TRANSFORMACIÓN DIGITAL DE LA GESTIÓN MARÍTIMO-PORTUARIA: SISTEMA DE PREDICCIÓN DE OLEAJE BASADO EN INTELIGENCIA ARTIFICIAL Y PLANIFICACIÓN COLABORATIVA DE AGUAS EN LA BAHÍA DE SAN VICENTE, CHILE

Omar Salgado Oportus y Cristian Wulf Sotomayor[1]

Empresa Portuaria Talcahuano San Vicente, Chile

Eduardo Gonzalez y Luis Zamorano Riquelme[2]

Instituto Nacional de Hidráulica, Chile

RESUMEN

La Bahía de San Vicente constituye uno de los principales complejos marítimo-portuarios de Chile, concentrando cinco terminales especializados en gas, petróleo, graneles, carga general y contenedores, los cuales comparten espacios de navegación y recursos para las maniobras de los buques. En este contexto, la necesidad de fortalecer la coordinación operacional, reducir la incertidumbre asociada a las condiciones marítimas, optimizar la planificación naviera y disponer de herramientas que apoyen la toma de decisiones motivó el desarrollo de un Sistema de Predicción de Oleaje, liderado por la Empresa Portuaria Talcahuano San Vicente (Puertos de Talcahuano) y el Instituto Nacional de Hidráulica (INH). El sistema integra modelación numérica multiescala mediante WaveWatch III, SWAN y FUNWAVE-TVD, complementada con un modelo subrogado basado en Fourier Neural Operators (FNO), permitiendo generar pronósticos locales de alta resolución para la bahía. Paralelamente, se implementó un modelo colaborativo de planificación de aguas que incorpora a terminales portuarios, Autoridad Marítima, agencias navieras y prácticos, utilizando los pronósticos de oleaje como principal insumo para la toma de decisiones operacionales. Este trabajo presenta el resultado de la recalibración del sistema, así como su evolución hacia una plataforma de apoyo para la planificación colaborativa de operaciones portuarias y navieras, mediante su integración con VUMAR y herramientas digitales de coordinación. Los resultados evidencian mejoras en el monitoreo de riesgos, la gestión de ventanas operacionales y la coordinación entre actores públicos y privados, identificándose además aprendizajes y recomendaciones para consolidar este modelo como referencia nacional en gestión colaborativa de aguas portuarias.

Palabras clave: predicción de oleaje, planificación naviera, inteligencia artificial, gestión portuaria, VUMAR, Bahía de San Vicente.

[1] Omar Salgado, Coordinador Estratégico Puertos de Talcahuano y Cristian Wulf Gerente General Puertos de Talcahuano.
[2] Eduardo Gonzalez, jefe de proyectos en Instituto Nacional de Hidráulica y Luis Zamorano jefe departamento Ingeniería y Desarrollo Instituto Nacional de Hidráulica

INTRODUCCIÓN

La creciente complejidad de las operaciones marítimo-portuarias exige nuevas herramientas capaces de integrar información oceanográfica, meteorológica y operacional para apoyar la toma de decisiones. Este desafío es particularmente relevante en sistemas portuarios multipropósito donde diversos terminales tanto públicas como privadas comparten áreas de navegación, y recursos como lanchas, personal AAMM (Autoridad Marítima Chilena), remolcadores, operadores de naves, prácticos entre otros, para realizar sus maniobras.

La Bahía de San Vicente tal como se observa en la figura 1 concentra una parte importante de la actividad marítima del Gran Concepción, integrando terminales pertenecientes a SVTI (San Vicente Terminal Internacional), ENAP (Empresa Nacional DEL petróleo), Abastible y Huachipato, además de organismos públicos y privados que participan en la gestión de las operaciones marítimas. En este contexto, durante los años 2022 y 2023 la Mesa de Apoyo a Maniobras impulsada por Puertos de Talcahuano y el MTT (Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones de Chile), identificó diversas brechas asociadas a la planificación naviera, gestión de maniobras y coordinación entre actores, destacando la necesidad de disponer de herramientas que permitieran anticipar condiciones operacionales y mejorar la toma de decisiones.

Figura 1: Terminales Bahía de San Vicente



Fuente: Elaboración propia sobre la base Google Earth.

Como respuesta a esta necesidad, la Empresa Portuaria Talcahuano San Vicente junto al Instituto Nacional de Hidráulica (INH) inician el desarrollo de un Sistema de Predicción de Oleaje para la Bahía de San Vicente. La iniciativa apoya la evolución del modelo colaborativo de planificación de aguas de la bahía que integra información de pre-arribos, pronósticos marítimos, disponibilidad de infraestructura y coordinación institucional que hoy lidera Puertos de Talcahuano.

El objetivo de este trabajo es presentar la evolución del proyecto tomando los resultados del desarrollo científico y tecnológico del sistema de predicción de oleaje hasta su aplicación práctica como soporte para un modelo colaborativo de planificación de operaciones portuarias y navieras en la bahía que se espera integrar además a la Ventanilla Única Marítima (VUMAR).

2 DESARROLLO Y VALIDACIÓN DEL SISTEMA DE PREDICCIÓN DE OLEAJE[3]

2.1 Antecedentes del proyecto

En octubre de 2023 la Empresa Portuaria Talcahuano San Vicente suscribió un contrato con el Instituto Nacional de Hidráulica para el desarrollo de un Sistema de Predicción de Oleaje para el Puerto de San Vicente. El proyecto fue concebido como una herramienta destinada a fortalecer la seguridad marítima, apoyar la continuidad operacional y servir de base para futuras iniciativas de coordinación logística y portuaria, tal como se indica en la Figura 2.

El desarrollo consideró tres etapas sucesivas:

- Modelo de propagación de oleaje exterior.
- Modelo de agitación interior del puerto.
- Modelo subrogado basado en inteligencia artificial.

El proyecto contempló además procesos de calibración, validación y transferencia tecnológica para asegurar su futura utilización operacional. la metodología de modelación numérica no se profundiza en este documento debido a que el objetivo general del manuscrito es mostrar una nueva forma de hacer gestión portuaria utilizando una herramienta de predicción.

2.2 Arquitectura de modelación

El sistema fue diseñado bajo un enfoque multiescala que combina modelación numérica y aprendizaje automático.

[3] Presentando en Seminario Internacional Operaciones Portuarias 2024; "Sistema de Pronóstico para puertos del estado". Autores: Eduardo Gonzalez (INH), Jimmy Schlegel (MTT), Rodrigo Filippi (Dirección de obras Portuarias).

2.2.1 Modelo oceánico

La escala oceánica, representada mediante WaveWatch III, modelo espectral de tercera generación desarrollado por NOAA, utilizado para reproducir la generación y propagación del oleaje en el Océano Pacífico.

2.2.2 Modelo regional

Las condiciones obtenidas desde WaveWatch III son utilizadas como condiciones de borde para SWAN, modelo encargado de representar la propagación del oleaje hacia sectores costeros y exteriores de la Bahía de San Vicente.

2.2.3 Modelo local

La escala local se modeló mediante FUNWAVE-TVD, herramienta basada en ecuaciones de Boussinesq completamente no lineales que permite representar fenómenos tales como:

- Refracción, Difracción y Reflexión.
- Resonancia portuaria.
- Transformación del oleaje al interior de la bahía.

2.2.4 Modelo subrogado basado en inteligencia artificial

La etapa final incorporó un modelo Fourier Neural Operator (FNO), entrenado utilizando aproximadamente 1.400 simulaciones representativas obtenidas desde FUNWAVE-TVD. El objetivo fue reducir significativamente los tiempos de cálculo manteniendo niveles de precisión compatibles con aplicaciones operacionales y que adicionalmente el sistema de predicción fuera alojado en los servidores de Puertos de Talcahuano para ser corrido diariamente en computador convencional.

Figura 2: Arquitectura integrada del Sistema de Predicción de Oleaje y su conexión con la planificación colaborativa de aguas de la Bahía de San Vicente.



Fuente: Elaboración propia sobre la base de antecedentes INH y Puertos de Talcahuano.

2.3 Datos utilizados

La construcción del sistema requirió la integración de múltiples fuentes de información y trabajo con equipos multisectoriales:

- Batimetrías GEBCO.
- Bases NOAA-NCEI.
- Cartografía SHOA.
- Levantamientos hidrográficos locales.
- Campañas de medición de oleaje para la construcción del sistema predicción.
- Información meteorológica.
- Registros históricos de oleaje.
- Información operacional proporcionada por terminales de la bahía.
- Mediciones ADCP desarrolladas entre julio y octubre de 2025 para la recalibración del sistema de predicción.

La utilización de fuentes complementarias permitió representar adecuadamente las condiciones oceanográficas de la Bahía de San Vicente y su entorno inmediato.

2.4 Calibración y validación

Este trabajo fue ejecutado por el mismo equipo del INH que construyo el sistema, además en las sesiones de avance del trabajo participaron todos los actores vinculados a los procesos de recepción y despacho de naves de la bahía de San Vicente. Los resultados de validación mostraron desempeños favorables. En la etapa exterior, el informe final reportó correlaciones de Pearson superiores al 90% y valores de r^2 sobre 0,80 para WaveWatch III; en la propagación exterior con SWAN se obtuvo r^2 = 0,89 y RMSE = 0,26 m, por debajo del umbral de 0,40 m recomendado por Williams, J.J. & Esteves, L.S. 2017 en el papaer Guidance on setup, calibration, and validation of hydrodynamic, wave, and sediment models for shelf seas and estuaries.

Tabla 1: Principales indicadores de desempeño obtenidos durante la validación del sistema

Modelo	**Indicador**
WaveWatch III	Correlación > 90 %
WaveWatch III	$R^2 > 0,80$
SWAN	$R^2 = 0,88$
SWAN	RMSE = 0,35 m
SWAN recalibrado	R = 0,89
SWAN recalibrado	RMSE = 0,26 m
FNO	$R^2 = 0,937$
FNO	RMSE = 0,0002744 m

Fuente: Instituto Nacional de Hidráulica (2024; 2026).

Posteriormente, durante 2025 y 2026 se ejecutó un proceso de recalibración (Informe para puertos de Talcahuano realizado por equipo INH) utilizando mediciones ADCP instaladas en la bahía, y mareógrafos con información en tiempo real en la bahía que brindaron apoyo con base de datos con información, permitiendo mejorar la precisión del sistema mediante ajustes en las mallas de cálculo y parámetros de propagación. La campaña ADCP 2025 permitió fortalecer la base empírica. El instrumento se instaló el 23 de julio de 2025 y fue retirado el 20 de noviembre de 2025, obteniéndose un registro entre el 23 de julio y el 23 de octubre de 2025; el objetivo fue registrar clima de oleaje operacional para mejorar precisión y fiabilidad del sistema mediante integración de campañas recientes y recalibración de modelos numéricos. Los resultados recalibrados

mostraron una reducción del error cuadrático medio desde 0,35 m hasta 0,26 m para determinadas configuraciones de modelación. En esta fase se incluyo el acompañamiento de la Capitanía de puertos de San Vicente, el cuerpo de prácticos y el Centro Meteorológico de Talcahuano.

2.5 Evaluación del modelo FNO

La incorporación de inteligencia artificial representa uno de los principales aportes tecnológicos del proyecto. El modelo FNO permite reproducir el comportamiento del modelo FUNWAVE-TVD utilizando tiempos de cálculo considerablemente menores.

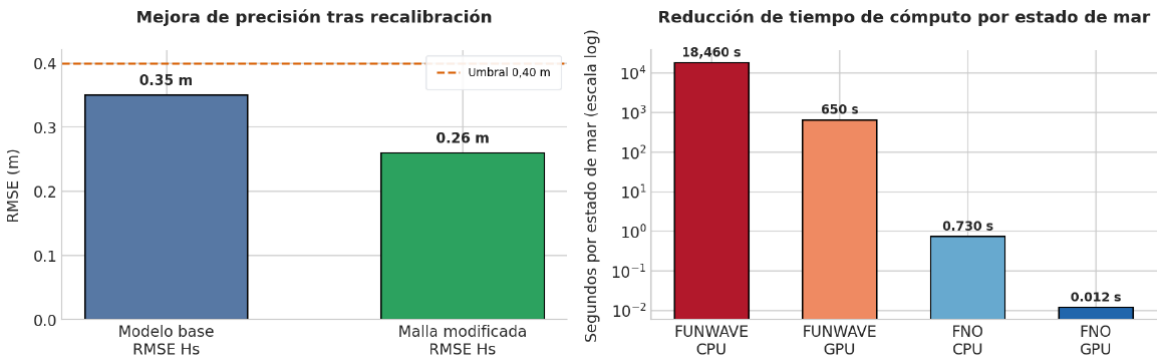
Tabla 2: Comparación de tiempos de cálculo entre modelos físicos y modelo FNO

Modelo	Tiempo aproximado
FUNWAVE CPU	18.460 s
FUNWAVE GPU	650 s
FNO CPU	0,73 s
FNO GPU	0,012 s

Fuente: Instituto Nacional de Hidráulica 2026).

La reducción de tiempos permite actualizar escenarios operacionales en tiempo real y facilita la incorporación del sistema a procesos cotidianos de planificación portuaria, tal como se indica en la figura 3.

Figura 3: Indicadores técnicos principales: mejora de RMSE tras recalibración y reducción de tiempos de cómputo al usar FNO.



Fuente: Elaboración propia sobre la base de antecedentes INH y Puertos de Talcahuano.

3 TRANSFORMACIÓN DEL SISTEMA EN UNA HERRAMIENTA OPERACIONAL

3.1 Gobernanza y actores participantes

La planificación colaborativa de aguas debe entenderse como la capa operativa que conecta el Sistema de Predicción de Oleaje con la coordinación y planificación naviera diaria. El objetivo es pasar desde planificaciones fragmentadas por terminal hacia una planificación semanal común, validada con actores públicos y privados, donde Puertos de Talcahuano articule el proceso, la Capitanía de Puerto conserve su rol de seguridad marítima, y terminales, agencias y prácticos aporten criterios de factibilidad operacional. La evolución del sistema hacia una herramienta operacional involucró la participación de múltiples actores:

- Empresa Portuaria Talcahuano San Vicente.
- Capitanía de Puerto de San Vicente, Cuerpo de Prácticos y Centro Meteorológico de Talcahuano.
- Puertos (SVTI, ENAP, Abastible, Huachipato)
- Comunidad Logística de Talcahuano (COMLOG) y Comité Portuario de Coordinación y Servicios Públicos.

La participación de estos actores permitió validar operacionalmente el sistema y generar confianza respecto de su utilización como apoyo para la toma de decisiones.

3.2 Uso operacional del pronóstico

El pronóstico se transforma ahora en insumo principal porque aporta una variable objetiva, mostrando una predicción a siete días en diversos puntos críticos de la bahía, y común para todos los actores incluyendo la capitanía de Puertos de San Vicente, el cuerpo de prácticos y el centro meteorológico de Talcahuano, este hecho es inédito y piloto en Chile, por esto variables claves como; las condiciones de oleaje por punto de control, umbrales Hs/Tp, evolución por día y sectores más sensibles son visualizados bajo una única herramienta de pronósticos para todos los actores. A partir de 2026 y después de haber concluido la sesión de validación del sistema de predicción con la AAMM, los pronósticos comenzaron a distribuirse diariamente mediante correo electrónico entre terminales, prácticos, Centro meteorológico y Autoridad Marítima local.

Los reportes incluyen:

- Altura significativa de ola, Período de ola, Boyas virtuales, Sectores críticos, Umbrales operacionales.

- Apoyados por IA (agente de Gemini generativa), incluye recomendaciones preventivas, esto permite hacer un doble click a los reportes ante eventos climáticos complejos si es necesario.

Esta información comenzó a utilizarse para apoyar decisiones relacionadas con:

- Maniobras de atraque y desatraque, cierres preventivos.
- Monitoreo para la coordinación de recursos, Gestión de fondeos, Continuidad operacional de la bahía.

3.3 El sistema de predicción como insumo principal

El principal aporte del sistema de predicción consiste en entregar información objetiva y común para todos los actores.

El uso de pronósticos permite:

- Identificar ventanas favorables para maniobras.
- Anticipar cierres preventivos, Priorizar operaciones críticas y permite gestionar recursos compartidos.
- Un logro realmente importante fue reducir incertidumbre operacional.

De esta forma, el sistema se transforma en el principal insumo técnico para evaluar la potencial condición de la bahía v/s parámetros operacionales para efectuar la planificación colaborativa de aguas.

3.4 Modelo operativo: Rol de Autoridad Portuaria - Ejecución cuatro macroprocesos

Hoy en día se está iniciando un proceso de marcha blanca que incluye el desarrollo de cuatro macroprocesos que están siendo ejecutados y liderados por Puertos de Talcahuano. La lógica operativa de este trabajo es relevar el rol de la Capitanía de Puerto de San Vicente como Autoridad Marítima de la bahía preocupada de que todas las actividades se ejecuten en un marco normativo seguro y sostenible, pero a su vez dejar a Puertos de Talcahuano ejerciendo roles de coordinaciones propios de Autoridad Portuaria incluyendo a otros terminales privados de la bahía bajo una misma planificación portuaria. Lo anterior es un ejemplo clave de los nuevos roles que deben tomar las empresas portuarias estatales apoyando no solo el trabajo de sus terminales propios sino también los privados para generar una actividad más armónica y sostenible del sistema portuario. Finalmente se destaca en este esquema operativo los recursos

técnicos, humanos y tecnológicos que está aportando la empresa portuaria al sistema, la plataforma Talcahuano Port Community System (TPCS) de la estatal ya esta integrada con la plataforma VUMAR y al alero de esta misma se esta diseñando el sistema web que estará integrada al TPCS apoyará la ejecución de esta planificación de aguas.

Figura 4: Flujo operativo propuesto: desde el prearribo en VUMAR hasta la ejecución, monitoreo y replanificación dinámica de las operaciones en la bahía.



Fuente: Elaboración propia sobre la base modelo de gestión de Puertos de Talcahuano.

4 PLANIFICACIÓN COLABORATIVA DE OPERACIONES PORTUARIAS Y NAVIERAS

4.1 Origen y propósito

La planificación colaborativa de aguas surge como una evolución natural del trabajo desarrollado por la Mesa de Apoyo a Maniobras y posteriormente por la Mesa Técnica Marítima de COMLOG.

El objetivo es construir un modelo coordinado de gestión de las operaciones marítimas que permita:

- Optimizar recursos, reducir conflictos de maniobras.
- Mejorar la anticipación operacional, Incrementar la seguridad marítima.
- Fortalecer la coordinación institucional y actores privados.

4.2 Modelo operativo

La planificación se estructura en cuatro macroprocesos, tal como se indica en la figura 4.

- Macro Proceso 1: Existe un "Primer llamado a VUMAR para ejecutar una planificación naviera semanal": En este macroproceso se le solicita a las Agencias que ingresan información de las naves con anticipación en VUMAR (idealmente una semana antes), se utilizan insumos tales como nombre nave, N° IMO, ETA, Puerto/terminal/sitio. Con esto se genera matriz base anticipada de naves por parte de Puertos de Talcahuano, que es la base de la planificación.
- Macro Proceso 2: Resolución de "Asignación de ingreso a Puertos", Puertos de Talcahuano consolida información a través de un sistema propio, donde cada terminal en función de los datos que se extraen de VUMAR trae una asignación preliminar, y luego se realiza una reunión de planificación de la bahía junto a todos los actores y se ordenan las prioridades acordes a un reglamento elaborado por puertos de Talcahuano y validado por todos los actores, en esta sesión se determinan fechas y horas de ingreso a puerto para la semana. Este es el insumo base para que las agencias anoten las maniobras en VUMAR definitivas para los procesos de recepción y despachos correspondientes.
- Macro Proceso 3: Con la información anterior se desarrolló un "Visualizador y Registro de maniobras operacionales para la bahía San Vicente en VUMAR", este es un trabajo desarrollado en la Plataforma web/ Talcahuano Port Community System (TPCS) donde existe un módulo que visualiza la planificación de aguas y permite revisar trazabilidad, a futuro esta plataforma será interoperable con VUMAR (esta plataforma web inyectará la planificación y estará monitoreando las acciones de cambios de maniobras en VUMAR).
- Macro Proceso 4: Finalmente en la fase de "Monitoreo activo y Gestión de la planificación de operaciones portuarias y navieras de la bahía de san Vicente", se espera ir haciendo seguimiento de cierres, ETA/ETD, clima, fondeos y cambios, sistema de Pronóstico, estados de sitio, avisos seguridad y operativos, recursos, permitiendo replanificaciones de planificación, esta etapa estará siendo ejecutada por un profesional de puertos de Talcahuano.

Finalmente indicar y reforzar que esta iniciativa no sustituye las decisiones de seguridad marítima de la Autoridad Marítima, sino que ordena la información, anticipa escenarios, transparenta prioridades y reduce tiempos muertos para todos los actores vinculados a los procesos de recepción y despacho de naves y facilita la mejor toma de decisiones.

5 DISCUSIÓN

La experiencia desarrollada en la Bahía de San Vicente demuestra que los sistemas de predicción de oleaje adquieren su máximo valor cuando son integrados a procesos de gobernanza y coordinación operacional.

La combinación entre modelación avanzada, inteligencia artificial, planificación colaborativa y herramientas digitales constituye una aplicación práctica de conceptos internacionales asociados a Port Collaborative Decision Making (PortCDM) y Port Call Optimization, mismos principios que está utilizando puertos de Talcahuano para desarrollar su TPCS.

Asimismo, la experiencia demuestra que la calidad de los datos y la participación de los actores resultan tan relevantes como el desempeño de los modelos numéricos.

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El Sistema de Predicción de Oleaje desarrollado para la Bahía de San Vicente alcanzó niveles de desempeño compatibles con estándares internacionales y permitió disponer de una herramienta robusta para la gestión operacional de la bahía.

La fase de recalibración ejecutada por INH que incluyó la participación de todos los actores participantes en los procesos de recepción y despacho de nave, permitió la validación de este sistema por parte de la capitanía de puerto de San Vicente, el cuerpo de prácticos, el Centro meteorológico de Talcahuano y los Terminales de la bahía, aportando un único sistema de predicción cuyos datos son validados por todos.

La principal innovación del proyecto corresponde a la transformación de un sistema científico de predicción en un instrumento operativo practico, con tiempos de respuesta acorde y para la planificación colaborativa de operaciones portuarias y navieras, considerando la validación de una misma herramienta para todos los actores vinculados.

Finalmente, la integración entre pronósticos de oleaje, VUMAR, plataforma web, Autoridad Marítima y el Talcahuano Port Community System que vincula a su comunidad portuaria constituye una experiencia pionera en Chile que puede transformarse en referencia para futuros modelos de gestión colaborativa de aguas.

Y en lo que refiere al modelo operativo de planificación de las aguas de San Vicente se recomienda lo siguiente, acciones que ya algunas de ellas están en plena ejecución:

- Formalizar gobernanza. Crear un reglamento operativo de planificación de aguas con roles, frecuencia de sesiones, criterios de priorización, mecanismo de resolución de conflictos y procedimiento de contingencias (liderado por Puertos de Talcahuano).
- Asegurar calidad de datos en VUMAR. Exigir prearribos anticipados, campos mínimos obligatorios, validación de ETA/ETD, control de cambios y trazabilidad del número de trámite por parte de las Agencias de Naves
- Integrar VUMAR y plataforma web. Implementar interoperabilidad bidireccional mediante API, JSON/HTTPS y tokens temporales, como ha planteado Puertos de Talcahuano al MTT como propuestas de mejoras a VUMAR.
- Incorporar el pronóstico como regla operacional. Definir umbrales por instalación, semáforos por boya virtual, alertas Hs/Tp y gatillos de replanificación. (estamos en una etapa iterativa y mejorando los reportes constantemente)
- Medir desempeño. Usar KPIs: cumplimiento del plan semanal, horas efectivas de cierre, tiempo reapertura–primera maniobra, cambios ETA/ETD, maniobras reprogramadas, uso de ventanas favorables y confiabilidad del pronóstico.
- Sostener participación. Mantener sesiones con terminales, agencias, Capitanía, prácticos y COMLOG, especialmente durante marcha blanca.
- Monitorear y recalibrar. Mantener campañas, ADCP, boyas virtuales, control de calidad y ajustes de malla/modelo.
- Escalar gradualmente. Consolidar San Vicente como piloto replicable antes de extender el modelo a Bahía de Concepción u otras bahías.
- Desarrollar un sistema dinámico que permita visualizar en línea los recursos disponibles/utilizados para la ejecución de las maniobras en la bahía, con el objeto de realizar análisis posteriores para ir optimizando su uso.

REFERENCIAS

Empresa Portuaria Talcahuano San Vicente e Instituto Nacional de Hidráulica. (2023). *Contrato generación de Sistema de Predicción de Oleaje para el Puerto de San Vicente*. Talcahuano, Chile.

Empresa Portuaria Talcahuano San Vicente e Instituto Nacional de Hidráulica. (2025). Recalibración sistema de predicción de oleaje Puerto Talcahuano - San Vicente.

Instituto Nacional de Hidráulica. (2024). *Informe modelo de predicción de oleaje Puerto San Vicente*. Santiago, Chile.

Puertos de Talcahuano. (2026). *Planificación colaborativa de aguas Bahía de San Vicente: propuesta de implementación operacional*. Talcahuano, Chile.

Puertos de Talcahuano. (2026). *Rol Coordinador de la Planificación Naviera de la Bahía de San Vicente*. Talcahuano, Chile.

UNCTAD. (2023). *Digitalizing Port Call Processes*. United Nations Conference on Trade and Development, Geneva.

World Association for Waterborne Transport Infrastructure (PIANC). (2024). *Guidelines for Digitalization and Port Call Optimization*. Brussels.

Williams, J. J. y Esteves, L. S. (2017). *Guidance on calibration and validation of coastal numerical models*. Coastal Engineering Practice Series, ICE Publishing.