
COMPARACIÓN ENTRE MALLAS ESTRUCTURADAS Y NO ESTRUCTURADAS EN SWAN PARA UN PRONÓSTICO DE OLEAJE EN TOCOPILLA, REGIÓN DE ANTOFAGASTA

Memoria de Título
Rodrigo Alejandro Navarrete Morales
Diciembre 2024

Contenidos

- 1- Introducción
- 2- Objetivos
- 3- Marco Teórico
- 4- Metodología
- 5- Resultados
- 6- Discusiones
- 7- Conclusiones

Introducción

El oleaje es un fenómeno que se da en la superficie de un cuerpo de agua debido a la interacción entre el agua y el viento (Silva, 2005).

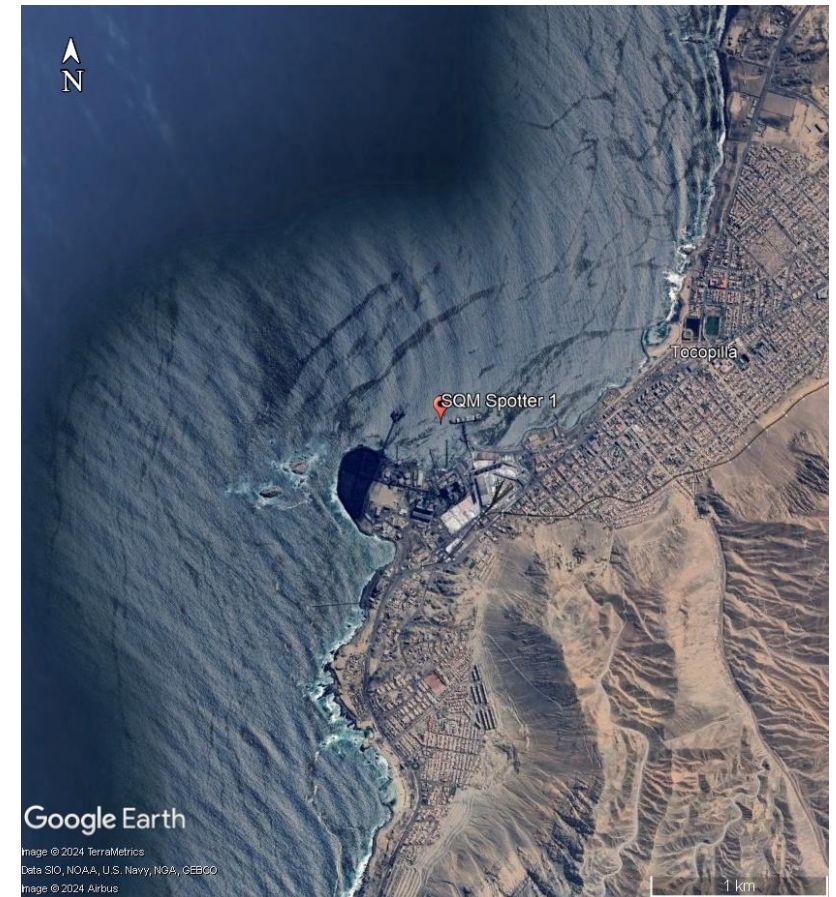
Eventos de oleaje extremo o anormales se denominan “Marejadas”.

Es importante pronosticar el oleaje para realizar de forma segura actividades marítimas (DIRECTEMAR, 2023).



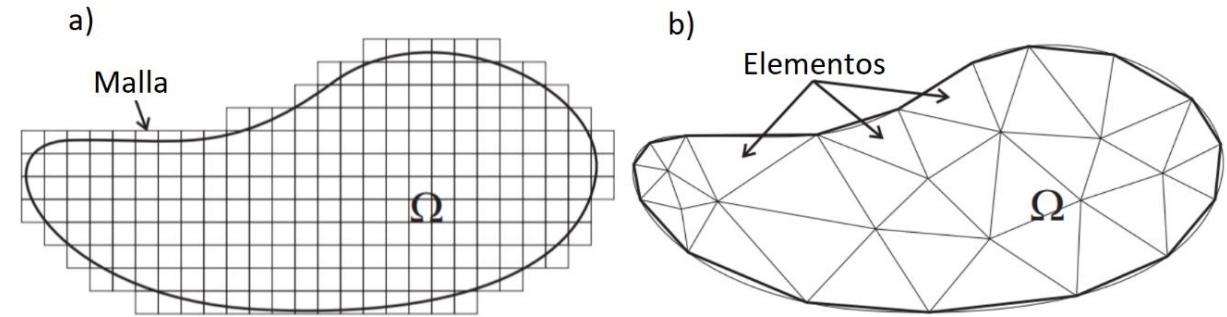
¿Qué?, ¿Cómo?, ¿Dónde? y ¿Para qué?

- ¿Qué?: Comparar los resultados entre mallas estructuradas y no estructuradas para un pronóstico de oleaje.
- ¿Cómo?: Aplicando, calibrando y validando el modelo SWAN con ambos tipos de mallas.
- ¿Dónde?: en Tocopilla, región de Antofagasta, Chile
- ¿Para qué?: para optimizar los recursos computacionales al momento de realizar pronósticos en SWAN



Mallas de cálculo

- Mallas estructuradas:
 - Nodos ordenados y uniformes.
- Mallas No estructuradas:
 - Nodos no ordenados
 - Mayor flexibilidad (forma y tamaño variable)
- Mallas estructuradas anidadas:
 - Mallas de menor tamaño, con mejor resolución usan resultados de mallas de mayor tamaño y menor resolución



a) Representación de una malla estructurada
b) Representación de una malla no estructurada
(Ferreira & Mesquita, 2015).

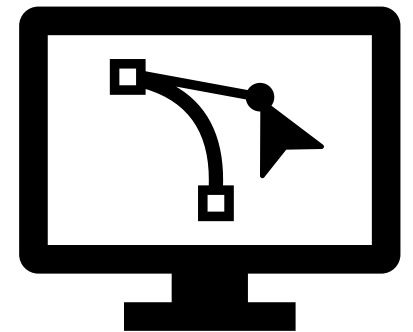
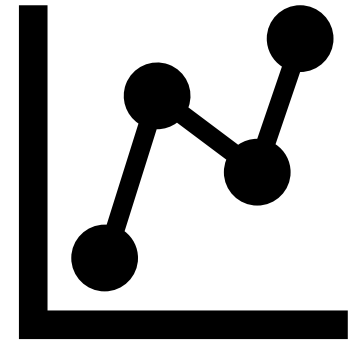
Objetivos

OBJETIVO GENERAL

- Evaluar el rendimiento del modelo SWAN, al ser utilizadas mallas estructuradas y no estructuradas en un pronóstico de oleaje para las costas de Tocopilla

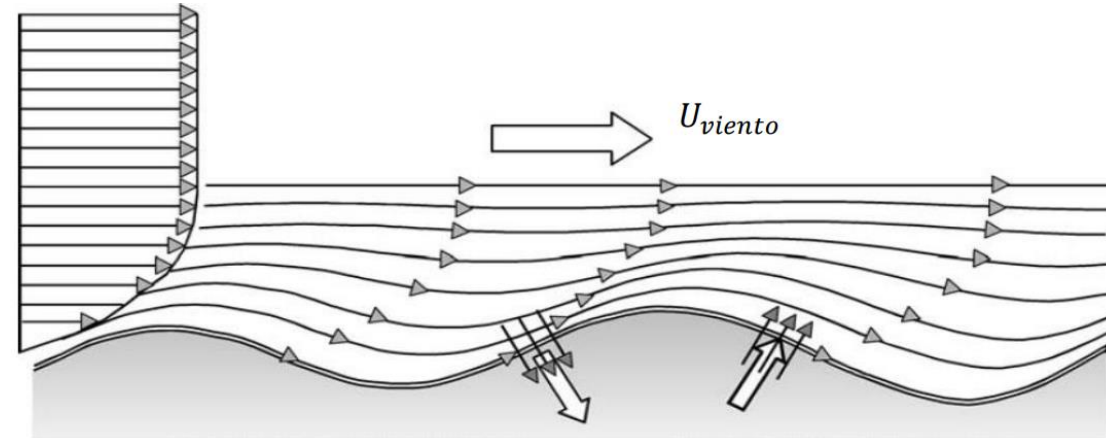
OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar las mallas de cálculo Estructuradas y No Estructuradas que cumplan con los criterios del modelo SWAN.
- Calibrar y validar el modelo SWAN haciendo uso de datos registrados en boyas en la zona de estudio.
- Medir el tiempo empleado para la obtención de resultados utilizando ambos tipos de mallas.



Marco teórico: Oleaje – Generación

- Movimiento ondulatorio superficial de un cuerpo de agua, resultado de la interacción con el viento, la gravedad y el fondo marino (Silva, 2005).
- Mecanismo de Phillips (1957) – **resonancia** entre ondas de presión de viento con ondas del agua.
- Mecanismo de Miles (1957) – presión del viento es mayor en barlovento y menor en sotavento, generando una retroalimentación positiva.



Representación del mecanismo de Miles (1957) sobre la generación de oleaje producto de la variación en la presión del viento (Holthuijsen, 2007).

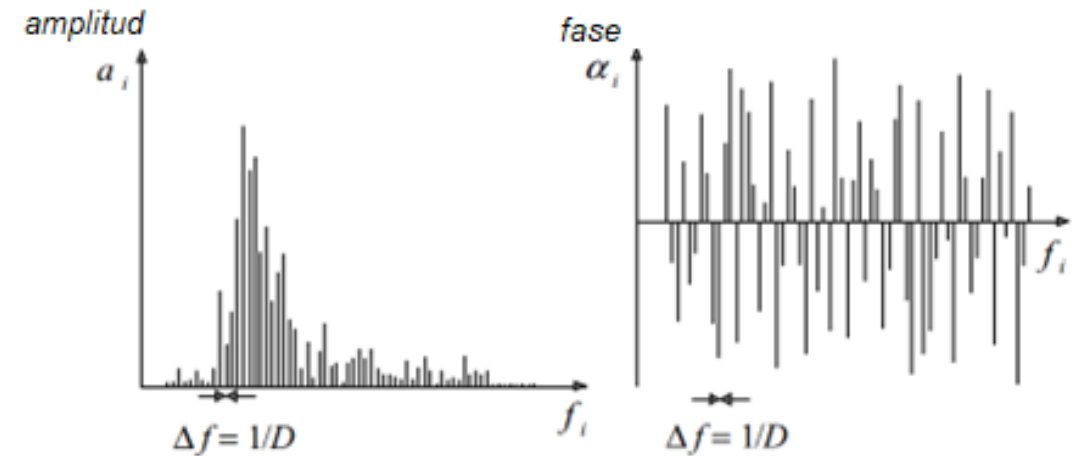
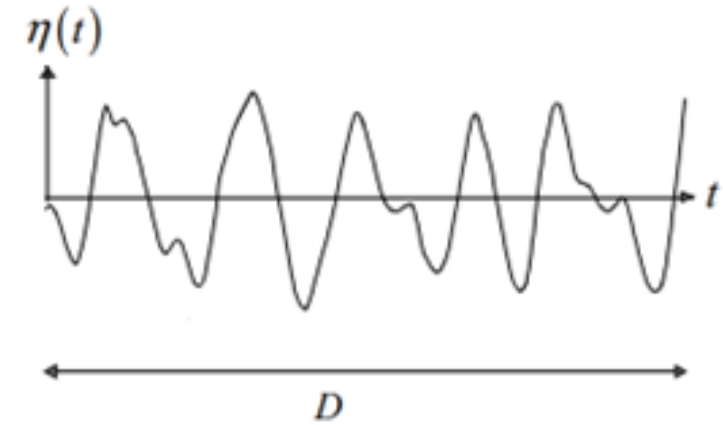
Espectros de oleaje

- Unidimensional

$$\eta(t) = \sum_{i=1}^N a_i \cos(2\pi f_i t + \alpha_i)$$

- Bidimensional

$$\eta(x, y, t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M a_{i,j} \cos(\omega_i t - k_i x \cos \theta_j - k_i y \sin \theta_j + \alpha_{i,j})$$



Espectros de amplitud y fase (Holthuijsen, 2007)

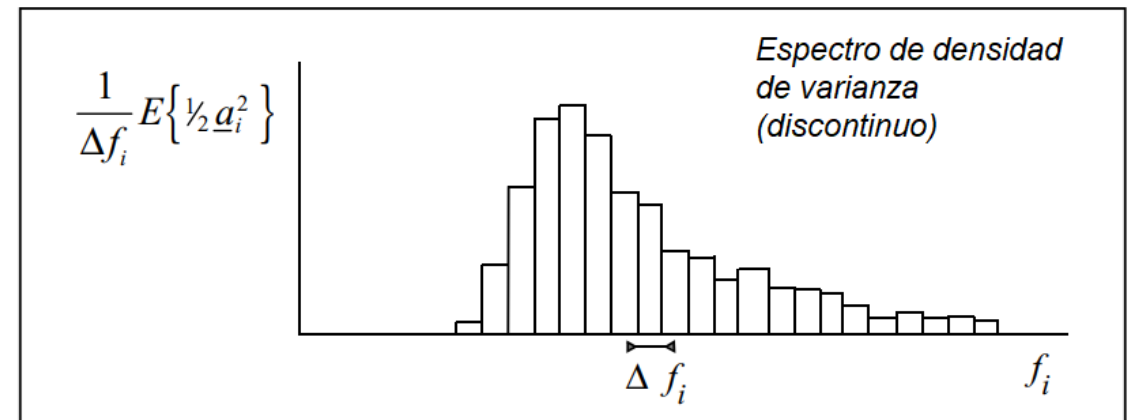
- **Espectro unidimensional de varianza:**

$$E(f_i) = \lim_{\Delta f_i \rightarrow 0} \frac{E\{1/2 a_i^2\}}{\Delta f_i}$$

- **Espectro bidimensional de varianza:**

$$E(f, \theta) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \lim_{\Delta \theta \rightarrow 0} \frac{E\{1/2 a^2\}}{\Delta f \Delta \theta}$$

Al realizar una **gran cantidad** de mediciones en un mismo punto y calculando el **promedio de las amplitudes** en cada una de estas mediciones, el promedio tiende a converger en un cierto valor, con esto se puede obtener la **varianza** como $\frac{1}{2} a_i^2$, obteniéndose el **Espectro de densidad de varianza**.



Espectro de densidad de varianza discretizado en su frecuencia (Holthuijsen, 2007).

Parámetros de resumen

Es posible obtener la altura, el periodo y la dirección, utilizando el **espectro de varianza**. Sin embargo, primero se deben obtener los momentos espectrales m_n

$$m_n = \int_0^\infty \int_0^{2\pi} f^n E(f, \theta) d\theta df$$

Además

$$E(\theta) = \int_0^\infty E(f, \theta) df$$

Altura Significativa espectral

$$H_{m0} = 4\sqrt{m_0}$$

Dirección media

$$D_m = \arctan_2 \frac{\int_0^{2\pi} E(\theta) \sin\theta d\theta}{\int_0^{2\pi} E(\theta) \cos\theta d\theta}$$

Periodo medio

$$T_m = \frac{m_0}{m_1}$$

Modelos numéricos y SWAN

- Existen dos tipos de modelos: los que **resuelven** la fase y los que **promedian** la fase.
- Los modelos numéricos que promedian la fase buscan resolver la **ecuación de balance de acción**.
- Se usa el espectro de densidad de **acción** y no el de **energía**, ya que el de acción se **conserva** en presencia de corrientes.
- Tienen en cuenta los efectos de pérdida de energía como, por ejemplo, el **whitecapping**, la **fricción de fondo** o las **interacciones no lineales**.
- SWAN es un modelo numérico que **promedia la fase**, es decir, resuelve la ecuación de balance de acción.

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial c_x N}{\partial x} + \frac{\partial c_y N}{\partial y} + \frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S}{\sigma}$$

$$S_{ds}(\sigma, \theta) = S_{wc}(\sigma, \theta) + S_{bf}(\sigma, \theta) + S_{br}(\sigma, \theta)$$

Términos de disipación

Whitecapping

- Rotura en aguas profundas

$$S_{wc} = -\Gamma \bar{\sigma} \frac{k}{\bar{k}} E(\sigma, \theta)$$

$$\Gamma = C_{ds}((1 - \delta) + \delta \frac{k}{\bar{k}})(\frac{\tilde{s}}{\tilde{s}_{PM}})^p$$

Coeficientes de Komen et al.
(1984): $C_{ds} = 2.36 \times 10^{-5}$, $\delta = 0$
y $p = 4$

Fricción de fondo

- Interacción del fondo marino con las partículas orbitales del oleaje

$$S_{bf} = -C_{bf} \frac{\sigma^2}{g^2 \sinh^2 kd} E(\sigma, \theta)$$

El modelo SWAN utiliza el coeficiente $C_{bf} = 0.038 \text{ m}^2 \text{ s}^{-3}$, obtenido empíricamente por Hasselmann (1974).

Rotura

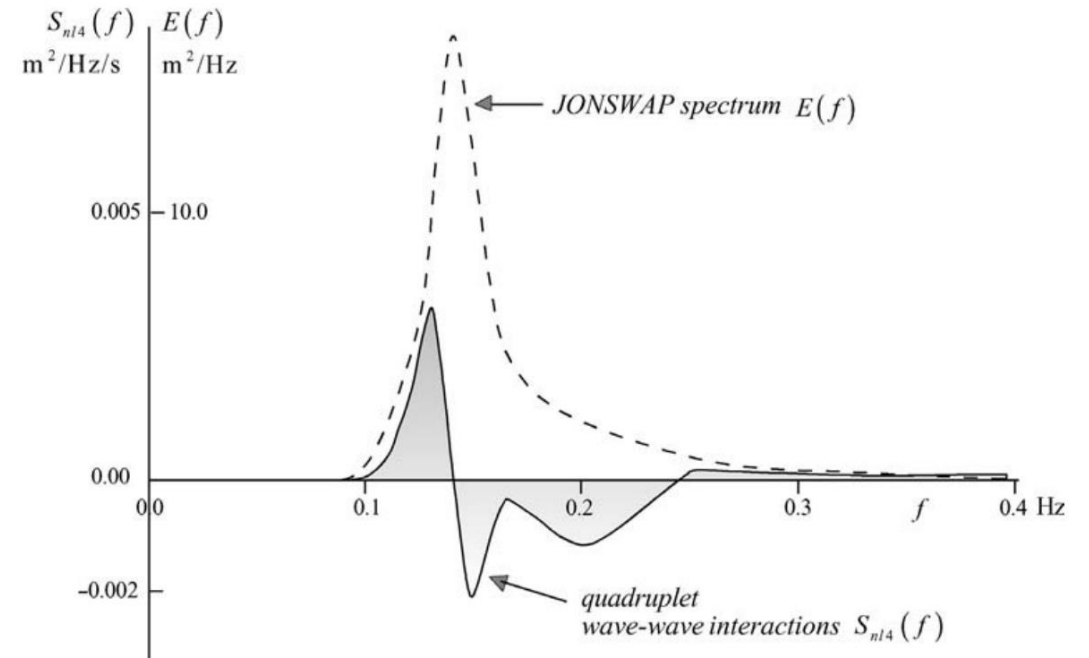
- Tras alcanzar cierta altura, el oleaje rompe y disipa energía

$$S_{br}(\sigma, \theta) = -\frac{S_{br,tot}}{E_{tot}} E(\sigma, \theta)$$

$S_{br,tot}$ es la tasa de disipación de la energía total, la cual depende, a su vez de un valor γ , tal que $\gamma = H_{max}/d$. Normalmente, se utiliza un valor $\gamma = 0.78$.

Interacciones No Lineales

- En general, son interacciones entre olas, las cuales **distribuyen la energía** a través del espectro.
- Las **cuadrupletas** son más importantes en **aguas profundas e intermedias**
- Las **triadas** resultan más importantes en **aguas someras**
- El cálculo de estas interacciones requiere de mucho tiempo, es por esto que se opta por **parametrizarlas**.



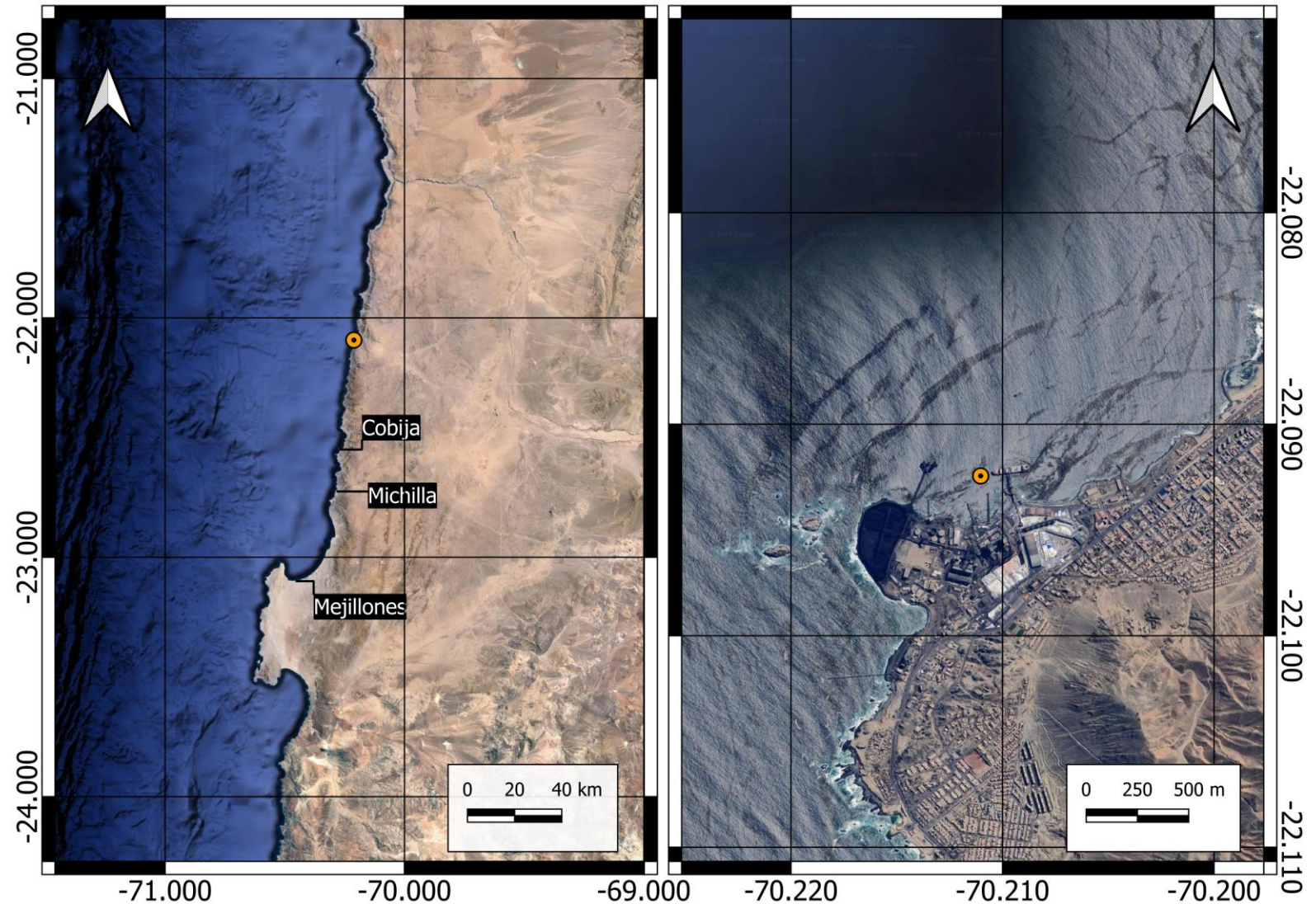
Representación de los cambios en el espectro de oleaje producto de las interacciones no lineales (Holthuijsen, 2007).

Metodología

- Zona de estudio:
Tocopilla, Región de
Antofagasta.

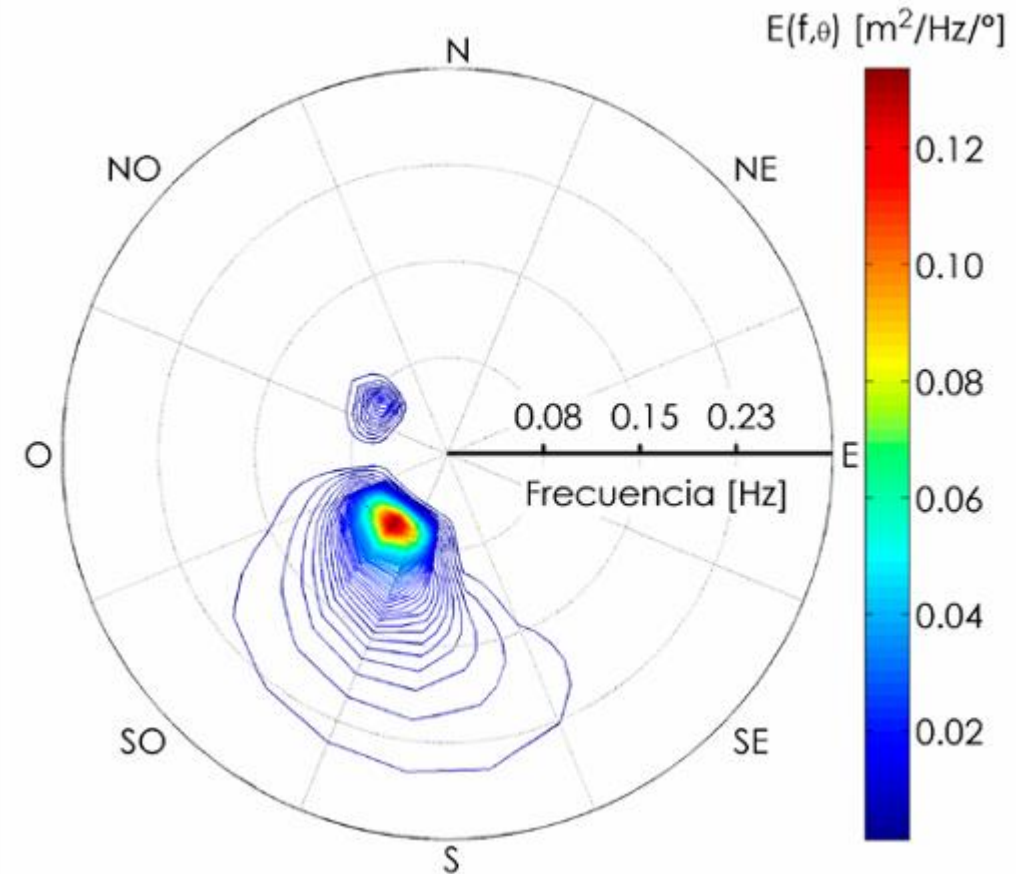
Latitud: -22,0941

Longitud: -70,201



Espectros de Oleaje

- Para la propagación de oleaje desde aguas profundas hacia aguas someras, es necesario contar con los **espectros de oleaje en aguas profundas**. Estos datos fueron obtenidos mediante el empleo del modelo **WAVEWATCH III** y facilitados por el Sistema de Alerta de Marejadas de la Universidad de Valparaíso, con una resolución espacial de 1° y una resolución temporal de 1 hora.
- Se cuenta con 81792 espectros bidimensionales de oleaje, que comprenden los periodos del 01/01/2015 a las 00:00 horas, hasta el 30/04/2024 a las 23:00 horas. La posición del nodo de extracción de espectros es: Lat. -22; Lon. -72.

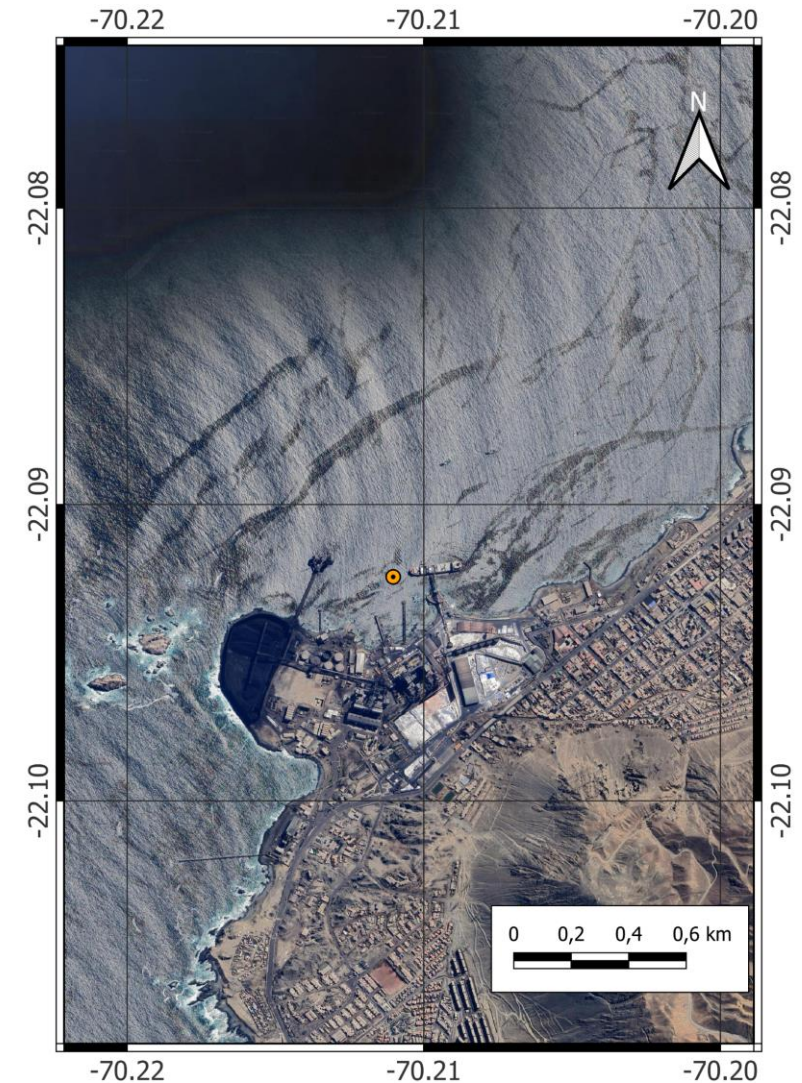


Ejemplo de espectro bidimensional de oleaje de Iquique (Beyá et al., 2016)

Datos de oleaje SQM Spotter 1

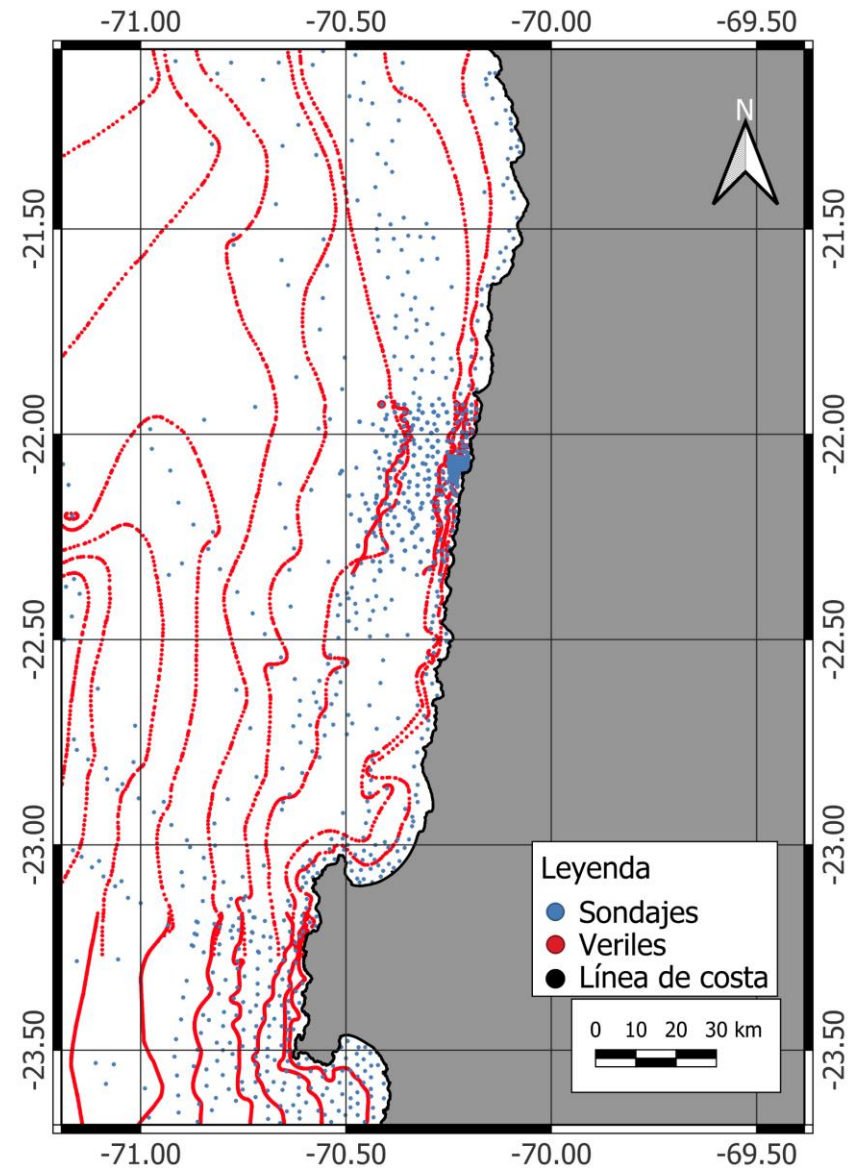
Para **calibrar y validar** el modelo se requiere contar con datos observados por algún instrumento de medición de oleaje. Para este caso, dichos datos fueron obtenidos de la boya **SQM Spotter 1**, la cual entrega datos de oleaje de altura H_{m0} , periodo medio T_m , periodo peak T_p , dirección media D_m y dirección peak D_p , en la posición Latitud= -22.092; Longitud= -70.211;

Es así como se logra obtener una base de datos de oleaje que comprende el periodo entre el 01/09/2020 a las 03:46 horas, hasta el día 26/04/2024 a las 17:46.



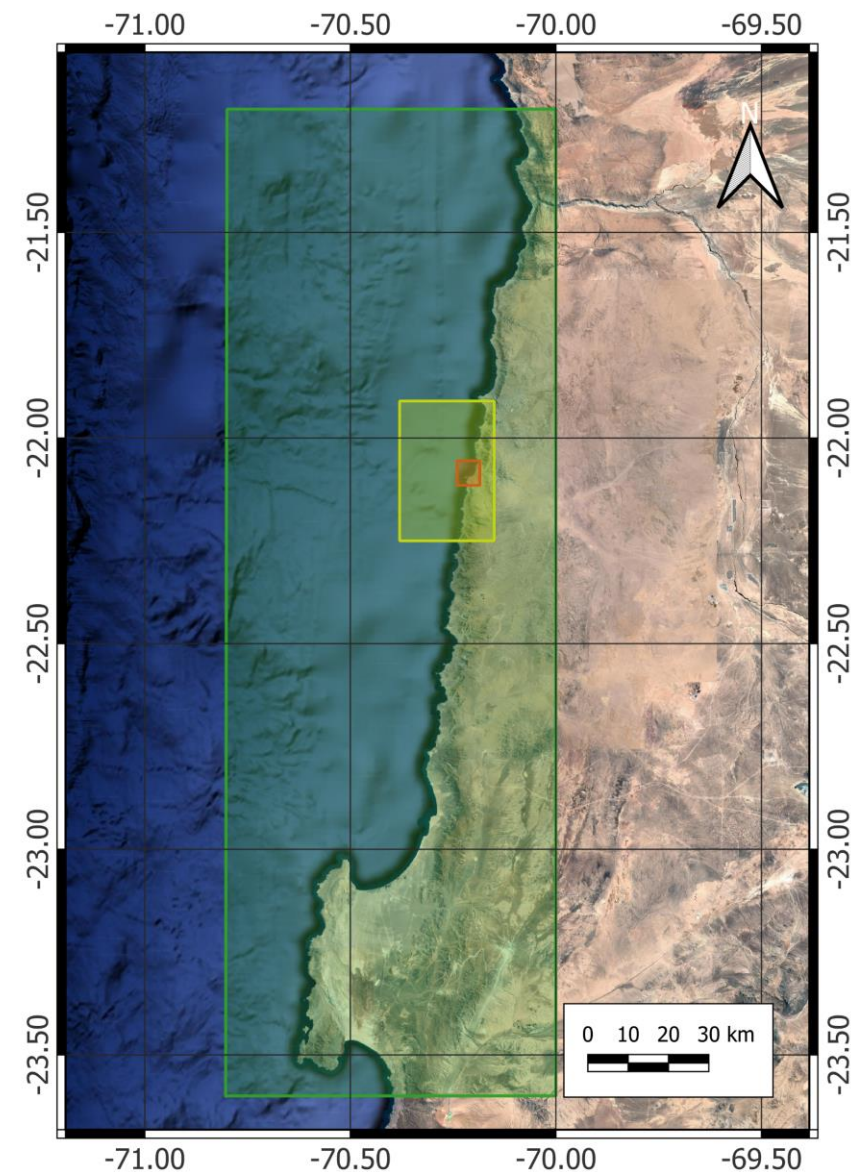
Modelo de elevación digital

El modelo de elevación digital contiene los datos de **profundidad** necesarios para la modelación en SWAN. El modelo de elevación digital se crea a partir de datos de **cartas náuticas** del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA), concretamente de las cartas **Nro. 1200, 1300 y 1311**.



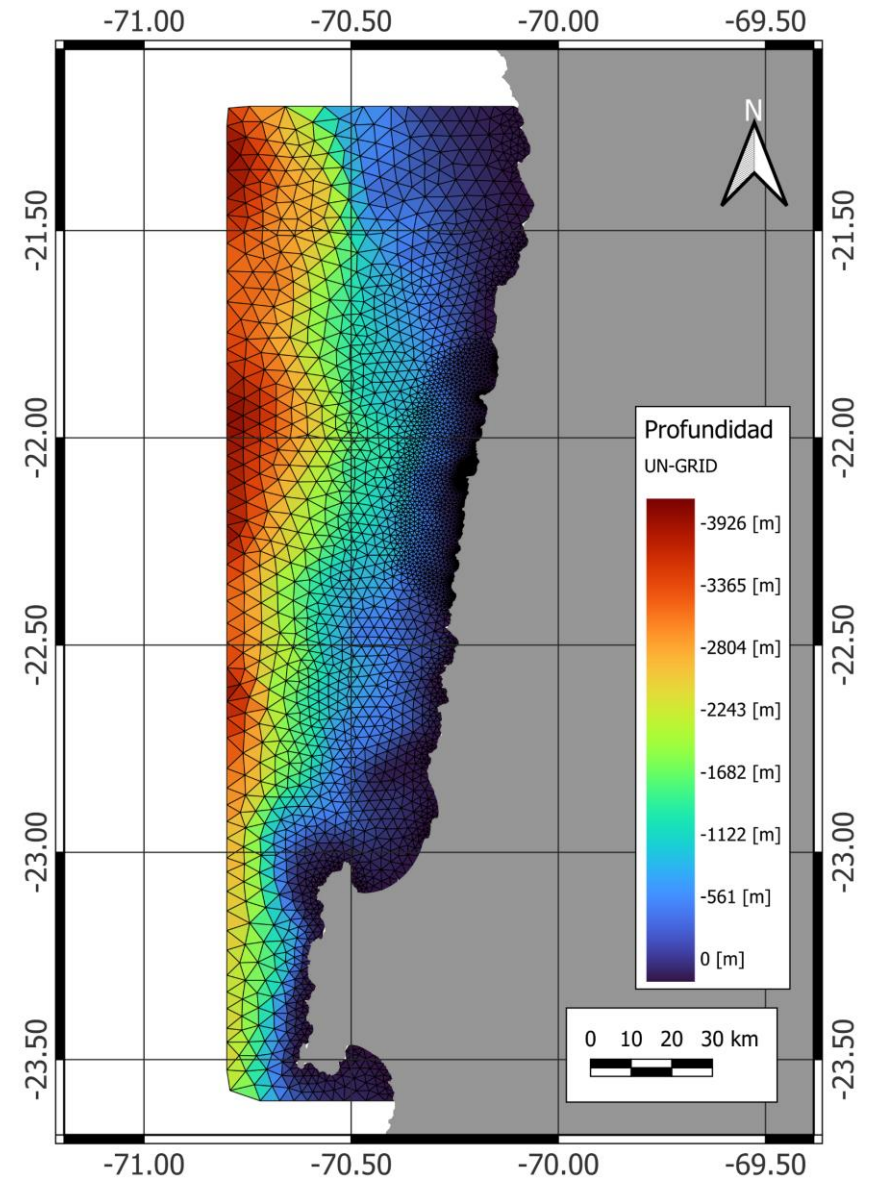
Malla Estructurada

Malla	Latitud inicial/final	Longitud inicial/final	Resolución	Nodos
Gruesa	-23.6 / -21.2	-70.8 / -70	1000 [m]	24120
Intermedia	-22.25 / -21.91	-70.38 / -70.15	200 [m]	24510
Local	-22.115 / -22.055	-70.24 / -70.185	40 [m]	25872



Malla No estructurada

- Para la generación de una **malla no estructurada**, compatible con SWAN, se emplea el programa **OceanMesh2D** (Roberts & Pringle, 2018), el cual utiliza el método de triangulación de Delaunay (1934).
- Esta malla tiene una **resolución mínima de 5000 metros y, una máxima de 20 metros**. Asimismo, cuenta con **8489 nodos** y 16132 elementos individuales, contando con más del 80% de los nodos en zonas cercanas a la costa de Tocopilla.



Modelación – Calibración

- Para calibrar el modelo es necesario **modificar** algunos de los **parámetros físicos** del modelo, como el whitecapping, la fricción de fondo, la disipación por rotura y las interacciones no lineales; para un periodo de **60 días de corrido modelados en modo no estacionario**.
- Sin embargo, modificar cada uno de los parámetros físicos resultaría altamente demandante en términos de tiempo de ejecución. Es por esto, que se decide por dejar los parámetros de **whitecapping e interacciones no lineales en sus valores por defecto** en SWAN. Y modificar únicamente la **fricción de fondo**.

N°	Nombre del modelo	Formulación de Fricción de fondo	Tipo de Malla	C_{bf}	C_f	kn
1	ST-CO015	Collins	Estructurada	-	0.015	-
2	ST-MA005	Madsen	Estructurada	-	-	0.05
3	ST-JS038	JONSWAP	Estructurada	0.038	-	-
4	ST-JS067	JONSWAP	Estructurada	0.067	-	-
5	ST-JS085	JONSWAP	Estructurada	0.085	-	-
6	ST-JS100	JONSWAP	Estructurada	0.1	-	-
7	ST-JS200	JONSWAP	Estructurada	0.2	-	-
8	UN-CO015	Collins	No estructurada	-	0.015	-
9	UN-MA005	Madsen	No estructurada	-	-	0.05
10	UN-JS038	JONSWAP	No estructurada	0.038	-	-
11	UN-JS067	JONSWAP	No estructurada	0.067	-	-
12	UN-JS085	JONSWAP	No estructurada	0.085	-	-
13	UN-JS100	JONSWAP	No estructurada	0.1	-	-
14	UN-JS200	JONSWAP	No estructurada	0.2	-	-

Indicadores de desempeño del modelo

Indicador estadístico	Ecuación
Error absoluto medio	$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i - O_i $
Raíz del error cuadrático medio	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}$
Sesgo	$BIAS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i - O_i$
Habilidad de pronóstico	$SS = 1 - \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N O_i^2}$
Coeficiente de determinación	$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N ((P_i - \bar{P}) \cdot (O_i - \bar{O}))}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}}$

Normalización y Calificaciones del modelo

$$X_{norm} = \frac{X_i - \min(X)}{\max(X) - \min(X)}; \quad 0 \geq X_{norm} \geq 1, \text{ para } R^2 \text{ y } SS$$

$$X_{norm} = 1 - \frac{X_i - \min(X)}{\max(X) - \min(X)}; \quad 0 \geq X_{norm} \geq 1, \text{ para } MAE \text{ y } RSME$$

$$X_{norm} = 1 - \frac{X_i - \min(abs(X))}{\max(abs(X)) - \min(abs(X))}; \quad 0 \geq X_{norm} \geq 1, \text{ para } BIAS$$

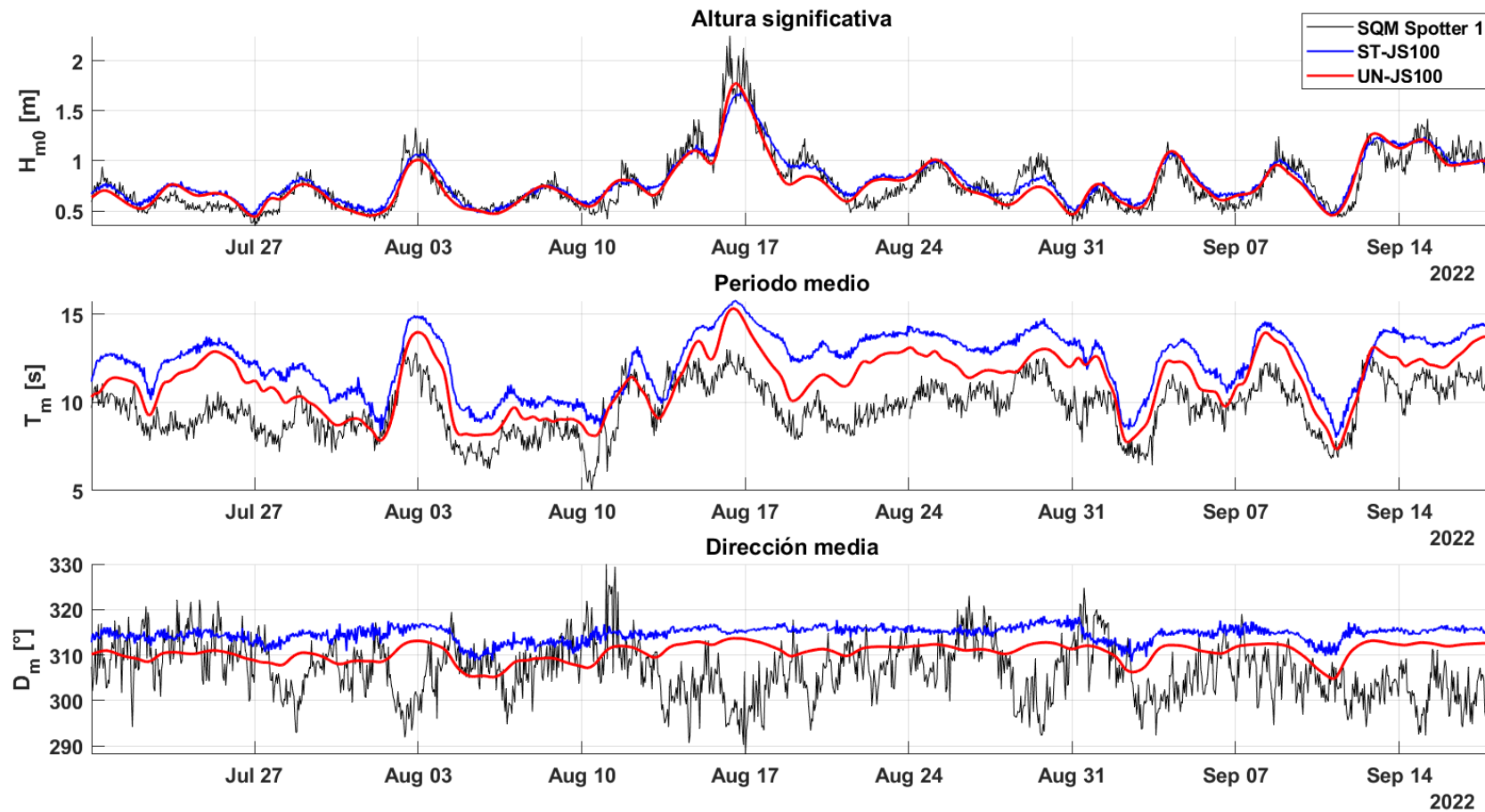
$$CDM^{IE} = \sum_{j=1}^5 \omega_j^{IE} \times X_{norm} \quad \text{con } j = MAE, RMSE, SS, BIAS \text{ y } R^2$$

$$CDM = \sum_{k=1}^5 \omega_k^{PR} \times CDM^{IE} \quad \text{con } k = H_{m0}, T_m, D_m \text{ y Tiempo empleado}$$

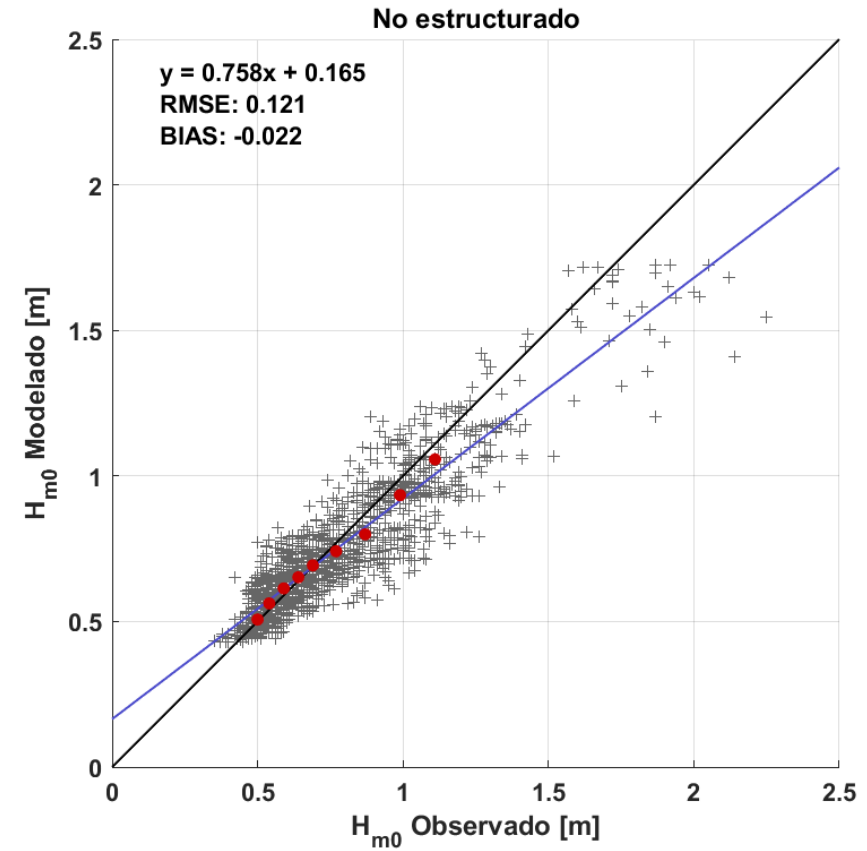
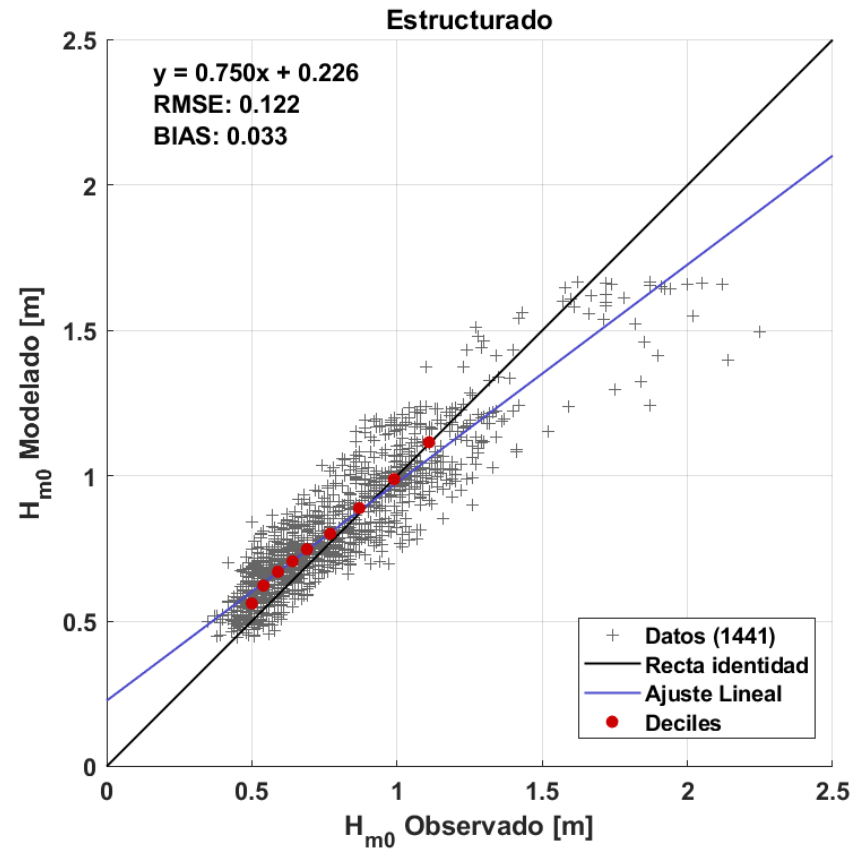
Indicador estadístico	Factor de importancia (ω^{IE})
MAE	0,2
RMSE	0,2
BIAS	0,2
SS	0,2
R^2	0,2
Total Σ	1

Parámetros de oleaje	Factor de importancia (ω_i^{PR})
H_{m0}	0,25
T_m	0,25
D_m	0,25
Tiempo Empleado	0,25
Total Σ	1

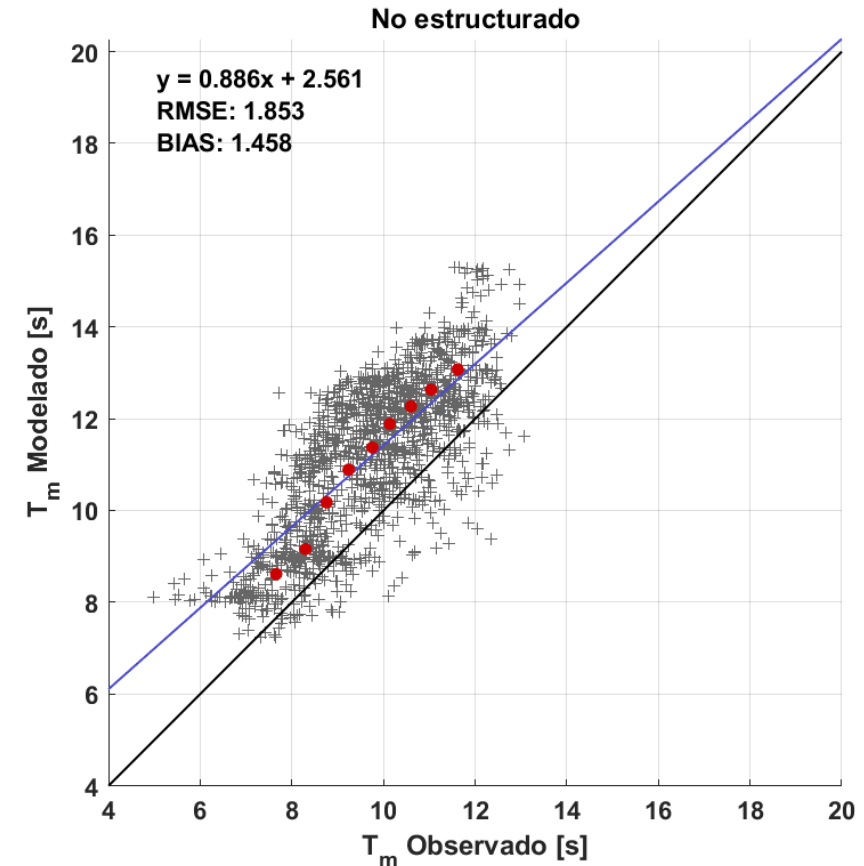
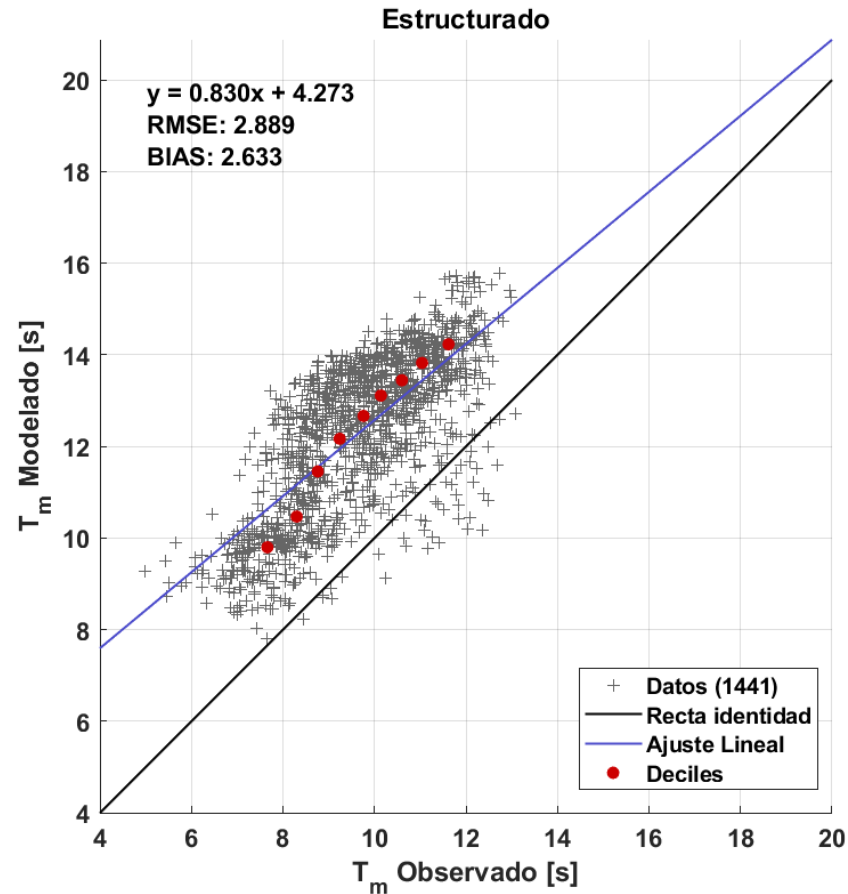
Resultados – Calibración



Dispersión - Altura significativa



Dispersión – Periodo medio



Dispersión – Dirección Media

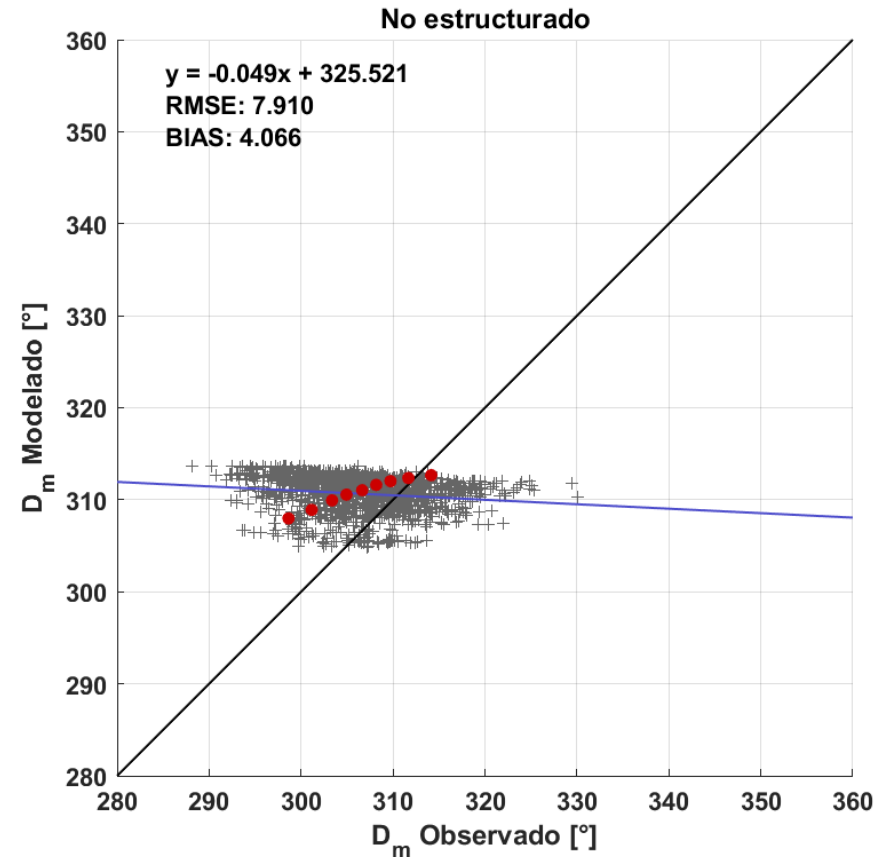
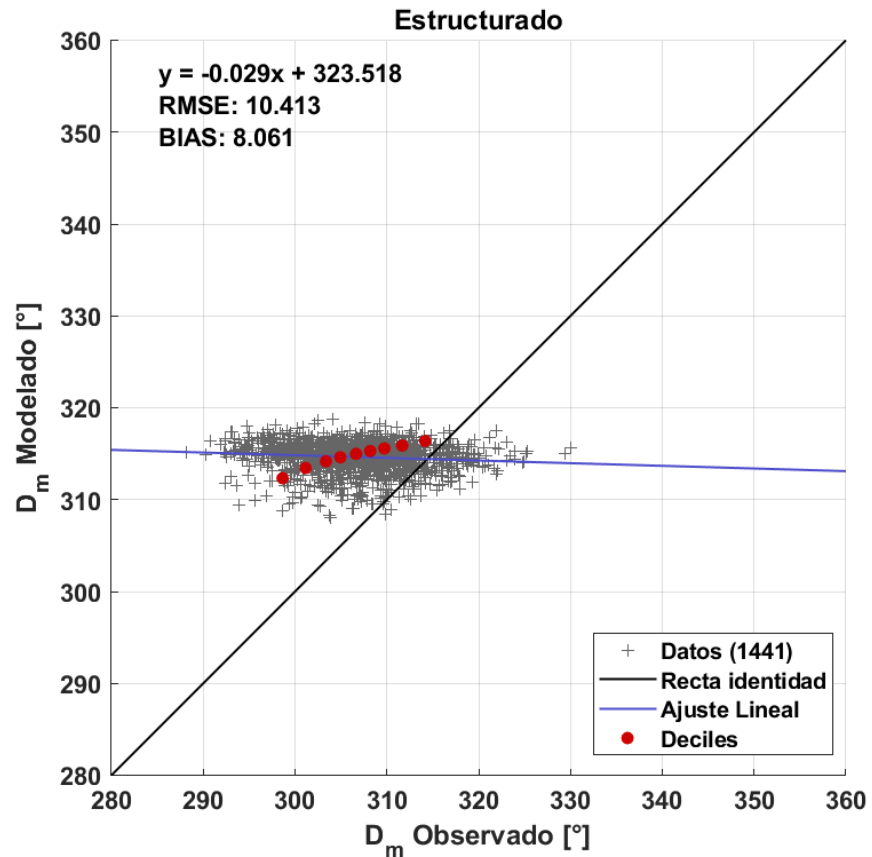
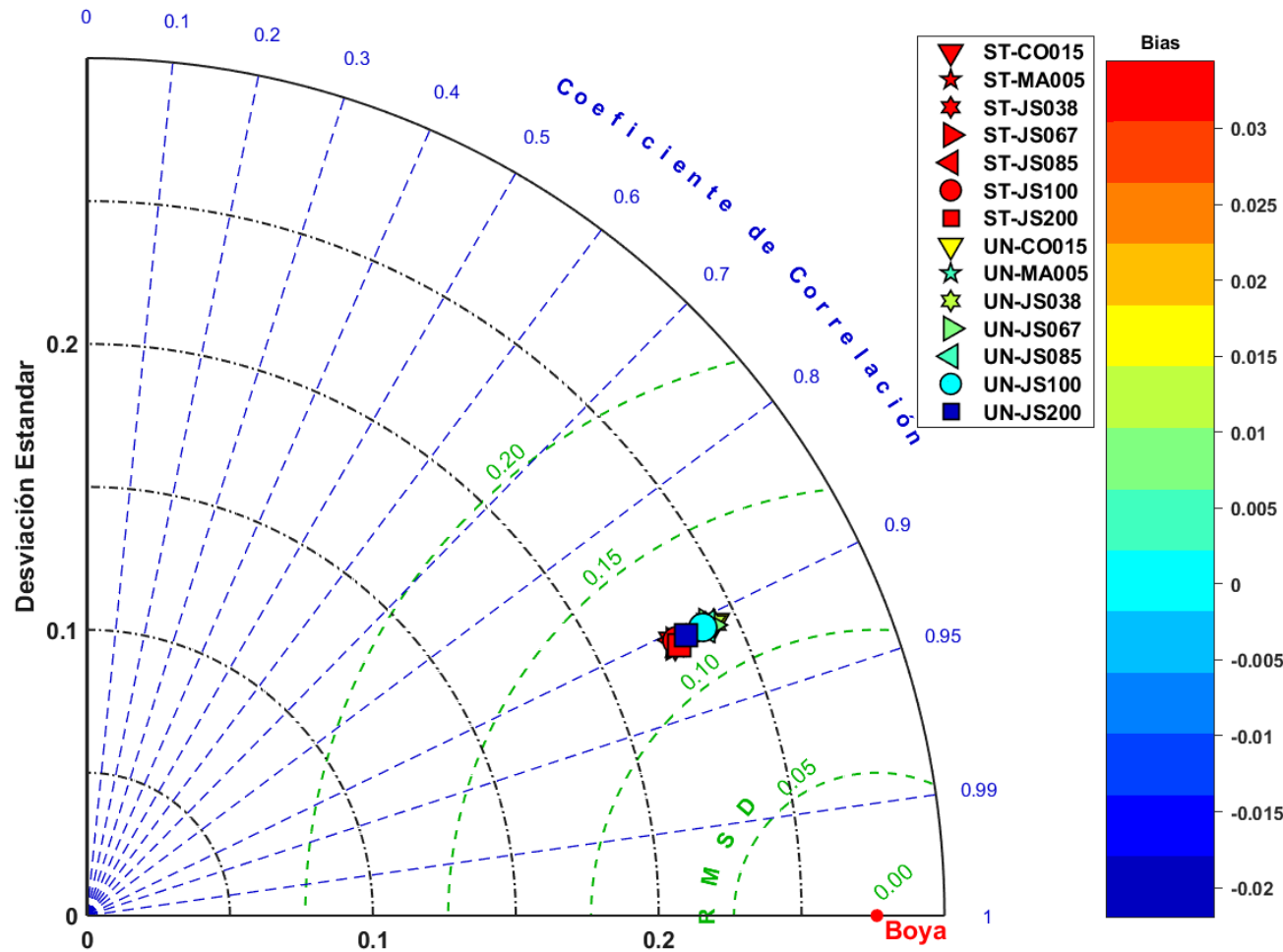
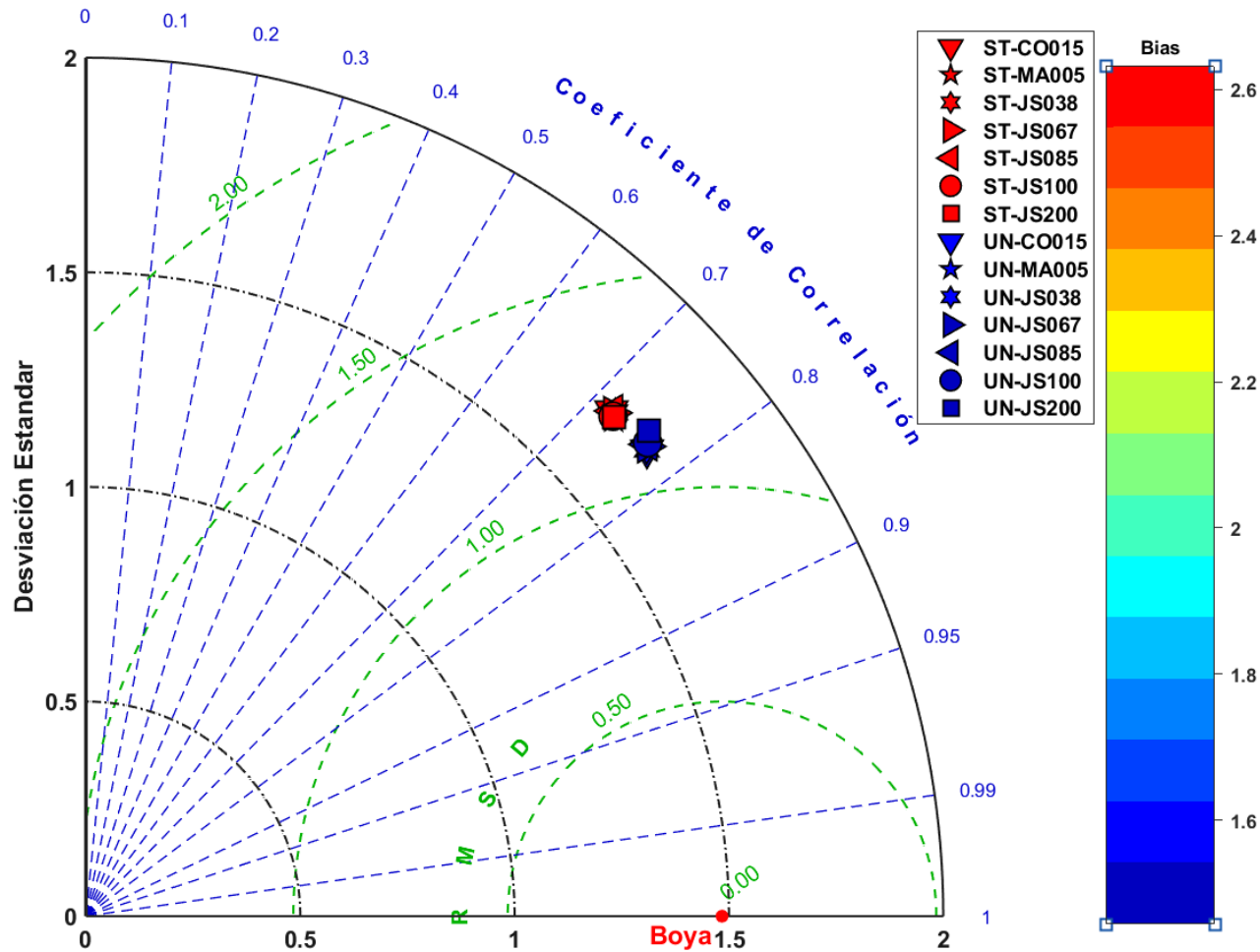


Diagrama de Taylor – Altura significativa



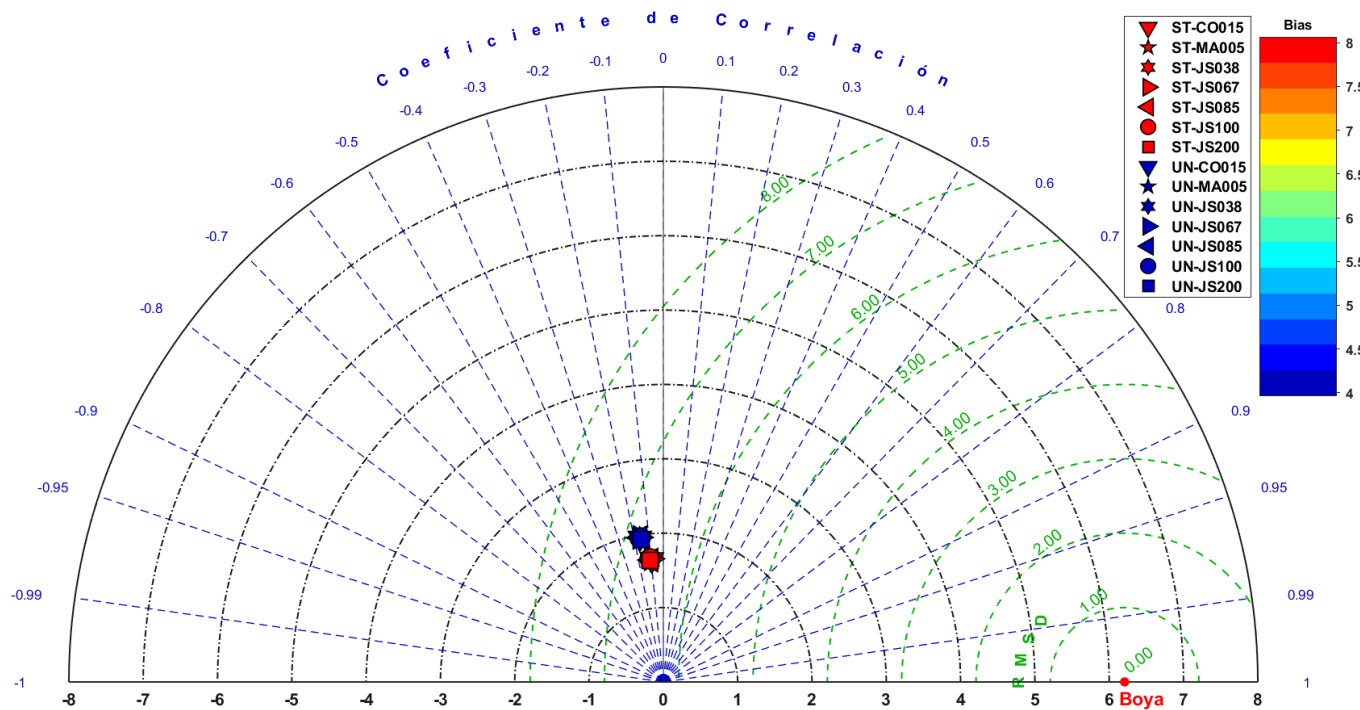
			Hm0		
	R	MAE [m]	RMSE [m]	BIAS [m]	SS
ST-CO015	0.914	0.093	0.120	0.034	0.854
ST-MA005	0.916	0.093	0.119	0.034	0.855
ST-JS038	0.915	0.093	0.119	0.035	0.854
ST-JS067	0.915	0.094	0.120	0.035	0.854
ST-JS085	0.915	0.093	0.119	0.033	0.855
ST-JS100	0.915	0.093	0.119	0.034	0.854
ST-JS200	0.918	0.092	0.118	0.034	0.856
UN-CO015	0.909	0.091	0.117	0.016	0.857
UN-MA005	0.909	0.090	0.116	0.006	0.858
UN-JS038	0.909	0.091	0.116	0.014	0.858
UN-JS067	0.909	0.090	0.116	0.007	0.858
UN-JS085	0.909	0.090	0.116	0.003	0.858
UN-JS100	0.909	0.090	0.116	0.000	0.858
UN-JS200	0.908	0.090	0.119	-0.021	0.854

Diagrama de Taylor – Periodo Medio



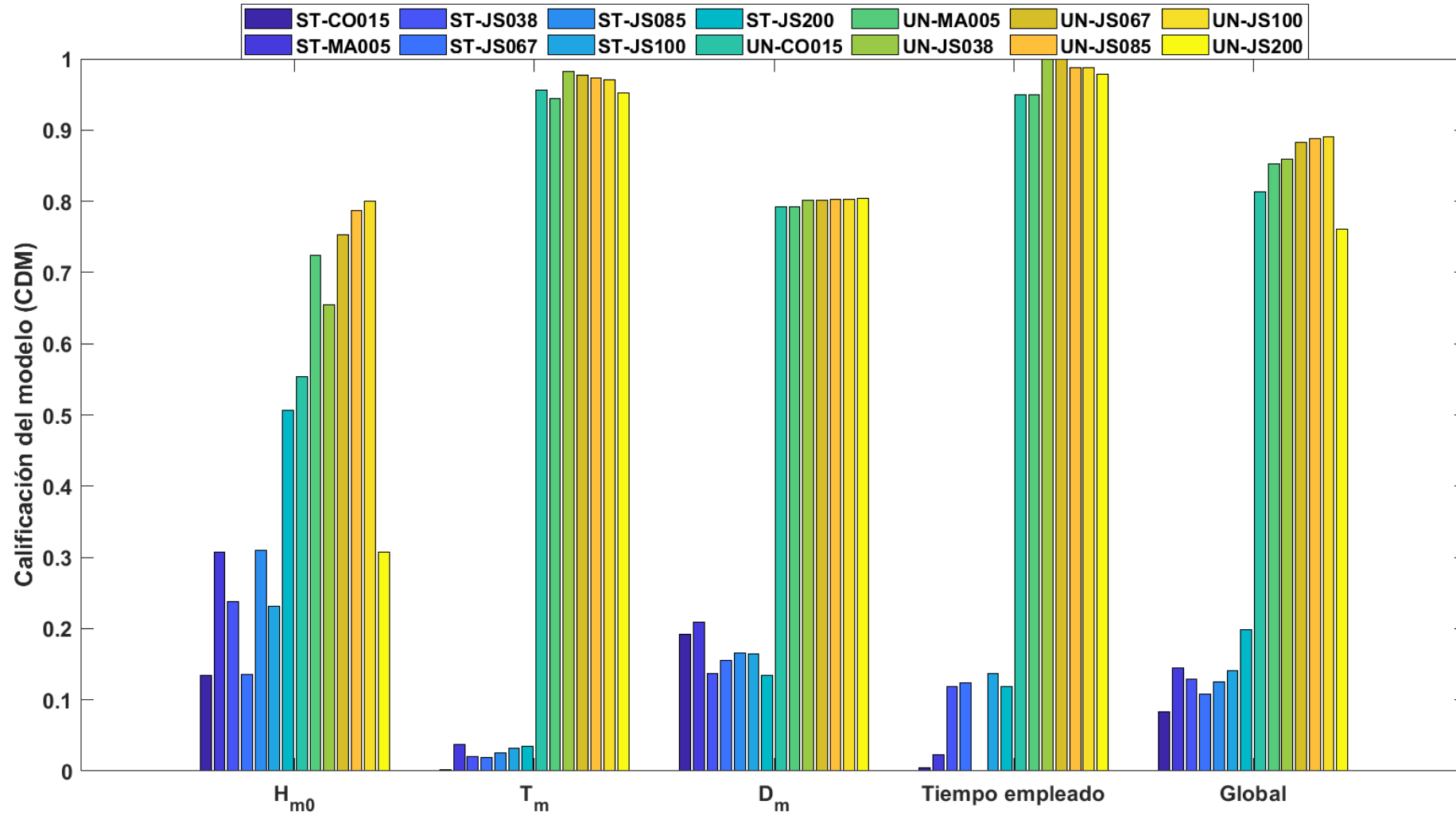
			Tm		
	R	MAE [s]	RMSE [s]	BIAS [s]	SS
ST-CO015	0.755	2.655	2.860	2.625	0.707
ST-MA005	0.761	2.646	2.847	2.620	0.709
ST-JS038	0.759	2.654	2.859	2.627	0.707
ST-JS067	0.759	2.653	2.857	2.625	0.708
ST-JS085	0.759	2.646	2.849	2.617	0.708
ST-JS100	0.761	2.651	2.850	2.622	0.708
ST-JS200	0.763	2.659	2.857	2.631	0.708
UN-CO015	0.798	1.610	1.859	1.545	0.810
UN-MA005	0.794	1.605	1.857	1.535	0.810
UN-JS038	0.797	1.575	1.824	1.504	0.813
UN-JS067	0.796	1.570	1.822	1.496	0.814
UN-JS085	0.795	1.568	1.821	1.491	0.814
UN-JS100	0.794	1.565	1.819	1.487	0.814
UN-JS200	0.788	1.549	1.810	1.457	0.815

Diagrama de Taylor – Dirección media

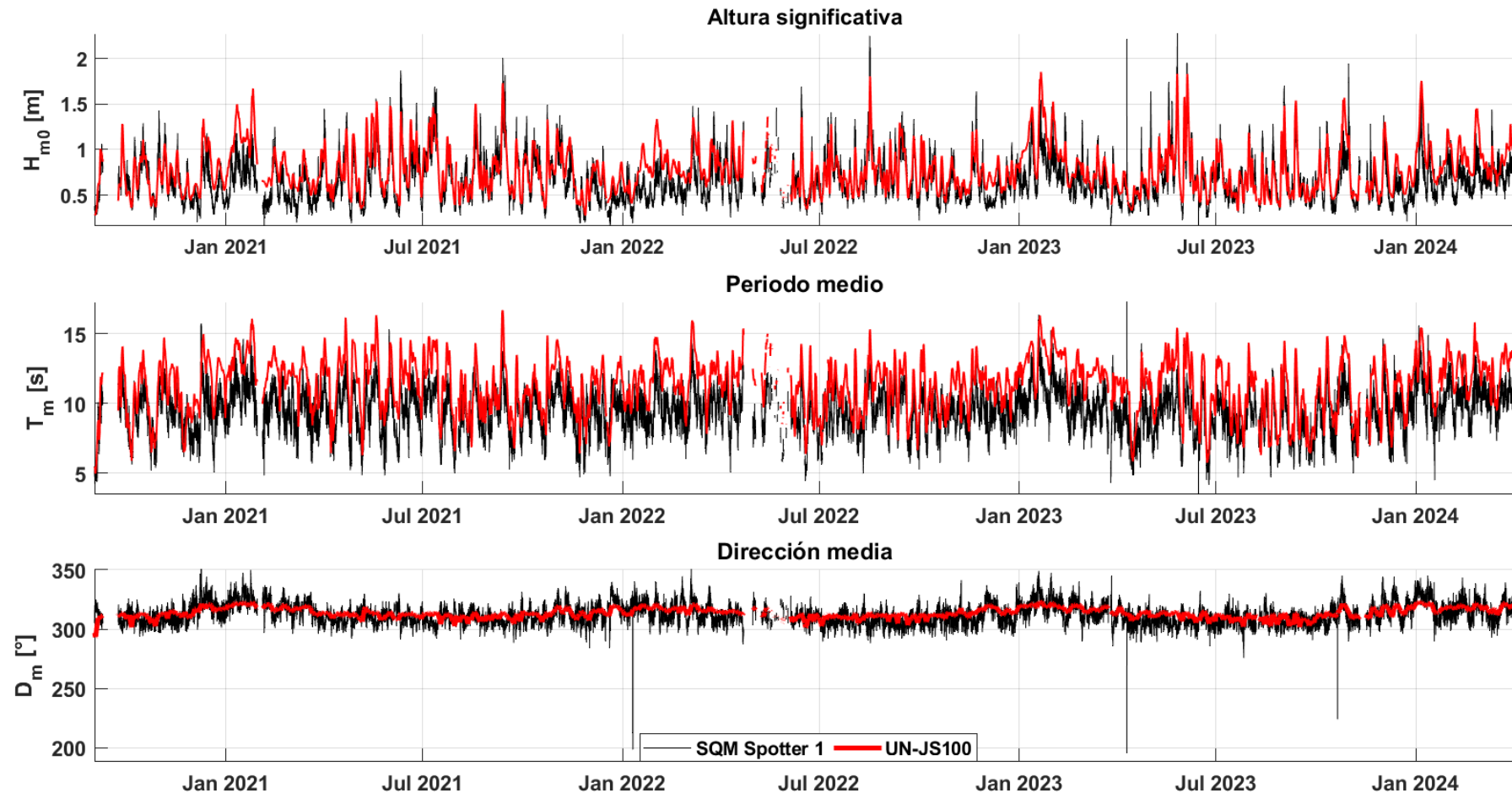


			Dm		
	R	MAE [°]	RMSE [°]	BIAS [°]	SS
ST-CO015	-0.126	8.768	10.403	8.020	0.966
ST-MA005	-0.117	8.781	10.408	8.045	0.966
ST-JS038	-0.144	8.813	10.445	8.058	0.966
ST-JS067	-0.139	8.785	10.421	8.024	0.966
ST-JS085	-0.135	8.780	10.417	8.029	0.966
ST-JS100	-0.134	8.791	10.429	8.041	0.966
ST-JS200	-0.145	8.812	10.444	8.053	0.966
UN-CO015	-0.201	6.330	7.958	4.013	0.974
UN-MA005	-0.199	6.338	7.968	4.055	0.974
UN-JS038	-0.200	6.313	7.937	3.960	0.974
UN-JS067	-0.199	6.317	7.942	3.980	0.974
UN-JS085	-0.198	6.320	7.946	3.992	0.974
UN-JS100	-0.198	6.322	7.948	4.002	0.974
UN-JS200	-0.194	6.336	7.967	4.064	0.974

Calificaciones de modelos

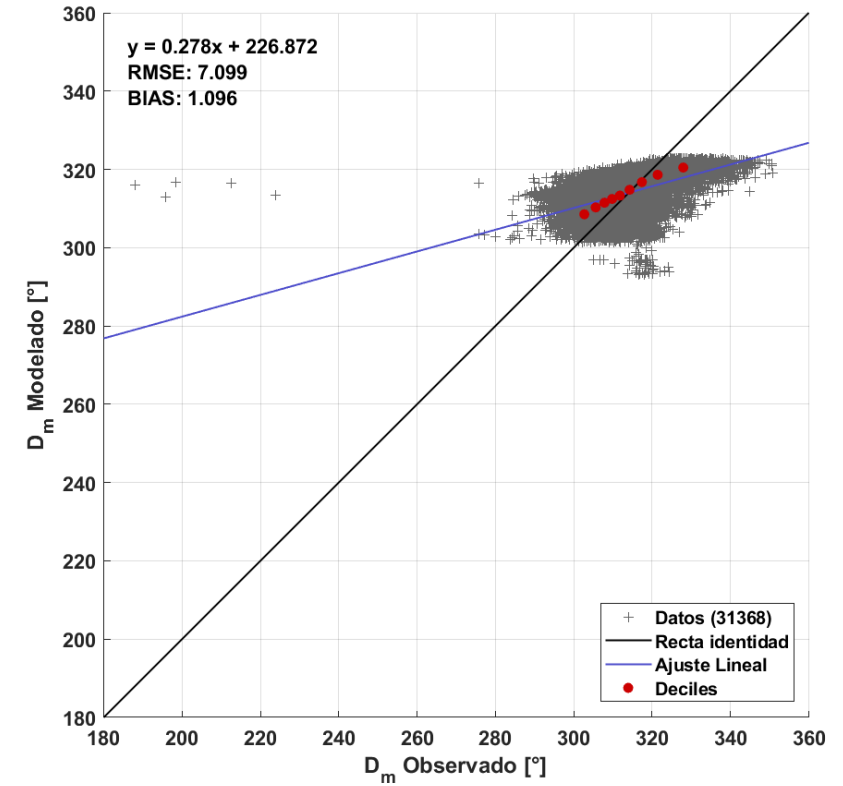
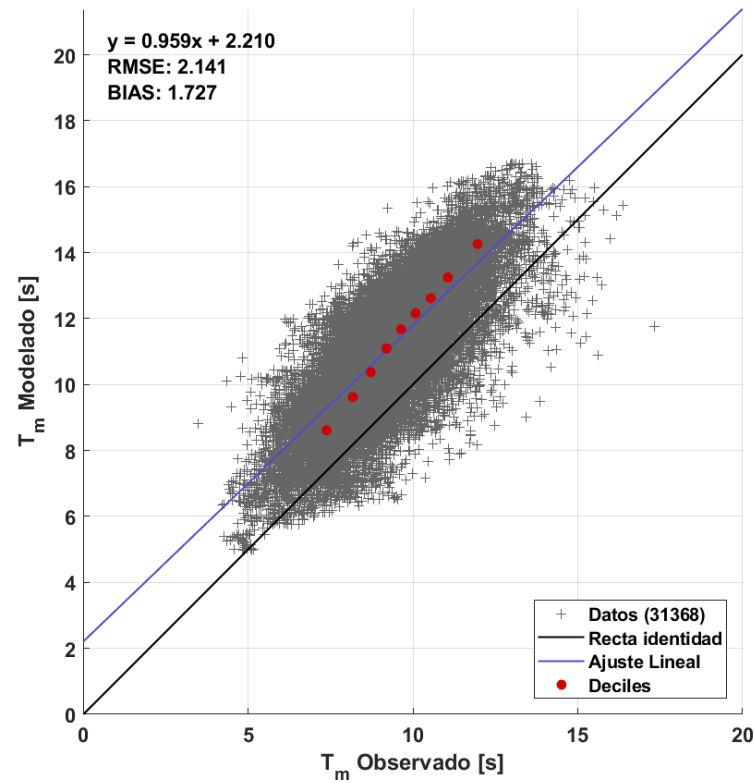
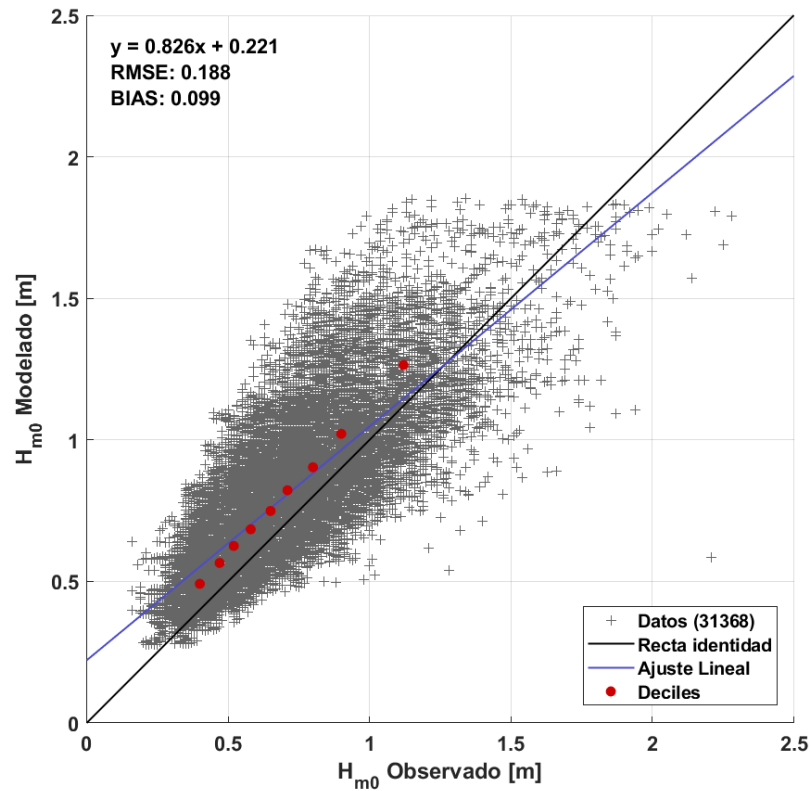


Validación – Series de tiempo



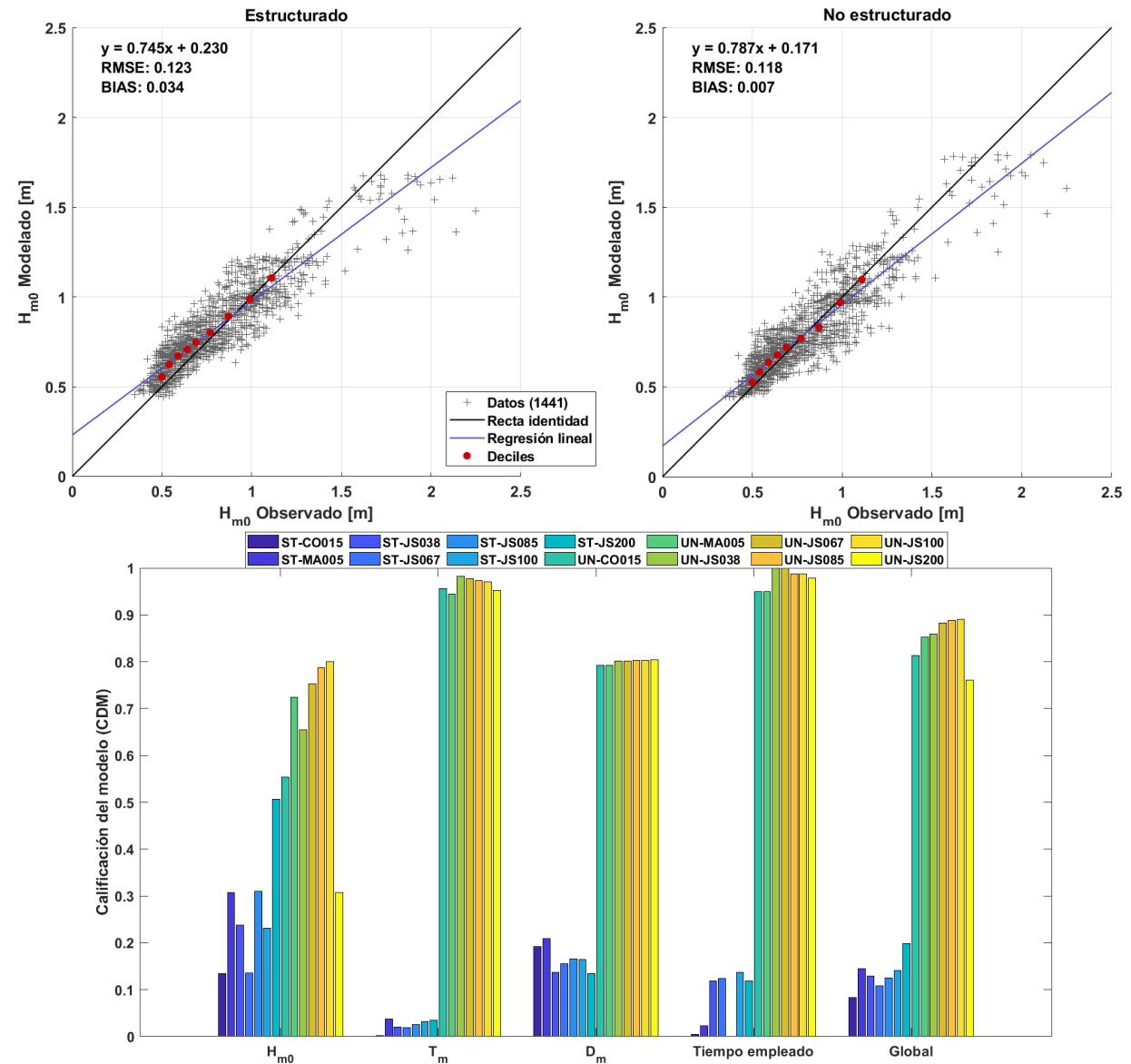
	Validación		
	H_{m0}	T_m	D_m
MAE	0.14 [m]	1.73 [s]	5.24 [°]
RMSE	0.19 [m]	2.08 [s]	7.09 [°]
BIAS	0.1 [m]	1.72 [s]	1.09 [°]
SS	0.73	0.77	0.98
R	0.79	0.78	0.56

Validación – Diagramas de dispersión



Discusión

- Las diferencias entre mallas regulares o estructuradas y mallas no estructuradas son **mínimas** para los indicadores estadísticos. Sin embargo, las **no estructurada** presentan **mejores resultados** que su contraparte **estructurada**. El **método de normalización** favorece de **sobremano** a las simulaciones con menores indicadores estadísticos, sin importar si estas diferencias al **segundo o tercer decimal**.

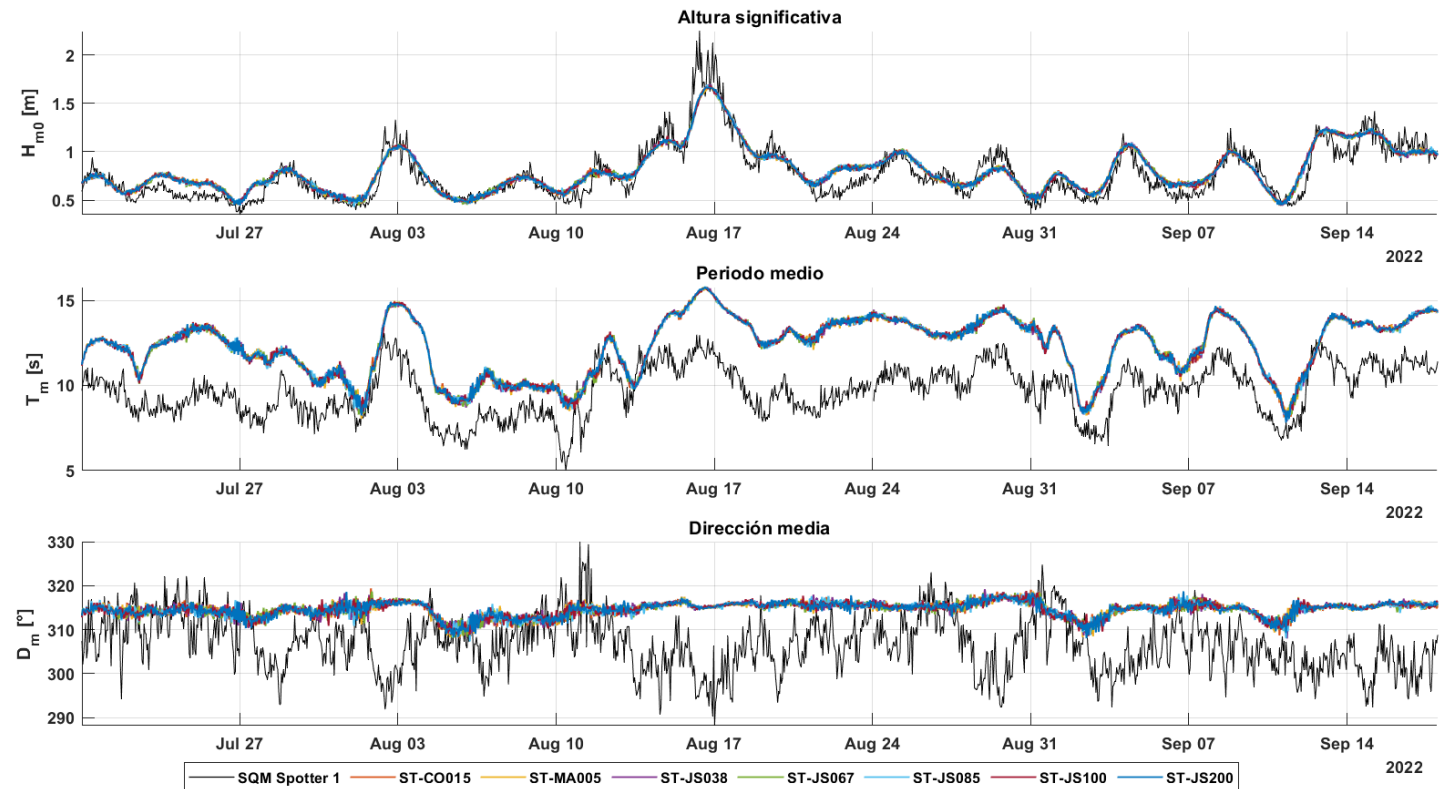


Discusión

- En cuanto a los **tiempos de cálculo** se observó que este es proporcional al **número total de nodos** de cálculo (Amunugama et al.,2019).
- Las direcciones medias no logran abarcar todo el **rango de direcciones observadas**, esto puede deberse al $\Delta\theta$ de 15° de los espectros obtenidos del modelo WAVEWATCH III. Un **menor $\Delta\theta$ en los espectros** podría abarcar mejor el rango de direcciones medias observadas. El modelo SWAN no logra representar las variaciones en las direcciones surgidas de la **reflexión y difracción del oleaje**.

Discusión

El modelo, en su configuración **estructurada**, mostró **inestabilidades**, las cuales no se presentaron para el caso No estructurado. Esto puede deberse al **salto brusco en el Δx** , al momento de pasar a una malla **anidada**.



Discusión

- SWAN sobreestima los **periodos** respecto a lo observado. Sin embargo, los modela **mejor** en la malla **no estructurada**. Para obtener mejores resultados, se puede realizar una calibración del **parámetro** δ en presente en la formulación de **whitecapping** (Pallares et al., 2014).
- El proceso de **calibración** estuvo limitado por el **tiempo de cómputo** necesario para modelar con las **mallas regulares anidadas**, requiriendo mucho más tiempo que las no estructuradas. Asimismo, un proceso de calibración más exhaustivo puede ser llevado a cabo utilizando únicamente mallas no estructuradas.

Conclusiones

- Las mallas no estructuradas entregaron mejores resultados estadísticos en todas las configuraciones.
- Se redujo considerablemente el tiempo de implementación y ejecución al pasar de una malla regular a una no estructurada.
- La variación de la fricción de fondo no demostró ser significativa.
- Para el caso analizado, el modelo SWAN tendió a sobreestimar tanto la altura significativa como el periodo medio.
- El modelo SWAN no logra representar las direcciones medias.

Bibliografía

- Amunugama, M., Suzuyama, K., Manawasekara, C., Tanaka, Y., & Xia, Y. (2019). Analysis of Wind-Waves With SWAN on Structured Mesh and Unstructured Mesh During The Arrival of Typhoon. *Journal of Japan Society of Engineers, Ser. B3 (Ocean Engineering)*, 75(2), I_283-I_288.
- Battjes, J. A., & Janssen, J. P. F. M. (1978). Energy loss and set-up due to breaking of random waves. *In Proceedings of 16th International Conference on Coastal Engineering, Am. Soc. of Civ. Eng.*, 569–587.
- Bertotti, L., & Cavalerfl, L. (1994). Accuracy of Wind and Wave Evaluation in Coastal Regions,. *In Proceedings of 24th International Conference on Coastal Engineering*, 57–67.
- Beyá, J., Álvarez, M., Gallardo, A., Hidalgo, H., Aguirre, C., Valdivia, J., Parra, C., Méndez, L., Contreras, F., Winckler, P., & Molina, M. (2016). *ATLAS DE OLEAJE DE CHILE* (Primera edición). Escuela de Ingeniería Civil Oceánica - Universidad de Valparaíso.
- Booij, N., Ris, R. C., & Holthuijsen, L. H. (1999). A third-generation wave model for coastal regions 1. Model description and validation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104(C4), 7649–7666. <https://doi.org/10.1029/98JC02622>
- Bosboom, J., & Stive, M. (2023). Coastal dynamics. In *Hydro Delft*. TU Delft Open. <https://doi.org/10.5074/t.2021.001>
- Eldeberky, Y. (1996). *Nonlinear Transformation of Wave Spectra in the Nearshore Zone*. Delft University of Technology.

Bibliografía

- Guisado, E., Malvárez, G., & Navas, F. (2010). Los modelos de propagación de oleaje, simulación morfodinámica y las TIG. *Tecnologías de La Información Geográfica: La Información Geográfica al Servicio de Los Ciudadanos. Secretariado de Publicaciones de La Universidad de Sevilla*, 861–872.
- Günther, H., Hasselmann, S., & Janssen, P. (1992). *The WAM Model cycle 4*.
- Hasselmann, K. (1974). On the spectral dissipation of ocean waves due to White capping. *Bound.-Layer Meteor*, 6, 1–2, 107–127.
- Hasselmann, S., Hasselmann, K., Allender, J. H., & Barnett, T. P. (1985). Computations and parameterizations of the nonlinear energy transfer in a gravity wave spectrum. Part II: Parameterizations of the nonlinear transfer for application in wave models. *Journal of Physical Oceanography*, 15, 1378–1391.
- Holthuijsen, L. H. (2007). *Waves in Oceanic and Coastal Waters*. Cambridge University Press.
- Komen G., Hasselmann S., & Hasselmann K. (1984). On the Existence of a Fully Developed Wind-Sea Spectrum. *Max-Planck-Institut Für Meteorologie, Hamburg FRG*.
- Lizano, O. G., Ocampo, F. J., Alvarado, L. F., Vega, R., José, Y., & Puig, M. (2001). Evaluación de modelos numéricos de Tercera Generación para el pronóstico del oleaje en Centroamérica y México. In *Top. Meteor. Oceanog* (Vol. 8, Issue 1).
- Miles, J. W. (1957). On the generation of surface waves by shear flows. *Journal of Fluid Mechanics*, 3, 185–204.
- Pallares, E., Lopez, J., Espino, M., & Sánchez-Arcilla, A. (2017). Comparison between nested grids and unstructured grids for a high-resolution wave forecasting system in the western Mediterranean sea. *Journal of Operational Oceanography*, 10(1), 45–58. <https://doi.org/10.1080/1755876X.2016.1260389>

Bibliografía

- Phillips, M. (1957). On the generation of waves by turbulent wind. *Journal of Fluid Mechanics*, 2, 417–445.
- Silva, R. (2005). *Análisis y descripción estadística del oleaje CEMIE-Océano View project EXCEED-SWINDON View project*.
- Tolman, H. L. (2008). *PRACTICAL WIND WAVE MODELING*.
- Wiegell, R. L. (2011). *Wave Theory and Measurements*. University of California.
- Winckler, P. (2021). *Introducción al modelado de procesos costeros. Apuntes de clases*. Universidad de Valparaíso.
- Zijlema, M. (2009). Parallel, Unstructured mesh implementation for SWAN. *Proc. 31th Int. Conf. Coastal Engineering*, ASCE, 470–482. www.worldscientific.com

COMPARACIÓN ENTRE MALLAS ESTRUCTURADAS Y NO ESTRUCTURADAS EN SWAN PARA UN PRONÓSTICO DE OLEAJE EN TOCOPILLA, REGIÓN DE ANTOFAGASTA

Proyecto de Título
Rodrigo Alejandro Navarrete Morales
Diciembre 2024