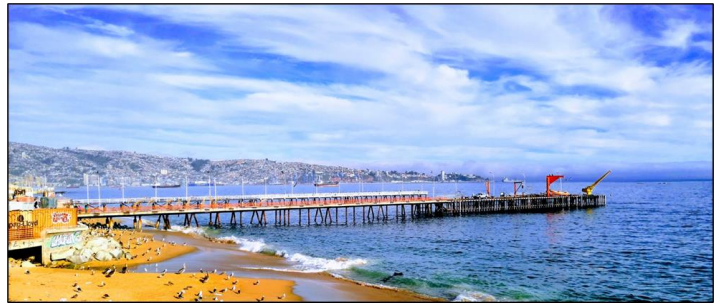
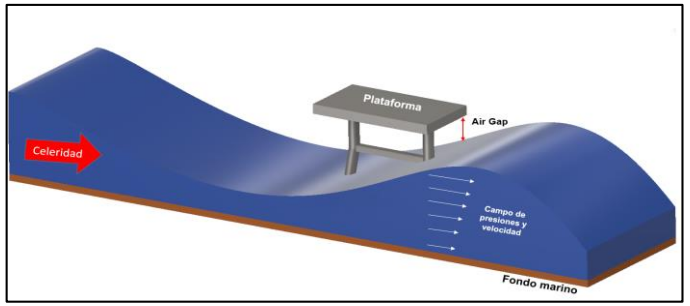
Universidad de Valparaíso
CHILE

INGENIERÍA CIVIL OCEÁNICA

Proyecto para optar al Titulo de Ingeniero Civil Oceánico

Metodología de cálculo para determinar la cota de inundación a lo largo de un muelle en penetración





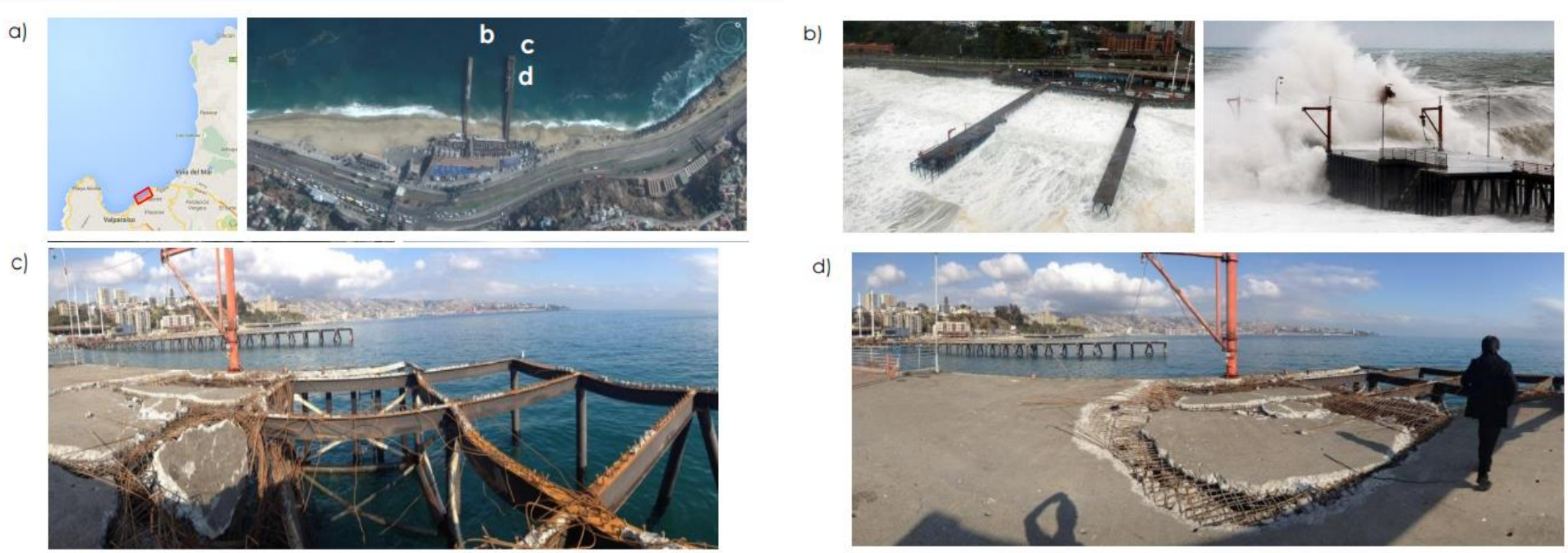
Jean Pierre Toledo Alvarado

Profesor Guía: Patricio Winckler
Comisión: Felipe Caselli
Francisco Molteni

Junio 2021

1. Introducción

- ✓ **La magnitud** de estos fenómenos pueden provocar cambios violentos en la costa, afectando vida e infraestructuras (Martínez et al., 2017).
- ✓ **Altura de ola significativa** en eventos extremos ha incrementado (1957 -2015) (Martínez et al., 2018).
- ✓ **La frecuencia** de eventos extremos ha incrementado (5 temporales el siglo pasado y 20 en el XXI) (Martínez et al., 2018).



Winckler et al 2017

INGENIERÍA CIVIL OCEÁNICA

1. Introducción

→ Daño estructural

→ Limite operacional / funcional

Falta de consenso en criterios de diseño

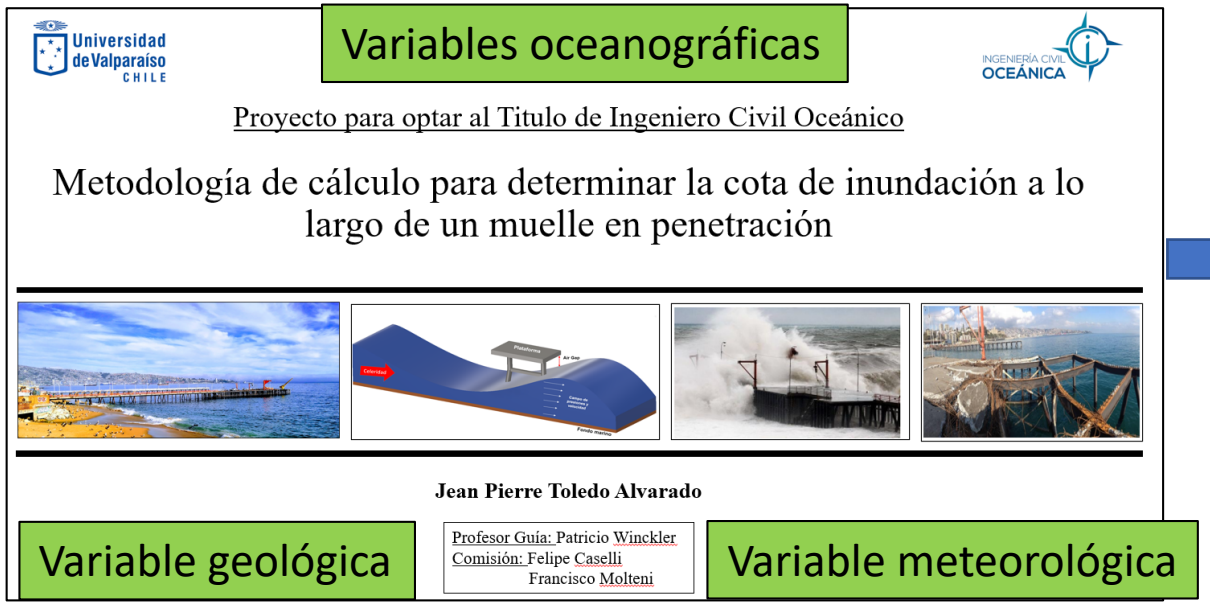
- Fenómeno ENOS
- Cambio climático
- Ondas largas
- Freaks waves

Patrones de viento y oleaje a escala regional

Bahías, Puertos, Playas y estuarios

Beyá et al. (2012)

1. Introducción



Zona sur extremo no presenta tendencia ni registros en daños costeros (campos-caba, 2016)

Aplica a costa abiertas predomina el oleaje y no corrientes

2. Objetivos

2.1 OBJETIVO GENERAL

✓ Proponer una metodología de cálculo para determinar la cota de inundación a lo largo de un muelle en penetración, ejemplificado con una aplicación en costas chilenas.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1) Analizar el efecto de cambio climático en el nivel medio del mar (NMM) y oleaje en costas chilenas, entre la región de Arica y Parinacota, y la región de los Ríos.

2) Analizar la subsidencia y solevantamiento en la costa respecto a los antecedentes históricos de sismos ocurridos en Chile, entre la región de Arica y Parinacota, y la región de los Ríos.

3) Efectuar un análisis de sensibilidad de la cota de inundación a lo largo de un muelle de penetración ante variaciones de altura, periodo y dirección del oleaje, marea astronómica, marea meteorológica y pendiente de playa.

4) Proponer criterios para calcular la cota de inundación a lo largo de un muelle en penetración.

INGENIERÍA CIVIL OCEÁNICA

3. Alcance y limitaciones

1

- ✓ Efectos de cambio climático
- ✓ Eventos sísmicos
- ✓ Ondas largas
- ✓ Oleaje
- ✓ Marea astronómica
- ✓ Marea meteorológica

2

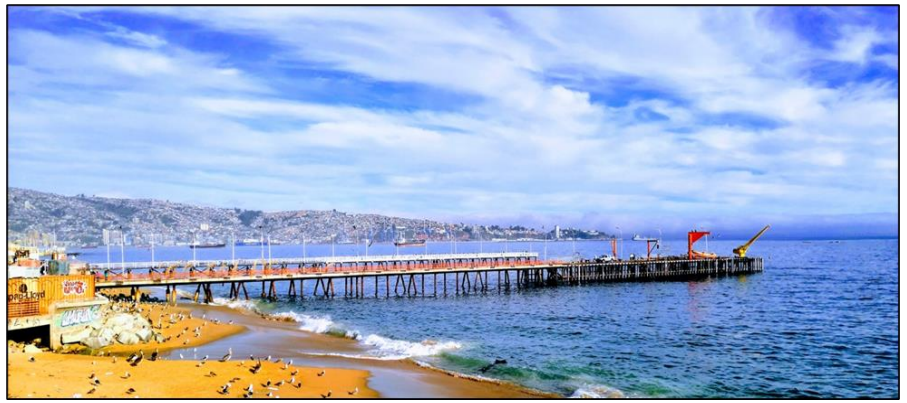
- ✓ Literatura existente
- ✓ **Xbeach**

3

- ✓ Atlas de oleaje (Beyá et al. 2016)
- ✓ GPS diferencial
- ✓ No contempla análisis estructural del muelle

4. Marco Teórico

- Muelle en penetración
- Cota de inundación
- Nivel medio del mar
- Marea astronómica
- Marea meteorológica
- Zona de rompiente
- Onda infragravedad
- Wave setup
- Modelos matemáticos de oleaje
- Modelo numérico Xbeach
- Fenómenos ENOS
- Movimientos verticales



Orientación → OLEAJE REINANTE

Estructura → OLEAJE DOMINANTE

NORMATIVAS

Norma Chilena	Nombre
12944	Pintura y barnices – Protección de estructuras de acero ante la corrosión.
3329	Acero – Barras láminas en caliente de acero con cromo para hormigón armado.
3417	Estructuras – Requisitos para el cálculo estructural.
432	Cargas de viento.
1537	Cargas permanentes y de uso.
2369	Diseño sísmico de estructuras
148	Cemento – Terminología, clasificación y especificaciones.
170	Hormigón – Requisitos generales.
204	Acero.
3348	Principios a la corrosión de hierro y acero con recubrimiento de zinc.
3171	Diseño estructural - Disposiciones generales y combinaciones de carga-

4. Marco Teórico

- Muelle en penetración
- Cota de inundación
- Nivel medio del mar
- Marea astronómica
- Marea meteorológica
- Zona de rompiente
- Onda infragravedad
- Wave setup
- Modelos matemáticos de oleaje
- Modelo numérico Xbeach
- Fenómenos ENOS
- Movimientos verticales

DISEÑO MUELLE

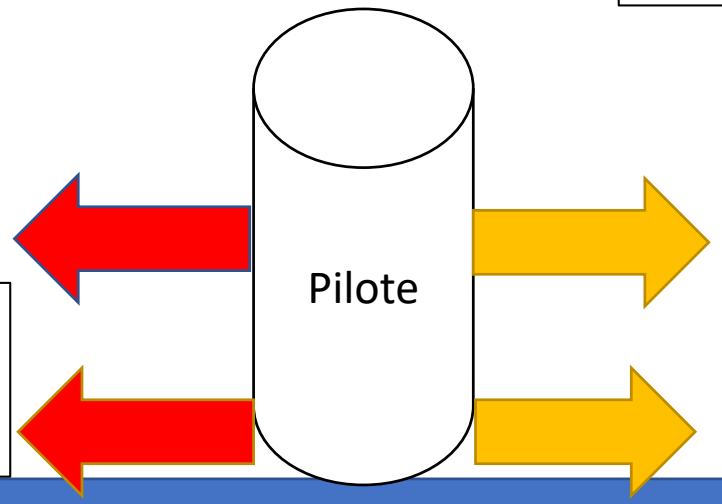
En un caso conservador, el periodo de retorno del evento debe exceder la vida útil de la estructura

La naturaleza estocástica del oleaje y nivel de agua, existe todavía el riesgo de que el evento de diseño elegido sea excedido (McConnell et al., 2004).

Cargas hidrodinámicas asociadas a un evento extremo o una secuencia de ellos

Criterio es variable porque depende directamente del riesgo que el diseñador, el cliente, el mandante o la compañía de seguros esté dispuesto asumir

Sitios expuestos



Reduce capacidad estructural

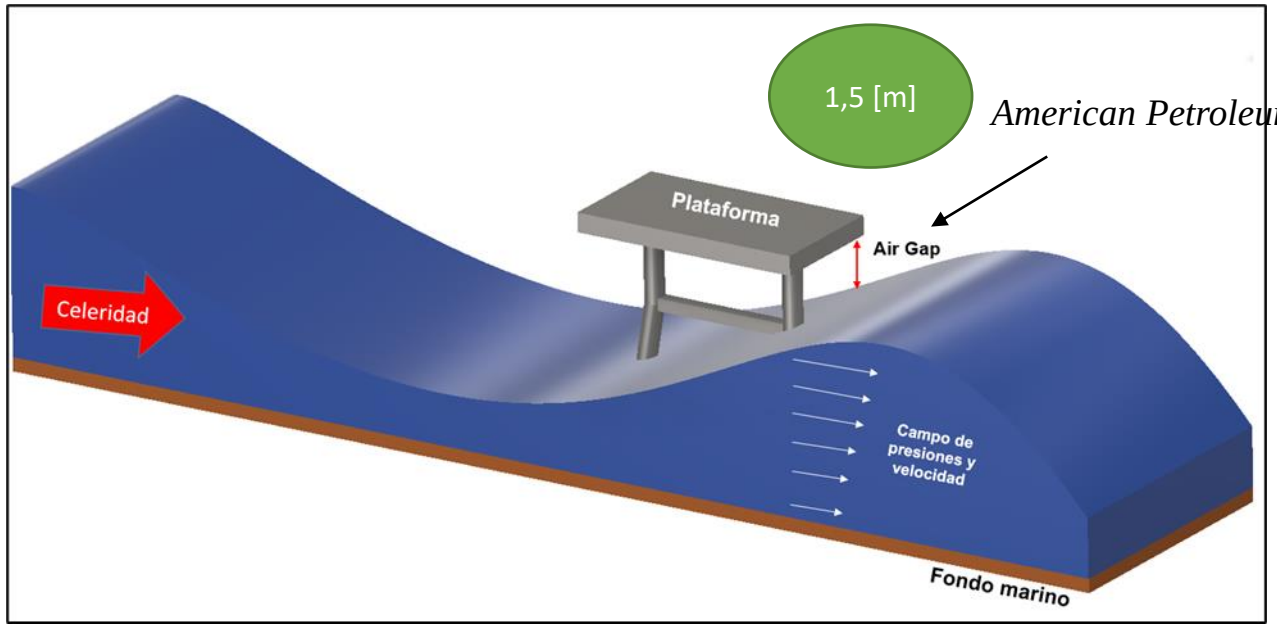
Reduce resistencia y rigidez lateral

Incrementa Carga por oleaje

Socavación

4. Marco Teórico

- Muelle en penetración
- Cota de inundación
- Nivel medio del mar
- Marea astronómica
- Marea meteorológica
- Zona de rompiente
- Onda infragravedad
- Wave setup
- Modelos matemáticos de oleaje
- Modelo numérico Xbeach
- Fenómenos ENOS
- Movimientos verticales



American Petroleum Institute

AIR GAP → Fuerza vertical u horizontal puede aumentar o disminuir al variar la distancia

Park et al., 2017

4. Marco Teórico

- Muelle en penetración
- Cota de inundación
- Nivel medio del mar
- Marea astronómica
- Marea meteorológica
- Zona de rompiente
- Onda infragravedad
- Wave setup
- Modelos matemáticos de oleaje
- Modelo numérico Xbeach
- Fenómenos ENOS
- Movimientos verticales

1901-2010 → 0,19 ± 0,02 [m]

80% expansión térmica
15% glaciares continentales

Proyecciones incremento NMM mundial

Escenario de emisión	Concentración de $C0_2$ (ppm)	NMM [m] 2046 - 2065	NMM [m] 2081- 2100
Bajo	421	0,24 [0,17 – 0,32]	0,44 [0,28 – 0,61]
Medio Bajo	578	0,26 [0,19 – 0,33]	0,53 [0,36 – 0,71]
Medio Alto	670	0,25 [0,18 – 0,32]	0,55 [0,38 – 0,73]
Alto	936	0,29 [0,22 – 0,38]	0,74 [0,52 – 0,98]

Contreras et al., (2012), últimos 60 años en Chile:

1. En Arica el NMM ha disminuido 82 [mm] en 58 años
2. En Antofagasta el NMM ha disminuido 55 [mm] en 63 años de registros
3. En caldera el NMM aumento de 69 [mm] en 58 años
4. En Valparaíso el NMM ha aumentado 6 [mm] en 58 años
5. En Talcahuano el NMM ha aumentado en torno a 88 [mm] en 59 años

4. Marco Teórico

- Muelle en penetración
- Cota de inundación
- **Nivel medio del mar**
- Marea astronómica
- Marea meteorológica
- Zona de rompiente
- Onda infragravedad
- Wave setup
- Modelos matemáticos de oleaje
- Modelo numérico Xbeach
- Fenómenos ENOS
- Movimientos verticales

Proyecciones NMM en Chile

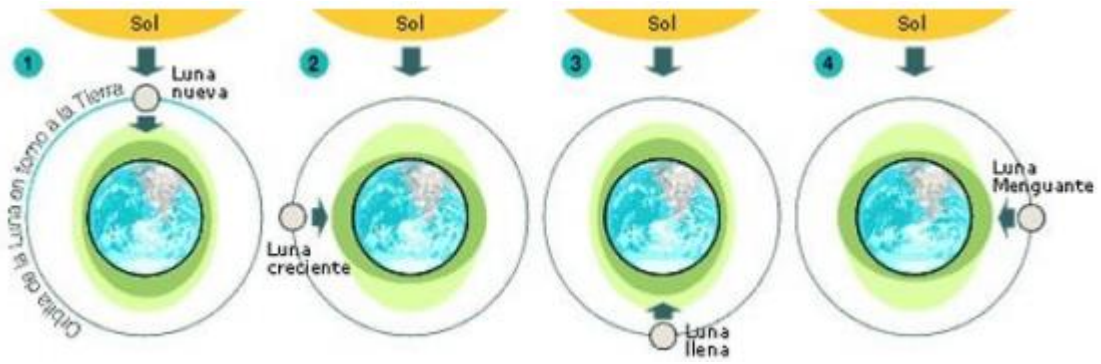
CEPAL (2011)
Magrin et al., 2014). → 0.2 – 0.3 [m]

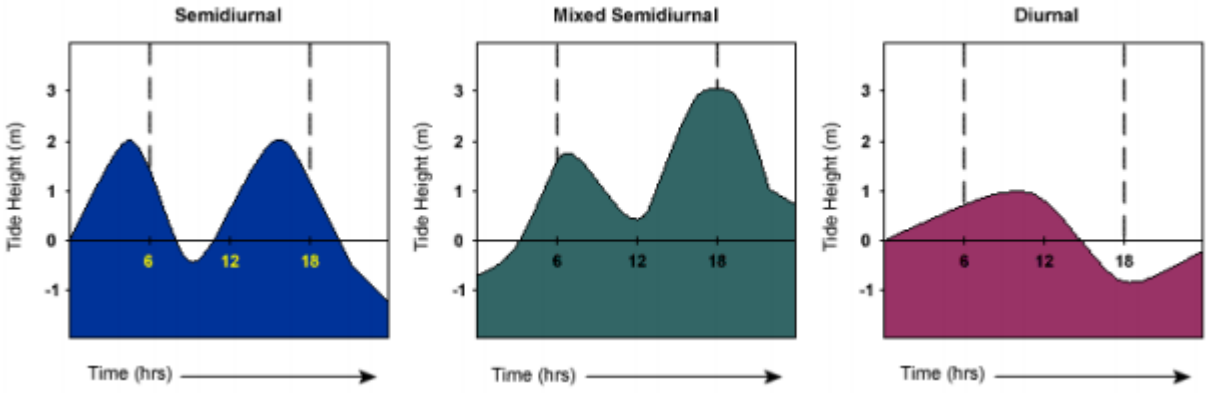
Albrecht y Shaffer (2016) → 0.34 – 0.52 [m] Escenario medio bajo

0.46 – 0.74 [m] Escenario alto

4. Marco Teórico

- Muelle en penetración
- Cota de inundación
- Nivel medio del mar
- **Marea astronómica**
- Marea meteorológica
- Zona de rompiente
- Onda infragravedad
- Wave setup
- Modelos matemáticos de oleaje
- Modelo numérico Xbeach
- Fenómenos ENOS
- Movimientos verticales





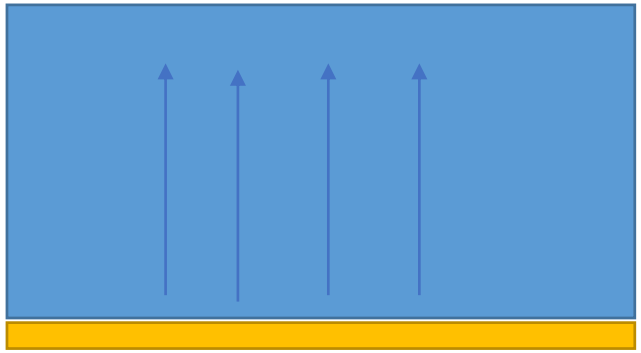
4. Marco Teórico

- Muelle en penetración
- Cota de inundación
- Nivel medio del mar
- Marea astronómica
- **Marea meteorológica**
- Zona de rompiente
- Onda infragravedad
- Wave setup
- Modelos matemáticos de oleaje
- Modelo numérico Xbeach
- Fenómenos ENOS
- Movimientos verticales

Eventos de oleaje extremo

Alta presión

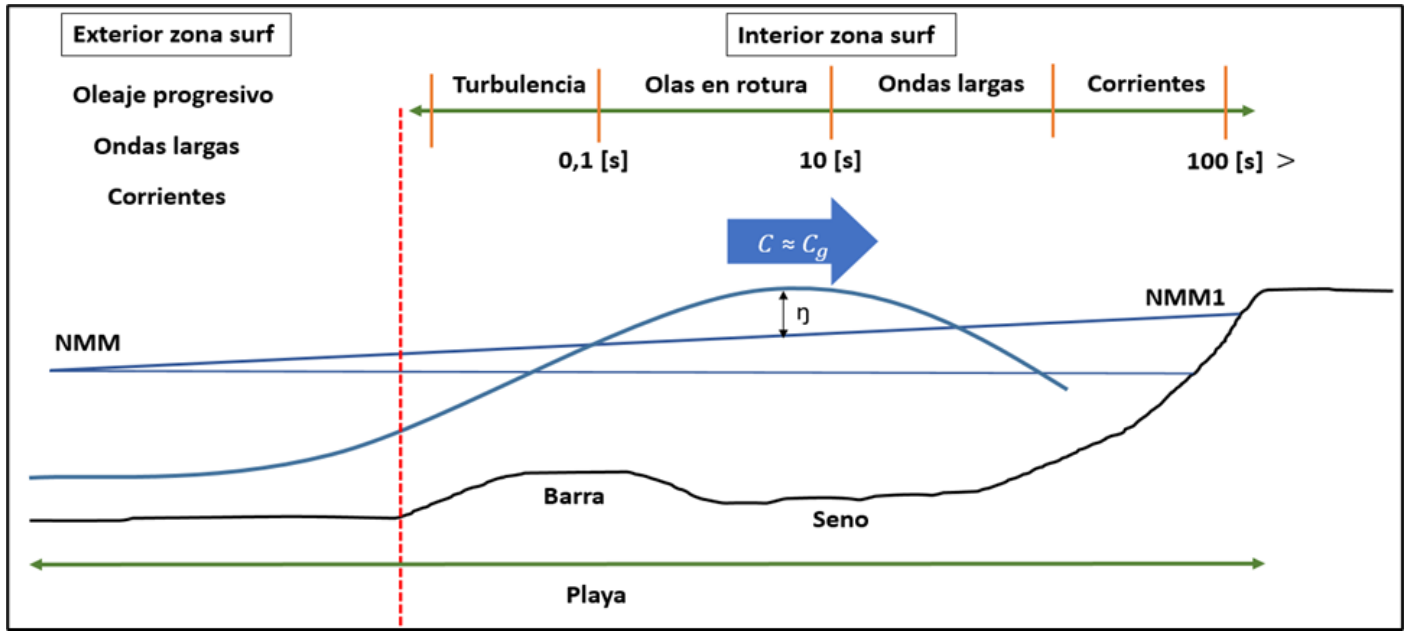
Baja presión – fuertes vientos



$$ZNM = ZMA + ZMM$$

4. Marco Teórico

- Muelle en penetración
- Cota de inundación
- Nivel medio del mar
- Marea astronómica
- Marea meteorológica
- **Zona de rompiente**
- Onda infragravedad
- Wave setup
- Modelos matemáticos de oleaje
- Modelo numérico Xbeach
- Fenómenos ENOS
- Movimientos verticales



Velocidad de las partículas ≥ Celeridad de la onda

Corrientes costeras, concentración transporte de sedimentos

4. Marco Teórico

$$I_r = \frac{\tan(\beta)}{\sqrt{\frac{H}{L}}},$$

INGENIERÍA CIVIL OCEÁNICA

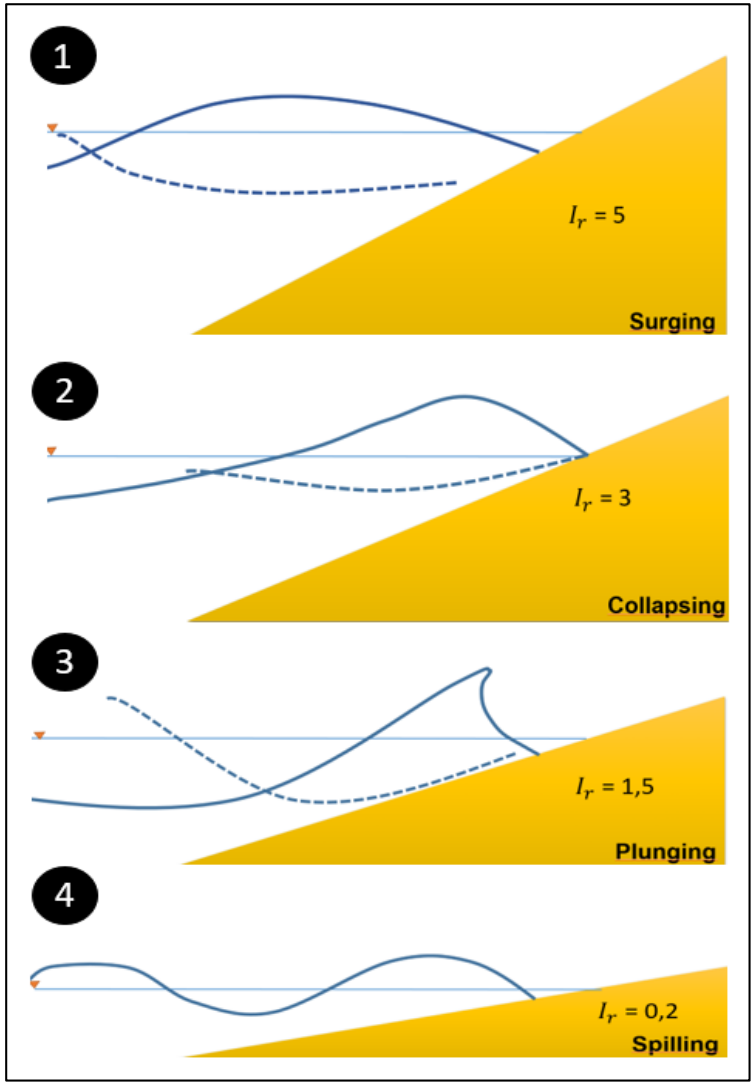
- Muelle en penetración
- Cota de inundación
- Nivel medio del mar
- Marea astronómica
- Marea meteorológica
- **Zona de rompiente**
- Onda infragravedad
- Wave setup
- Modelos matemáticos de oleaje
- Modelo numérico Xbeach
- Fenómenos ENOS
- Movimientos verticales

La ola no rompe completamente

Se desmorona, colapsa

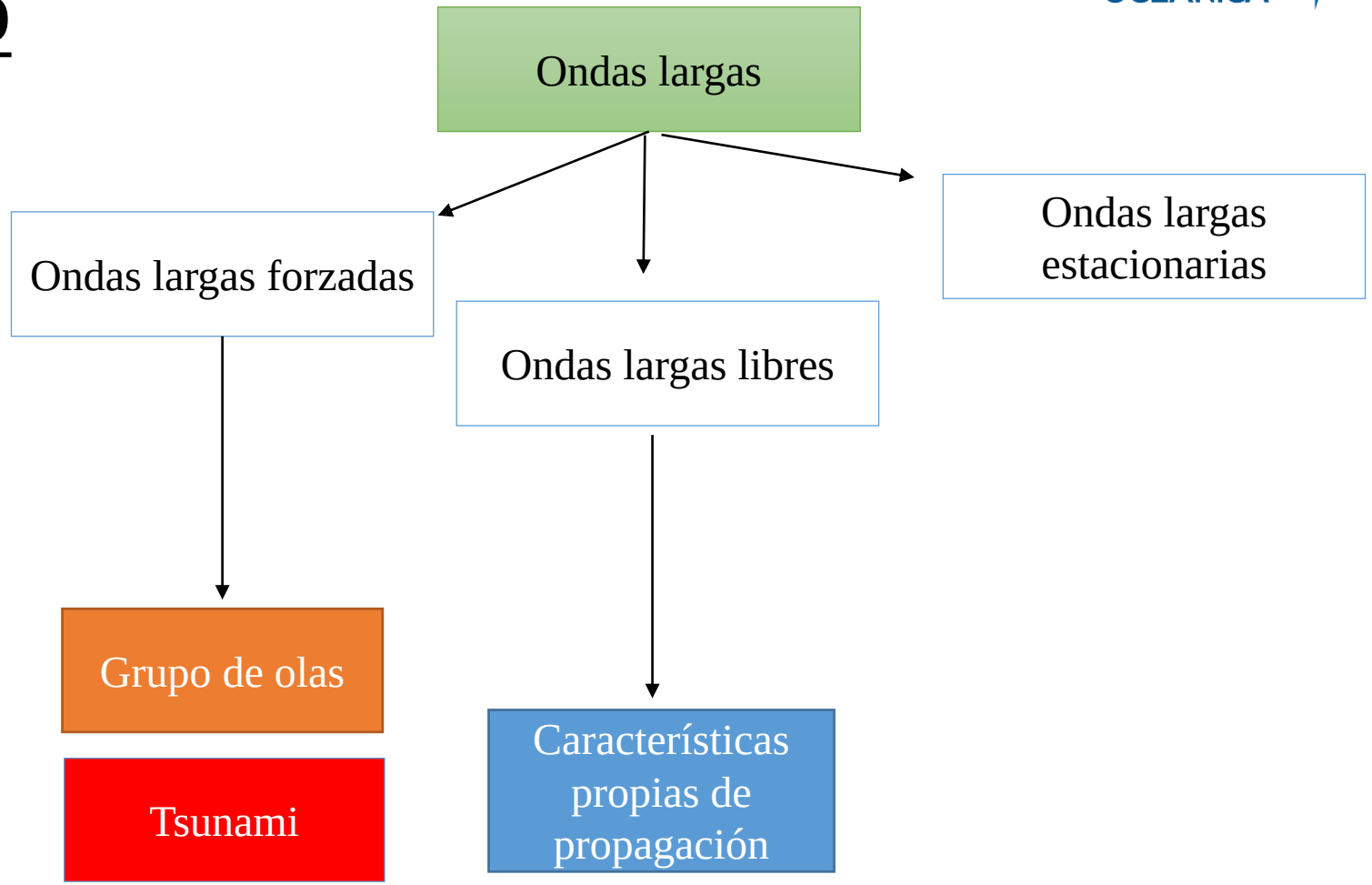
Frecuente en playas, ideal surfistas

Parte superior de la onda



4. Marco Teórico

- Muelle en penetración
- Cota de inundación
- Nivel medio del mar
- Marea astronómica
- Marea meteorológica
- Zona de rompiente
- **Onda infragravedad**
- Wave setup
- Modelos matemáticos de oleaje
- Modelo numérico Xbeach
- Fenómenos ENOS
- Movimientos verticales

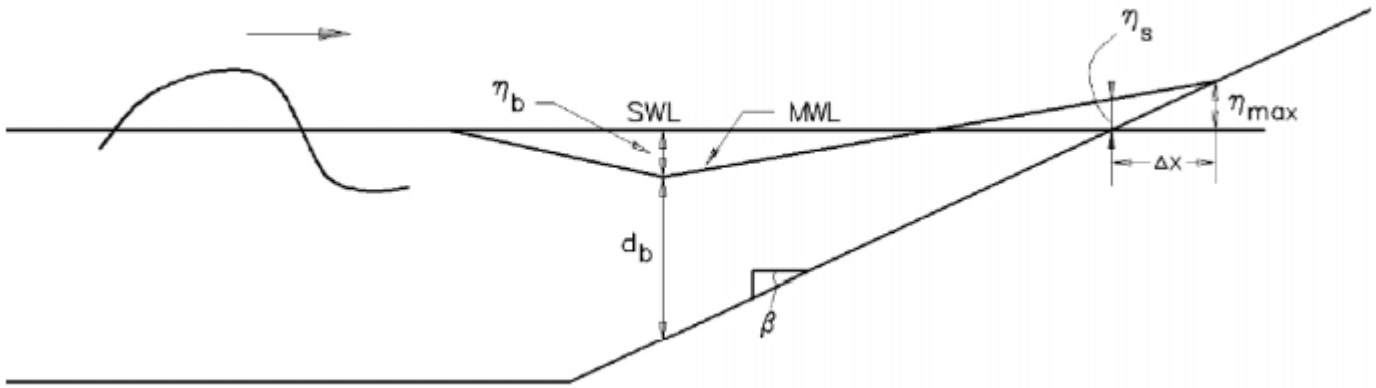


4. Marco Teórico

- Muelle en penetración
- Cota de inundación
- Nivel medio del mar
- Marea astronómica
- Marea meteorológica
- Zona de rompiente
- Onda infragravedad
- **Wave setup**
- Modelos matemáticos de oleaje
- Modelo numérico Xbeach
- Fenómenos ENOS
- Movimientos verticales

Playa plana

$$0 = -g(\tilde{\eta} + h)\frac{\partial \tilde{\eta}}{\partial x} + F_x,$$



- ✓ Subestimada en la costa (Raubenheimer et al., 2001)
- ✓ Guerin et al., 2018 determinaron que el *wave setup* lo largo de la costa aumenta con la pendiente de playa, en orden del 10-12% de la altura de ola rompiente

INGENIERÍA CIVIL OCEÁNICA

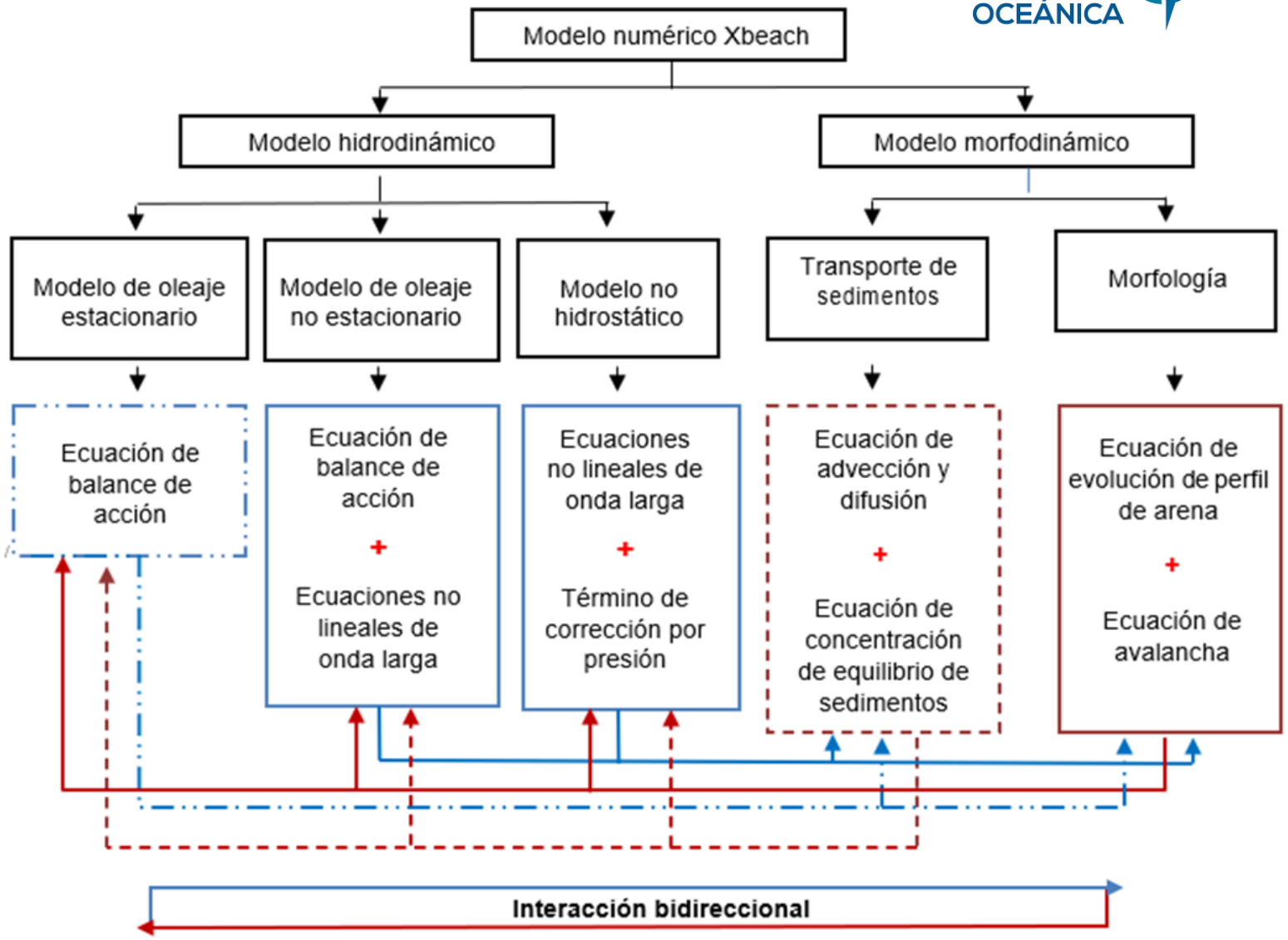
4. Marco Teórico

- Muelle en penetración
- Cota de inundación
- Nivel medio del mar
- Marea astronómica
- Marea meteorológica
- Zona de rompiente
- Onda infragravedad
- Wave setup
- **Modelos matemáticos de oleaje**
- Modelo numérico Xbeach
- Fenómenos ENOS
- Movimientos verticales

Característica	Modelos que promedian la fase	Modelos que resuelven la fase
Dimensiones	2D	2D
Incógnitas	Espectro de oleaje $E\,(r,t)$ $con\ r = (x,y)$	Desnivelación y velocidad media en la profundidad $\eta\,(r,t)$, $\bar{\mu}\,(r,t)\ y\ \bar{v}(r,t)$ $con\ r = (x,y)$
Intervalo de tiempo $\Delta t\ [s]$	O $(10^3 \sim 10^2)$	O $(10^1 \sim 10^{-1})$
Tamaño de la grilla $\Delta l\ [m]$	O $(10^2 \sim 10^0)$	O $(10^0 \sim 10^{-1})$
Tamaño del dominio [m]	O $(10^5 \sim 10^3)$	O $(10^3 \sim 10^2)$
Aplicación en oleaje	Generación y propagación en aguas profundas e intermedias	Propagación en aguas profundas (régimen de Stokes), intermedias y someras (régimen de onda larga)
Modelos numéricos	SWAN, WW3, STEWAVE	Xbeach

4. Marco Teórico

- Muelle en penetración
- Cota de inundación
- Nivel medio del mar
- Marea astronómica
- Marea meteorológica
- Zona de rompiente
- Onda infragravedad
- Wave setup
- Modelos matemáticos de oleaje
- **Modelo numérico Xbeach**
- Fenómenos ENOS
- Movimientos verticales



4. Marco Teórico

- Muelle en penetración
- Cota de inundación
- Nivel medio del mar
- Marea astronómica
- Marea meteorológica
- Zona de rompiente
- Onda infragravedad
- Wave setup
- Modelos matemáticos de oleaje
- Modelo numérico Xbeach
- Fenómenos ENOS
- Movimientos verticales

MODULO HIDRODINAMICO

INGENIERÍA CIVIL OCEÁNICA

Ecuación balance de acción

$$A\,(x,y,t,\theta) = \frac{S_w(x,y,t,\theta)}{\sigma(x,y,t)}$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial C_x A}{\partial x} + \frac{\partial C_y A}{\partial y} + \frac{\partial C_\theta A}{\partial \theta} = \frac{D_w + D_f}{\sigma}$$

Rompiente Baldock

$$D_w = \frac{1}{4}\alpha Q_b \rho g f_{rep}\left(H_b^2 + H_{rms}^2\right)$$

$$Q_b = exp\left[-\left(\frac{H_b^2}{H_{rms}^2}\right)\right]$$

Estacionario

$$\frac{\partial u^L}{\partial t} + u^L\frac{\partial u^L}{\partial x} + v^L\frac{\partial u^L}{\partial y} - fv^L - v_h\left(\frac{\partial^2 u^L}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u^L}{\partial y^2}\right) = \frac{\tau_{sx}}{\rho h} - \frac{\tau_{bx}^E}{\rho h} - g\frac{\partial n}{\partial x} + \frac{F_x}{\rho h} + \frac{F_{v,x}}{\rho h}$$

$$\frac{\partial v^L}{\partial t} + u^L\frac{\partial v^L}{\partial x} + v^L\frac{\partial v^L}{\partial y} - fu^L - v_h\left(\frac{\partial^2 v^L}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v^L}{\partial y^2}\right) = \frac{\tau_{sy}}{\rho h} - \frac{\tau_{by}^E}{\rho h} - g\frac{\partial n}{\partial y} + \frac{F_y}{\rho h} + \frac{F_{v,y}}{\rho h}$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \frac{\partial hu^L}{\partial x} + \frac{\partial hv^L}{\partial y} = 0$$

NO Estacionario

4. Marco Teórico

- Muelle en penetración
- Cota de inundación
- Nivel medio del mar
- Marea astronómica
- Marea meteorológica
- Zona de rompiente
- Onda infragravedad
- Wave setup
- Modelos matemáticos de oleaje
- **Modelo numérico Xbeach**
- Fenómenos ENOS
- Movimientos verticales

MODULO HIDRODINAMICO

Modelo no estacionario

Rompiente Roelvink1

$$D_w = 2\frac{\alpha}{T_{rep}} Q_b E_w$$

$$Q_b = 1 - exp\left(-\left(\frac{H_{rms}}{H_{max}}\right)^n\right)$$

Rompiente Roelvink2

$$D_w = 2\frac{\alpha}{T_{rep}} Q_b E_w \frac{H_{rms}}{h}$$

$$Q_b = 1 - exp\left(-\left(\frac{H_{rms}}{Hmax}\right)^n\right)$$

Roelvink_daly

$$D_w = 2\frac{\alpha}{T_{rep}} Q_b E_w \frac{H_{rms}}{h}$$

$$\begin{cases} Q_n = 1 \; si \; H_{rms} > \gamma h \\ Q_b = 0 \; si \; H_{rms} < \gamma_2 h \end{cases}$$

MODULO MORFODINÁMICO

Modelo de transporte de sedimentos

$$\frac{\partial hC}{\partial t} + \frac{\partial hC(u^E + u_A sin\theta)}{\partial x} + \frac{\partial hC(v^E + u_A cos\theta)}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}\left(D_h h \frac{\partial C}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(D_h h \frac{\partial C}{\partial y}\right) = \frac{hC_{eq} - hC}{T_s}$$

$$T_s = \max\left(f_{Ts}\frac{h}{\omega_s}, T_s, min\right)$$

4. Marco Teórico

- Muelle en penetración
- Cota de inundación
- Nivel medio del mar
- Marea astronómica
- Marea meteorológica
- Zona de rompiente
- Onda infragravedad
- Wave setup
- Modelos matemáticos de oleaje
- Modelo numérico Xbeach
- Fenómenos ENOS
- Movimientos verticales

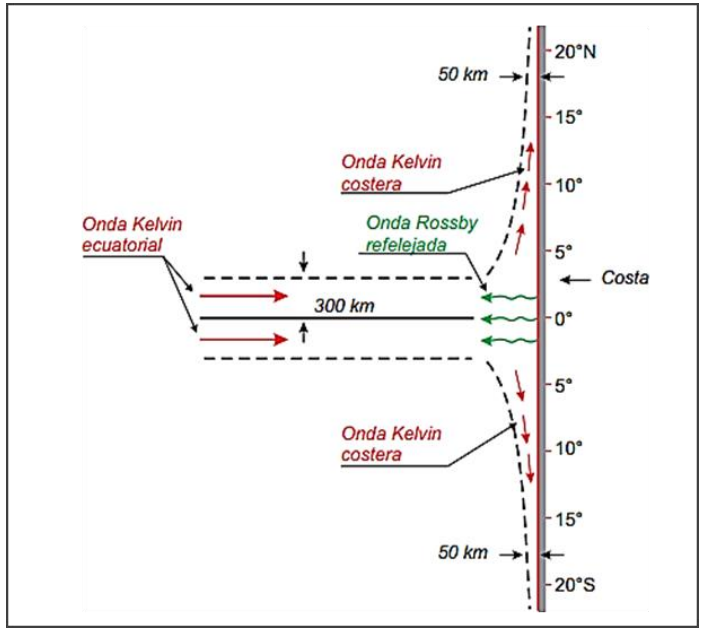
MODULO MORFODINÁMICO

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = -\frac{fmor}{(1-pr)}\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y}\right)$$

Gradiente positivo : erosión
Gradiente negativo: acreción

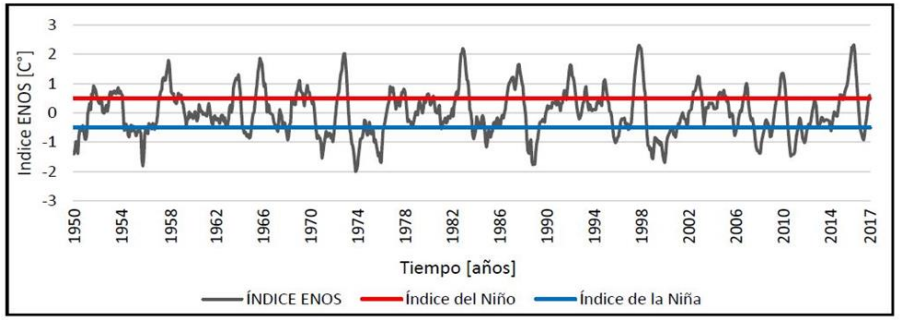
4. Marco Teórico

- Muelle en penetración
- Cota de inundación
- Nivel medio del mar
- Marea astronómica
- Marea meteorológica
- Zona de rompiente
- Onda infragravedad
- Wave setup
- Modelos matemáticos de oleaje
- Modelo numérico Xbeach
- **Fenómenos ENOS**
- Movimientos verticales



Molina (2011)

Fenómeno	Hs [m]	Tp [s]	Dp [º]
Calentamiento global	↑	↑	↓
Niño	↑	↑	↑
Niña	↑	↓	↓



ONDAS KELVIN
1982 /83 y 1997/98

30 [cm]

Winckler et al., 2015

1985-2006

4. Marco Teórico

17 hundimientos
23 Solevantamientos

- Muelle en penetración
- Cota de inundación
- Nivel medio del mar
- Marea astronómica
- Marea meteorológica
- Zona de rompiente
- Onda infragravedad
- Wave setup
- Modelos matemáticos de oleaje
- Modelo numérico Xbeach
- Fenómenos ENOS
- **Movimientos verticales**

Localidad	Coordenadas	Distancia normal a la losa [km]	Alzamiento cosísmico [m]
Valparaíso	33.03 / 71.57	110	-0.15
Cartagena	33.55 / 71.6	128	-0.35 ± 0.05
Navidad	33.55 / 71.6	116	No perceptible
Topocalma	34.13 / 71.99	117	No perceptible
Pichilemu	34.38 / 72.01	120	-0.35 ± 0.05
Bucalemu	34.64 / 72.04	125	-1 ± 0.2
Lago Vichunquén	34.79 / 72.06	132	-0.35 ± 0.05
Desembocadura rio Mataquito	35 / 72.18	132	-0.6 ± 0.1
La trinchera	35.11 / 72.21	136	-0.5 ± 0.1
Constitución	35.33 / 72.41	124	-0.4 ± 0.1
Desembocadura Rio Itata	36.39 / 72.87	130	-0.3 ± 0.1
Dichato	36.55 / 72.94	132	No perceptible
Nipas	36.6 / 72.54	166	-1 ± 0.2
Cocholgue	36.6 / 72.98	130	0.2 ± 0.1
Tomé	36.93 / 72.96	134	No perceptible
Caleta Tumbes	36.64 / 73.09	123	0.6 ± 0.1
Talcahuano	36.72 / 73.21	125	0.5 ± 0.1
Caleta Chome	36.77 / 73.21	120	0.7 ± 0.1
Desembocadura rio Biobío	36.81 / 73.17	125	0.5 ± 0.1
Observatorio Geodésico TIGO (Concepción)	36.84 / 73.02	102	2 ± 0.2
Isla Santa María, Puerto Norte	36.97 / 73.52	102	2 ± 0.2
Maule (Coronel)	37 / 73.19	131	0.6 ± 0.1

Localidad	Coordenadas	Distancia normal a la losa [km]	Alzamiento cosísmico [m]
Isla Santa María Puerto Sur	37.04 / 73.51	102	1.8 ± 0.2
Playa Blanca Coronel	37.06 / 73.14	133	0.5 ± 0.1
Punta Lavapié	37.15 / 73.58	96	1.9 ± 0.2
Playa Chivilingo	37.15 / 73.18	129	0.4 ± 0.1
Playa Laraquete	37.16 / 73.19	128	0.5 ± 0.1
Santa Juana	37.17 / 72.93	160	-0.2 ± 0.5
Tanahuillín	37.2 / 72.86	167	-0.4 ± 0.1
Llico	37.19 / 73.56	97	1.9 ± 0.2
Salto del Laja	37.22 / 72.38	203	-0.4 ± 0.1
Laja	37.27 / 72.72	173	-0.5 ± 0.2
Tubul	37.23 / 73.44	111	1.4 ± 0.1
Caleta Piures	37.23 / 73.65	91	2.5 ± 0.11
Tucapel	37.3 / 71.97	240	-0.3 ± 0.1
Lebu	37.59 / 73.64	100	2 ± 0.2
Punta Morhuilla	37.72 / 73.66	100	2.2 ± 0.2
Lago Lanalhe sector La Vaina	37.9 / 73.35	123	0.1 ± 0.05
Lago Lanalhue camping Chanchan	37.93 / 73.26	138	-0.4 ± 0.1
Lago Lleulleu sector Huilinco	38.1 / 73.28	133	-1.2 ± 0.1
Lago Lleulleu Sector Puerto	38.11 / 73.29	123	0.1 ± 0.1
Playa Quidico	38.23 / 73.47	120	0.3 ± 0.05
Isla Mocha, muelle nuevo	38.33 / 73.92	82	0,25 ± 0.05
Tirua	38.34 / 73.49	114	0.6 ± 0.2

Quezada et al., 2010

4. Marco Teórico

- Muelle en penetración
- Cota de inundación
- Nivel medio del mar
- Marea astronómica
- Marea meteorológica
- Zona de rompiente
- Onda infragravedad
- Wave setup
- Modelos matemáticos de oleaje
- Modelo numérico Xbeach
- Fenómenos ENOS
- **Movimientos verticales**

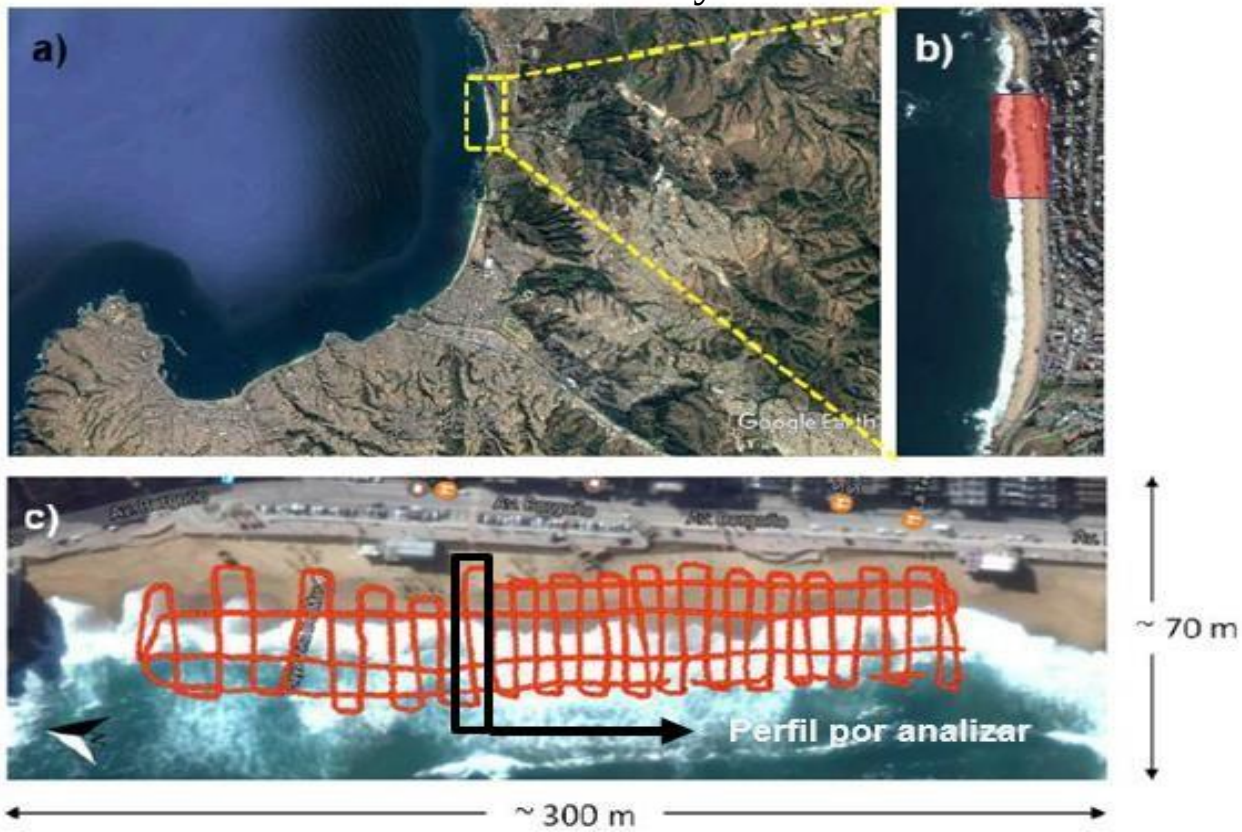
1/3 de longitud del muelle Llico

5. Metodología

5.1 FUENTES DE INFORMACIÓN

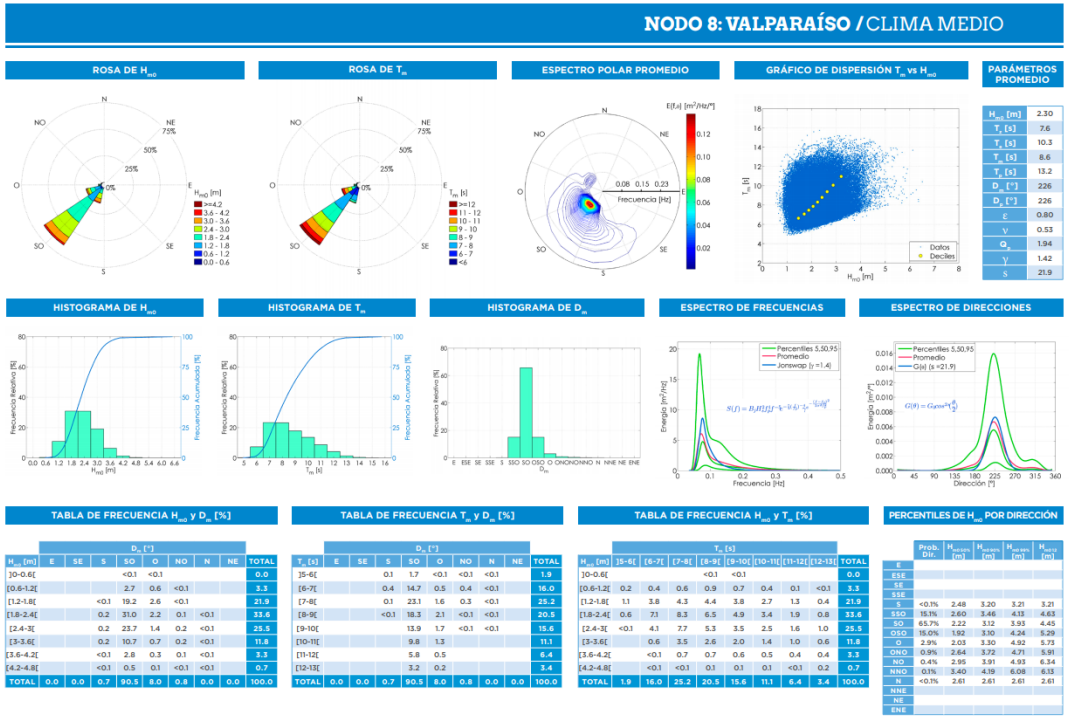
Datos de perfiles batimétricos de playa Reñaca, Viña del Mar, Chile.

coordenadas 262.065 E y 6.349.405 N

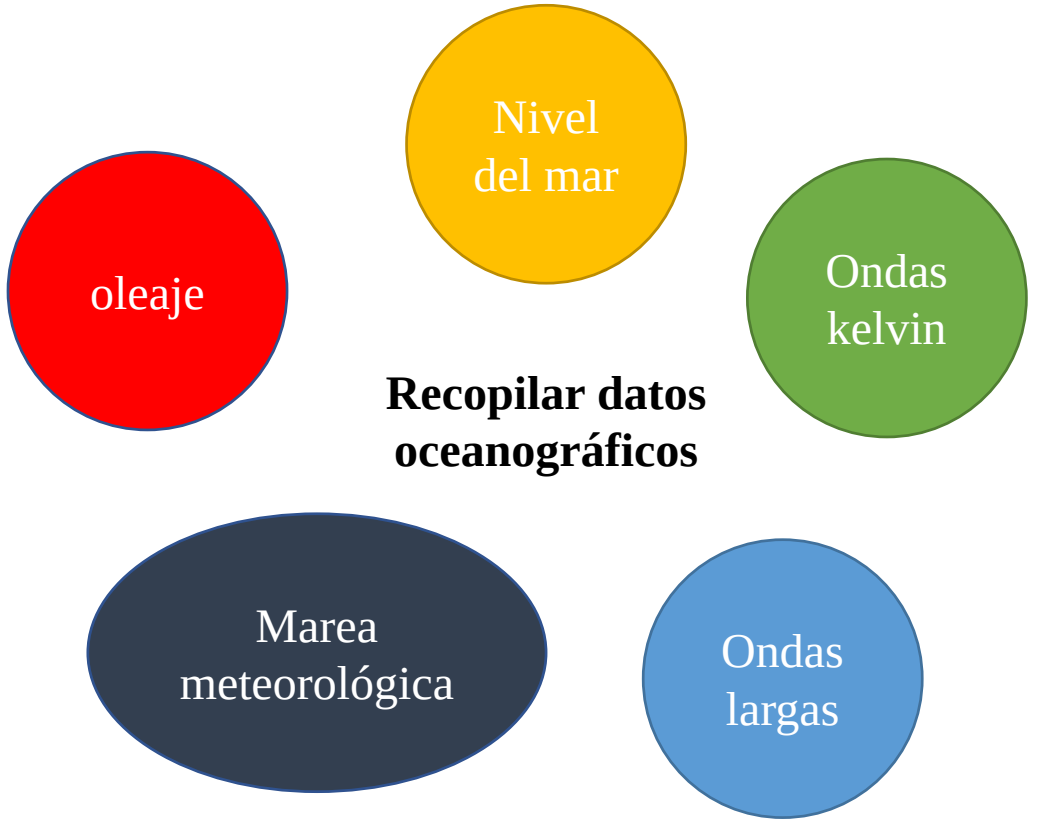


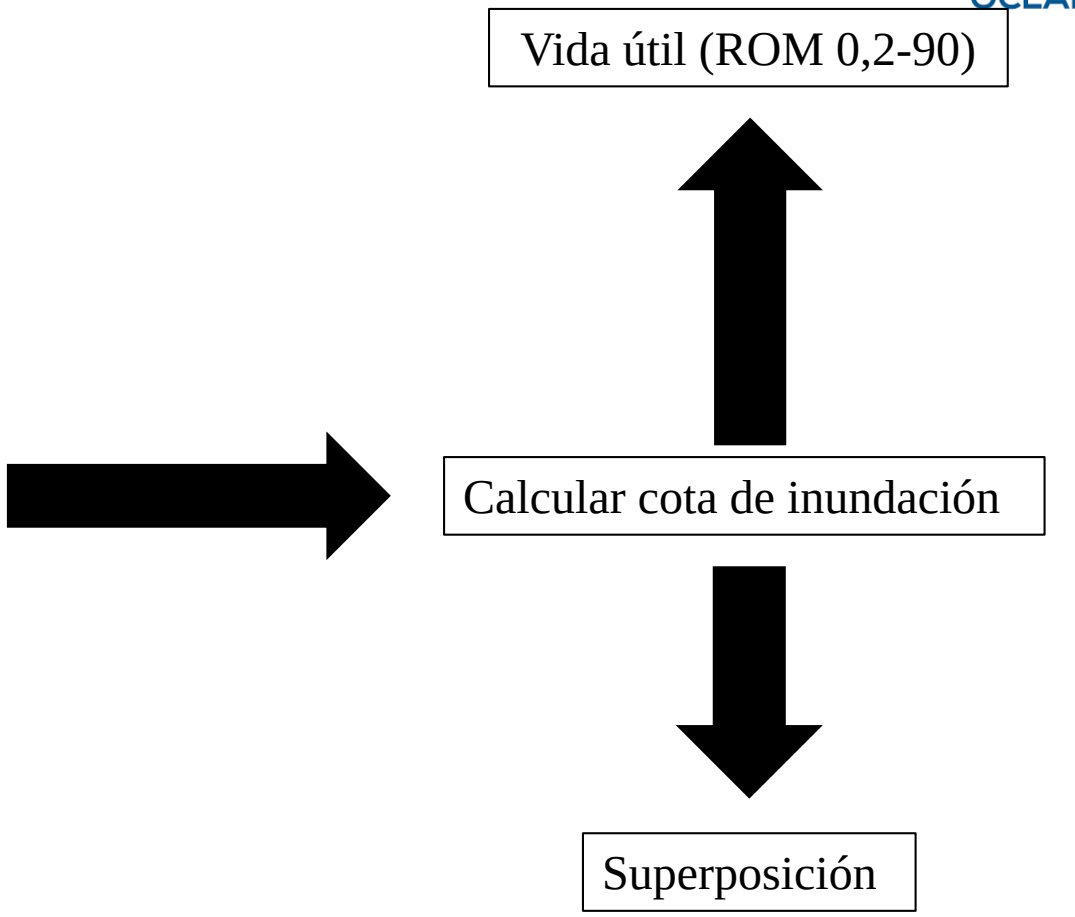
Agredano et al., 2015

Atlas de oleaje



5. Metodología OE1





$$C_i = NMM + O.I + \eta \ \ [m\ NRS]$$

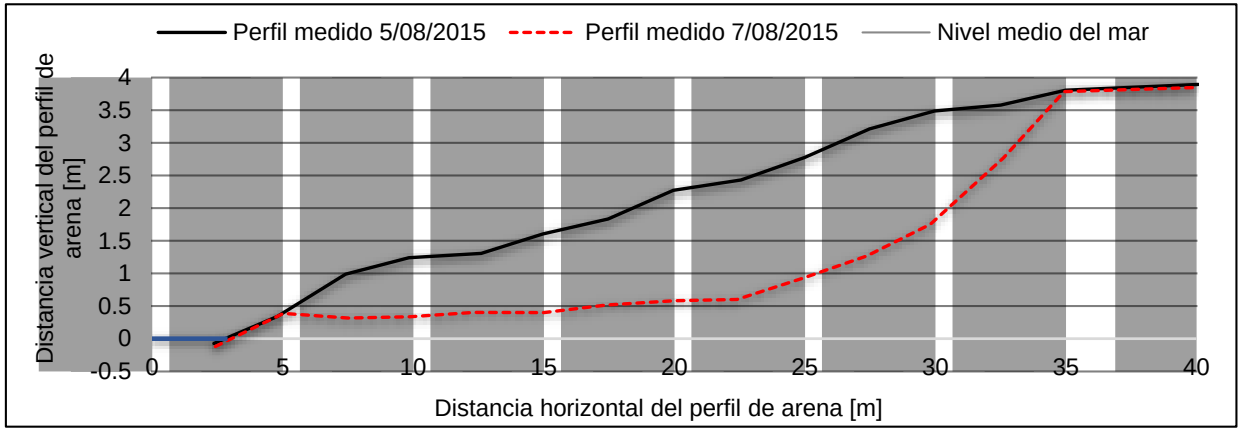
5. Metodología OE2

Identificar rango de cambios morfológicos → Establecer escenario conservador y no conservador → Incorporación Cálculo cota de inundación

5. Metodología OE3

Calibración del modelo

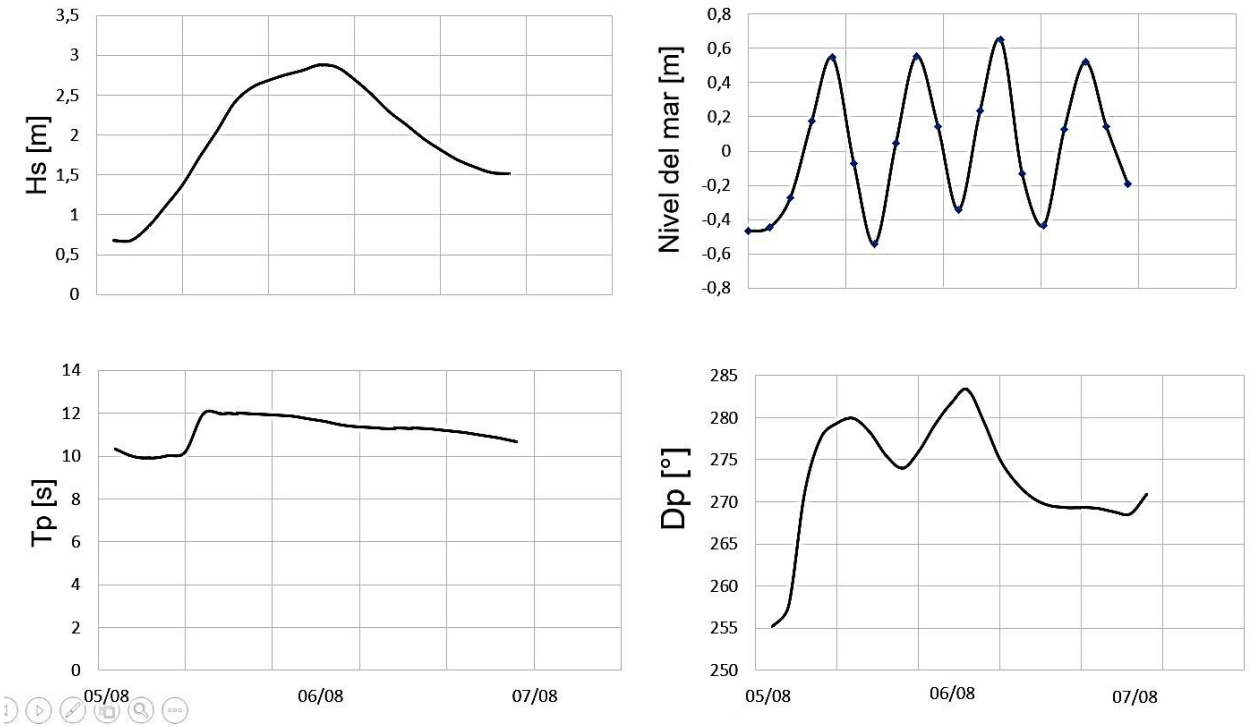
$$\forall_e = \int_0^{z_{NMM,f}} z dx - \int_0^{z_{NMM,i}} z dx$$



40,84 $(m3/m)$

5. Metodología OE3

Datos de salida SWAN a 20 [m] de profundidad



Datos de entrada Xbeach

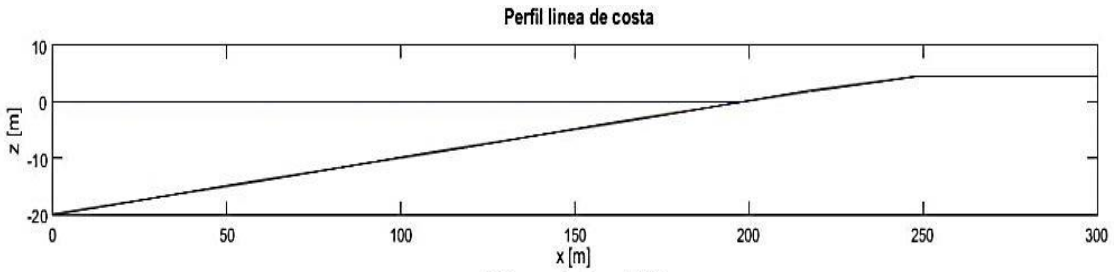
www.ioc-sealevelmonitoring.org

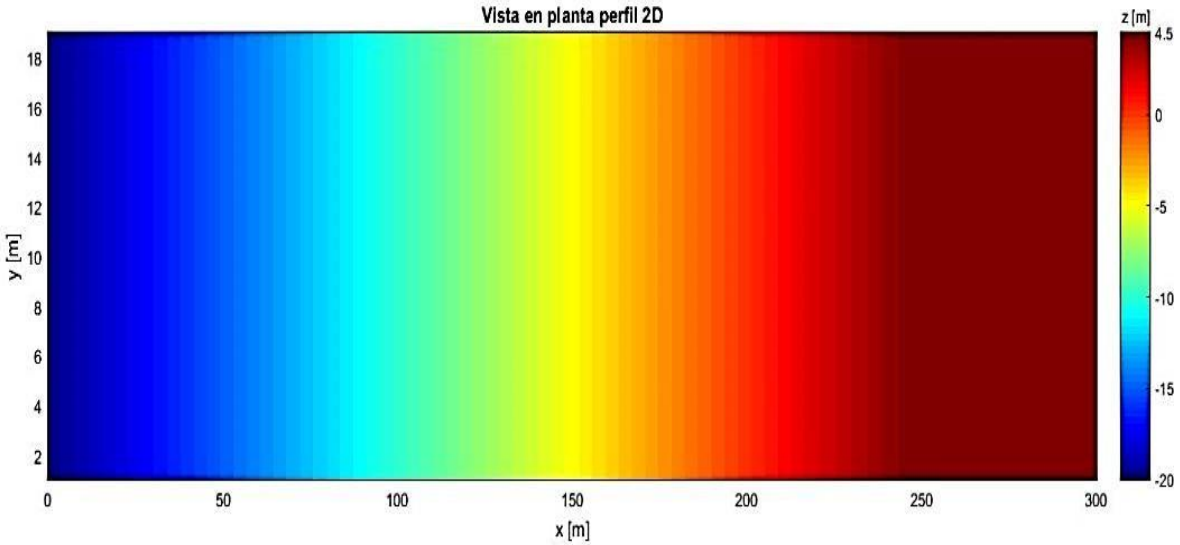
INGENIERÍA CIVIL OCEÁNICA

5. Metodología OE3

Análisis de sensibilidad

$$\partial\forall_e = \frac{\partial\forall_e}{\partial H_s}\partial H_s + \frac{\partial\forall_e}{\partial T_p}\partial T_p + \frac{\partial\forall_e}{\partial\theta}\partial\theta + \frac{\partial\forall_e}{\partial Z_a}Z_a + \frac{\partial\forall_e}{\partial Z_m}Z_m + \frac{\partial\forall_e}{\partial C_{NMM}}\partial C_{NMM} + \frac{\partial\forall_e}{\partial PP}\partial PP$$

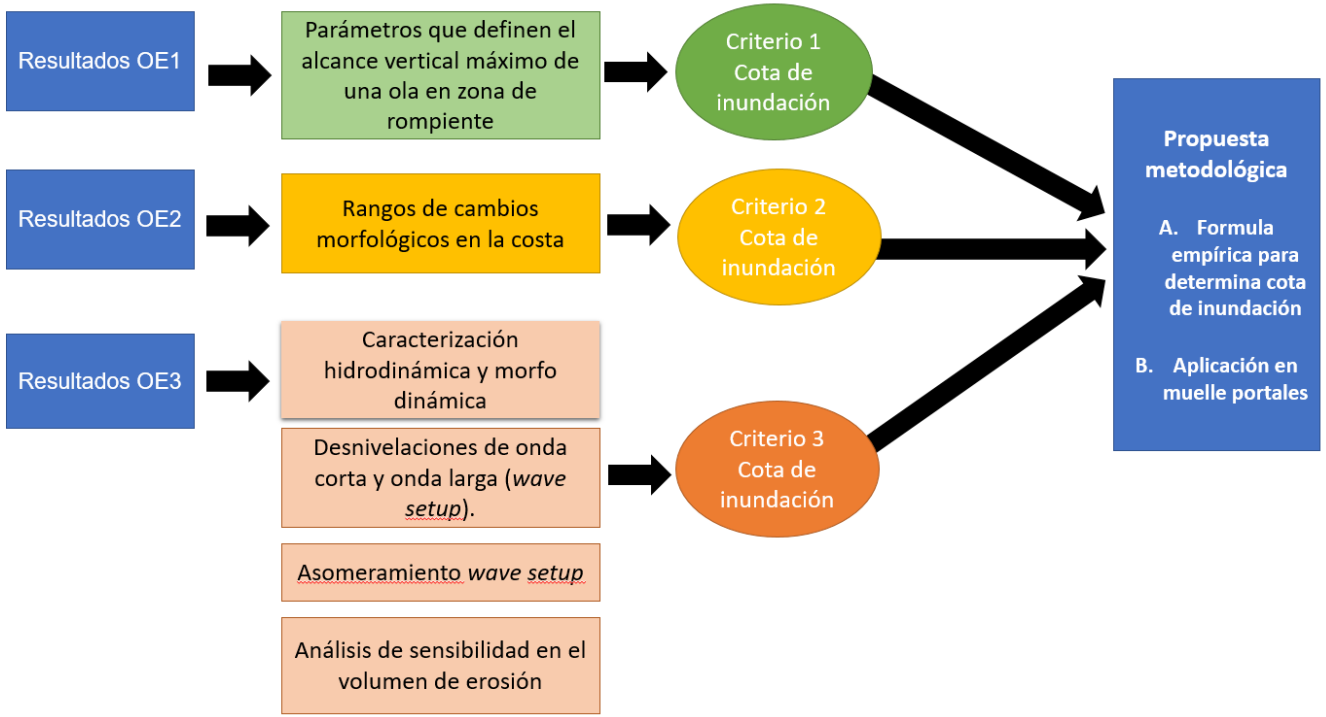


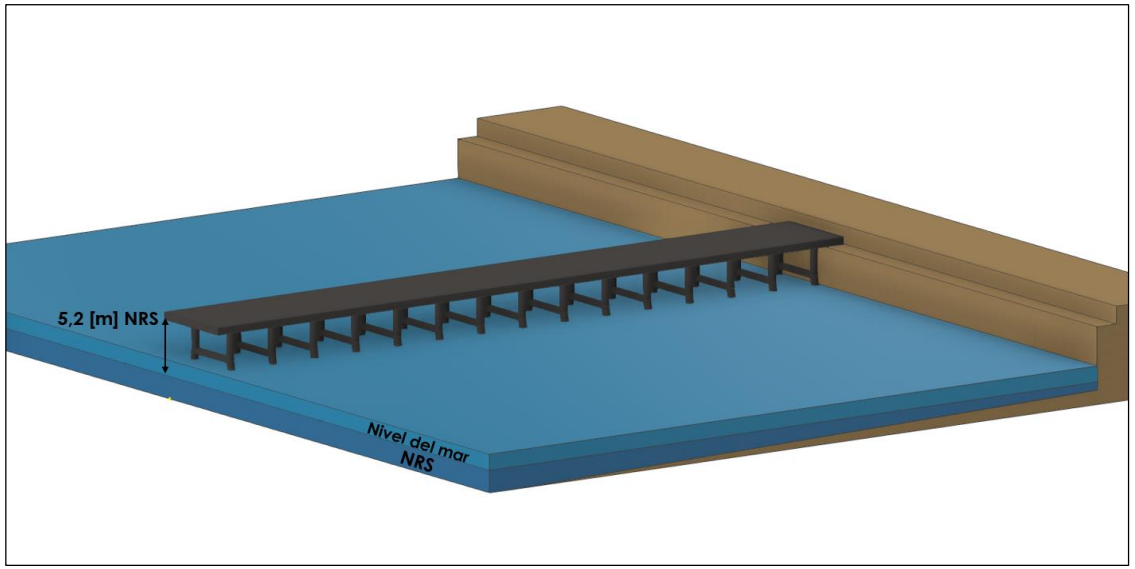


N°	Hs [m]	Tp [s]	Θ [°]	Za [m]	Zm [m]	Pendiente [°]
1	1, 2 ,3, 4 y 5	14	270	Sicigia	Tr 50 años	25
2	1	10,12,14,16 y 18	270	Sicigia	Tr 50 años	25
3	1	14	180,225,270, 315 y 360	Sicigia	Tr 50 años	25
4	1	14	270	Cuadratura y Sicigia	Tr 50 años	25
5	1	14	270	Sicigia	Tr 10,25 y 50 años	25
6	1	14	270	Sicigia	Tr 50 años	1, 8 y 25

Hs [m]	Tp [s]	Θ [°]	Δz [m]	Caso
1	14	270	0	Caso base
1	14	270	-1.0	Solevantamiento terremoto mediano
1	14	270	-2.0	Solevantamiento terremoto fuerte
1	14	270	1.0	Hundimiento terremoto mediano
1	14	270	2.0	Hundimiento terremoto fuerte
1	14	270	0.3	Niño severo
1	14	270	-0.3	Niña severa

5. Metodología OE4





6. Resultados OE1

	Parámetros que intervienen en la cota de inundación						
Índice	**Aumento futuro** del nivel medio del mar por **expansión térmica del agua**	**Aumento** del nivel medio del mar por **fenómeno del niño**	**Aumento** del nivel medio del mar por efectos de **ondas de infragravedad** (Wave setup)	**Aumento** del nivel medio del mar por **marea meteorológica**	**Descenso** del nivel medio del mar por **fenómeno de la Niña**	**Aumento** del nivel medio del mar por **marea astronómicas** fase de sicigia	**Altura de ola** sobre el nivel medio del mar
Variación	0,3 - 0,7 [m]	0,3 [m]	10 – 12% H	Tr 10 años: 0,78 [m] Tr 25 años: 0,87 [m] Tr 50 años: 0,93 [m]	0,3 [m]	1 [m]	η

$$\bar{\eta} = \frac{H_{máx}}{2} exp\left(\frac{2\pi}{L_m}\frac{H_{máx}}{2}\right)$$

$$C_P = C_i + F_s \; [m\ NRS]$$

$$C_i = NMM + O.I + \eta \;\; [m\ NRS]$$

$$NMM = NRS + Z_{m.m} + Z_{m.a} + Z_{e.t} + Z_{niño\ o\ niña\ severo}$$

6. Resultados OE2

Región de Chile	Conservador		No conservador	
	Solevantamiento máximo [m]	Hundimiento máximo [m]	Solevantamiento mínimos [m]	Hundimiento mínimo [m]
Valparaíso	No hay registros	-0.35	No hay registros	-0.15
Libertador General Bernardo O´Higgins	No hay registros	-1.0 ± 0.2	No hay registros	-0.35 ± 0.05
Maule	No hay registros	-0.6 ± 0.1	No hay registros	-0.35 ± 0.05
Ñuble	No hay registros	-1.0 ± 0.2	0.2 ± 0.1	-0.3 ± 0.1
Bio Bio	2 ± 0.2	-1.2 ± 0.1	1.4 ± 0.1	-0.4 ± 0.1
Araucanía	2.5 ± 0.1	No hay registros	0.1 ± 0.05	-0.3 ± 0.1
Ríos y Lagos	2.2 ± 0.2	-0.4 ± 0.1	0.1 ± 0.1	No hay registros

6. Resultados OE3

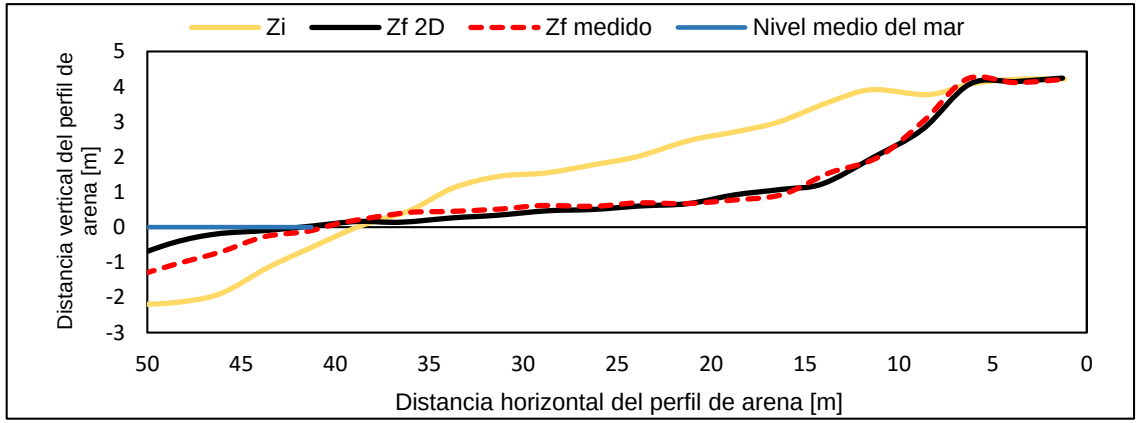
MORFODINAMICO

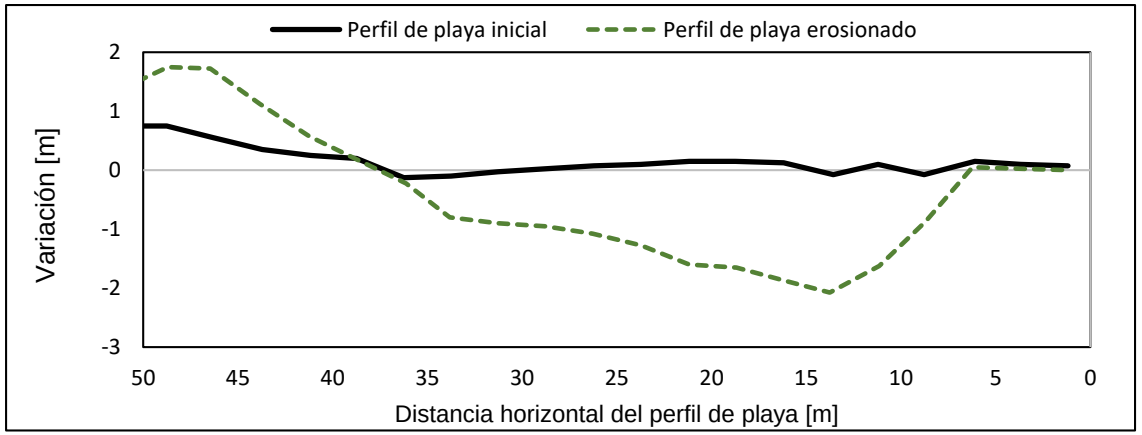
Calibración	Parámetro *break*						
Parámetro *facua*	2DH Transiente Roelvink1	1D Transiente Roelvink1	1D Estacionario Baldock	2DH Transiente Roelvink_daly	1D Transiente Roelvink_daly	2DH Transiente Roelvink2	1D Transiente Roelvink2
	Volumen erosionado simulado $\left(m^3/m\right)$						
0.100	113,65	94,08	51,87	119,84	99,16	114,58	100,21
0.125	111,81	84,83	45,43	111,01	95,58	113,77	97,91
0.150	107,66	80,75	39,70	107,84	93,70	98,60	93,21
0.175	98,86	78,75	34,38	105,09	88,99	95,15	89,91
0.200	93,56	76,62	31,23	101,90	84,41	93,84	85,12
0.225	92,32	65,78	28,80	96,23	80,15	91,17	76,57
0.250	84,35	61,23	22,63	92,73	78,59	88,63	73,15
0.275	81,25	56,52	17,14	86,98	74,70	87,02	71,32
0.300	77,97	54,70	15,53	83,55	69,74	81,74	69,83
0.325	66,51	44,96	11,24	80,57	67,91	80,20	64,08
0.350	60,91	38,14	9,67	74,99	64,92	75,51	60,56
0.375	51,95	33,24	8,63	70,23	59,65	66,78	49,03
0.400	48,00	32,41	7,18	66,33	58,89	63,55	45,07
0.425	40,95	28,81	2,93	57,46	57,55	59,94	38,58
0.450	33,84	25,33	2,41	47,91	50,09	45,25	36,91
0.475	31,90	19,71	1,63	44,52	39,46	43,15	31,18
0.500	27,03	16,71	1,27	40,21	36,09	35,70	25,43

6. Resultados OE3

MORFODINAMICO

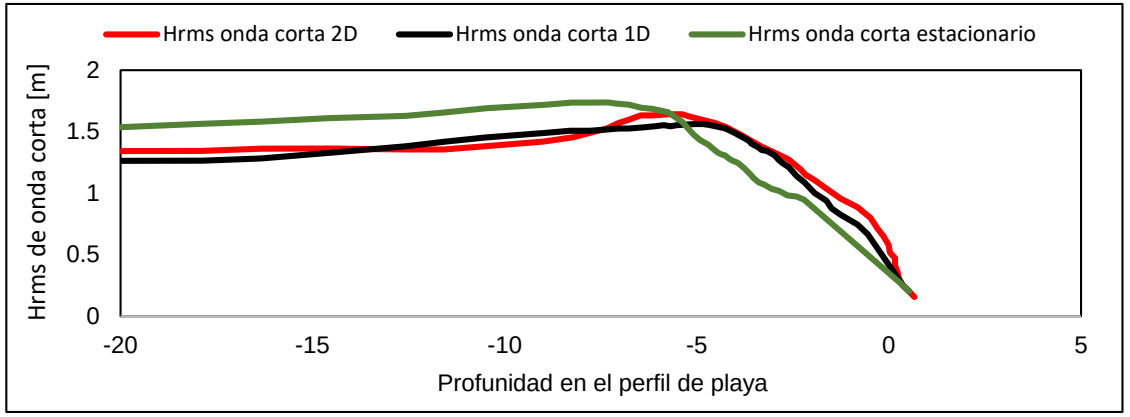
Modo de análisis	*facua*	*break*	Volumen de erosión (m^3/m)	R^2
2D Transiente	0,425	Roelvink1	40,95	0,9815
1D Transiente	0,350	Roelvink1	38,14	0,9501
2D Transiente	0,475	Roelvink 2 (default)	43,15	0,9683
1D Transiente	0,425	Roelvink 2 (default)	38,58	0,9431
2D Transiente	0,500	Roelvink_daly	40,21	0,9399
1D Transiente	0,475	Roelvink_daly	39,46	0,9184
1D Estacionario	0,150	Baldock	39,70	0,8589

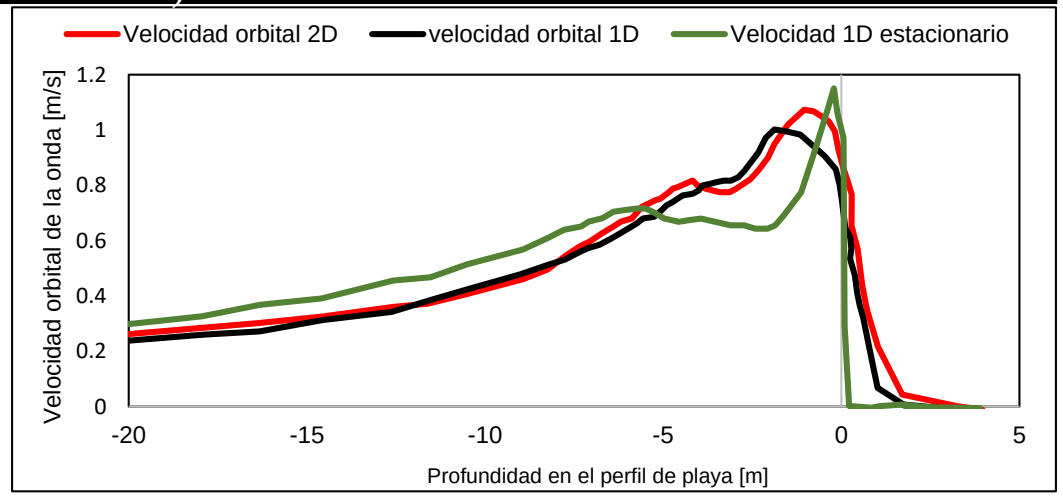




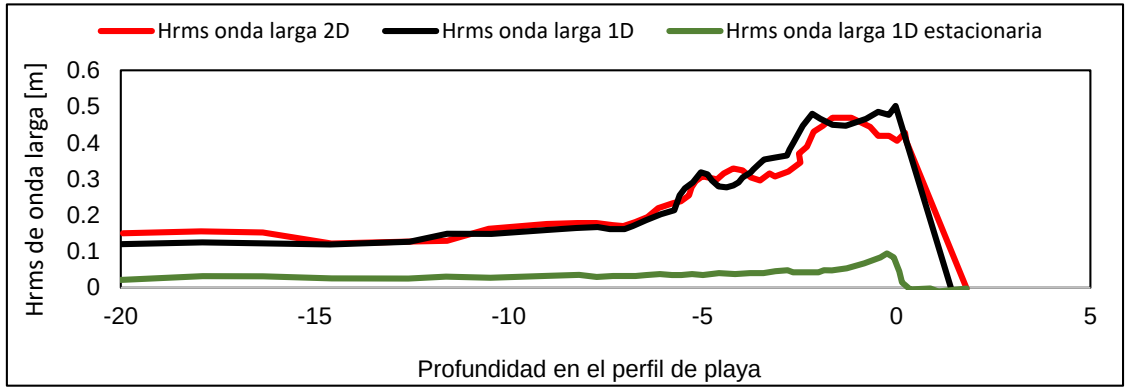
6. Resultados OE3

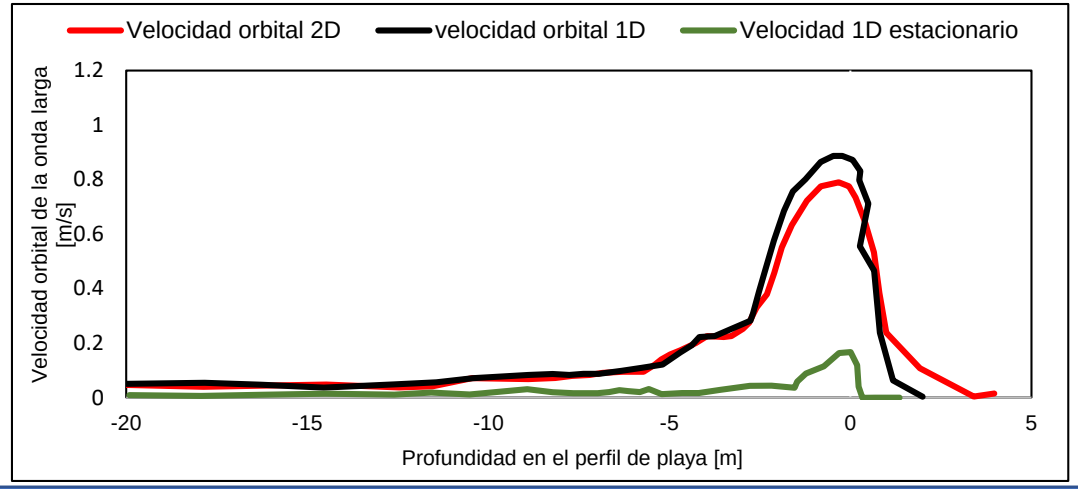
OLEAJE (ONDA CORTA)





ONDA LARGA

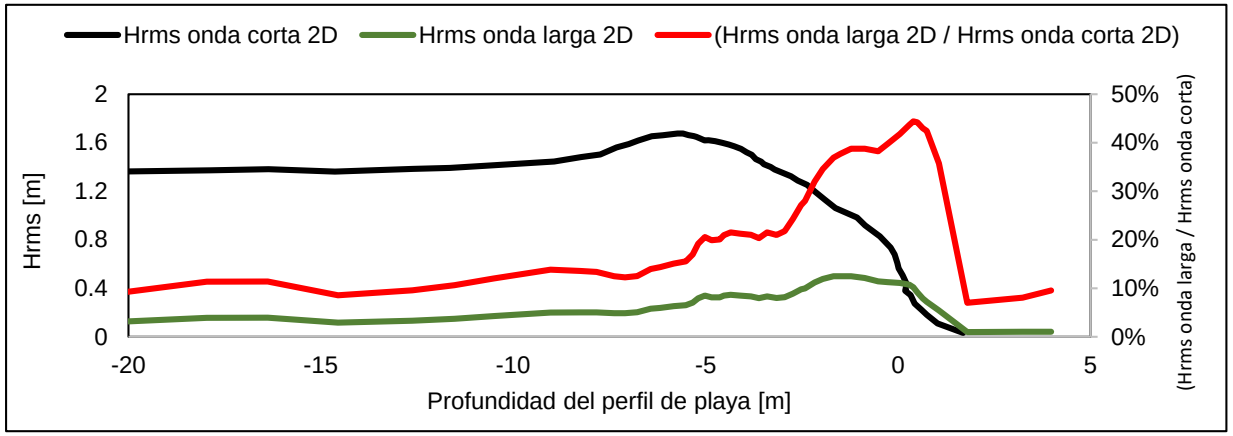




6. Resultados OE3

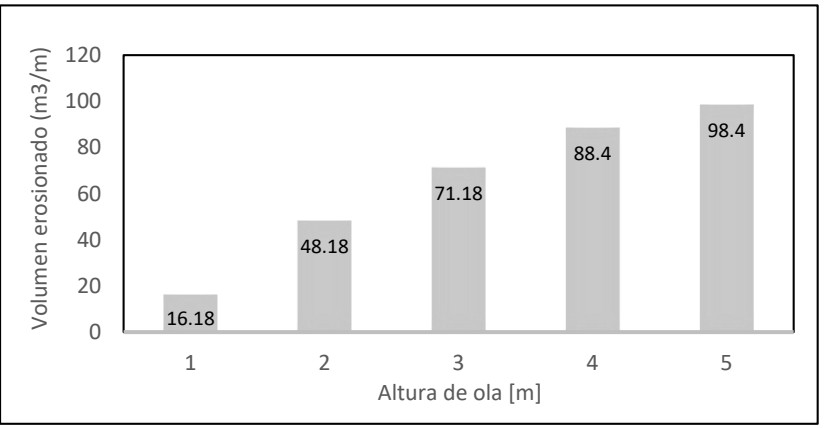
RELACIÓN ALTURA ONDA CORTA / ONDA LARGA

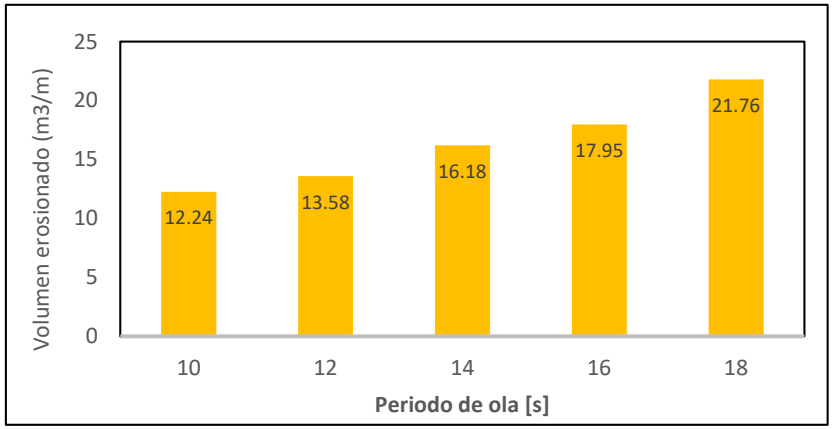
Modo de análisis	*facua*	*break*	R^2	$\bar{\%}\left(\frac{Hrms_{onda\ larga}}{Hrms\ onda\ corta}\right)$ hasta los 5 m de profundidad	$\bar{\%}\left(\frac{Hrms_{onda\ larga}}{Hrms\ onda\ corta}\right)$ sobre los 5 m de profundidad
2D Transiente	0,425	Roelvink1	0,9815	11,22	52,66
1D Transiente	0,350	Roelvink1	0,9501	12	47
2D Transiente	0,475	Roelvink 2 (default)	0,9683	12	42
1D Transiente	0,425	Roelvink 2 (default)	0,9431	11	46
2D Transiente	0,500	Roelvink_daly	0,9399	12	64
1D Transiente	0,475	Roelvink_day	0,9184	12	43
1D Estacionario	0,150	Baldock	0,8589	2	5

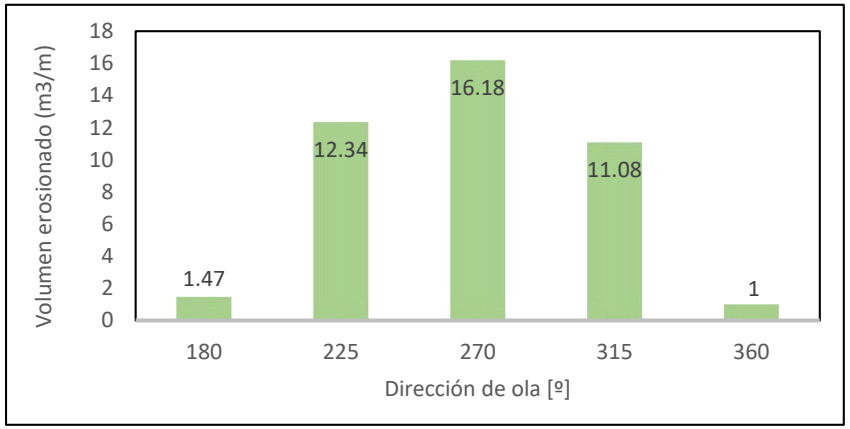


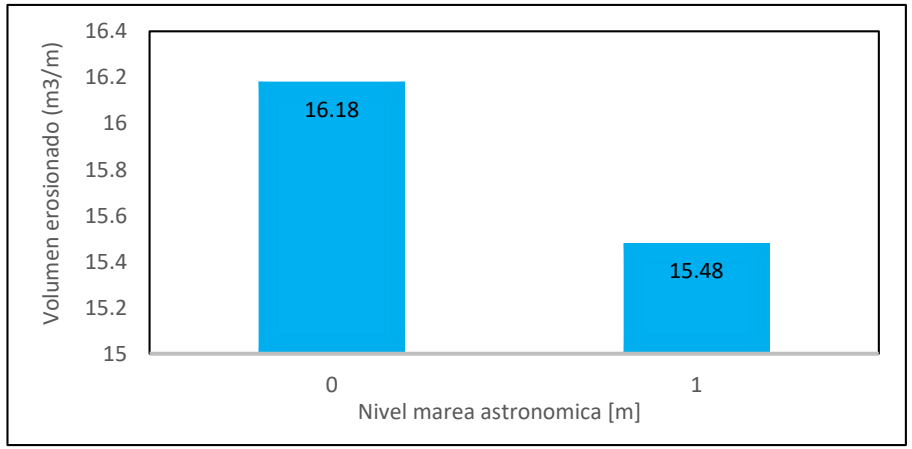
6. Resultados OE3

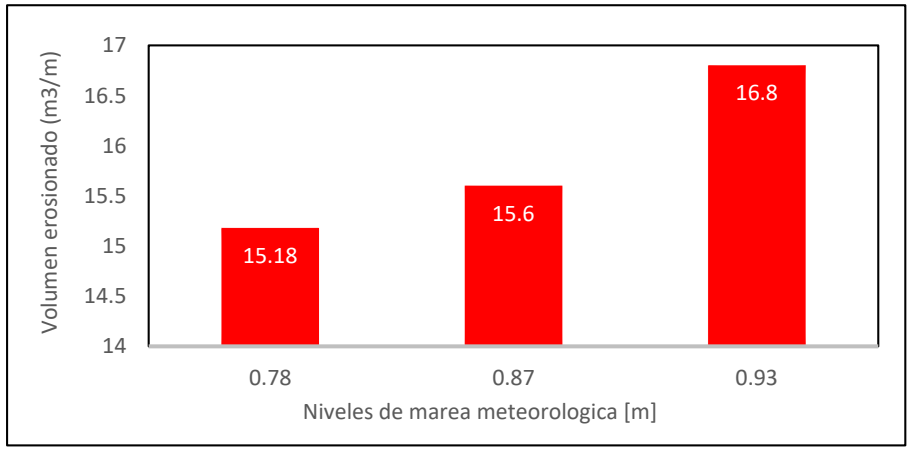
ANALISIS DE SENSIBILIDAD





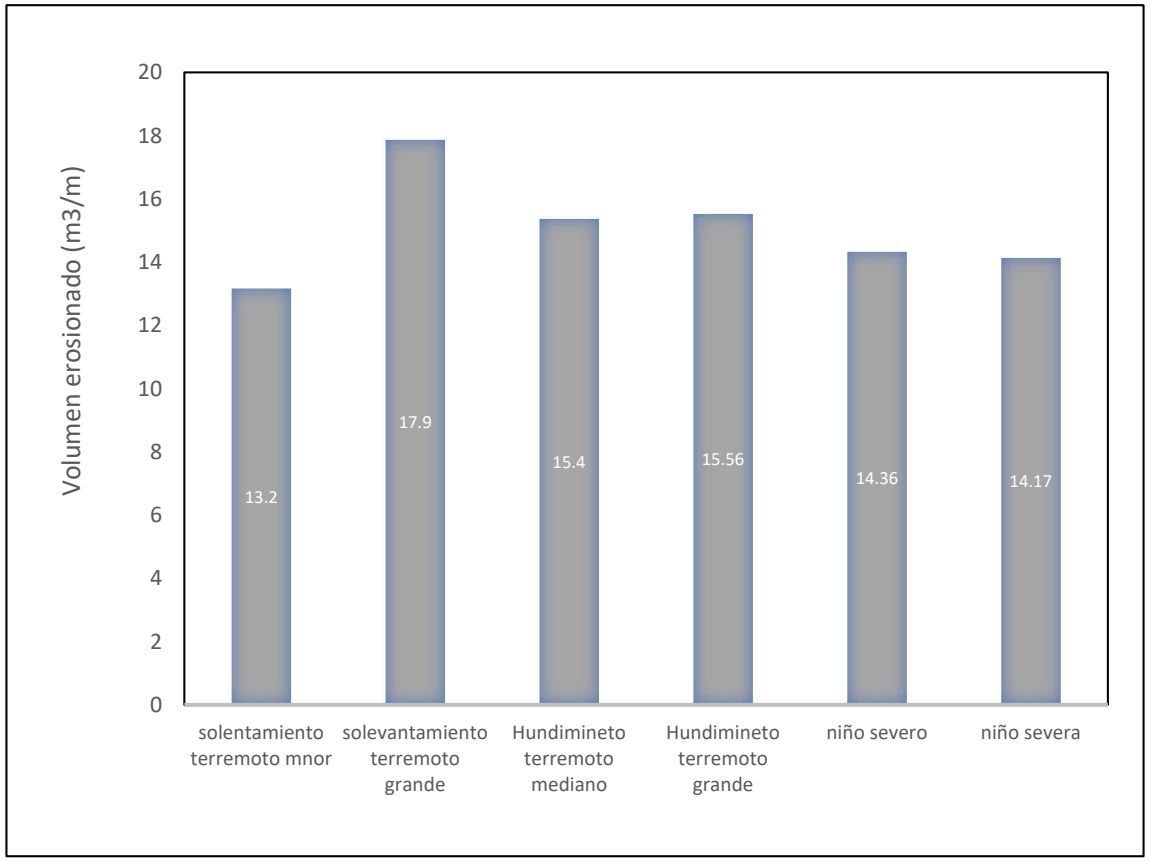


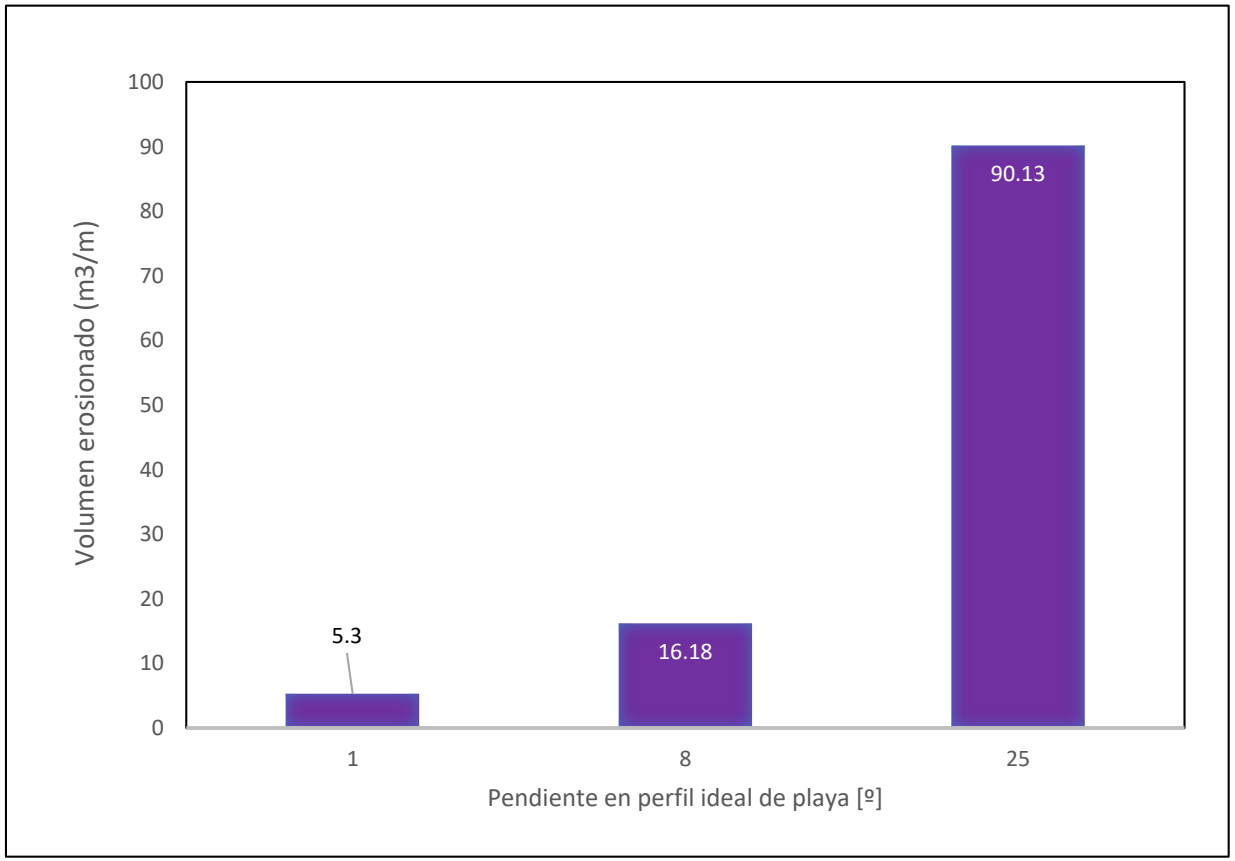




6. Resultados OE3

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD





6. Resultados OE3

ANALISIS DE SENSIBILIDAD

Objetivo	Parámetro	Sensibilidad
Análisis de sensibilidad de diferentes parámetros respecto Volumen de erosión del perfil modelado	Altura de ola	Alta
	Periodo de ola	Alta
	Dirección de ola	Alta
	Altura marea astronómica	Baja
	Altura marea meteorológica	Baja
	Cambios en el NMM	Baja
	Pendiente del perfil	Alta

6. Resultados OE4

Propuesta metodológica

FACTORES GENERALES

i. Selección de la vida útil
ii. Futuro nivel del mar
iii. Análisis de sensibilidad de parámetros de diseño
iv. Evento de diseño asociado a un periodo de retorno
v. Diseño determinista
vi. Diseño probabilístico
vii. Cargas de arrastre por oleaje y corrientes
viii. Cargas de sobrepaso (importante pero frecuentemente ignorado)
ix. Cargas de impacto
x. Cargas de levante
xi. Cambios morfológicos de la línea de costa (erosión. acreción socavación, etc.)

6. Resultados OE4

Propuesta metodológica

Vida útil mínima para infraestructuras costeras de carácter definitivo (años)			
Tipo de obra o instalación	Nivel de seguridad requerido		
	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Infraestructura de carácter general	25	50	100
Infraestructura de carácter industrial	15	25	50

ROM 0.2 - 90

CONSIDERACIONES

Escenario conservador						
Tr [años]	Δz					
	Hundimiento	Niño severo	Expansión térmica	Onda larga	Altura de ola	Factor de seguridad
5-10	0,15 [m]	+0,3 [m]	0,46 [m]	0,12Hs [m]	η [m]	0,5 [m]
10-25	+0,3 [m]	+0,3 [m]	0,46 [m]			
25-50	+1,2 [m]	+0,3 [m]	0,74 [m]			1 [m]
50-100	+1,2 [m]	+0,3 [m]	0,74 [m]			

Escenario no conservador						
Tr [años]	Δz					
	Hundimiento	Niño severo	Expansión térmica	Onda larga	Altura de ola	Factor de seguridad
5-10	-	-	0,34 [m]	0,12Hs [m]	η [m]	-
10-25	-	-	0,34 [m]			
25-50	+0,15 [m]	+0,3 [m]	0,5 [m]			0,5 [m]
50-100	+0,30 [m]	+0,3 [m]	0,5 [m]			0,5 [m]

6. Resultados OE4

Pasos a seguir:

i. Determinar tipo de obra o infraestructura.
ii. Determinar nivel de seguridad respecto a su finalidad.
iii. Determinar clima medio y extremo de oleaje respecto a la estadística disponible.
iv. Determinar la zona de rompiente en la infraestructura costera.
v. Determinar evento de diseño (Hs) con un periodo de retorno que se relacione con la vida útil de la estructura.
vi. Identificar niveles de marea astronómica según corresponda (Extensión de información, zona geográfica, etc.).
vii. Identificar niveles de marea meteorológica, según corresponda (de forma empírica a través de presión y viento o por análisis estadístico). Este valor debe estar asociado al periodo de retorno de diseño.
viii. Asumir que todas las ondas que afectan el alcance vertical de la ola en zona de rompiente poseen la misma fase, con el fin de realizar la superposición de ondas.
ix. Se deben considerar los valores de diseño que alzan el nivel medio del mar respectivos escenarios y periodo de retorno.
x. Finalmente se calcula la cota de inundación a través de la siguiente expresión:

$$C_i = NMM + O.I + \eta + C.F$$

$$NMM = NRS + Z_{m.m\,Tr\,años} + Z_{m.a\,sicigia} + Z_{e.t} + Z_{niño\,severo}\,[m]$$

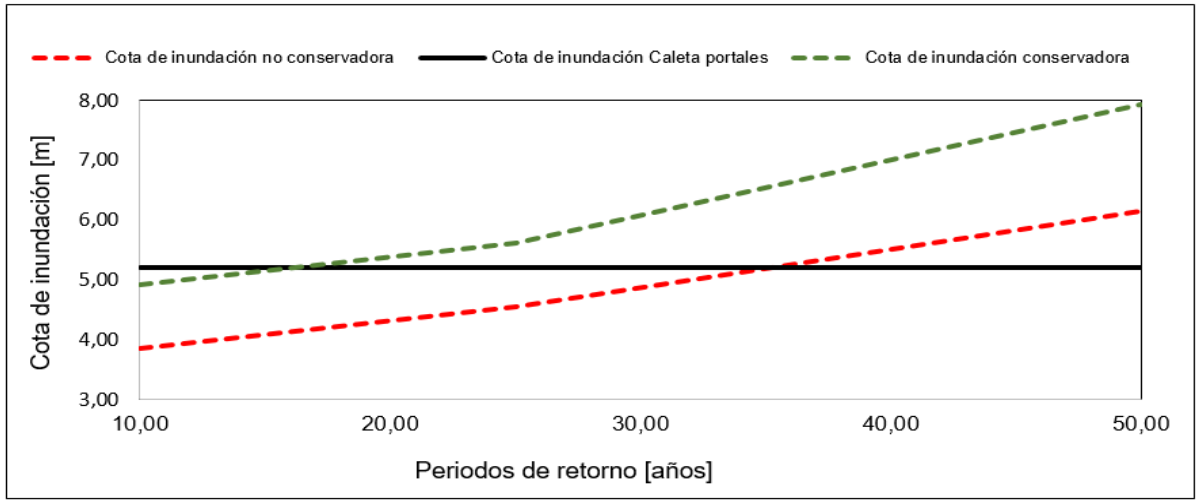
$$O.I = 0{,}12H_{tr}$$

6. Resultados OE4

Ejemplo aplicación

Variables	Valores
NRS Valparaíso	0,92 [m]
Marea astronómica	0,5 [m]
Marea meteorológica	Tr 10 años, 0,76 [m] Tr 25 años 0,83 [m] Tr 50 años 0,93 [m]
Altura de ola de diseño a 20 metros de profundidad	Tr 10 años: 2 [m] Tr 25 años 2,7 [m] Tr 50 años 3,5 [m]
Aumento del nivel del mar por expansión térmica	Ver tabla
Wave setup (onda larga)	Tr 10 años: 0,24 [m] Tr 25 años 0,324 [m] Tr 50 años 0,42 [m]
η Elevación sobre el nivel medio	Tr 10 años: 1,1 [m] Tr 25 años 1,485 [m] Tr 50 años: 1,925 [m]
Cambio de fondo por hundimiento	Ver tabla
Factor de seguridad	Ver tabla 16

Escenario conservador	
Cota de inundación	**Distancia desde el NRS**
Ci $de\ 10\ años$	4,93 [m] NRS
Ci $de\ 25\ años$	5,62 [m] NRS
Ci $de\ 50\ años$	7,93 [m] NRS
Escenario no conservador	
Cota de inundación	**Distancia desde el NRS**
Ci $de\ 10\ años$	3,86 [m] NRS
Ci $de\ 25\ años$	4,55 [m] NRS
Ci $de\ 50\ años$	6,15 [m] NRS



7. Conclusiones

MORFODINÁMICA

- Para calibrar un modelo morfodinámico en Xbeach se deben realizar extensas simulaciones debido a que depende del transporte de sedimentos (diámetro medio de sedimento, velocidad de corriente, velocidades orbitales de ondas, morfología costera, etc) y del tipo de rompiente que da origen a la morfología costera, por lo tanto, estos parámetros son muy sensibles e importantes para determinar la erosión de un perfil batimétrico de playa
- La calibración del volumen erosivo por *facua* 0,425 y break *Roelvink1* solo pertenece al perfil playa analizado en Reñaca, ya que estos parámetros dependen sustancialmente de la caracterización hidrodinámica y morfodinámica local, por lo tanto, antes de modelar la erosión, se debe efectuar una calibración del modelo.
- Las ecuaciones de onda larga en un modelo morfodinámico son necesarias para calcular la erosión en los perfiles de playa, de lo contrario, podría disminuir hasta 14 veces su volumen de erosión, tal como ocurrió en Playa Reñaca según este estudio.
- La onda larga frecuentemente tiene una extensión de kilómetros, por lo tanto, su velocidad orbital afecta toda la columna de agua, ocasionando esfuerzos de corte y desplazamiento en los granos sedimentarios.

7. Conclusiones

HIDRODINÁMICA

- La envolvente de la onda larga en 1 y 2 dimensiones para profundidades mayores a 5 metros, representa el 12% de la altura la onda corta (Hrms), sin en embargo, para profundidades menores su altura incrementa hasta un 60%.
- La onda larga en zona de rompientes alcanza la velocidad orbital de la ola, debido al aporte energético de la onda corta que genera en su disipación.
- Las estructuras marítimas que se ubiquen en zona de rompiente podrían interaccionar cargas hidrodinámicas de ondas cortas y ondas largas en un desfase de 180º.
- La morfología costera en zona de rompientes es variable, debido al contante cambio de ubicación de las barras de sedimentos, por lo tanto, es recomendable a futuros estudios analizar un perfil batimétrico mínimo hasta los 20 metros de profundidad.

7. Conclusiones

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

- El análisis de sensibilidad de la altura de ola en la función objetivo demuestra que en la erosión es importante, ya que en un 1 [m] de ola se erosionan 16,18 ($m3/m$), mientras que para 5 [m] de altura 98,4 ($m3/m$). Esto quiere decir que es un parámetro relevante en los temporales erosivos.
- El periodo de ola en la función objetivo no es tan importante como su altura,sin embargo, aún es considerando significativo ya que entre un periodo de 10 y 18 segundos existe una diferencia de 10 ($m3/m$).
- La dirección de ola en la función objetivo es igual de importante que su altura. Si la dirección es perpendicular al perfil de playa ocasiona máxima erosión, sin embargo, si es paralela a la playa la erosión disminuye hasta 15 veces.
- El nivel de la marea astronómica en la función objetivo ya sea en sicigia o en cuadratura no es relevante porque se diferencian en un ($m3/m$). Homólogamente ocurre en la marea meteorológica.
- La pendiente del perfil de arena en la función objetivo es sumamente importante ya que si la playa es de carácter disipativa su erosión será menor, no obstante, para una playa reflectiva la erosión aumenta hasta 6 veces.
- El análisis de sensibilidad de los cambios del nivel medio del mar respecto al cambio climático o cambios de fondos (por efectos de sismos) es regular. Esto quiere decir, que las variaciones de solevantamiento, hundimientos, fenómeno del niño y fenómeno de la niña no tienen grandes implicancias en la erosión del perfil de arena, obtenido hasta un 1 ($m3/m$) de diferencias.

7. Conclusiones

METODOLOGIA DE CÁLCULO

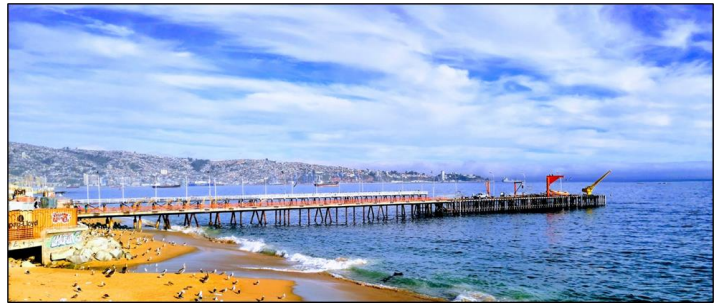
- La metodología de cálculo para determinar la cota de inundación depende sustancialmente de la vida útil de la estructura y del evento de diseño asociado a un periodo de retorno, ya que de esto depende la inclusión o exclusión de parámetros que afectan el NMM.
- La elevación de la onda infragravedad es el wave setup, por eso solo se considera la altura de onda larga en la cota de inundación.
- Finalmente se puede concluir que la cota de diseño de un muelle en penetración es un proceso iterativo que dependerá de los costos del proyecto y de la información disponible referente a las condiciones hidrodinámicas y morfodinámicas

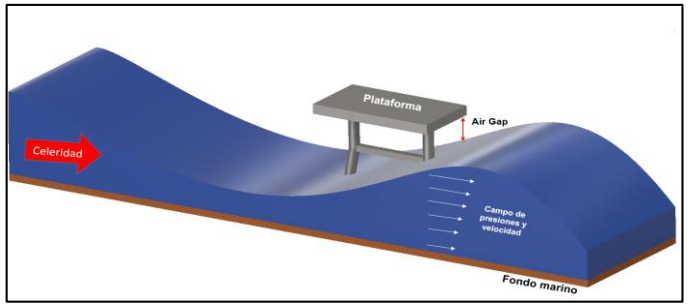
Universidad de Valparaíso
CHILE

INGENIERÍA CIVIL OCEÁNICA

Proyecto para optar al Titulo de Ingeniero Civil Oceánico

Metodología de cálculo para determinar la cota de inundación a lo largo de un muelle en penetración



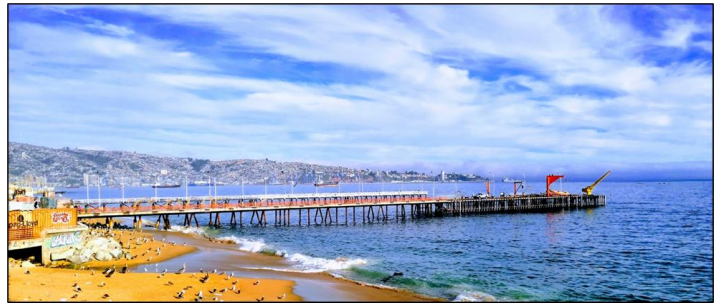


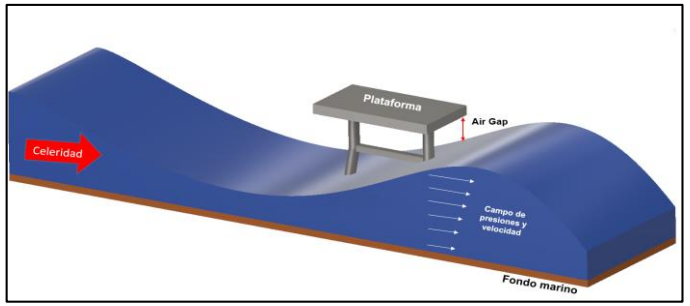
Jean Pierre Toledo Alvarado

Profesor Guía: Patricio Winckler
Comisión: Felipe Caselli
Francisco Molteni

Junio 2021

PREGUNTAS





Jean Pierre Toledo Alvarado

Profesor Guía: Patricio Winckler
Comisión: Felipe Caselli
Francisco Molteni

Junio 2021