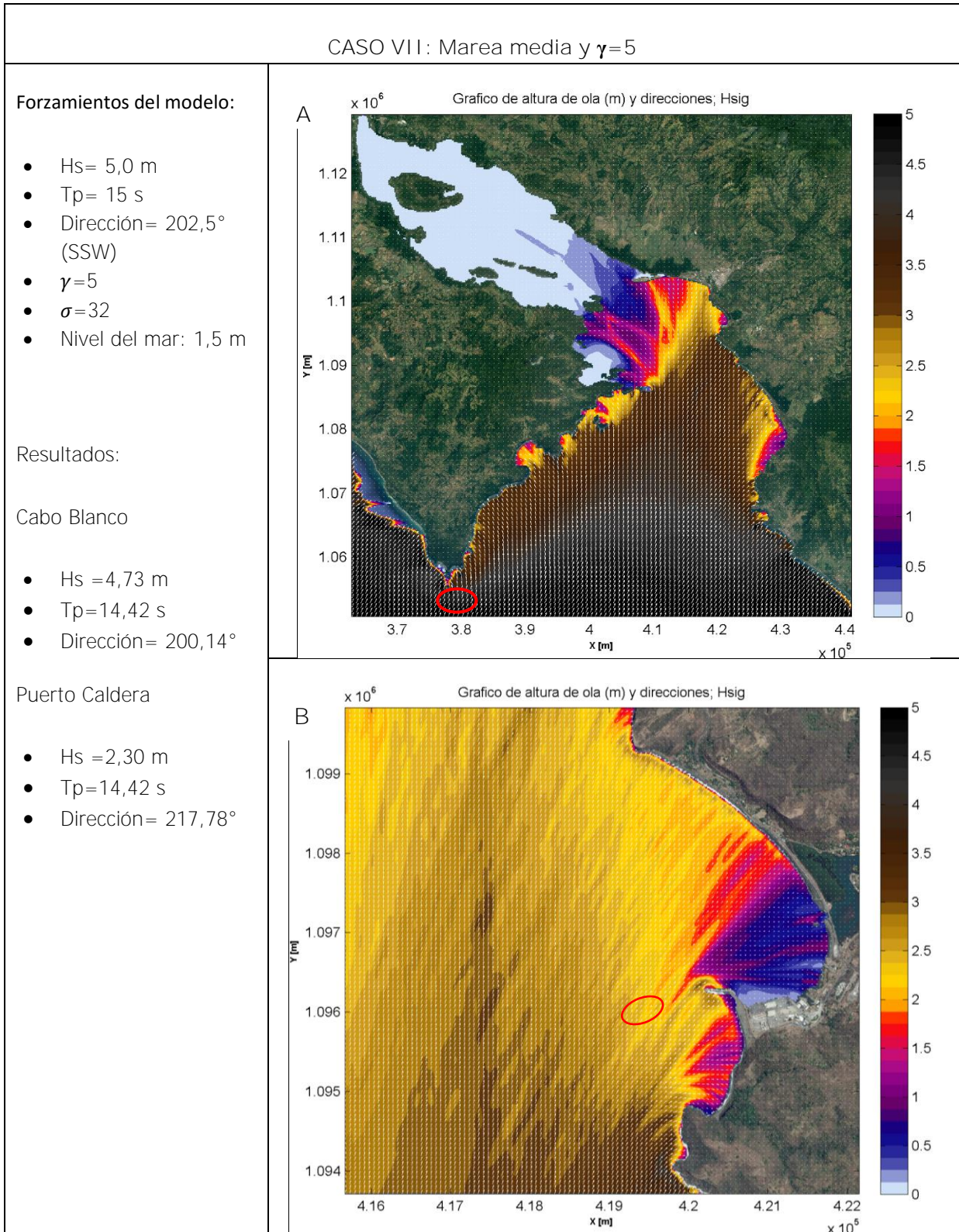
Cuadro A.I-5. Resultados de  $H_s$  y dirección de la propagación de oleaje para el mallado general (A) en Cabo Blanco y el mallado detalle (B) en Puerto Caldera.



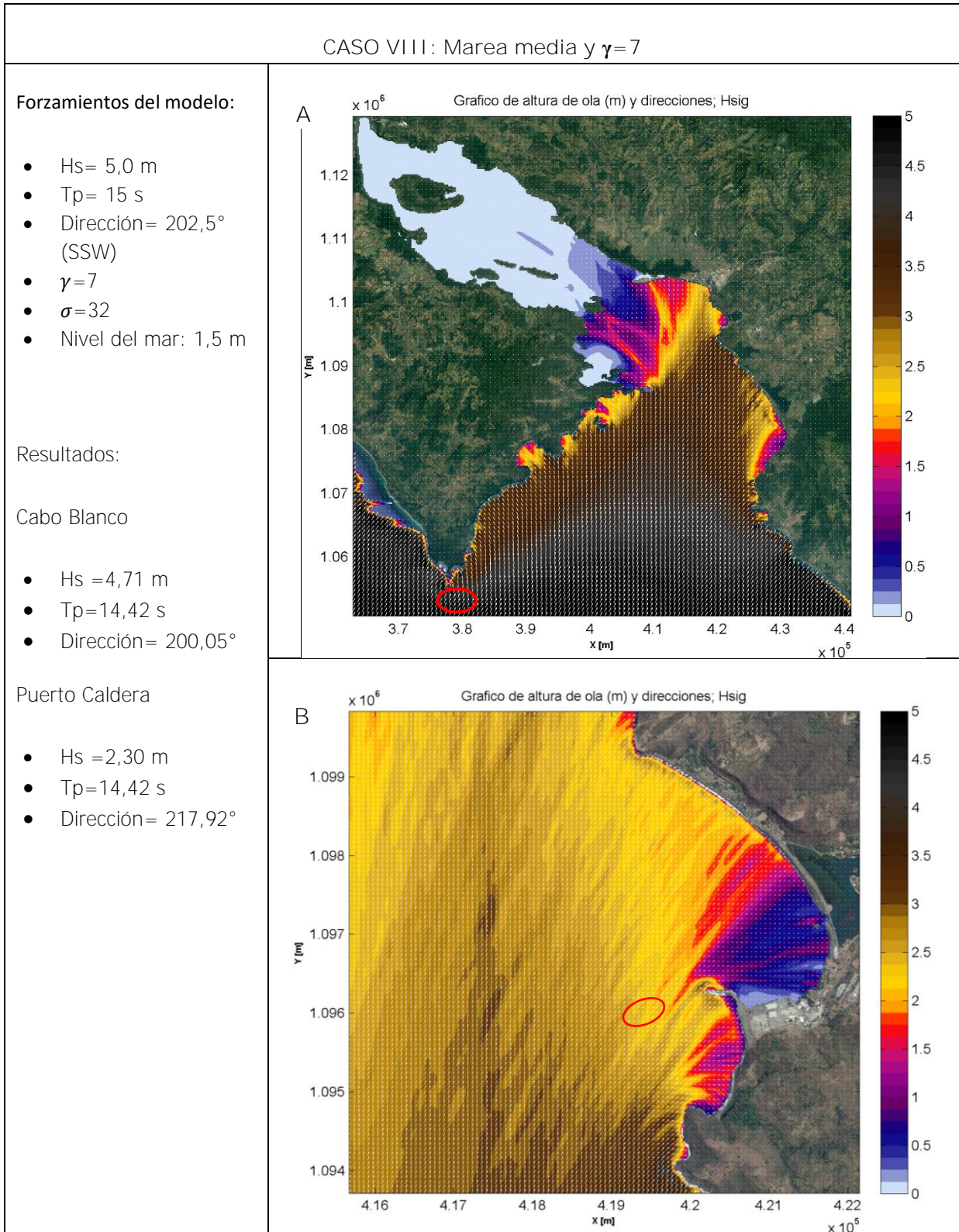
Cuadro A.1-6. Resultados de  $H_s$  y dirección de la propagación de oleaje para el mallado general (A) en Cabo Blanco y el mallado detalle (B) en Puerto Caldera.



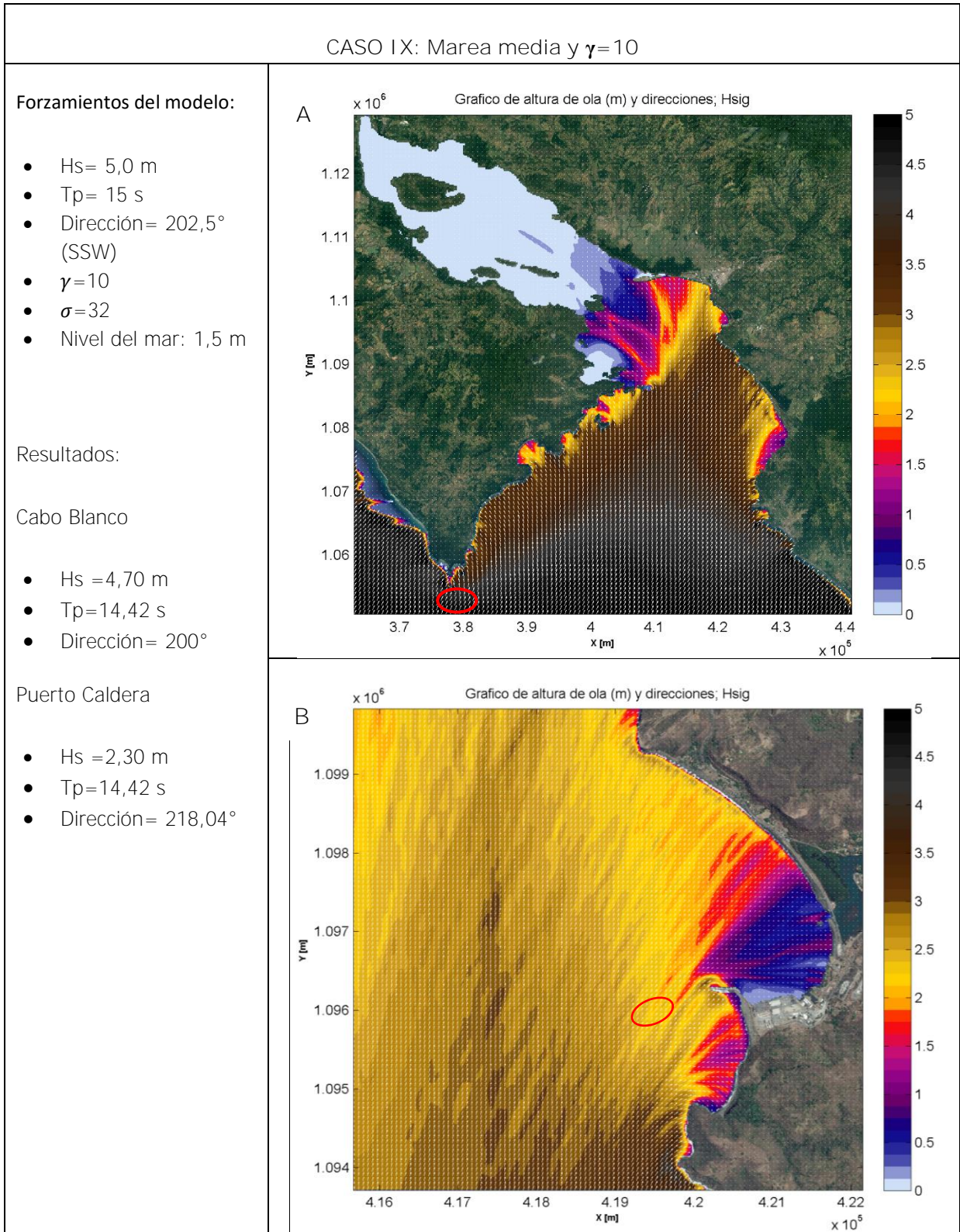
Cuadro A.I-7. Resultados de Hs y dirección de la propagación de oleaje para el mallado general (A) en Cabo Blanco y el mallado detalle (B) en Puerto Caldera.



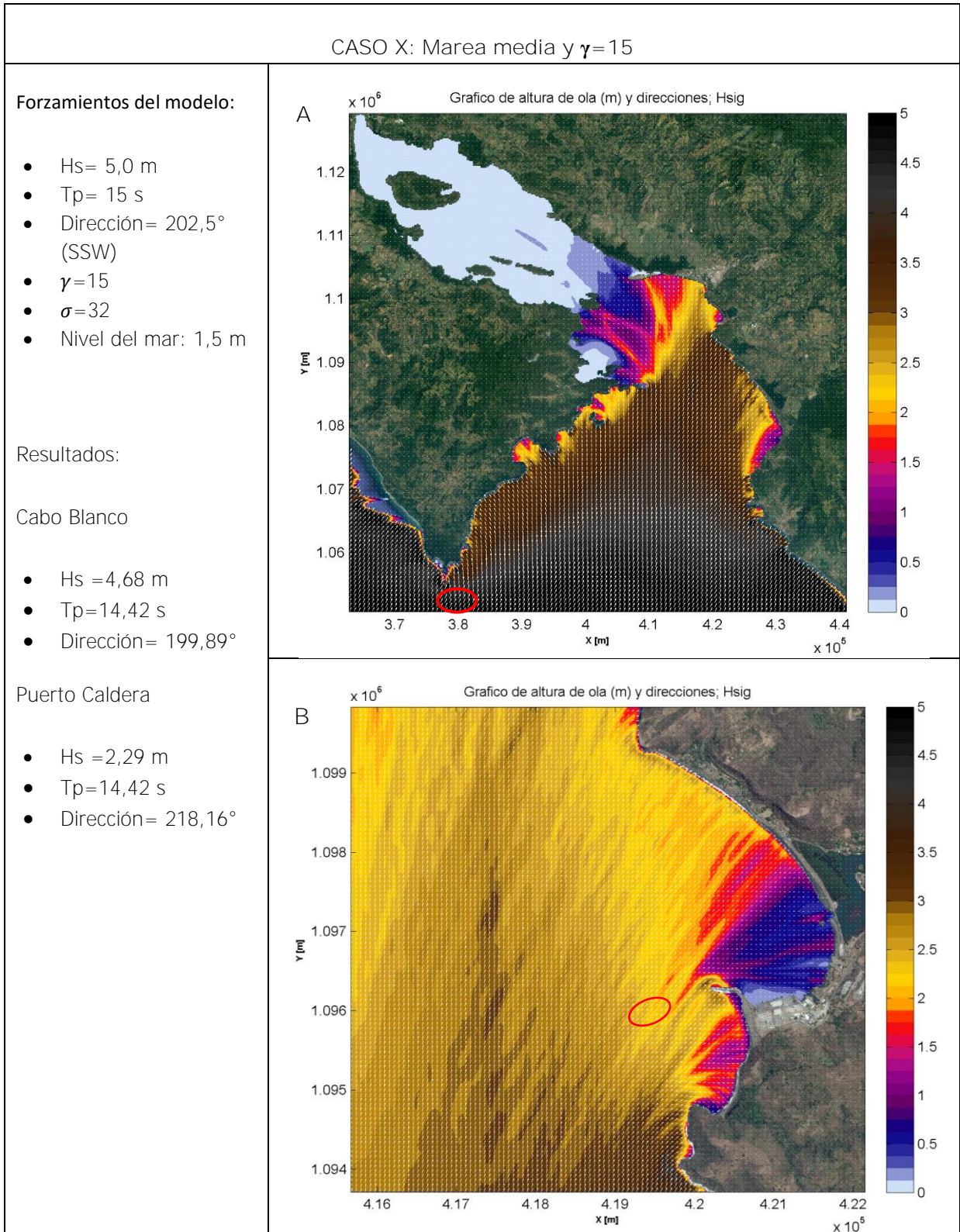
Cuadro A.I-8. Resultados de Hs y dirección de la propagación de oleaje para el mallado general (A) en Cabo Blanco y el mallado detalle (B) en Puerto Caldera.



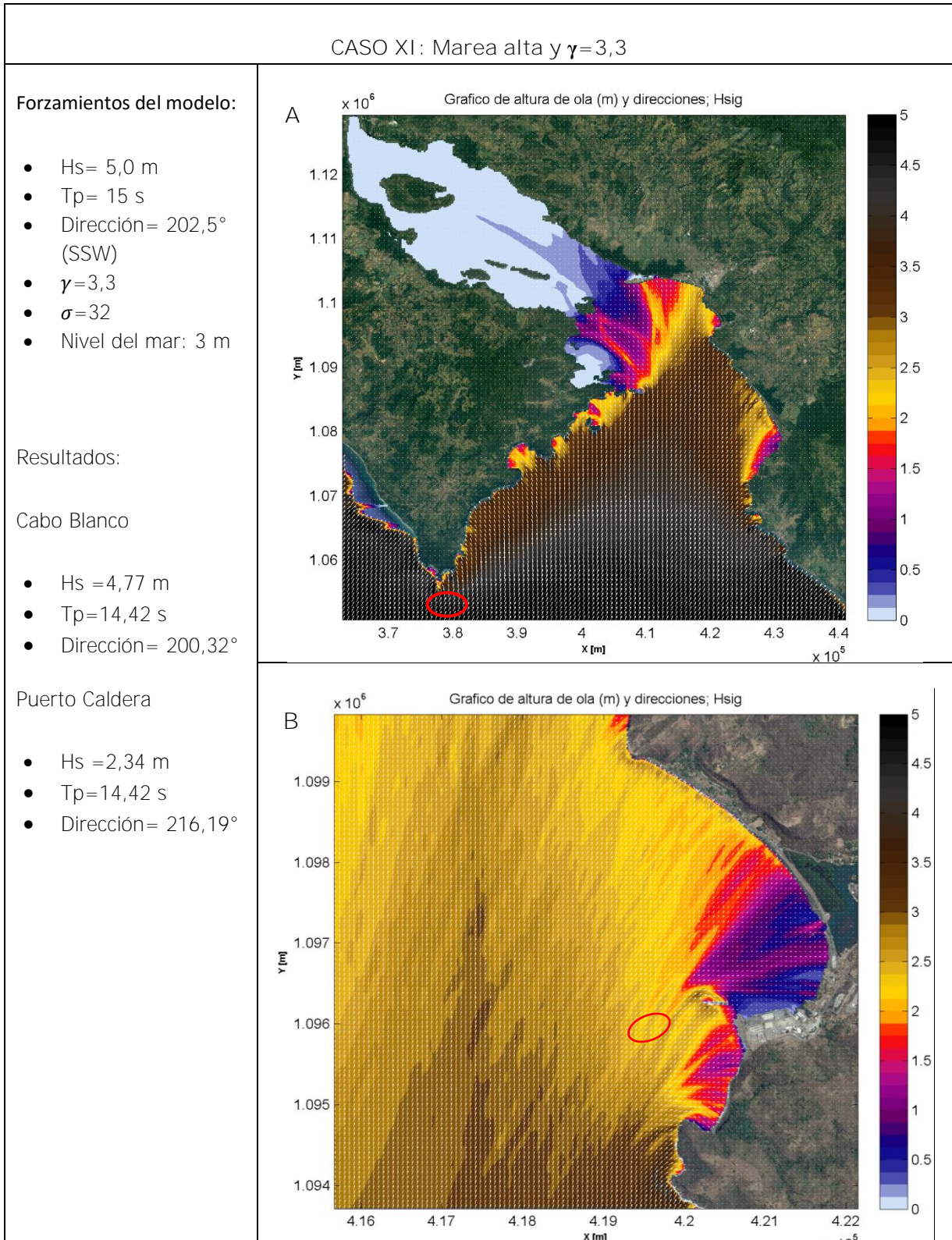
Cuadro A.I-9. Resultados de  $H_s$  y dirección de la propagación de oleaje para el mallado general (A) en Cabo Blanco y el mallado detalle (B) en Puerto Caldera.



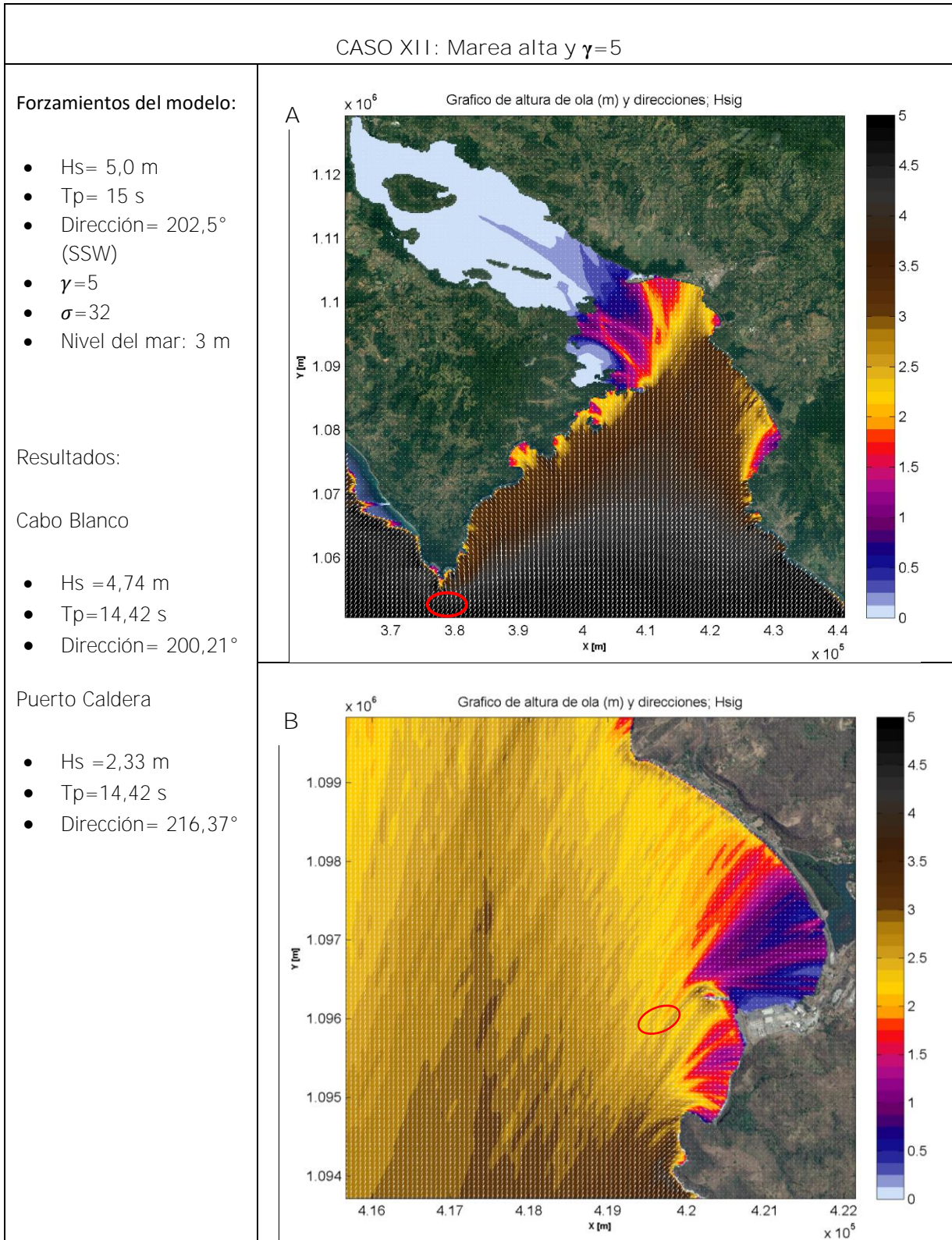
Cuadro A.I-10. Resultados de  $H_s$  y dirección de la propagación de oleaje para el mallado general (A) en Cabo Blanco y el mallado detalle (B) en Puerto Caldera.



Cuadro A.I-11. Resultados de Hs y dirección de la propagación de oleaje para el mallado general (A) en Cabo Blanco y el mallado detalle (B) en Puerto Caldera.

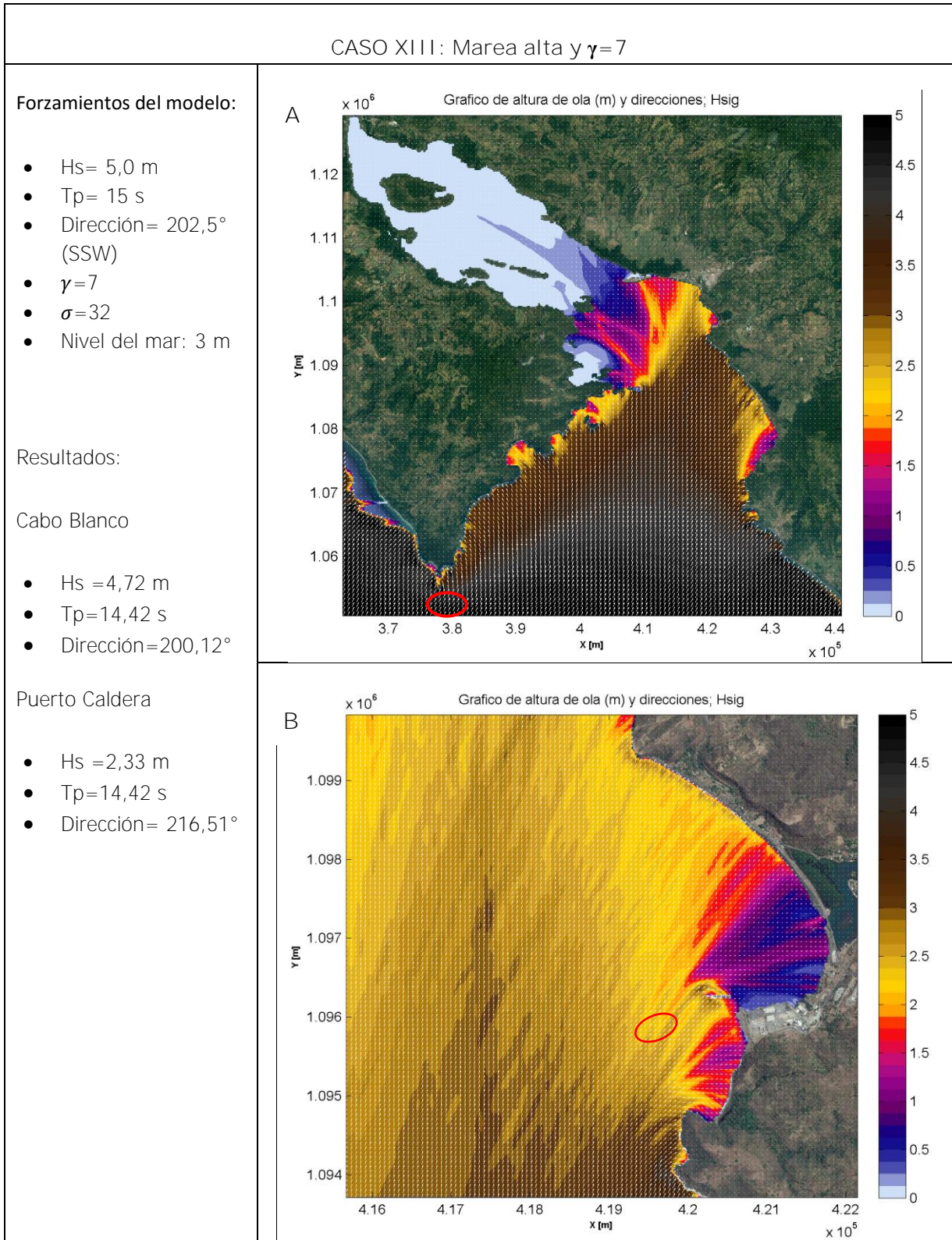


Cuadro A.I-12. Resultados de  $H_s$  y dirección de la propagación de oleaje para el mallado general (A) en Cabo Blanco y el mallado detalle (B) en Puerto Caldera.

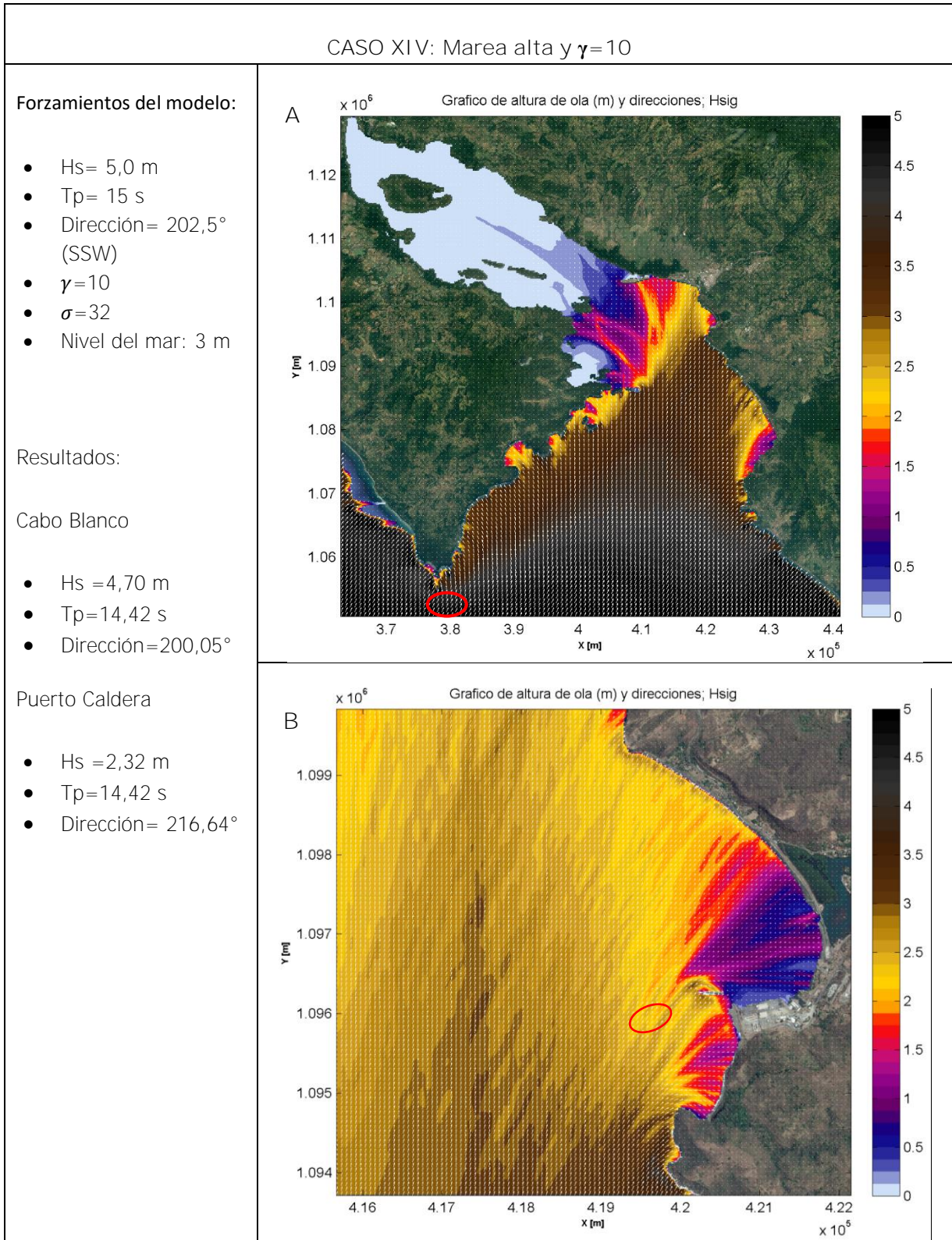




Cuadro A.I-13. Resultados de Hs y dirección de la propagación de oleaje para el mallado general (A) en Cabo Blanco y el mallado detalle (B) en Puerto Caldera.



Cuadro A.I-14. Resultados de Hs y dirección de la propagación de oleaje para el mallado general (A) en Cabo Blanco y el mallado detalle (B) en Puerto Caldera.



Cuadro A.I-15. Resultados de Hs y dirección de la propagación de oleaje para el mallado general (A) en Cabo Blanco y el mallado detalle (B) en Puerto Caldera.

