

Ministerio de Energía

Gobierno de Chile

Documentación del Explorador de Energía Marina Recurso Undimotríz

17 de junio de 2013

Preparado por:



Geofísica
FACULTAD DE CIENCIAS

rísicas y matemáticas JNIVERSIDAD DE CHILE

Colaboradores:





Contenidos

1. Introducción	2
2. Descripción del Explorador Marino	3
3. Descripción del Sitio Web	4
4. Implementación del modelo de oleaje WaveWatch III	8
5. Validación	11
6. Referencias	21

1. Introducción

Chile es un país que cuenta con un extenso litoral, lo que hace posible pensar que existe un importante potencial de energía de las olas frente a nuestras costas. Dado el desafío que enfrenta actualmente nuestro país en torno a aumentar y diversificar su matriz energética, resulta oportuno realizar una caracterización detallada del potencial de la energía undimotriz. El Explorador de Energía Marina avanza en esa dirección, ya que tiene como principal objetivo ampliar el conocimiento público del recurso energético presente en las costas de Chile a través del desarrollo de modelaciones numéricas.

Para llevar a cabo el Explorador de Energía Marina se utilizó un modelo de generación y propagación de oleaje (WaveWatch III) a alta resolución (1 km) y se simuló el oleaje del año 2010 completo.

En este documento se describe en detalle el Explorador de Energía Marina y se presenta la metodología que fue adoptada para la ejecución de las simulaciones numéricas. Además, se muestran las configuraciones de los dominios, indicando las bases de datos seleccionadas para utilizar como condiciones de borde en las distintas simulaciones.

Se evalúa el desempeño del modelo a través de validaciones realizadas mediante comparaciones con observaciones, la cuales son de origen satelital o mediciones *in-situ* otorgadas por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA).

2. Descripción del Explorador de Energía Marina: Recurso Undimotríz

El Explorador de Energía Marina es una herramienta destinada a proveer información del recurso energético unidomtriz (energía de las olas). En el Explorador se puede llevar a cabo una prospección preliminar del potencial energético de forma rápida y directa. Los resultados desplegados corresponden a simulaciones numéricas llevadas a cabo usando el modelo Wavewatch III. El Explorador cubre todo el territorio nacional, desde Arica a Tierra del Fuego, con una resolución espacial de 1 km en la costa. Se presentan los resultados de las simulaciones para el año 2010 completo, con una resolución temporal horaria.

Los parámetros presentados en el Explorador de Energía Marina son:

Altura significativa (H_s) : Corresponde a la media aritmética del tercio de olas más altas de un conjunto de olas.

Periodo medio (T): Es la media aritmética de los periodos del oleaje.

Potencia (P): Es el flujo de energía en kilowatts por metros, obtenido a través de la siguiente relación: $P = 0.5 T H_s^2$

Dirección media (D): Es la media aritmética de las direcciones del oleaje.

Es posible visualizar mapas mensuales de la altura significativa, periodo medio y la potencia con el objetivo de observar la estacionalidad del recurso undimotriz en Chile. Además, se puede obtener de manera rápida, un resumen del recurso energético en puntos de interés para el usuario, sólo al hacer un `clic` sobre el mapa. Igualmente, se pueden obtener informes más detallados de cualquier punto cercano a la costa, los cuales incluyen estadística básica, series de tiempo de altura significativa y potencia, y la rosa del oleaje.

3. Descripción del Sitio Web

El Explorador de Energía Marina posee un conjunto de herramientas que permiten visualizar, de forma interactiva, mapas del recurso undimotriz en las costas de Chile (Figura 3.1). Además, el Explorador tiene la capacidad de entregar información más detallada en puntos de interés para el usuario.

Las herramientas de visualización permiten desplegar mapas de la altura significativa, el periodo medio y potencia del oleaje. El usuario puede escoger entre el promedio anual de los datos o los promedio mensuales.

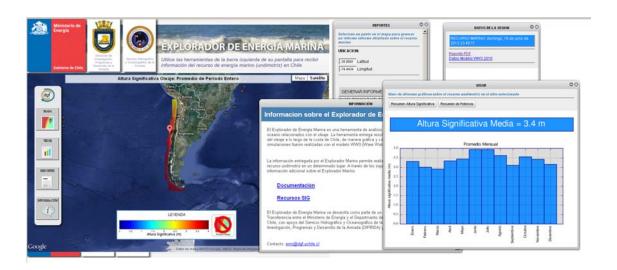


Figura 3.1. Explorador Marino. A la izquierda se presenta el aspecto general de los mapas desplegados por el Explorador Marino. A la derecha se muestran todas las herramientas que permiten acceder a las funcionalidades del Explorador Marino.

MAPA

Utilizando la opción "MAPA" en la barra de herramientas, se controlan los campos desplegados en la pantalla GoogleMaps® (Figura 3.2). Al ingresar en la página web, el mapa del promedio de la altura significativa para todo el año 2010, es desplegado por defecto. Sin embargo, el usuario también puede seleccionar el periodo medio y potencia del oleaje. La barra de desplazamiento de los meses permite visualizar el promedio mensual de la variable seleccionada.

En el mapa la altura significativa es representada con una determinada escala de colores. Los colores cálidos corresponden a valores mayores de altura, y a su vez los colores fríos a valores menores de altura. Por defecto, la escala de color muestra valores entre 0 a 4 m. Para cambiar la escala de color, y así visualizar un rango más acotado o más amplio, simplemente se debe hacer 'clic' sobre alguna de las opciones 0-2 m, 0-4 m, o 0-6 m. Inmediatamente se podrá apreciar en el mapa la nueva escala de colores. La representación gráfica de las variables de periodo medio (T) y potencia (P) es análoga a esto.

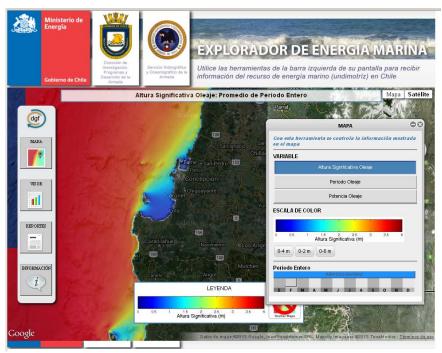


Figura 3.2. La herramienta MAPA permite seleccionar la variable desplegada en Google Maps. A través de la interfaz gráfica es posible cambiar la escala de colores y seleccionar un mes en particular.

VISOR

El VISOR permite obtener información básica sobre el comportamiento de las distintas variables de manera gráfica y prácticamente instantánea (Figura 3.3). Esta herramienta es de gran utilidad ya que permite obtener información cuantitativa para puntos geográficos seleccionados a través de un 'clic' en el mapa. Por defecto, se entrega la información de la altura significativa promedio anual y mensual en el punto de interés.

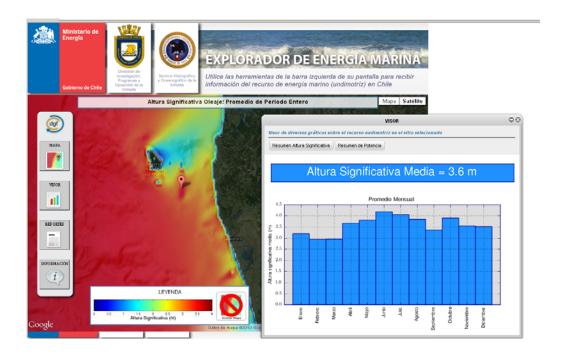


Figura 3.3. La herramienta VISOR permite acceder al promedio anual y promedio mensual de la altura significativa en un punto de interés definido por el usuario.

REPORTES

Al utilizar la herramienta REPORTES se puede obtener información más detallada sobre el recurso undimotriz. Al hacer 'clic'sobre el botón REPORTES, se abre una ventana con el formulario que permite especificar la consulta (Figura 3.4). Una vez completado el formulario y enviada la solicitud, el sistema entrega como resultado un documento en formato PDF que incluye estadística relevante para la evaluación de potencial undimotriz. Conjuntamente, el sistema ofrece al usuario la opción de acceder a las series de tiempo utilizadas para el cálculo de las estadísticas contenidas en el informe. Para generar un reporte el usuario debe identificar el punto de interés, usualmente a través de un 'clic' en el mapa que posiciona un marcador rojo sobre el punto seleccionado. Las coordenadas geográficas del punto seleccionado aparecen en el formulario REPORTES. Una vez completado el formulario el usuario debe hacer 'clic' sobre el botón GENERAR INFORME. En la herramienta REPORTES aparecerá un botón azul que indica el estado de la generación del reporte. Una vez que se ha generado el reporte, se desplegará en la pantalla un mensaje con el vínculo de descarga de dicho reporte, desde donde el usuario podrá obtener un archivo en formato PDF, con la información solicitada respecto del sitio de interés.

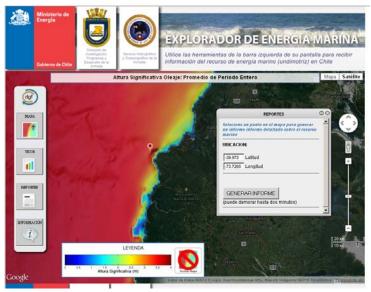


Figura 3.4. Formulario de la herramienta REPORTES que permite identificar el punto seleccionado para generar el reporte.

INFORMACION

La herramienta INFORMACION (Figura 3.5) entrega acceso a un conjunto de recursos relevantes entre los cuales se halla la presente documentación, y archivos con los mapas del recurso undimotríz en un formato compatible con los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Finalmente, se dispone la dirección de correo errc@dgf.uchile.cl que será utilizada como un mecanismo de comunicación entre desarrolladores y usuarios

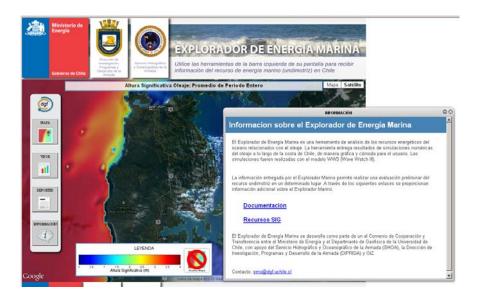


Figura 3.5. Ventana de INFORMACION con enlaces al informe final del proyecto e información de contacto.

4. Implementación del modelo de oleaje WaveWatch III

Para obtener una prospección de la energía undimotriz presente en las costas de Chile, el sistema de modelación implementado es WaveWatch III¹. Este modelo de tercera generación, es un modelo espectral de olas oceánicas, el cual expresa la distribución de energía en función de la frecuencia y la dirección del oleaje.

Dado que las olas que inciden en las costas de Chile pueden propagarse desde cualquier punto de la cuenca del Océano Pacífico, el clima del oleaje incidente en Chile es de gran complejidad. Por lo tanto, es importante contar con un dominio mayor que considere toda la cuenca del Océano Pacífico. Este dominio mayor cuenta con una resolución horizontal de 0.5° (Figura 4.1a). Una grilla de resolución intermedia (~5 km) se encuentra anidada al dominio Pacífico, la cual cubre todo Chile hasta aproximadamente 1500 km fuera de la costa (Figura 4.1a). Finalmente se anidaron 6 grillas de alta resolución espacial (1 km) ubicadas sobre la zona costera de Chile cubriendo hasta aproximadamente 100 km costa afuera (Figura 4.1b).

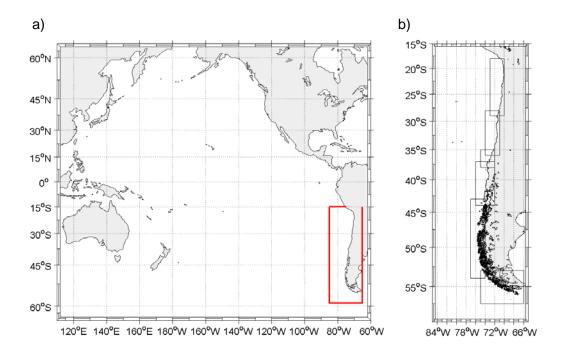


Figura 4.1. a) Dominio mayor de resolución espacial 0.5°. La región enmarcada con rojo corresponde a la grilla anidada de resolución espacial de 5 km. b) Configuración de los dominios anidados de alta resolución (1 km) utilizados para cubrir toda la costa de Chile.

8

¹ WaveWatch III es un modelo de olas desarrollado en Estados Unidos por el NWS (*National Weather Service*). Para más información se puede visitar la siguiente página: http://polar.ncep.noaa.gov/waves/index2.shtml)

Se utilizaron distintas bases de datos de batimetría en los diferentes dominios de la simulación. La batimetría utilizada para generar la grilla del Pacífico corresponde a la base de datos ETOPO2 (Figura 4.2a), la cual cuenta con una resolución de ~4 km (Smith & Sandwell, 1997). Por otra parte, para generar las grillas anidadas de resolución intermedia y alta resolución, la batimetría utilizada corresponde a la base de datos GEBCO² (Figura 4.2b), la cual cuenta con una resolución espacial de 1 km.

Otra variable importante para generar las distintas grillas es la línea de costa, ya que utilizando estos datos se generan obstrucciones que producen una atenuación de la energía de las olas por efecto de las islas no representadas en el modelo debido a la resolución de la batimetría. En estas simulaciones la base de datos de línea de costa escogida corresponde a GSHHS (A Global Self-consistent, Hierarchical, High-resolution Shoreline Database; Wessel and Smith,1996). Se decidió utilizar una resolución de 5 km para la grilla Pacífico, y 1 km de resolución la grilla intermedia y las grillas de alta resolución.

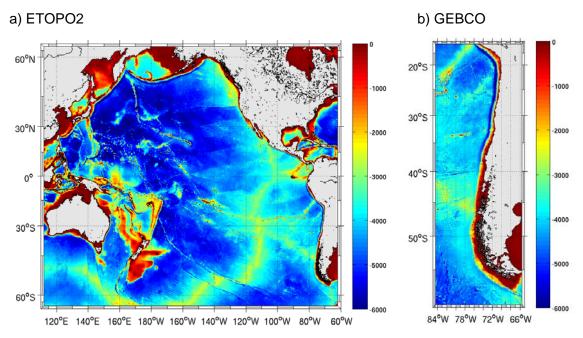


Figura 4.2. a) Batimetría de la base de datos ETOPO2 utilizada en el dominio de mayor extensión (dominio "padre"). b) Batimetría de la base de datos GEBCO utilizada en los dominios de resolución intermedia y alta resolución.

_

² GEBCO: General Bathymetric Chart of the Oceans. Es una base de datos de batimetría global desarrollado por el IHO (*International Hydrographic Organization*) (http://www.gebco.net/)

El modelo debe ser forzado por el viento para generar el oleaje. Estas simulaciones utilizan series de tiempo de viento a 10 metros de altura con una resolución temporal de 6 horas. La base de datos escogida es el Reanálisis NCEP Climate Forecast System Reanalysis (CFSR), el cual presenta una resolución espacial de 0.3° (Saha et al., 2010). Esta base de datos corresponde a un Reanálisis NCEP relativamente nuevo que tiene como principales ventajas el acoplamiento con el océano durante la generación de los campos de 6 horas y una mayor resolución espacial que el Reanalisis NCEP anterior (0.5°). En la figura 4.3 se presenta el promedio anual (año 2010) de la velocidad y dirección del viento en el dominio Pacífico.

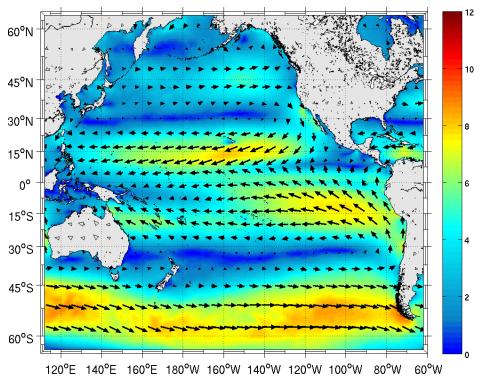


Figura 4.3. Promedio del año 2010 de la velocidad (m/s) y dirección del viento de los datos CFSR.

5. Validación

El objetivo de este proyecto es realizar una prospección de la energía undimotriz presente en las costas de Chile. Por esta razón, es necesario contar con buenas simulaciones y así obtener resultados confiables de los modelos. Para establecer cuan realista son las simulaciones realizadas, se efectuó una validación de los resultados, la cual consiste básicamente en comparar los datos entregados por el modelo y las observaciones disponibles. La validación del modelo Wavewach III en la cuenca del Océano Pacífico se realizó a través de datos satelitales, mientras que la evaluación del modelo en la zona costera se llevó a cabo, además, con mediciones instrumentales de olas proporcionadas por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA).

5.1 Datos satelitales

Se utilizaron datos diarios de altura significativa de las olas derivadas de información de altimetría satelital distribuida por AVISO (Archivage, Validation, Interprétation des données des Satellite Océanographiques). Los datos del año 2010 con una resolución espacial de 1° fueron obtenidos directamente desde www.oceanobs.com.

5.2 Mediciones instrumentales

Para llevar a cabo una comparación entre el oleaje simulado por Wavewatch III y observaciones, se utilizaron mediciones *in-situ* de oleaje obtenidas por boyas escalares del SHOA en 12 puntos del país (Figura 5.1). La Tabla 5.1 contiene información detallada de la posición geográfica y del período de medición de estos instrumentos utilizados para la validación de los resultados del modelo en la zona costera. Es importante notar que estos datos fueron obtenidos en su gran mayoría en la década de los 80. Por esta razón la comparación entre los resultados del modelo y las mediciones *in-situ* de boyas escalares, sólo se puede realizar mediante valores medios, ya que estas mediciones no fueron efectuadas durante el año 2010.

Adicionalmente se cuenta con una boya direccional Watchkeeper con mediciones realizadas frente a las costas de Valparaíso. Los datos obtenidos por esta boya son altura significativa, periodo y dirección del oleaje durante el año 2010.

Tabla 5.1. Sitios de medición, posición geográfica y período de medición.

Sitio	Latitud (°S)	Longitud (°W)	Inicio	Final
Arica	18°27.3'	70° 22.8'	7-Jul-1988	6-Jul-1989
Iquique	20°10.9'	70° 10.3'	5-Jun-1986	12-Jul-1987
Antofagasta	23°35.6'	70° 25.6'	15-Oct-1990	5-Dic-1991
Caldera	27° 2.3'	70° 51.2'	21-Dic-1987	20-Abr-1988
Coquimbo	29° 55.7'	71° 22.6'	17-Ago-1989	10-Oct-1990
Valparaíso	32° 59.3'	71° 37.5'	7-Jun-1979	12-Ago-1981
Valparaíso (Watchkeeper)	33° 00.0'	71° 49.8′	1-Ene-2010	10-Oct-2010
Constitución	35° 17.0'	72° 31.5'	18-Feb-1984	22-Feb-1985
Concepción	36° 35.1'	73° 14.1'	3-Sep-1987	22-Sep-1987
San Vicente	36° 43.9'	73° 9.2'	29-Nov-1985	5-Feb-1986
Chaihuin	39° 55.1'	73° 38.2'	18-Abr-1985	28-Jun-1985
Golfo Coronado	41° 40.0'	73° 56.52'	13-May-1986	11-Jul-1987
Diego Ramírez	56° 32.5'	68° 38.0'	31-May-1981	10-Ene-1984

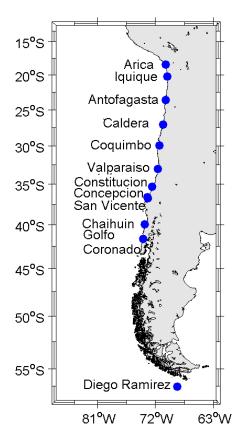


Figura 5.1. Estaciones de muestreo disponibles para realizar una validación del modelo de oleaje.

5.3 Resultados

Los campos medios de altura significativa simulada y observada presentan un patrón espacial similar (Figura 5.2ab). En general, se observan mayores alturas en latitudes medias y altas, en las regiones de océano abierto, con valores mayores a 5 m. En las zonas tropicales las alturas son considerablemente menores con valores entre 1 y 2 m. A pesar de que el patrón espacial de la altura significativa simulada y observada es similar, en general, se observa que las alturas reproducidas por el modelo tienen valores mayores a las observadas por el satélite (figura 5.2c). Esta diferencia no supera 1 m de altura siendo mayor en latitudes medias y altas.

Con el objetivo de evaluar la variabilidad de la altura significativa simulada se realizó un análisis de correlación cruzada entre las series de tiempo obtenidas por el modelo y las series de tiempo satelitales. En general, se observa una buena correlación en el dominio Pacífico con valores de correlación superiores a 0.8 sin desfase entre las series. (Figura 5.3). Sin embargo, las series de tiempo de altura significativa (H_s) simuladas y observadas se decorrelacionan fuertemente en zonas cercanas a islas y regiones de línea de costa compleja.

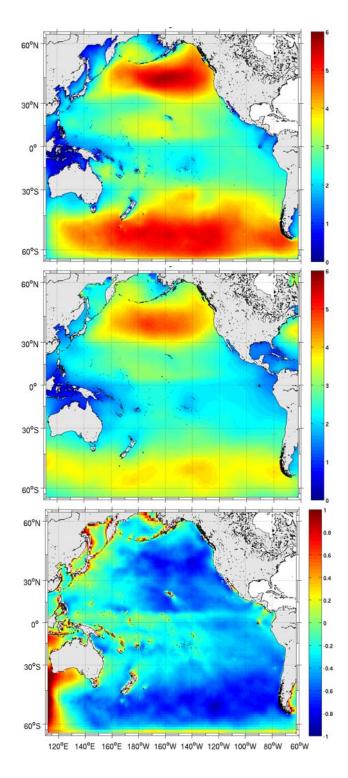


Figura 5.2 .a) Promedio de Hs simulada por Wavewatch III. b) Promedio de Hs satelital (AVISO). c) Diferencia del campo medio de Hs observada y simulada (Hs satelital – Hs simulada).

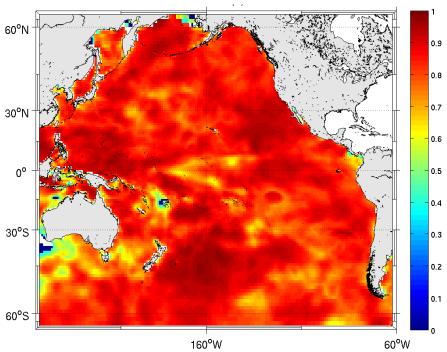


Figura 5.3. Correlación de las series de Hs simuladas y observadas mediante satélite.

A pesar de la limitación que impone la resolución espacial de los datos satelitales cerca de la costa, se compararon también las series de tiempo simuladas en los dominios de mayor resolución en la zona costera con datos de altimetría (Figura 5.4). En la zona norte del país (por ejemplo en Arica e Iquique) se observa, en general, un buen ajuste de los datos observados y simulados. En esta zona del país tanto las magnitudes del viento como su variabilidad sinóptica son más bien bajas, lo que provoca que las olas incidentes en estas costas sean de tipo Swell (oleaje de gran escala) y se puedan correlacionar de buena forma con los datos satelitales. Hacia la zona centro y sur de Chile (desde Coquimbo a Golfo Coronado), los vientos locales son más intensos y presentan una alta variabilidad sinóptica, lo que se ve reflejado en el aumento de la varianza de alta frecuencia de las series de tiempo del altura significativa tanto observadas como simuladas. Los valores de correlación entre los datos satelitales y simulados, obtenidos para las distintas localidades frente a la costa de Chile, son presentados en la tabla 5.2.

Tabla 5.2. Valores de correlación entre las series de tiempo de altura significativa simulada por WaveWatch III y la altura significativa satelital.

Sitio	Correlación AVISO-WW3
Arica	0.78
Iquique	0.77
Antofagasta	0.78
Caldera	0.69
Coquimbo	0.71
Valparaíso	0.65
Constitución	0.74
Concepción	0.73
San Vicente	0.64
Chaihuin	0.77
Golfo Coronado	0.73
Diego Ramírez	0.82

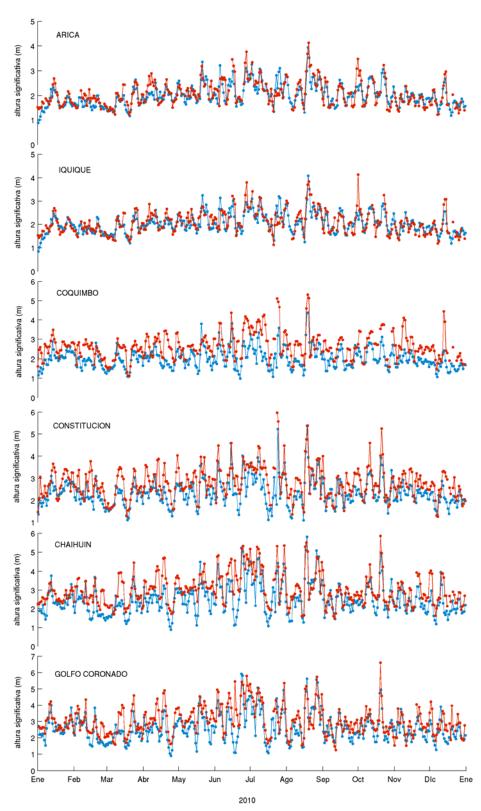


Figura 5.4. Series de tiempo del año 2010 de la altura significativa simulada (línea azul) y observada mediante altimetría satelital (línea roja) en distintas localidades frente a la costa de Chile.

En la Figura 5.5 se muestran las series de tiempo de las alturas significativas, los periodos y la dirección del oleaje obtenidas con la boya direccional (Watchkeeper), la cual midió hasta Octubre del año 2010 frente a las costas de Valparaíso. En general, se observa un buen ajuste entre los datos observados y simulados, lo que es de gran importancia, ya que este es el único punto donde es posible comparar el resultado del modelo con mediciones directas. Un análisis de correlación de las series de tiempo arrojó coeficientes R² de 0.85, 0.64 0.70 para la altura significativa, periodo y dirección del oleaje respectivamente.

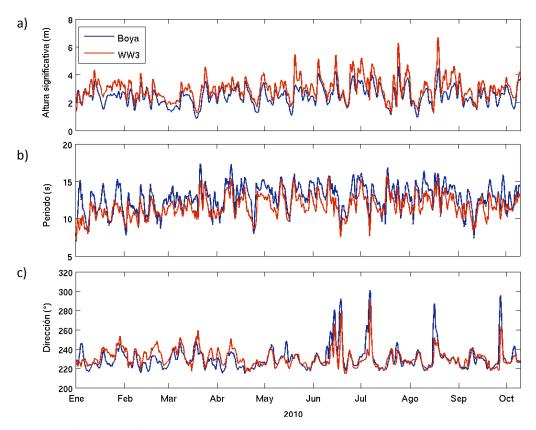


Figura 5.5. Comparación de las series de tiempo observadas *in-situ* por una boya direccional (línea azul) y simuladas por WaveWatch III (línea roja). a) Altura significativa, b) periodo y c) dirección.

Como se mencionó anteriormente, no es posible realizar una comparación de las series de tiempo simuladas con las observaciones *in-situ* de las boyas escalares. Por esta razón, se realizó una comparación de los promedios anuales de las alturas significativas observadas y simuladas. Es importante destacar que se consideraron las series de altura significativa obtenidas *in-situ* en distintos años de medición (las estaciones que no contaban con datos durante todo un año no fueron consideradas) y la altura significativa satelital y simulada para el año 2010.

La figura 5.6a muestra el diagrama de dispersión y la correlación obtenida al comparar las mediciones *in-situ* con los datos satelitales. Existe una buena correlación entre los datos y se observa el aumento de altura de las olas hacia el sur del país. Sin embargo, las altura satelital es mayor a la altura medida *in-situ*, lo que se explicaría por la resolución de los datos satelitales (1º) que entregan condiciones de oleaje de una región más lejana a la costa, donde la altura de las olas es mayor.

En la figura 5.6b se presenta la comparación entre las alturas simuladas y observadas *in-situ* por las boyas escalares. Se observa que hay una correlación entre los datos, pero la altura significativa simulada presenta valores mayores la altura observada. Sin embargo, se debe ser cuidadoso al interpretar este análisis, ya que podría haber una variabilidad interanual significativa en la altura de las olas, ya que como se mencionó anteriormente se están comparando los promedios anuales de años diferentes.

Finalmente, la figura 5.6c, muestra la comparación de los promedios anuales del año 2010, ya que se están considerando las alturas satelitales y simuladas. En este caso se obtiene una correlación de 0.9 y los datos simulados presentan, en general, valores menores a los datos satelitales, lo que nuevamente se explicaría por la resolución de los datos satelitales. Sin embargo, la altura simulada en Diego Ramirez es mayor a la altura satelital, ya que esta estación no se encuentra cerca de la costa.

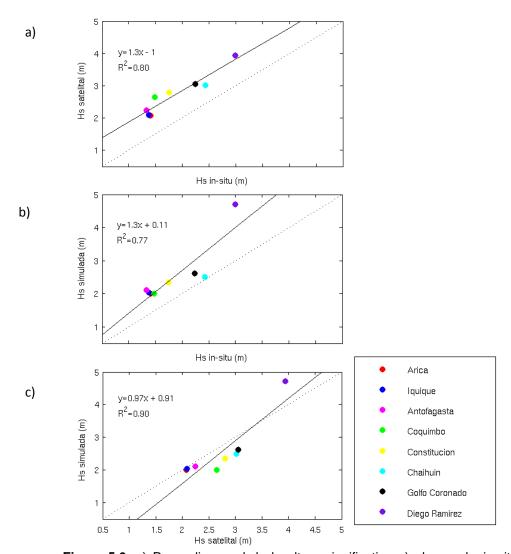


Figura 5.6. a) Promedio anual de la altura significativa a) observada *in-situ* versus satelital. b) observada *in-situ* versus simulada por Wavewatch III. c) satelital versus simulada por Wavewatch III

6. Referencias

Saha, S., and Coauthors, 2010. The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *Bull. Amer. Meteor. Soc., 91*, 1015-1057.

Smith W., and D. Sandwell, 1997. Global seafloor topography from satellite altimetry and ship depth soundings, *Science, 277*, 1957-1962.

Wessel, P., and W. H. F. Smith, 1996. A Global, Self-consistent, Hierarchical, High-Resolution Shoreline Database, J. Geophys. Res., 101, 8741-8743.