

MEMORIA DEL PROYECTO DE TÍTULO

EFFECTOS EN LA AGITACIÓN Y RESONANCIA EN PUERTECITO DEBIDO A LA CONSTRUCCIÓN DE PGE, PUERTO SAN ANTONIO, CHILE

Mauricio Giovanni Lagos Mena

Profesor guía: Patricio Winckler Grez

Abril 2019

CONTENIDO

- **INTRODUCCIÓN**
- **OBJETIVOS**
- **ALCANCES Y LIMITACIONES**
- **PUERTO SAN ANTONIO**
- **PUERTECITO**
- **PGE**
- **METODOLOGÍA**
- **RESULTADOS**
- **CONCLUSIONES**
- **RECOMENDACIONES**

INTRODUCCIÓN



AÑO	Resumen Proyección TEU's V Región		
	Bajo	Base	Alto
2013	2.316.244	2.369.958	2.423.672
2018	3.120.779	3.359.605	3.613.003
2023	4.022.729	4.522.972	5.078.272
2028	5.035.801	5.884.914	6.865.500
2033	6.019.682	7.254.832	8.726.824

Fuente: EPSA (2013)

La construcción del PGE generará cambios en la agitación y resonancia dentro de los actuales sitios del puerto, dentro de los cuales se encuentra el de Puertecito, ubicado en la llamada “poza chica”, y administrado por Corporación de Fomento y Desarrollo de la Pesca Artesanal Puertecito San Antonio.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Analizar los efectos en la agitación y resonancia en el sector de Puertecito, debido a la construcción del PGE.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Determinar las condiciones naturales en las cercanías del sector.
- Determinar y analizar coeficientes de agitación en Puertecito, bajo condiciones actuales y futuras.
- Caracterizar el clima operacional de oleaje en Puertecito, bajo condiciones actuales y futuras.
- Comparar modos resonantes en Puertecito, para el escenario actual y futuro, mediante ecuaciones paramétricas y propagación de espectros de ruido blanco.

ALCANCES Y LIMITACIONES

ALCANCES

- Evaluación de los efectos en la agitación portuaria debido a la construcción de PGE San Antonio.
- Evaluación de los efectos en la resonancia portuaria debido a la construcción de PGE San Antonio.
- Se utilizaron datos del proyecto Atlas de Oleaje de Chile.

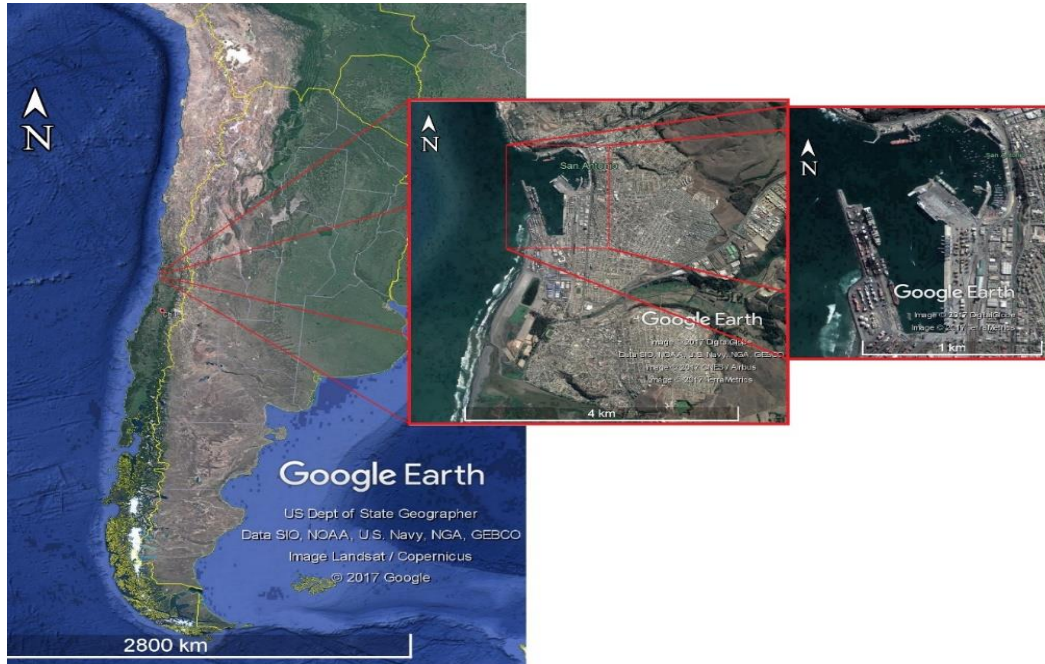
LIMITACIONES

- No existen registros de oleaje de baja frecuencia, ni ondas largas asociadas a grupos de ondas.

PUERTO

SAN ANTONIO

UBICACIÓN DEL PUERTO



Fuente: Elaboración propia, a partir de imágenes satelitales de Google Earth.

PUERTECITO

Bajo la administración de la Corporación de Fomento y Desarrollo de la Pesca Artesanal Puertecito San Antonio. Actualmente 500 socios constituyen esta organización, la cual está compuesta por 5 sindicatos y 1 cooperativa:

- S.T.I. de Buzos Mariscadores Embarcados “Puertecito”.
- S.T.I. de Pescadores “Montemar”.
- S.T.I. de Pescadores Artesanales “Rincón de Puertecito”.
- S.T.I. de Pescadores Artesanales “Caleta Puertecito de San Antonio”.
- Sindicato de Fletes y Turismo de Puertecito.
- Cooperativa de Pescadores Artesanales de San Antonio.

Producto	% de producción Puertecito	Ton	MM\$
Jibia	70	24.888	9.955
Sardina Común	18	6.582	922
Anchoveta	5	2.072	290
Albacora	3	1.077	2.693
Jurel, Machuelo y Merluza	3	970	970
Bacalao de profundidad	1	74	1.116

Fuente: Plan Maestro Caleta Puertecito, San Antonio (2017).



CAPACIDAD TOTAL
6.000.000
de TEU anuales

FRENTES



2 frentes de
atraque de
1.730
mts

SITIOS

contará con: **8** nuevos sitios
de atraque



para naves de diseño de **397** metros de eslora

METODOLOGÍA

- Propagación de oleaje desde aguas profundas hasta un nodo en aguas intermedias, mediante uso de modelo SWAN, usando método de propagación de alturas unitarias.
- Acople de modelo de fase promediada (SWAN) y modelo que resuelve la fase de las olas (MIKE21 BW).
- Propagación de alturas unitarias de oleaje desde nodo de aguas intermedias hasta nodos de control en los sitios de interés dentro del puerto.
- Estimación de periodos naturales dentro del puerto, utilizando ecuaciones paramétricas.
- Obtención de frecuencias naturales en sector de Puertecito y sitios de interés, mediante propagación de espectro de ruido blanco.

ANÁLISIS DE CONDICIONES NATURALES

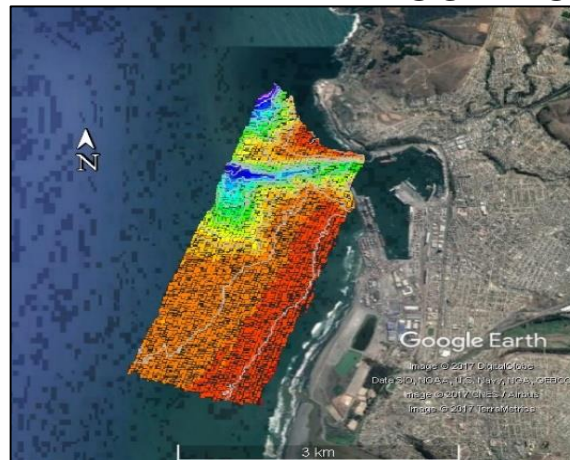
BATIMETRIA

BATIMETRÍA CARTAS NÁUTICAS SHOA

N°	Nombre	Escala
4000	Bahía Coquimbo a Bahía Valparaíso	1:500.000
5000	Bahía Valparaíso a Golfo de Arauco	1:500.000
5114	Aproximación a Puerto San Antonio	1:10.000
5115	Puerto San Antonio	1:5.000

Fuente: Elaboración propia.

BATIMETRÍA DE DETALLE CONDICIÓN ACTUAL



Fuente: Elaboración propia.

BATIMETRÍA PROYECTO PGE

- Nueva dársena y círculo de reviro con una profundidad de 18.5 m.
- Canal de acceso con una profundidad de 24 m.



Fuente: Elaboración propia.

MAREA

ANÁLISIS ARMÓNICO

Símbolo	Nombre	Periodo solar [hrs]	Semiapertura [m]
O1	Lunar declinacional diario	25.82	0.084
K1	Lunisolar declinacional diario	23.93	0.138
N2	Lunar eclíptica mayor semidiurna	12.66	0.101
M2	Lunar principal semidiurna	12.42	0.441
S2	Solar principal semidiurna	12	0.148

Fuente: Elaboración propia.

ANÁLISIS NO ARMÓNICO

Planos de referencia de la marea	NRS [m]
ALTURA MEDIA DE LA PLEAMAR MÁS ALTA	+1.51
ALTURA MEDIA DE LA PLEAMAR	+1.22
NIVEL MEDIO DEL MAR	+0.91
ALTURA MEDIA DE LA BAJAMAR	+0.61
ALTURA MEDIA DE LA BAJAMAR MÁS BAJA	+0.40

Fuente: Elaboración propia.

MEDICIONES DE CAMPO DISPONIBLES

Nodo	Fecha de registro	Profundidad [m]
INVIERNO NORTE	21 de Julio de 2016 al 23 de Agosto de 2016	16
INVIERNO SUR		16.25
VERANO NORTE	26 de Diciembre de 2015 al 27 de Enero de 2016	17.34
VERANO SUR		15.2

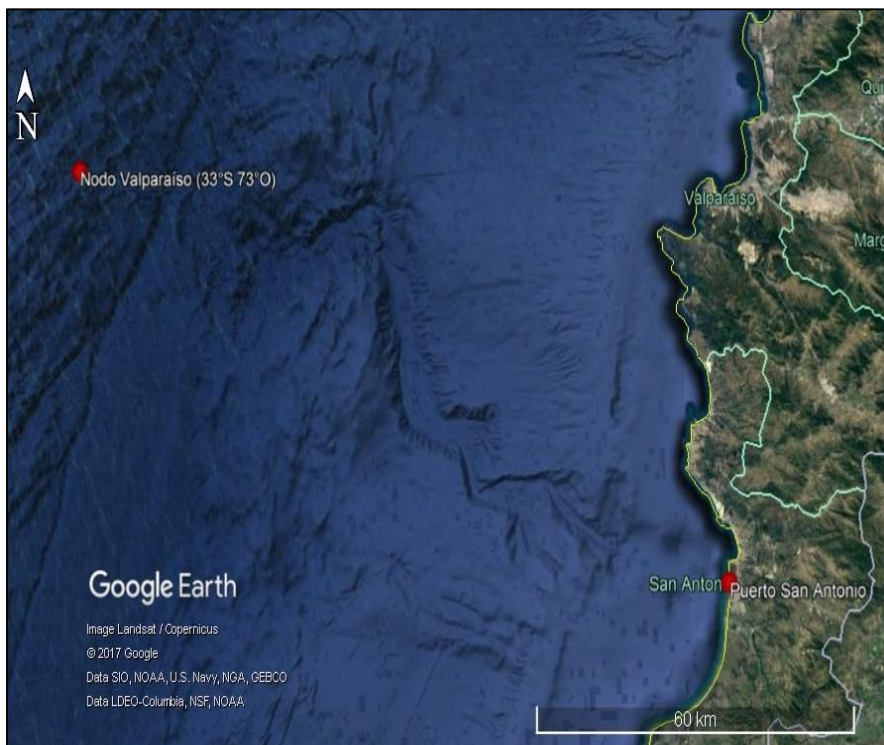
Fuente: Informe técnico olas, Bordemar ingeniería SPA.



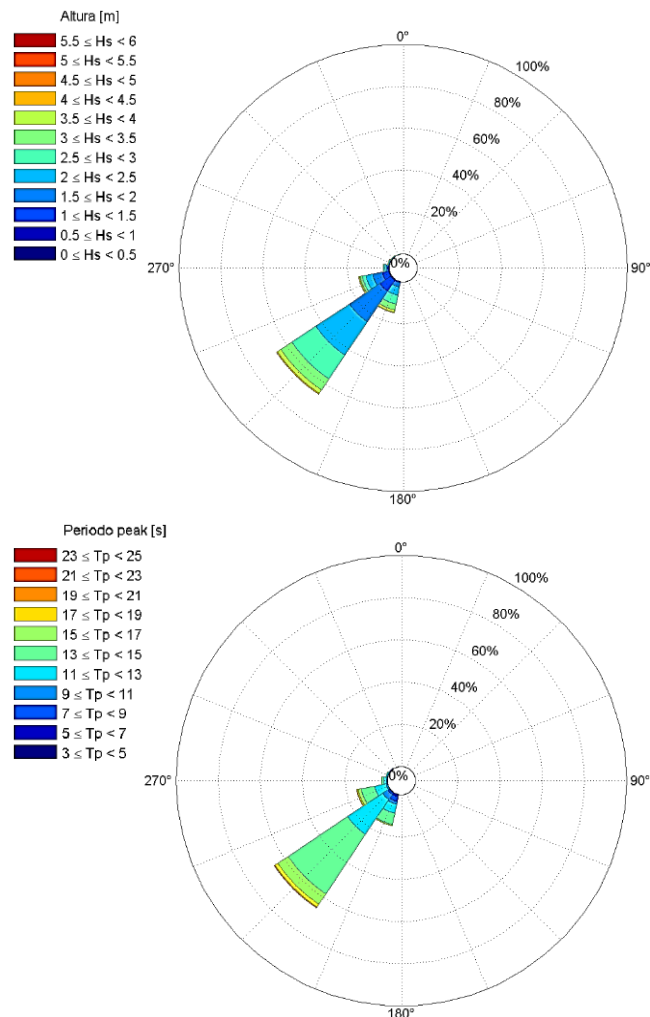
Fuente: Elaboración propia, a partir de imágenes de Google earth.

ESTUDIO DE OLEAJE

OLEAJE EN AGUAS PROFUNDAS



Fuente: Elaboración propia, a partir de imágenes de Google earth.

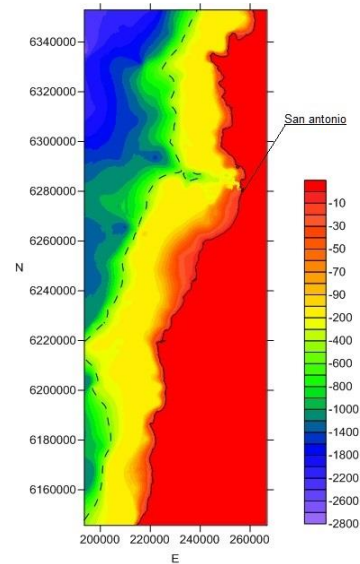


Fuente: Elaboración propia.

PROPAGACIÓN MODELO SWAN



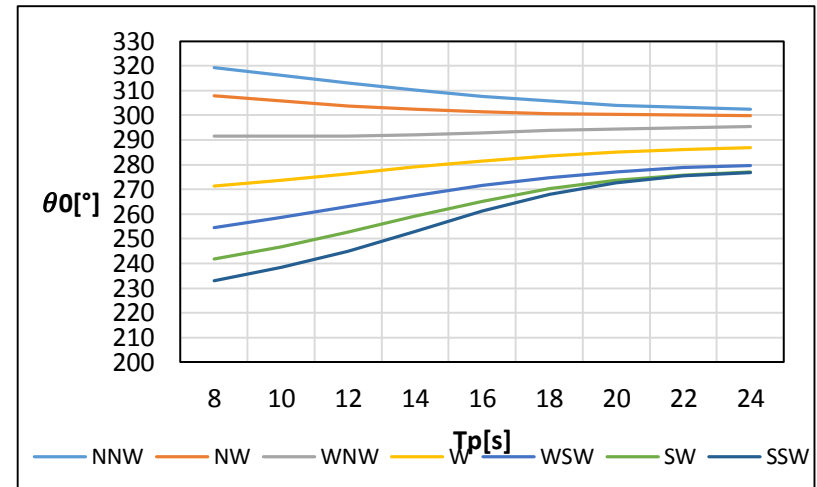
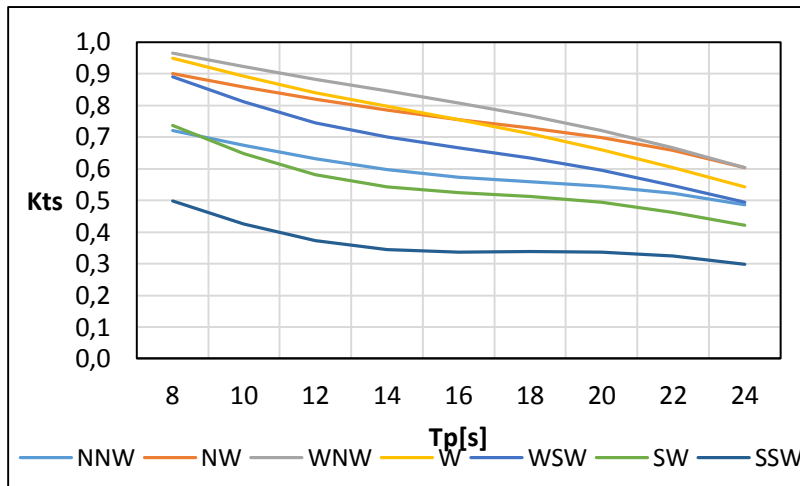
Fuente: Elaboración propia, a partir de imágenes de Google earth.



H[m]	Tp[s]	θ_0 [°]	γ Jonswap	Directional Spreading [°]
1	8		1.42	21.9
	10	202.5		
	12	225		
	14	247.5		
	16	270		
	18	292.5		
	20	315		
	22	337.5		
	24			

Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS



		Tp[s]										R%	A%	
		8	10	12	14	16	18	20	22	24	Total			
Dir [°]	N	13										13	0.01	0.01
	NW	230	171	68	34	4	1					508	0.47	0.48
	W	58	1266	7195	43403	8792	2592	662	79	17		64064	59.25	59.74
	WNW	102	231	400	1065	322	158	66	13	3		2360	2.18	61.92
	WSW	4784	4479	26055	5856							41174	38.08	100
	Total	5187	6147	33718	50358	9118	2751	728	92	20		108119		
R%		4.80	5.69	31.19	46.58	8.43	2.54	0.67	0.09	0.02				
A%		4.80	10.48	41.67	88.25	96.68	99.22	99.90	99.98	100				

Fuente: Elaboración propia.

MODELO NUMÉRICO

PARAMETROS BASICOS

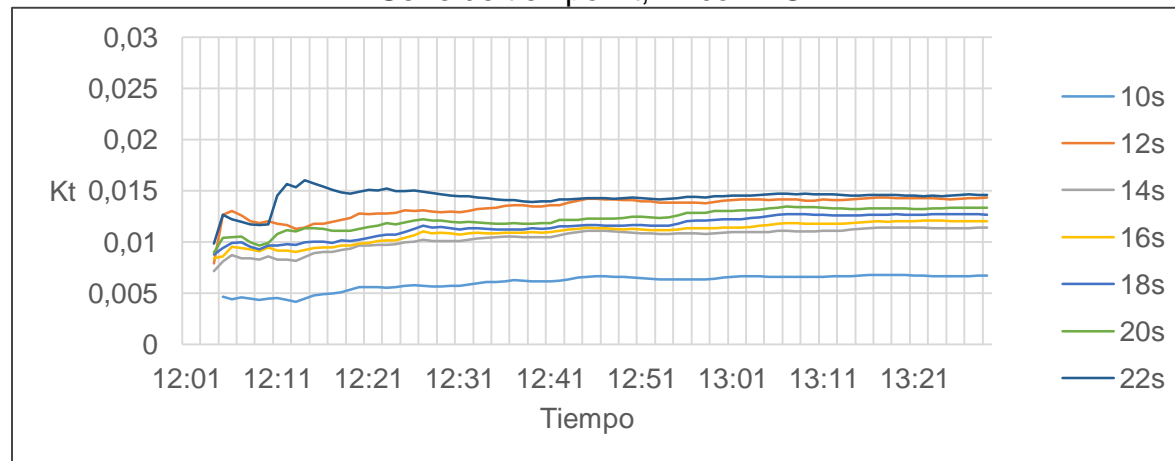
Modelo numérico:	Mike21 BW 2D
Factor de dispersión lineal:	0.066
Discretización espacial de términos convectivos:	<i>“Quadratic upwinding with simple upwinding at steep gradients and near land”</i> .
Factor de tiempo de extrapolación:	1, 0.5 para profundidades mayores a 35 m.
Paso de tiempo:	0.226 s
Pasos:	23950

Numero de Courant: 0.7

Nivel medio del mar: 0.91 m

Tiempo de simulación: 90 minutos

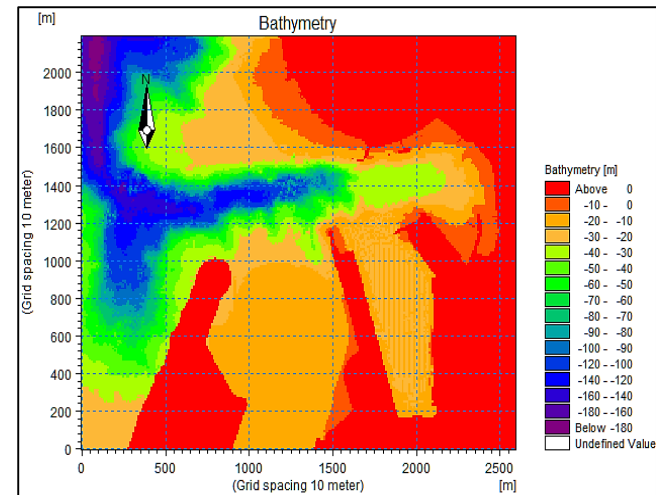
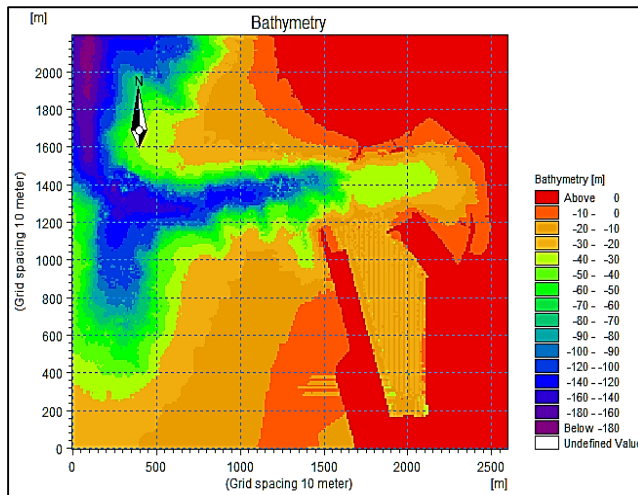
Serie de tiempo Kt, W con PGE



Fuente: Elaboración propia.

MODELO DE AGITACION

BATIMETRIA



Fuente: Elaboración propia.

CONDICIONES DE BORDE HIDRODINAMICAS

		Tp [s]							
		8	10	12	14	16	18	20	22
DIR [°]	WNW			•	•	•	•	•	
	W		•	•	•	•	•	•	•
	WSW	•	•	•	•				

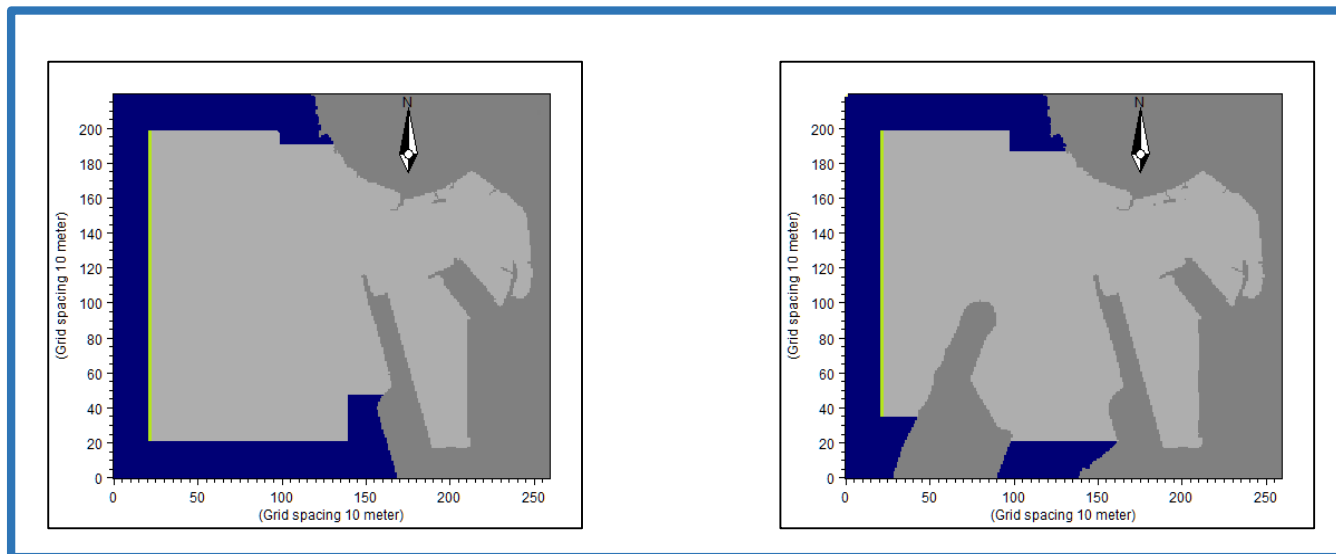
Fuente: Elaboración propia.

GENERACION DE OLAJE

El oleaje modelado se originó en paletas de generación, mediante la herramienta “*Random Wave Generation*”, de Mike Toolbox.

CAPA ESPONJA

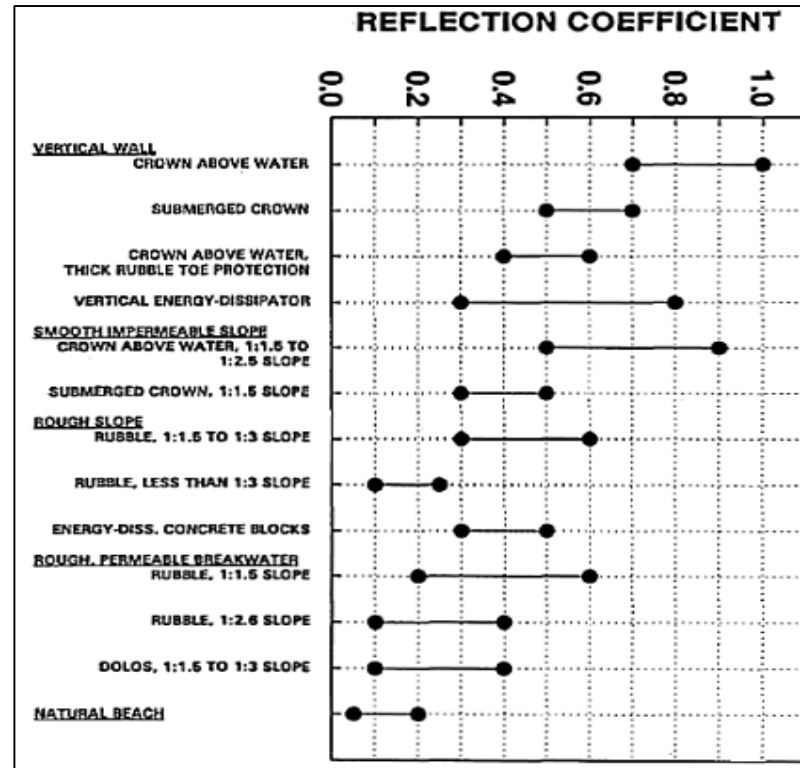
20 capas según manual Mike 21



Fuente: Elaboración propia.

CAPA POROSA

Coeficientes de reflexión típicos, Thompson et al. (1996).

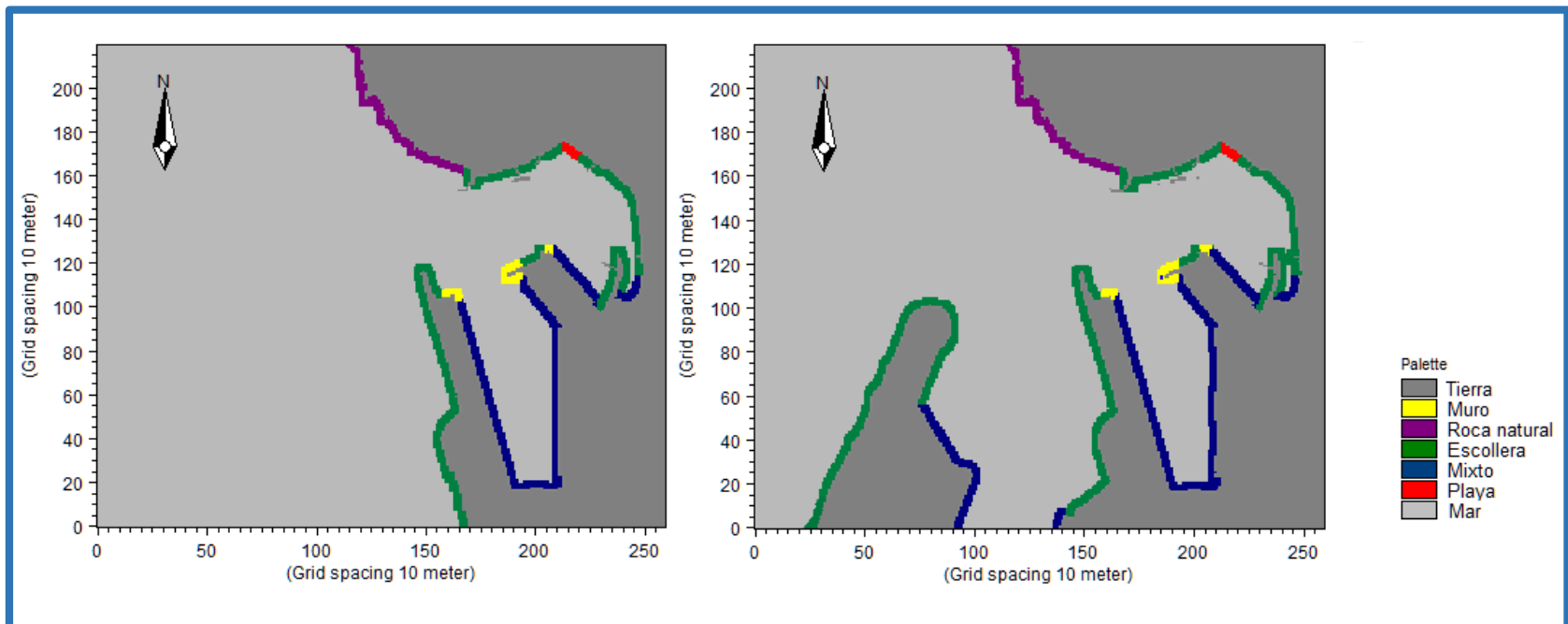


Fuente: (DHI, 2005).

Tipología	Coefficiente de reflexión
Muro	0.9
Roca natural	0.6
Escollera	0.6
Mixto	0.4
Playa	0.2

Fuente: Elaboración propia.

¹ Tipología de pilotes sobre escollera.



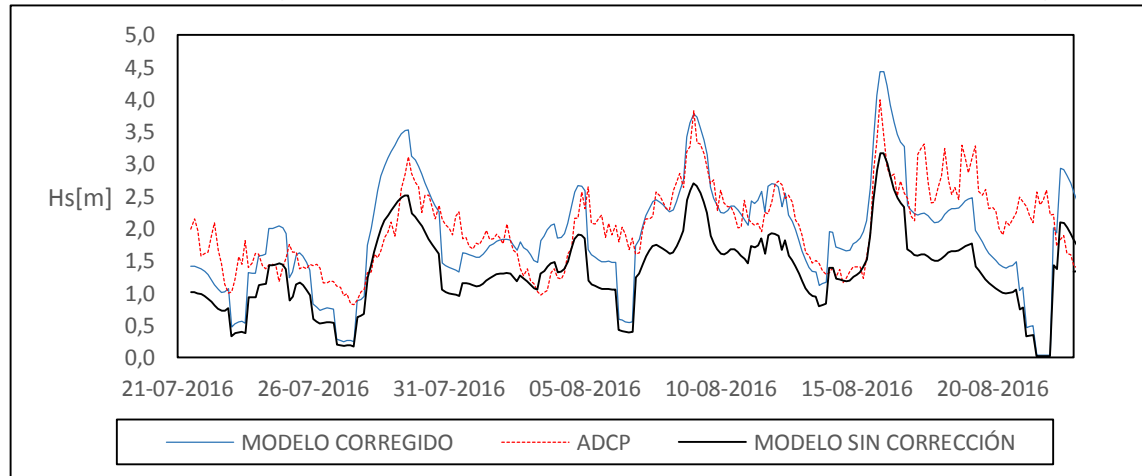
Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS

VALIDACION

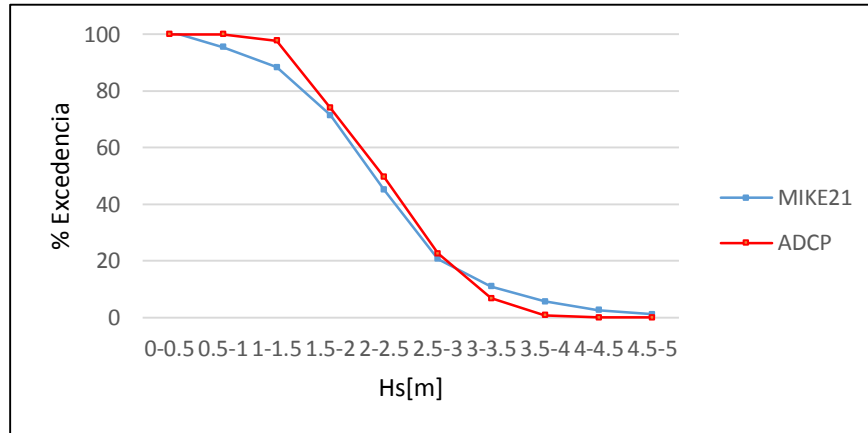
INVIERNO

Comparación registro de oleaje, modelo sin corrección y modelo corregido.



Fuente: Elaboración propia.

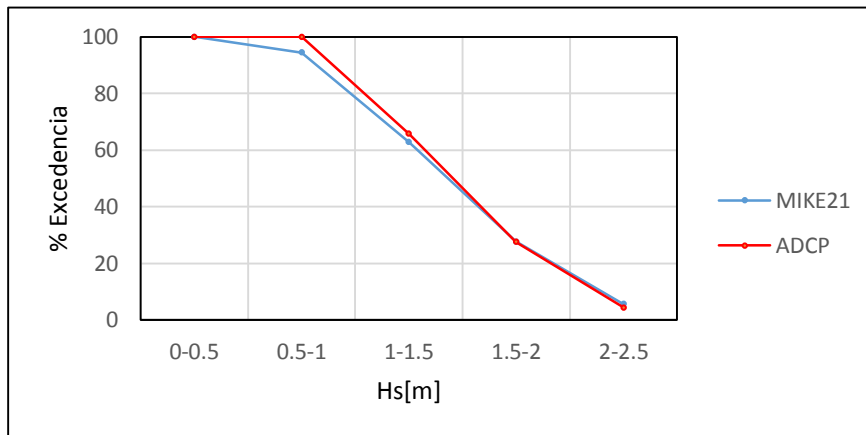
INVIERNO



		MIKE	ADCP	DIF
Hs[m]	Max	4.43	3.99	0.44
	Min	0.03	0.82	0.79
	Promedio	1.91	2.00	0.10
	Desvest	0.85	0.62	0.23
	Percentil 25%	1.01	1.46	0.45
	Percentil 50%	1.33	1.98	0.65
	Percentil 75%	1.69	2.42	0.73
Tp[s]	Max	20.00	20.00	0.00
	Min	8.00	6.00	2.00
	Promedio	13.67	11.49	2.18
	Desvest	2.11	2.21	0.10
	Percentil 25%	12	10.5	1.50
	Percentil 50%	14	10.9	3.10
	Percentil 75%	14	11.4	2.60
Dir[°]	Max	255.45	306.00	50.55
	Min	220.00	216.00	4.00
	Promedio	247.09	244.66	2.43
	Desvest	4.70	13.27	8.56
	Percentil 25%	243.82	236	7.82
	Percentil 50%	245.06	242	3.06
	Percentil 75%	253.47	250	3.47

Fuente: Elaboración propia.

VERANO

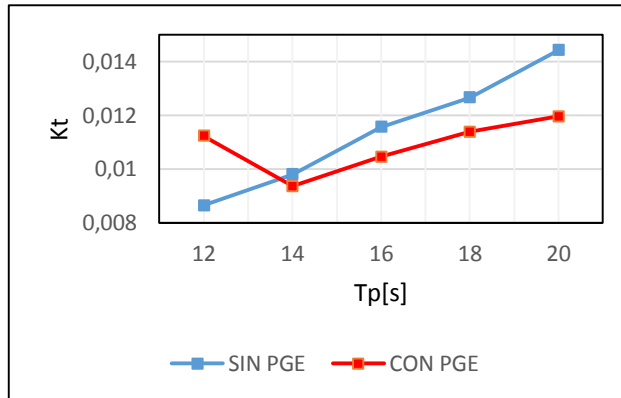


		MIKE	ADCP	DIFERENCIA
Hs[m]	Max	2.26	2.17	0.09
	Min	0.23	0.54	0.31
	Promedio	1.21	1.23	0.02
	Desvest.	0.47	0.41	0.06
	Percentil 25%	0.91	0.89	0.02
	Percentil 50%	1.07	1.14	0.07
Tp[s]	Max	24.00	22.00	2.00
	Min	10.00	2.00	8.00
	Promedio	15.21	12.15	3.06
	Desvest.	2.93	2.78	0.15
	Percentil 25%	14.00	10.60	3.40
	Percentil 50%	14.00	11.40	2.60
Dir[°]	Max	260.24	321.00	60.76
	Min	222.56	197.00	25.56
	Promedio	245.71	255.21	9.49
	Desvest.	10.05	19.19	9.14
	Percentil 25%	247.74	252.00	4.26
	Percentil 50%	247.74	260.00	12.26
Percentil 75%	247.16	284.00	36.84	

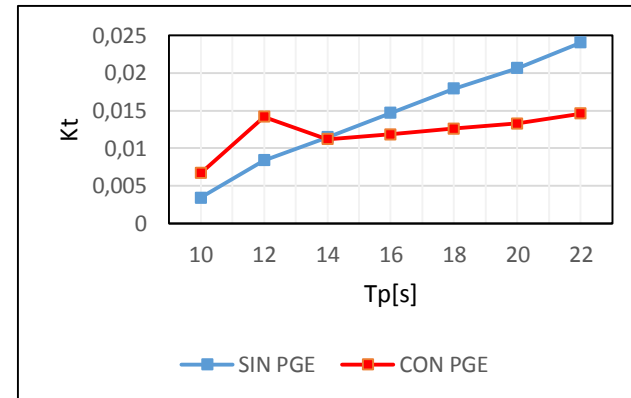
Fuente: Elaboración propia.

COMPARACION COEFICIENTES DE AGITACION

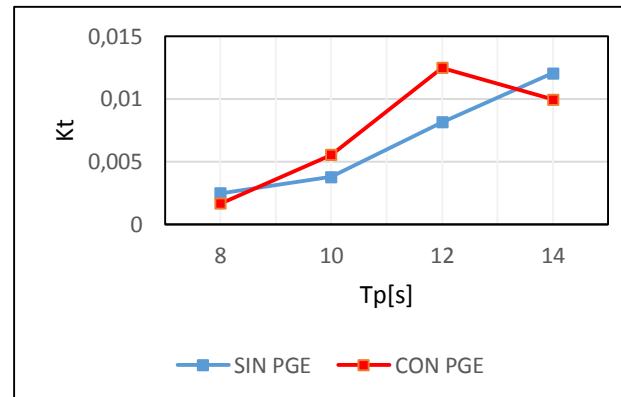
Dirección WNW



Dirección W



Dirección WSW



Fuente: Elaboración propia.

COMPARACION CLIMA DE OLEAJE 1980 A 2016

CONDICION ACTUAL

		Tp[s]									R%	A%	
		8	10	12	14	16	18	20	22	24			Total
Hs[m]	0-0.01	5187	6038	13897	5429	570	215	94	17	20	31467	29.104	100
	0.01-0.02		109	17844	34772	5260	1820	532	64		60401	55.865	70.896
	0.02-0.03			1749	8644	2423	522	88	8		13434	12.425	15.031
	0.03-0.04			203	1293	713	134	11	3		2357	2.180	2.605
	0.04-0.05			21	193	114	49	3			380	0.351	0.425
	0.05-0.06			4	24	29	6				63	0.058	0.074
	0.06-0.07				3	9	4				16	0.015	0.016
	0.07-0.08						1.00				1	0.001	0.001
	Total		5187	6147	33718	50358	9118	2751	728	92	20	108119	
R%		4.797	5.685	31.186	46.576	8.433	2.544	0.673	0.085	0.018		100	
A%		4.797	10.483	41.669	88.245	96.679	99.223	99.896	99.982	100			

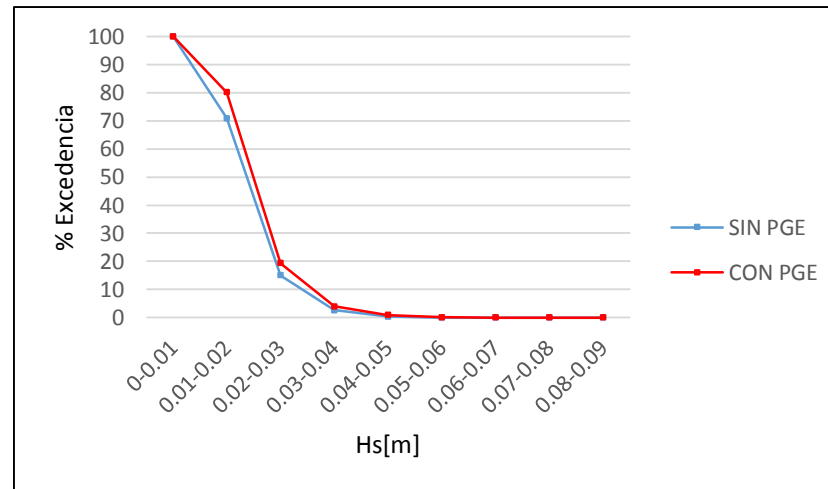
Fuente: Elaboración propia.

CONDICION FUTURA

		Tp[s]										R%	A%
		8	10	12	14	16	18	20	22	24	Total		
Hs[m]	0-0.01	5187	4541	1604	7134	1587	947	407	73	20	21500	19.885	100
	0.01-0.02		1533	22273	34254	5784	1540	309	17		65710	60.776	80.115
	0.02-0.03		71	7154	7630	1498	223	12	2		16590	15.344	19.339
	0.03-0.04		2	1897	1168	210	34				3311	3.062	3.995
	0.04-0.05			616	152	34	6				808	0.747	0.932
	0.05-0.06			137	20	5	1				163	0.151	0.185
	0.06-0.07			25							25	0.023	0.034
	0.07-0.08			9.00							9	0.008	0.011
	0.08-0.09			3.00							3	0.003	0.003
		Total	5187	6147	33718	50358	9118	2751	728	92	20	108119	
	R%	4.797	5.685	31.186	46.576	8.433	2.544	0.673	0.085	0.018		100	
	A%	4.797	10.483	41.669	88.245	96.679	99.223	99.896	99.982	100			

Fuente: Elaboración propia.

COMPARACIÓN EXCEDENCIA ALTURA SIGNIFICATIVA



Fuente: Elaboración propia.

OPERATIVIDAD PUERTECITO

Operatividad en puertos para embarcaciones hasta 20 m de eslora.

LONGITUD DE LA EMBARCACION [m]	INCIDENCIA LATERAL		INCIDENCIA LONGITUDINAL	
	PERIODO [s]	ALTURA Hs [m]	PERIODO [s]	ALTURA Hs [m]
4-10	<2.0	0.20	<2.5	0.20
	2.0-4.0	0.10	2.5-4.0	0.15
	>4.0	0.15	>4.0	0.20
10-16	<3.0	0.25	<3.5	0.30
	3.0-5.0	0.15	3.5-5.5	0.20
	>5.0	0.20	>5.5	0.30
20	<4.0	0.30	<4.5	0.30
	4.0-6.0	0.15	4.5-7.0	0.25
	>6.0	0.25	>7.0	0.30

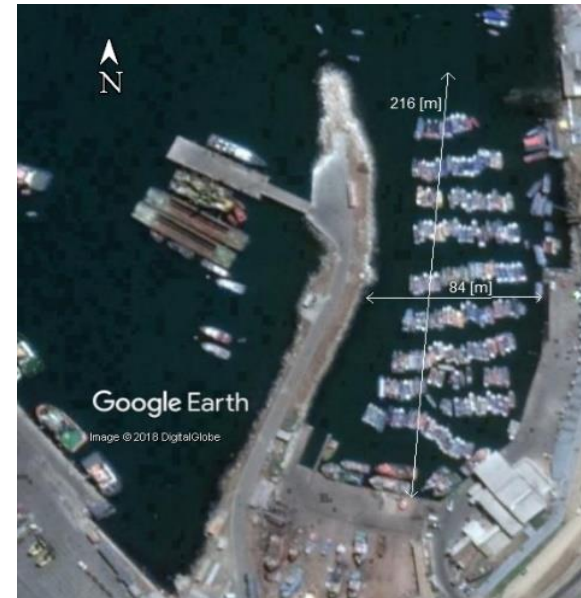
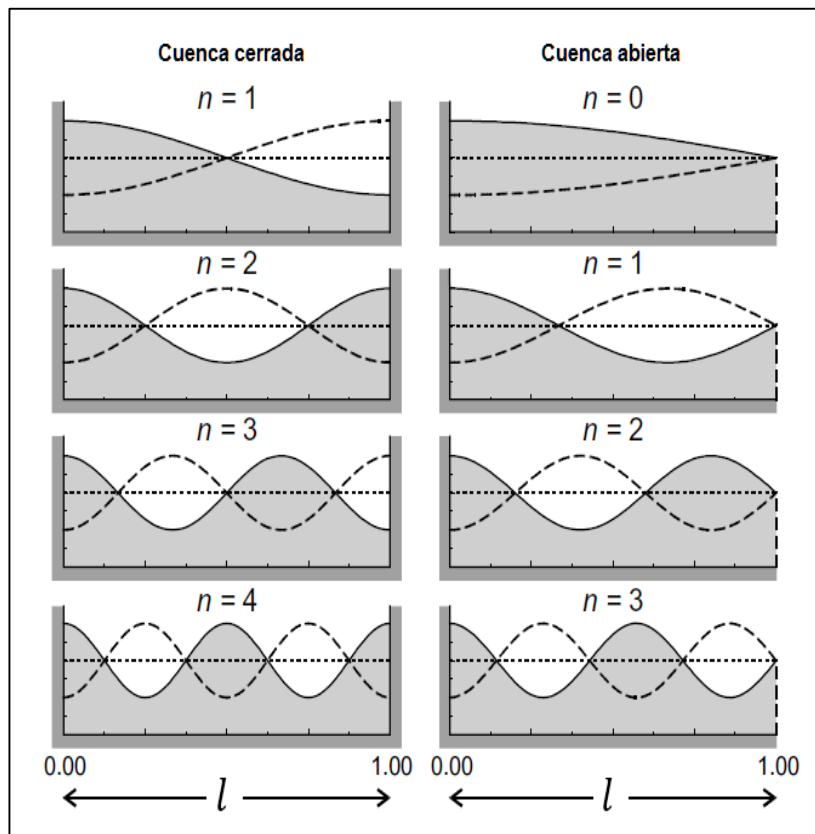
Fuente: PIANC (1995).

ESLORA DE LA EMBARCACION [m]	SIN PGE		CON PGE	
	INCIDENCIA LATERAL	INCIDENCIA LONGITUDINAL	INCIDENCIA LATERAL	INCIDENCIA LONGITUDINAL
	%	%	%	%
4-10	100	100	100	100
10-16	100	100	100	100
20	100	100	100	100

Fuente: Elaboración propia.

MODELO DE RESONANCIA

CALCULO PRELIMINAR MEDIANTE ECUACIONES PARAMETRICAS

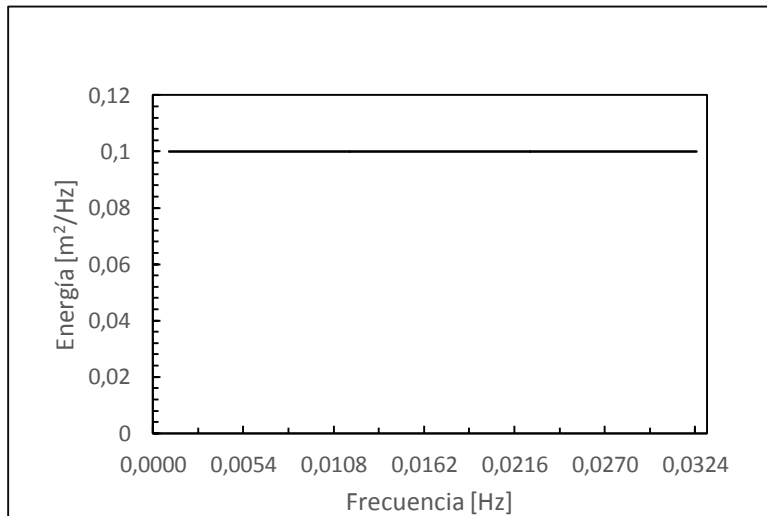


SECCIÓN	PERIODOS NATURALES [s]					
	L	d	T0	T1	T2	T3
Longitudinal abierta	216	3.2	154	51	31	22
Transversal cerrada	84	2.5	-	34	17	11

L: Longitud d: Profundidad
 T0: Periodo Helmholtz T_n: Periodo modo n

Fuente: Elaboración propia.

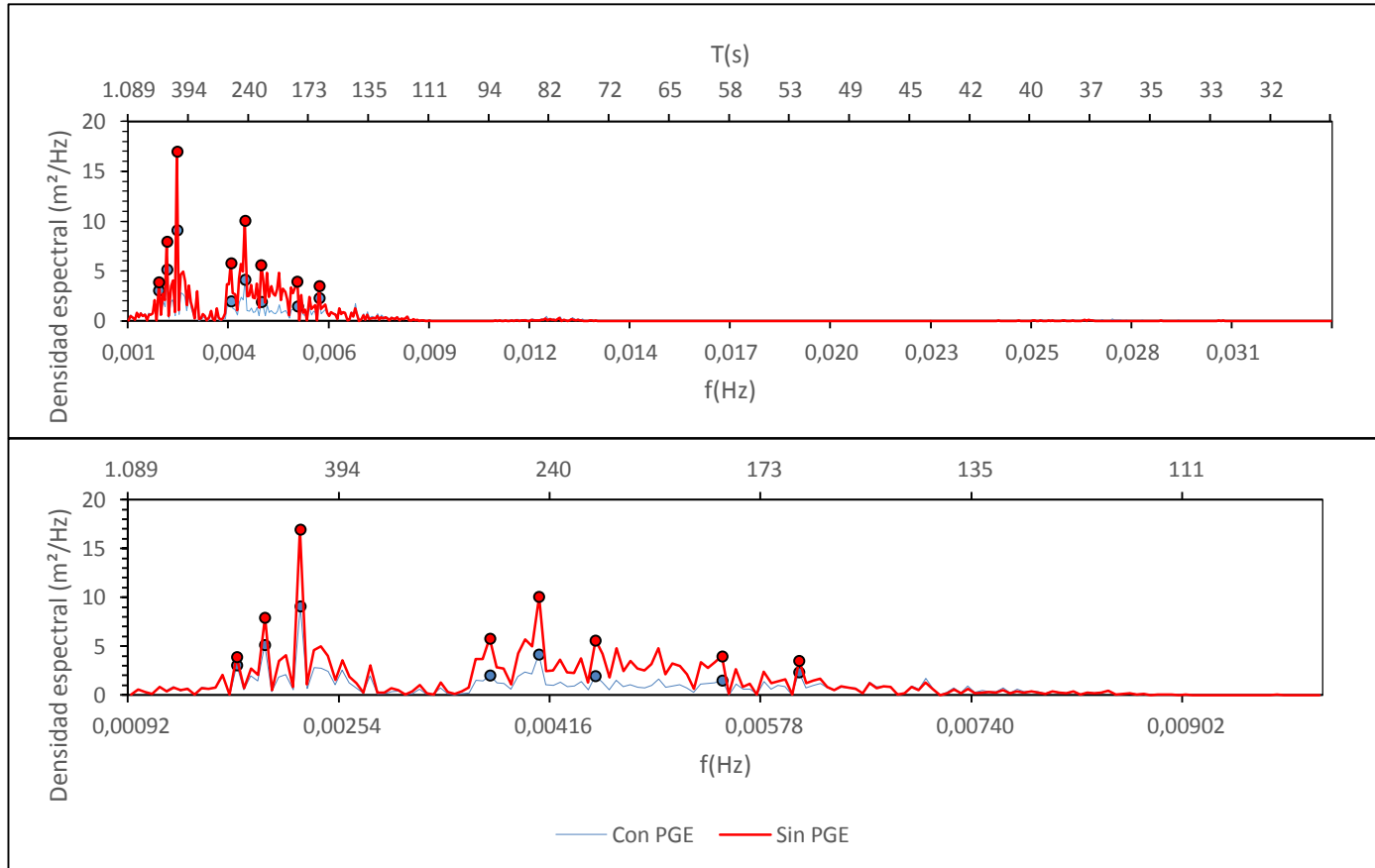
MODELO NUMERICO DE RESONANCIA



Fuente: Elaboración propia.

El espectro de ruido blanco aplicado abarcó períodos de 30 a 1000 s, con una densidad de energía de 0.1 m²/Hz, simulado como ondas unidireccionales desde una paleta de generación ubicada en el borde oeste del modelo batimétrico. El periodo de simulación fue de 4 horas (Ota et al., 2010).

RESULTADOS



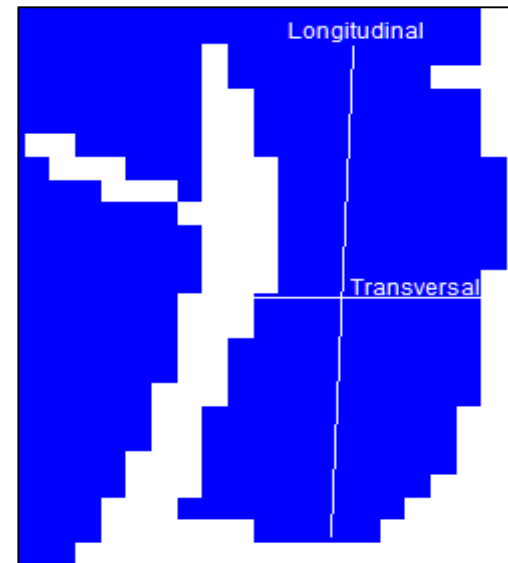
Fuente: Elaboración propia.

Análisis

Bandas de frecuencia

N° de Banda	Rango de frecuencia [Hz]	Rango de periodo [s]
1	0.00091-0.00178	1089-561
2	0.00178-0.00199	561-500
3	0.00199-0.00270	500-370
4	0.00270-0.00383	370-261
5	0.00383-0.00442	261-226
6	0.00442-0.00523	226-191
7	0.00523-0.00599	191-167
8	0.00599-0.033326	167-30

Líneas de extracción



N° PEAK	MODO DE VIBRAR LONGITUDINAL
1	Modo alto, genera elevaciones verticales de la superficie.
2	Modo alto, genera elevaciones verticales de la superficie.
3	Primer modo de vibrar, con una muy baja oscilación, un antinodo en el fondo de la dársena, y nodo fuera de esta. Disminuye su amplitud característica, para el escenario futuro.
4	Segundo modo de vibrar, con una muy baja oscilación, un antinodo en el fondo de la dársena, y nodo fuera de esta. Disminuye su amplitud característica, para el escenario futuro.

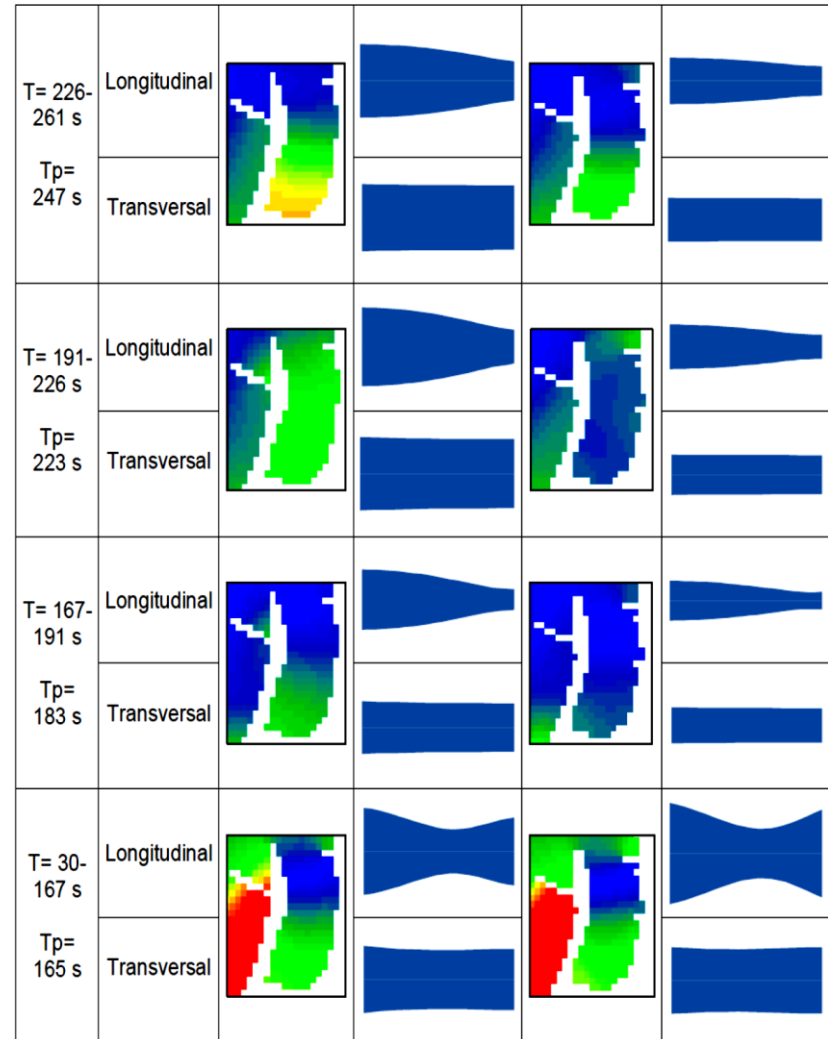
Fuente: Elaboración propia.

Periodo	Sección	Sin PGE		Con PGE	
T= 561-1089 s Tp= 579 s	Longitudinal				
	Transversal				
T= 500-561 s Tp= 514 s	Longitudinal				
	Transversal				
T= 370-500 s Tp= 452 s	Longitudinal				
	Transversal				
T= 261-370 s Tp= 272 s	Longitudinal				
	Transversal				

Fuente: Elaboración propia.

N° PEAK	MODO DE VIBRAR LONGITUDINAL
5	Tercer modo de vibrar, con un antinodo en el fondo de la dársena, y nodo fuera de esta. La dimensión longitudinal de la dársena corresponde aproximadamente a 1/6 de la longitud de onda. Disminuye su amplitud característica, para el escenario futuro.
6	Cuarto modo de vibrar, con un antinodo en el fondo de la dársena, y nodo fuera de esta. La dimensión longitudinal de la dársena corresponde aproximadamente a 1/5 de la longitud de onda. Disminuye su amplitud característica, para el escenario futuro.
7	Quinto modo de vibrar, modo dominante (Helmholtz), con un antinodo en el fondo de la dársena, y nodo en la bocana de esta. Las dimensiones longitudinales de la dársena corresponden aproximadamente a 1/4 de la longitud de onda. Disminuye su amplitud característica, para el escenario futuro.
8	Sexto modo de vibrar, con un antinodo en el fondo, y un nodo dentro de la dársena, aproximadamente a 120 m desde el fondo. La dimensión longitudinal de la dársena es poco menos de 1/4 de la longitud de onda asociada a la frecuencia peak. En los dos antinodos aumenta alrededor de 0,01 m su amplitud característica, para el escenario futuro.

Fuente: Elaboración propia.



Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

OLEAJE CORTO PERIODO

- Leve aumento de un 10% en la excedencia de oleaje entre 1 y 2 cm, un aumento de 4% en excedencia para oleaje entre 2 y 3 cm. El oleaje de mayor altura no sufre variación.
- La operatividad de Puertecito se mantiene en un 100%, ya que se registran alturas máximas de 9 cm.

LONGITUD DE LA EMBARCACION [m]	INCIDENCIA LATERAL		INCIDENCIA LONGITUDINAL	
	PERIODO [s]	ALTURA Hs [m]	PERIODO [s]	ALTURA Hs [m]
4-10	<2.0	0.20	<2.5	0.20
	2.0-4.0	0.10	2.5-4.0	0.15
	>4.0	0.15	>4.0	0.20
10-16	<3.0	0.25	<3.5	0.30
	3.0-5.0	0.15	3.5-5.5	0.20
	>5.0	0.20	>5.5	0.30
20	<4.0	0.30	<4.5	0.30
	4.0-6.0	0.15	4.5-7.0	0.25
	>6.0	0.25	>7.0	0.30

Fuente: Elaboración propia.

OLEAJE LARGO PERIODO

- Aquellos periodos comprendidos entre 500 y 1000 s solo generan una pequeña elevación de la superficie del agua, constante a lo largo y ancho de la dársena.
- Los cuatro primeros modos de oscilación generan dentro de la dársena una oscilación longitudinal con una pequeña amplitud.
- El quinto modo de oscilar genera una oscilación con longitud de onda 4 veces la longitud de la dársena, un nodo en la bocana y un antinodo en el fondo. Este es el modo más dominante y se debe tener especial cuidado, ya que presenta un transporte de masa constante a través de la bocana. Este modo también es conocido como modo Helmholtz y puede provocar efectos resonantes dentro de la dársena.

- El sexto modo oscilante presenta un nodo en los 130 m desde el fondo de la dársena, dos antinodos en la bocana y el extremo opuesto. Este modo de oscilar puede generar resonancia dentro de la dársena.
- Para el escenario futuro las condiciones de oscilación de las ondas largas dentro de la dársena de Puertecito, disminuye su nivel energético para los primeros cinco modos, y aumenta levemente para el sexto modo oscilante, lo que sin embargo se traduce en una diferencia en un rango de milímetros a unos pocos centímetros de amplitud.
- Si bien el método propuesto por Rabinovic (2010), representa un modo práctico para hallar los periodos naturales dentro de la dársena, solo corresponde a una primera aproximación, ya que omite información relevante en los casos en que se presenta una configuración en planta, batimetría y condiciones de borde irregulares.
- El periodo peak del quinto modo de oscilar es cercano al periodo del modo Helmholtz obtenido mediante ecuaciones paramétricas, mientras que los restantes periodos naturales obtenidos con este último método mencionado, se registran en el espectro analizado con una muy baja energía, despreciable en comparación con el resto de los periodos identificados como peaks.

RECOMENDACIONES

- Registrar ondas con periodos sobre 30 s, tanto fuera como dentro del puerto.
- Estudiar el comportamiento de las ondas largas asociadas a grupos de onda que ingresan a la bahía.
- Propagar conjuntamente ondas de corto y largo periodo, para estudiar la transferencia de energía entre estas.
- Realizar propagaciones con distintos niveles de marea, y analizar la sensibilidad de los resultados, tanto para oleaje de corto periodo, como para oleaje de largo periodo.



MUCHAS GRACIAS