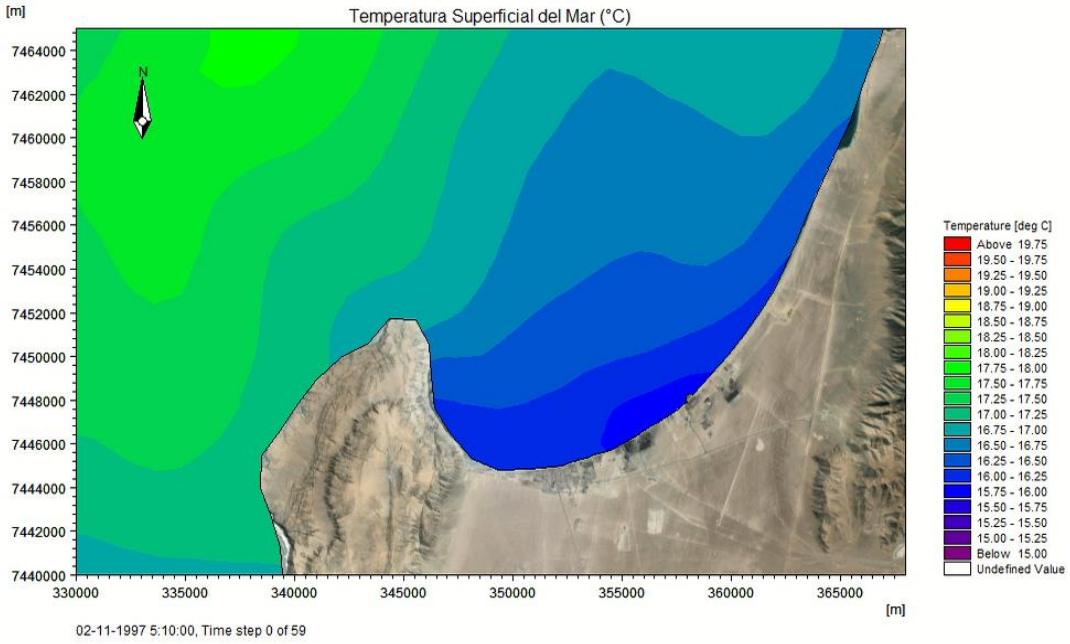
INGENIERÍA CIVIL
OCEÁNICA

MEMORIA DEL PROYECTO PARA OPRTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL OCEÁNICO

Universidad de Valparaíso
CHILE

MODELACIÓN HIDRODINÁMICA TRIDIMENSIONAL DE LOS EFECTOS DE LA SURGENCIA EN BAHÍA MEJILLONES, CHILE

NICOLE PATRICIA MATURANA MORALES



RESUMEN

- El presente trabajo dio una respuesta hidrodinámica a la surgencia, identificando las condiciones necesarias para reproducirla numéricamente.
- Evaluando dos dominios numéricos: canal rectangular y Bahía Mejillones.
- Para el canal se comparó la pendiente de la surgencia mediante modelo conceptual y modelo numérico.
- En Bahía Mejillones se determinó que el tiempo de surgencia es mayor en invierno que en verano. La Niña y El Niño variaron la proporción de las masas de agua y la temperatura en la columna de agua.

INTRODUCCIÓN

- En la costa chilena, existen diversos polos de desarrollo portuario e industrial marítimo, siendo en su mayoría focos de preocupación ambiental debido a la gran cantidad de proyectos que conviven entre sí.
- Tal es el caso de Bahía Mejillones, que gracias a Punta Angamos, corresponde a un sector con abrigo natural a las condiciones de oleaje más frecuentes y consecuentemente hacen de ella una zona de explotación industrial.
- Estos proyectos en su mayoría requieren agua para funcionar y posteriormente dicho flujo es devuelto al mar con alteraciones físicas, químicas y biologías, posiblemente son capaces de alterar el comportamiento natural del medio.
- Esta bahía ha sido estudiada por diversos autores, evidenciando la ocurrencia de surgencia costera.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

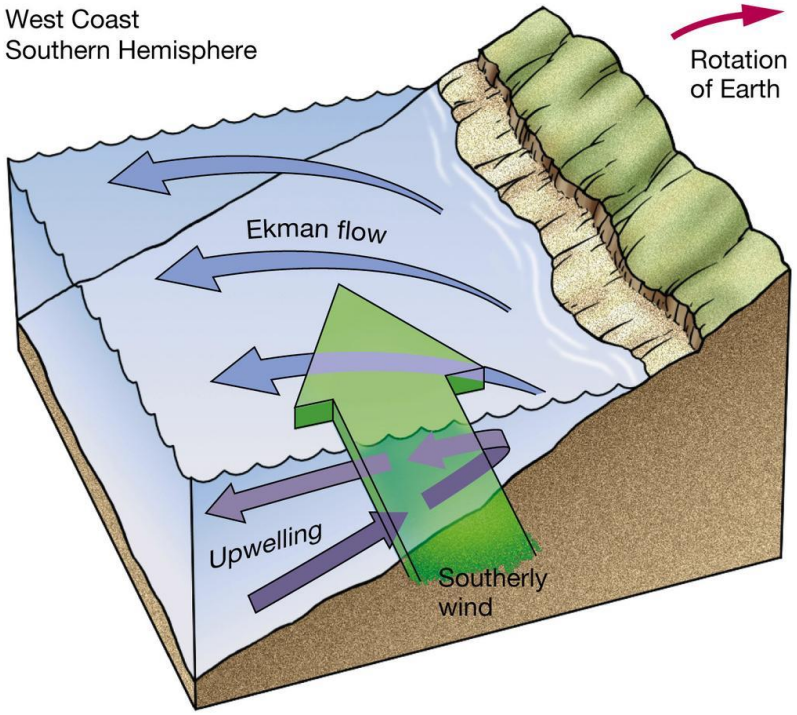
- Estudiar la surgencia generada en Bahía Mejillones, mediante la caracterización y simulación hidrodinámica, modelando la condición de casos medios de las forzantes principales que influyen en este proceso.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Recopilar información oceanográfica y meteorológica de la zona estudiada.
- Caracterizar la hidrodinámica de Bahía Mejillones.
- Evaluar la surgencia para un canal y comparar sus resultados con experimentos desarrollados por terceros.
- Determinar el comportamiento de la surgencia a través de un análisis de sensibilidad de la forzante viento.
- Evaluar la influencia del ciclo ENOS en la surgencia.

FUNDAMENTO TEÓRICO

Proceso de surgencia



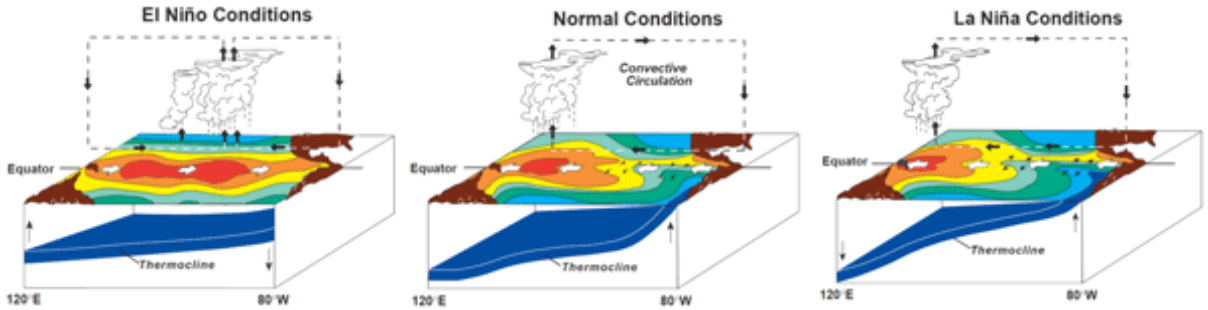
FUNDAMENTO TEÓRICO

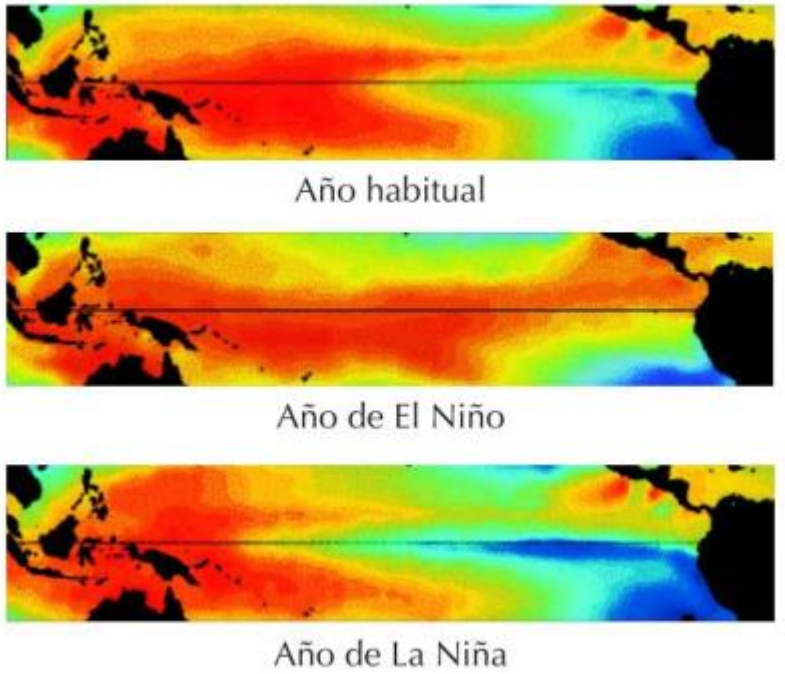
Fenómeno ENOS

- Sistema de interacción océano-atmósfera, en que variaciones en los patrones de vientos son las principales causas en los cambios TSM y por ende en la circulación océano atmosférica.
- Puede durar 18 meses el ciclo completo y aparece cada 2 a 7 años.
- Evento irregular que puede variar en intensidad y duración. (Maturana et al., 1997; Lau y Nath, 2003 y Zambrano, 1986).
- Comprende una fase cálida, fría y neutra.

FUNDAMENTO TEÓRICO

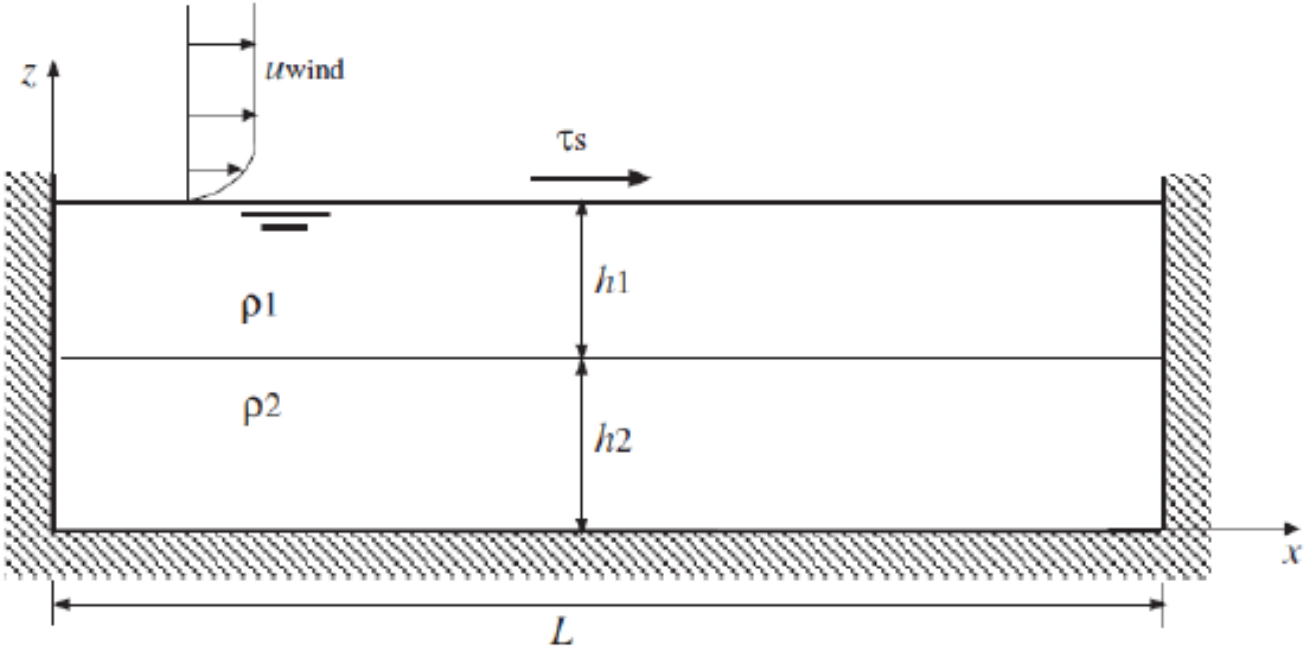
Fenómeno ENOS





FUNDAMENTO TEÓRICO

Respuesta de un cuerpo estratificado a la acción del viento



Fuente: Niño, 2013.

FUNDAMENTO TEÓRICO

Respuesta de un cuerpo estratificado a la acción del viento

El problema descrito anteriormente se resuelve a partir de las ecuaciones incompresibles de Navier-Stokes promediadas por Reynolds (RANS) con el supuesto de presión hidrostática en cada una de las dos capas. Considerando que se trata de un problema 2D, se presentan ecuaciones de momentum en el eje x (3.1), en el eje z (3.2) y la ecuación de continuidad (3.3) (Niño, 2013).

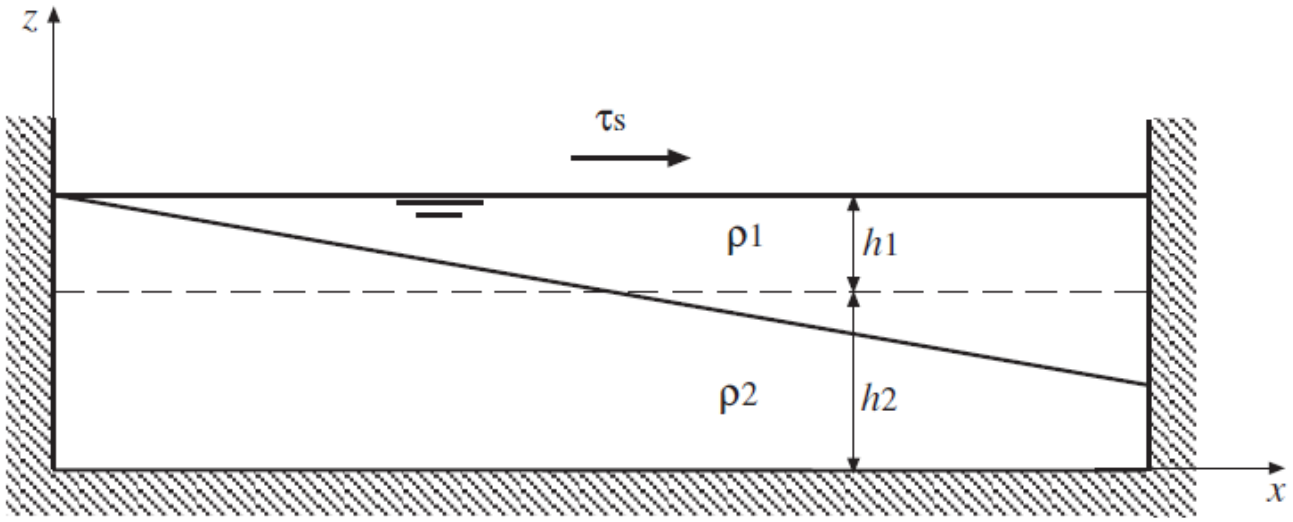
$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_i\frac{\partial u_i}{\partial x} + w_i\frac{\partial u_i}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_i}\left(\frac{\partial \hat{p}}{\partial x}\right) i + \frac{1}{\rho_i}\frac{(\partial \tau_{xx})_i}{\partial x} + \frac{1}{\rho_i}\frac{(\partial \tau_{zx})_i}{\partial z} \qquad (3.1)$$

$$\frac{\partial w_i}{\partial t} + u_i\frac{\partial w_i}{\partial x} + w_i\frac{\partial w_i}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_i}\left(\frac{\partial \hat{p}}{\partial z}\right) i + \frac{1}{\rho_i}\frac{(\partial \tau_{xz})_i}{\partial x} + \frac{1}{\rho_i}\frac{(\partial \tau_{zz})_i}{\partial z} \qquad (3.2)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x} + \frac{\partial w_i}{\partial z} = 0 \qquad (3.3)$$

FUNDAMENTO TEÓRICO

Respuesta de un cuerpo estratificado a la acción del viento



Fuente: Niño, 2013.

$$\frac{\partial \xi_1}{\partial x} = Fr_*^2 \tag{3.6}$$

$$\frac{\partial \xi_2}{\partial x} = -\frac{1}{Ri_0} \tag{3.7}$$

$$Ri_0 = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1}\frac{gh_1}{u_{*_s}^2} = \frac{\triangle \rho}{\rho_1}\frac{1}{Fr_*^2} \tag{3.8}$$

$$u_{*_s} = \sqrt{(\tau_s/\rho_1)} \tag{3.9}$$

FUNDAMENTO TEÓRICO

Respuesta de un cuerpo estratificado a la acción del viento

Las ecuaciones presentadas con anterioridad (Niño,2013), describen el modelo conceptual de la surgencia generada por viento. Fenómeno que será reproducido mediante modelación numérica, la que considera una batimetría ideal definida para una canal

FUNDAMENTO TEÓRICO

Respuesta de un cuerpo estratificado a la acción del viento

Monismith (1986)

$$\frac{d}{dt}(\Delta\rho h_2) = 0 \qquad (3.13)$$

$$\frac{dh_2}{dt} = -\frac{h_2 d\Delta\rho/dt}{\Delta\rho} \qquad (3.14)$$

$$\frac{dh_2/dt}{u_*} = 0{,}07Ri^{-1} \qquad (3.15)$$

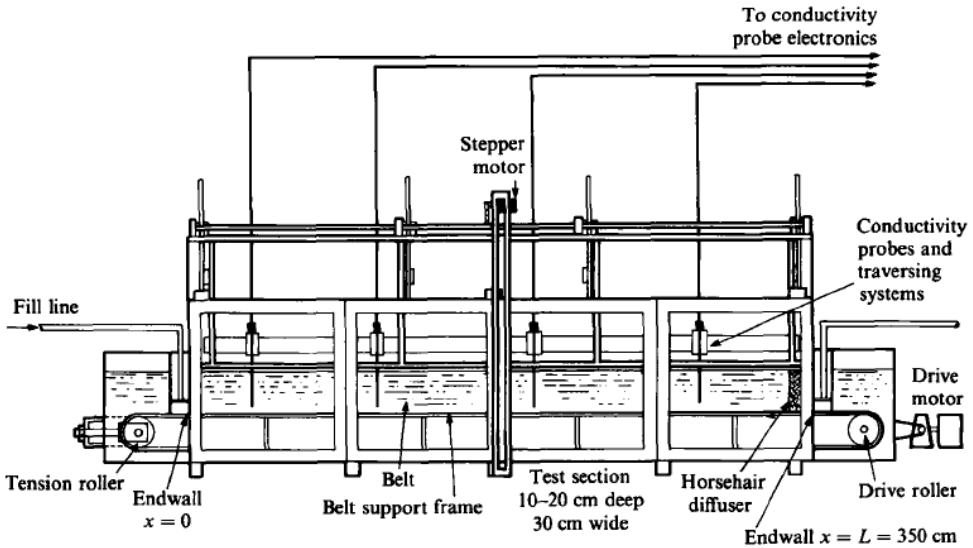


FIGURE 3. The experimental apparatus.

Fuente: Monismith (1986)

FUNDAMENTO TEÓRICO

DESCRIPCIÓN DE MODELOS NUMÉRICOS

MIKE 3 FLOW MODEL FM: MÓDULO HIDRODINÁMICO

Corresponde a un modelo numérico tridimensional, con la capacidad de modelar flujos en estuarios, bahías y áreas costeras. Adicionalmente, puede simular flujos inestables teniendo en cuenta variaciones de densidad, batimetría y forzantes externas como el viento y la presión atmosférica, elevaciones de mareas, corrientes y otras condiciones hidrográficas.

La solución numérica se basa en un sistema tridimensional de las ecuaciones incompresibles de Navier-Stokes promediadas por Reynolds (RANS), invocando supuestos de Boussinesq y de presión hidrostática. Es por ello que el modelo se sustenta de las ecuaciones de continuidad (3.18), momentum en el eje x (3.19) y en el eje y (3.20).

FUNDAMENTO TEÓRICO

DESCRIPCIÓN DE MODELOS NUMÉRICOS

MIKE 3 FLOW MODEL FM: MÓDULO HIDRODINÁMICO

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = S \tag{3.18}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial vu}{\partial y} + \frac{\partial wu}{\partial z} = fv - g\frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0}\frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0}\int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial x}dz - \frac{1}{\rho_0 h}\left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y}\right) + F_u + \frac{\partial}{\partial z}\left(\nu_t \frac{\partial u}{\partial z}\right) + u_s S \tag{3.19}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial wv}{\partial z} = fu - g\frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0}\frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{g}{\rho_0}\int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial y}dz - \frac{1}{\rho_0 h}\left(\frac{\partial S_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial S_{yx}}{\partial x}\right) + F_v + \frac{\partial}{\partial z}\left(\nu_t \frac{\partial v}{\partial z}\right) + v_s S \tag{3.20}$$

FUNDAMENTO TEÓRICO

DESCRIPCIÓN DE MODELOS NUMÉRICOS

MIKE 3 FLOW MODEL FM: MÓDULO HIDRODINÁMICO

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial uT}{\partial x} + \frac{\partial vT}{\partial y} + \frac{\partial wT}{\partial z} = F_T + \frac{\partial}{\partial z}\left(D_\nu \frac{\partial T}{\partial z}\right) + \widehat{H} + T_s S \qquad (3.31)$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial us}{\partial x} + \frac{\partial vs}{\partial y} + \frac{\partial ws}{\partial z} = F_s + \frac{\partial}{\partial z}\left(D_\nu \frac{\partial s}{\partial z}\right) + s_s S \qquad (3.32)$$

$$(F_T, F_s) = \left(\frac{\partial}{\partial x}\left(D_h \frac{\partial}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(D_h \frac{\partial}{\partial y}\right)\right)(T, s) \qquad (3.33)$$

$$D_h = \frac{A}{\sigma_T}, \quad D_v = \frac{\nu_t}{\sigma_T} \qquad (3.34)$$

FUNDAMENTO TEÓRICO

DESCRIPCIÓN DE MODELOS NUMÉRICOS

MIKE 3 FLOW MODEL FM: MÓDULO HIDRODINÁMICO

Para resolver las ecuaciones anteriormente presentadas se recurre a las condiciones de borde de superficie y de fondo para u, v y w, mostradas en la ecuación (3.23) y ecuación (3.24), respectivamente.

Para $z = \eta$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + u\frac{\partial \eta}{\partial x} + v\frac{\partial \eta}{\partial y} - w = 0, \ \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z}\right) = \frac{1}{\rho_0 \nu_t}\left(\tau_{sx}, \tau_{sy}\right) \qquad (3.23)$$

Para $z = -d$

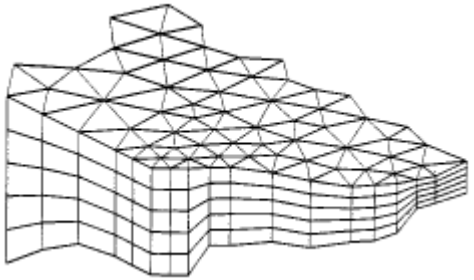
$$u\frac{\partial d}{\partial t} + v\frac{\partial d}{\partial y} + w = 0, \ \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z}\right) = \frac{1}{\rho_0 \nu_t}\left(\tau_{bx}, \tau_{by}\right) \qquad (3.24)$$

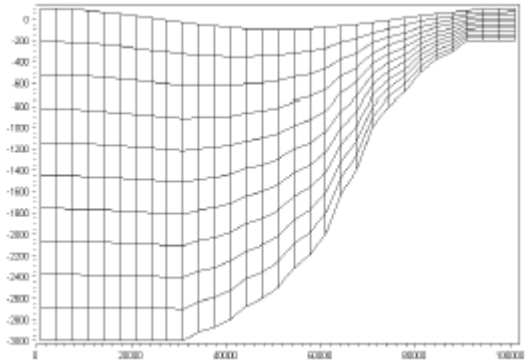
FUNDAMENTO TEÓRICO

DESCRIPCIÓN DE MODELOS NUMÉRICOS

MIKE 3 FLOW MODEL FM: MÓDULO HIDRODINÁMICO

La discretización espacial de dichas ecuaciones es posible a través del método de volúmenes finitos centrado en la celda. Para el dominio horizontal se usa una malla estructurada mientras que para el vertical una no estructurada. En cuanto a la superficie libre, se considera una aproximación de la transformación de coordenadas sigma (DHI, 2014b).





Fuente: DHI, 2014

FUNDAMENTO TEÓRICO

DESCRIPCIÓN DE MODELOS NUMÉRICOS

MIKE 21 SPECTRAL WAVES FM: MÓDULO DE PROPAGACIÓN DE OLEAJE

Modelo que simula el crecimiento, decaimiento y transformación del oleaje tipo sea y swell desde aguas profundas a zonas costeras. Se basa en el método de volúmenes finitos de celda centrada para la discretización de la ecuación de balance de acción del oleaje (ecuación 3.35) definida como (DHI, 2014a)

$$N(\sigma,\theta) = \frac{E(\sigma,\theta)}{\sigma} \qquad (3.35)$$

$$\sigma = \sqrt{gktanh(kd)} = \omega - \vec{k}\cdot\vec{U} \qquad (3.36)$$

Dado que se trata de un estudio de pequeña escala, se utiliza la ecuación de conservación de acción del oleaje (3.37) en coordenadas cartesianas, donde la velocidad de propagación de la onda $\vec{v}$ (3.37) está compuesta por c_x, c_y, c_σ, c_θ (3.38, 3.39 y 3.40) y además, las fuentes asociadas a la energía S (3.41). Todas ellas son descritas a continuación.

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla(\vec{v}N) = \frac{S}{\sigma} \qquad (3.37)$$

FUNDAMENTO TEÓRICO

DESCRIPCIÓN DE MODELOS NUMÉRICOS

MIKE 21 SPECTRAL WAVES FM: M´ODULO DE PROPAGACIÓN DE OLEAJE

$$S_{xx} = \frac{1}{2} g(f_{u2} + f_{pp})$$

$$S_{xy} = \frac{1}{2} g(f_{uv}) \qquad (3.42)$$

$$S_{yy} = \frac{1}{2} g(f_{v2} + f_{pp})$$

INGENIERÍA CIVIL
OCEÁNICA

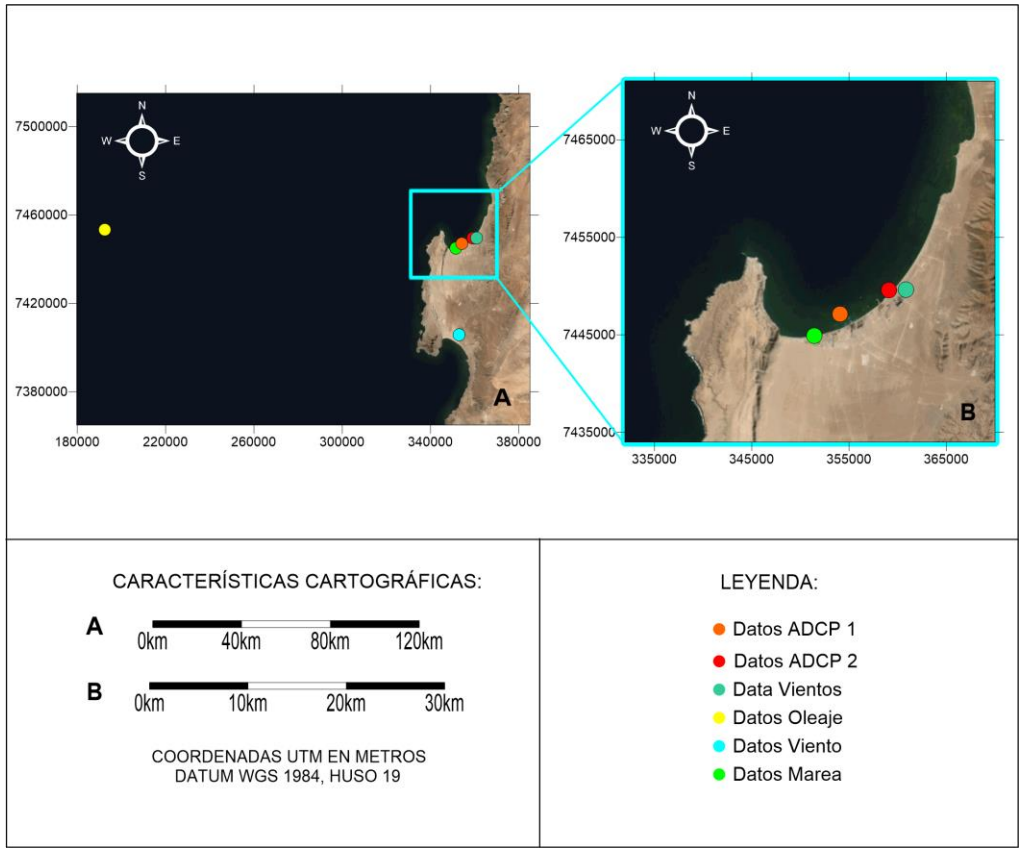
ANTECEDENTES DE LA BAHÍA MEJILLONES

Universidad de Valparaíso CHILE

OCEANOGRAFÍA Y METEOROLOGÍA

Variable	Base de datos históricos	Campañas en terreno
Corrientes	Sin información	Ecotecnos – ADCP Datos ADCP1 Datos ADCP2
Oleaje	Atlas de Oleaje Datos Oleaje	
Marea	Sea Level Monitoring Datos Marea	
Temperatura	Modelo HYCOM Datos Tempetatura	Sin información
Viento	DGAC Datos Viento	Ecotecnos – Estación meteorológica Data Viento

Datos	Verano	Invierno
ADCP1	28/02/2016-20/04/2016	21/06/2016-25/07/2016
ADCP2	Sin información	20/08/2011-13/09/2011



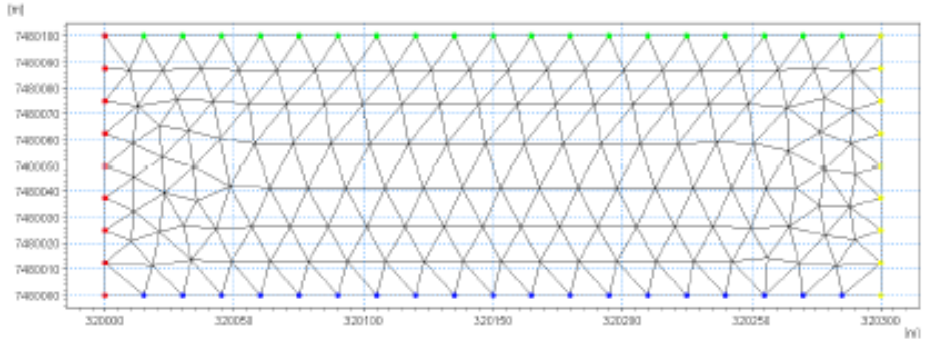
METODOLOGÍA UTILIZADA

CARACTERIZACIÓN PRELIMINAR MODELACIÓN NUMÉRICA HIDRODINÁMICA

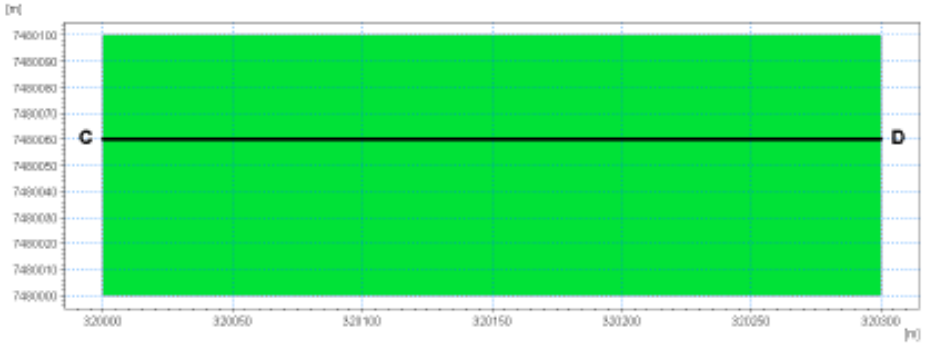
DOMINIO NUMÉRICO

- Caso ideal: Canal
- Caso real: Bahía

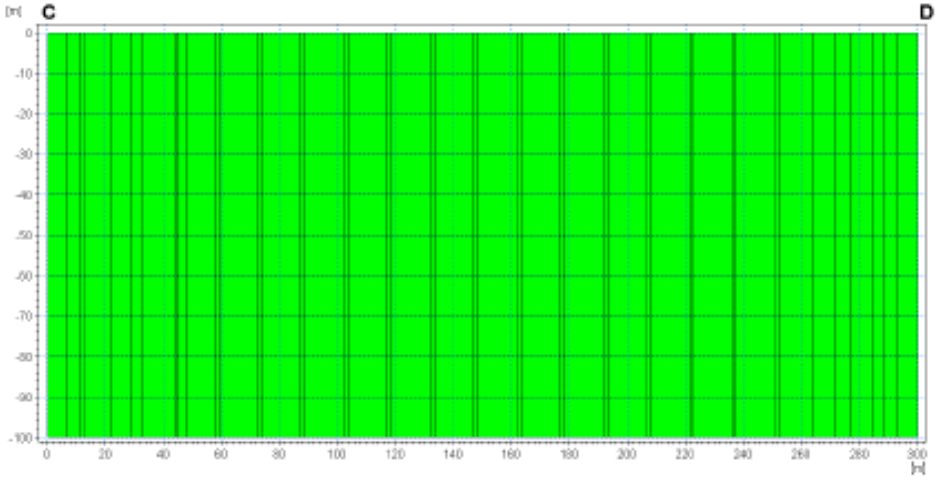
CASO IDEAL Para la malla del canal, se consideró una longitud de 300 [m] y una profundidad constante de 100 [m]. Con respecto al dominio vertical, se determinaron 10 capas equidistantes, que permitieron representar los perfiles de temperatura utilizados como forzantes en el modelo hidrodinámico. La malla de la Figura 5.3 contiene 183 nodos y 308 elementos, lo que permite reducir el costo computacional sin perder información necesaria para describir el proceso de surgencia.



(a)



(b)



(c)

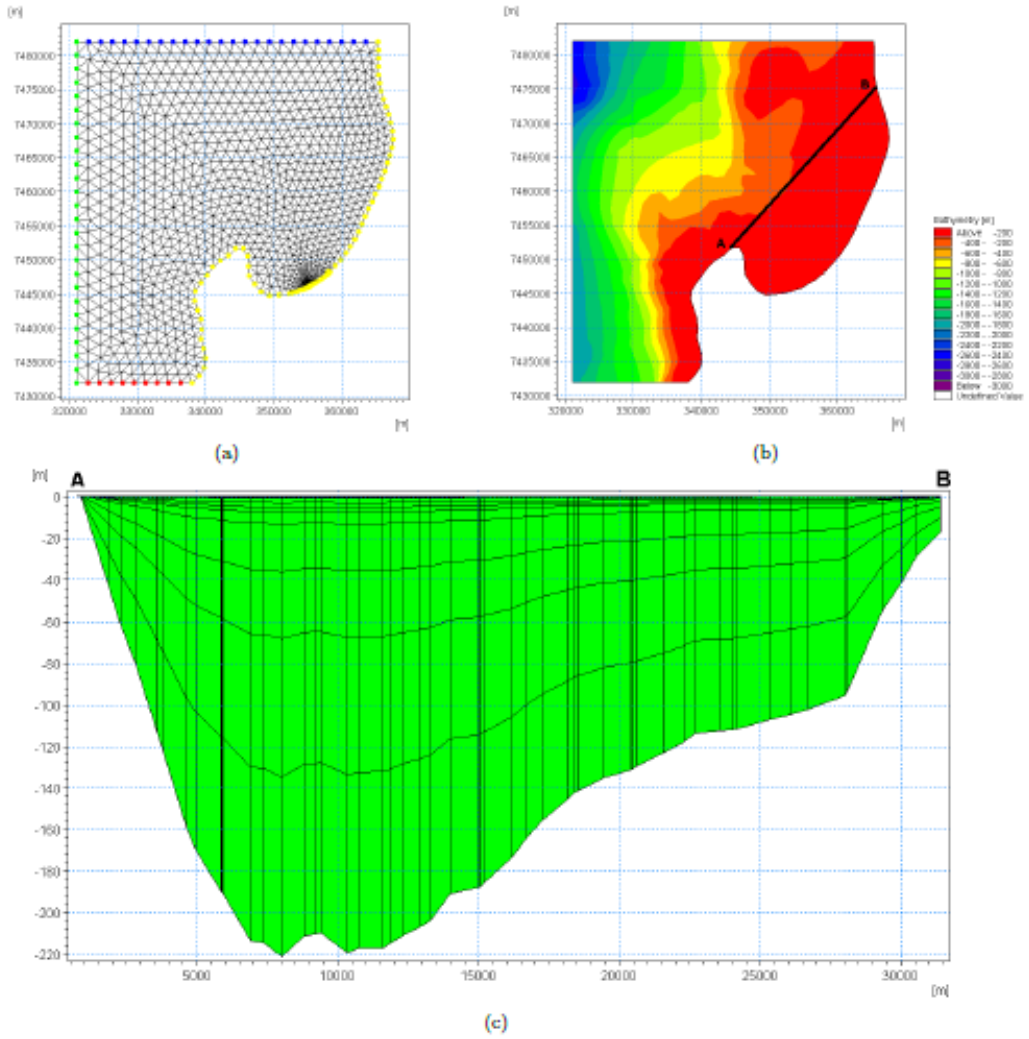
METODOLOGÍA UTILIZADA

CARACTERIZACIÓN PRELIMINAR MODELACIÓN NUMÉRICA HIDRODINÁMICA

DOMINIO NUMÉRICO

CASO REAL

- La línea de costa consideró como límite sur parte de la Península de Angamos, y al norte por punta sin identificar (Figura 4.1), dado que estos límites, y en particular el del sur, tienen gran influencia en la hidrodinámica de la Bahía (Letelier et al., 2012).
- A partir de la caracterización de Datos Oleaje fue posible advertir el mayor periodo peak Tp = 24[s] conllevando que a partir de 500 [m] de profundidad dicho estado de mar se encuentra en aguas profundas. Por ello, el borde oceánico se localizó a profundidades mayores a 500 [m] de manera que la propagación hacia la costa fue desde aguas profundas.


(a)
(b)
A
B
(c)
5000
10000
15000
20000
25000
30000

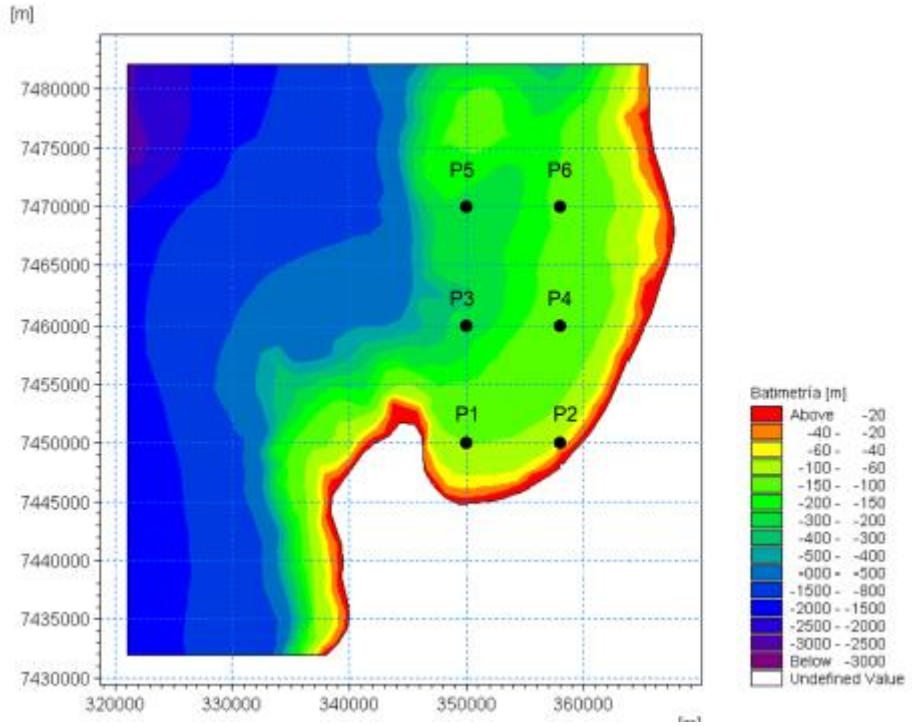
INGENIERÍA CIVIL
OCEÁNICA

METODOLOGÍA UTILIZADA

Universidad de Valparaíso
CHILE

ESTABILIDAD NUMÉRICA

Luego de obtener la malla 3D del caso real, fue necesario determinar si ésta era estable numéricamente. Para ello, se analizó el campo hidrodinámico de la Bahía generado por la forzante marea.



METODOLOGÍA UTILIZADA

CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN

CONFIGURACIÓN MODELO DE OLEAJE

Sección	Parámetro	Valor
Basic Equations	Spectra Formulation	Directionally decoupled parametric formulation
	Time formulation	Quasi stationary formulation
Solution Technique	Geographical space discretization	Low order, fast algorithm
	Method	Newton-Raphson iteration
	Max. number of iterations	500
	Tolerance	0.001
	Relaxation factor	0.1
Diffraction	Smoothing factor	1
Wave Breaking	Type of gamma	0.8
Bottom Friction	Nikuradse roughness, kn	0.04 [m]
Initial Conditions	Zero Spectra	–
Boundary Conditions	Waves parameters	Variando en el tiempo, constante en todo el borde

CONFIGURACIÓN MODELO HIDRODINÁMICO

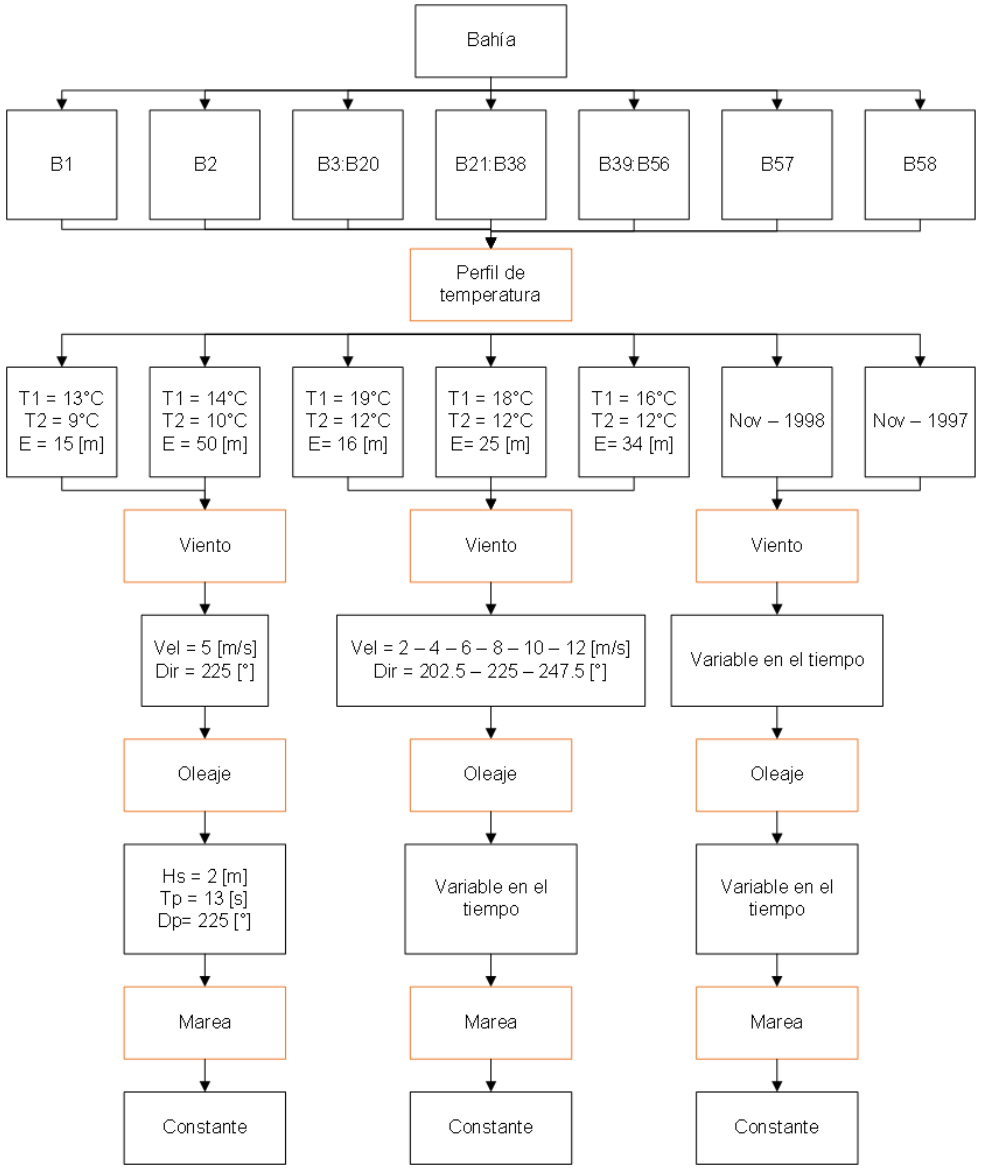
Sección	Parámetro	Valor
Solution Technique	Time integration	Low order, fast algorithm
	Space discretization	Low order, fast algorithm
	Minimun time step	0.01 [s]
	Maximun time	600 [s]
	Critical CFL number	0.8
Eddy Viscosity	Horizontal Eddy Viscosity Smagorinsky formulation	0.28
	Vertictal Eddy Viscosity Log Law formulation	1.8e-006 - 0.4 [m2/s]
Bed resistence	Roughness height	0.01 [m]
Wind Forcing	Constant	0.0007
Wave Radiation	Varying in time and domain	Resultados modelo de propagación de oleaje
Initial Conditions	Surface elevation	De acuerdo con el valor inicial de la Condición de Borde
Boundary Conditions	Specified level	Varying in time, constante along boundary

INGENIERÍA CIVIL
OCEÁNICA

METODOLOGÍA UTILIZADA

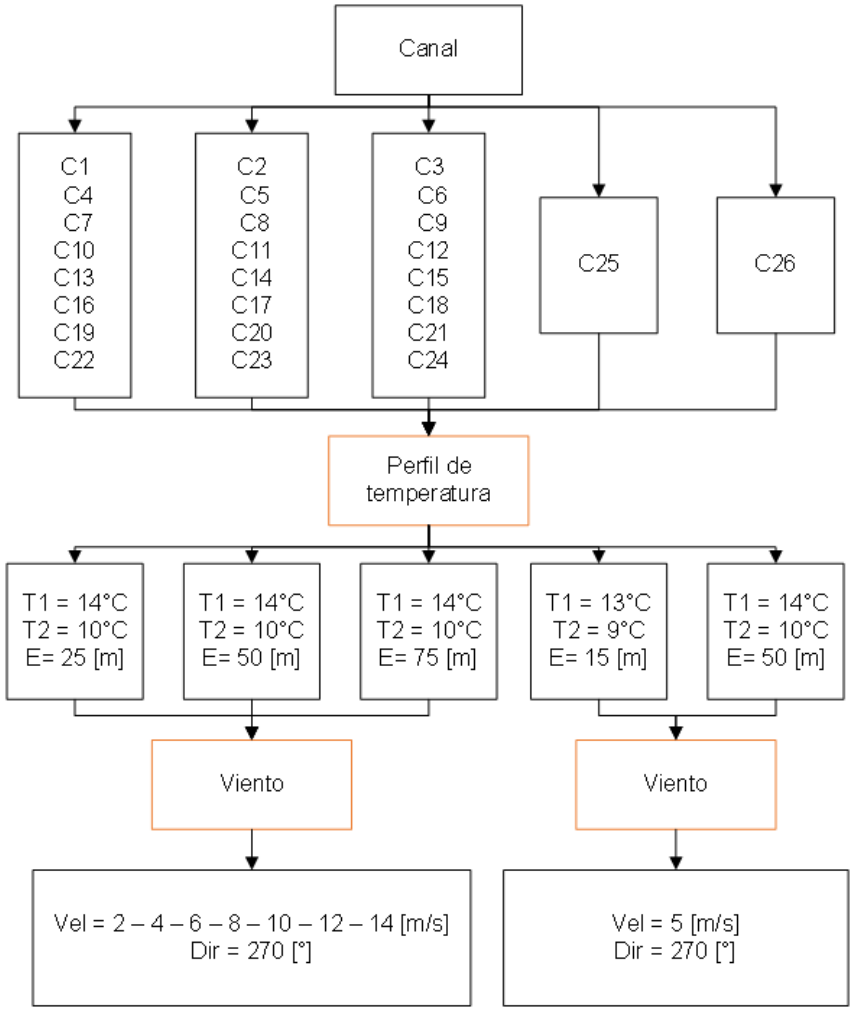
Universidad de Valparaíso CHILE

EXPLOTACIÓN DEL MODELO



METODOLOGÍA UTILIZADA

EXPLOTACIÓN DEL MODELO



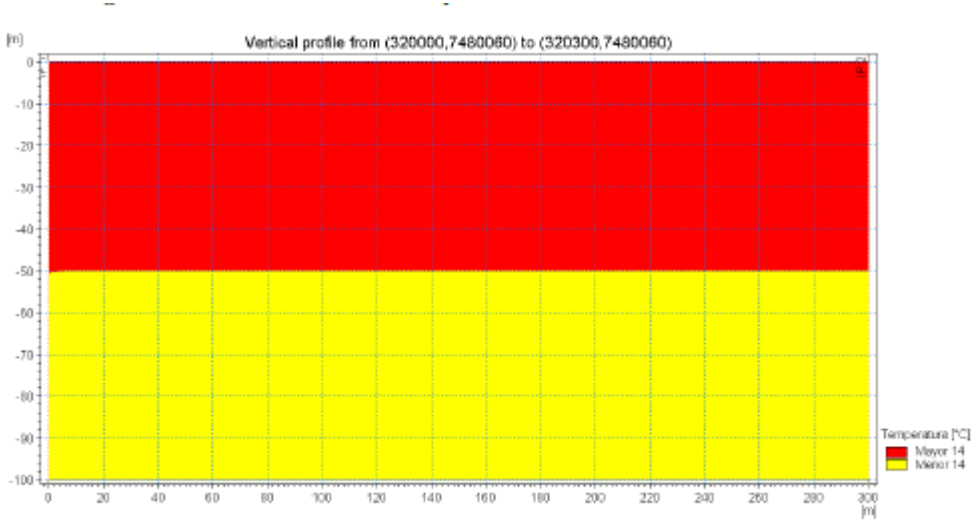
METODOLOGÍA UTILIZADA

EXPLOTACIÓN DEL MODELO: CANAL

CÁLCULO EXPERIMENTAL Y TEÓRICO

- La CI se definió como variable en el espacio, mientras la CB varió en el tiempo y a lo largo de la línea, forzada desde el W

Sección	Parámetro	Valor
Density	Function of temperature	Reference temperature: 8 [°C]
Temperature Module	Equation	0 - 40 [°C]
	Solution technique	Low order
	Dispersion, Scaled eddy viscosity formulation	Constant value: 1
	Initial Conditions	Varying in domain
	Boundary Conditions	Varying in time and along boundary



METODOLOGÍA UTILIZADA

EXPLOTACIÓN DEL MODELO: BAHÍA

RESPUESTA A LA ACCIÓN DEL VIENTO

SSW: 202.5 [°]
SW : 225 [°]
SWS: 247.5 [°]

} Velocidad [m/s]: 2 - 4 - 6 - 8 - 10 - 12 - 14

Escenarios:

- Verano
- Condición media
- Invierno

→ viento SW constante de 6 [m/s]

} TSM
Campo de valocidades
Perfil vertical de temperatura

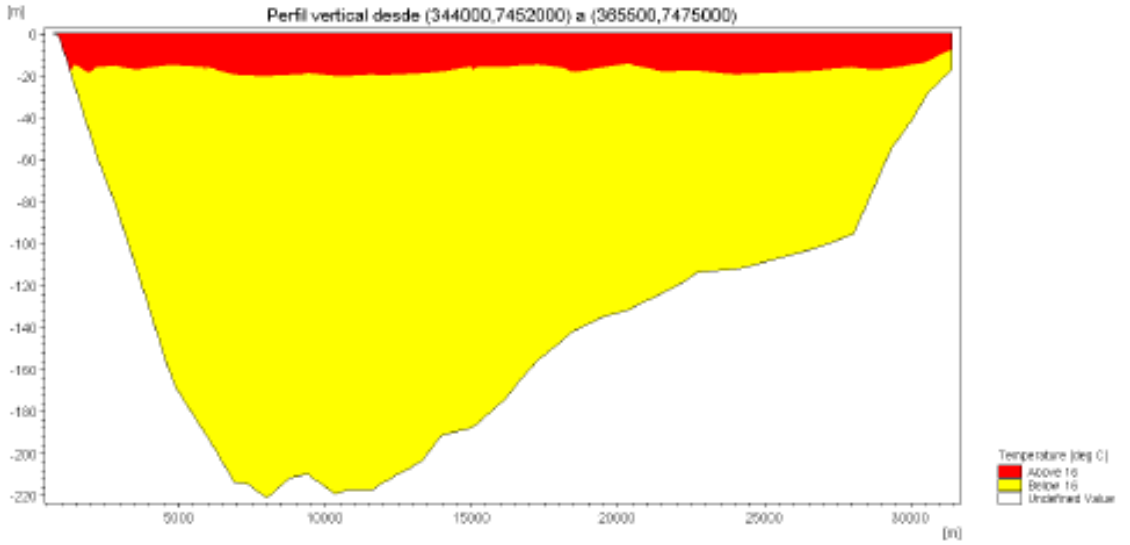
METODOLOGÍA UTILIZADA

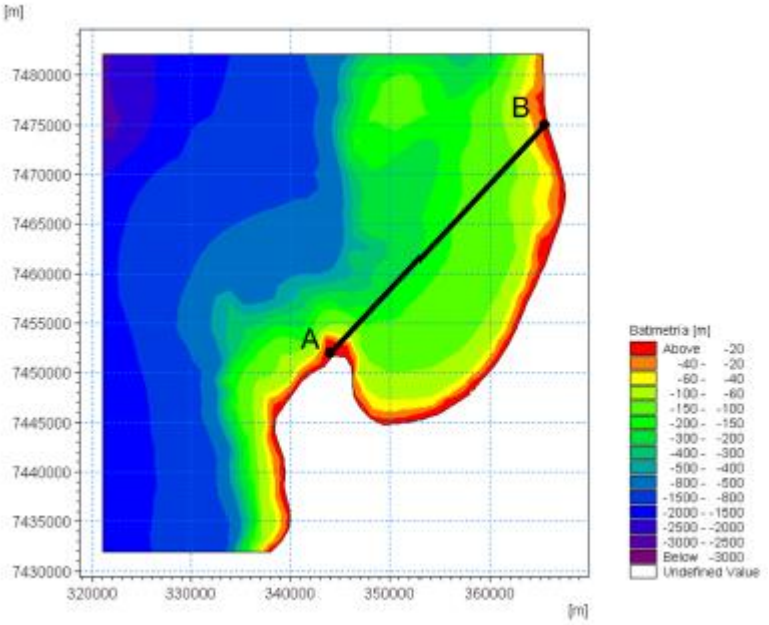
EXPLOTACIÓN DEL MODELO: BAHÍA

RESPUESTA A LA ACCIÓN DEL VIENTO

Sección	Parámetro	Valor
Density	Function of temperature	Reference temperature: 8 [°C]
Temperature Module	Equation	0 - 40 [°C]
	Solution technique	Low order
	Horizontal dispersion coefficient formulation	Constant value: 0.01 [m2/s]
	Vertical dispersion coefficient formulation	Constant value: 0.001 [m2/s]
	Initial Conditions	Varying in domain
	Boundary Conditions	Varying in time and along boundary

- Marea : Constante en el tiempo y a lo largo del borde.
- Tensores de radiación : Variable en el espacio y tiempo.
- Temperatura CB : Variable en el tiempo y a lo largo del borde.
- Temperatura CI : Variable en el espacio.
- Viento : Constante en el tiempo y espacio.





METODOLOGÍA UTILIZADA

EXPLOTACIÓN DEL MODELO: BAHÍA

CONDICIONES EL NIÑO Y LA NIÑA

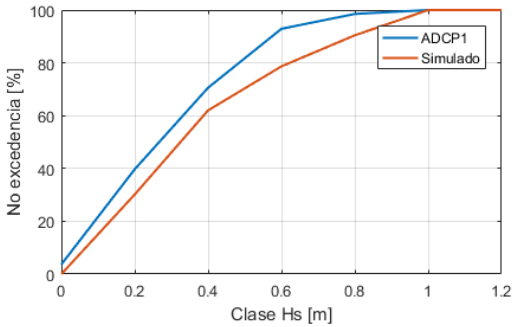
- El Niño 1997
- La Niña 1998

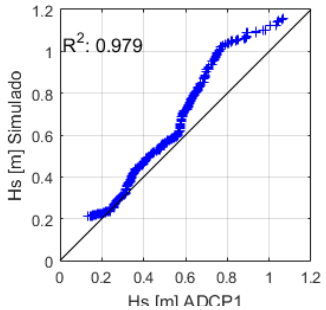
- Marea : Constante en el tiempo y a lo largo del borde.
- Tensores de radiación : Variable en el espacio y tiempo.
- Temperatura CB : Variable en el tiempo y a lo largo del borde.
- Temperatura CI : Variable en el espacio.
- Viento : Variable en el tiempo, constante en el espacio.

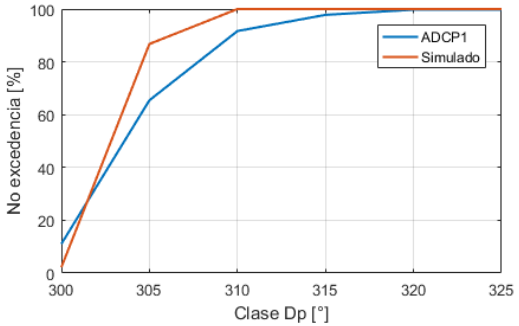
RESULTADOS

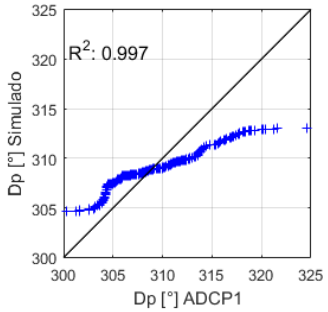
CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE OLEAJE

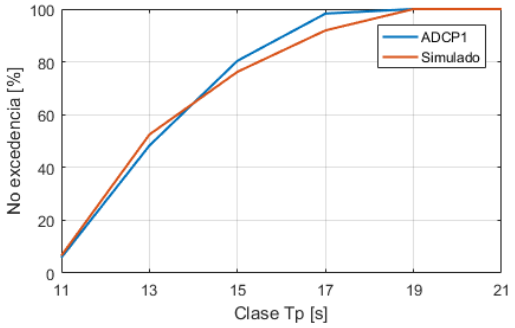
CAMPAÑA DE VERANO

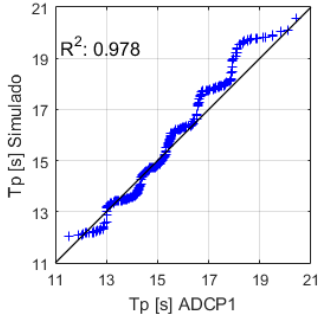








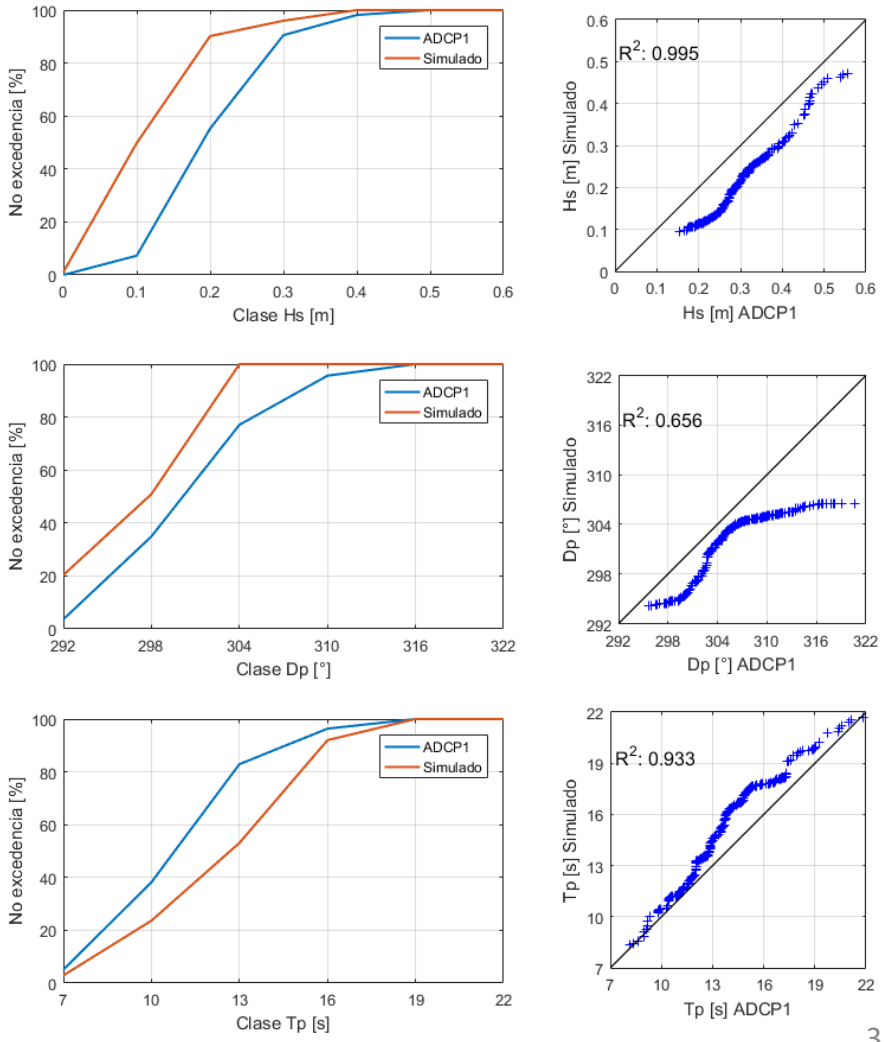




RESULTADOS

CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN: MODELO DE PROPAGACIÓN DE OLEAJE

CAMPAÑA DE INVIERNO

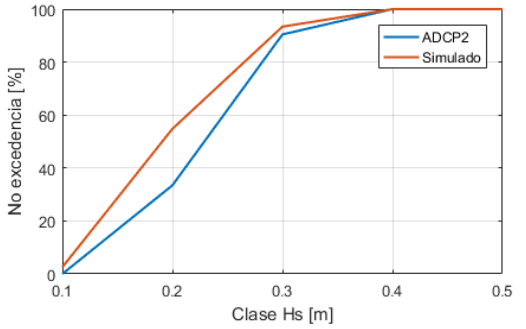


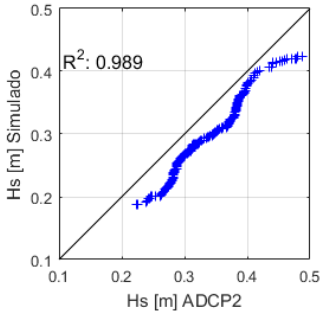
RESULTADOS

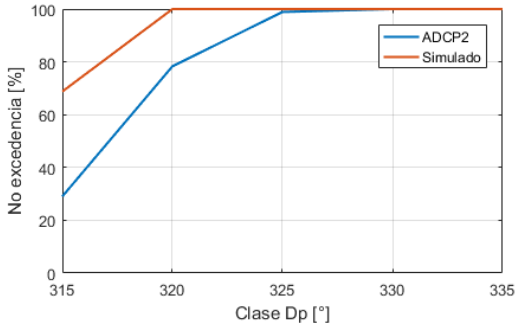
CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN: MODELO DE PROPAGACIÓN DE OLEAJE

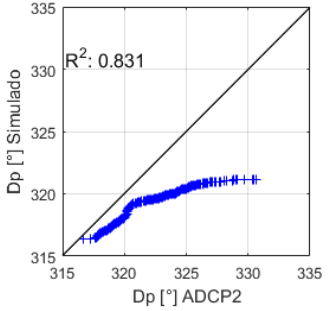
CAMPAÑA DE VERANO

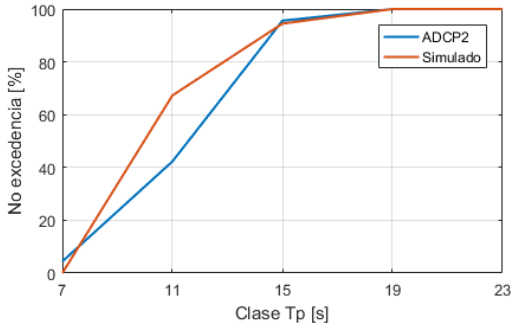
- el modelo no ha sido capaz de representar totalmente la difracción provocada por Punta Angamos, considerando que el 95.57% del oleaje incide desde SW.

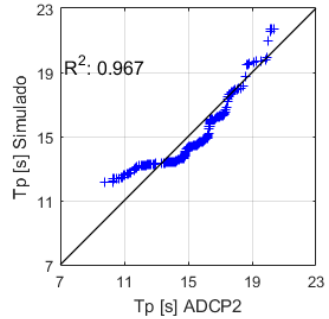








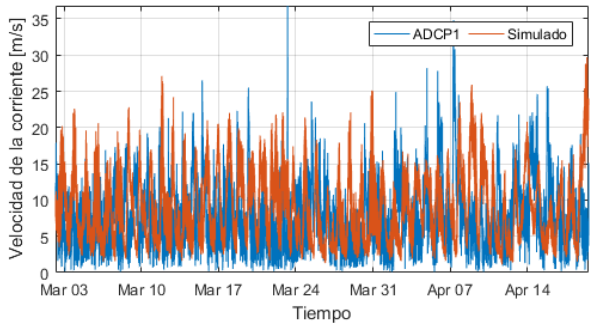


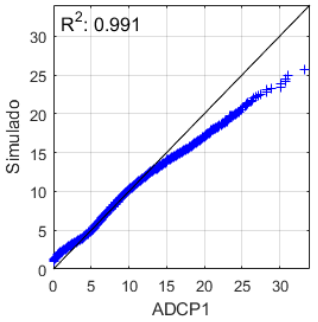


RESULTADOS

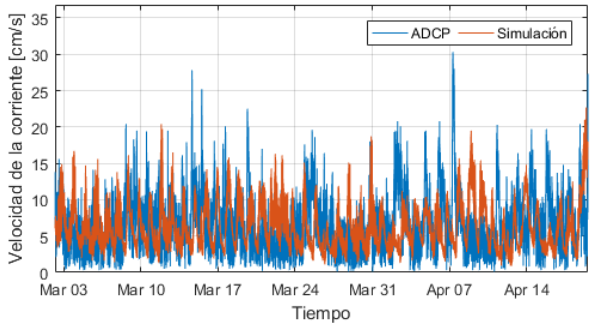
CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE CORRIENTES

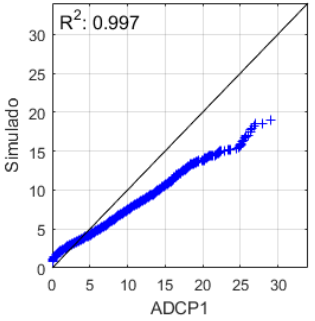
CAMPAÑA DE VERANO



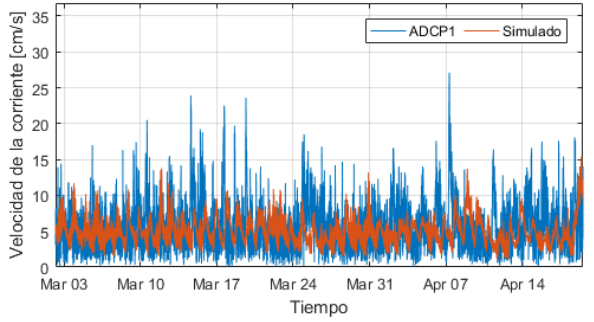


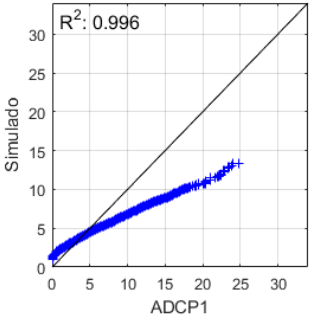
Capa superficial





Capa intermedia



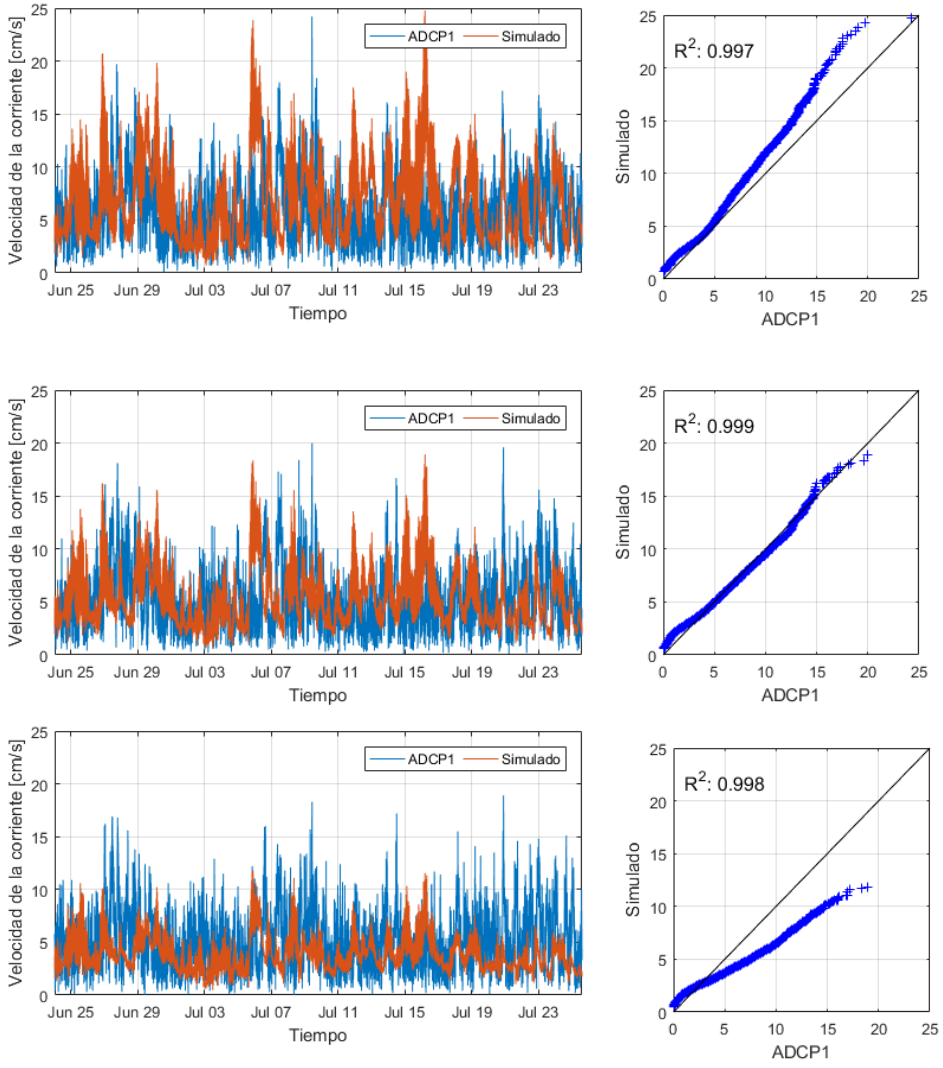


Capa de fondo

RESULTADOS

CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN: MODELO HIDRODINÁMICO

CAMPAÑA DE INVIERNO



Capa superficial

Capa intermedia

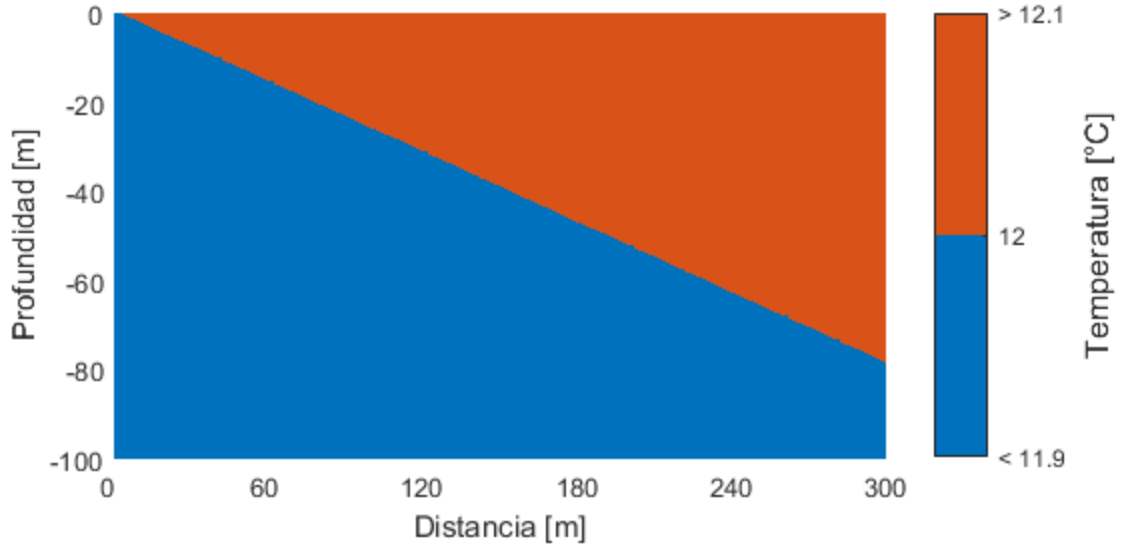
Capa de fondo

RESULTADOS

EXPLOTACIÓN DEL MODELO: CANAL

CÁLCULO EXPERIMENTAL Y TEÓRICO PARA

MODELO NUMÉRICO



m_1 = −0,257

MODELO CONCEPTUAL

Parámetro	Valor	Unidad
ρ_1	1024.267	kgm^{-3}
ρ_2	1024.268	kgm^{-3}
u_*	0.011	ms^{-1}
τ	0.126	$kgm^{-1}s^{-2}$
C_d	0.004	
ρ_a	1.225	kgm^{-3}
U	5	ms^{-1}
g	9.82	ms^{-2}
h_1	50	m
L	300	m
Ri_o	3.910	
m	-0.256	

INGENIERÍA CIVIL
OCEÁNICA

RESULTADOS

Universidad de Valparaíso CHILE

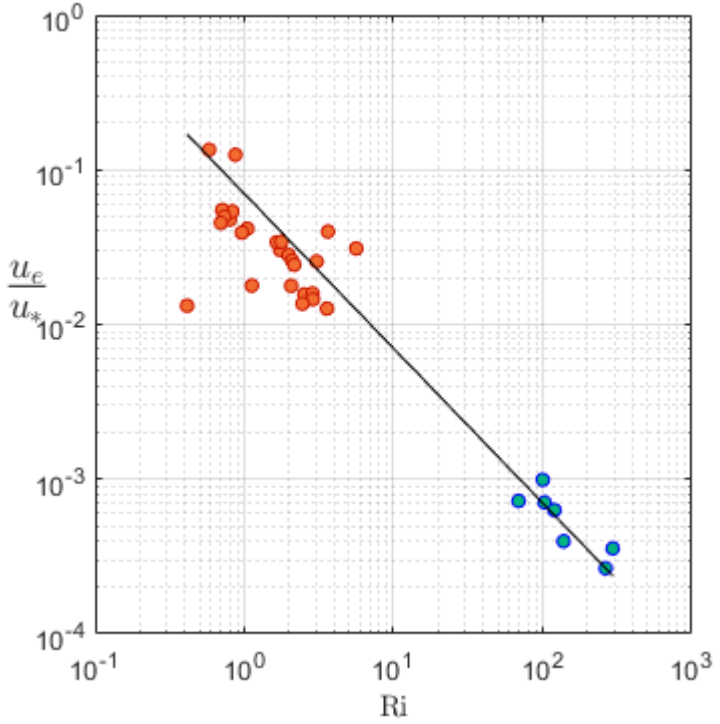
EXPLOTACIÓN DEL MODELO: CANAL

CÁLCULO EXPERIMENTAL Y TEÓRICO

Modelo físico

Experimento	Ri	u_e/u_*	u_e/u_*
1b	120	5.8e-04	6.3e-04
2	295	2.4e-04	3.6e-04
7	264	2.7e-04	2.6e-04
8	138	5.1e-04	4.0e-04
20	100	7.0e-04	9.9e-04
21	103	6.8e-04	7.1e-04
22	69	1.0e-03	7.2e-03

Fuente: Monismith (1986)



Modelo numérico

Viento	Canal	t_s	t_s	$\Delta\rho$	τ_s	u_*	Ri	u_e	u_e
2	1	430200	120	2.9e-04	0.0196	0.0044	3.6324	0.0001	0.0002
	2	447600	124	1.2e-04	0.0196	0.0044	3.0557	0.0001	0.0001
	3	432000	120	1.1e-05	0.0196	0.0044	0.4132	0.0007	0.0001
4	4	180000	50	2.6e-04	0.0784	0.0087	0.8016	0.0008	0.0004
	5	188400	52	2.8e-04	0.0784	0.0087	1.7407	0.0004	0.0003
	6	182400	51	2.7e-04	0.0784	0.0087	2.5261	0.0002	0.0001
6	7	106200	30	6.0e-04	0.1764	0.0131	0.8295	0.0011	0.0007
	8	112200	31	5.9e-04	0.1764	0.0131	1.6475	0.0006	0.0004
	9	106800	30	2.7e-04	0.1764	0.0131	1.1227	0.0008	0.0002
8	10	78000	22	9.1e-04	0.3136	0.0175	0.7116	0.0017	0.0010
	11	83400	23	1.1e-03	0.3136	0.0175	1.7752	0.0007	0.0006
	12	80400	22	8.8e-04	0.3136	0.0175	2.0589	0.0006	0.0003
10	13	69000	19	1.5e-03	0.4900	0.0219	0.7330	0.0021	0.0011
	14	73800	21	5.6e-03	0.4900	0.0219	5.6274	0.0003	0.0007
	15	72000	20	1.9e-03	0.4900	0.0219	2.8608	0.0005	0.0003
12	16	63000	18	2.0e-03	0.7056	0.0262	0.6959	0.0026	0.0012
	17	67800	19	2.9e-03	0.7056	0.0262	1.9836	0.0009	0.0007
	18	65400	18	2.8e-03	0.7056	0.0262	2.8913	0.0006	0.0004
17	19	58800	16	4.1e-03	0.9604	0.0306	1.0475	0.0020	0.0013
	20	63000	18	4.1e-03	0.9604	0.0306	2.0870	0.0010	0.0008
	21	60000	17	3.2e-03	0.9604	0.0306	2.4539	0.0009	0.0004
16	22	54600	15	4.9e-03	1.2544	0.0350	0.9633	0.0025	0.0014
	23	58800	16	5.5e-03	1.2544	0.0350	2.1603	0.0011	0.0009
	24	56400	16	6.1e-03	1.2544	0.0350	3.5779	0.0007	0.0004

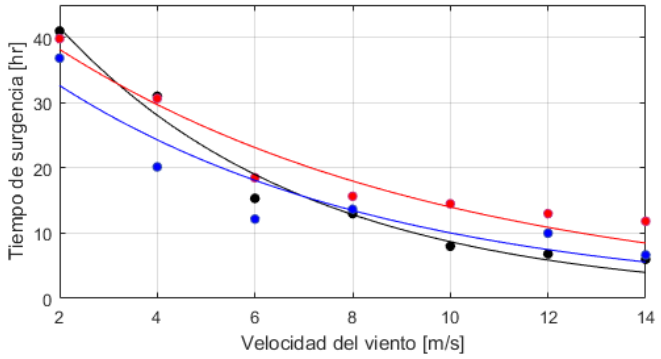
Fuente: Elaboración propia

RESULTADOS

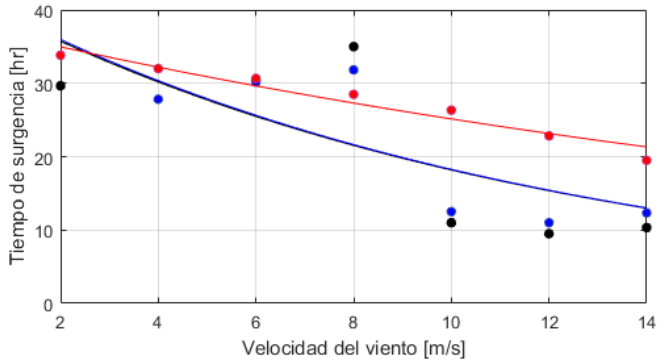
EXPLOTACIÓN DEL MODELO: BAHÍA

RESPUESTA A LA ACCIÓN DEL VIENTO

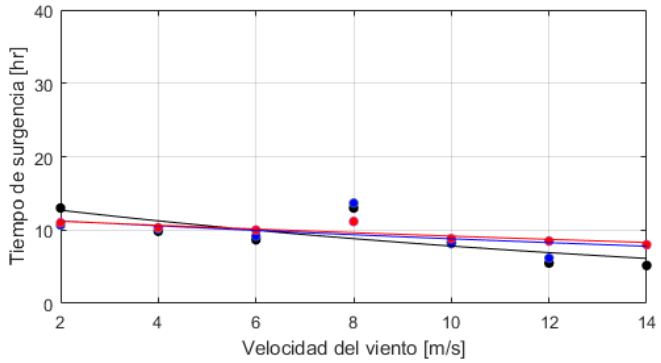
Invierno

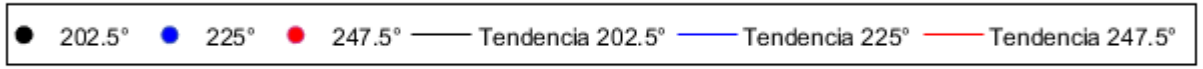


Caso base



Verano





RESULTADOS

EXPLOTACIÓN DEL MODELO: BAHÍA

RESPUESTA A LA ACCIÓN DEL VIENTO

$$T_n = \frac{4L}{(2n+1)\sqrt{gd}}$$

$$T_0 = 3716\ [s]$$
$$T_s = 3813\ [s]$$

$\mathrm{T_n}$	: Periodo de oscilación
$\mathrm{L} = 30.5\ [\mathrm{km}]$	: Longitud de la transeca
$\mathrm{n} = 0$	: Periodo fundamental de la bahía
g	: Gravedad
$\mathrm{d} = 110\ [\mathrm{m}]$	: Profundidad característica

Por lo tanto, lo que demora un viento constante de 8 [m/s] en forzar el cuerpo de agua, representado como la frecuencia de la onda larga de surgencia, y el periodo natural de oscilación de la bahía son muy similares, provocando resonancia y una perturbación en el tiempo de surgencia

INGENIERÍA CIVIL
OCEÁNICA

RESULTADOS

Universidad de Valparaíso CHILE

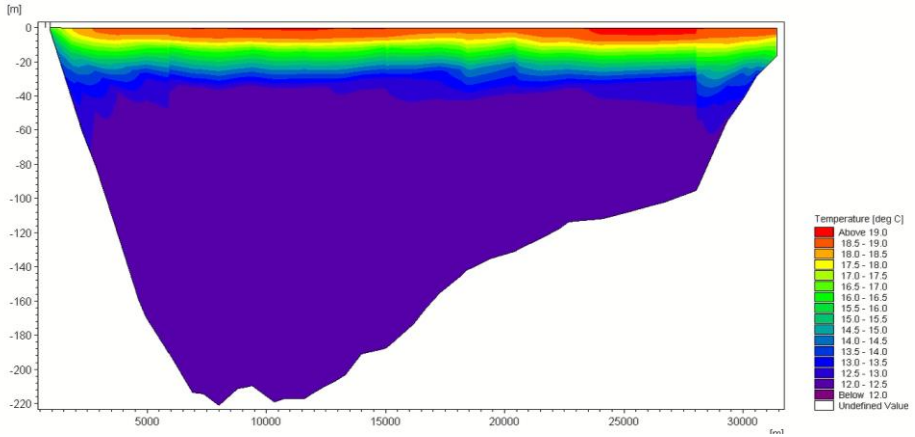
EXPLOTACIÓN DEL MODELO: BAHÍA

VERANO

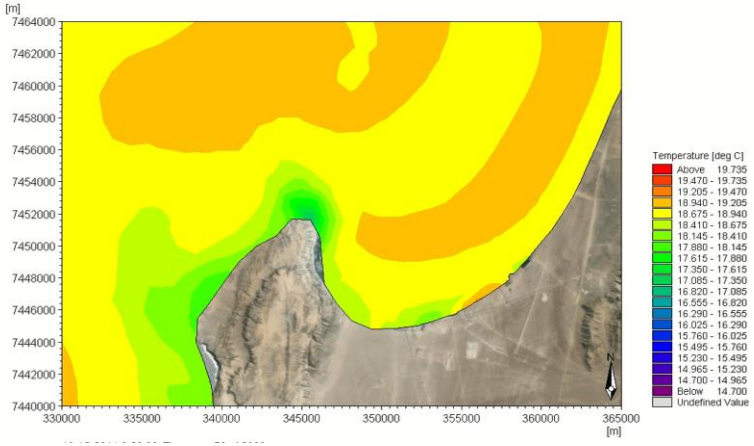
- Viento SW de 6 [m/s]
- Termoclina: 65 [m]

$t_i = 16.5\ [hr]$
$T_i = 17.2\ [°C]$ $\quad v_i = 40\ [cm/s]$
$T_f = 15.2\ [°C]$ $\quad v_f = 28\ [cm/s]$
$\Delta T\ = 2\ [°C]$

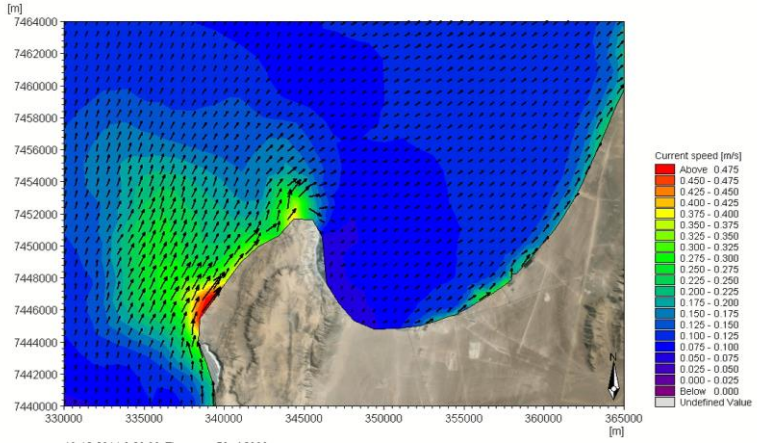
Perfil vertical de temperatura



TSM



Campo de velocidades



INGENIERÍA CIVIL
OCEÁNICA

RESULTADOS

Universidad de Valparaíso
CHILE

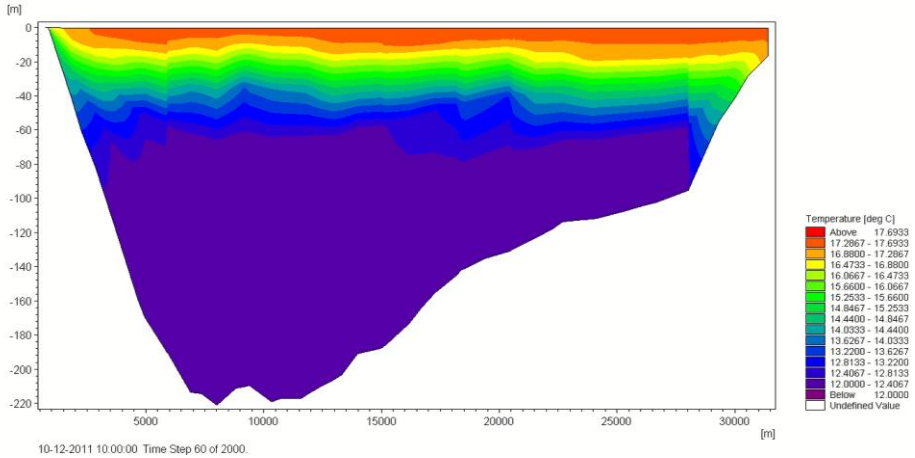
EXPLOTACIÓN DEL MODELO: BAHÍA

CASO MEDIO

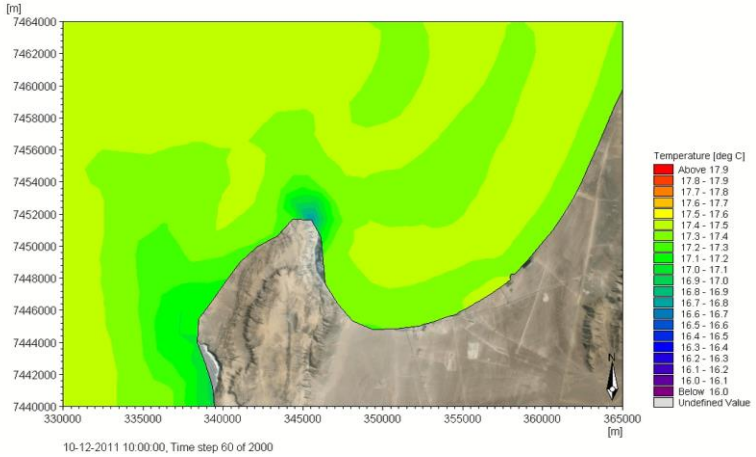
- Viento SW de 6 [m/s]
- Termoclina: 80 [m]

$t_i = 8.5\ [hr]$
$T_i = 16.7\ [°C]$ $\quad v_i = 38\ [cm/s]$
$T_f = 16\ [°C]$ $\quad v_f = 13\ [cm/s]$
$\Delta T\ = 0.7\ [°C]$

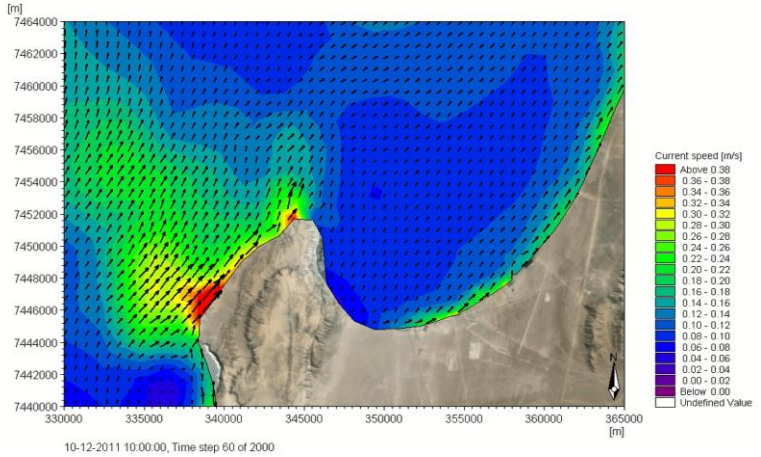
Perfil vertical de temperatura



TSM



Campo de velocidades



INGENIERÍA CIVIL
OCEÁNICA

RESULTADOS

Universidad de Valparaíso
CHILE

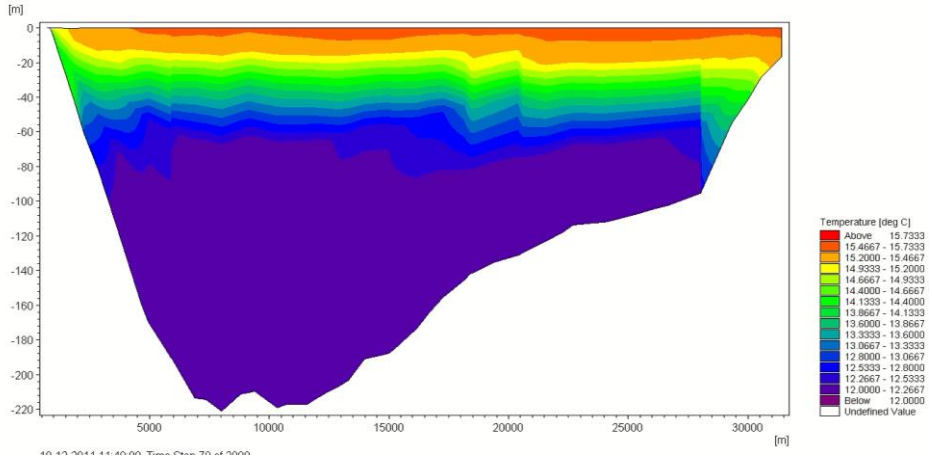
EXPLOTACIÓN DEL MODELO: BAHÍA

INVIERNO

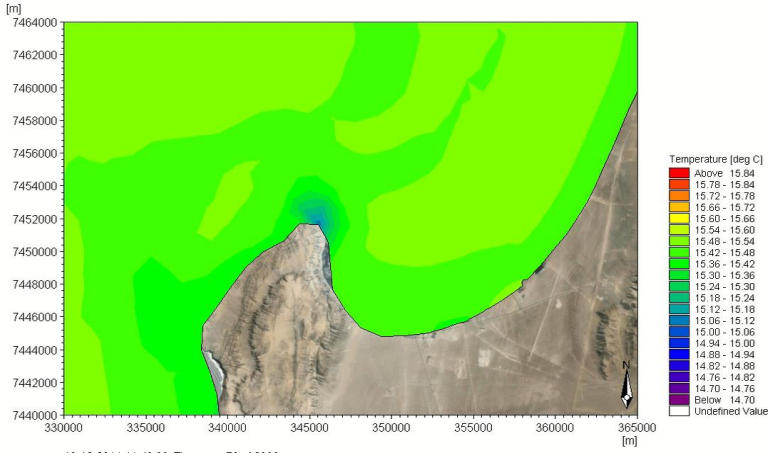
- Viento SW de 6 [m/s]
- Termoclina: 100 [m]

$t_i = 13.3\ [hr]$
$T_i = 15\ [°C]$ $\quad v_i = 30\ [cm/s]$
$T_f = 14.6\ [°C]$ $\quad v_f = 58\ [cm/s]$
$\Delta T = 1.6\ [°C]$

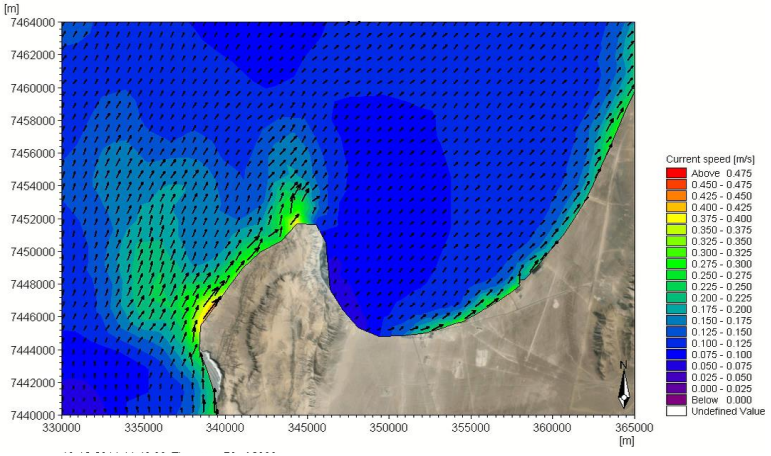
Perfil vertical de temperatura



TSM



Campo de velocidades



INGENIERÍA CIVIL
OCEÁNICA

RESULTADOS

Universidad de Valparaíso CHILE

EXPLOTACIÓN DEL MODELO: BAHÍA

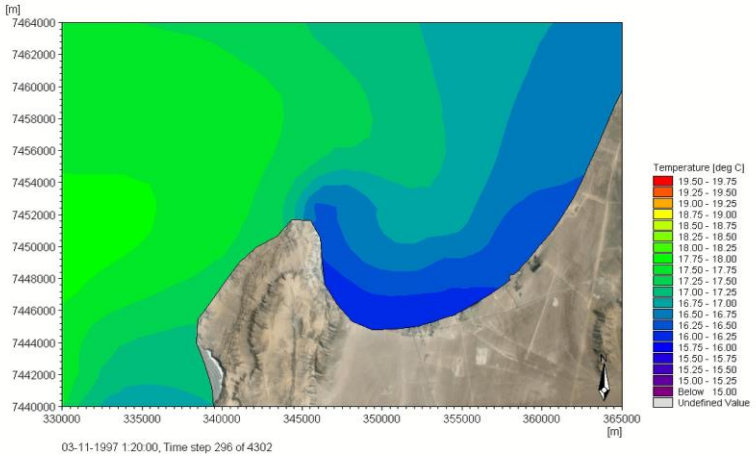
EL NIÑO 1997

$t_i \quad 13.30\ [hr]$
$T_{mean} = 16.90\ [°C]$
$T_{min} = 13.4\ [°C]$
$\Delta T \quad = 3.5\ \ [°C]$

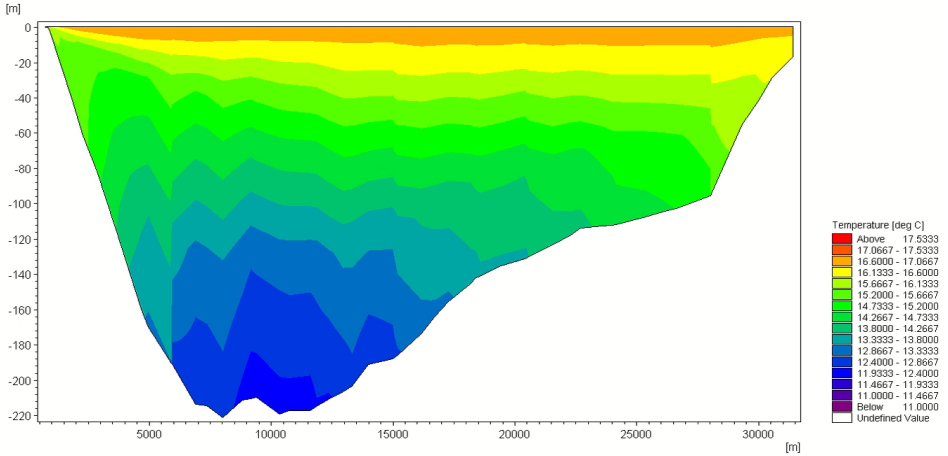
$v_i = 100.07\ [cm/s]$

$Termoclina_{14°C} = 60\ [m]$

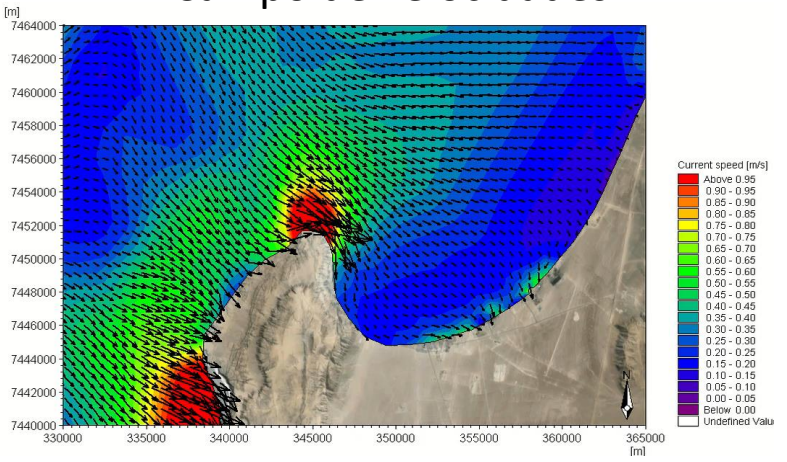
TSM



Perfil vertical de temperatura



Campo de velocidades



INGENIERÍA CIVIL
OCEÁNICA

RESULTADOS

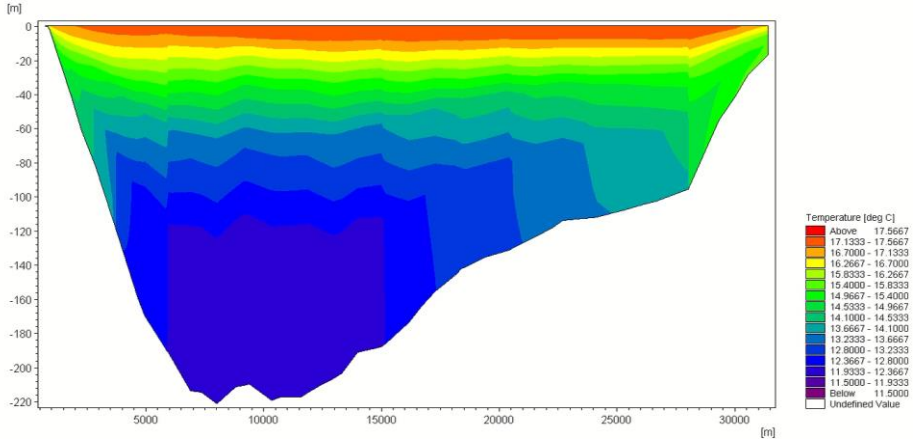
Universidad de Valparaíso CHILE

EXPLOTACIÓN DEL MODELO: BAHÍA

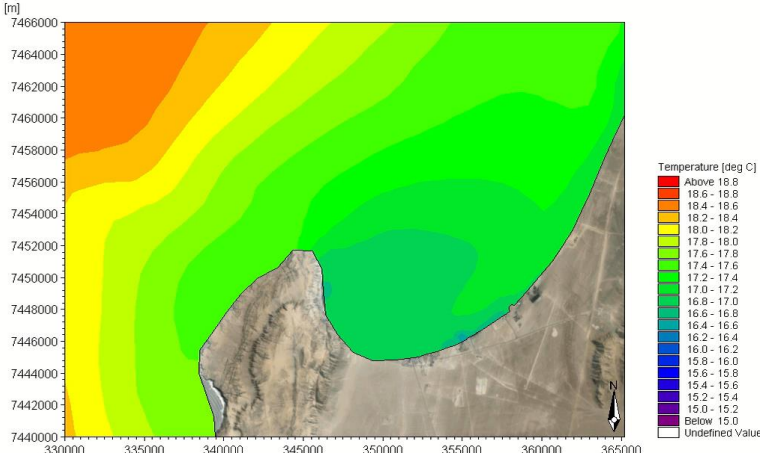
LA NIÑA 1998

$t_i = 13.00\ [hr]$
$T_{mean} = 17.20\ [°C]$ $\quad v_i = 37\ [cm/s]$
$T_{min} = 13.11\ [°C]$
$\Delta T = 4.1\ [°C]$
$Termoclina_{14°C} = 45\ [m]$

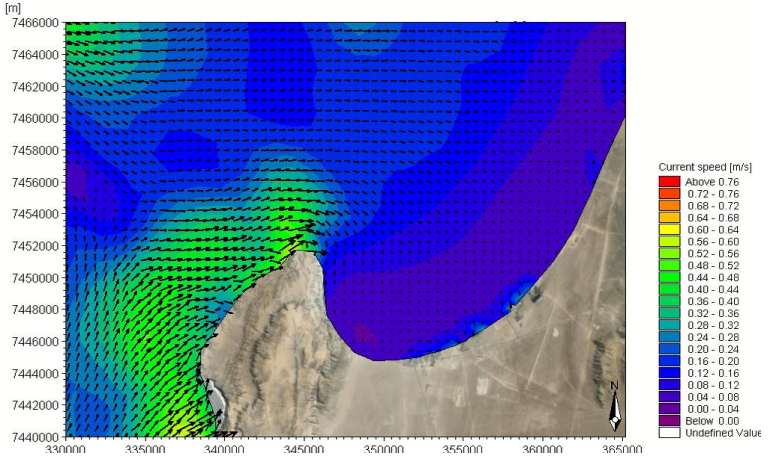
Perfil vertical de temperatura



TSM



Campo de velocidades



CONCLUSIONES

- Gran relevancia de las forzantes externas
- De acuerdo con el modelo hidrodinámico, la velocidad de la corriente fue subestimada en las capas inferiores, presentando un mejor comportamiento en la superficie. Esto fue asociado por una parte, a una menor representación de la difracción del oleaje al interior de la Bahía y por otra parte, a la transferencia de momentum desde el viento al océano
- Sin embargo, ambos modelos fueron capaces de representar los órdenes de magnitud de las variables del oleaje y las corrientes registradas por los ADCP's.
- Con respecto a los casos de Canal, la estimación de la pendiente de la surgencia presentó consistencia entre la teoría y modelación de C26
- Los modelos de El Niño y La Niña para noviembre de 1997 y 1998, respectivamente, validaron el comportamiento esperado para ambas fases; cambios en la proporción de masas de agua, intensidades del viento y la distribución de temperatura en la columna de agua.
- La velocidad de la corriente registró valores medios de 0.42 [m/s] y 0.62 [m/s] en la fase fría y cálida, respectivamente, valores que fueron contrastado con modelación hidrodinámica desarrollada por CEA (2019), indicando que en primavera y verano los rangos medios de corrientes fueron 0.25-0.5 [m/s] en la capa superficial.

GRACIAS POR SU ATENCIÓN