



Memoria para optar al Título de  
Ingeniero Civil Oceánico

**“CARACTERIZACIÓN HIDRODINÁMICA Y MORFODINÁMICA DE  
PLAYA BRAVA, IQUIQUE, REGIÓN DE TARAPACÁ, CHILE.”**

Francisca Araya Contreras

DICIEMBRE, 2016

# **“CARACTERIZACIÓN HIDRODINÁMICA Y MORFODINÁMICA DE PLAYA BRAVA, IQUIQUE, REGIÓN TARAPACÁ, CHILE.”**

Francisca Araya Contreras

COMISIÓN REVISORA

NOTA

FIRMA

CRISTIAN FLORES  
Profesor guía

---

---

PATRICIO WINCKLER  
Docente

---

---

LEONARDO RODRÍGUEZ  
Docente

---

---

## DECLARACIÓN

*Este trabajo, o alguna de sus partes, no han sido presentados anteriormente en la Universidad de Valparaíso, institución universitaria chilena o extranjera u organismo de carácter estatal, para evaluación, comercialización u otros propósitos. Salvo las referencias citadas en el texto, confirmo que el contenido intelectual de este Proyecto de Título es resultado exclusivamente de mis esfuerzos personales.*

*La Universidad de Valparaíso reconoce expresamente la propiedad intelectual del autor sobre esta Memoria de Titulación. Sin embargo, en caso de ser sometida a evaluación para los propósitos de obtención del Título Profesional de Ingeniero Civil Oceánico, el autor renuncia a los derechos legales sobre la misma y los cede a la Universidad de Valparaíso, la que estará facultada para utilizarla con fines exclusivamente académicos.*

---

Cristian Flores  
Profesor Guía

---

Francisca Araya  
Alumno Memorista

## **AGRADECIMIENTOS**

Que melancolía poder expresar en algunas líneas lo que ha significado este proceso para mí, ya que es el término de un largo proceso de aprendizaje, tanto valórico como intelectual; en donde aprendí que la palabra “no puedo” no existe, que todo se puede lograr con esfuerzo y apoyo de las personas que nos brindan buenos deseos y sustento.

*Dios tu amor y bondad no tienen fin, me permites sonreír ante todos mis logros que son resultado de tu ayuda, y cuando caigo y me pones a prueba, aprendo de mis errores para poder crecer como persona de diversas maneras.*

Este trabajo de tesis ha sido una bendición en todo sentido, a pesar de las dificultades vividas en este largo proceso, no cesan mis ganas de agradecer a Dios que esta meta ya está cumplida.

Deseo agradecer a mis profesores de comisión, a Cristian Flores, quien me guio durante todo este proceso, agradezco tu dedicación, tiempo y paciencia, pero sobre todo agradezco que hayas creído en mí.

A Patricio Winckler, quien por su amor al mar me cautivo para quedarme en esta linda carrera. Eres una excelente persona y un gran profesional, gracias por ayudarme en todo momento.

A Leonardo Rodríguez, gracias por la ayuda que me has brindado. Eres un gran profesional, pero sobre todo una excelente persona.

Deseo también agradecer a mi familia, a mis padres por haberme forjado como la persona que soy en la actualidad; muchos de mis logros se los debo a ustedes entre los que se incluye éste.

Quiero agradecer a mi padre por los ejemplos de perseverancia y constancia que lo caracterizan y que me ha infundido siempre, por el valor mostrado para salir adelante y por su amor. A mi madre por siempre estar ahí en todo momento, por regalarme una sonrisa en días difíciles y por sobre todo agradezco sus oraciones hacia mí. A ambos los amo, gracias por todo.

A mis hermanos por su apoyo constante e incondicional, gracias por sus oraciones y soporte durante todos estos años. A mis tías por su amor, preocupación y oración.

A mis amigas, quienes me han acompañado en todo momento, a Mariella, Cristina, Francisca, Amanda gracias por sus palabras de aliento y por tanto amor brindado en estos largos años de amistad.

A mis amigos Pablo, Hernán, Richard , Alex y Cindy, gracias por su apoyo, ayuda y comprensión durante este largo proceso que nos ha unido.

A Cristian Santander por su ayuda incondicional y sobre todo por su paciencia, eres una excelente persona. A Gustavo Haffeman por sus palabras precisas en momentos de debilidad y por acompañarme en esta importante etapa.

En especial a mi hermana Anita por su tiempo, dedicación, paciencia, ayuda y amor estaré agradecida de por vida te quiero infinito.

Gracias a todas las personas que de una u otra forma aportaron con su tiempo, dedicación y oraciones. Por estar presente no solo en esta etapa de mi vida, sino en todo momento ofreciéndome lo mejor y buscando lo mejor para mi persona.

*Cada momento vivido durante todos estos años, son simplemente únicos, cada oportunidad de corregir un error, la oportunidad de que cada mañana pueda comenzar de nuevo, sin importar la cantidad de errores y faltas cometidas durante el día anterior, han hecho de este proceso algo inolvidable.*

*Porque las promesas se cumplen, ésta memoria va dedicada con todo mi amor a Cristian  
Marcial Araya, quien vivirá por siempre en mi corazón.*

*Con amor para mis tíos: Marta Araya y David Marcial.*

*“En esta vida es más valorable, ser buenas personas, que buenos profesionales...”*

*Mi padre: Armando Araya O.*

## **CONTENIDOS**

1	INTRODUCCIÓN .....	16
2	OBJETIVOS .....	18
2.1	OBJETIVO GENERAL.....	18
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	18
3	MARCO TEÓRICO .....	19
3.1	OLEAJE .....	19
3.1.1	TEORÍAS DE OLAS .....	20
3.2	MAREA .....	29
3.2.1	MAREA ASTRONÓMICA.....	30
3.2.2	CLASIFICACIÓN DE MAREAS .....	30
3.2.3	ANÁLISIS ARMÓNICO DE MAREAS.....	31
3.3	MORFODINÁMICA DE PLAYAS.....	32
3.3.1	TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.....	33
3.3.2	EQUILIBRIO EN PLAYAS.....	34
3.3.3	ECUACIÓN DE CONTINUIDAD DEL SEDIMENTO .....	37
4	MODELOS NUMÉRICOS .....	38
4.1	MIKE SW.....	39
4.2	MIKE 21 HD .....	40
4.3	MIKE ST .....	42
4.3.1	TRANSPORTE DE FONDO.....	43
4.3.2	TRANSPORTE EN SUSPENSIÓN .....	44
5	APLICACIÓN DE METODOLOGÍA PARA PLAYA BRAVA, IQUIQUE. ....	46
5.1	PLAYA BRAVA .....	46
5.2	SEDIMENTOLOGÍA DE LA PLAYA .....	47
5.3	BATIMETRÍA.....	51
5.4	OLEAJE .....	52
5.4.1	BASE DE DATOS 1: MEDICIÓN DE OLEAJE A TRAVÉS DE ADCP.....	52
5.4.2	BASE DE DATOS 2: HINDCASTING INSITU PREVIO .....	56
5.4.3	BASE DE DATOS 3: ESTIMACIÓN DEL CAMPO DE OLEAJE EN PLAYA BRAVA CON MES DE HINDCASTING .....	64
5.4.4	GENERACIÓN DEL MODELO MIKE 21 SW .....	67

5.5	MAREAS .....	84
5.5.1	MODELO GLOBAL DE MAREA .....	89
5.6	CORRIENTES .....	90
5.6.1	MEDICIÓN DE CORRIENTES.....	90
5.6.2	MODELACIÓN NUMÉRICA DE CORRIENTES.....	98
5.7	MORFODINÁMICA DE PLAYA BRAVA.....	114
5.7.1	PROFUNDIDAD ACTIVA Y PROFUNDIDAD DE CIERRE.....	114
5.7.2	TRANSPORTE GENERAL DE SEDIMENTOS PLAYA BRAVA.....	117
5.8	CARACTERIZACIÓN TEMPORAL DE LINEA DE COSTA.....	136
5.9	SIMULACIÓN DE TORMENTA.....	138
5.9.1	SIMULACIÓN DE TORMENTA, RESULTADOS OLEAJE.....	141
5.9.2	SIMULACIÓN DE TORMENTA, RESULTADOS CORRIENTES.....	141
5.9.3	MODELACIÓN DE RESPUESTA TRANSVERSAL DE LA PLAYA.....	142
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	150
6.1	RESPECTO DE LA CARACTERIZACIÓN DEL MEDIO .....	150
6.2	RESPECTO DEL ESTUDIO DE morfología.....	150
6.3	RECOMENDACIONES GENERALES .....	151
7	BIBLIOGRAFÍA .....	153
8	ANEXOS.....	157

## **LISTA DE TABLAS**

<i>Tabla 5-1: Coordenadas de las muestras de sedimentos</i> .....	48
<i>Tabla 5-2: Identificación de las muestras de acuerdo al lugar de extracción.</i> .....	49
<i>Tabla 5-3: Clasificación textural de las muestras</i> .....	49
<i>Tabla 5-4: Cartas SHOA utilizadas para la confección de Grilla.</i> .....	51
<i>Tabla 5-5: Información ADCP's, campaña 2010.</i> .....	53
<i>Tabla 5-6: Tabla de Incidencia, Altura significativa v/s Dirección, ADCP 25 [m].</i> .....	54
<i>Tabla 5-7: Tabla de Incidencia, Ocurrencia de periodos, ADCP 25 [m].</i> .....	54
<i>Tabla 5-8: Tabla de Incidencia, Ocurrencia de periodos v/s alturas, ADCP 25 [m].</i> .....	54
<i>Tabla 5-9: Tabla de Incidencia Altura de olas v/s Dirección Peak, Nodo de Trabajo.</i> .....	58
<i>Tabla 5-10: Tabla de incidencia Periodo de oleaje v/s Dirección Peak, Nodo de Trabajo.</i> .....	59
<i>Tabla 5-11: Tabla de incidencia Altura de oleaje v/s Periodo, Nodo de Trabajo.</i> .....	59
<i>Tabla 5-12: Comparación de estadísticos de Hs [m], Hindcasting v/s mediciones.</i> .....	63
<i>Tabla 5-13: Comparación de estadísticos de Tp [s], Hindcasting v/s mediciones.</i> .....	63
<i>Tabla 5-14: Comparación de estadísticos de Dpk [°], Hindcasting v/s mediciones</i> .....	64
<i>Tabla 5-15: Tabla de incidencia altura de oleaje v/s dirección, mes de Hindcasting.</i> .....	65
<i>Tabla 5-16: Tabla de incidencia periodo v/s dirección, mes de Hindcasting.</i> .....	65
<i>Tabla 5-17: Descripción de Áreas en el Mallado SW.</i> .....	71
<i>Tabla 5-18: Información general de malla para modelo Mike SW.</i> .....	73
<i>Tabla 5-19: Tabla de incidencia altura de oleaje v/s dirección, datos modelados.</i> .....	77
<i>Tabla 5-20: Tabla de incidencia periodo v/s dirección, datos modelados.</i> .....	77
<i>Tabla 5-21: Valores de constituyentes armónicas, Iquique.</i> .....	85
<i>Tabla 5-22: Tabla de Magnitud de velocidad y dirección, Capa de fondo.</i> .....	92
<i>Tabla 5-23: Tabla de Mag. de velocidad y dirección, Capa Promediada.</i> .....	95
<i>Tabla 5-24: Estadística básica de las componentes ortogonales U y V.</i> .....	97
<i>Tabla 5-25: Descripción de áreas máximas de elementos.</i> .....	102
<i>Tabla 5-26: Información del mallado, para modelo Mike21 HD.</i> .....	103
<i>Tabla 5-27: Tabla de magnitud velocidad y dirección de la corriente, punto 25[m].</i> .....	107
<i>Tabla 5-28: Tabla de incidencia altura significativa [Hs] versus dirección.</i> .....	115
<i>Tabla 5-29 Tabla de incidencia altura significativa [Hs] versus periodo [Tp].</i> .....	115
<i>Tabla 5-30: Valores de profundidad activa y de cierre, Nodo21.</i> .....	117
<i>Tabla 5-31: Porcentaje de incidencia de oleaje del SW.</i> .....	118
<i>Tabla 5-32: Casos a simular en nodo de trabajo.</i> .....	118
<i>Tabla 5-33: Información de malla para modelo de 22 años, Mike SW.</i> .....	120
<i>Tabla 5-34: Información de malla circular para modelo de 22 años, Mike HD.</i> .....	124
<i>Tabla 5-35: Tormentas seleccionadas en análisis extremal.</i> .....	139
<i>Tabla 5-36: Alturas Hs extrémales por periodo de Retorno.</i> .....	139
<i>Tabla 5-37: Calculo de volúmenes.</i> .....	149

## **LISTA DE FIGURAS**

Figura 1-1: Ubicación Iquique.....	16
Figura 1-2: Ubicación Playa Brava, Iquique. ....	17
Figura 3-1: Clasificación de distintas ondas generadas en el océano.....	20
Figura 3-2: Ejemplo de espectro de frecuencia y dirección.....	22
Figura 3-3: Tipos de rompimiento de oleaje.....	26
Figura 3-4: Mapa comareal global.....	31
Figura 3-5: Esquema de Transporte neto y bruto.....	34
Figura 3-6: Perfil de tormenta y perfil de acreción de playas. ....	35
Figura 4-1: Metodología de trabajo en MIKE21, módulos SW, HD y ST.....	38
Figura 5-1: Infraestructuras existentes en zona de estudio.....	47
Figura 5-2: Ubicación de las muestras de sedimentos.....	48
Figura 5-3: Curvas granulométricas promedios para cada zona. ....	50
Figura 5-4: Batimetría de campaña de medición en Playa Brava, Iquique.....	51
Figura 5-5: Batimetría de medición datos zona de rompientes en Playa Brava, Iquique. ....	52
Figura 5-6: Ubicación de ADCP (corriente y oleaje).....	53
Figura 5-7: Histogramas de alturas, ADCP 25 [m]. ....	55
Figura 5-8: Histogramas de periodos, ADCP 25 [m]. ....	55
Figura 5-9: Histogramas de direcciones, ADCP 25[m]. ....	55
Figura 5-10: Rosa de Oleaje, Altura v/s Dirección de oleaje, ADCP 25 [m]. ....	56
Figura 5-11: Ubicación Nodo Iquique, Hindcasting Olas Chile. ....	57
Figura 5-12: Grillas utilizadas para propagación. ....	57
Figura 5-13: Nodos propagados desde aguas profundas. ....	58
Figura 5-14: Histogramas de Alturas, Nodo de Trabajo.....	60
Figura 5-15: Histograma de Periodos, Nodo de Trabajo.....	60
Figura 5-16: Rosa de Oleaje, Altura v/s Dirección de oleaje, Nodo de Trabajo. ....	61
Figura 5-17: Excedencia de alturas de olas Hs [m] transferidas por año v/s medidas. ....	62
Figura 5-18: Promedio de Excedencia de alturas de olas Hs [m] transferidas por año v/s medidas. ....	62
Figura 5-19: Alturas Significativas, Datos Insitu, mes de Hindcasting.....	66
Figura 5-20: Periodos, Datos Insitu, mes de Hindcasting.....	66
Figura 5-21: Direcciones, Datos Insitu, mes de Hindcasting. ....	66
Figura 5-22: Rosa de oleaje, mes de Hindcasting.....	67
Figura 5-23: Corrección temporal de alturas de ola. ....	68
Figura 5-24: Polígonos de restricción de área de elementos, Modelo Mike SW. ....	70
Figura 5-25: Malla numérica de batimetría para modelo Mike SW.....	72
Figura 5-26: Parámetros de elementos para modelo Mike SW.....	73
Figura 5-27: Esquema de ubicación de condiciones de borde.....	75
Figura 5-28: Propagación de estado de mar (14/9/2010).....	76
Figura 5-29: Rosa de oleaje modelado, mes de Hindcasting. ....	78
Figura 5-30: Ajuste datos de alturas significativas ADCP v/s propagadas en Mike 21 SW.....	79
Figura 5-31: Serie de datos de olas modeladas v/s oleaje ADCP 25 [m]. ....	80
Figura 5-32: Serie de datos de periodos modelados v/s periodo ADCP 25 [m]. ....	80
Figura 5-33: Serie de direcciones modeladas v/s direcciones ADCP 25 [m]. ....	81
Figura 5-34: Componentes de Tensores de radiación Sxx (izquierda), Sxy (centro), Syy (derecha). ....	83
Figura 5-35: Marea de Iquique, datos medidos.....	84
Figura 5-36: Significancia al 95% de constituyentes mareales, Iquique.....	86
Figura 5-37: Ajuste de armónicos de curva de marea con respecto al cero instrumental, Iquique...87	87
Figura 5-38: Espectros de nivel del mar, ajuste y medición. ....	87
Figura 5-39: Correlación lineal de medición v/s ajuste.....	88

Figura 5-40: Curva de marea astronómica con respecto al NRS, Iquique. ....	88
Figura 5-41: Residuo de ajuste de marea. ....	89
Figura 5-42: Ruido extraído del ajuste de marea. ....	89
Figura 5-43: Representación de fase y amplitud de la constituyente M2 en el globo. ....	90
Figura 5-44: Diagrama de trazos de datos ADCP. ....	91
Figura 5-45: Histogramas de velocidades y direcciones, rosas de corrientes capa de fondo. ....	93
Figura 5-46: Diagrama de trazos velocidad, capa de fondo. ....	94
Figura 5-47: Diagrama de trazos velocidad, capa promediada. ....	95
Figura 5-48: Histograma de velocidades y direcciones. rosa de corrientes, capa promediada. ....	96
Figura 5-49: Serie de tiempo de magnitudes [cm/s], capa de fondo y capa promediada. ....	98
Figura 5-50: Configuración de polígonos para límite de áreas de elementos, Mike 21 HD. ....	101
Figura 5-51: Modelo de elevación digital, Mike 21 HD. ....	102
Figura 5-52: Parámetros de elementos de modelo de elevación digital, Mike21 HD. ....	103
Figura 5-53: Esquema de ubicación de condiciones de borde. ....	104
Figura 5-54: Resultado modelo hidrodinámico. Área de estudio. ....	106
Figura 5-55: Diagrama de trazos velocidad, capa modelada. ....	108
Figura 5-56: Estadística media de corrientes. Punto 25 [m], corriente modelada. ....	109
Figura 5-57: Magnitud [m/s] y componentes u-v, corriente modelada, punto 25 [m]. ....	110
Figura 5-58: Comparación de magnitudes [cm/s], capa de fondo v/s corriente modelada. ....	111
Figura 5-59: Diagrama de trazos de velocidades, capa de fondo y corriente modelada. ....	112
Figura 5-60: Comparación de magnitudes [cm/s], capa promediada v/s corriente modelada. ....	112
Figura 5-61: Diagrama de trazos de velocidades, capa promedio y corriente modelada. ....	113
Figura 5-62: Distribución de no excedencia de magnitudes del modelo v/s capa promedio. ....	113
Figura 5-63: Ubicación Nodo 21 a los 10 [m] de profundidad. ....	114
Figura 5-64: Ajuste estadística SW, Nodo21. ....	116
Figura 5-65: Ajuste estadística W, Nodo21. ....	116
Figura 5-66: Malla numérica y batimétrica para medio plazo. ....	119
Figura 5-67: Parámetros de elementos para modelo de 22 años, Mike SW. ....	120
Figura 5-68: Distribución de nodos, mallado SW. ....	121
Figura 5-69: Modelación de Oleaje, Mike21 SW. Caso 1. ....	122
Figura 5-70: Malla Circular Batimétrica interpolada, Mike 21 HD. ....	123
Figura 5-71: Parámetros de elementos para modelo de 22 años, Mike SW. ....	124
Figura 5-72: Modelación de corrientes, Mike21 HD. Caso 1. ....	125
Figura 5-73: Análisis imagenes Google Earth. ....	126
Figura 5-74: Simulación de transporte de sedimentos, caudal neto. Caso 1. ....	127
Figura 5-75: Simulación de transporte de sedimentos, caudal neto, carga total. ....	129
Figura 5-76: Distribución de perfiles. ....	130
Figura 5-77: Tramo 1, variación entre perfil 1 y 2, carga total. ....	131
Figura 5-78: Tramo 2, variación entre perfil 2 y 3, carga total. ....	131
Figura 5-79: Tramo 3, variación entre perfil 3 y 4, carga total. ....	132
Figura 5-80: Tramo 4, variación entre perfil 4 y 5, carga total. ....	132
Figura 5-81: Tramo 5, variación entre perfil 5 y 6, carga total. ....	133
Figura 5-82: Tramo 6, variación entre perfil 6 y 7, carga total. ....	133
Figura 5-83: Tramo 7, variación entre perfil 7 y 8, carga total. ....	134
Figura 5-84: Tramo 8, variación entre perfil 8 y 9, carga total. ....	134
Figura 5-85: Tramo 9, variación entre perfil 9 y 10, carga total. ....	135
Figura 5-86: Tramo 10, variación entre perfil 10 y 11, carga total. ....	135
Figura 5-87: Líneas de costa en el tiempo. ....	137
Figura 5-88: Estimación extremal, 3er cuadrante. ....	140
Figura 5-89: Tormenta con peak de Hs = 4.7 [m]. ....	140
Figura 5-90: Simulación de Hs [m]. Periodo de tormenta, playa Brava. ....	141
Figura 5-91: Simulación de corrientes en peak de tormenta, Playa Brava. ....	142
Figura 5-92: Simulación de cambio total de fondo, Playa Brava. ....	143
Figura 5-93: Perfil 1. ....	144

<i>Figura 5-94: Perfil 2.....</i>	<i>144</i>
<i>Figura 5-95: Perfil 3.....</i>	<i>145</i>
<i>Figura 5-96: Perfil 4.....</i>	<i>145</i>
<i>Figura 5-97: Perfil 5.....</i>	<i>146</i>
<i>Figura 5-98: Perfil 6.....</i>	<i>146</i>
<i>Figura 5-99: Perfil 7.....</i>	<i>147</i>
<i>Figura 5-100: Perfil 8.....</i>	<i>147</i>
<i>Figura 5-101: Perfil 9.....</i>	<i>148</i>
<i>Figura 5-102: Perfil 10.....</i>	<i>148</i>
<i>Figura 5-103: Perfil 11.....</i>	<i>149</i>
<i>Figura 8-1: Modelación de Oleaje, Mike21 SW. Caso 1 (izquierda) y Caso 2 (derecha).....</i>	<i>159</i>
<i>Figura 8-2: Modelación de Oleaje, Mike21 SW. Caso 3 (izquierda) y Caso 4 (derecha).....</i>	<i>160</i>
<i>Figura 8-3: Modelación de Oleaje, Mike21 SW. Caso 5 (izquierda) y Caso 6 (derecha).....</i>	<i>161</i>
<i>Figura 8-4: Modelación de Oleaje, Mike21 SW. Caso 7.....</i>	<i>162</i>
<i>Figura 8-5: Salida gráfica por timesteps Mike 21 HD, Caso 1.....</i>	<i>164</i>
<i>Figura 8-6: Salida gráfica por timesteps Mike 21 HD, Caso 2.....</i>	<i>165</i>
<i>Figura 8-7: Salida gráfica por timesteps Mike 21 HD, Caso 3.....</i>	<i>166</i>
<i>Figura 8-8: Salida gráfica por timesteps Mike 21 HD, Caso 4.....</i>	<i>167</i>
<i>Figura 8-9: Salida gráfica por timesteps Mike 21 HD, Caso 5.....</i>	<i>168</i>
<i>Figura 8-10: Salida gráfica por timesteps Mike 21 HD, Caso 6.....</i>	<i>169</i>
<i>Figura 8-11: Salida gráfica por timesteps Mike 21 HD, Caso 7.....</i>	<i>170</i>
<i>Figura 8-12: Simulación de transporte de sedimentos, caudal neto. Caso 1 (izquierda) y Caso 2 (derecha).....</i>	<i>172</i>
<i>Figura 8-13: Simulación de transporte de sedimentos, caudal neto. Caso 3 (izquierda) y Caso 4 (derecha).....</i>	<i>173</i>
<i>Figura 8-14: Simulación de transporte de sedimentos, caudal neto. Caso 5 (izquierda) y Caso 6 (derecha).....</i>	<i>174</i>
<i>Figura 8-15: Simulación de transporte de sedimentos, caudal neto. Caso 7.....</i>	<i>175</i>

## **ABSTRACT**

This document corresponds to the undergraduate project entitled "Hydrodynamics and morphodynamics characterization of Brava Beach, Iquique, Tarapacá Region, Chile." in which three main stages are addressed as follows:

- Validations of Numerical Models.
- Hydrodynamic Analysis.
- Morphodynamic analysis.

Brava Beach is one of the tourist attractions of Iquique. However, due to its natural characteristics, it is not suitable for swimming. For this reason and in order to study its properties, a morphodynamic and hydrodynamic characterization is performed.

Firstly, a characterization of the waves is performed a wave climate analysis is performed for each database, which shows that the waves come mainly from SW with an average height of 1.5 [m] and a period of 13 [s].

Secondly, currents are characterized using the numerical model Mike 21 HD. Result show that in the shoaling zone before the surf zone, there are an average magnitude of 7 [cm/s].

Finally, data provided by the Dirección de Obras Portuarias (DOP) are used for the analysis of the morphology of the beach. These data correspond to a 22 years wave hindcast to the study area. The morphology in long-term period is simulated with the most frequent cases of significant height ( $H_s$ ), Period ( $T_p$ ) and Peak Direction ( $D_{pk}$ ), which are used to quantify the annual net longshore transport rates on the beach. Thus, it is possible to detect the potential erosion and accretion areas along the beach. Also, beach storm response is simulated with an extreme case (a storm) to observe the changes in the bottom.

## **RESUMEN**

El presente documento corresponde al proyecto de título llamado “Caracterización Hidrodinámica y Morfodinámica, Playa Brava, Iquique, Región de Tarapacá, Chile”, en el cual se abordan tres principales etapas, a saber:

- Validación de modelos.
- Análisis hidrodinámico.
- Análisis Morfodinámico.

Playa Brava es una de las atracciones turísticas de Iquique, sin embargo por sus características naturales, no es apta para el baño. Por este motivo se realizó una caracterización hidrodinámica y morfodinámica, con el fin de estudiar sus propiedades físicas.

En una primera instancia se realizó una caracterización del oleaje en el sector estudiado, llevando a cabo un análisis de clima medio para cada base de datos. Se aprecia que el oleaje proviene principalmente del Sur-Oeste (en adelante SW) con una altura significativa media de 1,5 [m] y un periodo de 13 [s].

En una segunda instancia, se realizó una caracterización de las corrientes del sector, utilizando el modelo numérico Mike 21 HD, a partir de la cual se concluye que fuera de la zona de corriente hay una magnitud media de 7 [cm/s].

Finalmente, para el análisis de la morfología de la playa, se optó por utilizar los datos proporcionados por la Dirección de Obras Portuarias (DOP), correspondientes a un hindcasting de 22 años propagados hacia aguas someras. De esta forma se analizó la morfología a largo plazo (utilizando el oleaje más frecuente), con el objetivo de cuantificar a través de la simulación numérica los transportes longitudinales promedios en la playa, detectando así los sectores de cambios y equilibrio en la línea de costa. Adicionalmente, en un análisis de corto plazo, se modeló la variación del fondo de la playa para una condición extrema, identificando zonas erosionadas de acumulación de arenas.

# 1 INTRODUCCIÓN

Como introducción se puede definir playa como “*la acumulación de sedimento no consolidado (arena, grava o canto rodado) que se sitúa entre la línea de máximo alcance del oleaje en temporal y pleamar viva y una profundidad que corresponde a la zona donde deja de producirse un movimiento activo de sedimentos debido a la acción del oleaje*” (Komar, 1976).

La extensa costa chilena posee múltiples configuraciones de playas y una cantidad considerable de éstas corresponden a playas largas. Por ejemplo, la playa Cucao ubicada en la Región de los Lagos, Chile, está compuesta por arena gruesa, mientras que la playa Las Torpederas de la Región de Valparaíso, Chile, se caracteriza por ser una playa encajonada, ya que está protegida naturalmente por rocas del sector.

De acuerdo a Directemar la mayoría de las playas en su estado natural no son aptas para el baño, pues, “*no permiten su utilización en condiciones seguras*” (Ronald Hira, 1987). Lo anterior se debe a la presencia de fuertes corrientes en la zona, por lo que se requiere de intervenciones antrópicas para su uso.

“*Actualmente, las playas son uno de los elementos más valorados de la costa de nuestro país*” (INE, 2004), lo que ha propiciado que en ellas se realicen muchas intervenciones, de las cuales, un gran número genera importantes problemas de gestión en esta franja del territorio. “*En los últimos años, Chile ha invertido en las costas, generando más espacios recreacionales, como por ejemplo, playas artificiales, donde se refleja un crecimiento para el turismo del país*” (Dirplan, 2009).



**Figura 1-1: Ubicación Iquique**  
**Fuente: Google Earth.**



Dado lo anterior surge la idea de generar un estudio sobre playas largas, analizando de manera hidrodinámica y morfodinámica, la Playa Brava, ubicada en la ciudad de Iquique.

La Región de Tarapacá (Figura 1-1) es una de las zonas más concurridas por turistas, pues cerca de 24.500 personas visitan este lugar cada año (Instituto Nacional de Estadísticas, 2011). Iquique, su capital, también posee una gran atracción debido a sus playas (INE, 2010).



**Figura 1-2: Ubicación Playa Brava, Iquique.**  
**Fuente: Google Earth.**

El presente Proyecto de Título se enfoca en el análisis de Playa Brava, área que está expuesta al oleaje, turbulencias y corrientes en la zona de rotura. *“De acuerdo al conocimiento previo, estas dinámicas, no permiten el nado y por lo tanto, es calificada como no apta para el baño”*(Directemar, 2010).

Playa Brava está ubicada en la ciudad de Iquique, ubicada en la Tarapacá, Chile; cuyas coordenadas son 381156.35 m E y 7760446.61 m S (Figura 1-2).

El análisis numérico se basa en las diversas modelaciones numéricas utilizando el software MIKE 21; los módulos SW, HD y ST, los cuales para los fines esperados proporcionan la información necesaria para realizar una caracterización de la playa estudiada.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GENERAL**

El objetivo general de la presente memoria de título es caracterizar la hidrodinámica y morfodinámica de Playa Brava, ubicada en Iquique, Región de Tarapacá, Chile. Para ello se analiza su comportamiento bajo condiciones reinantes (medio plazo) y dominantes (largo plazo).

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Investigar y recopilar antecedentes de playas largas, incluyendo: morfología, corrientes, olas y marea.
- Caracterizar el clima de oleaje, la hidrodinámica y la morfología en el balneario de Playa Brava.
- Modelar la hidrodinámica y morfodinámica de la zona de estudio para condiciones de largo y corto plazo.
- Calibrar y validar los resultados de las modelaciones.
- Realizar un análisis de sensibilidad de los resultados obtenidos.
- Describir el funcionamiento del área de estudio bajo diferentes condiciones naturales.

### **3 MARCO TEÓRICO**

En el presente ítem se introducen conceptos básicos de series de tiempo para dar así una interpretación al oleaje incidente, hidrodinámica y morfodinámica del sector.

#### **3.1 OLAJE**

El oleaje es el principal agente climático causante de la dinámica litoral. Éste es generado por el viento al soplar sobre una superficie de mar que produce una transmisión de energía del aire al agua, dando lugar a la formación de oleaje que se propaga aún fuera de su área de generación.

La superficie de agua donde actúa el viento generador de oleaje se denomina Fetch y el oleaje generado en el área de aguas someras se denomina oleaje tipo SEA, el cual se caracteriza por la más variada gama de alturas y periodos de ola. Al salir estas olas del área de generación se produce un efecto de reagrupamiento entre las diferentes ondas. Este tipo de oleaje es conocido como oleaje SWELL o mar de fondo y es caracterizado por frentes de olas bien definidos.

Como se aprecia en la Figura 3-1, existen otros mecanismos que aportan energía al mar y que son de diferente naturaleza, como lo son perturbaciones meteorológicas, terremotos, atracción planetaria, etc.

Las ondas se pueden clasificar dependiendo de su periodo (Olivas, 2007) y varían en un rango que fluctúa entre 1 y 30 [s] como se observa en la Figura 3-1.

Para describir un estado de mar<sup>1</sup>, puede optarse por métodos un estadístico o espectral. El primero define distintas propiedades a partir del registro de posición de la superficie libre, éstas son tratadas como variables aleatorias, el segundo a diferencia agrupa y estudia el oleaje como un fenómeno energético al cual pueden aplicarse metodologías espectrales y estudiarlo en su conjunto.

Dentro de la clasificación de profundidad relativa del oleaje existen tres tipos: aguas someras (el oleaje interacciona con el fondo); aguas intermedias (el oleaje recién comienza a interactuar con el fondo); y aguas profundas (el oleaje no interactúa con el fondo). Para mayor información ver G.I.O.C.(2000<sup>a</sup>).

---

<sup>1</sup> Es un registro de oleaje consiste en una sucesión de posiciones de la superficie libre tomadas en un máximo de 3 horas un mismo punto fijo.

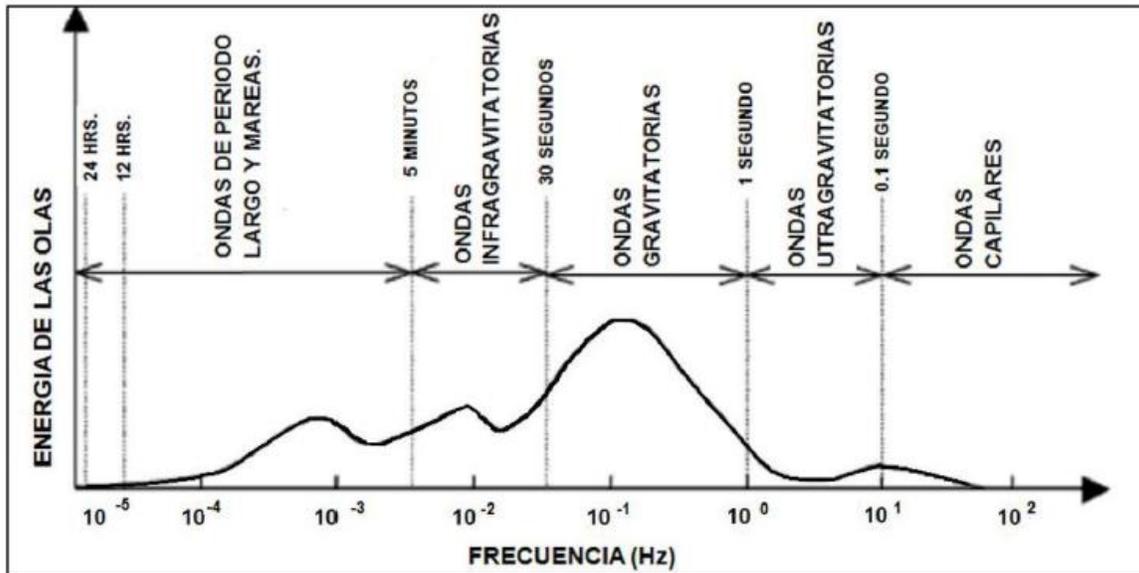


Figura 3-1: Clasificación de distintas ondas generadas en el océano.  
Fuente: Kinsman, (1965).

### 3.1.1 TEORÍAS DE OLAS

La manera más sencilla de comprender el oleaje es considerándolo como una onda sinusoidal; de esta manera su perfil puede ser explicado por una función progresiva; ya sea seno o coseno, con una amplitud igual a la mitad de la altura de ola, como se muestra en la Ecuación 1.

$$\eta(x,t) = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t)$$

Ecuación 1

Donde:

- H : Altura de la ola.
- x : Coordenada espacial.
- t : Tiempo.
- L : Longitud de la onda.
- k : Numero de onda.
- $\omega$  : Frecuencia angular.

Las teorías de oleaje se pueden clasificar en lineales y no lineales. La teoría lineal del oleaje (TLO) desarrollada por Airy en 1845, es una formulación fácil de aplicar con una aproximación razonable de las características de la ola y con una amplia gama de parámetros (C.E.M., 2002). Esta teoría puede ser deducida a partir de una función potencial de velocidad  $\Phi(x, z, t)$ .

$$u = \frac{d\Phi}{dx} \quad w = \frac{d\Phi}{dz}$$

**Ecuación 2**

Donde:

$\Phi$  : Potencial de Velocidad  
 $w$  : Velocidad en z [m/s]  
 $u$  : Velocidad en x [m/s]

Dentro del grupo de teorías de olas, existen otros tipos tales como la teoría de Stokes y la teoría C-noidal, las cuales no se analizarán en esta memoria. Para mayor información, revisar G.I.O.C (2000a).

### 3.1.1.1 CARACTERIZACIÓN ESTADÍSTICA DEL OLAJE

La estadística de oleaje es empleada sobre un registro de olas, donde se representa gráficamente la data a estudiar. Uno de los parámetros que se analizan es el periodo de ola (T), el cual se define como el tiempo transcurrido entre dos cruces consecutivos por un nivel medio del mar (NMM), ascendiendo o descendiendo; otra variable es la altura de la ola (H) la cual se define como la distancia vertical entre un seno y una cresta. La dirección de la ola, es otro parámetro importante en el análisis del oleaje, pues representa de donde proceden las ondas. Para mayor detalle ver G.I.O.C. (2000a).

La superficie del mar tiene variaciones estadísticas según escalas temporales y espaciales, por lo que, dependiendo del objetivo en estudio, el análisis estadístico del oleaje se clasifica en tres tipos: *corto, mediano y largo plazo* (G.I.O.C., 2000a), (Silva,2005).

### 3.1.1.2 DEFINICIÓN ESPECTRAL DEL OLAJE

Otro método para representar la desnivelación de la superficie del mar, es el espectro de oleaje, el cual corresponde a la distribución de energía de una sucesión de armónicos que representan la desnivelación instantánea del estado de mar. De esta forma la dirección y la frecuencia del oleaje definen un espectro de oleaje direccional. La serie de armónicos se presenta en la Ecuación 3:

$$\eta(t) = \sum a_j \cos(\omega_j t - \phi_j)$$

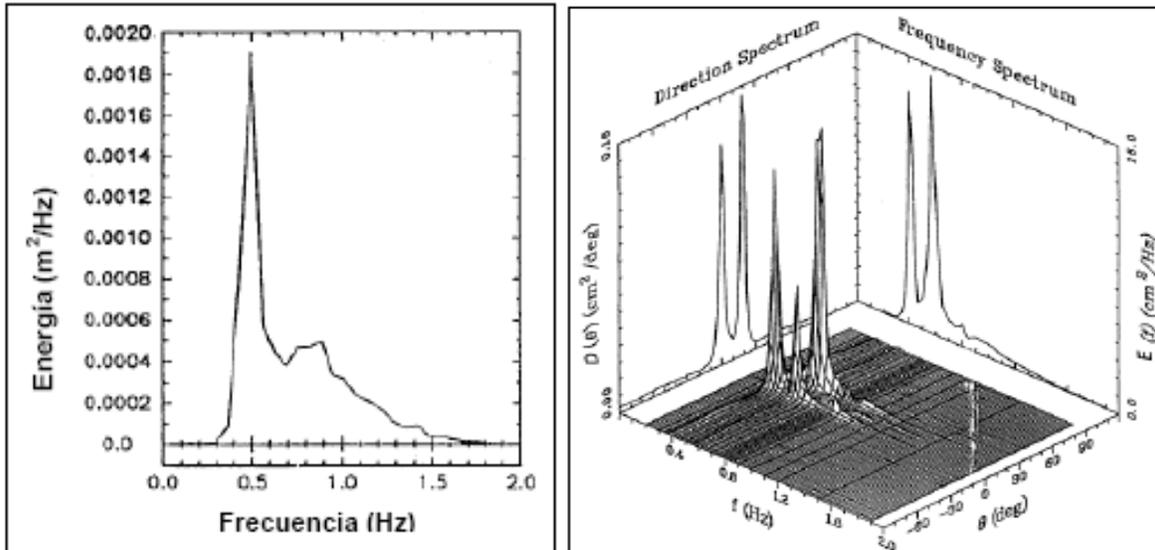
**Ecuación 3**

Donde:

$a_j$  : Amplitud en componente j.  
 $\omega_j$  : Frecuencia de componente j.  
 $\phi_j$  : Desfase de componente j.

El espectro es una de las formas más habituales y completas de describir las propiedades del oleaje irregular. Éste caracteriza la energía, la frecuencia y dirección de propagación y describe cómo la energía se reparte sobre un rango de frecuencias y direcciones. La distribución de energía ( $m^2/H_z$ ) en el dominio de frecuencias se representa por el espectro

de frecuencias, mientras que la distribución de la energía en el dominio de la dirección se representa por la función de dispersión direccional (G.I.O.C, 2000a).



**Figura 3-2: Ejemplo de espectro de frecuencia y dirección**  
**Fuente: Coastal Engineering Manual (1995).**

Los espectros son utilizados para caracterizar los estados de mar (G.I.O.C, 2000a). Dentro de los más utilizados están:

- Espectro Pierson Moskowitz
- Espectro TMA
- Espectro JONSWAP

### 3.1.1.2.1 ESPECTRO JONSWAP

El espectro Joint North Sea Wave Project (JONSWAP) está basado en una campaña de mediciones realizada en el Mar de Norte entre 1968 y 1969. En la Ecuación 4 se observa la expresión dependiente de los parámetros de altura de ola del momento de orden cero  $H_{m0}$  y periodo peak  $T_p$ :

$$S(f) = \alpha H_{m0}^2 T_p^{-4} f^{-5} \exp[-1.25(T_p f)^{-4}] \gamma \exp\left[-\frac{(T_p f - 1)^2}{2\sigma^2}\right]$$

**Ecuación 4**

Donde:

$$\alpha \approx 0.0624 / [0.23 + 0.0336 \gamma - 0.185(1.9 + \gamma)^{-1}]$$

$$\sigma \approx 0.07, \text{ para } f \leq f_p \text{ y } \sigma \approx 0.09, \text{ para } f > f_p$$

$\gamma$  entre 1 y 7, con una media de 3.3.

### 3.1.1.3 TRANSFERENCIA ESPECTRAL DEL OLAJE

El viento al soplar sobre la superficie del mar transmite parte de su energía, generando olas y corrientes. Las olas se propagan en un abanico de direcciones en torno a una dirección principal. A la traslación de las olas por la superficie se le conoce como propagación y su importancia radica en determinar las características del oleaje cuando este se aproxima a las costas. A medida que el oleaje se acerca a la costa, el efecto del fondo comienza a notarse (G.I.O.C ,2000a).

Los procesos de transformación fundamentalmente son variaciones en la altura de ola, periodo y dirección de propagación. Las alteraciones más comunes que sufre el oleaje son: refracción, difracción, reflexión, shoaling y rompimiento, entre otras (G.I.O.C, 2000a).

Por tratarse de una playa abierta, en el presente estudio, los fenómenos que dominan la propagación de oleaje son *shoaling* y *refracción*.

### 3.1.1.4 SHOALING (ASOMERAMIENTO)

Al aproximarse a la costa, la profundidad disminuye, lo que se traduce en una disminución de la celeridad de grupo. Que induce cambios en su altura y longitud de onda (USACE, 1984).

Por lo tanto, si tenemos una onda que se propaga de una profundidad mayor  $d_2$  con altura de ola  $H_2$  a una profundidad  $d_1$  con altura de ola  $H_1$ , esta onda tendrá un cambio en su altura y periodo, (Ecuación 5)

$$H_1 = H_2 \sqrt{\frac{C_{g2}}{C_{g1}}}$$

**Ecuación 5**

De esta forma, el coeficiente de Shoaling,  $K_s$ , se define como la raíz de las celeridades de grupo. (Ecuación 6):

$$K_s = \frac{H_1}{H_2}$$

**Ecuación 6**

El Coeficiente de Shoaling con respecto a aguas profundas, se define en la Ecuación 7:

$$K_s = \frac{1}{\sqrt{2n \tanh \frac{2\pi d}{L}}}$$

**Ecuación 7**

Donde:

$$n = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right)$$

d : Profundidad

L : Longitud de onda

### 3.1.1.5 REFRACCIÓN

La refracción produce un cambio en su dirección y velocidad de propagación, y en consecuencia de la altura de la ola.

La refracción se debe tanto al efecto del fondo como a la presencia de una corriente, la que puede producir un retraso de parte del frente de ola con el siguiente cambio de dirección (G.I.O.C., 2000a).

El flujo medio de energía contenido entre dos rayos ortogonales, en el tren de ondas provenientes de aguas profundas, está dado por la siguiente expresión:

$$\bar{P}_0 = \frac{1}{2} b_0 \bar{E}_0 C_0$$

**Ecuación 8**

Donde:

$b_0$  : Ancho entre ortogonales de aguas profundas

$\bar{E}_0$  : Energía media en aguas profundas

$C_0$  : Celeridad en aguas profundas

La media del flujo de energía en aguas intermedias está dada por la Ecuación 9:

$$\bar{P} = nb\bar{E}C$$

**Ecuación 9**

Donde:

b : Ancho entre ortogonales en aguas intermedias

$\bar{E}$  : Energía media en aguas intermedias

C : Celeridad en aguas intermedias

El primer término de la Ecuación 10, es conocido como el coeficiente de asomeramiento ( $k_s$ ), el segundo término de la ecuación corresponde al coeficiente de refracción ( $k_r$ ):

$$\frac{H}{H_0} = \sqrt{\frac{E}{E_0}} = \sqrt{\frac{C_0}{C} \frac{1}{n} \frac{1}{2}} \sqrt{\frac{b_0}{b}} = K_s \cdot K_r$$

**Ecuación 10**

Donde:

H : Altura en aguas intermedias

H<sub>0</sub> : Altura en aguas profundas

La Ecuación 10 permite determinar las alturas de olas en aguas intermedias o someras.

El cambio de la dirección está relacionado con la variación de la celeridad de la fase a través de la ley de Snell (Ecuación 11).

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{L_1}{L_2} ; \therefore \frac{\sin \alpha_1}{C_1} = \frac{\sin \alpha_2}{C_2} = \text{constante}$$

**Ecuación 11**

Donde:

α<sub>1</sub> : Ángulo del frente de ola respecto al veril en sitio 1.

α<sub>2</sub> : Ángulo del frente de ola respecto al veril en sitio 2.

### 3.1.1.6 ROTURA DEL OLEAJE

Cuando un tren de ondas se propaga en profundidades decrecientes, el aumento del peralte y la disminución en la celeridad de la onda hacen que el perfil de la misma vaya cambiando. En una cierta profundidad, la altura de la ola se vuelve muy esbelta, pues pierde estabilidad y rompe disipando energía. En otras palabras, este fenómeno ocurre cuando el perfil de la ola se vuelve inestable y las partículas se desprenden de la misma. Cuando la velocidad de las partículas, en la parte superior de la cresta, supera la celeridad de la onda, las partículas escapan de la cresta, produciéndose la rotura de la onda (USACE, 1984).

Se usa el número de Iribarren I<sub>r</sub>, como descriptor del tipo de rotura. Si β es la pendiente del fondo, la expresión queda como sigue:

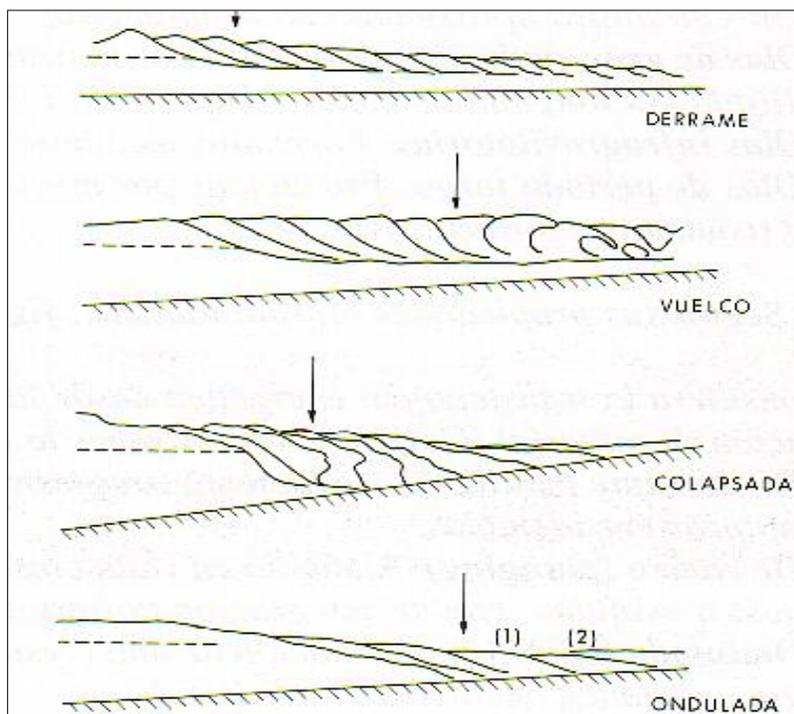
$$I_r = \frac{\tan \beta}{\sqrt{\frac{H_0}{L_0}}}$$

**Ecuación 12**

Donde:

- $\beta$  : Ángulo de pendiente de fondo
- $H_0$  : Altura en profundidad indefinida
- $L_0$  : Longitud en profundidad indefinida

El número de Iribarren define el tipo de rotura que tendrá al interactuar el oleaje con el fondo. En la Figura 3-3, se señala los tipos de rompientes. Para una mayor definición de las roturas, ver G.I.O.C, (2000a).



**Figura 3-3: Tipos de rompimiento de oleaje**  
**Fuente: González, (1995).**

De acuerdo a las definiciones vistas anteriormente, Galvin (1968) y Batjjes (1974) establecieron los límites de los tipos de rompiente:

Spilling	$\epsilon_0 < 0.5$	$\epsilon_b < 0.4$
Plunging	$0.5 < \epsilon_0 < 3.3$	$0.4 < \epsilon_b < 2.0$
Surging	$\epsilon_0 > 3.3$	$\epsilon_b > 2.0$

Para el desarrollo de la ecuación de rompimiento el software de oleaje MIKE21 utiliza la fórmula de rompimiento de Batjjes y Janssen (1978), la cual se observa en Ecuación 13.

$$S_s(f,\theta) = -\frac{2\alpha_{BJ}Q_b\bar{f}}{X}E(f,\theta)$$

**Ecuación 13**

Donde:

- $\alpha_{BJ}$  : Coeficiente constante  $\approx 1.0$   
 $Q_b$  : Fracción de olas de rompiente.  
 $\bar{f}$  : Frecuencia promedio.  
 $X$  : Ratio del total de energía dentro de la ola, definido por:

$$X = \frac{E_{tot}}{\left(\frac{H_m^2}{8}\right)} = \left(\frac{H_{rms}}{H_m}\right)$$

**Ecuación 14**

Con:

- $E_{tot}$  : Total de energía de la ola.  
 $H_m$  : Altura máxima.  
 $H_{rms}$  :  $\sqrt{8E_{tot}}$

En aguas poco profundas, la máxima ola significativa puede ser calculada como:

$$H_m = \gamma d$$

**Ecuación 15**

Donde  $\gamma$  varía desde 0.5 a 1, dependiendo de la pendiente de la playa y los parámetros del oleaje, y  $d$  es la profundidad.

Batjies y Stive (1985) propusieron un nuevo parámetro de rotura, el cual considera una pendiente más débil, la cual se puede observar en la Ecuación 16:

$$\gamma = 0.5 + 0.4 \tanh 33s_0$$

**Ecuación 16**

Donde:

- $s_0 = \frac{H_0}{L_0}$  : Pendiente de la ola en aguas profundas.

Ruessink et al (2003), presenta una forma empírica para  $\gamma$ , determinada como el producto la ola local  $k$  y la profundidad  $d$ .

$$\gamma = 0.76kd + 0.29$$

**Ecuación 17**

La Ecuación 17, puede ser usada en zonas de rompiente en playas cerradas y planas. Para mayor información ver Manual MIKE 21 SW.

### 3.1.1.7 SETUP, SETDOWN Y TENSOR DE RADIACIÓN

En la rotura del oleaje se producen varios fenómenos, siendo uno de ellos el Setdown el cual es la disminución de energía en la zona de asomeramiento previa a el rompiente y el Setup que es el incremento del nivel del agua entre la rompiente y la línea de costa.

*“El Setup proporciona un gradiente de presión y velocidad que balancea la componente en dirección a la costa del tensor de radiación. El Setdown se produce justo antes de que el oleaje rompa, en la zona donde éste tiene su transformación más evidente en su altura y energía.”* (Olivas, 2007).

El tensor de radiación S, se define como el exceso de flujo de momentum, debido a la presencia del oleaje con componentes  $S_{xx}$ ,  $S_{yy}$  y  $S_{xy}$ ,  $S_{yx}$ , donde por ejemplo  $S_{xx}$  es el momentum en la dirección x, normal al plano yz, etc. Es decir,  $S_{xx}$  y  $S_{yy}$  son esfuerzos normales y  $S_{xy}$ , y  $S_{yx}$ , son esfuerzos cortantes por exceso de presión, a través de la columna de agua lo que da como resultado una fuerza por unidad de longitud.

Para el desarrollo del presente estudio, el tensor de radiación será utilizado como forzante en el modelo hidrodinámico y tendrá asociadas las siguientes componentes:

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

**Ecuación 18**

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

**Ecuación 19**

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

**Ecuación 20**

Donde:

$$f_{pp} = \int_0^{2\pi\infty} \int_0^{\infty} \left(1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd}\right) E(f,\theta) df d\theta$$

$$f_{u,2} = \iint_{00}^{2\pi\infty} \cos 2 \left( \frac{3}{2} \pi - \theta \right) \left( 1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right) E(f, \theta) df d\theta$$

$$f_{uv} = \iint_{00}^{2\pi\infty} \cos \left( \frac{3}{2} \pi - \theta \right) \sin \left( \frac{3}{2} \pi - \theta \right) \left( 1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right) E(f, \theta) df d\theta$$

$$f_{v,2} = \iint_{00}^{2\pi\infty} \sin 2 \left( \frac{3}{2} \pi - \theta \right) \left( 1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right) E(f, \theta) df d\theta$$

El tensor de radiación tienen influencia sólo donde cambian las condiciones del oleaje y de la profundidad. Cuando las olas se aproximan a la costa, los parámetros cambian debido al asomeramiento, a la refracción, la difracción, la rotura y a los consecuentes cambios en los tensores de radiación. De la misma manera, los cambios de momentum en dirección a la costa están balanceados por los desplazamientos en el nivel medio del agua, el Setdown y el Setup (Olivas, 2007)

Cuando el tensor de radiación no mantiene un valor constante a lo largo de todo su eje de acción, en especial en la zona de rompiente, se calcula el gradiente dado por la Ecuación 21 y la Ecuación 22.

$$\tau_x = -\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} - \frac{\partial S_{xy}}{\partial y}$$

**Ecuación 21**

$$\tau_y = -\frac{\partial S_{xy}}{\partial x} - \frac{\partial S_{yy}}{\partial y}$$

**Ecuación 22**

### 3.2 MAREA

La marea es uno de los fenómenos más regulares que se presenta en el Océano. Deben su origen principalmente a la atracción gravitacional que ejercen la luna y el sol sobre la Tierra y originan más del 98 % de las variaciones del nivel del mar. El movimiento de la marea produce variaciones de la fuerza gravitacional resultante en la superficie terrestre que, al mezclarse con forzantes de tipo meteorológico producen desnivelaciones características del nivel del mar (Sepúlveda, 2010).

Según el SHOA (Servicio Hidrografico Oceanografico de la Armada de Chile) (1992), la marea es definida como: *“el ascenso y descenso rítmico y alternado de la superficie del océano (o nivel del agua) y de los cuerpos de agua conectados con el océano, tales como: estuarios, golfos y canales, que ocurren dos veces al día sobre la mayor parte de la tierra y*

*que resultan de la atracción gravitacional de la luna y en menor grado de la del sol, actuando desigualmente sobre partes diferentes de la tierra en rotación”.*

### 3.2.1 MAREA ASTRONÓMICA

La marea astronómica se define como la oscilación periódica del nivel del mar incitada por fuerzas gravitacionales que actúan sobre las partículas de agua en la superficie de los océanos (Arce, 2014).

El análisis de armónicos se basa en el conocimiento de que la marea observada está formada por un grupo de constituyentes armónicas cuyos periodos son conocidos, los cuales coinciden con los periodos de algunos movimientos astronómicos relativos entre tierra-sol-luna. Newton en 1687, establece que: *“toda partícula material del universo atrae a cualquier otra partícula con una fuerza directamente proporcional al producto de las masas de ambas partículas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa”*, es decir:

$$F_f = \frac{GM_T * M_{SL}}{d^2}$$

**Ecuación 23**

Donde:

$M_T$  : Masa de la Tierra.

$M_{SL}$  : Masa de la Luna o el Sol.

$G$  : Constante de Gravitación Universal.

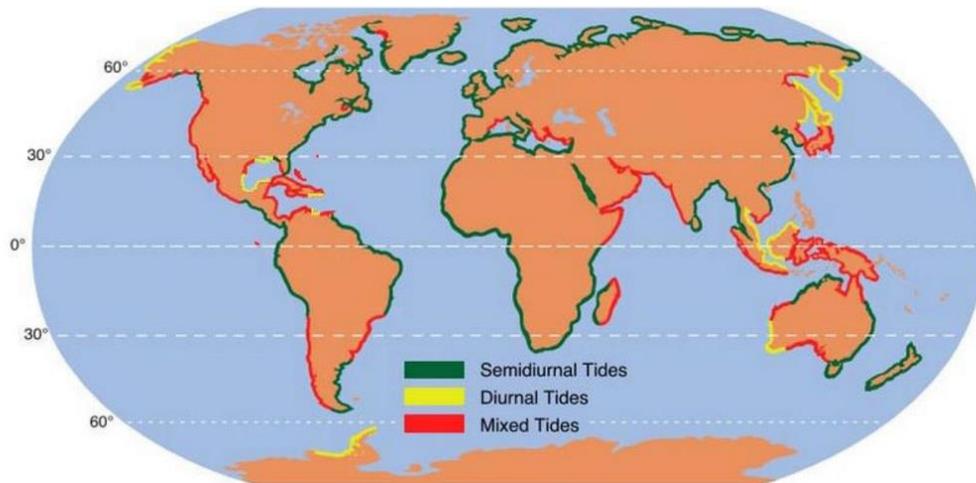
$d^2$  : Distancia media entre los centros de masa de ambos astros.

Esta fuerza actúa en la línea que une a ambas partículas y, está dirigida hacia la partícula que ejerce la atracción. En el sistema solar los planetas y satélites presentan movimientos orbitales anuales y mensuales en torno a un centro de gravedad común, donde experimentan fuerzas centrífugas que son proporcionales a sus masas al cuadrado, de sus velocidades angulares y a los radios orbitales (Arce, 2014).

### 3.2.2 CLASIFICACIÓN DE MAREAS

La forzante astronómica de la marea, produce un desnivel en que la altura mayor es llamada pleamar y la menor bajamar. La diferencia entre ellas es la amplitud de la marea para regímenes semidiurnos.

De este modo los regímenes de mareas varían en diversas partes del mundo. Se conocen tres ciclos mareales, un régimen semidiurno, uno diurno y uno mixto, el cual es la mezcla de los regímenes anteriores, y es el que se presenta en Chile. La distribución mundial de regímenes de marea se puede ver en la Figura 3-4.



**Figura 3-4: Mapa comareal global.**

Fuente: <http://www.physicalgeography.net/fundamentals/8r.html>.

### 3.2.3 ANÁLISIS ARMÓNICO DE MAREAS

La marea se descompone según sus constituyentes armónicas de frecuencia, con una fase y amplitud desconocida.

En la presente memoria se utilizó el análisis armónico para determinar la amplitud y fase de las constituyentes armónicas Playa Brava. Dentro de las técnicas utilizadas, existe la de los mínimos cuadrados sobre una base de datos finitos de los niveles del mar. Para evitar que las constituyentes calculadas sean alteradas, se realiza una corrección nodal, la cual consiste en correcciones a la fase y a la amplitud de la marea, quedando como indica la ecuación 24:

$$\eta(t) = \sum_{i=1}^N A_i(t) a_i \cos(\omega_i t + f_i + F_i(t))$$

**Ecuación 24**

Donde:

- $\eta(t)$  : Nivel del mar
- $\omega_i$  : Frecuencia angular de la constituyente.
- $a_i$  : Amplitud de la constituyente i.
- $f_i$  : Fase de la constituyente i.
- $A_i(t)$  : Corrección de amplitud de la constituyente i.
- $F_i(t)$  : Corrección de la fase de la constituyente i.

El movimiento lunar y solar respecto a la tierra viene dado por 6 periodos o ciclos, de los cuales se difieren todas las constituyentes astronómicas que posee la marea (IDEAM, 2010).

Las constituyentes diarias son las primeras en identificarse, ya que están presentes a lo largo de 24 horas, debido a los días solar y lunar. En el presente estudio, para analizar las mareas se utilizó el código T\_tide (Foreman, 1977), el que supone un total de 45 constituyentes armónicas para considerar de manera directa en el equilibrio de la marea (Sepúlveda, 2010).

### **3.3 MORFODINÁMICA DE PLAYAS**

Existe una variedad de costas y diversas configuraciones morfológicas del litoral de nuestro país. Entre las que se encuentran las “zonas bajas deposicionales”, las cuales se generan cuando la cantidad de material disponible sobrepasa el volumen de sedimentos que las olas y las corrientes litorales son capaces de desplazar, acumulándose de esta forma cierto volumen de arena (G.I.O.C, 2000a). Esto da origen a playas que constituyen áreas de disipación de la energía del oleaje en las cuales se presentan fenómenos hidrodinámicos necesarios de estudiar.

Komar (1976) define playa como la acumulación de sedimento no consolidado (arena, grava o canto rodado) que se sitúa entre la línea de máximo alcance del oleaje en temporal y pleamar viva, y una profundidad que corresponde a la zona donde deja de producirse un movimiento activo de sedimentos debido a la acción del oleaje (Martínez, 2005).

Los materiales que forman la playa están constituidos por sedimentos que pueden abarcar, desde arenas muy finas hasta gravas o cantos rodados. Las características del material constitutivo dependen de las condiciones e intensidad del oleaje y de los materiales que forman parte de las zonas aledañas.

Generalmente, una playa posee en forma constante una zona sumergida o también llamada “surf zone” la cual tiene una menor pendiente.

Existen diversos tipos de playas, las rocosas, abiertas y cerradas. La playa en estudio corresponde a una playa abierta.

Las playas largas como Playa Brava, están directamente afectadas por las dinámicas litorales, como lo son la corriente y el oleaje. Debido a esto, su funcionamiento hidrodinámico está afecto tanto al transporte longitudinal como transversal de sedimentos.

Las playas sufren cambios topobatimétricos bajo la acción del oleaje, corrientes y viento. Los modelos de evolución de playas integran todas o algunas de estas dinámicas con el objetivo de predecir su evolución. El perfil de éstas cambia constantemente como respuesta a los cambios del transporte transversal de sedimentos que produce la dinámica costera, especialmente el oleaje. Los cambios más notorios son los asociados a los desplazamientos de las barras y el avance o retroceso de la berma. Entre las múltiples formas posible de perfil de una playa existen dos formas extremas las cuales se denominan perfil disipativo y reflejante (USACE, 2003).

### 3.3.1 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

Los sedimentos de las playas son movilizados generalmente por la rotura del oleaje, ya sea a lo largo de la costa o en forma perpendicular a ella. Las corrientes litorales dentro de la zona de rompiente del oleaje, son más importantes que las corrientes generadas por marea u otros en el transporte de sedimentos.

El transporte de sedimentos es el proceso litoral de mayor relevancia en la evaluación de proyectos de regeneración o erosión de playas, pues es en la zona de rompiente donde se determinará su estabilidad. En el sector de rotura es donde ocurre el mayor movimiento de sedimentos los cuales quedan en suspensión o son transportados hacia alguna dirección, sea transversal u longitudinal (Olivas, 2007).

#### 3.3.1.1 TRANSPORTE LONGITUDINAL

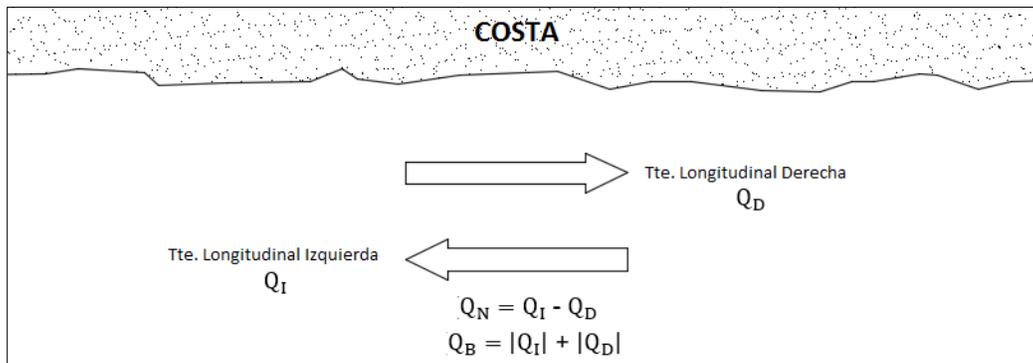
Se define transporte longitudinal de sedimento al desplazamiento a lo largo de la playa del material sedimentario. Éste es el responsable de la mayoría de los cambios morfodinámicos de las playas a largo plazo, gracias a los cuales, se pueden obtener indicios de la dirección del transporte longitudinal de sedimentos.

Este tipo de transporte se debe a tres mecanismos de generación, el principal de ellos es la variación del ángulo de incidencia del oleaje, ya que bajo a él, se presentan las mayores corrientes longitudinales (Olivas, 2007).

Un parámetro importante dentro del transporte longitudinal de sedimentos es la profundidad activa, la cual por definición, es aquella zona donde el transporte longitudinal tiende a cero. Su determinación depende principalmente de la altura de ola  $H_{S0.137}$  que corresponde a la altura de la misma que es superada sólo doce horas al año (G.I.O.C, 2000a). En el acápite 3.3.2, se profundizará sobre este término.

##### 3.3.1.1.1 CONCEPTO DE TRANSPORTE NETO Y BRUTO

Como se mencionó anteriormente, la variación del ángulo de incidencia es diverso, lo que repercute en que el transporte longitudinal exista en ambas direcciones a lo largo de una playa. El transporte es direccional tanto hacia izquierda o derecha ( $Q_I$  o  $Q_D$  respectivamente). En relación a lo expuesto anteriormente se consideran los siguientes conceptos: 1) El Transporte Neto  $Q_N$  como la diferencia entre el transporte derecho e izquierdo, el cual cuantifica el caudal de transporte total en un sentido a lo largo de la playa ( $Q_N = Q_I - Q_D$ ), y 2) El Transporte Bruto  $Q_B$  el cual es la suma del caudal de las arenas en movimiento para cada dirección, y cuantifica el movimiento total de los transportes ( $Q_B = |Q_I| + |Q_D|$ ). Estos se esquematizan en la Figura 3-5.



**Figura 3-5: Esquema de Transporte neto y bruto.**  
Fuente: Elaboración propia.

### 3.3.1.2 TRANSPORTE TRANSVERSAL

El transporte transversal de sedimentos corresponde al movimiento de partículas que se agitan en forma perpendicular a la línea de costa.

El transporte transversal está asociado a diferentes fenómenos que tienen lugar cerca del perfil de playa. Los agentes dinámicos que actúan en el litoral son principalmente el viento, el oleaje y las mareas. Ellos suministran energía al territorio costero, la cual es causante de los cambios del perfil. El oleaje generado por el viento y que se propaga hacia la playa, es considerado como la principal fuente de energía. (G. I. O. C., 2000a).

El principal fenómeno causante del movimiento de las arenas es la rompiente, debido a la gran disipación de energía existente en el tramo de rotura del oleaje. Las olas pueden alcanzar la costa con una gran cantidad de energía, teniendo así potencial para causar daños. La playa al ser sometida al oleaje reduce su pendiente total, alejando de esta forma la zona de rotura y aumenta así la disipación del oleaje antes que alcance la orilla.

El comportamiento estacional de las playas está totalmente vinculado con el transporte transversal. Éste es el encargado de enriquecer de arena la zona alta de la playa durante el verano y, empobrecerla en invierno, generando de esta forma barras de arena a lo largo del perfil de la playa.

Las fuerzas movilizadoras pueden clasificarse en arrastre o sustentación. Las fuerzas de arrastre son paralelas al lecho, en dirección a la corriente; éstas se originan principalmente por tres motivos: 1-La fricción viscosa del fluido sobre la partícula y 2-La diferencia de presión entre el lado de la partícula sobre el que incide la corriente (sobrepresión) y el lado sobre el que no incide (subpresión).

### 3.3.2 EQUILIBRIO EN PLAYAS

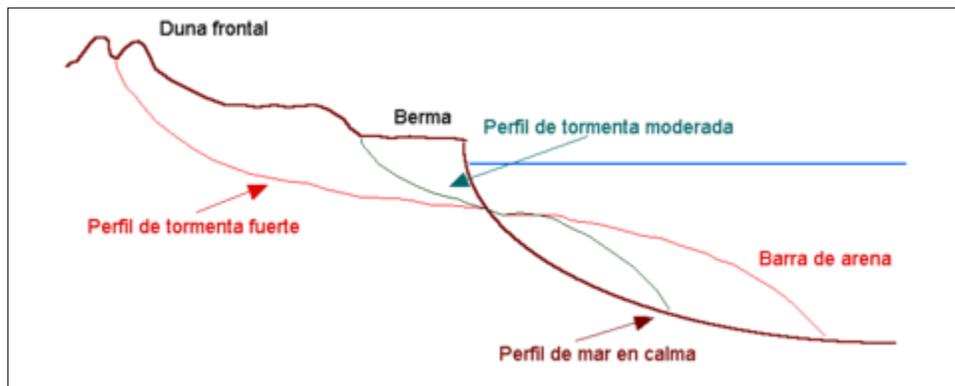
El objetivo del análisis a largo plazo es determinar las variaciones que presenta la playa, tanto en su forma de planta, perfil y en el estado morfodinámico; este objetivo tiene el fin de verificar que la funcionalidad de la playa se cumpla adecuadamente (por ejemplo: defensa de costa en invierno o uso lúdico en verano).

La evaluación de los fenómenos que ocurren en esta escala de tiempo presenta serias dificultades dado que su escala es demasiado grande para utilizar modelos de procesos (ola a ola), y demasiado pequeña para poder asumir que se ha alcanzado un equilibrio en ciertos fenómenos (González, 1995). En lo que sigue, se realiza una revisión de las posibles vías existentes para el análisis de:

- Perfil
- Planta
- Estado morfodinámico modal estacional

### 3.3.2.1 EQUILIBRIO EN PERFIL

Una de las características del perfil de la playa es su variabilidad estacional con erosión en su parte emergida y acumulación de la zona sumergida en invierno y en verano.



**Figura 3-6: Perfil de tormenta y perfil de acreción de playas.**  
**Fuente: Adaptado de Hattersley y Foster (1968).**

Si bien no existe ninguna formulación que permita estimar la variabilidad invierno - verano de la línea de costa, como criterio general, se puede decir que:

- Es mayor cuanto mayor sea la variabilidad de los oleajes incidentes.
- Es mayor cuanto mayor sea la profundidad de cierre.
- Es mayor en estados morfodinámicos intermedios que en estados reflejantes o disipativos.

El perfil de una playa se define como el nivel del terreno formado por los sedimentos a lo largo de la recta normal a la línea de costa. Es un perfil dinámico, pues se encuentra en interacción principalmente con oleaje.

Se pueden identificar varias zonas en un perfil de playas, sin embargo para el desarrollo de la presente memoria, nos enfocaremos en:

- Playa Seca: *“Es definida por la parte superior de la berma activa (zona de playa seca en la que los fenómenos de la dinámica litoral dejan de actuar. Solo puede ser afectada por el viento u otro tipo de agente erosivo) y la línea de costa”.* (Olivas,2007).

- Zona de rompientes: *“Definida entre el punto de rotura y la profundidad de cierre. La profundidad de cierre se define como el punto de la playa en donde no se produce movimiento de sedimentos, es decir, a partir de donde los fenómenos englobados en la dinámica litoral no actúan”.* (Olivas,2007).

Para calcular la profundidad de cierre, es necesario considerar varios factores, tales como: oleaje, corrientes, nivel medio del mar, etc.

Se asume que el perfil de costa activo debe extenderse más allá de la profundidad activa ( $d_1$ ) y al menos, hasta la profundidad máxima conocida como profundidad de cierre máxima del perfil. Hallemeier en el año 1978 obtuvo una formulación para la profundidad activa para arenas de cuarzo.

En 1985, Birkermeier utilizó la formulación de Hallemeier, donde corrigió algunos datos, originando la Ecuación 25:

$$d_1 = 1.75 H_{s,0.137} - 5.79 \left( \frac{H_{s,0.137}^2}{gT_s^2} \right)$$

**Ecuación 25**

Donde:

$H_{s,0.137}$  : Altura de ola significativa con una frecuencia de excedencia de 0.137% al año (12 horas año).

$d_1$  : Profundidad activa.

$T_s$  : Periodo significativo.

Según CUR (1987), para un espectro tipo JONSWAP se puede suponer Ecuación 26:

$$\sqrt{\frac{H_s}{gT_s^2}} = 7,1 \cdot 10^{-2}$$

**Ecuación 26**

Sustituyendo estas aproximaciones en la fórmula de Hallemeier (1978), se obtiene:

$$d_1 = 1,95 \text{ a } 2 H_{s,0.137}$$

**Ecuación 27**

La profundidad activa se resume a Ecuación 28:

$$\frac{2\pi d_1}{L} = \text{arc sinh} \left( \frac{\pi H_{s50}}{T \sqrt{8\rho_s g D_{50}}} \right)$$

**Ecuación 28**

Donde:

T: Periodo de oleaje.

$D_{50}$ : Diámetro promedio.

$\rho_s$ : Densidad del grano.

G: Gravedad.

CUR (1987) simplificó la Ecuación 28 y propuso la expresión:

$$d_i = 2d_1 = 3.5H_{s,0.137}$$

**Ecuación 29**

Donde :

$d_i$ : Profundidad activa.

### 3.3.3 ECUACIÓN DE CONTINUIDAD DEL SEDIMENTO

Para la evaluación en los cambios de niveles del fondo se debe determinar la razón  $\frac{\partial z}{\partial t}$ . Este parámetro se puede obtener de modo general a través de la ecuación de Continuidad del Sedimento (Ecuación de Exner) la cual viene dada por la Ecuación 30:

$$-(1-p)\frac{\partial z}{\partial t} = \frac{\partial S_x}{\partial x} + \frac{\partial S_y}{\partial y} - \Delta S$$

**Ecuación 30**

Donde:

p: Porosidad

z: Nivel de fondo

t: Tiempo

$S_x$ : Transporte en el eje x

$S_y$ : Transporte en el eje y.

$\Delta S$ : Razón de sumidero o fuente de sedimentos.

En este estudio, la evaluación del transporte de sedimentos se realizó a través de modelos numéricos descritos en el ítem 4. Para lo cual se utilizó una porosidad del sedimento con un valor del 40% ( $p=0.4$ ).

Para el área de estudio no se consideraron fuentes externas ni sumideros de sedimentos, por lo tanto en la práctica de este estudio el termino  $\Delta S$  es considerado nulo ( $\Delta S=0$ ).

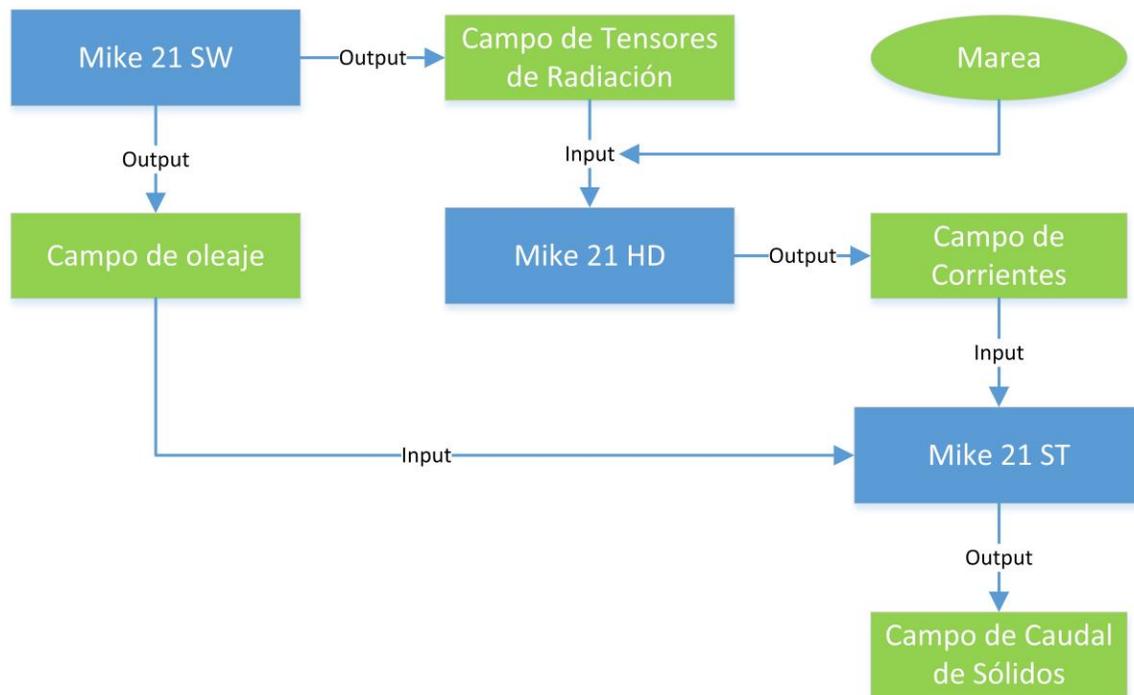
## 4 MODELOS NUMÉRICOS

Con el desarrollo de nuevas metodologías para simular el oleaje, se han presentado modelos que se basan en la función de densidad espectral y balance de energía, permitiendo así el cálculo de su propagación hasta aguas someras. Por otro lado, existen modelos que sin emplear la función de densidad espectral permiten tener en cuenta el aporte de energía debido al viento (López, 2004).

Para el desarrollo de las propagaciones del oleaje existen los siguientes métodos:

- *Modelos espectrales* (modelos que promedian la fase).
- *Modelos no espectrales* (modelos que resuelven la fase).

“El software MIKE21 es un grupo de subprogramas que en conjunto constituyen un ambiente de trabajo que permiten el modelado bidimensional de flujos costeros y fenómenos de transporte de sedimentos. Este software es un desarrollo del “Danish Hydraulic Institute” (DHI, Dinamarca), el cual incluye una serie de subrutinas que permiten digitalizar y modelar batimetrías irregulares, así como tener un eficiente manejo de entrada de datos y salidas gráficas de los resultados. Como esquema numérico el software utiliza la técnica de las diferencias finitas, con la cual resuelve las ecuaciones de movimiento y conservación de masa” (Zurita, 2005).



**Figura 4-1: Metodología de trabajo en MIKE21, módulos SW, HD y ST.**  
**Fuente: Elaboración Propia.**

Con la metodología de la Figura 4-1, se obtuvieron las tasas de cambio del nivel de fondo, debido al transporte de sedimento ocasionado por las corrientes generadas por la marea y oleaje provenientes del modelo MIKE 21 SW y MIKE 21 HD.

#### 4.1 MIKE SW

MIKE 21 SW es un modelo espectral de tercera generación que simula el crecimiento, el decaimiento, la transformación de las olas generadas por el viento en alta mar y las zonas costeras. Resuelve la ecuación de balance de la acción del oleaje espectral formulado en coordenadas cartesianas o esféricas.

El modelo incluye el crecimiento de las olas por la acción del viento, la interacción de onda no lineal y la disipación de White-capping de rompiente.

MIKE21 SW, utiliza un mallado triangular, el cual varía a medida que cambia la profundidad (se utilizan triángulos mayores en zonas de aguas profundas y menores en áreas de interés).

La discretización de tiempo puede ser aplicada como cuasi-estacionario o no estacionario. En el modo cuasi-estacionario el tiempo es removido como variable independiente, por lo que los parámetros calculados por el modelo no dependen del tiempo. Con lo anterior, una solución de estado estacionario se calcula en cada paso de tiempo utilizando el procedimiento iterativo Newton-Raphson en el dominio del tiempo (DHI, 2014).

Las ecuaciones de gobierno corresponden a las ecuaciones de balance. A continuación se describen en coordenadas cartesianas.

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

**Ecuación 31**

Donde:

$N(\vec{x}, \sigma, \theta, t)$	: Densidad de acción.
$t$	: Tiempo.
$\vec{x}=(x,y)$	: Coordenadas cartesianas.
$\vec{v}=(c_x, c_y, c_\sigma, c_\theta)$	: Celeridad de propagación del grupo de olas cuadrimensional.
$\sigma, \theta, y S$	: Fuente de energía para la ecuación de balance.
$\nabla$	: Operador diferencial en cuatro dimensiones en el espacio $(\vec{x}, \sigma, \theta)$ .

Las características de las cuatro celeridades de propagación están dadas por:

$$(c_x, c_y) = \frac{d\vec{x}}{dt} = \vec{c}_g + \vec{U}$$

**Ecuación 32**

$$c_{\sigma} = \frac{d\sigma}{dt} = \frac{\partial\sigma}{\partial d} \left[ \frac{\partial d}{\partial t} + \vec{U} \cdot \nabla_{\vec{x}} d \right] - c_g \vec{k} \cdot \frac{\partial \vec{U}}{\partial s}$$

**Ecuación 33**

$$c_{\theta} = \frac{d\theta}{dt} = -\frac{1}{k} \left[ \frac{\partial\sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} + \vec{k} \cdot \frac{\partial \vec{U}}{\partial m} \right]$$

**Ecuación 34**

Donde:

- s : Coordenada espacial en la dirección de la ola  $\theta$
- m : Coordenada perpendicular a s.
- $\nabla_{\vec{x}}$  : Operador diferencial bi-dimensional en el espacio.

## 4.2 MIKE 21 HD

MIKE 21 Flow Model, es un sistema de modelación para flujos en superficie libre en dos dimensiones. Es aplicable a la simulación de fenómenos hidráulicos y medioambientales en ríos, lagos, estuarios, bahías y zonas costeras. Puede ser usado para simular un amplio rango de efectos hidráulicos relativos a corrientes y efectos de las crecidas, mareas, temperatura y calidad del agua.

El módulo hidrodinámico simula las variaciones del nivel de agua como respuesta a las fuerzas que intervienen en la columna de agua. Los efectos que incluye éste módulo son: tensiones de corte de fondo, variaciones del gradiente de presión, fuerza de Coriolis, difusión del momentum, tensores de radiación, aportes y extracciones de agua e inundaciones (DHI, 2014).

Las ecuaciones empleadas por el módulo hidrodinámico (HD) son las ecuaciones de masa y momentum (Ecuaciones de Reynolds) para un flujo medio. *“El modelo puede ser seleccionado sólo si los flujos verticales y las variaciones de la velocidad en la vertical son despreciables en comparación a los flujos horizontales y los gradientes de velocidad en la horizontal”* (Sepúlveda, 2010).

La turbulencia es tratada mediante un submodelo de tipo algebraico, permitiendo así el uso de una viscosidad constante o bien el de una viscosidad dependiente de los gradientes del campo de la velocidad.

Dentro de la información necesaria para la confección del modelo numérico, se encuentran los datos de batimetría y forzantes tales como el oleaje y curvas de marea obtenidas a través de un modelo global descrito en la (Sección 5.5.1).

En resumen, el principal propósito del módulo hidrodinámico HD, es resolver las ecuaciones de continuidad y momentum para el flujo medio (DHI, 2014), expresadas por:

### Continuidad

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}}{\partial y} = hS$$

**Ecuación 35**

### Momentum X

$$\begin{aligned} \frac{\partial h\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial y} \\ = f\bar{v}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left( \frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (gT_{xx}) \\ + \frac{\partial}{\partial y} (gT_{xy}) + hu_s S \end{aligned}$$

**Ecuación 36**

### Momentum Y

$$\begin{aligned} \frac{\partial h\bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}^2}{\partial y} \\ = -f\bar{u}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left( \frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (gT_{xy}) \\ + \frac{\partial}{\partial y} (gT_{yy}) + hv_s S \end{aligned}$$

**Ecuación 37**

Donde:

$h(x,y,t)$	: Profundidad total del agua (profundidad fija $d$ mas desnivelación $\eta$ )
$f = 2\Omega \cdot \text{sen}\phi$	: Parámetros de Coriolis
$\Omega, \phi$	: Razón angular de revolución y latitud respectivamente.
$p_a$	: Presión atmosférica.
$\rho, \rho_0$	: Densidad del agua y densidad de referencia del agua respectivamente
$\bar{u}, \bar{v}$	: Velocidad promedios en la vertical componentes x,y respectivamente.
$S$	: Magnitud de descarga debido a los puntos de fuente.
$g$	: Aceleración de gravedad
$x,y$	: Coordenadas espaciales
$t$	: Tiempo
$(\tau_{sx}, \tau_{sy}) (\tau_{bx}, \tau_{by})$	: Componentes x y de tension superficial del viento y de fondo.
$s_{xx}, s_{xy}, s_{yx}, s_{yy}$	: Componentes de tensores de radiación del oleaje
$u_s, v_s$	: Velocidad a la cual el agua es descargada al ambiente acuatico.

Las tensiones laterales  $T_{ij}$  incluyen fricción viscosa, fricción turbulenta y advección diferencial. Estos son estimados usando una formulación de viscosidad turbulenta basada en los gradientes de velocidad promediados en la profundidad (ver también Ecuación 21 y Ecuación 22).

$$T_{xx} = 2A \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \quad , \quad T_{xy} = A \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) \quad , \quad T_{yy} = 2A \frac{\partial \bar{v}}{\partial y}$$

Donde A es la viscosidad turbulenta horizontal.

En este estudio no se considera forzante de viento ya que no se cuenta con dichos datos.

La tensión de fondo  $\vec{\tau}_b = (\tau_{bx}, \tau_{by})$  es determinada por la siguiente ley cuadrática de fricción:

$$\frac{\vec{\tau}_b}{\rho_0} = c_f \vec{u}_b |\vec{u}_b|$$

Con  $c_f$  el coeficiente de arrastre y  $\vec{u}_b = (u_b, v_b)$  el la velocidad de flujo sobre el fondo. Para el presente caso en 2D, se considera la velocidad promediada en la profundidad.

El coeficiente de arrastre  $c_f$  puede ser determinado de dos modos: con el numero de Chezy C o con en numero de Manning M, cuyas formulaciones se muestran en la Ecuación 38:

$$c_f = \frac{g}{C^2} \quad \quad c_f = \frac{g}{(Mh^{1/6})^2}$$

**Ecuación 38**

### 4.3 MIKE ST

A partir de las condiciones hidrodinámicas obtenidas a través de los modelos descritos en 4.1 y 4.2, se utilizó el modelo MIKE21 ST de transporte de sedimentos.

MIKE 21 ST calcula las tasas de transporte de sedimentos no-cohesivos (arenas) basado en la información de corrientes generadas por mareas, viento, oleaje o inducidas artificialmente por alguna condición de borde.

Además de tasas de transporte, las simulaciones entregan las tasas iniciales de cambio en los niveles de la batimetría, lo cual es suficiente para identificar las potenciales áreas de erosión y deposición, tomando en cuenta la información granulométrica existente en el sector de estudio.

MIKE 21 ST, puede simular el transporte de arena en un amplio rango de situaciones, incluyendo estuarios, costas, puentes y puertos entre otros.

En este estudio, las cargas de sedimentos fueron obtenidas, a través de tablas de transporte las cuales se extrajeron por el Toolbox de MIKE 21, llamado "Generation of Q3D Sediment table". La base de este programa es un modelo de transporte de sedimentos cuasi-tridimensional (STPQ3D), el cual calcula la hidrodinámica y el transporte de sedimentos de

modo instantáneo y promediado en el tiempo en las 2 direcciones horizontales para las cargas de fondo más la carga suspendida, a partir del cual se obtienen las tablas de transporte total integrado en la vertical.

El modelo utiliza un parámetro de desviación geométrica o spreading de la curva de distribución granulométrica, el cual corresponde al parámetro de forma utilizado en el ajuste log-normal a la curva, centrándose en el tamaño medio del sedimento  $d_{50}$ . La Desviación Geométrica es definida en la Ecuación 39

$$\sigma_g = (d_{84}/d_{16})^{1/2}$$

**Ecuación 39**

Donde:

$d_{84}$ ,  $d_{16}$ : diámetros donde pasa el 84% y 16% del sedimento en peso.

Las fórmulas que utilizó el modelo para la carga de suspendida y de fondo son las siguientes:

#### 4.3.1 TRANSPORTE DE FONDO

El transporte de fondo dimensional  $\Phi_b$  es dado por la Ecuación 40:

$$\Phi_b = 5p(\sqrt{\theta'} - 0.7\sqrt{\theta_c})$$

**Ecuación 40**

Donde:

$\theta'$ : Parte del parámetro de Shields relacionado a la fricción superficial de la partícula.

$\theta_c$ : Valor crítico del parámetro de Shields.

$p$ : Concentración de fondo (Ecuación 43).

De  $\Phi_b$  se calcula las siguientes cantidades promediadas en el tiempo:

$$\Phi_{b1} = \frac{1}{T} \int_0^T \Phi_b(t) \cos(\phi(t)) dt$$

$$\Phi_{b2} = \frac{1}{T} \int_0^T \Phi_b(t) \text{seno}(\phi(t)) dt$$

$$q_{b1} = \Phi_{b1} \cdot \sqrt{(s-1)gd_{50}^3}$$

$$q_{b2} = \Phi_{b2} \cdot \sqrt{(s-1)gd_{50}^3}$$

**Ecuación 41**

Donde:

$\phi(t)$  : Es la dirección del flujo instantáneo.

$\Phi_{b1}$  : Es la carga adimensional de fondo en la dirección de la corriente promedio.

$\Phi_{b2}$  : Es la carga adimensional de fondo normal a la dirección de la corriente promedio.

$q_{b1}$  : Es la carga de fondo en la dirección promedio de la corriente.

$q_{b2}$  : Es la carga de fondo normal a la dirección promedio de la corriente.

### 4.3.2 TRANSPORTE EN SUSPENSIÓN

La carga en suspensión es obtenida a partir del producto de la velocidad del flujo instantáneo y la concentración de sedimentos instantánea del siguiente modo:

$$q_s = \frac{1}{T} \int_0^T \int_{2d}^D (uc) dz dt$$

El modelo MIKE 21 ST, determina la velocidad de fricción  $U_f$  en un periodo de ola proveniente del cálculo hidrodinámico del programa considerando un fondo plano, obteniendo los siguientes parámetros para cada timestep:

Parámetro de Shields:

$$\theta' = \frac{U_f^2}{(s-1)gd_{50}}$$

**Ecuación 42**

Concentración del fondo:

$$p = \left[ 1 + \left( \frac{\frac{\pi}{6}\beta}{\theta' - \theta_c} \right)^4 \right]^{-0.25}$$

**Ecuación 43**

$$\lambda = \sqrt{\frac{\theta' - \theta_c - \frac{\pi}{6}\beta p}{0.027s\theta'}}$$

**Ecuación 44**

$$c_b = \frac{0.65}{\left(1 + \frac{1}{\lambda}\right)^3}$$

**Ecuación 45**

Donde:

s: Densidad relativa de sedimento.

$d_{50}$  : Tamaño medio de la arena.

$\theta'$  : Parámetro de Shields determinado en un fondo plano.

$\theta_c$  : Valor crítico del parámetro de Shields.

p : Probabilidad de que todas las partículas de una capa estén en movimiento.

$\lambda$  : Concentración lineal.

$c_b$  : Concentración en el fondo.

También existe otra expresión alternativa empírica de la concentración del fondo que se muestra en la Ecuación 46.

$$c_b = \frac{0.331(\theta' - 0.045)^{1.75}}{1 + \frac{0.331}{0.46}(\theta' - 0.045)^{1.75}}$$

**Ecuación 46**

La descripción de la Ecuación 46, fue desarrollada en base a un parámetro de Shields crítico  $\theta_{c0}$  para un fondo plano igual a 0.045, donde el programa no considera otro valor del parámetro de Shields crítico. En este estudio se utilizó las descripciones anteriores a esa última formulación.

La concentración de sedimento suspendido fue obtenida en el paso del tiempo y en distintas profundidades dadas en la zona de estudio. El modelo genera diversas iteraciones en ciclos de oleaje hasta encontrar una solución periódica.

## **5 APLICACIÓN DE METODOLOGÍA PARA PLAYA BRAVA, IQUIQUE.**

En este capítulo se presenta la información con la que se desarrolló esta memoria de titulación. Dentro de ésta, se utilizaron datos adquiridos por la Dirección de Obras Portuarias del Ministerio de Obras Públicas (en adelante DOP).

### **5.1 PLAYA BRAVA**

En el año 2007 la empresa Baird & Associates S.A. desarrolló para la DOP un estudio orientado a evaluar el desempeño de alternativas de mejoramiento en la hidrodinámica de Playa Brava.

Se realiza estudios para caracterizar las condiciones de oleaje operacional tanto en aguas profundas, como en aguas someras mediante la utilización de la base de datos de Olas Chile II y la aplicación del modelo numérico STWAVE. Además, se realizaron trabajos de terreno mediante el desarrollo de ocho lanzas de agua los cuales permitieron determinar la composición del lecho marino.

El proyecto y su entorno inmediato se encuentran ubicados en el sector sur de Iquique, cuyo borde costero comprende desde el sector de Primeras Piedras hasta Cavanha. Las temperaturas oscilan entre una mínima de 18°C y una máxima de 26°C, mientras que en invierno la variación está entre los 15°C y 18°C. En la Figura 5-1, se presenta una descripción gráfica de la zona de estudio y de la infraestructura existente en su entorno inmediato.

El sector Playa Brava es considerado como un polo de atracción ciudadana con una concentración social de nivel medio-alto, un nivel de centralidad alto, un bajo deterioro urbano y un gran dinamismo urbano DOP (2010). El área del proyecto, se encuentra entre los siguientes límites:

- Norte: Avenida Arturo Prat.
- Oriente: Avenida Tadeo Hanke, José Francisco Vergara.
- Sur: Avenida Ramón P. Opazo.
- Poniente: Playa.



**Figura 5-1: Infraestructuras existentes en zona de estudio.**  
**Fuente: DOP, (2010).**

Los trabajos de terreno realizados para la caracterización de Playa Brava consistieron en la medición y muestreo de diversos parámetros, tales como: sedimentos superficiales, topografía y batimetría, mediciones de oleaje y corrientes, entre otros.

Cabe mencionar que los antecedentes de medición de la playa actual, fueron suministrados por la DOP para fines de investigación en la presente memoria.

## 5.2 SEDIMENTOLOGÍA DE LA PLAYA

Para la caracterización de los sedimentos se tomaron una serie de muestras superficiales en diversos puntos del sector de interés (Figura 5-2); las coordenadas están descritas en la Tabla 5-1 (información proporcionada por la DOP).

Muestra	X [m]	Y [m]	Z (m)
M1	380.158	7.761.541	2
M2	380.389	7.761.352	2
M3	380.344	7.761.288	0
M4	380.311	7.761.247	-2
M5	380.558	7.761.132	2
M6	380.767	7.760.934	2
M7	380.727	7.760.887	0
M8	380.673	7.760.825	-4
M9	380.913	7.760.668	2
M10	381.112	7.760.460	2
M11	381.055	7.760.421	0
M12	380.991	7.760.376	-4
M13	381.210	7.760.186	2
M14	381.344	7.759.987	2
M15	381.293	7.759.946	0
M16	381.218	7.759.883	-4
M17	381.410	7.759.817	2

Coordenadas UTM en datum WGS 84

**Tabla 5-1: Coordenadas de las muestras de sedimentos**  
Fuente: DOP, (2010).



**Figura 5-2: Ubicación de las muestras de sedimentos.**  
Fuente: DOP, (2010).

Para el análisis granulométrico, se dividió el sector en tres segmentos: playa trasera, intermareal y sumergida, como se observa en la Tabla 5-2.

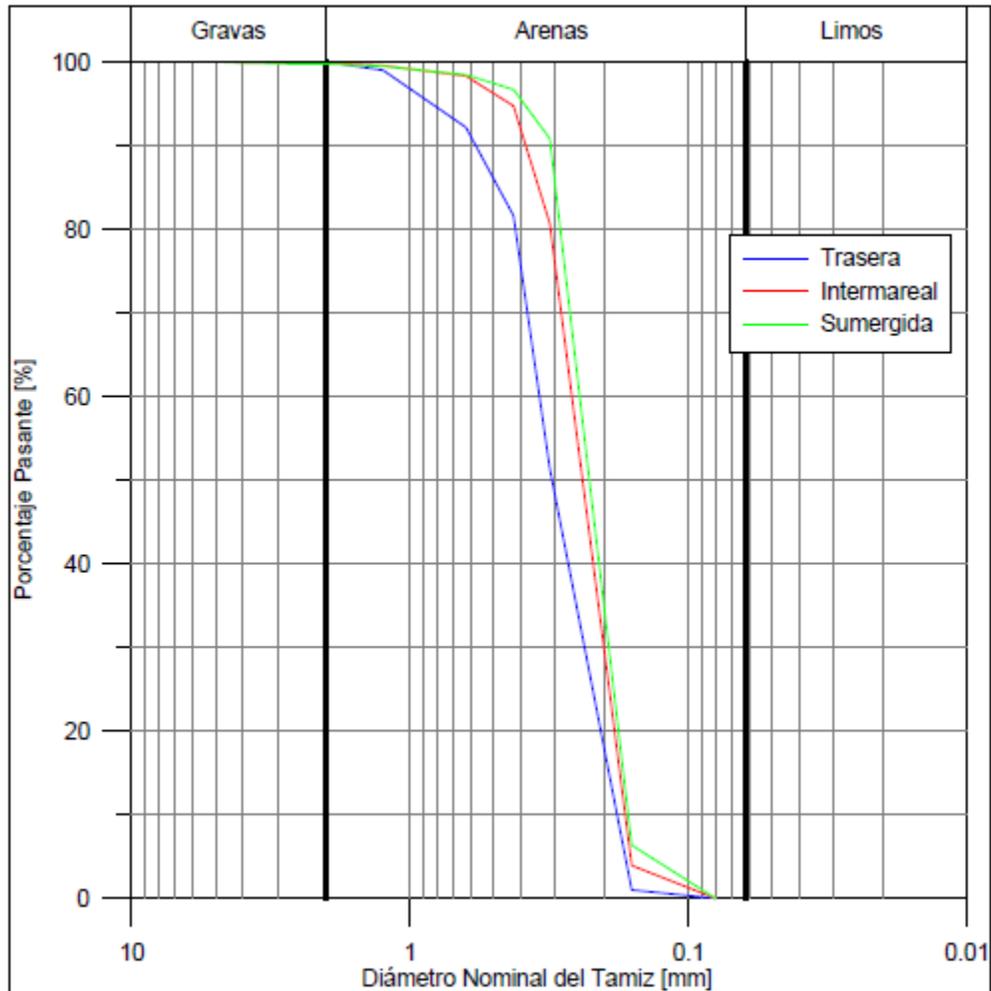
Zona de Estudio	Muestras que la componen
Playa Trasera	M2, M6, M10 y M14
Zona Intermareal	M1, M3, M5, M7, M9, M11, M13, M15 y M17
Playa Sumergida	M4, M8, M12 y M16

**Tabla 5-2: Identificación de las muestras de acuerdo al lugar de extracción.  
Fuente: DOP, (2010).**

Muestra	Diámetros [mm]				Unidad $\phi$ de la muestra			
	$d_{90}$	$d_{50}$	$d_{30}$	$d_{10}$	$\phi_{90}$	$\phi_{50}$	$\phi_{30}$	$\phi_{10}$
M1	0.315	0.238	0.200	0.162	1.667	2.068	2.321	2.627
M2	0.868	0.340	0.266	0.195	0.203	1.555	1.912	2.357
M3	0.300	0.233	0.200	0.167	1.737	2.100	2.322	2.585
M4	0.305	0.235	0.200	0.165	1.715	2.090	2.321	2.598
M5	0.300	0.232	0.199	0.165	1.738	2.105	2.331	2.599
M6	0.414	0.306	0.244	0.182	1.271	1.710	2.037	2.460
M7	0.303	0.235	0.201	0.167	1.722	2.090	2.316	2.584
M8	0.305	0.236	0.201	0.167	1.715	2.084	2.312	2.583
M9	0.421	0.279	0.230	0.182	1.249	1.843	2.119	2.460
M10	0.451	0.288	0.235	0.181	1.150	1.794	2.090	2.463
M11	0.385	0.260	0.217	0.175	1.377	1.945	2.202	2.516
M12	0.395	0.247	0.205	0.162	1.340	2.017	2.289	2.625
M13	0.410	0.291	0.236	0.182	1.287	1.783	2.082	2.460
M14	0.754	0.315	0.250	0.186	0.407	1.667	1.998	2.428
M15	0.303	0.233	0.198	0.163	1.724	2.101	2.334	2.613
M16	0.315	0.238	0.199	0.160	1.667	2.074	2.331	2.644
M17	0.587	0.330	0.259	0.188	0.769	1.599	1.951	2.410

**Tabla 5-3: Clasificación textural de las muestras  
Fuente: DOP, (2010).**

En la Tabla 5-3, se muestra que el  $d_{50}$  se encuentra en un rango de 0.232 a 0.340 [mm], clasificado como arenas finas y medianas.



**Figura 5-3: Curvas granulométricas promedio para cada zona.**  
**Fuente: DOP, (2010).**

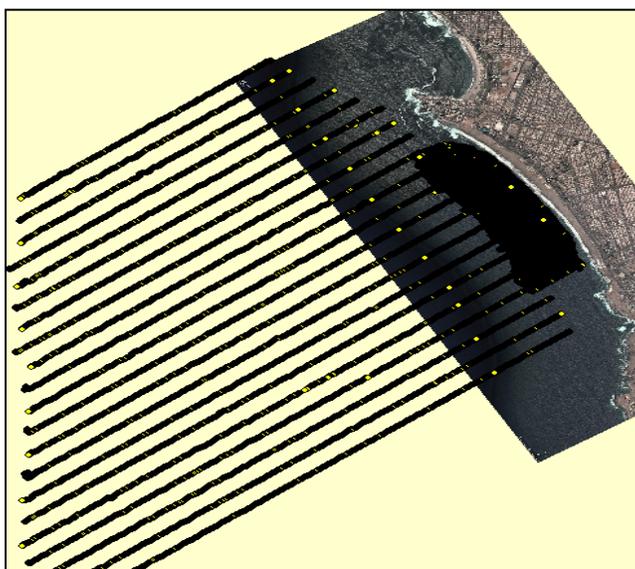
La empresa responsable del estudio analizó las curvas granulométricas promedio de cada una de las zonas características de la playa (Figura 5-3). En él se advierte que tanto la zona intermareal como la sumergida presentan un comportamiento similar en su distribución granulométrica con un  $d_{50}$  muy cercano a 0.2 [mm]. En el caso de la playa trasera, la curva granulométrica promedio sugiere la presencia de sedimentos levemente más gruesos, lo que aumenta el  $d_{50}$  en torno a los 0.28 [mm]. Para el desarrollo de la presente tesis, se consideraron los diámetros medidos en el área sumergida, tales como:  $d_{50}$  de 0.24 [mm], un  $d_{84}$  de 0.31 [mm] y  $d_{16}$  de 0.18 [mm].

### 5.3 BATIMETRÍA

Para la confección de los modelos de oleaje se utilizó la información batimétrica entregada por el SHOA (Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile). La base de datos corresponde a las cartas náuticas en la zona de Iquique (Tabla 5-4), las cuales fueron empleadas para obtener los puntos de sondajes, veriles y líneas de costa correspondientes. Además se trabajó con los datos de la campaña de medición batimétrica entregada por la DOP.

Cartas Náuticas	N°
Bahía de Iquique	1211
Bahía de Iquique a Puerto Tocopilla	1200
Rada de Arica a bahía de Iquique	1100

**Tabla 5-4: Cartas SHOA utilizadas para la confección de Grilla.**  
Fuente: SHOA.



**Figura 5-4: Batimetría de campaña de medición en Playa Brava, Iquique.**  
Fuente: Imágenes realizadas en base a Google Earth, SHOA.



**Figura 5-5: Batimetría de medición datos zona de rompientes en Playa Brava, Iquique.**

**Fuente: Imagen basada en Google Earth con datos proporcionados por DOP.**

En la Figura 5-4 y Figura 5-5, se aprecian las batimetrías utilizadas, en la zona de estudio. Los datos de batimetría fueron procesados para formar una batimetría única, la cual fue utilizada como entrada para todos los software que se implementaron en esta memoria de título.

## **5.4 OLEAJE**

Para realizar la caracterización del oleaje se dispuso de tres bases de datos. La primera consistió en el fondeo de dos equipos ADCP (acápite 5.4.1) los cuales fueron utilizados para la validación de los modelos numéricos. La segunda corresponde a 20 años de datos de oleaje previamente propagados al sitio de estudio en varios nodos a lo largo de Playa Brava, los cuales corresponden a un hindcasting basado en el modelo de generación global WaveWatch III (Olas Chile/Pacífico). Finalmente se analizaron los datos de oleaje en aguas profundas del nodo Iquique, correspondiente a Olas Chile/Pacífico abarcando el mes de Septiembre del año 2010. Estos datos son coincidentes con el periodo de medición del ADCP, siendo propagados en este estudio, a través del modelo MIKE 21 SW.

### **5.4.1 BASE DE DATOS 1: MEDICIÓN DE OLEAJE A TRAVÉS DE ADCP**

La campaña consistió en el fondeo de 6 ADCP's en el mes de Mayo del 2010. Posteriormente se realizó una nueva campaña de medición donde se fondearon 2 ADCP's que registraron oleaje y corriente (Figura 5-6).

El registro de oleaje se realizó desde el día 06/09/2010 hasta el 02/10/2010, con mediciones cada 3 horas, registrando una altura significativa espectral [Hs], periodo peak [Tp] y dirección peak [Dpk], cuyos datos fueron utilizados en esta presente memoria.

La ubicación y profundidad de los ADCPs se visualiza en la Tabla 5-5.

Sector	Coordenadas Norte [m]	Coordenadas Este [m]	Profundidad	Inicio de Mediciones	Término de Mediciones
Brava 9	7.760.370	380.189	25 [m]	06-09-2010	03-10-2010
Brava 10	7.760.489	380.485	18 [m]	06-09-2010	03-10-2010

**Tabla 5-5: Información ADCP's, campaña 2010.**

**Fuente: DOP, 2010.**



**Figura 5-6: Ubicación de ADCP (corriente y oleaje).**

**Fuente: DOP, 2010.**

En el presente estudio se utilizaron los datos provenientes del ADCP fondeado a los 25 [m] de profundidad para analizar el oleaje. Para efectos prácticos el punto de estudio mencionado se denominará ADCP 25 [m]. Estos datos se resumieron en las siguientes tablas de incidencia e histogramas.

		Dirección [°]									
		S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	N	
Hs [m]	0 - 0.5										0%
	0.5 - 1			4%	6%						10%
	1 - 1.5			23%	25%						48%
	1.5 - 2			10%	24%						34%
	2 - 2.5			1%	5%						6%
	2.5 - 3			0%	0%						1%
	3 - 3.5										0%
	3.5 - 4				0%						0%
		0%	0%	39%	61%	0%	0%	0%	0%	0%	100%

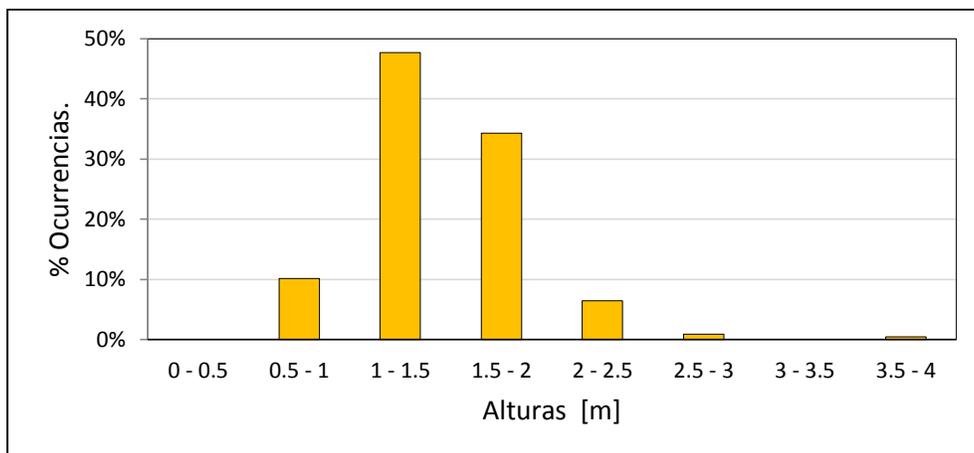
**Tabla 5-6: Tabla de Incidencia, Altura significativa v/s Dirección, ADCP 25 [m].  
Fuente: Elaboración propia.**

		Dirección [°]									
		S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	N	
Tp [s]	2 - 4			1%	1%						2%
	4 - 6										0%
	6 - 8			0%							0%
	8 - 10			6%	2%						8%
	10 - 12			9%	11%						20%
	12 - 14			16%	25%						41%
	14 - 16			6%	19%						24%
	16 - 18			1%	3%						4%
		0%	0%	39%	61%	0%	0%	0%	0%	0%	100%

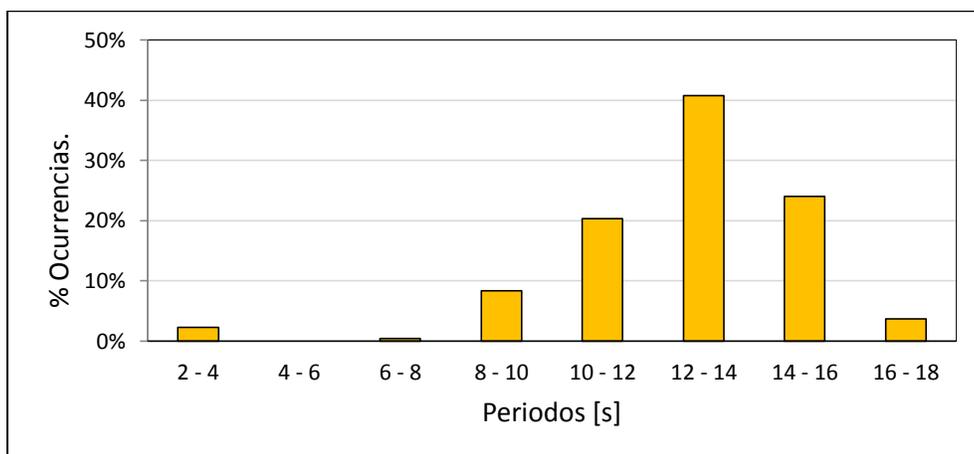
**Tabla 5-7: Tabla de Incidencia, Ocurrencia de periodos, ADCP 25 [m].  
Fuente: Elaboración propia.**

		Hs [s]								
		0-0.5	0.5-1	1-1.5	1.5-2	2-2.5	2.5-3	3-3.5	3.5-4	
Tp [s]	2 - 4			0%	2%					2%
	4 - 6									0%
	6 - 8			0%						0%
	8 - 10		1%	6%	1%					8%
	10 - 12		5%	11%	5%	0%				20%
	12 - 14		3%	19%	14%	4%	0%		0%	41%
	14 - 16		1%	9%	12%	2%	0%			24%
	16 - 18		0%	2%	1%	0%				4%
		0%	10%	48%	34%	6%	1%	0%	0%	100%

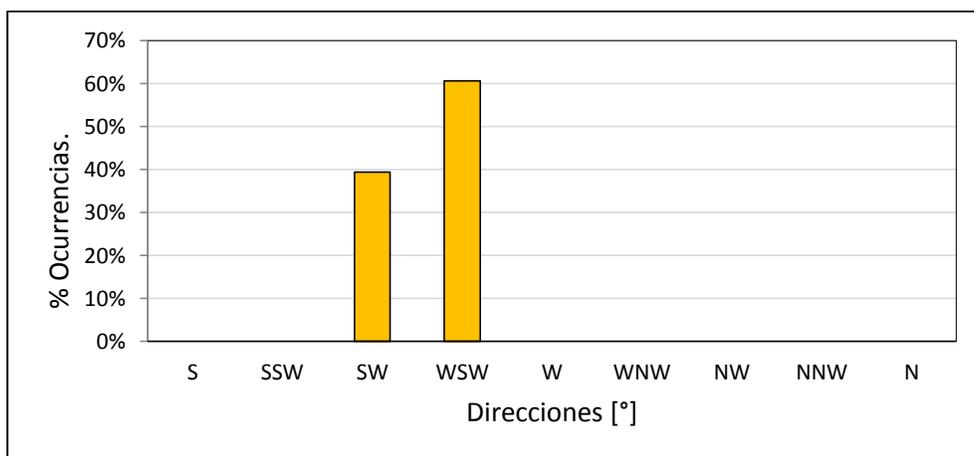
**Tabla 5-8: Tabla de Incidencia, Ocurrencia de periodos v/s alturas, ADCP 25 [m].  
Fuente: Elaboración propia.**



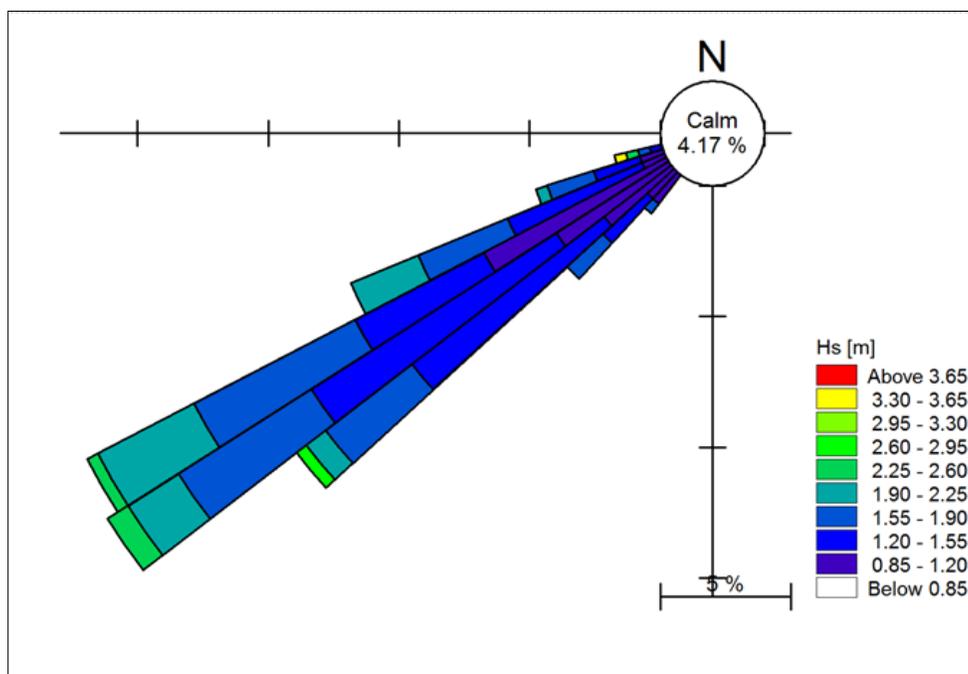
**Figura 5-7: Histogramas de alturas, ADCP 25 [m].  
Fuente: Elaboración propia.**



**Figura 5-8: Histogramas de periodos, ADCP 25 [m].  
Fuente: Elaboración propia.**



**Figura 5-9: Histogramas de direcciones, ADCP 25[m].  
Fuente: Elaboración propia.**



**Figura 5-10: Rosa de Oleaje, Altura v/s Dirección de oleaje, ADCP 25 [m].  
Fuente: Elaboración propia.**

En términos generales, las condiciones de olas indicadas en la Tabla 5-6 muestran una baja presencia de altura inferiores a 1 [m] (menor de un 10%), por lo cual se observa una mayor ocurrencia de olas con alturas entre los 1.0 y 1.5 [m] (47.69%) provenientes de la dirección S, WSW (Figura 5-7 y Figura 5-8). Dicha información se aprecia en la Figura 5-10.

En la Tabla 5-7 y en la Figura 5-7, se aprecia que los mayores periodos provienen de la dirección S, WSW, en un rango entre los 12 y 14 [s] (40.74%).

#### 5.4.2 BASE DE DATOS 2: HINDCASTING INSITU PREVIO

Para el desarrollo de este estudio se utilizó datos de oleaje otorgados por la DOP, los cuales corresponden a una propagación previa realizada por la empresa consultora Baird & Associates S.A. Los datos de oleaje perteneciente al nodo Iquique del Hindcasting del proyecto Olas Chile (Figura 5-11) describen el oleaje desde el año 1985 al 2006. Se dispuso de 22 nodos (Figura 5-13) propagados desde aguas profundas con el modelo numérico STWAVE. De esta forma, se optó por validar la propagación con el nodo 17, el cual posee mayor profundidad y está ubicado aproximadamente al centro de la playa. Este nodo se denominó *nodo de trabajo*.



Figura 5-11: Ubicación Nodo Iquique, Hindcasting Olas Chile.  
Fuente: DOP (2010).

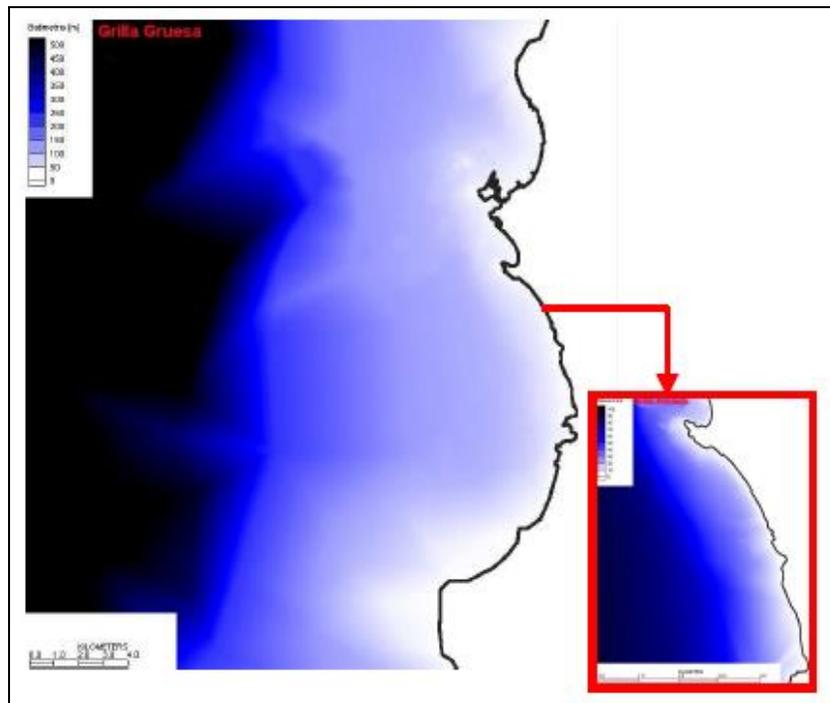
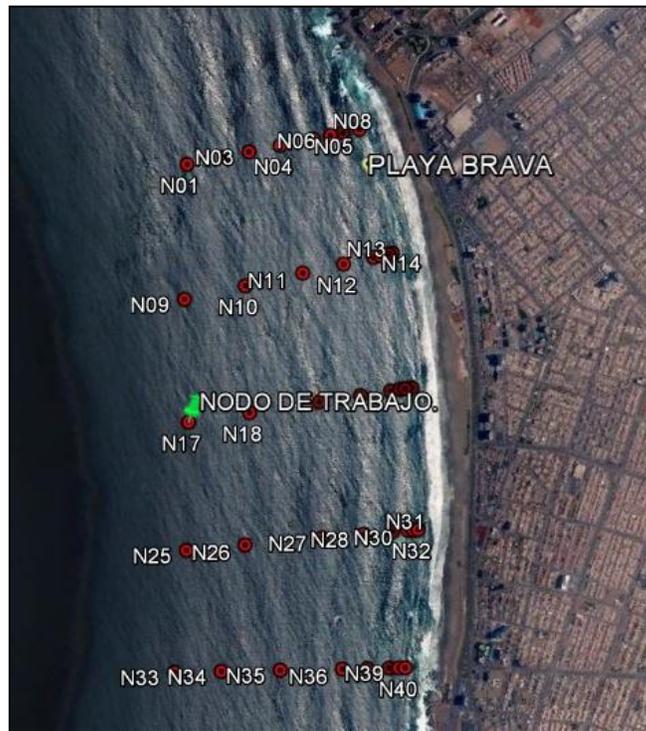


Figura 5-12: Grillas utilizadas para propagación.  
Fuente: DOP (2010).



**Figura 5-13: Nodos propagados desde aguas profundas.**  
Fuente: Elaboración propia.

Con el nodo de trabajo, se procedió a realizar un análisis de clima medio. Los parámetros utilizados son, altura significativa [Hs], periodo peak [Tp], y dirección peak [DPK], los cuales se aprecian en los histogramas de las Figura 5-14 y Figura 5-15.

		Dirección [°]								Total	
		S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW		N
H [m]	0.0 - 0.5			0.0%							0.0%
	0.5 - 1.0		0.2%	8.6%	1.5%	0.6%	0.0%				10.9%
	1.0 - 1.5		0.1%	44.6%	4.2%	2.5%					51.3%
	1.5 - 2.0			28.7%	1.6%	0.3%					30.6%
	2.0 - 2.5			6.0%	0.3%	0.0%					6.4%
	2.5 - 3.0			0.7%	0.0%						0.7%
	3.0 - 3.5			0.1%							0.1%
	3.5 - 4.0			0.0%							0.0%
		0.0%	0.2%	88.7%	7.7%	3.4%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%

**Tabla 5-9: Tabla de Incidencia Altura de olas v/s Dirección Peak, Nodo de Trabajo.**  
Fuente: Elaboración propia.

		Dirección [°]									
		S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	N	
Tp [s]	4 - 6			0.0%							0.0%
	6 - 8		0.0%	0.3%							0.4%
	8 - 10		0.1%	2.5%	0.1%						2.7%
	10 - 12		0.0%	22.6%	0.9%						23.5%
	12 - 14		0.0%	43.0%	3.2%	0.1%	0.0%				46.4%
	14 - 16		0.0%	16.3%	2.6%	1.1%	0.0%				20.1%
	16 - 18			3.5%	0.8%	1.8%					6.1%
	18 - 20			0.3%	0.1%	0.4%					0.8%
	20 - 22			0.0%	0.0%	0.0%					0.1%
		0.0%	0.2%	88.7%	7.7%	3.4%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%

**Tabla 5-10: Tabla de incidencia Periodo de oleaje v/s Dirección Peak, Nodo de Trabajo.**

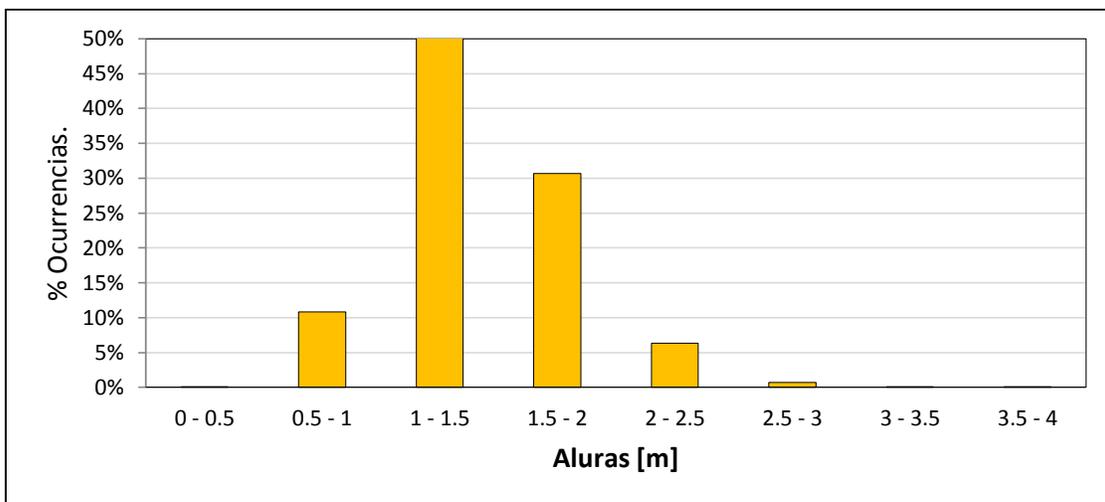
Fuente: Elaboración propia.

		Tp [s]										
		4	6	8	10	12	14	16	18	20		
H [m]	0.0 - 0.5					0.0%	0.0%					0.0%
	0.5 - 1.0	0.0%	0.1%	0.6%	3.8%	4.3%	1.3%	0.6%	0.1%	0.0%		10.9%
	1.0 - 1.5	0.0%	0.2%	1.8%	15.5%	22.8%	7.5%	3.0%	0.5%	0.1%		51.3%
	1.5 - 2.0		0.0%	0.3%	4.1%	16.6%	7.7%	1.7%	0.2%	0.0%		30.6%
	2.0 - 2.5			0.0%	0.2%	2.4%	3.1%	0.6%	0.0%	0.0%		6.4%
	2.5 - 3.0					0.1%	0.4%	0.2%	0.0%			0.7%
	3.0 - 3.5					0.0%	0.1%	0.0%				0.1%
	3.5 - 4.0						0.0%					0.0%
			0.0%	0.4%	2.7%	23.5%	46.4%	20.1%	6.1%	0.8%	0.1%	

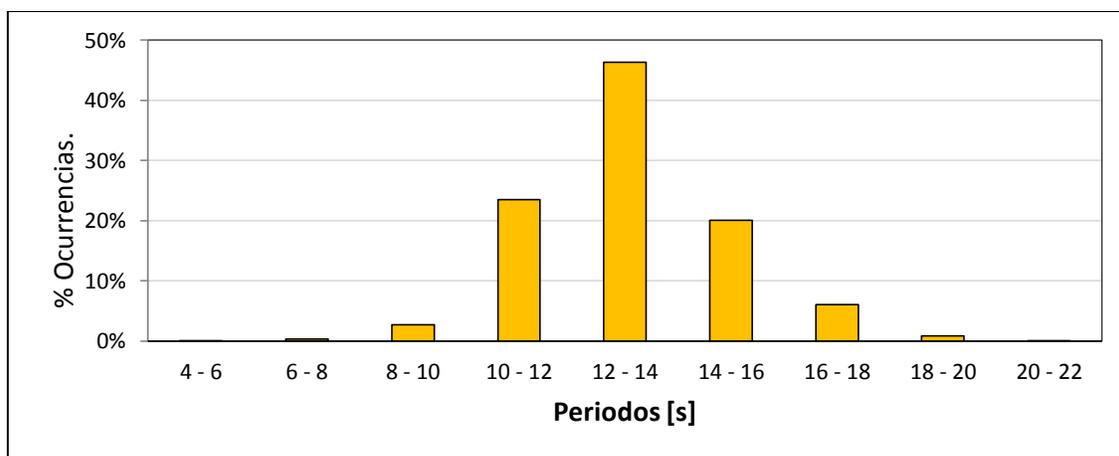
**Tabla 5-11: Tabla de incidencia Altura de oleaje v/s Periodo, Nodo de Trabajo.**

Fuente: Elaboración propia.

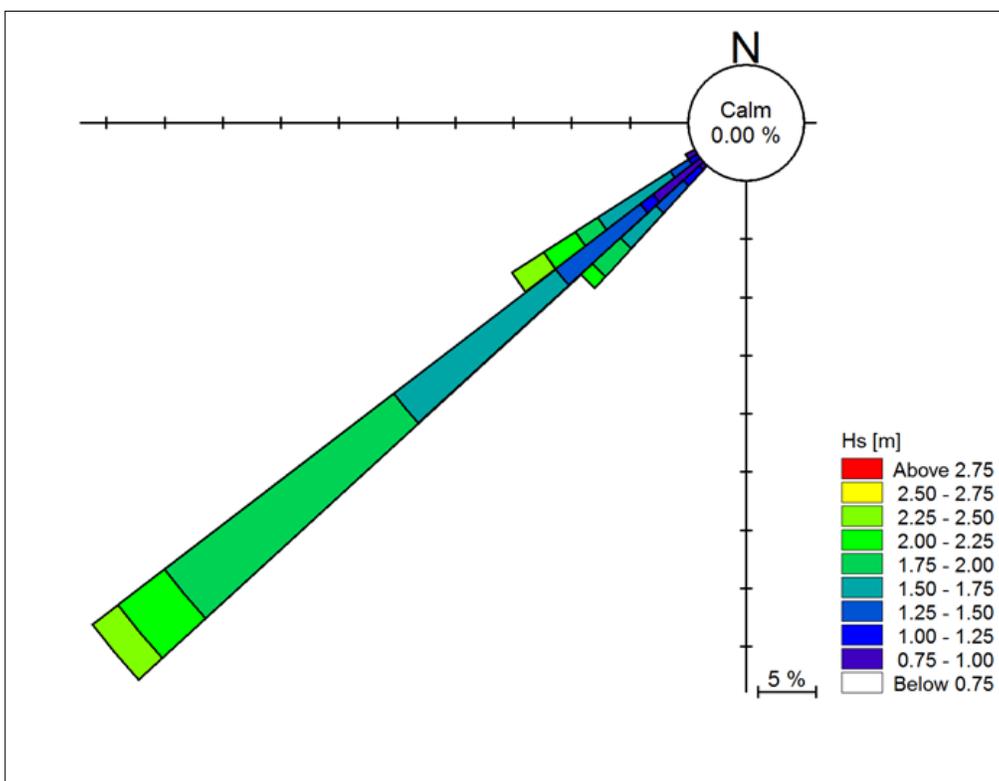
En la Tabla 5-9 se observa que la dirección reinante y dominante corresponde a la dirección SW.



**Figura 5-14: Histogramas de Alturas, Nodo de Trabajo**  
Fuente: Elaboración propia.



**Figura 5-15: Histograma de Periodos, Nodo de Trabajo.**  
Fuente: Elaboración propia.



**Figura 5-16: Rosa de Oleaje, Altura v/s Dirección de oleaje, Nodo de Trabajo.**  
**Fuente: Elaboración propia.**

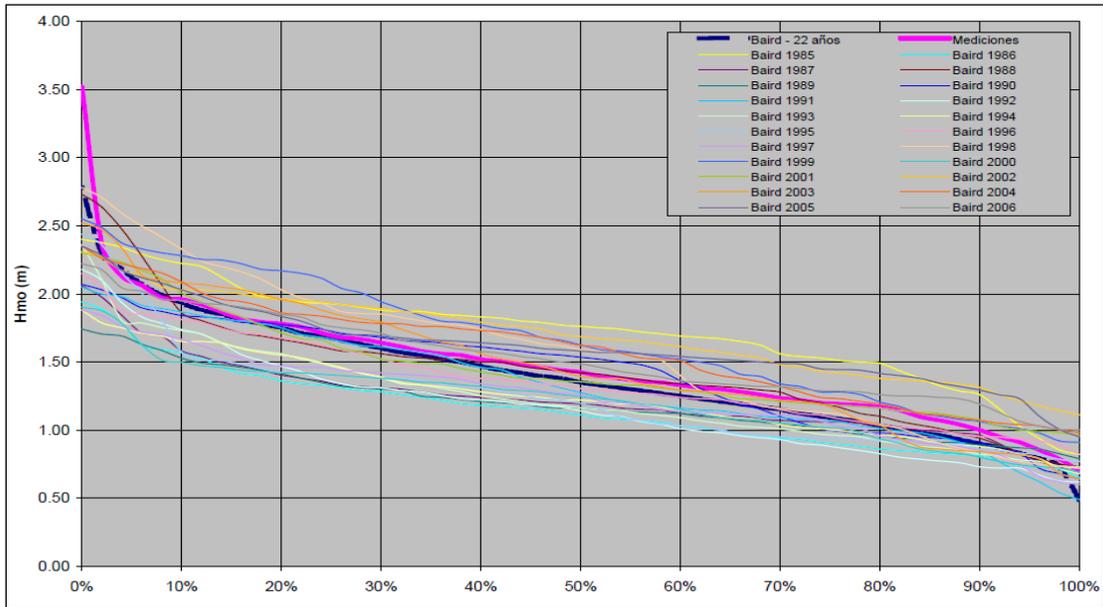
La Tabla 5-9, Tabla 5-10 y Tabla 5-11 del nodo de trabajo, indican que las mayores frecuencias están entre las alturas 1 y 1.5 [m] (51.3%), con periodos entre 12 y 14 [s] (46.4%) cuyas bandas direccionales de mayor incidencia son del tercer cuadrante, SW (88.7%), seguido por direcciones del WSW (7.7%) y W (3.4%). También se observa gráficamente en la Figura 5-14 y Figura 5-15,

En la rosa de oleaje en la Figura 5-16, se muestra un gran porcentaje de olas que provienen del tercer cuadrante, con una altura que va entre los 0.5 y 2 [m] aproximadamente.

#### 5.4.2.1 VALIDACIÓN DE PROPAGACIÓN PREVIA

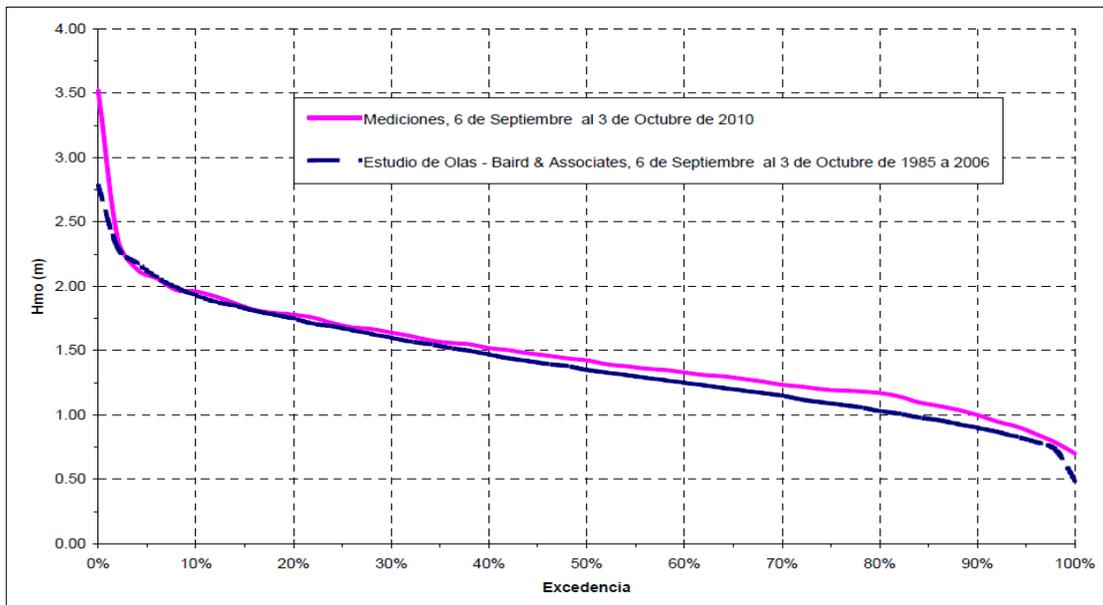
En el informe facilitado por la DOP (2010) se muestra una validación realizada con datos coincidentes con el periodo de mediciones vistos en la descripción de la campaña vista en el ítem 5.4.1. En el mes de medición correspondiente a Septiembre, se extrajeron las propagaciones de oleaje de todos los septiembrés de cada año (1985-2006), obteniendo 22 meses para procesar.

En la Figura 5-17 se muestran diagramas de excedencia para el periodo de medición de los 22 años en conjunto con la curva que representa las mediciones del nodo ADCP 25 [m].



**Figura 5-17: Excedencia de alturas de olas  $H_s$  [m] transferidas por año v/s medidas.**  
**Fuente: DOP (2010).**

En la Figura 5-17 se aprecia que, a pesar de existir variaciones en distintas curvas, se encuentran años que presentan un buen ajuste. En la Figura 5-18 se presenta una comparación de los promedios de las curvas de los datos transferidos versus la curva de mediciones:



**Figura 5-18: Promedio de Excedencia de alturas de olas  $H_s$  [m] transferidas por año v/s medidas.**  
**Fuente: DOP (2010).**

En la Figura 5-18 se observa que las curvas de excedencia tienen similar comportamiento entre las mediciones y el promedio del hindcasting, considerándose así que el modelo representa adecuadamente las alturas del oleaje en el sitio de estudio.

Debido a que no es posible realizar una comparación directa entre el hindcasting y las mediciones (porque no hay mediciones simultáneas), es que se muestran tablas de comparación de las principales estadísticas tabuladas de Hs [m], Tp [s] y Dpk [°].

	Mediciones in-situ (6 de Septiembre a 3 de Octubre 2010)	Estudio Hindcast-Transferencia de olas (6 de Septiembre a 3 de Septiembre 1985-2006)
Número de datos	216	4928
Máximo	3.52	2.78
Mínimo	0.70	0.49
<b>Promedio</b>	<b>1.46</b>	<b>1.40</b>
Desviación Estándar	0.39	0.40
Percentil 25%	1.20	1.09
Percentil 75%	1.69	1.67

**Tabla 5-12: Comparación de estadísticos de Hs [m], Hindcasting v/s mediciones  
Fuente: DOP (2010).**

En la Tabla 5-12 se aprecia que en promedio las alturas difieren en solo 6 [cm], esto considerando la gran diferencia de datos insitu y los hindcast, lo que se evidencia en los valores extremos de mínimo y máximo.

	Mediciones in-situ (6 de Septiembre a 3 de Octubre 2010)	Estudio Hindcast-Transferencia de olas (6 de Septiembre a 3 de Septiembre 1985- 2006)
Número de datos	216	4928
Máximo	17.1	20.4
Mínimo	2.0	6.3
<b>Promedio</b>	<b>12.6</b>	<b>13.2</b>
Desviación Estándar	2.5	1.8
Percentil 25%	11.5	12.1
Percentil 75%	14.1	14.4

**Tabla 5-13: Comparación de estadísticos de Tp [s], Hindcasting v/s mediciones.  
Fuente: DOP, (2010).**

Del mismo modo en la Tabla 5-13, se observa que los periodos tienen una similar distribución, con una diferencia de periodo de unos 0.8 [s]. Además de una diferencia no relevante en la determinación del clima de oleaje en el sector.

	Mediciones in-situ (6 de Septiembre a 3 de Octubre 2010)	Estudio Hindcast-Transferencia de olas (6 de Septiembre a 3 de Septiembre 1985- 2006)
Número de datos	216	4928
Máximo	263	276
Mínimo	227	214
<b>Promedio</b>	<b>245</b>	<b>230</b>
Desviación Estándar	7	5
Percentil 25%	240	226
Percentil 75%	250	233

**Tabla 5-14: Comparación de estadísticos de Dpk [°], Hindcasting v/s mediciones Fuente: DOP, (2010).**

Las direcciones obtenidas del hindcasting en la Tabla 5-10 difieren en promedio 15° hacia el sur, sin tener algún dato estadístico que escape abruptamente, lo que se manifiesta en las transferencias del modelo STWAVE.

En general, los datos modelados en el sitio se ajustan de modo adecuado a las mediciones, de manera que la base de datos es apropiada para su utilización en este estudio.

### **5.4.3 BASE DE DATOS 3: ESTIMACIÓN DEL CAMPO DE OLEAJE EN PLAYA BRAVA CON MES DE HINDCASTING**

Se realizó un análisis de datos de oleaje perteneciente al proyecto de Olas Chile del nodo Iquique, coincidente con el periodo de medición in-situ en Playa Brava. Los datos de aguas profundas se utilizaron con el fin de obtener los tensores de radiación y así poder ingresarlos como forzante en la evaluación de las corrientes litorales en el sitio de estudio, a través de una modelación hidrodinámica vistas en la sección 5.6. Para finalizar el análisis de oleaje, se realizó la validación del modelo MIKE 21 SW.

#### **5.4.3.1 ANÁLISIS EN AGUAS PROFUNDAS**

Los datos utilizados del nodo Iquique corresponden al período del 6 de Septiembre del 2010 al 3 de Octubre del 2010. El análisis descriptivo se resume en la Tabla 5-15 y Tabla 5-16.

		Dirección [°]									
		S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	N	
Hs [m]	0-0.5										0.0%
	0.5-1										0.0%
	1-1.5										0.0%
	1.5-2		19.0%	4.9%							23.9%
	2-2.5		21.6%	12.3%							34.0%
	2.5-3		11.9%	23.5%							35.4%
	3-3.5		3.4%	3.4%							6.7%
	3.5-4										0.0%
		0.0%	56.0%	44.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%

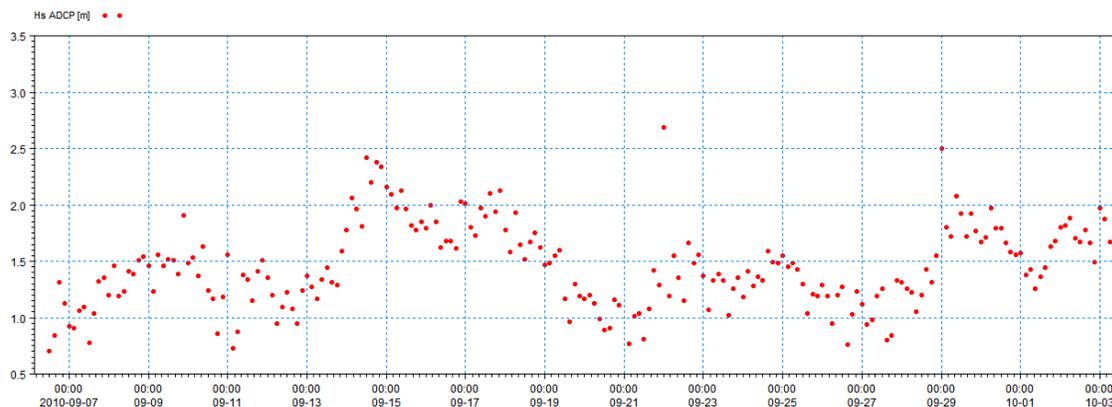
**Tabla 5-15: Tabla de incidencia altura de oleaje v/s dirección, mes de Hindcasting.**  
Fuente: Elaboración propia.

		Dirección [°]									
		S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	N	
Tp [s]	2-4										0.0%
	4-6										0.0%
	6-8		0.4%								0.4%
	8-10		4.1%								4.1%
	10-12		7.5%	1.9%							9.3%
	12-14		25.4%	25.7%							51.1%
	14-16		15.7%	14.2%							29.9%
	16-18		3.0%	2.2%							5.2%
	18-20										0.0%
	20-22										0.0%
		0.0%	56.0%	44.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%

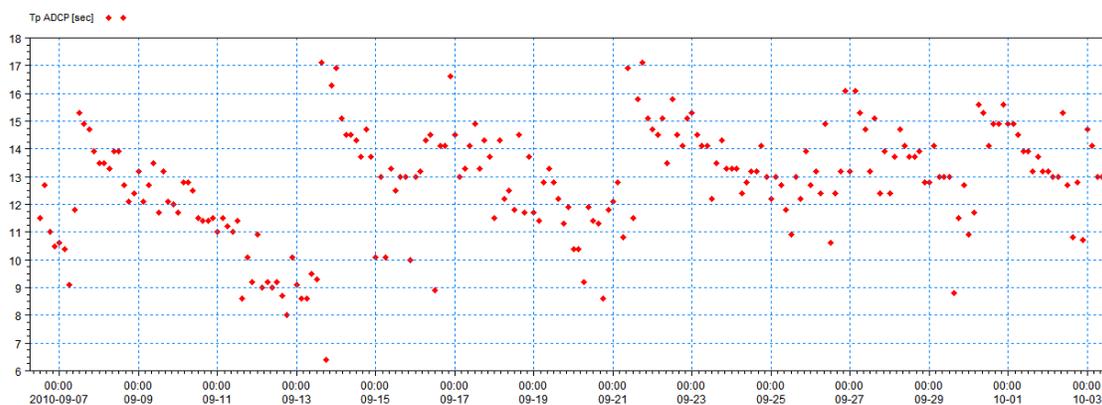
**Tabla 5-16: Tabla de incidencia periodo v/s dirección, mes de Hindcasting.**  
Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 5-15 se observa que las direcciones de oleaje reinante y dominante corresponden al SW y SSW.

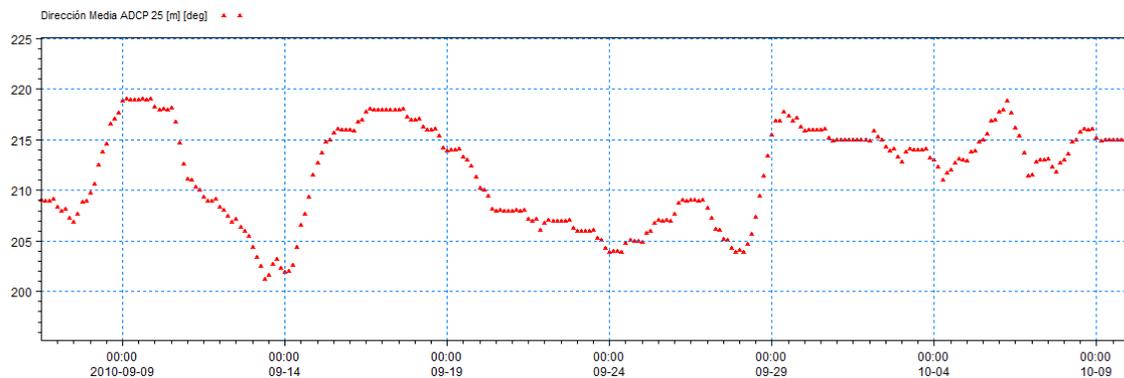
Respecto a la Tabla 5-15 y Tabla 5-16, la tendencia en aguas profundas de mayor incidencia es el oleaje con alturas entre 2 y 3 [m] (69.4%) con periodos de entre 12 y 16 [s] (81.0%), cuyas bandas direccionales de mayor incidencia son del tercer cuadrante SSW (56.0%), seguido por direcciones del SW (44.0%).



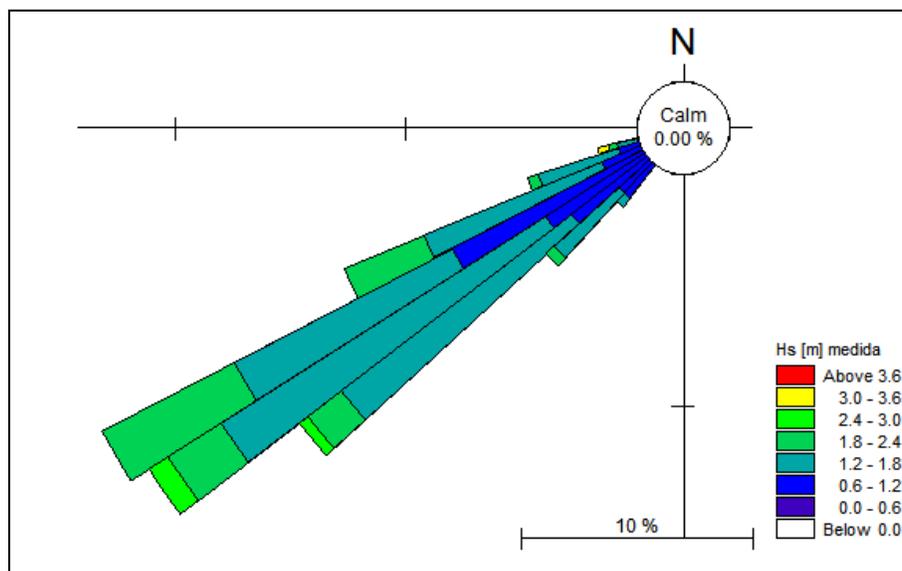
**Figura 5-19: Alturas Significativas, Datos Insitu, mes de Hindcasting.  
Fuente: Elaboración propia.**



**Figura 5-20: Periodos, Datos Insitu, mes de Hindcasting.  
Fuente: Elaboración propia.**



**Figura 5-21: Direcciones, Datos Insitu, mes de Hindcasting.  
Fuente: Elaboración propia.**



**Figura 5-22: Rosa de oleaje, mes de Hindcasting.**  
**Fuente: Elaboración propia.**

En la Figura 5-19, Figura 5-20 y Figura 5-21 se presentan las series de tiempo analizadas dato a dato para ver el comportamiento de cada variable. La Figura 5-22 muestra que el mayor porcentaje de olas provienen del tercer cuadrante con una altura que va entre los 2 y 3 [m] aproximadamente; así mismo las intensidades mayores tienen una dirección incidente del SSW.

#### 5.4.4 GENERACIÓN DEL MODELO MIKE 21 SW

Para la propagación de los datos de aguas profundas se utilizó el modelo numérico MIKE 21 SW (acápite 4.1). Como entrada de este modelo, se utilizó la batimetría descrita en el ítem 5.3, y se utilizó sólo la forzante dadas por el oleaje, sin considerar vientos u otra variable que ingrese energía al modelo.

Se utilizó el modo cuasi-estacionario de MIKE 21 SW, el cual simula cada estado de mar de la serie de tiempo que se ingresa al modelo. Por tal motivo se realizó un desfase de tiempo a los datos de aguas profundas para considerar el tiempo de viaje de cada parámetro de resumen del estado de mar, a modo de obtener los resultados del oleaje correspondiente a los mismos instantes de medición en el sitio de estudio.

Teniendo en cuenta la distancia entre la ubicación del nodo Iquique de Olas Chile y el sitio de estudio, se calculó el tiempo de arribo del oleaje, el que fue agregado al instante en cada estado de mar del nodo Iquique. Con esta serie de tiempo modificada, se interpolaron datos de Hs, Tp y Dpeak para los mismos instantes de medición en el sitio de estudio, los cuales se forzaron en los contornos en el modelo. En la Figura 5-23 se observa las alturas de olas de los datos del nodo Iquique versus los datos de las olas interpoladas en las cuales se aplicó el tiempo de arribo a la costa, aplicando en la Ecuación 47.

$$C_0 = \frac{g \cdot T}{2\pi}$$

$$t = \frac{D}{C_0}$$

**Ecuación 47**

Donde:

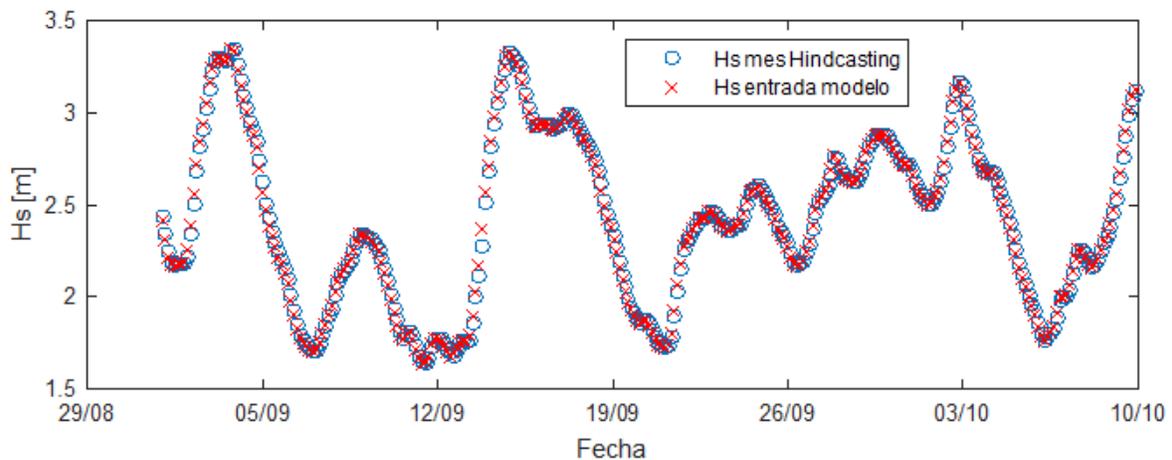
$C_0$ : Celeridad en aguas profundas

$g$ : Gravedad

$T$ : Periodo del oleaje (se utilizó todos los periodos, de cada estado de mar.)

$t$ : Tiempo de viaje (o arribo) del oleaje insitu.

$D$ : Distancia entre nodo Iquique al sitio de estudio.



**Figura 5-23: Corrección temporal de alturas de ola.  
Fuente: Elaboración propia.**

Se observa que entre la data cruda y la data corregida, no existe una gran variación como lo indica la Figura 5-23.

#### 5.4.4.1 MALLA NUMÉRICA

La malla se construyó a partir de condiciones de aguas profundas las cuales dependen del mayor periodo de registro de la data de oleaje. La malla comienza desde una profundidad mayor dada por la Ecuación 48.

$$L_0 = \frac{gT^2}{2\pi}$$

$$\frac{d}{L_0} < 0.5$$

**Ecuación 48**

Donde:

$L_0$ : Longitud de oleaje en aguas profundas.

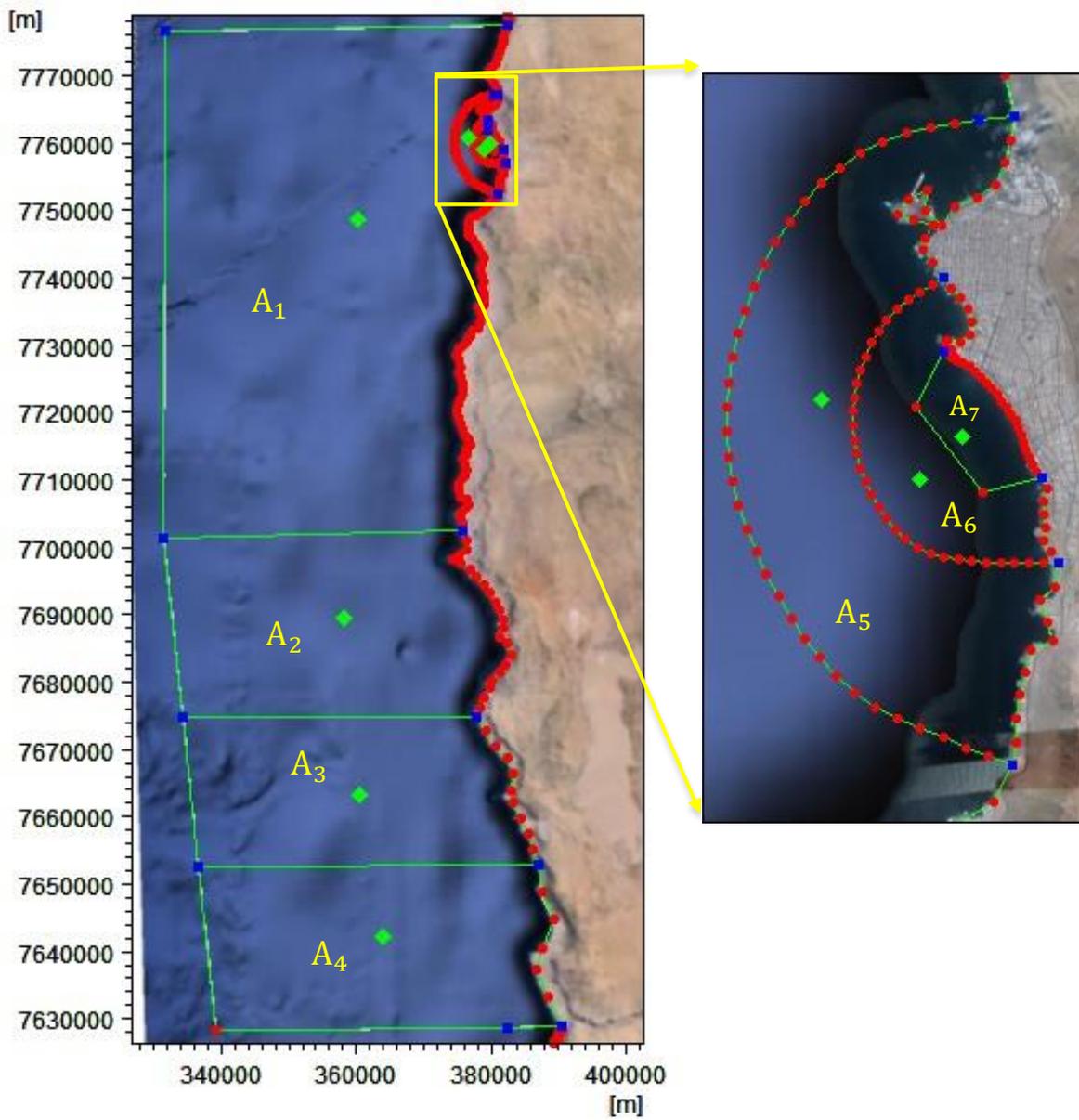
d: Profundidad.

La base de datos de aguas profundas correspondiente al mes de Septiembre, indica que el máximo periodo es de 17.7 [s], el cual se asocia a una longitud de onda de 492 [m]. Aplicando la Ecuación 80, la condición de aguas profundas corresponde a los 250 [m] aproximadamente.

Una vez trazado el límite de aguas profundas se procedió a proyectar la forma que tendrá la malla numérica, en la que se consideró el oleaje proveniente del tercer cuadrante (Sur a Oeste). Para obtener una adecuada resolución en el sector de estudio sin necesidad de recurrir a un elevado gasto computacional, se definieron distintas secciones mediante polígonos. El polígono exterior que encierra el sector de estudio se configura con el límite de área menor con la finalidad de obtener la resolución necesaria para el análisis. Los polígonos aledaños se le asignan el límite de área a una razón de 3, a medida que se va alejando de la zona de estudio. Esto para evitar cambios abruptos entre los tamaños de los elementos y evitar inestabilidades numéricas en el modelo.

Se consideraron las direcciones provenientes del SW y SSW como las más influyentes de acuerdo al análisis de la Tabla 5-15 y Tabla 5-16, como también la configuración geográfica. Se construyó una malla flexible triangular, la cual se puede acomodar de buen modo en las zonas irregulares. Sus elementos varían respecto al nivel de resolución espacial, a los gradientes batimétricos en el sector y a la discretización del tiempo con el que se desea calcular.

En la Figura 5-24 se muestra la configuración general de la malla, en la que se aprecian los polígonos trazados con sus respectivas áreas.



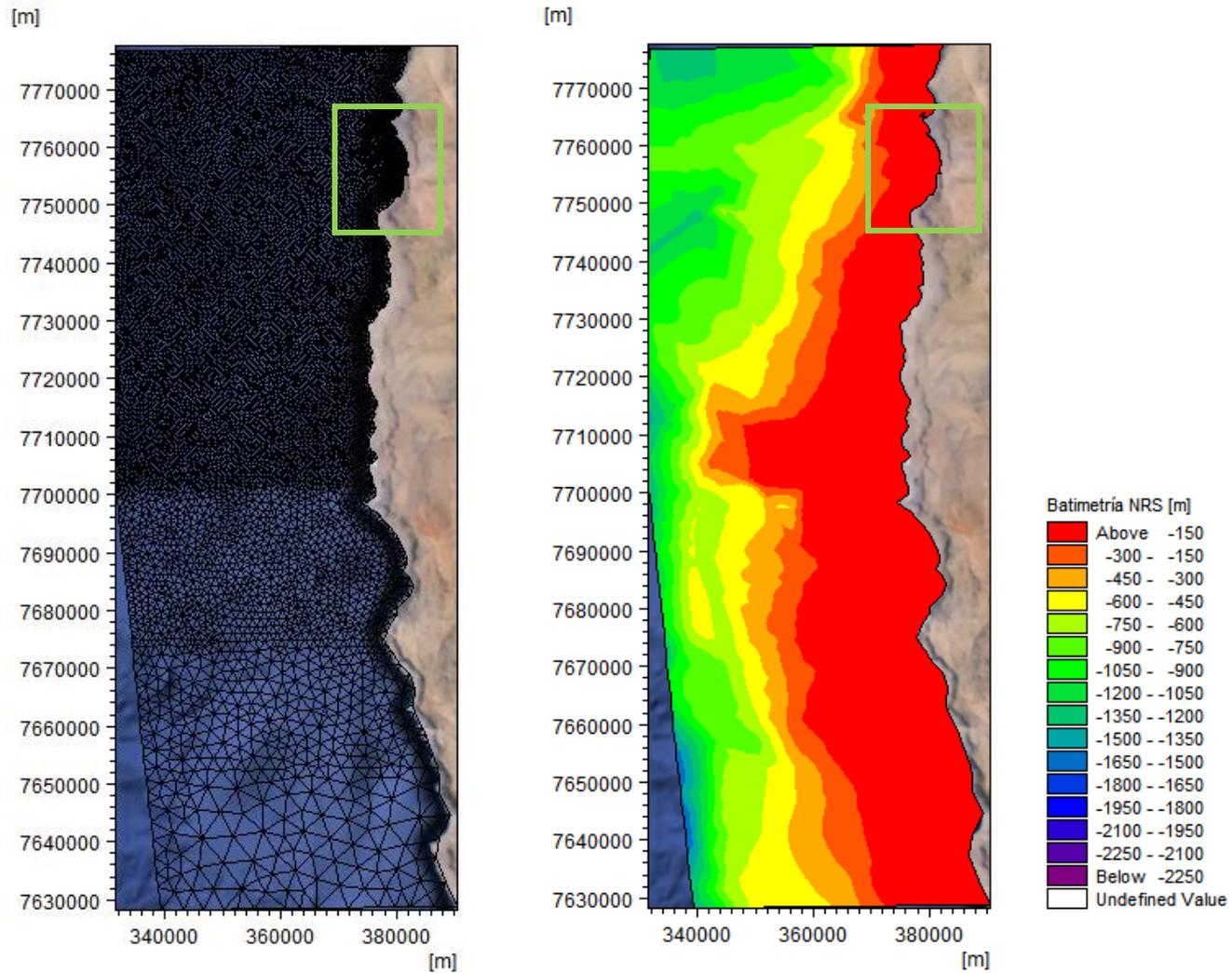
**Figura 5-24: Polígonos de restricción de área de elementos, Modelo Mike SW.  
Fuente: Elaboración propia.**

Zona	Área [ $m^2$ ]
A <sub>1</sub>	405.000
A <sub>2</sub>	1.215.000
A <sub>3</sub>	3.645.000
A <sub>4</sub>	10.935.000
A <sub>5</sub>	135.000
A <sub>6</sub>	45.000
A <sub>7</sub>	15.000

**Tabla 5-17: Descripción de Áreas en el Mallado SW.**  
**Fuente: Elaboración propia.**

En la Tabla 5-17, se describieron las áreas de cada zona del mallado de la Figura 5-24, donde A<sub>7</sub> tiene una extensión más densa, es ahí donde está enfocada la zona estudio.

Con lo descrito anteriormente, se procedió a generar la malla junto con la interpolación de los datos batimétricos del sector para ser utilizada en el modelo numérico MIKE 21 SW. La malla obtenida se aprecia en la Figura 5-25.



**Figura 5-25: Malla numérica de batimetría para modelo Mike SW.  
Fuente: Elaboración propia.**

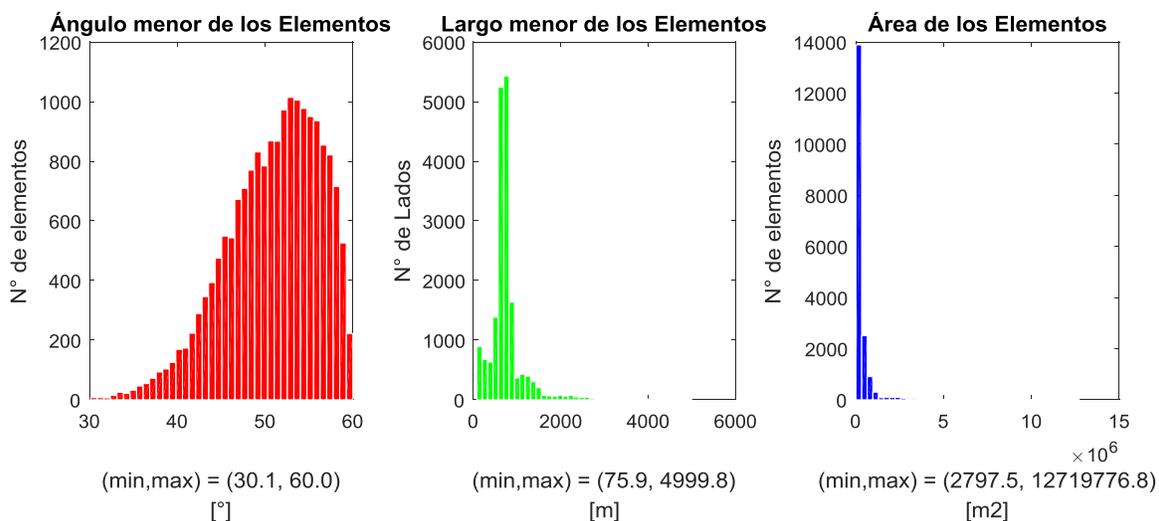
Una vez obtenida la malla, se procedió a realizar un análisis estadístico. En la Tabla 5-18, se aprecian datos básicos de ésta:

Información	Valor
Número de nodos	9.370
Número de elementos	18.259
Área elemento menor [m <sup>2</sup> ]	2.797
Área elemento mayor [m <sup>2</sup> ]	12.719.776
Ángulo mínimo menor [°]	30
Ángulo mínimo mayor [°]	60

**Tabla 5-18: Información general de malla para modelo Mike SW.**  
**Fuente: Elaboración propia.**

Las profundidades del mallado oscilan entre los 5 y 1.699 [m] aproximadamente, cumpliendo con las condiciones en aguas profundas.

La calidad de la malla se presenta en la Figura 5-26, en la que se aprecia que los tamaños de los elementos varían desde 2.797 [m<sup>2</sup>] hasta 12.719.776 [m<sup>2</sup>] aproximadamente.



**Figura 5-26: Parámetros de elementos para modelo Mike SW.**  
**Fuente: Elaboración propia.**

Se observa en la Figura 5-26, que más del 50% de los triángulos tienen un ángulo mínimo mayor a 40°, lo cual expresa una buena calidad de elementos. El largo menor y área de los elementos dependen del lugar y aproximación al sector de estudio. Las aristas de mayor longitud y área corresponden a los triángulos en las zonas más profundas y alejadas del sitio de estudio.

#### 5.4.4.2 CONDICIONES DE BORDE

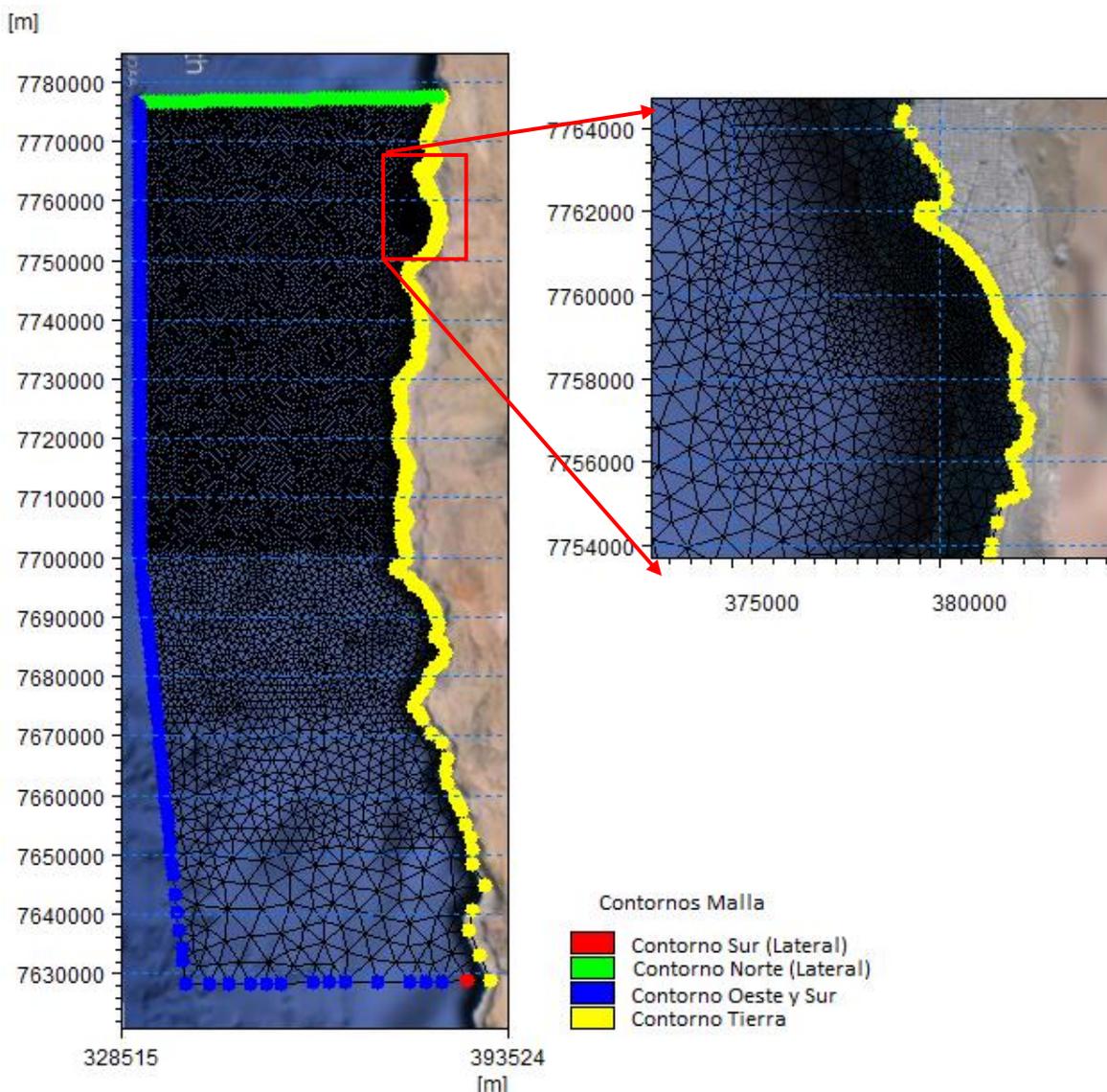
El dominio de la malla contiene dos tipos de contornos disponibles: las condiciones cerradas para línea de costa con los contornos sin forzantes y los bordes con condiciones forzantes constantes en el espacio y variables en el tiempo.

Las condiciones de bordes cerradas corresponden a la línea de costa sin forzante, en las cuales no hay entrada de oleaje al dominio, de forma que la energía que incide en este contorno es absorbida por completo.

En los contornos de forzantes se utilizó la pestaña llamada “versión 1” dada por MIKE 21 SW, la cual fue seteado con la variable constante en el espacio y en el tiempo, permitiendo así ingresar una serie de tiempo de oleaje en zonas de aguas profundas. Estas condiciones son especificadas con los parámetros de resumen Hs [m], Tp [s] y Dirm [°], y distribución de cada contorno.

La condición de borde del lado E, donde se encuentra la línea de costa (color amarillo), fue configurada con un contorno cerrado. El borde N (color verde) se le da una condición lateral, de modo que la energía que llegue a éste pueda desaparecer del modelo. El contorno W y S (color azul) son el borde en donde se ingresaron las condiciones de oleaje como serie de tiempo a propagar, esto debido a que el 100% del oleaje proviene de la dirección SW (Tabla 5-15). Finalmente, el sector E del contorno S (color rojo) se configuró con una condición de borde lateral con el propósito de generar una extensión entre la línea de costa y la condición de aguas profundas. Esta extensión se posicionó a una distancia considerable y adecuada para disminuir el efecto de la sombra numérica que pueda provocar la simulación del oleaje proveniente del SW, asegurando que no interfiera en la zona de estudio.

Lo descrito anteriormente se puede apreciar en la Figura 5-27.

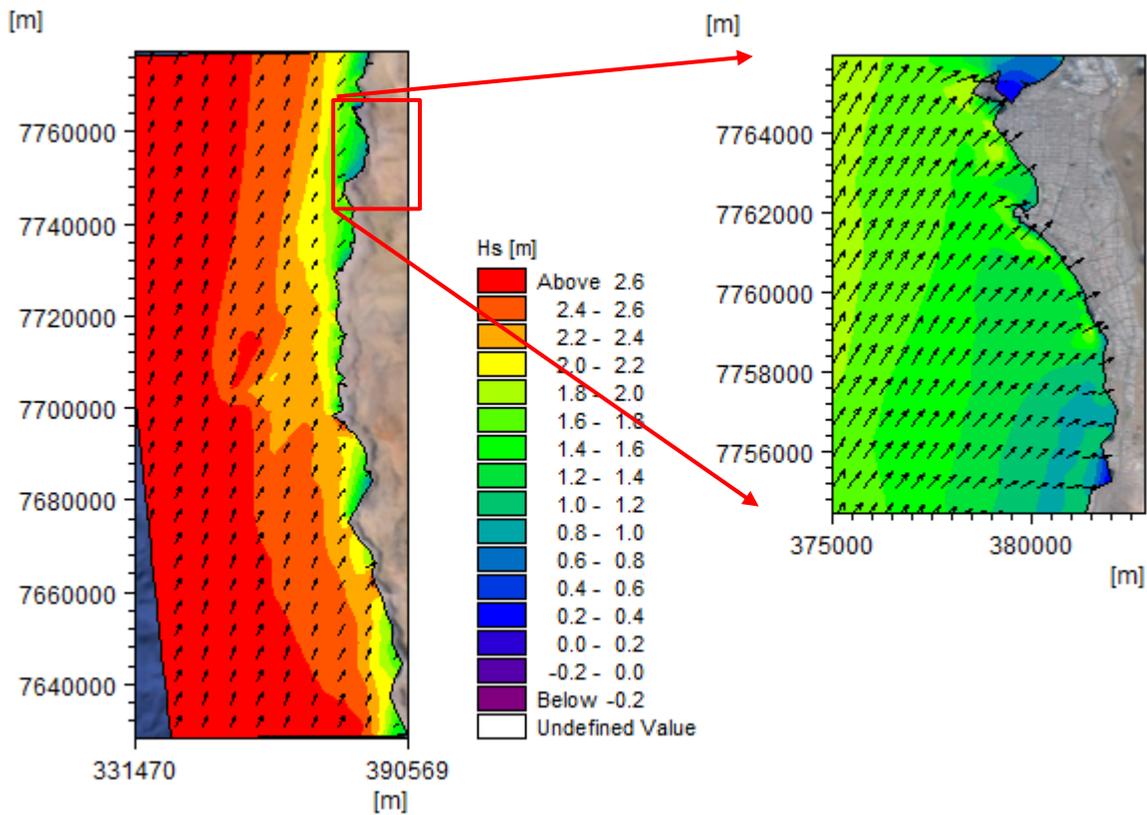


**Figura 5-27: Esquema de ubicación de condiciones de borde.**  
**Fuente: Elaboración propia.**

#### 5.4.4.3 RESULTADOS DEL MODELO

La serie de tiempo de estados de mar se propagó al sitio de estudio, obteniendo así los resultados para el nodo de ubicación del ADCP 25 [m] de profundidad. A modo de ejemplo se muestra el resultado del área modelada para el timestep de fecha 14/9/2010 y hora 00:00 correspondiente al estado de mar en condiciones de aguas profundas con Hs de 2.7 [m] Tp de 14.9 [s] y Dirmed de 202°.

En la Figura 5-28, se aprecia que los vectores en la zona de estudio se ubican en forma perpendicular a la línea de costa, con una indicada propagación del oleaje.



**Figura 5-28: Propagación de estado de mar (14/9/2010).**  
**Fuente: Elaboración propia.**

El oleaje propagado consiste en 268 estados de mar, correspondientes a la fecha entre el 6 de Septiembre y 3 de Octubre, obtenidos en el punto de ADCP 25 [m] de profundidad. La Tabla 5-19, Tabla 5-20 y la Figura 5-29 muestran el resumen de la estadística propagada en dicha ubicación.

		Dirección [°]									
		S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	N	
Hs [m]	0.0 - 0.5										0.0%
	0.5 - 1.0			2.3%							2.3%
	1.0 - 1.5		0.5%	50.0%							50.5%
	1.5 - 2.0		0.5%	27.3%							27.8%
	2.0 - 2.5			19.4%							19.4%
	2.5 - 3.0										0.0%
	3.0 - 3.5										0.0%
	3.5 - 4.0										0.0%
		0.0%	0.9%	99.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%

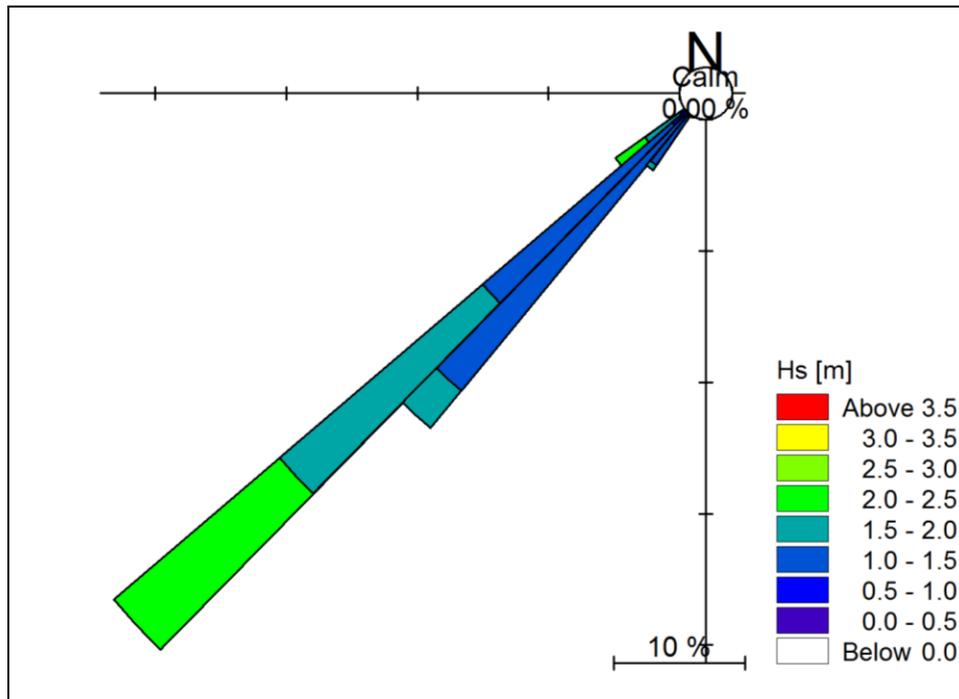
**Tabla 5-19: Tabla de incidencia altura de oleaje v/s dirección, datos modelados.**  
Fuente: Elaboración propia.

		Dirección [°]									
		S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	N	
Tp [s]	2 - 4										0.0%
	4 - 6										0.0%
	6 - 8		0.5%								0.5%
	8 - 10		0.5%	5.1%							5.6%
	10 - 12			12.5%							12.5%
	12 - 14			53.7%							53.7%
	14 - 16			25.5%							25.5%
	16 - 18			2.3%							2.3%
	18 - 20										0.0%
	20 - 22										0.0%
			0.0%	0.9%	99.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%

**Tabla 5-20: Tabla de incidencia periodo v/s dirección, datos modelados.**  
Fuente: Elaboración propia.

Se observó que la dirección del oleaje reinante y dominante corresponde al SW y SSW.

Respecto a la Tabla 5-19 y Tabla 5-20, la tendencia de mayor frecuencia es el oleaje con alturas entre 1–1.5 [m] (50.5%), con periodos entre 12 -14 [s] (53.7%) cuyas bandas direccionales de mayor incidencia son del tercer cuadrante, SW (99.1%), seguido por direcciones del SSW (0.9%).

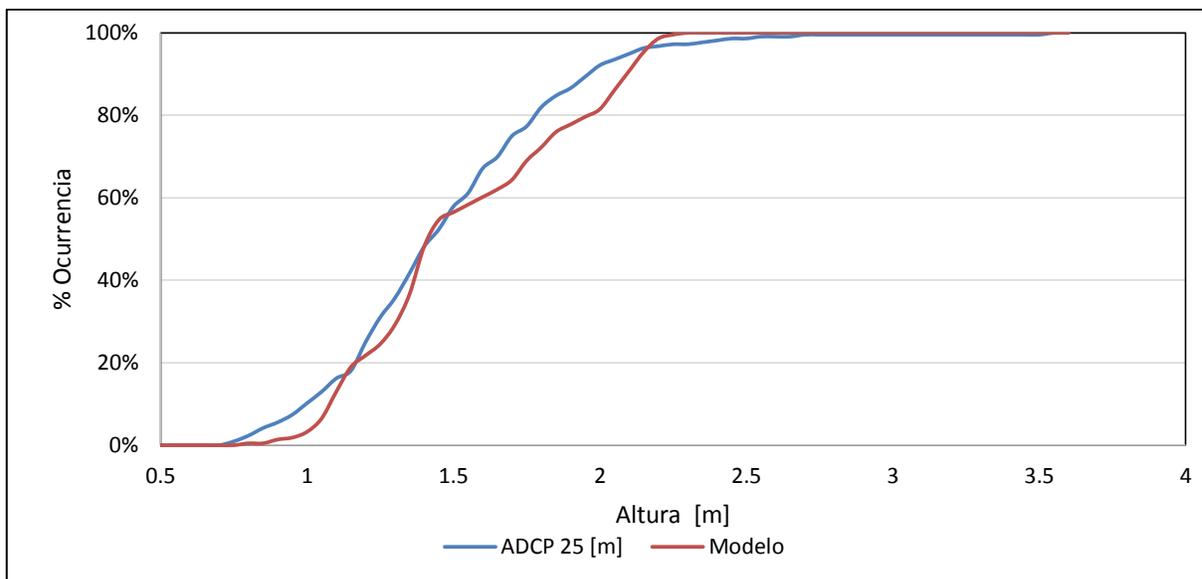


La rosa de la Figura 5-29 muestra que el gran porcentaje de olas provienen del tercer cuadrante con una altura de ola que va entre los 2 y 3 [m] aproximadamente. De esta forma, las intensidades mayores tienen una frecuencia de la dirección incidente del SSW.

#### 5.4.4.4 VALIDACIÓN DEL MODELO

Para la validación del modelo, se realizó una comparación entre el resultado obtenido del modelo y los datos medidos en el ADCP 25 [m].

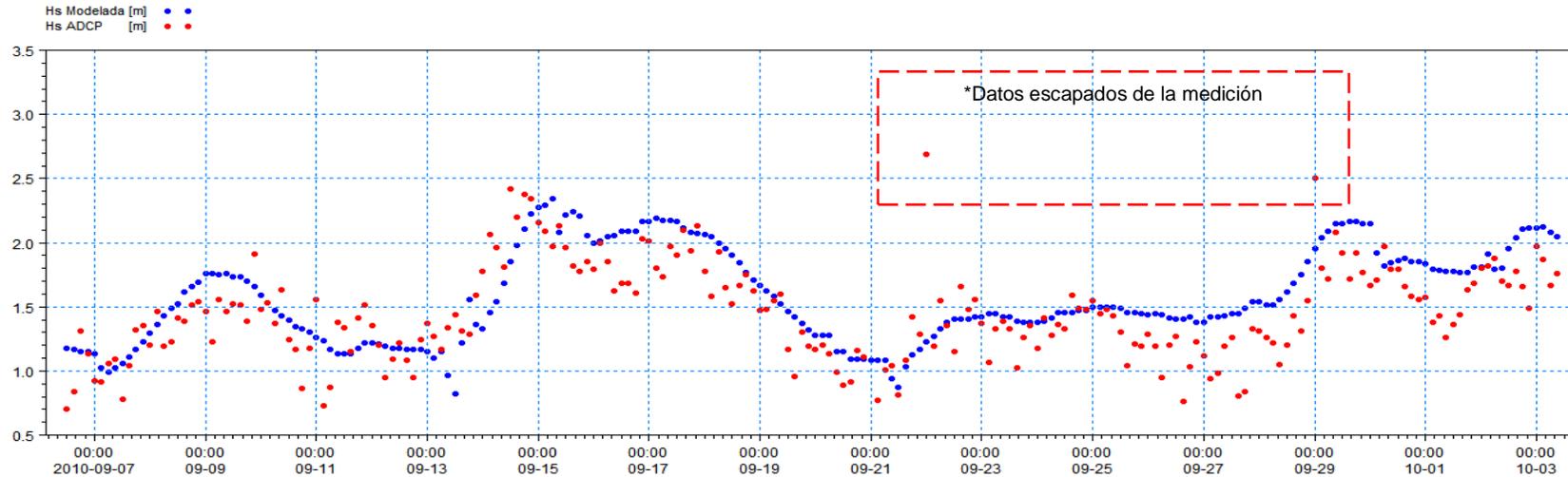
En la Figura 5-30 se comparan las curvas de no excedencia para cada caso, donde se aprecia que existe una similitud en la tendencia de la distribución de alturas entre las modeladas con las mediciones de ADCP.



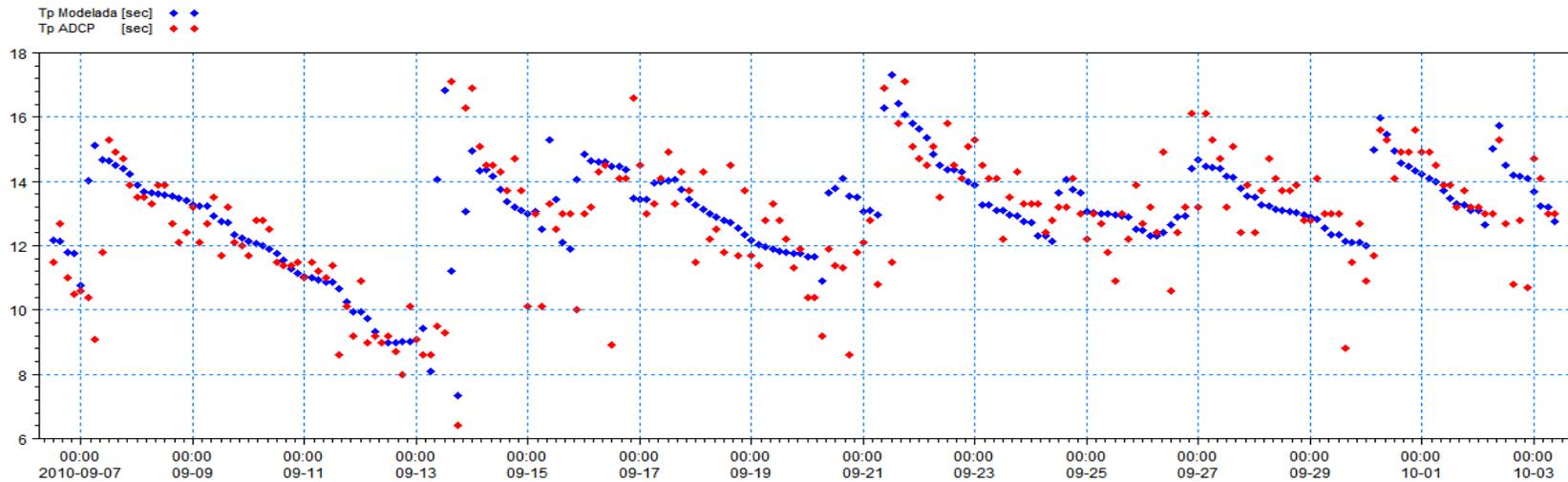
**Figura 5-30: Ajuste datos de alturas significativas ADCP v/s propagadas en Mike 21 SW.**

**Fuente: Elaboración propia.**

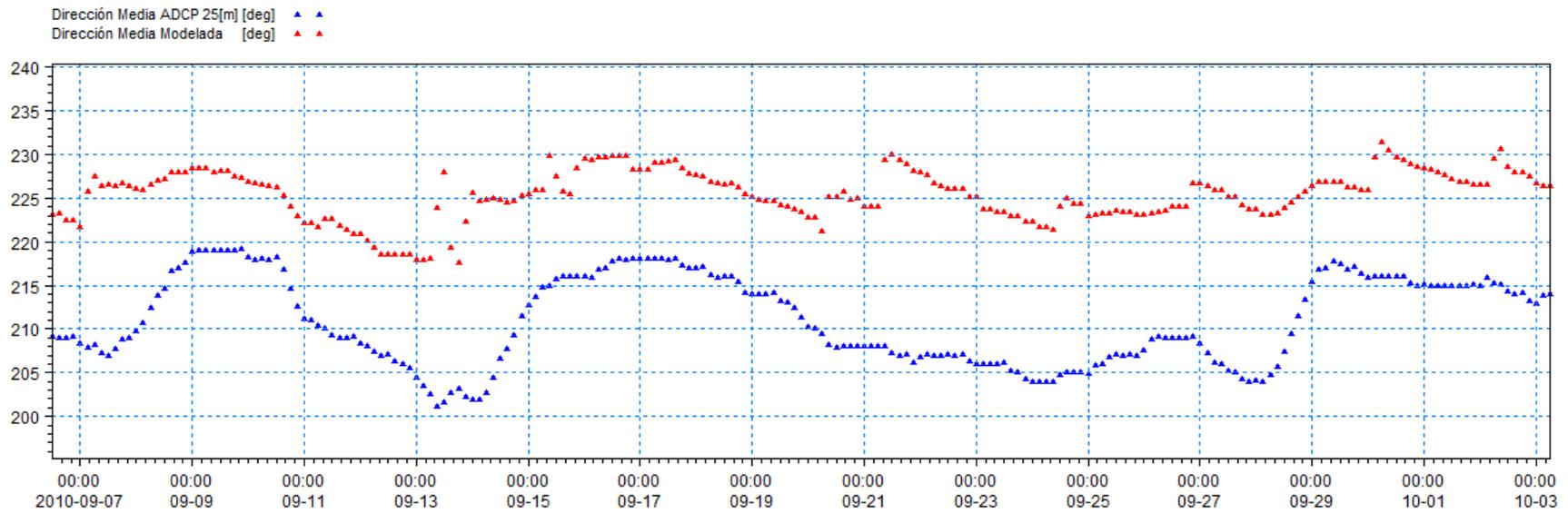
Siguiendo el proceso de validación, se optó por realizar una comparación de las series de tiempo de los datos medidos en conjunto con los datos propagados. Estos se observan en la Figura 5-31, Figura 5-32 y Figura 5-33, series de tiempo que muestran las variables altura, periodo y de dirección media.



**Figura 5-31: Serie de datos de olas modeladas v/s oleaje ADCP 25 [m].**  
Fuente: Elaboración propia.



**Figura 5-32: Serie de datos de periodos modelados v/s periodo ADCP 25 [m].**  
Fuente: Elaboración propia.



**Figura 5-33: Serie de direcciones modeladas v/s direcciones ADCP 25 [m].  
Fuente: Elaboración propia.**

De la Figura 5-31, Figura 5-32 y Figura 5-33, se observa que el modelo (hindcasting) se ajusta adecuadamente a las mediciones. Se presenta cierta irregularidad en los datos de mediciones en comparación a los resultados de alturas del modelo que se destaca en la línea segmentada en rojo en la Figura 5-31.

Para los periodos, en la Figura 5-32, se observa que el modelo representa de buen modo las tendencias de los datos peak de las mediciones.

En las direcciones modeladas en la Figura 5-33, se observa que en general éstas tienden a representar el oleaje, con una diferencia de  $10^\circ$  a  $20^\circ$  app.

Finalmente se puede concluir que tanto la base de datos de oleaje en aguas profundas (parámetros de resumen), como el método de propagación y el modelo numérico empleado, representan de manera adecuada las condiciones de oleaje en el sector de Playa Brava.

#### **5.4.4.5 CAMPO DE TENSORES DE RADIACIÓN**

Con los datos del hindcasting de oleaje del mes de Septiembre del 2010 y la generación de una malla más acotada a la zona de estudio, se obtuvo los tensores de radiación a través del modelo MIKE 21 SW.

En la Figura 5-34 se presentan distintos componentes del campo de tensores calculados por el modelo numérico, en donde sus magnitudes van en aumento al ir aproximándose a zonas poco profundas hasta llegar al punto de rompiente en la zona de estudio.

Las variaciones espaciales del tensor de radiación son causantes de las corrientes litorales en las playas largas, las cuales presentan condiciones adecuadas para que los tensores induzcan sin muchos obstáculos las llamadas corrientes litorales. De esta forma el tensor de variación permite forzar el modelo hidrodinámico MIKE 21 HD para el análisis de las corrientes.

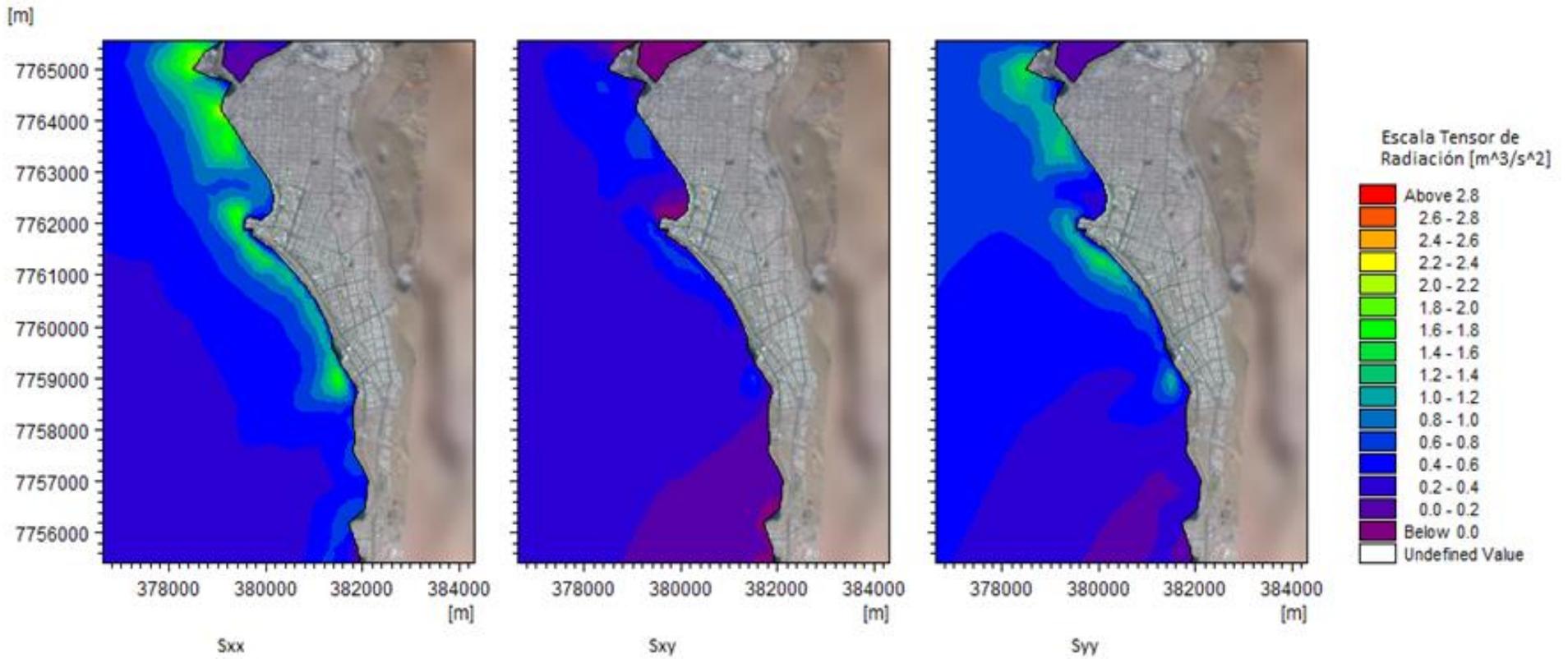
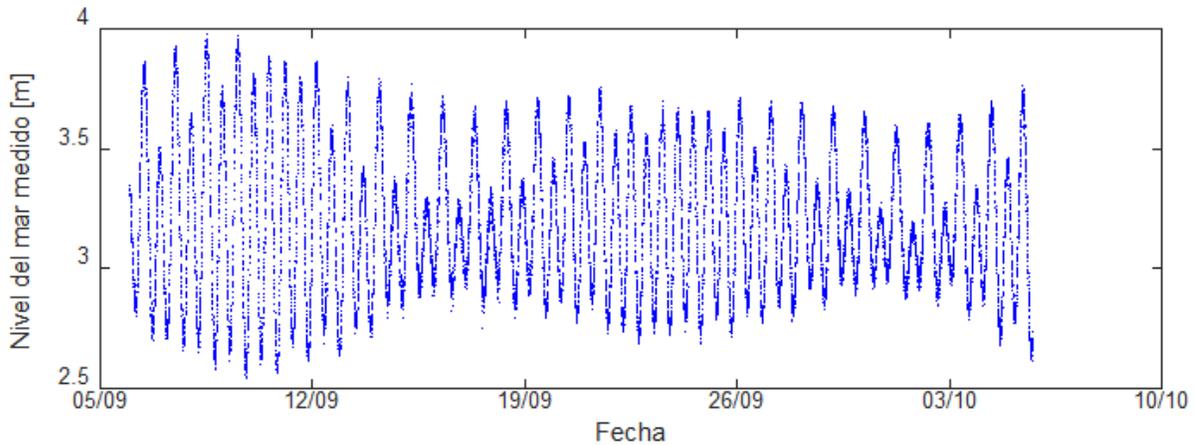


Figura 5-34: Componentes de Tensores de radiación Sxx (izquierda), Sxy (centro), Syy (derecha).  
Fuente: Elaboración propia.

## 5.5 MAREAS

Para analizar la marea en Iquique, se recopilaron datos de la página web <http://www.ioc-sealevelmonitoring.org/> desde el 6 de Septiembre del 2010 hasta el 6 de Octubre del 2010, coincidiendo con el periodo en que se realizó la campaña de medición para los datos de oleaje y corrientes. El registro se presenta en la Figura 5-35.



**Figura 5-35: Marea de Iquique, datos medidos.**  
**Fuente: Elaboración propia.**

A los datos de medición se les aplicó un análisis armónico con la finalidad de obtener las constituyentes armónicas y el nivel de reducción de sondas (NRS). El método empleado para realizar las estimaciones está basado en algoritmos para FORTRAN descritos por Foreman (1977 y 1978). Estos algoritmos utilizan el método de ajuste de mínimos cuadrados para encontrar las fases y amplitudes de las constituyentes armónicas a partir de la serie de datos del nivel del mar observados. La marea se representa en la Ecuación 49:

$$y(t) = b_0 + \sum_{k=1, \dots, N} A_k \cos(\sigma_k t) + B_k \sin(\sigma_k t) + b_1 t$$

**Ecuación 49**

$$A_k = a_k + a_{-k} , B_k = i(a_k - a_{-k})$$

**Ecuación 50**

Donde:

$y(t)$ : Altura de marea en instante  $t$ .

$b_0$ : Nivel medio del mar correspondiente al promedio del nivel en todo el periodo de medición.

$k$ :  $K$ -ésima constituyente de frecuencia  $\sigma_k$ .

$a_k, a_{-k}$ : Amplitud compleja y su conjugada.

Los resultados obtenidos mediante T-Tide corresponden a una serie de constituyentes mareales, los cuales se presentan en la Tabla 5-21.

Armónico	Amplitud	Frecuencia	Armónico	Amplitud	Frecuencia
M2	0.3659	30.59	UPS1	0.0013	152.17
S2	0.1342	44.64	S4	0.0012	262.58
K1	0.1109	33.68	MK3	0.0011	315.32
N2	0.0838	348.07	MS4	0.0011	169.25
O1	0.0828	347.29	M6	0.001	194.5
Q1	0.0147	303.78	2MS6	0.0009	357.51
MSF	0.0133	26.44	2SK5	0.0008	356.4
NO1	0.0132	38.58	2MN6	0.0008	196.23
OO1	0.0094	133.18	M4	0.0007	6.27
J1	0.0086	102.61	M8	0.0006	112.6
M3	0.0073	241.14	2SM6	0.0005	18.45
ETA2	0.0041	185.63	M10	0.0004	259
2Q1	0.0025	283.6	3MK7	0.0003	30.7
MO3	0.0024	122.52	MN4	0.0001	178.59
SK3	0.0014	187.6	2MK5	0.0001	331.84

**Tabla 5-21: Valores de constituyentes armónicas, Iquique.**

**Fuente: Elaboración propia.**

Con los datos obtenidos se identificó el régimen de marea existente en Iquique. Para esto se utilizó la Ecuación 51, donde el coeficiente de Courtier según el SHOA (2002) es definido por las amplitudes de los armónicos  $K_1, O_1, M_2$  y  $S_2$ :

$$\text{Courtier} = \frac{K_1 + O_1}{M_2 + S_2}$$

**Ecuación 51**

El régimen de marea se define para los siguientes rangos:

Si:	Courtier < 0.25	Régimen semidiurno
Si:	0.25 < Courtier < 1.50	Régimen mixto semidiurno
Si:	1.50 < Courtier < 3.00	Régimen mixto diurno
Si:	3.00 < Courtier	Régimen diurno

En este caso, el coeficiente de Courtier para Iquique tiene un valor de 0.387, por lo que el régimen de marea del sector corresponde a un tipo mixto semidiurno. El NRS, fue calculado por la Ecuación 52.

$$NRS=Z_0-(H_{M2}+H_{S2}+H_{N2}+H_{K1}+H_{O1})$$

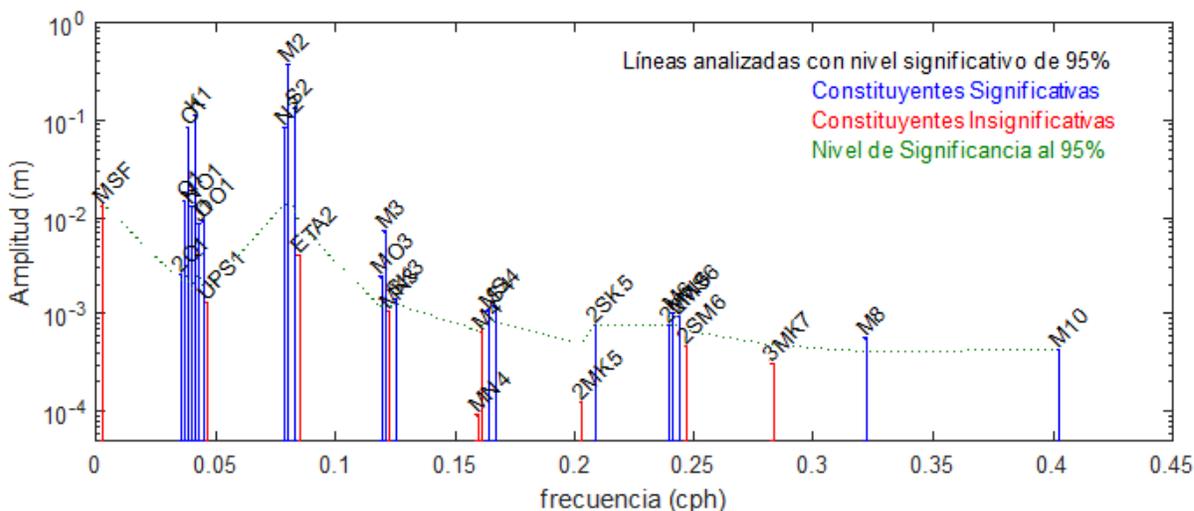
**Ecuación 52**

Donde:

- Z<sub>0</sub>: Nivel Medio del Mar.
- H<sub>M2</sub>: Semiamplitud constituyente lunar principal semidiurno.
- H<sub>S2</sub>: Semiamplitud constituyente solar principal semidiurno.
- H<sub>N2</sub>: Semiamplitud constituyente lunar eclíptica mayor semidiurno.
- H<sub>K1</sub>: Semiamplitud constituyente lunisolar declinacional diario.
- H<sub>O1</sub>: Semiamplitud constituyente lunar declinacional diario.

Siguiendo la Ecuación 52, junto con los valores de los constituyentes mostrados en la Tabla 5-21, el valor de NRS es de 2.442 [m] al cero del instrumento.

La amplitud de las componentes armónicas analizada a través de T-Tide, se muestra en la Figura 5-36.

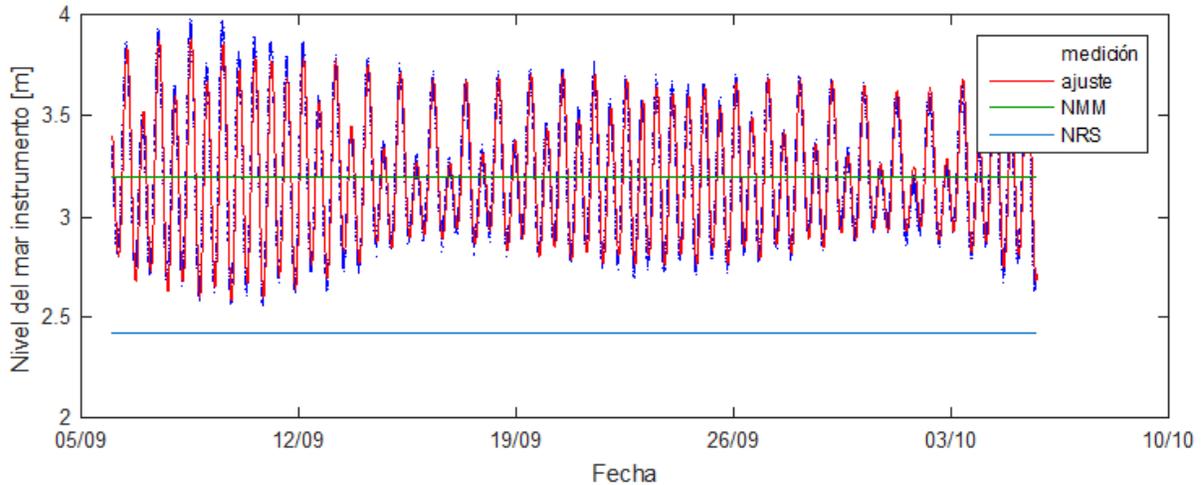


**Figura 5-36: Significancia al 95% de constituyentes mareales, Iquique.**  
**Fuente: Elaboración propia.**

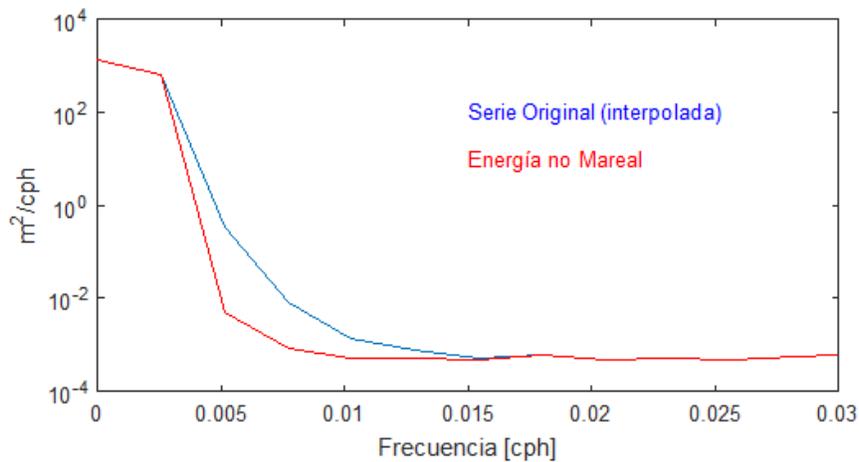
En la Figura 5-36 se aprecia que los componentes mareales principales son significantes en el régimen de mareas.

Con la herramienta T-Tide versión 1.3 beta para Matlab, se realizó un ajuste de la curva de marea utilizando todos los componentes armónicos, cuyo resultado se aprecia en la Figura 5-37, junto con el plano del nivel medio del mar y del NRS con respecto al cero instrumental.

Se aprecia que en las mediciones existen peaks que pueden pertenecer a ondas provocadas por oleaje y a otros fenómenos atmosféricos que afectan el nivel del mar, generando altas frecuencias. Estas variaciones se aprecian con mayor claridad en un análisis espectral de la curva de marea y de niveles del mar sin componentes mareales en la Figura 5-38.



**Figura 5-37: Ajuste de armónicos de curva de marea con respecto al cero instrumental, Iquique.**  
**Fuente: Elaboración propia.**

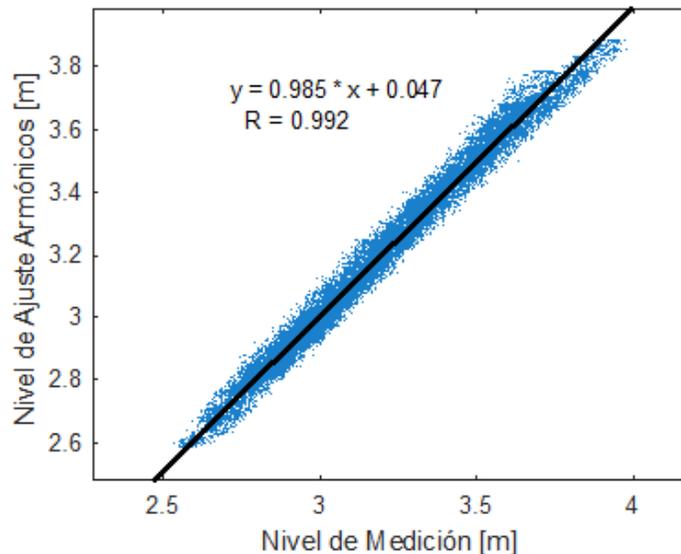


**Figura 5-38: Espectros de nivel del mar, ajuste y medición.**  
**Fuente: Elaboración propia.**

En la Figura 5-38 se observa que existe una energía de las mediciones no asociada a las de las componentes mareales astronómicas.

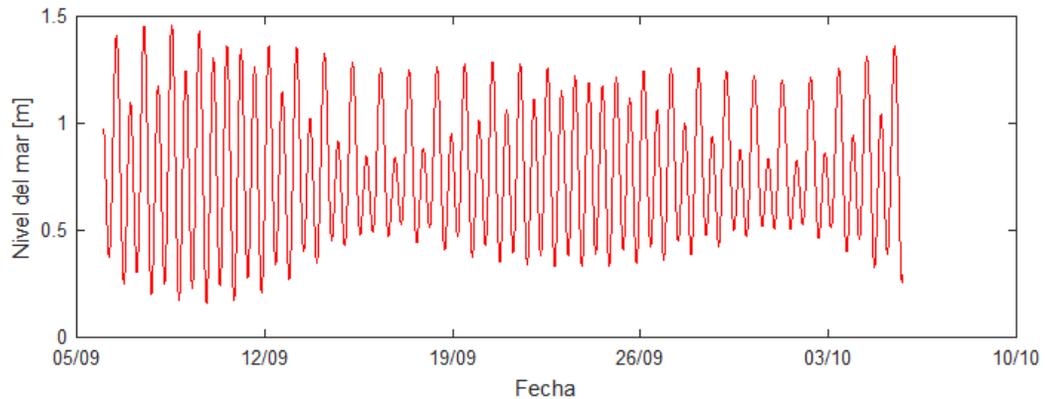
La alta correlación lineal simple entre los datos de medición y los datos obtenidos del ajuste, los cuales se presentan en la Figura 5-39.

El coeficiente de correlación de Pearson al cuadrado tiene un valor de 99.2%, por tanto el ajuste es una buena representación de la curva mareal debido a las forzantes astronómicas.



**Figura 5-39: Correlación lineal de medición v/s ajuste.**  
**Fuente: Elaboración propia.**

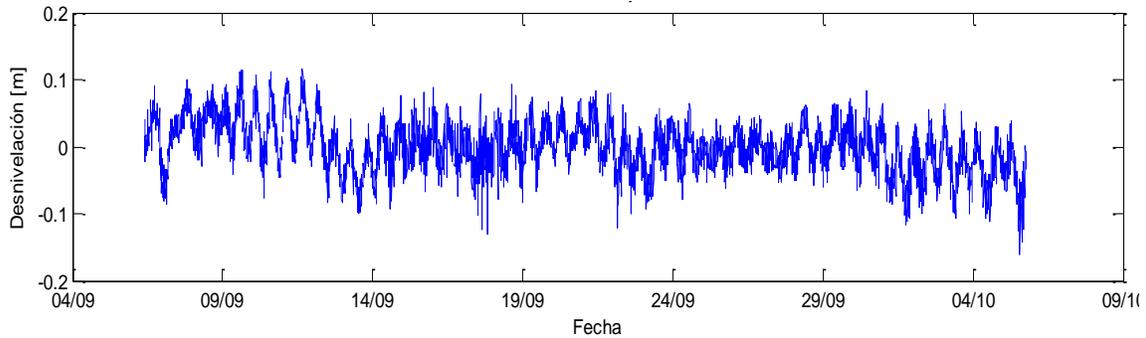
Con estos resultados, se procedió a obtener la curva de marea astronómica con respecto al NRS, substrayendo el nivel de NRS a la curva de ajuste obtenida anteriormente (Figura 5-40).



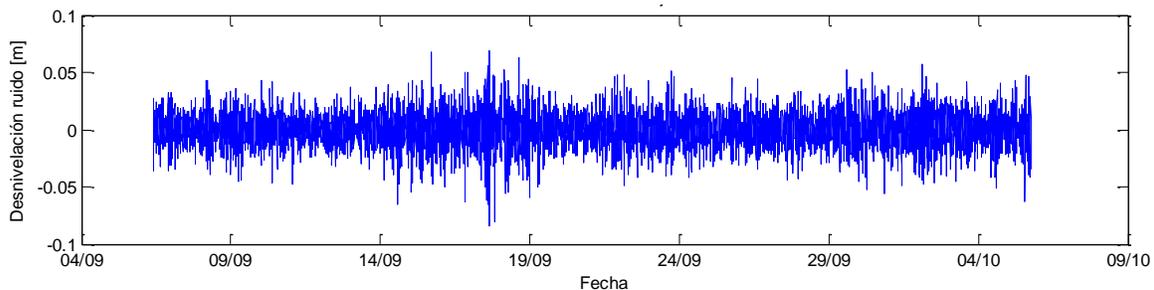
**Figura 5-40: Curva de marea astronómica con respecto al NRS, Iquique.**  
**Fuente: Elaboración propia.**

El nivel medio del mar (NMM) con respecto al NRS es de 0.78 [m]. En la Figura 5-41, se muestra el residuo entre el ajuste y los datos medidos en el sitio, donde se aprecia que existen ondas residuales junto con un ruido de alta frecuencia. Para la modelación en el sector de estudio (sección 5.6.2.3) se requirió simular de modo aleatorio aquel ruido. Para su cuantificación, se filtró el residuo total, a través del método de "Paso alto Lanczos", con

una frecuencia de corte de 1 [cph], de modo de garantizar la eliminación de ondas mareales, obteniendo así el ruido de alta frecuencia como se aprecia en la Figura 5-42.



**Figura 5-41: Residuo de ajuste de marea.**  
Fuente: Elaboración propia.



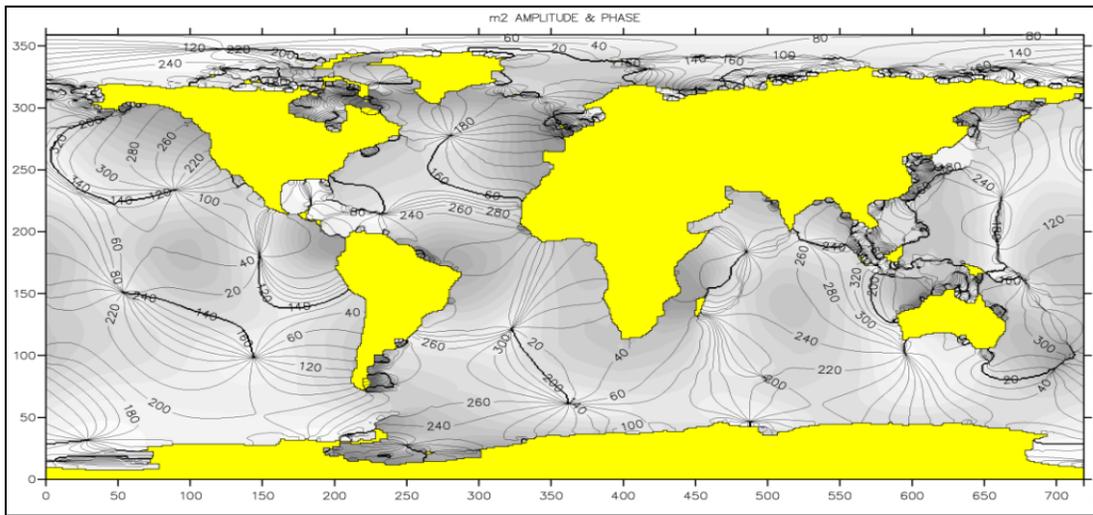
**Figura 5-42: Ruido extraído del ajuste de marea.**  
Fuente: Elaboración propia.

Los valores medios de desnivelación por ruido positivo es de 1.3 [cm] y de desnivelación negativa de 1.3 [cm]. La amplitud media del ruido a simular corresponde a 2.6 [cm], con un máximo de 6 [cm].

### 5.5.1 MODELO GLOBAL DE MAREA

Para la caracterización de corrientes, se fuerzan los modelos hidrodinámicos utilizando datos del modelo global de marea desarrollado por Yongcun Cheng (DHI, 2014). Este modelo consta de una grilla de datos disponibles cada 0.125x0.125 grados para las 10 constituyentes mayores del espectro mareal. Para este modelo se utilizaron los últimos 17 años de multi-misiones de mediciones correspondientes de altimetría satelital TOPEX/Poseidon (fase A y fase B), Jason-1 (fase A y Fase B) y Jason-2 para análisis de residuales de niveles de marea. Basado en lo anterior, DTU Space obtuvo los coeficientes armónicos.

Las constituyentes consideradas son las semidiurnas M2, S2, K2, N2, las diurnas S1, K1, O1, Q1 y la de aguas someras M4. En la Figura 5-43 se muestra un mapa global de la constituyente M2 en el mundo. Se observa que en la zona oriental del Océano Pacífico la marea avanza de norte a sur.



**Figura 5-43: Representación de fase y amplitud de la constituyente M2 en el globo. Fuente: Global Tide Model – Tidal Prediction, (DHI , 2014).**

En Chile la onda de marea se propaga desde el norte hacia al sur. La marea es del tipo mixta-semidiurna, con dos mareas bajas y dos altas cada día (Fariña y camaño, 2012).

## 5.6 CORRIENTES

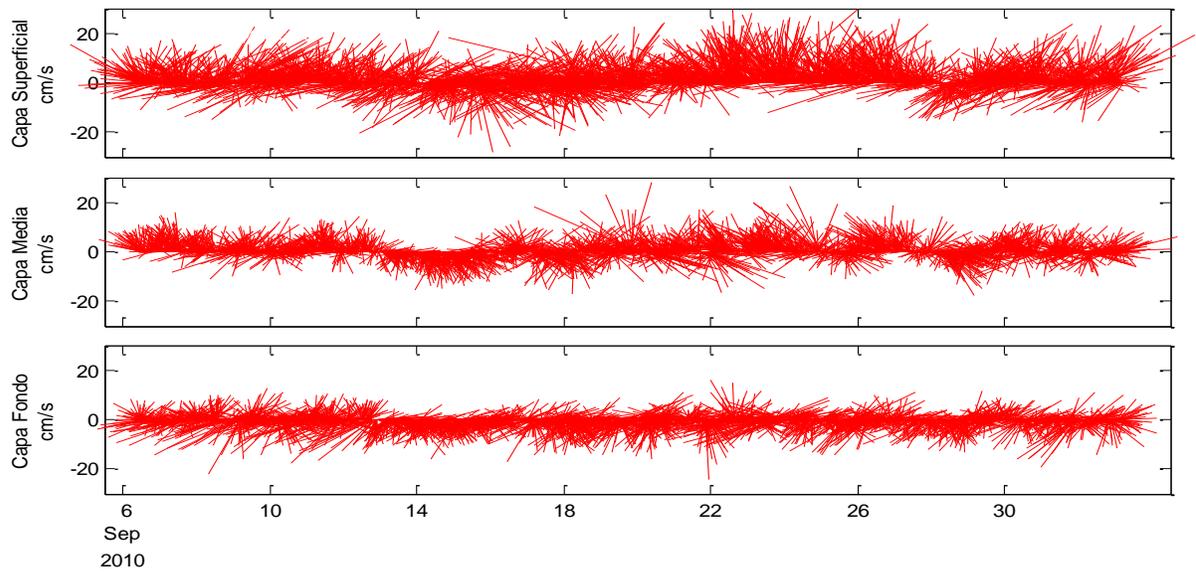
Para la caracterización de las corrientes y el estudio del comportamiento morfodinámico de Playa Brava, se analizaron mediciones de corrientes realizadas en el sector, a partir de las cuales se efectúa una modelación numérica de éstas y luego una validación de los resultados con los datos del ADCP 25 [m].

### 5.6.1 MEDICIÓN DE CORRIENTES

Para la caracterización de mediciones de corrientes, se utilizan datos correspondientes a la campaña realizada por DOP, en la que se instalaron 2 ADCP con fecha 6 de Septiembre de 2010 (Figura 5-6).

Los datos fueron analizados por tres capas de profundidad: capa de fondo, capa intermedia y capa superficial, cuyas distancias se encuentran referidas desde el fondo marino.

Cabe destacar que la capa superficial se encuentra bajo el mínimo valor de la altura de marea observada en todo el largo del registro del instrumento, el cual corresponde a 25.5 [m] desde el fondo marino (DOP, 2010). Los datos utilizados corresponden al ADCP 25 [m] de profundidad, del cual se extraen tres capas, una de fondo (capa 1), una media (capa 10) y una superficial (capa 20) las cuales se puede visualizar en la Figura 5-44.



**Figura 5-44: Diagrama de trazos de datos ADCP.**  
**Fuente: Elaboración propia.**

Para utilizar la data fue necesario aplicar un filtro de paso bajo “lanczos” en las componentes ortogonales, el cual filtra las frecuencias más altas. Esto se realiza para descartar los datos erróneos medidos por el ADCP, ya sea por movimientos del instrumento, perturbaciones, etc.

La información de corrientes fue sometida a un análisis estadístico con frecuencias de ocurrencia por rangos de dirección y magnitud para una rosa de 8 direcciones. También fue procesada, obteniéndose valores horarios a los cuales se les calculó las componentes ortogonales. Con esta información se construyeron diagramas de trazos, histogramas y rosa de direcciones.

En este proyecto de título no se consideró un análisis de vientos, ya que la finalidad de éste es simular la dinámica de Playa Brava, la cual se ve afectada netamente por las corrientes generadas por el oleaje, considerando que el viento influye en las corrientes de la superficie del mar y en menor magnitud en la rompiente del oleaje.

Para hacer un análisis más representativo, se optó por promediar las tres capas, tanto en su magnitud como en su dirección, la cual fue denominada *capa promediada*.

### 5.6.1.1 CAPA PROFUNDA

Las corrientes registradas en la capa profunda presentaron una incidencia hacia las componentes SW (18.3%) y E (16.1%). (Ver Tabla 5-22).

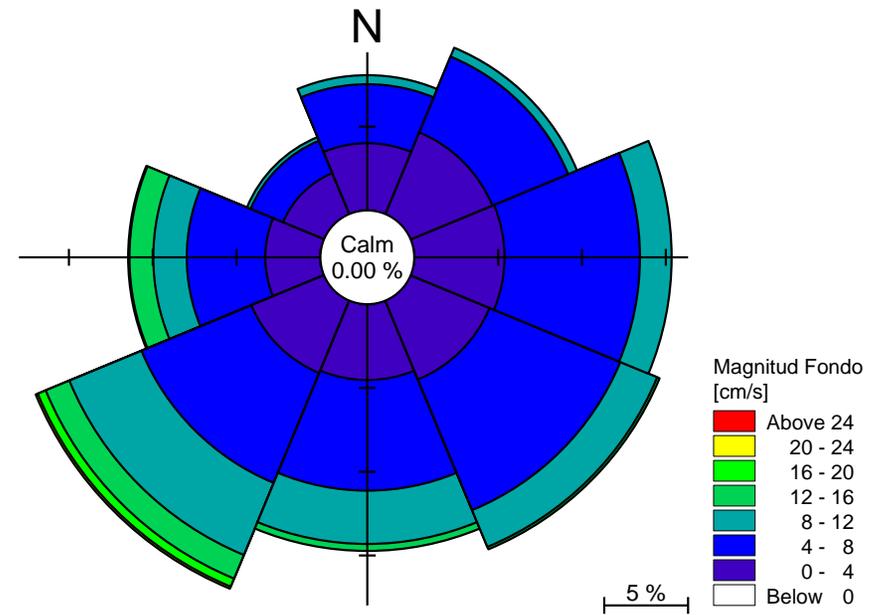
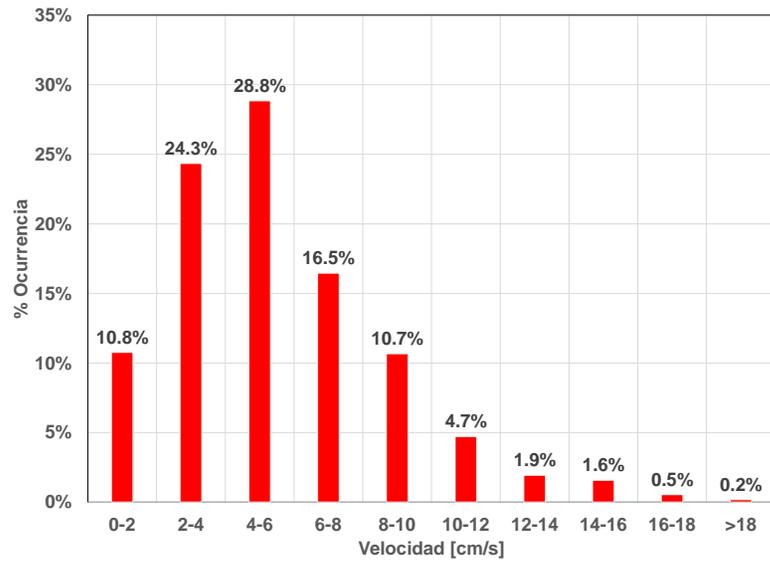
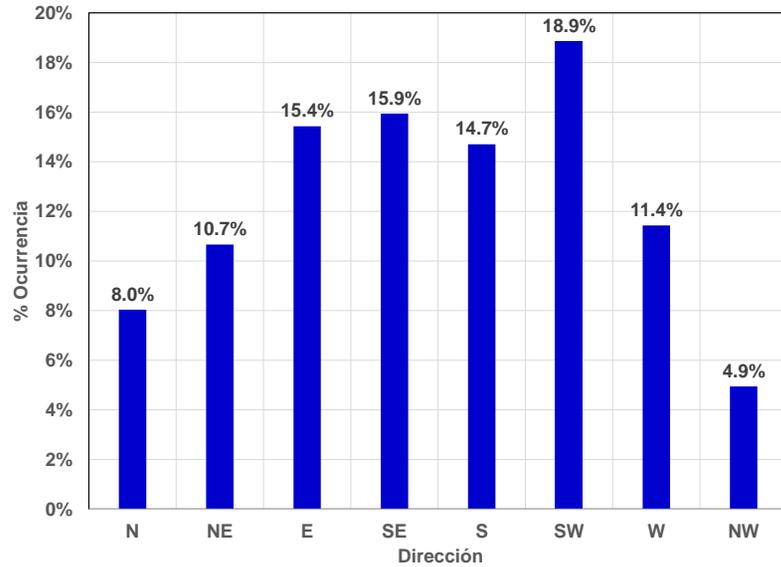
Las velocidades medias registradas presentaron una mayor ocurrencia en el rango de 4 a 6 [cm/s] (28.8%), seguido del rango de 2 a 4 [cm/s] (24.3%), según se observa en la Figura 5-45. La mayor velocidad registrada fue de 21.8 [cm/s] desde la dirección SW, y la velocidad media de 5.5 [cm/s].

Velocidad [cm/s]	Dirección [°]								Total	
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Nº Datos	% Ocurrencia
0 - 2	52	41	61	58	53	64	47	42	418	10.8%
2 - 4	102	163	151	139	123	124	83	60	945	24.3%
4 - 6	96	132	199	212	150	143	123	65	1120	28.8%
6 - 8	41	56	114	113	106	136	57	16	639	16.5%
8 - 10	15	18	63	74	88	110	38	8	414	10.7%
10 - 12	6	4	11	17	35	71	38	1	183	4.7%
12 - 14				6	9	31	29		75	1.9%
14 - 16					7	28	26		61	1.6%
16 - 18						18	3		21	0.5%
>18						7			7	0.2%
Nº Datos	312	414	599	619	571	732	444	192	<b>3883</b>	
% Ocurrencia	8.0%	10.7%	15.4%	15.9%	14.7%	18.9%	11.4%	4.9%		<b>100.0%</b>
									<b>Total</b>	<b>3883</b>
										<b>100.0%</b>

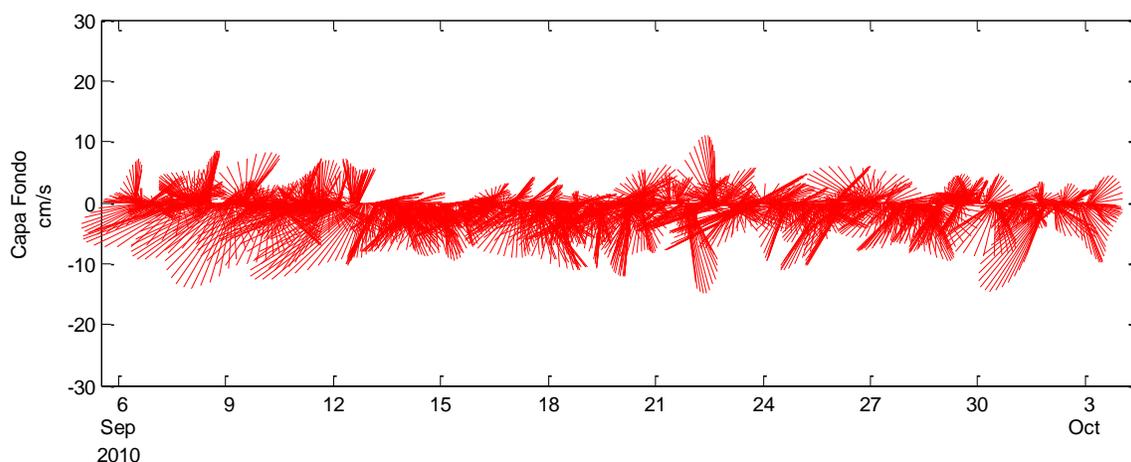
Estadística Básica	Dirección [°]								Total [cm/s]
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	
Vel. Max	11.2	10.6	10.4	13.7	15.1	21.9	17.0	10.3	<b>21.9</b>
Vel. Med	4.3	4.4	5.0	5.3	5.8	7.0	6.5	3.9	<b>5.5</b>
Desvt St	2.3	2.0	2.3	2.5	3.0	4.1	4.0	2.0	<b>3.2</b>

**Tabla 5-22: Tabla de Magnitud de velocidad y dirección, Capa de fondo.**

**Fuente: Elaboración propia.**



**Figura 5-45: Histogramas de velocidades y direcciones, rosas de corrientes capa de fondo.**  
 Fuente: Elaboración propia.



**Figura 5-46: Diagrama de trazos velocidad, capa de fondo.**  
**Fuente: Elaboración propia.**

El diagrama de trazos de la Figura 5-46 muestra la tendencia de la corriente a lo largo del tiempo de registro.

#### **5.6.1.2 CAPA PROMEDIADA (PROMEDIO DE LAS CAPAS FONDO-INTERMEDIA-SUPERFICIAL)**

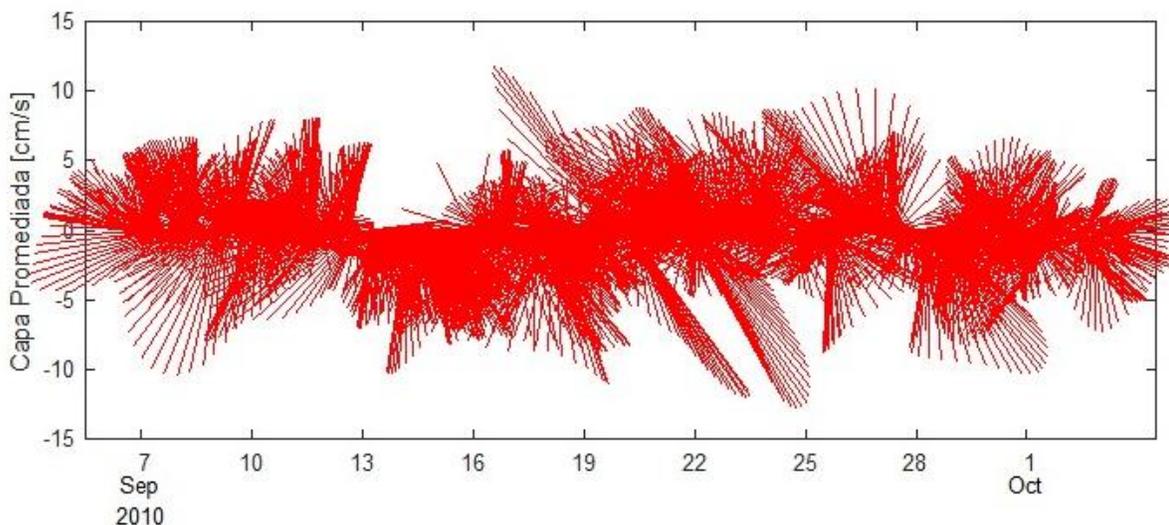
Las corrientes registradas en el nivel intermedio presentaron una incidencia de las 8 direcciones (Tabla 5-18). Sin embargo, es posible observar que las mayores ocurrencias se presentaron desde la dirección SE (17.8%), seguida del N (15.2%), S (12.5%) y NW (13.2%). Las velocidades medias registradas presentaron una mayor ocurrencia en el rango entre los 4 a 6 [cm/s] (35.4%), seguido del rango de 6 a 8 [cm/s] (23.4%). Gráficamente estas estadísticas se pueden observar en la Figura 5-48. La mayor velocidad registrada fue de 15.1 [cm/s] desde la componente SE, siendo la velocidad media de 5.4 [cm/s].

Velocidad [cm/s]	Dirección [°]								Total	
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Nº Datos	% Ocurrencia
0 - 2	18	15	12	10	13	9	13	27	117	3.0%
2 - 4	175	144	100	130	132	94	103	133	1011	26.0%
4 - 6	237	154	183	231	147	118	134	169	1373	35.4%
6 - 8	131	85	96	175	122	80	117	103	909	23.4%
8 - 10	25	4	17	90	52	42	61	25	316	8.1%
10 - 12	4			26	20	11	13	36	110	2.8%
12 - 14				17				15	32	0.8%
14 - 16				12				3	15	0.4%
Nº Datos	590	402	408	691	486	354	441	511	<b>3883</b>	
% Ocurrencia	15.2%	10.4%	10.5%	17.8%	12.5%	9.1%	11.4%	13.2%		<b>100.0%</b>
								<b>Total</b>	<b>3883</b>	<b>100.0%</b>

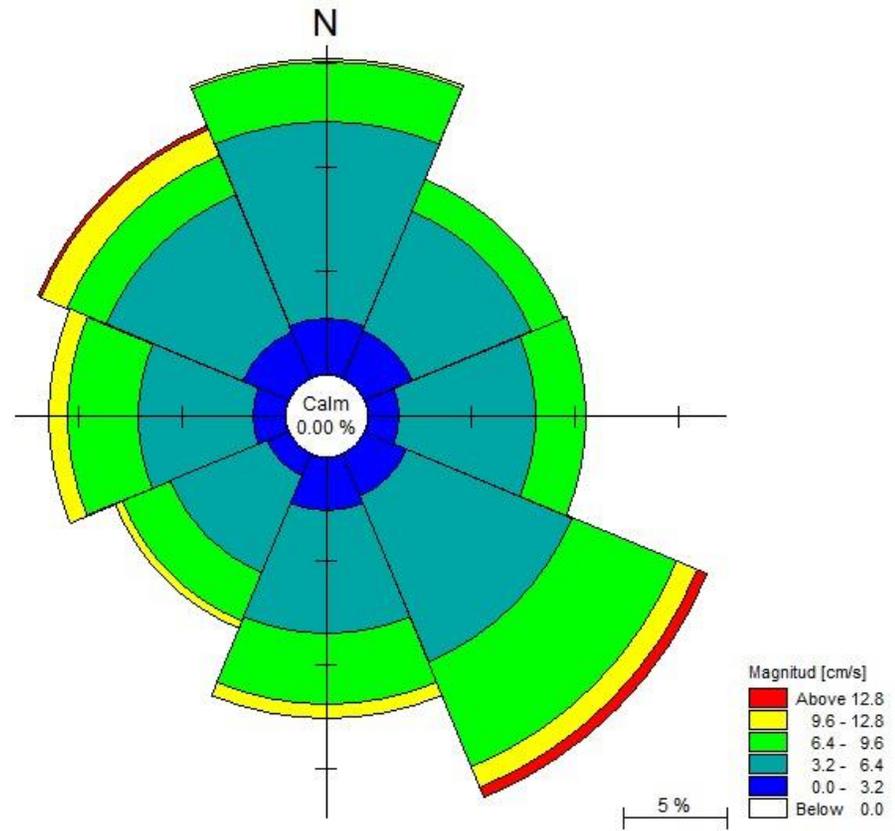
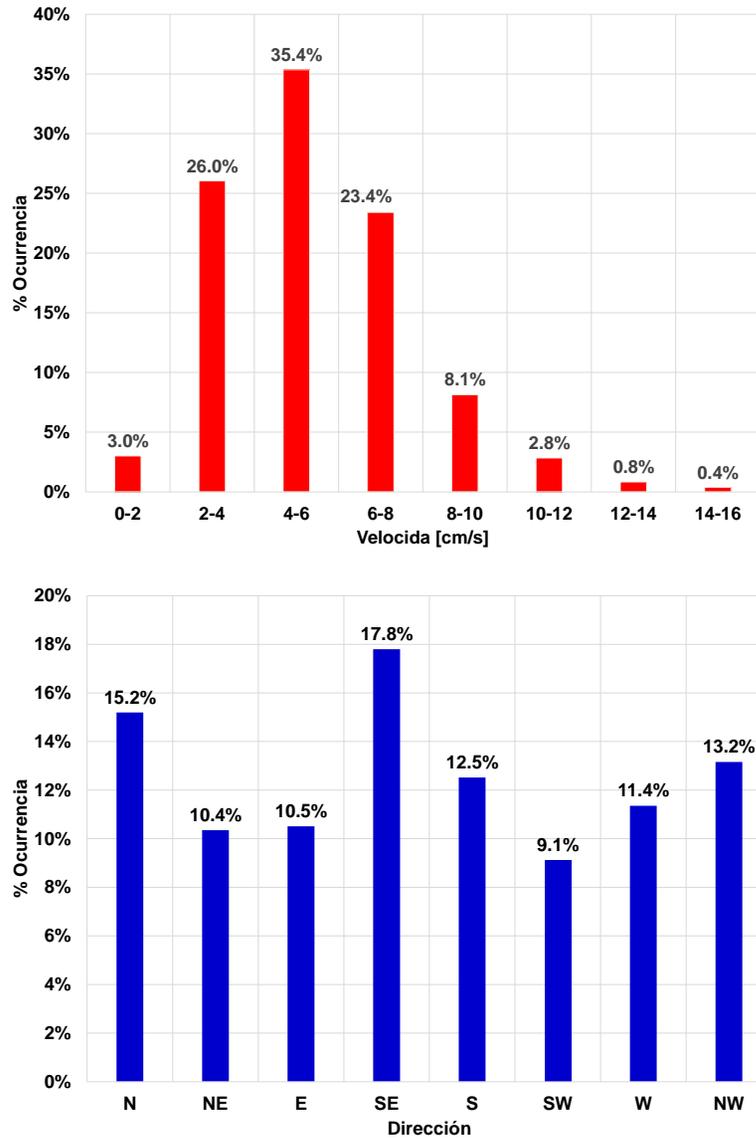
Estadística Básica	Dirección [°]								Total [cm/s]
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	
Vel. Max	10.4	8.8	9.1	15.1	11.8	11.9	11.6	14.8	<b>15.1</b>
Vel. Med	4.9	4.5	5.0	6.2	5.4	5.5	5.7	5.6	<b>5.4</b>
Desvt St	1.7	1.6	1.7	2.6	2.3	2.2	2.3	2.8	<b>2.3</b>

**Tabla 5-23: Tabla de Mag. de velocidad y dirección, Capa Promediada.**  
**Fuente: Elaboración propia.**

El diagrama de trazos para la capa promediada (Figura 5-47) muestra una tendencia de la corriente dispersa a lo largo del tiempo de registro. Esta información se presenta en la Tabla 5-18.



**Figura 5-47: Diagrama de trazos velocidad, capa promediada.**  
**Fuente: Elaboración propia.**



**Figura 5-48: Histograma de velocidades y direcciones. rosa de corrientes, capa promediada.**  
 Fuente: Elaboración propia.

Para analizar las corrientes como serie de tiempo, fueron reducidas a magnitudes horarias, calculando las respectivas componentes ortogonales. Así se definen las componentes U y V de la siguiente manera:

Componente U : Oeste – Este, positiva si el flujo va hacia el Este.

Componente V : Sur – Norte, positiva si el flujo va hacia el Norte.

Para las series de tiempo de componentes ortogonales, se obtuvieron los estadísticos básicos (mínimo, máximo, promedio y desviación estándar) (ver Tabla 5-24).

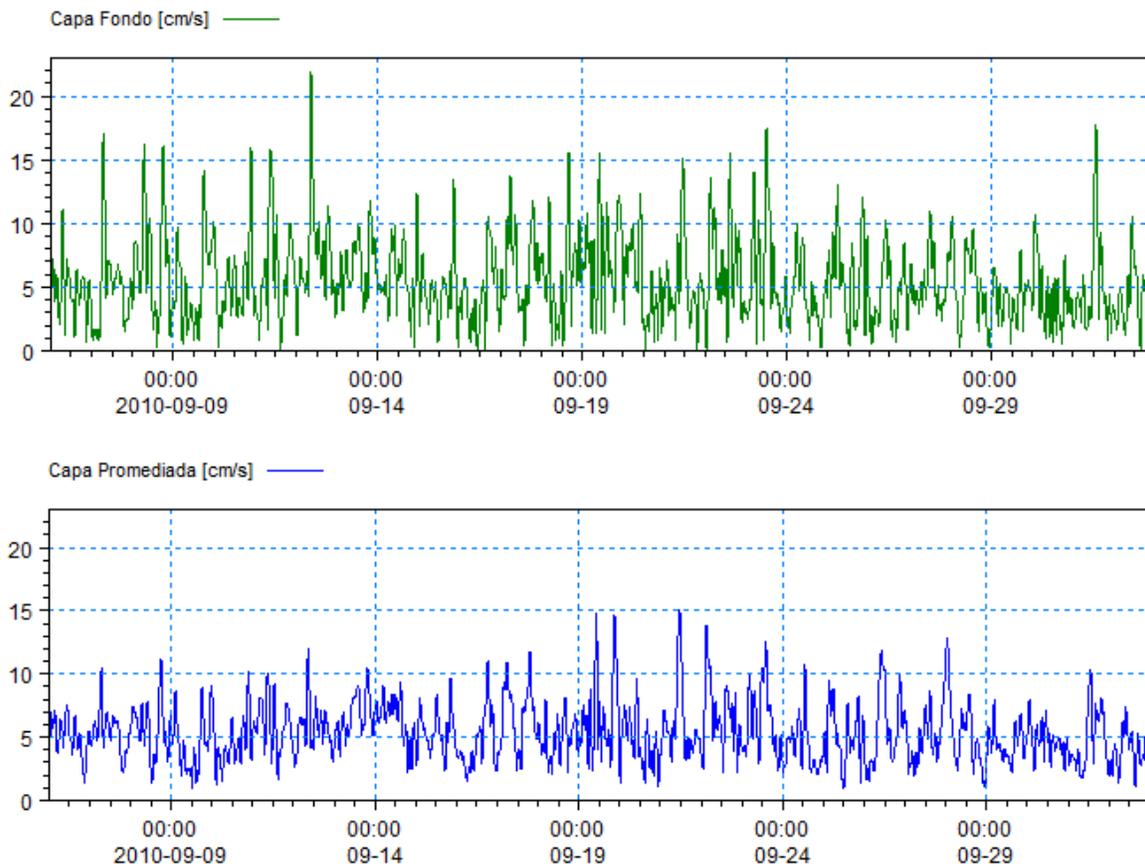
Componentes Ortogonales	Capa de Fondo		Capa Promediada	
	Comp. (u)	Comp. (v)	Comp. (u)	Comp. (v)
Mínimo [cm/s]	-16.45	-14.36	-12.17	-12.75
Máximo [cm/s]	10.27	10.19	8.39	11.93
Promedio [cm/s]	-0.13	-1.62	0.10	-0.24
Desv St [cm/s]	4.73	3.98	3.99	4.29

**Tabla 5-24: Estadística básica de las componentes ortogonales U y V.**

**Fuente: Elaboración propia.**

Las velocidad promedio de las componentes ortogonales de cada capa presentan un indicador de la tendencia general del recorrido que tendría una partícula suspendida en la columna de agua. De este modo es posible inferir de los resultados presentados que en la capa más cercana al fondo la tendencia se presentó hacia las componentes del 3er cuadrante dirección S. La capa promediada presentó una tendencia hacia el 2do cuadrante asociada a la componente E.

Para un análisis más fino de las magnitudes estudiadas, se realizó un gráfico de serie de tiempo a cada una de las capas. Estas series se observan en la Figura 5-49.



**Figura 5-49: Serie de tiempo de magnitudes [cm/s], capa de fondo y capa promediada.**

**Fuente: Elaboración propia.**

Al analizar las tablas y figuras, se puede inferir que existe una alta variabilidad en los datos obtenidos del sitio, sin detectar un patrón destacable en el régimen de corrientes en cuanto a sus direcciones y magnitudes.

## 5.6.2 MODELACIÓN NUMÉRICA DE CORRIENTES

Para la caracterización de las corrientes existentes en el sector de Playa Brava, se utilizó el modelo numérico MIKE 21 HD (sección 4.2), aplicando un mallado flexible. La implementación y detalle de este modelo se describe a continuación.

### 5.6.2.1 CONFIGURACIÓN DEL MODELO

En esta sección se considera la resolución espacial, la cual está relacionada a la batimetría del sector, a la estabilidad numérica y a la convergencia. Es importante considerar algunos factores importantes que influyeron en la calibración hidrodinámica de Playa Brava, tales como:

- **Tamaño de los elementos:** Se debe tener un aumento gradual del tamaño de los elementos. Después de varios intentos de mallas, se llegó a concluir que para evitar problemas de inestabilidad en el modelo una adecuada relación es ir aumentando el tamaño de los triángulos por polígono razón 1 es a 3.

El tamaño de los triángulos está relacionado con el espaciado entre sus nodos; idealmente éstos deberían parecer triángulos equiláteros. Según Sepúlveda (2010) los triángulos pueden semejar a un triángulo isósceles, y así cada nodo en la malla estará asociado a seis triangulaciones. Para generar una mayor estabilidad en el mallado. Es aconsejable tener un ángulo mínimo de 30°.

- **Condición de Courant –Friedrich-Levy:** Este número se establece para la resolución de ecuaciones en espacios discretos y está asociado a la estabilidad numérica del modelo. Se define como:

$$CFL = |u| \frac{\Delta t}{\Delta x} + |v| \frac{\Delta t}{\Delta y}$$

**Ecuación 53**

Donde:

u: Componente de la velocidad en el eje x.

v: Componente de la velocidad en el eje y.

$\Delta t$ : Paso del tiempo (timestep).

$\Delta x, \Delta y$ : Resolución del espacio en la malla en ejes x e y respectivamente.

El criterio de Courant establece según la Ecuación 53, que el tiempo de retención de un fenómeno al interior de cada elemento de la malla, debe ser mayor al timestep que se va a emplear para la discretización temporal. Al generar el mallado de volúmenes finitos se debe considerar que el valor de Courant no debe superar el valor de 1.

- **Número de Manning:** Formulación proveniente del número de Chezy (Ecuación 38), la cual calcula la velocidad del flujo en canales abiertos. Es importante considerar este factor para la calibración del modelo hidrodinámico, ya que influirá en la estabilidad del modelo.

Después de varias simulaciones para calibrar el modelo, se consideró utilizar un bajo número de Manning de 28 [ $m^{1/3}/s$ ] para todo el dominio.

El coeficiente de viscosidad turbulenta aplicado en la formulación de Eddy, tipo Smagorinsky, tomó el valor que por defecto otorga Mike 21 otorga, el cual es 0.28.

Con estos valores, se obtuvo una mayor similitud en el comportamiento de las magnitudes de la corriente versus las medidas insitu.

### **5.6.2.2 GENERACIÓN DE MALLA**

Se procedió a generar una malla para la modelación hidrodinámica del sector de estudio con una forma rectangular, la cual abarcó un área total de 99 [Km<sup>2</sup>], con una longitud y ancho de 15800 [m] y 7600 [m] respectivamente.

El tamaño de los elementos depende del espaciado entre nodos y el timestep del modelo. Estos criterios están relacionados al número de Courant (5.6.2.1), cuyo valor máximo permitido por el modelo es de 1. Para asegurar la estabilidad del modelo, se seteó en forma conservadora un valor de 0.8.

La malla se configuró con distintas áreas de elementos demarcados en varios polígonos. Los elementos abarcan un área desde los 25.000 [m<sup>2</sup>] a los 820.000 [m<sup>2</sup>]. Se escogió un área relativamente grande para evitar problemas de inestabilidad numérica local. Los tamaños varían gradualmente desde la zona más lejana hacia el sitio de estudio. El tamaño del elemento va acomodándose según la interpolación lineal que realiza el programa. Los triángulos mayores tienen lados de 1309 [m] aproximadamente. En la Figura 5-50, se puede observar los detalles de la malla numérica.

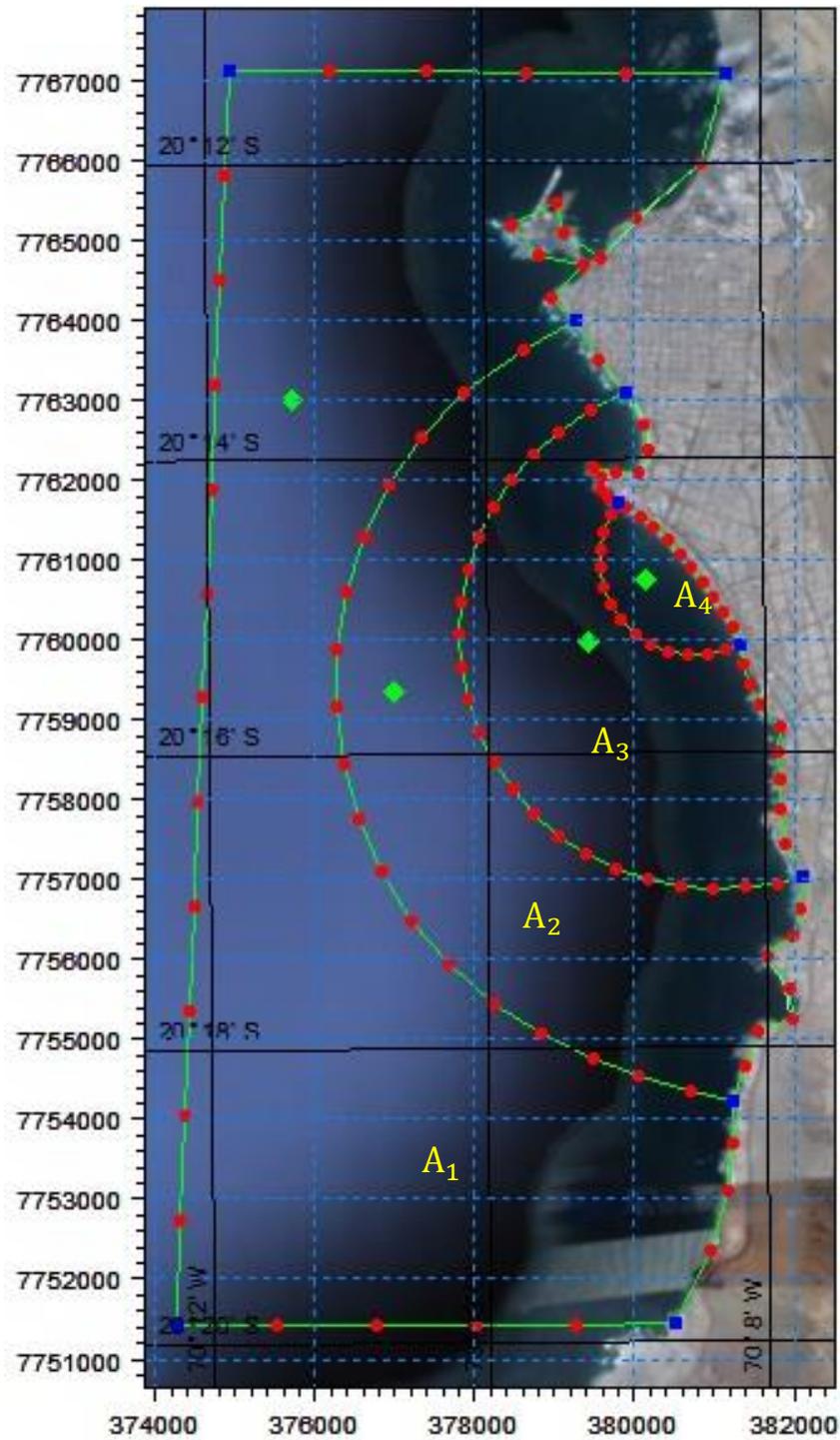


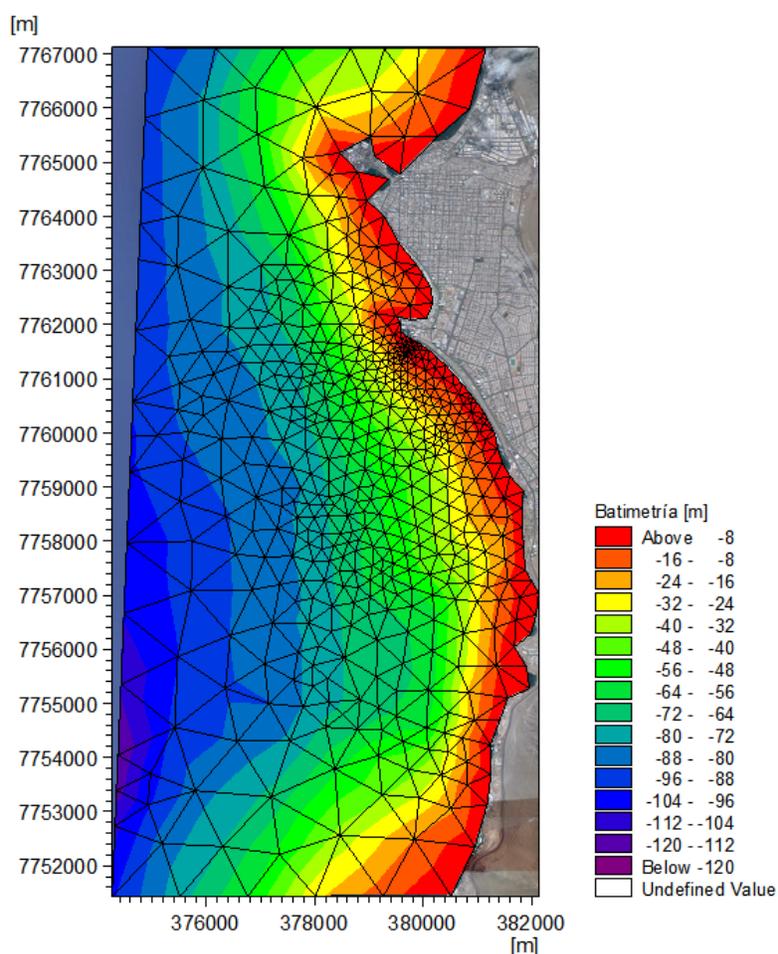
Figura 5-50: Configuración de polígonos para límite de áreas de elementos, Mike 21 HD.

Fuente: Elaboración propia.

Zona	Área [ $m^2$ ]
A <sub>1</sub>	820.000
A <sub>2</sub>	225.000
A <sub>3</sub>	75.000
A <sub>4</sub>	25.000

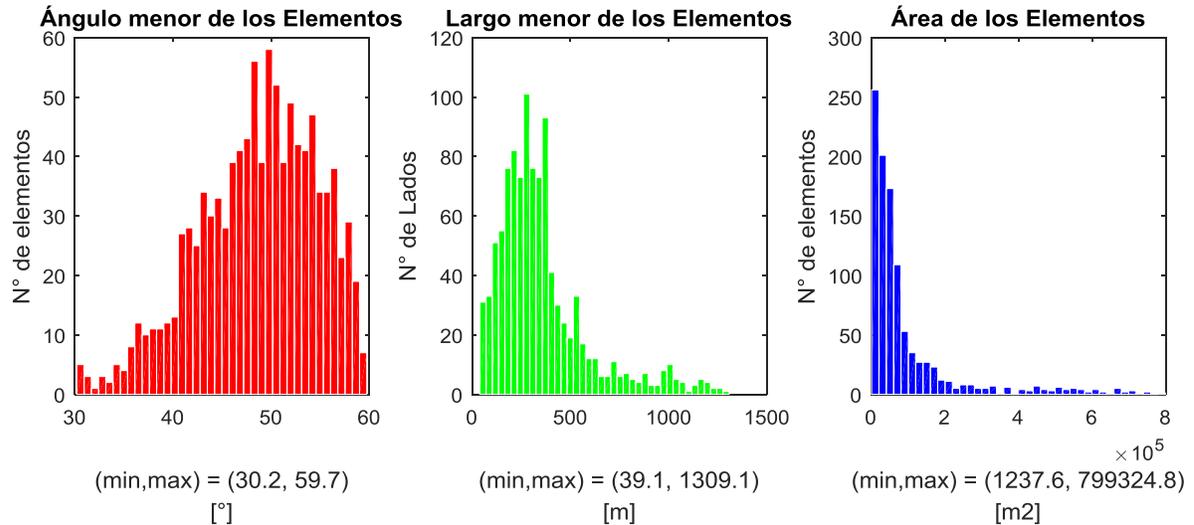
**Tabla 5-25: Descripción de áreas máximas de elementos.**  
**Fuente: Elaboración propia.**

En la Tabla 5-25 se detallan las áreas en cada zona del mallado, donde A<sub>4</sub> tiene mayor resolución, debido a que esta zona incluye playa Brava. Con esta configuración de polígonos en sus respectivas áreas máximas de elementos, se procedió a generar la malla y a interpolar los datos de batimetría, ver la Figura 5-51.



**Figura 5-51: Modelo de elevación digital, Mike 21 HD.**  
**Fuente: Elaboración propia.**

Las profundidades mayores de la malla corresponden a 120 [m] aproximadamente. La distribución de tamaños de los elementos y espaciado de los nodos se presenta en la Figura 5-52.



**Figura 5-52: Parámetros de elementos de modelo de elevación digital, Mike21 HD.**  
**Fuente: Elaboración propia.**

En la Figura 5-52 se observa que el mayor y menor elemento, tienen un área de 799.324 [m<sup>2</sup>] y 1237 [m<sup>2</sup>] respectivamente. El menor ángulo que se designó es de 30°. Más del 50% de los triángulos poseen un ángulo mínimo mayor a 45°, reflejando una buena distribución, una gran cantidad de elementos y una buena calidad del mallado.

Información	Datos
Numero de nodos	562
Número de elementos	1035
Área elemento menor [m <sup>2</sup> ]	1237
Área elemento mayor [m <sup>2</sup> ]	799.324
Profundidad máxima	119
Ángulo mínimo menor [°]	30
Ángulo mínimo mayor [°]	59

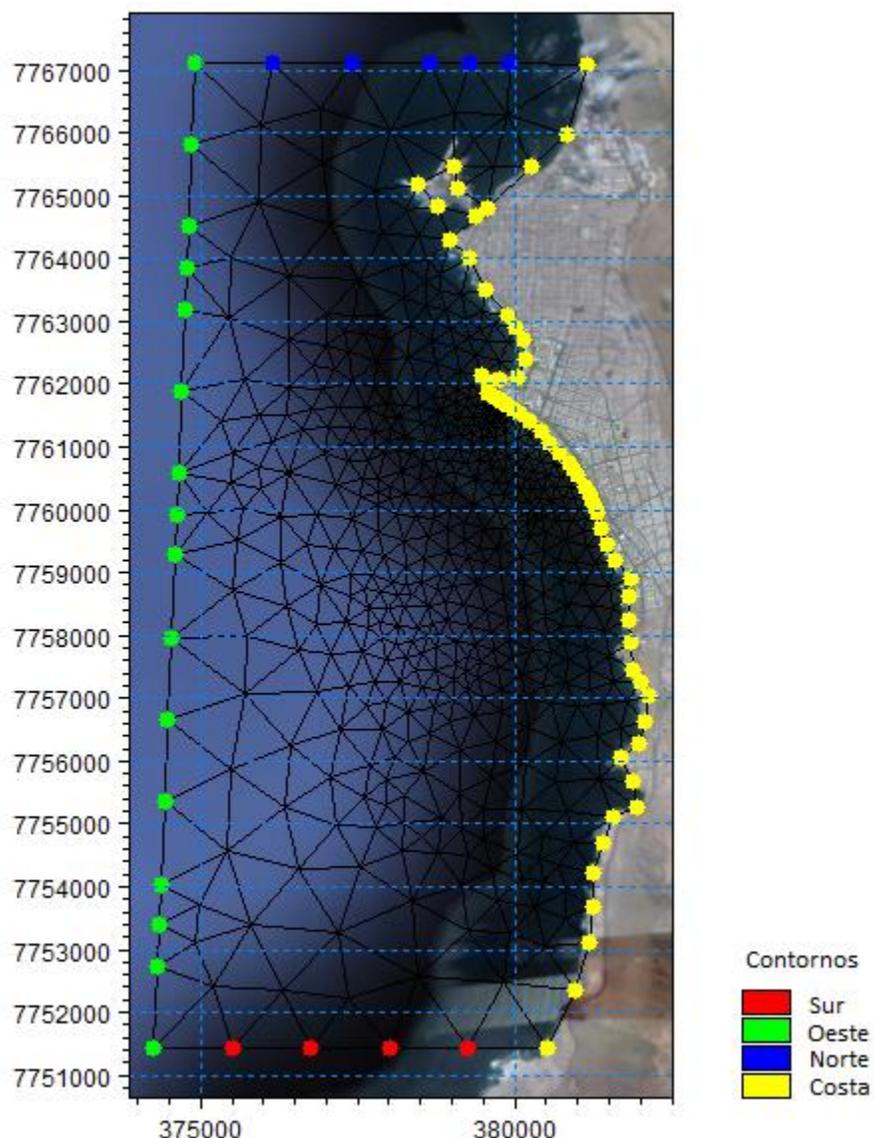
**Tabla 5-26: Información del mallado, para modelo Mike21 HD.**  
**Fuente: Elaboración propia.**

La longitud mínima y el área máxima dependen de la profundidad donde se encuentre el elemento. Para mayor detalle ver Tabla 5-26.

### 5.6.2.3 CONDICIONES DE BORDE

El modelo numérico utilizó el método de volúmenes finitos para resolver las ecuaciones de onda larga (sección 4). Para los bordes abiertos impusieron la desnivelación y velocidades en los límites del dominio como condiciones de borde.

Las condiciones de borde limitadas por condiciones abiertas y cerradas, están definidas en la Figura 5-53.



**Figura 5-53: Esquema de ubicación de condiciones de borde.**  
**Fuente: Elaboración propia.**

Las condiciones de bordes cerradas corresponden a las zonas de línea de costa y no consideran forzamiento de marea.

En los contornos N y S se utilizó la opción “Specified Level” dada por MIKE 21 HD, el cual fue seteado con la condición variable en tiempo y espacio, permitiendo así ingresar los datos del modelo global de marea para cada condición de borde.

Se optó por dejar la condición de borde oeste cerrada, con la finalidad de simular las corrientes generadas por la onda de marea.

Dentro de las forzantes que se emplearon, se encuentran los tensores de radiación de oleaje (sección 5.4.4.5). También se utilizaron como entrada al modelo las mareas obtenidas del modelo global, al cual se le agregó un ruido blanco aleatorio con una amplitud media de 2.6 [cm], descrito en la sección 5.5.

#### **5.6.2.4 SETEO DE FORZANTES**

Se utilizó la aplicación MIKE 21 Toolbox (DHI , 2014), utilizando las mareas globales, georreferenciadas para cada límite, como se explica en el sección 5.4.4.2. A esta señal de marea se le agregó un ruido blanco para simular las variaciones que se detectan en los datos descritos en la sección 5.5.1.

A los tensores de radiación se le aplicó un suavizado en las primeras 6 horas de simulación, al igual que las mareas, con la finalidad de evitar inestabilidad numérica debido a un cambio abrupto de un timestep a otro en los modelos.

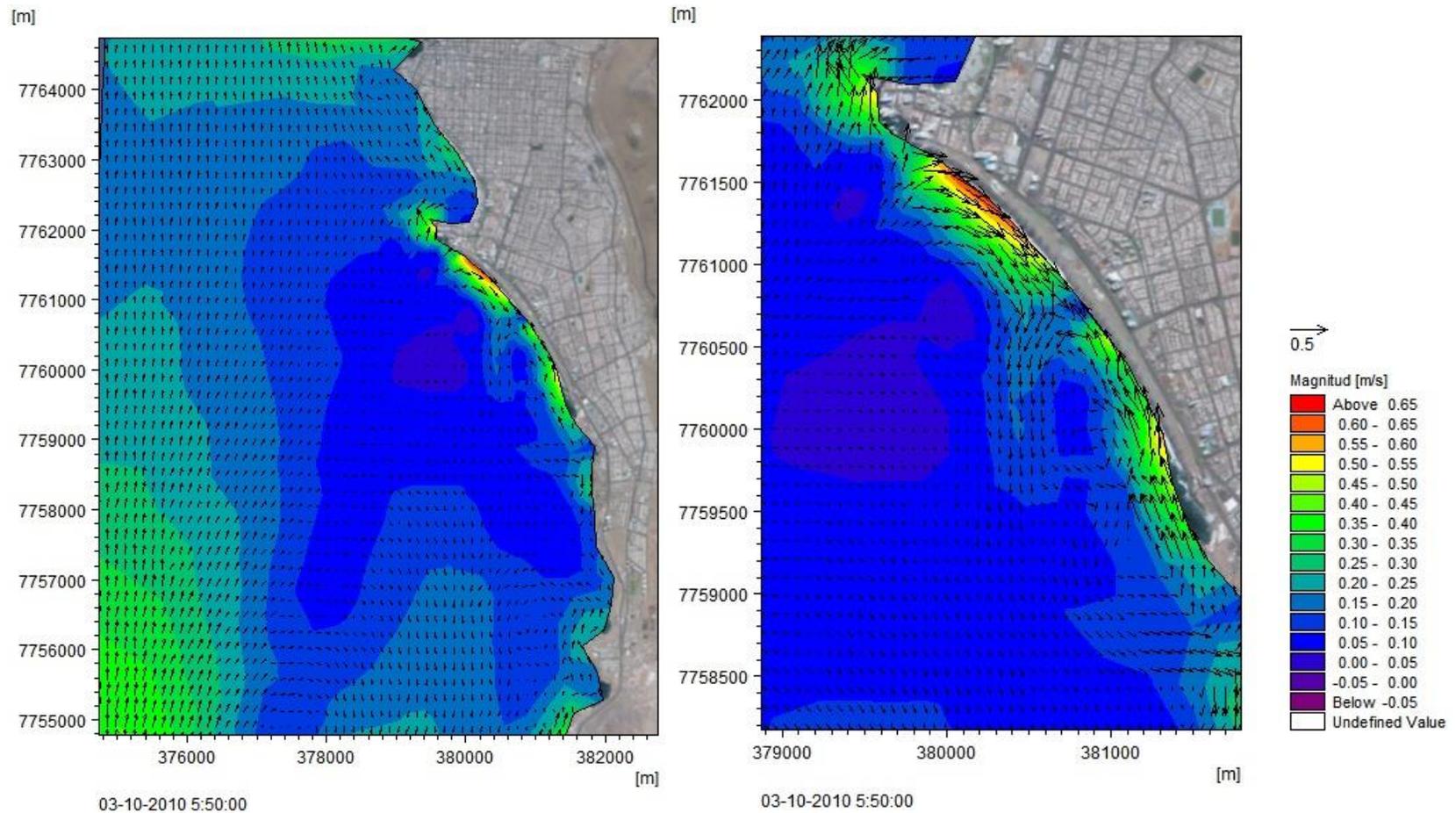
Los límites cerrados tienen como condición de borde, velocidad perpendicular nula.

#### **5.6.2.5 RESULTADOS DEL MODELO**

El proceso de modelación tuvo una duración de 40 [mín.], donde se modelaron 27 días, luego de 3851 iteraciones. Del área modelada se extrajo el punto de interés del ADCP a 25 [m].

En la Figura 5-54, se observa el área total modelada y la zona de estudio, donde se aprecia la circulación de la corriente. En zonas de puntas o lugares de roqueros se generan vórtices y remolinos, los que provocan las mayores magnitudes de corrientes.

En general se observan mayores magnitudes de corrientes en las zonas de rompiente del oleaje, las que corresponden a las corrientes litorales



**Figura 5-54: Resultado modelo hidrodinámico. Área de estudio**  
**Fuente: Elaboración propia.**

### 5.6.2.5.1 PUNTO DE EXTRACCIÓN; 25 [m]

Siguiendo el mismo orden de análisis que en el modelo de olas, se procedió a analizar el punto del ADCP 25 [m] (Figura 5-54), el cual tiene su información en la Tabla 5-5. Se realizó un análisis estadístico del sitio, quedando expresado en la Figura 5-56.

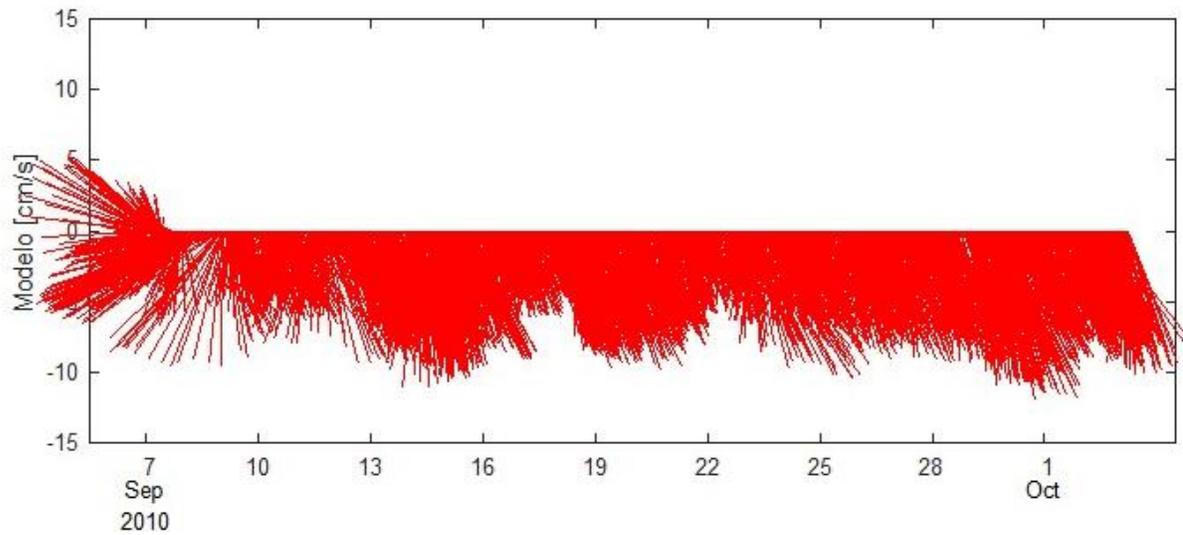
Velocidad [cm/s]	Dirección [°]								Total	
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Nº Datos	% Ocurrencia
0 - 2	1	2	1	1	3	7	12		27	0.7%
2 - 4			6	26	101	66	43	19	261	6.8%
4 - 6			15	319	433	124	17	49	957	24.8%
6 - 8			2	537	698	89	48	34	1408	36.6%
8 - 10				429	395	12	6	12	854	22.2%
10 - 12				115	130	28	20		293	7.6%
12 - 14				11	4	20	17		52	1.4%
Nº Datos	1	2	24	1438	1764	346	163	114	3852	
% Ocurrencia	0.0%	0.1%	0.6%	37.3%	45.8%	9.0%	4.2%	3.0%		100.0%
								Total	3852	100.0%

Estadística Básica	Dirección [°]								Total [cm/s]
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	
Vel. Max	0.0	1.9	6.2	13.3	12.6	13.3	13.7	9.9	13.7
Vel. Med	0.0	1.9	4.7	7.4	7.1	6.1	6.5	5.7	7.0
Desvt St	0.0	0.0	1.5	1.9	1.9	2.8	3.6	1.7	2.1

**Tabla 5-27: Tabla de magnitud velocidad y dirección de la corriente, punto 25[m].  
Fuente: Elaboración propia.**

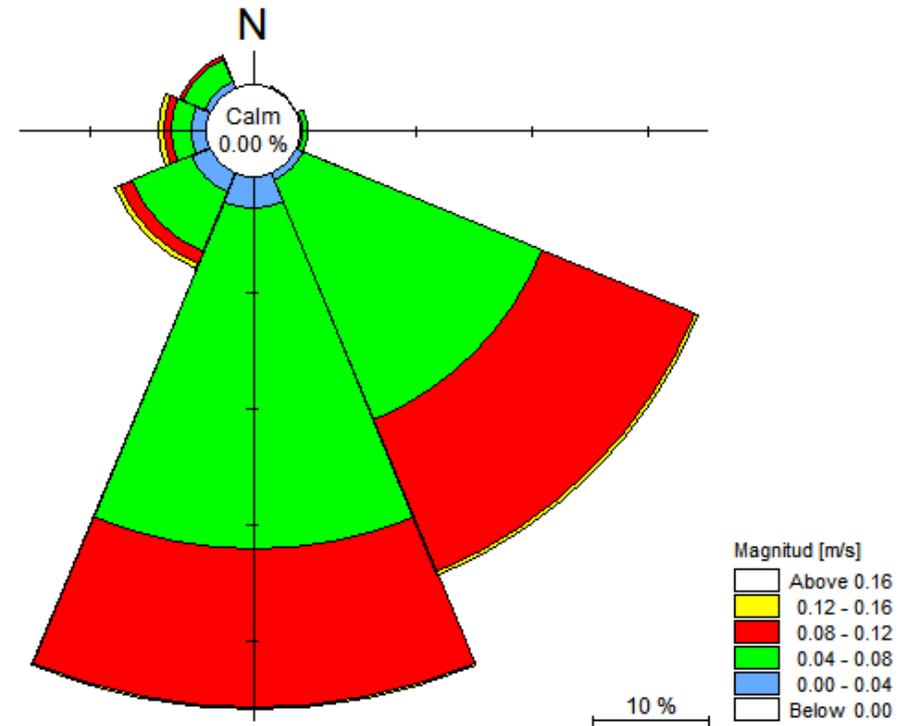
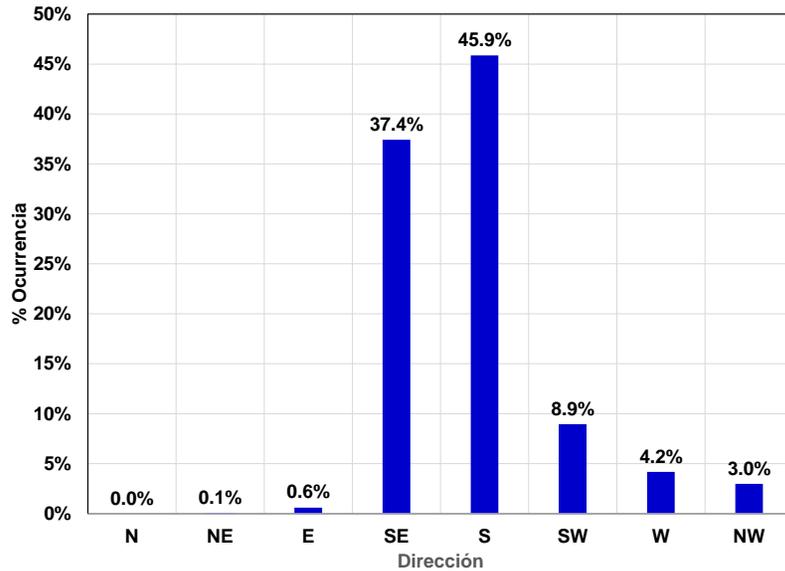
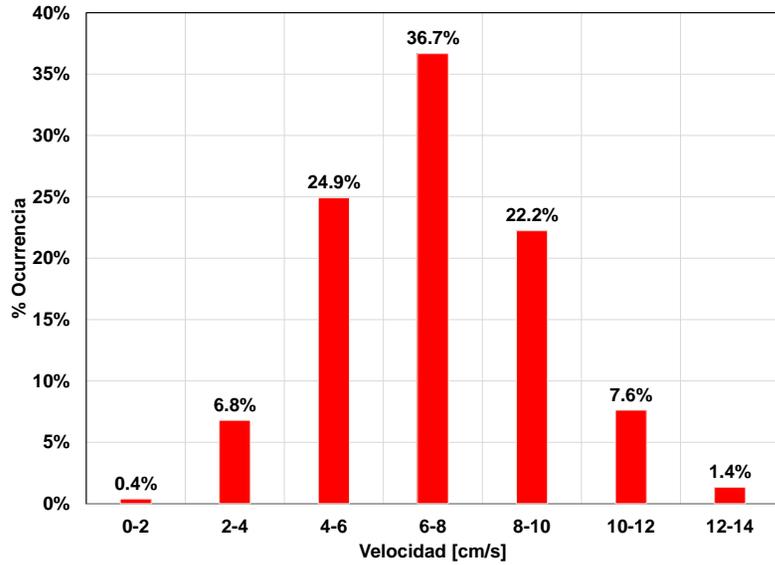
Las corrientes modeladas (Tabla 5-27) presentaron una incidencia en las 8 direcciones. Sin embargo, es posible observar que las mayores ocurrencias se presentan desde el tercer cuadrante en la dirección S (45.8%) y del segundo cuadrante la componente SE (37.3 %). Las velocidades medias registradas presentaron una mayor ocurrencia en el rango de 6 a 8 [cm/s] (36.6%), seguidas del rango de 4 a 6 [cm/s] (24.8%). Gráficamente esto se puede observar en la Figura 5-56. La mayor velocidad registrada fue de 13.7 [cm/s] desde las componentes W, y velocidad media de 7.0 [cm/s].

En la Figura 5-57, incluye una serie de tiempo de la magnitud y de las componente U-V.

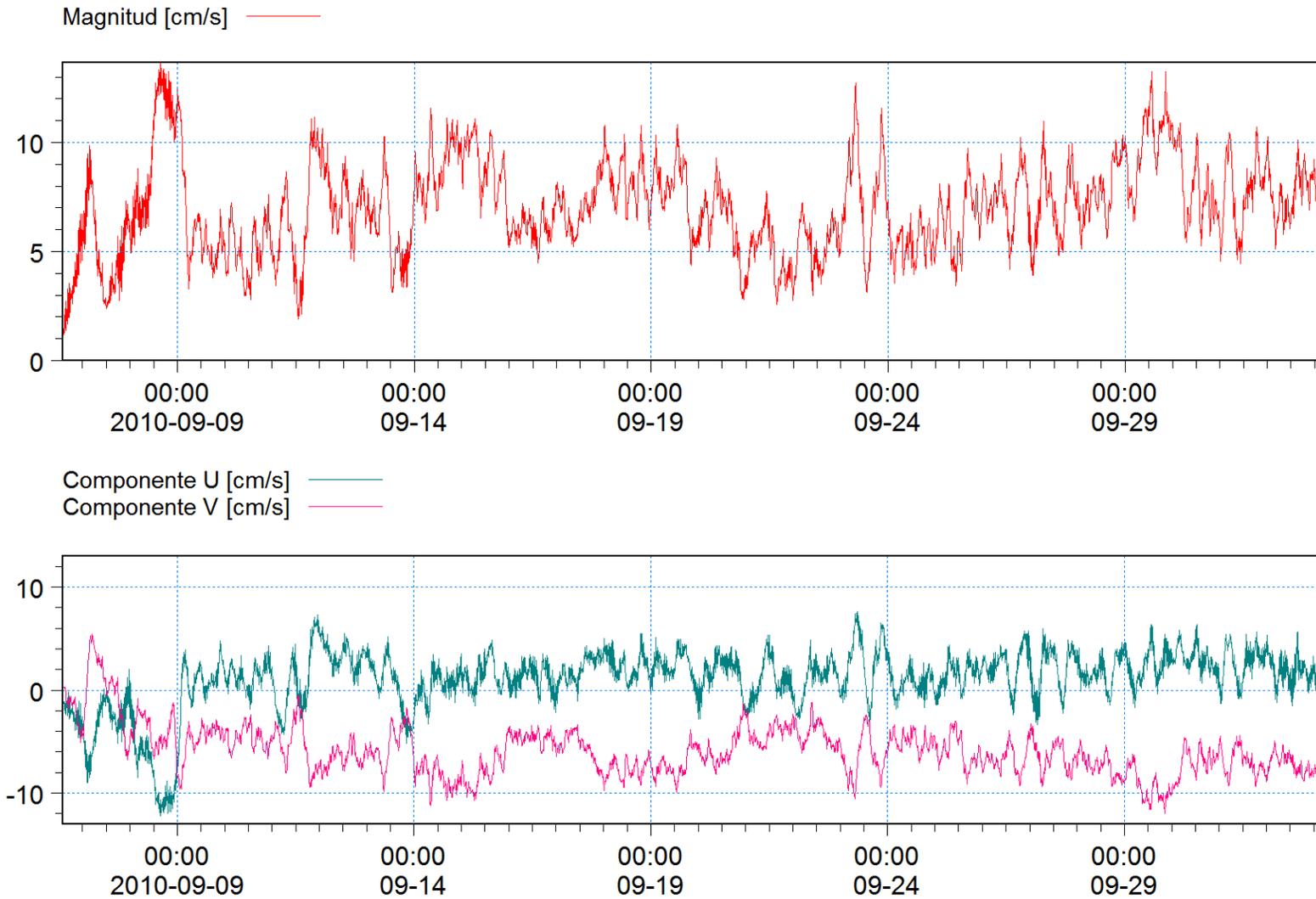


**Figura 5-55: Diagrama de trazos velocidad, capa modelada.**  
**Fuente: Elaboración propia.**

El diagrama de trazos para la capa promediada (Figura 5-55) muestra la tendencia de la corriente. El gran porcentaje de los datos tienen una trayectoria clara hacia la dirección SE.



**Figura 5-56: Estadística media de corrientes. Punto 25 [m], corriente modelada.**  
**Fuente: Elaboración propia.**



**Figura 5-57: Magnitud [m/s] y componentes u-v, corriente modelada, punto 25 [m].  
Fuente: Elaboración propia.**

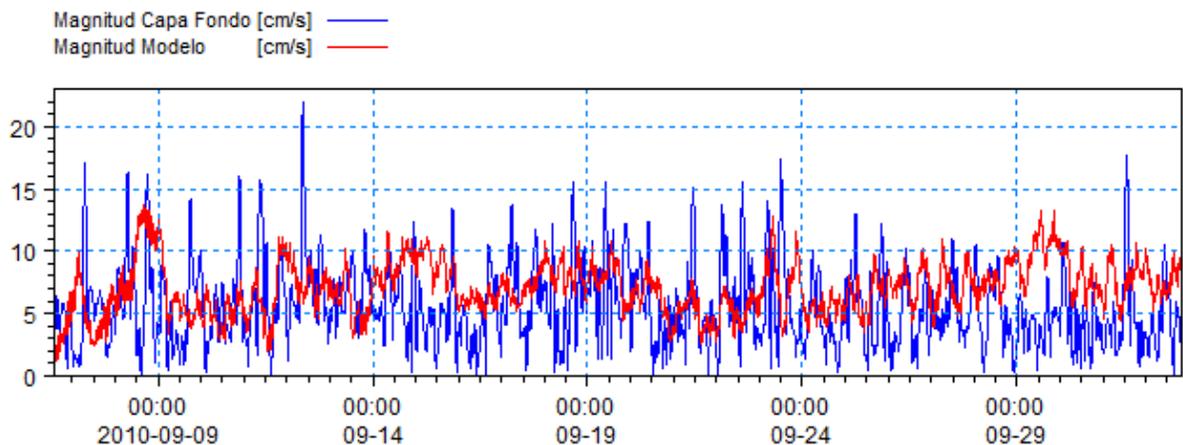
### 5.6.2.6 VALIDACIÓN DEL MODELO HIDRODINÁMICO MIKE 21 HD

Para el proceso de validación del modelo numérico MIKE21 HD, se compararon los datos medidos (capa de fondo y promediada) con los obtenidos del modelo numérico en el mismo punto de medición. Ello, con la finalidad de tener distintas opciones de comparación del comportamiento del modelo numérico.

### 5.6.2.7 COMPARACIÓN ENTRE CAPA DE FONDO Y CORRIENTE MODELADA

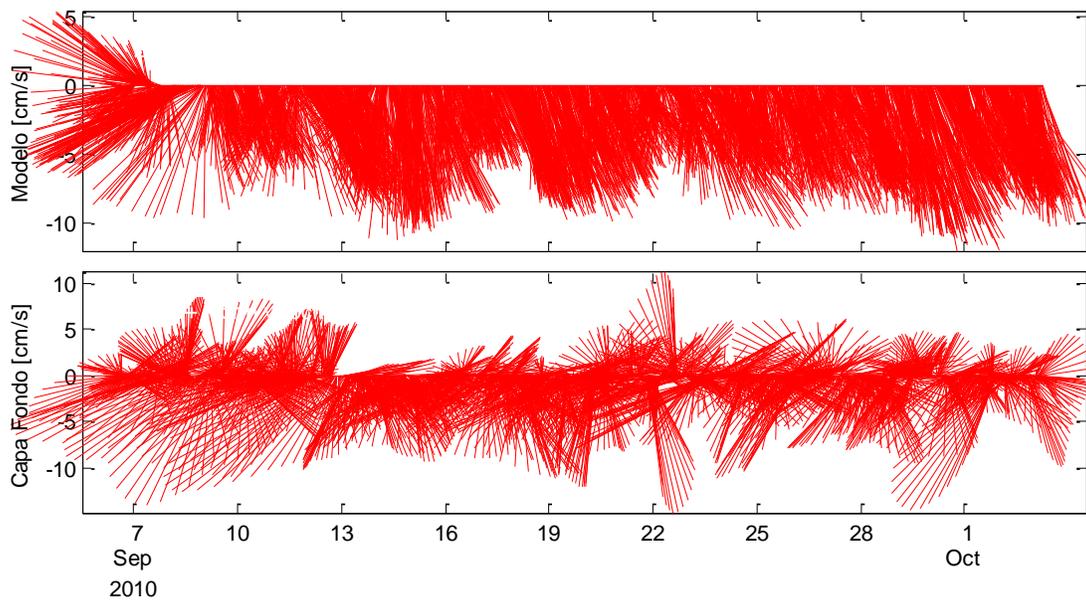
De la serie de tiempo de magnitudes (Figura 5-60) se aprecia, que el modelo numérico contiene un rango similar a los medidos por el ADCP en el sitio de estudio. Por tanto los peak pueden corresponder a datos escapados (Figura 5-31), debido a la alta variación que conllevan estos datos.

Para las direcciones (Figura 5-61), el modelo denota una clara tendencia hacia el SE, siendo prácticamente paralelo a la línea de costa, lo cual no ocurre en los datos medidos del ADCP, los cuales muestran una gran variación entre las direcciones, sin tener una clara tendencia.



**Figura 5-58: Comparación de magnitudes [cm/s], capa de fondo v/s corriente modelada.**

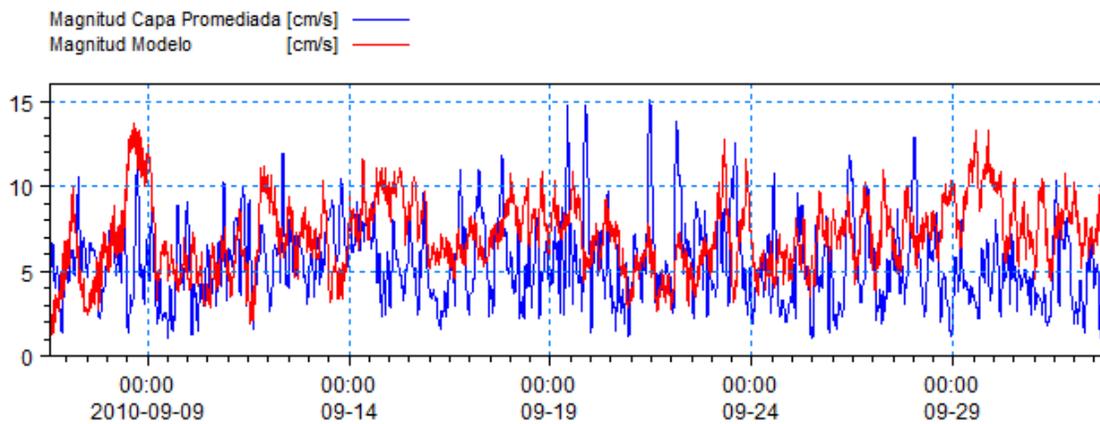
**Fuente: Elaboración propia.**



**Figura 5-59: Diagrama de trazos de velocidades, capa de fondo y corriente modelada.**

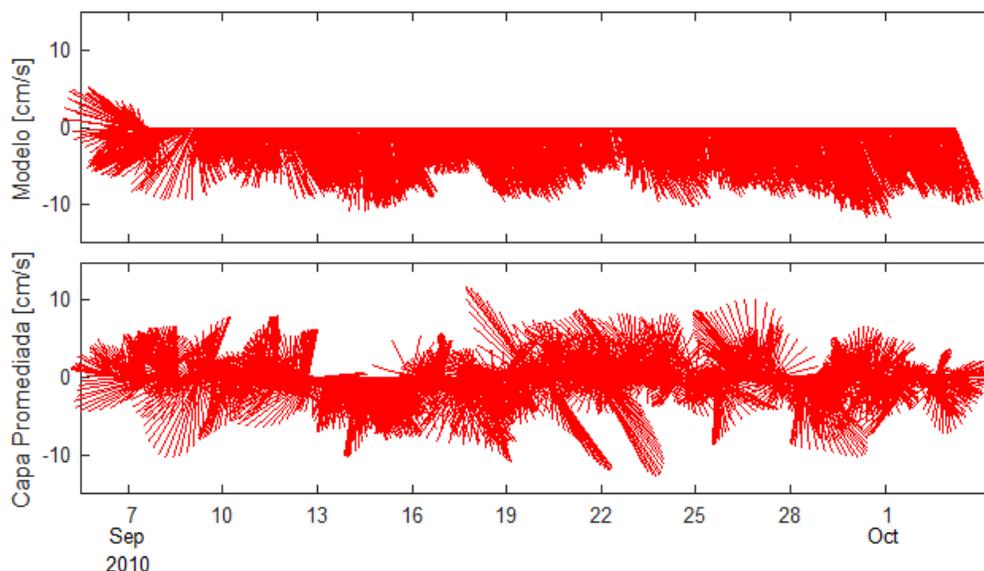
**Fuente: Elaboración propia.**

### 5.6.2.8 COMPARACIÓN ENTRE CAPA PROMEDIADA Y CORRIENTE MODELADA



**Figura 5-60: Comparación de magnitudes [cm/s], capa promediada v/s corriente modelada.**

**Fuente: Elaboración propia.**

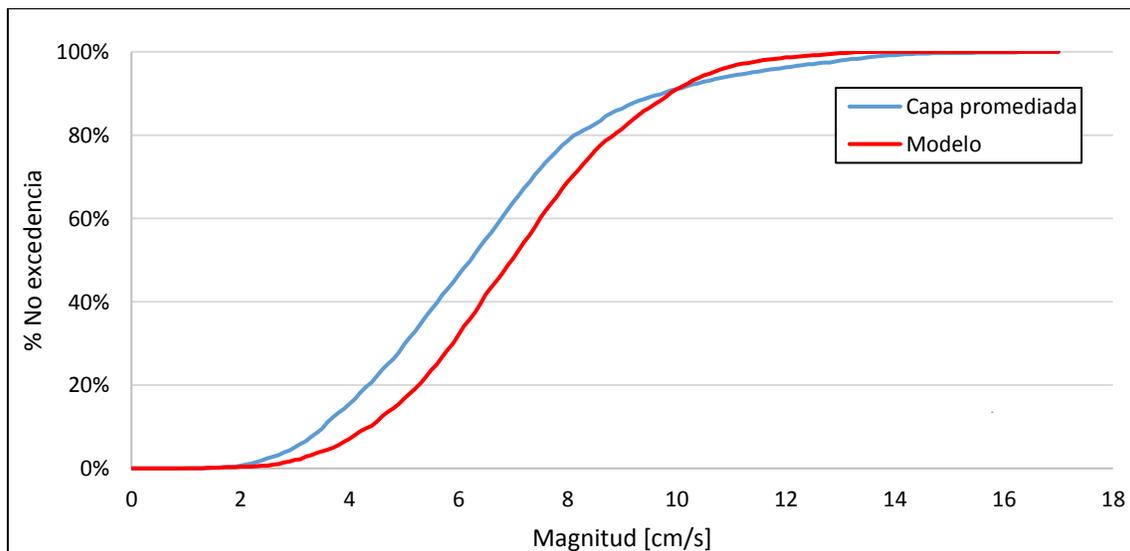


**Figura 5-61: Diagrama de trazos de velocidades, capa promedio y corriente modelada.**

**Fuente: Elaboración propia.**

La comparación entre resultados del modelo y la capa promediada refleja una similitud, (Figura 5-60). En cuanto a las direcciones no hay similitud a causa de la alta variación de las mediciones (Figura 5-61).

En la Figura 5-62 se comparan las distribuciones de ocurrencia de las magnitudes obtenidas por el modelo numérico en el punto de análisis. Se observa que la distribución de las velocidades en el punto de análisis es similar a la capa promediada, obteniendo así una correlación de 99.15%.



**Figura 5-62: Distribución de no excedencia de magnitudes del modelo v/s capa promedio.**

**Fuente: Elaboración propia.**

Las velocidades del modelo calibrado muestran rangos de velocidades similares a los registros mostrados por los datos insitu.

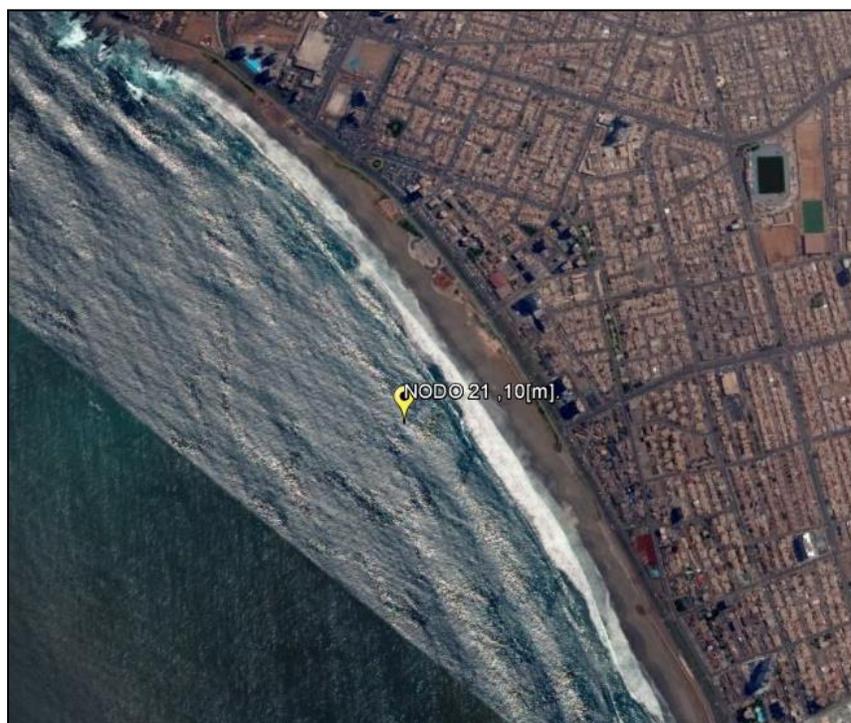
El modelo numérico es capaz de simular las variaciones de corrientes debido a la marea, y a los tensores de radiación para cada estado de mar obtenidos por MIKE 21 SW, el cual es un modelo que promedia la fase, por lo que no considera las velocidades orbitales del oleaje, cuyo efecto puede ser uno de los causante de las altas variaciones mostradas por las mediciones.

## 5.7 MORFODINÁMICA DE PLAYA BRAVA

Para determinar los patrones de erosión morfológica de la zona de estudio, se realizan una simulación morfodinámica, para lo que es necesario describir las características del sedimento en el lugar. El análisis se efectuó a través de métodos “empíricos” y de un modelo numérico de transporte de sedimentos.

### 5.7.1 PROFUNDIDAD ACTIVA Y PROFUNDIDAD DE CIERRE

Para definir las profundidades de cierre y activa, se utilizaron las ecuaciones vistas en el sección 3.3. Se manipularon los datos del nodo 21, correspondiente a la transferencia espectral previa, ubicado a los 10 [m] de profundidad con las coordenadas 380714.48E 7760608.26N, Figura 5-63.



**Figura 5-63: Ubicación Nodo 21 a los 10 [m] de profundidad.  
Fuente: Elaboración propia.**

Una caracterización previa del clima medio de este punto, se muestra en la Tabla 5-28 y Tabla 5-29.

		N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	
Rangos		337.5	22.5	67.5	112.5	157.5	202.5	247.5	292.5	total
		22.5	67.5	112.5	157.5	202.5	247.5	292.5	337.5	
H	0 0.4									0.00%
	0.4 0.8						3.19%	0.24%		3.44%
	0.8 1.2						28.98%	2.35%		31.33%
	1.2 1.6						37.01%	1.42%		38.42%
	1.6 2						19.09%	0.09%		19.19%
	2 2.4						5.96%	0.00%		5.96%
	2.4 2.8						1.35%			1.35%
	2.8 3.2						0.25%			0.25%
	3.2 3.6						0.06%			0.06%
3.6 4						0.01%			0.01%	
Total		0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	95.89%	4.11%	0.00%	100.00%

**Tabla 5-28: Tabla de incidencia altura significativa [Hs] versus dirección.**

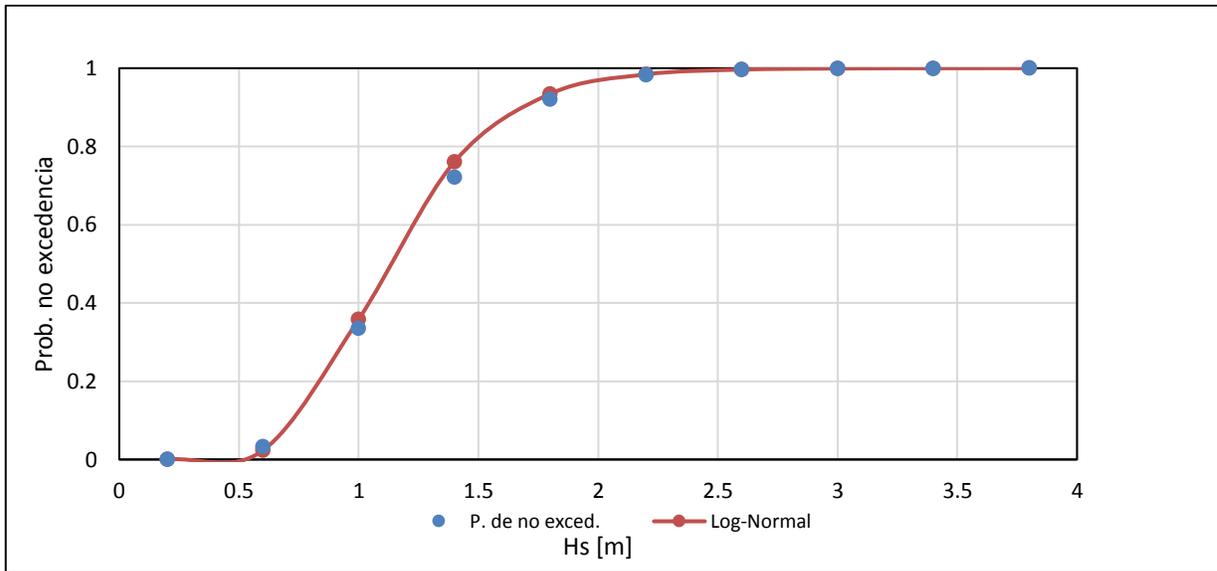
Fuente: Elaboración propia.

		H										
Rangos		0	0.4	0.8	1.2	1.6	2	2.4	2.8	3.2	3.6	Total
		0.4	0.8	1.2	1.6	2	2.4	2.8	3.2	3.6	4	
Tp	0- 2											0.00%
	2 4											0.00%
	4 6		0.00%	0.01%								0.02%
	6 8		0.03%	0.09%	0.02%							0.14%
	8 10		0.22%	1.09%	0.53%	0.02%						1.85%
	10 12		1.10%	10.45%	8.24%	1.53%	0.08%					21.40%
	12 14		1.39%	12.77%	19.81%	10.31%	2.22%	0.30%	0.02%	0.00%		46.81%
	14 16		0.46%	4.32%	6.78%	5.98%	2.99%	0.72%	0.15%	0.04%	0.01%	21.47%
	16 18		0.22%	2.13%	2.49%	1.24%	0.62%	0.30%	0.08%	0.01%		7.10%
	18 20		0.03%	0.41%	0.50%	0.11%	0.04%	0.02%	0.01%			1.11%
	20 22		0.00%	0.05%	0.04%	0.00%	0.00%	0.00%				0.11%
Total		0.00%	3.44%	31.33%	38.42%	19.19%	5.96%	1.35%	0.25%	0.06%	0.01%	100.00%

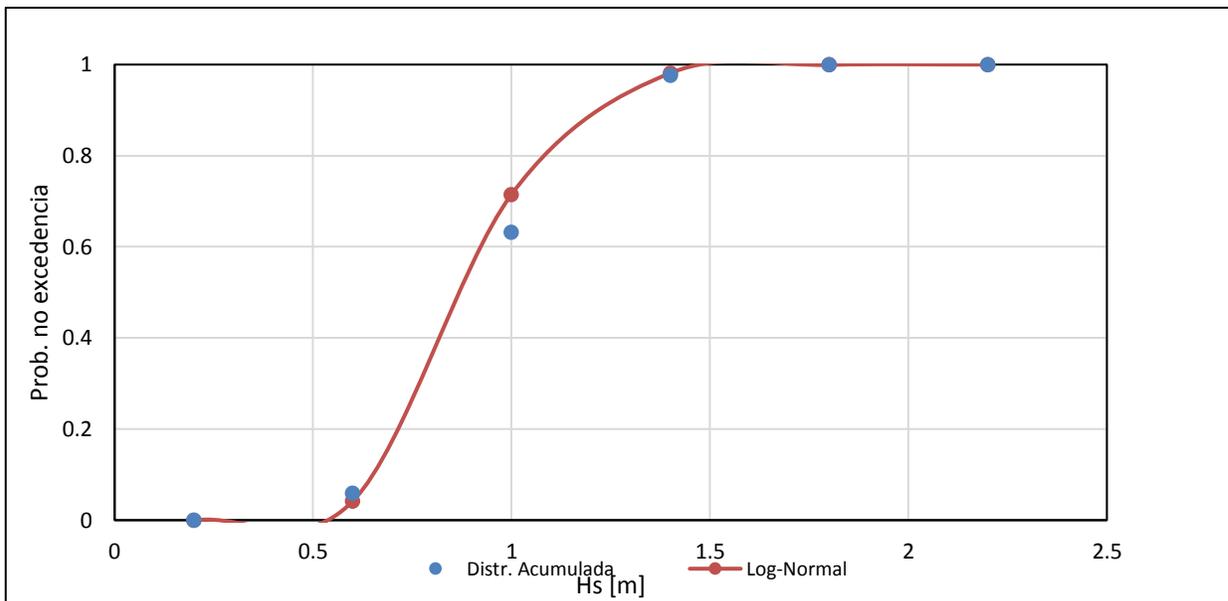
**Tabla 5-29 Tabla de incidencia altura significativa [Hs] versus periodo [Tp].**

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 5-29, se aprecia que el oleaje corresponde exclusivamente a las direcciones W (4.11%) y SW (95.89%). Con ello, se procedió a realizar un ajuste Log-normal a la estadística proveniente para cada una de las direcciones de incidencia del nodo 21 (Figura 5-64 y Figura 5-65), con la finalidad de obtener la altura la cual es sobrepasada 12 horas al año ( $H_{s,0.137}$ ).



**Figura 5-64: Ajuste estadística SW, Nodo21.**  
Fuente: Elaboración propia.



**Figura 5-65: Ajuste estadística W, Nodo21.**  
Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a los ajustes obtenidos, las alturas  $H_{s,0.137}$  para cada dirección analizada corresponden a 2.87 [m] proveniente del SW y de 1.72 [m] desde el W.

Para estas alturas, se debe tener en cuenta un periodo asociado. De acuerdo a la Tabla 5-30, el periodo asociado a las alturas de 2.87 [m] para la dirección SW corresponde entre los 14 y 18 [s], mientras que para las alturas en el rango para 1.72 [m], se concentran también entre los 14 y 18 [s]. En esta evaluación se utilizaron ambas alturas. Los resultados se muestran a continuación:

Datos	SW	W
H12 [m]	2.87	1.72
Tp1 [seg]	14	14
Tp2 [seg]	18	18
P. Activa [m]	4.77	2.91
	4.87	2.95
P. Cierre [m]	10.04	6.01

**Tabla 5-30: Valores de profundidad activa y de cierre, Nodo21.  
Fuente: Elaboración propia.**

Se considera como profundidad activa de cierre la obtenida en el oleaje de dirección SW, ya que tiene una ocurrencia del 95.9%. De este modo, la profundidad activa final es de 4.8 [m] correspondiente al promedio entre ambos períodos y a la profundidad de cierre, la cual es de 10.4 [m].

## 5.7.2 TRANSPORTE GENERAL DE SEDIMENTOS PLAYA BRAVA

Se determinaron las condiciones de transporte de sedimentos como base para el análisis morfodinámico del sector de estudio. Para ello se recurrió a simular casos frecuentes de clima de oleaje en Playa Brava. A partir del nodo de trabajo, se considera el SW como la dirección incidente a simular debido a la baja ocurrencia de oleaje proveniente de otras direcciones.

Para la elaboración de estos casos, se procedió a apartar el oleaje de otras direcciones, con el fin de obtener una tabla de incidencia de altura significativa v/s periodo peak proveniente del SW.

En cada caso se modelo de modo independiente, a fin de simular las condiciones más frecuentes en el sitio de estudio. La tabla de incidencia y los casos a recrear se muestran a continuación:

Se consideró de la Tabla 5-31, en primera instancia el grupo de oleaje de mayor ocurrencia y el perteneciente a mayor altura, debido a que, al tener mayor energía disipa en gran cantidad en la rompiente. Estos casos individuales mueven más arenas que el oleaje reinante. Estos casos se pueden ver en la Tabla 5-32.

Tp [s]	Hs [m]								Total
	0.0 - 0.5	0.5 - 1.0	1.0 - 1.5	1.5 - 2.0	2.0 - 2.5	2.5 - 3.0	3.0 - 3.5	3.5 - 4.0	
2 - 4									0.0
4 - 6		0.01	0.01						0.0
6 - 8		0.14	0.20	0.02					0.4
8 - 10		0.82	1.79	0.23	0.00				2.8
10 - 12		5.43	16.33	3.19	0.10				25.0
12 - 14	0.01	5.97	26.69	14.16	1.61	0.05	0.00		48.5
14 - 16	0.01	1.51	7.33	7.53	2.16	0.25	0.03	0.01	18.8
16 - 18		0.44	1.75	1.22	0.48	0.09			4.0
18 - 20		0.05	0.23	0.10	0.04	0.00			0.4
20 - 22		0.00	0.02	0.00	0.00				0.0
22 - 24									0.0
Total	0.0	14.4	54.3	26.5	4.4	0.4	0.0	0.0	100.0

**Tabla 5-31: Porcentaje de incidencia de oleaje del SW.  
Fuente: Elaboración propia.**

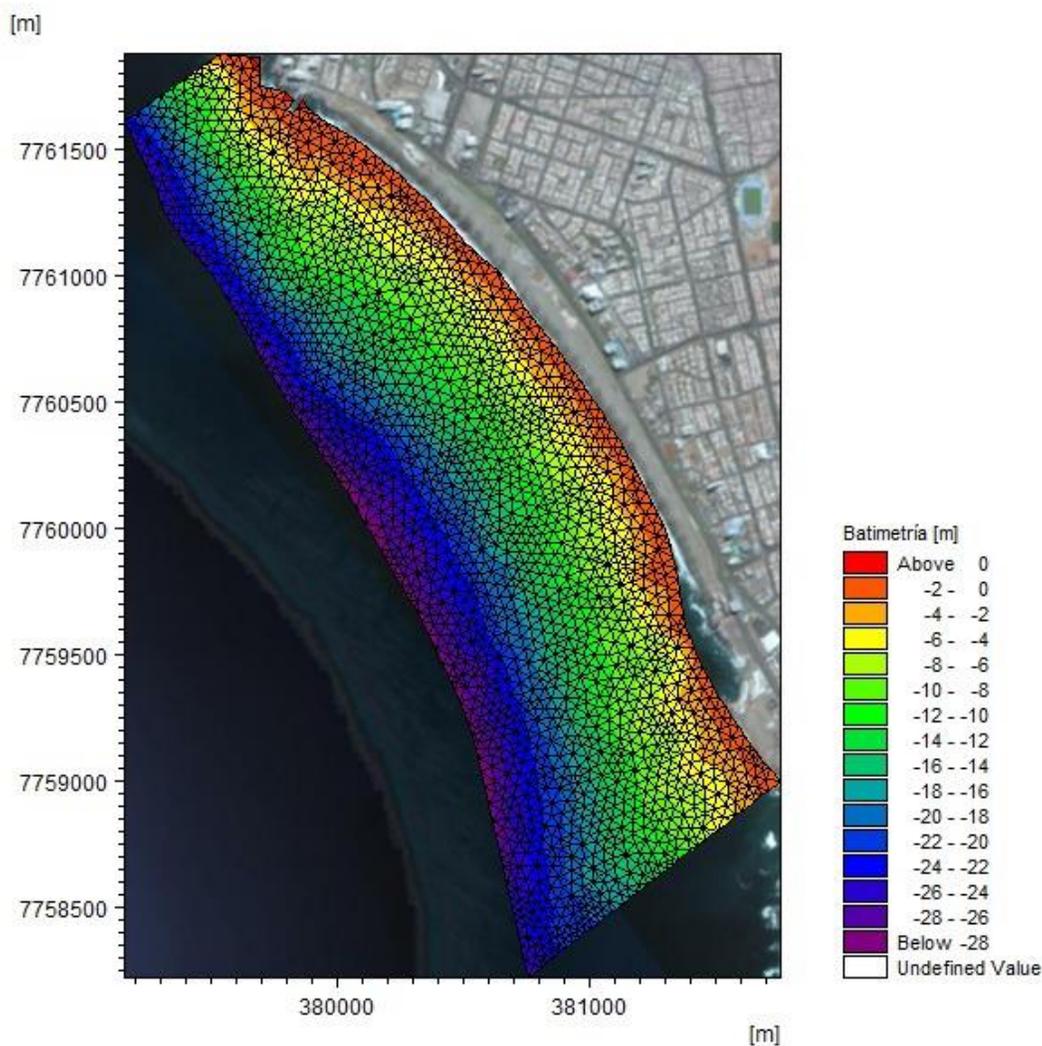
Casos	Hs [m]	Tp [s]	Dir. [°]	Frec. Ocurrencia <sup>2</sup>
1	1.25	11	225	15.6 %
2	1.25	13	225	25.5 %
3	1.25	15	225	7.0 %
4	1.75	13	225	13.5 %
5	1.75	15	225	7.2 %
6	2.25	13	225	1.6 %
7	2.25	15	225	2.1 %

**Tabla 5-32: Casos a simular en nodo de trabajo.  
Fuente: Elaboración propia.**

<sup>2</sup> Frecuencias corregidas con la ocurrencia total del oleaje proveniente del SW.

### 5.7.2.1 GENERACIÓN DE MALLA BATIMÉTRICA

Para la simulación de los casos, se generó una malla numérica la cual bordea los nodos externos descritos en la Figura 5-13, los cuales corresponden al nodo 1, 9, 25, 33, 34, 35, 36, 37, 38 y 39. La malla resultante se muestra en la Figura 5-66.



**Figura 5-66: Malla numérica y batimétrica para medio plazo**  
**Fuente: Elaboración propia.**

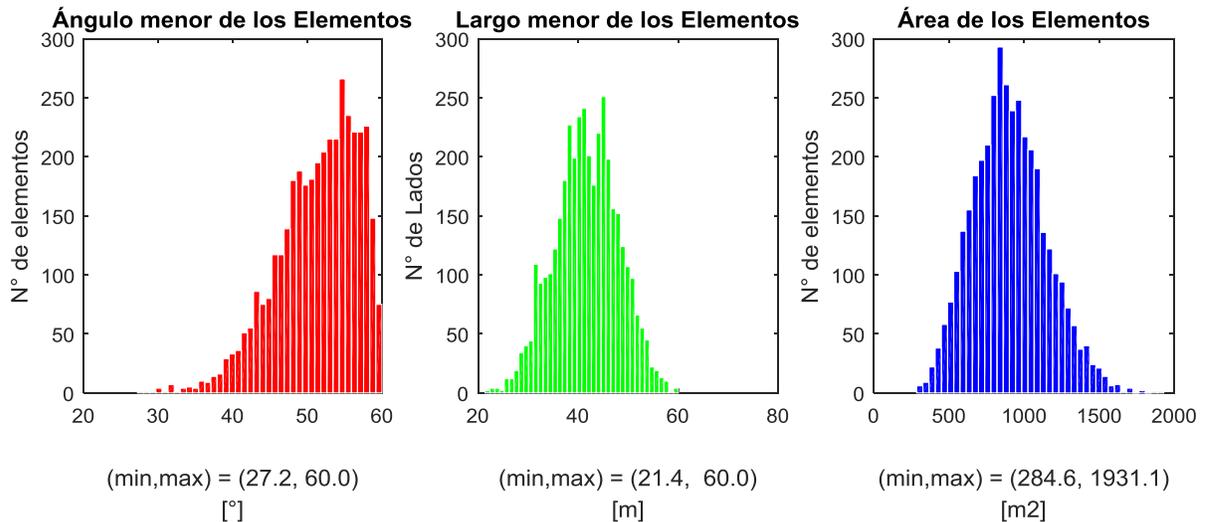
A la malla se le realizó un análisis estadístico de calidad. En la Tabla 5-33, se aprecia algunos datos básicos de ésta.

Información	Valor
Número de nodos	2034
Número de elementos	3842
Área elemento menor [m <sup>2</sup> ]	284
Área elemento mayor [m <sup>2</sup> ]	1930
Ángulo mínimo menor [°]	27
Ángulo mínimo mayor [°]	60

**Tabla 5-33: Información de malla para modelo de 22 años, Mike SW.**  
Fuente: Elaboración propia.

Las profundidades del mallado oscilan entre los 5 y 28 [m] aproximadamente. La malla contiene un total de 2034 nodos y 3842 de elementos.

En la Figura 5-67 se aprecia que los tamaños de los elementos varían desde 284 [m<sup>2</sup>] hasta 1930 [m<sup>2</sup>] aproximadamente.



**Figura 5-67: Parámetros de elementos para modelo de 22 años, Mike SW.**  
Fuente: Elaboración propia.

Se observa en la Figura 5-67 que más del 50% de los triángulos tienen un ángulo mínimo mayor a 40°, lo cual expresa una buena distribución de éstos.

### 5.7.2.2 CONDICIONES DE MODELO DE OLAJE MIKE 21 SW

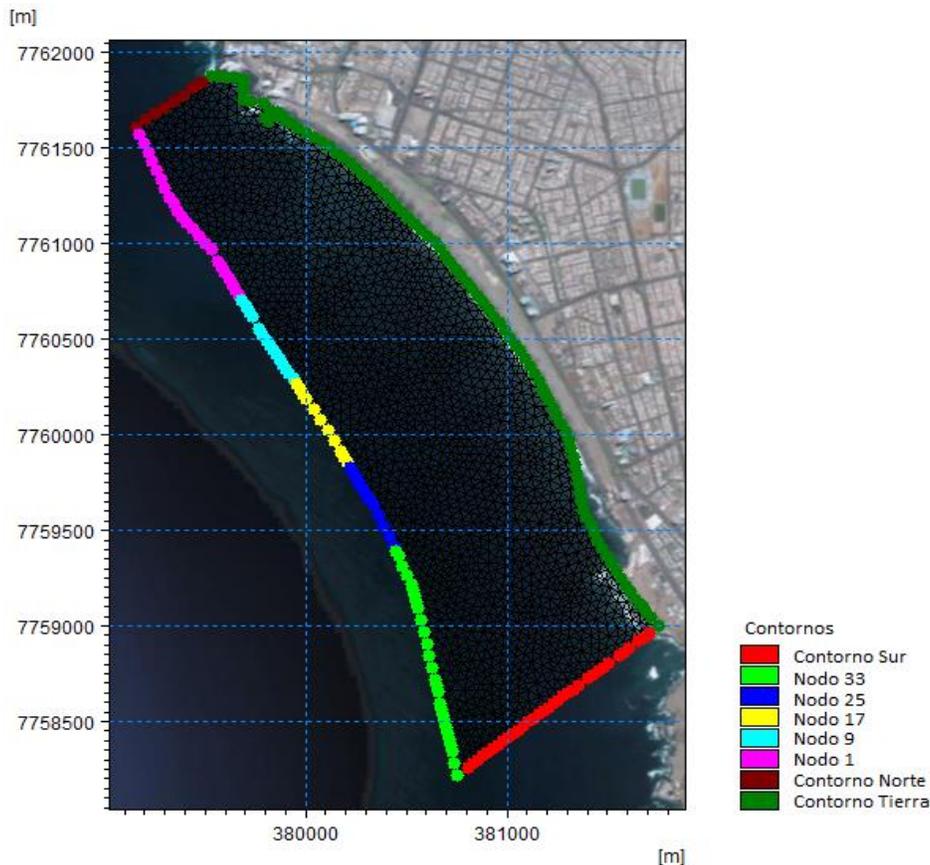
Para simular las variaciones a lo largo del contorno de la malla, se promediaron las diferencias entre los estados de mar para cada nodo respecto al “nodo de trabajo” por rango de altura y periodo, las cuales aplicada en los respectivos contornos.

El dominio de la malla creada para la modelación del oleaje contiene dos tipos de contornos disponibles: las condiciones cerradas para línea de costa con los contornos sin forzantes y con condiciones forzantes constantes en el espacio y variable en el tiempo.

Las condiciones de borde cerradas corresponden a las zonas de línea de costa, mientras que los costados norte y sur se consideran abiertos; en los cuales no hay entrada de energía al dominio del modelo.

En los contornos de forzantes se utilizó la pestaña llamada “versión 1” dada por MIKE 21 SW, la cual fue seteado con la variable constante, permitiendo así ingresar los datos de los casos analizados. Estas condiciones fueron especificadas con los parámetros de resumen Hs, Tp y Dirm.

La distribución de cada contorno se muestra en la Figura 5-68.



**Figura 5-68: Distribución de nodos, mallado SW.**  
Fuente: Elaboración propia.

### 5.7.2.2.1 RESULTADOS DEL MODELO DE OLAJE

En la Figura 5-69 se muestra el campo de oleaje propagado desde los nodos hacia la costa para el caso 1, en el que observan que las máximas alturas se encuentran en la zona norte y sur de la playa. En este caso las mayores alturas sobrepasan los 2 [m] antes de la rotura. Para ver los casos restantes, ver el Anexo A.

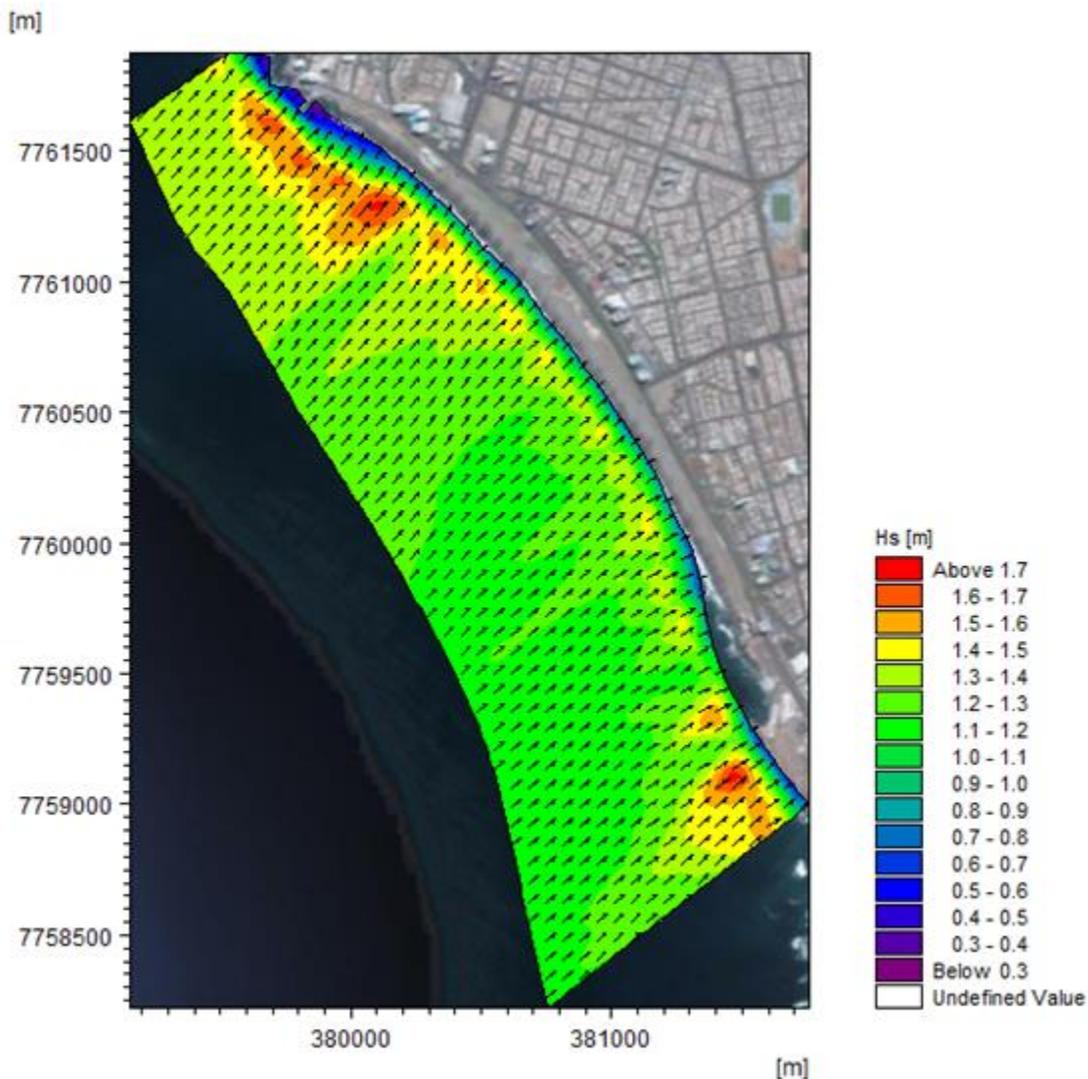


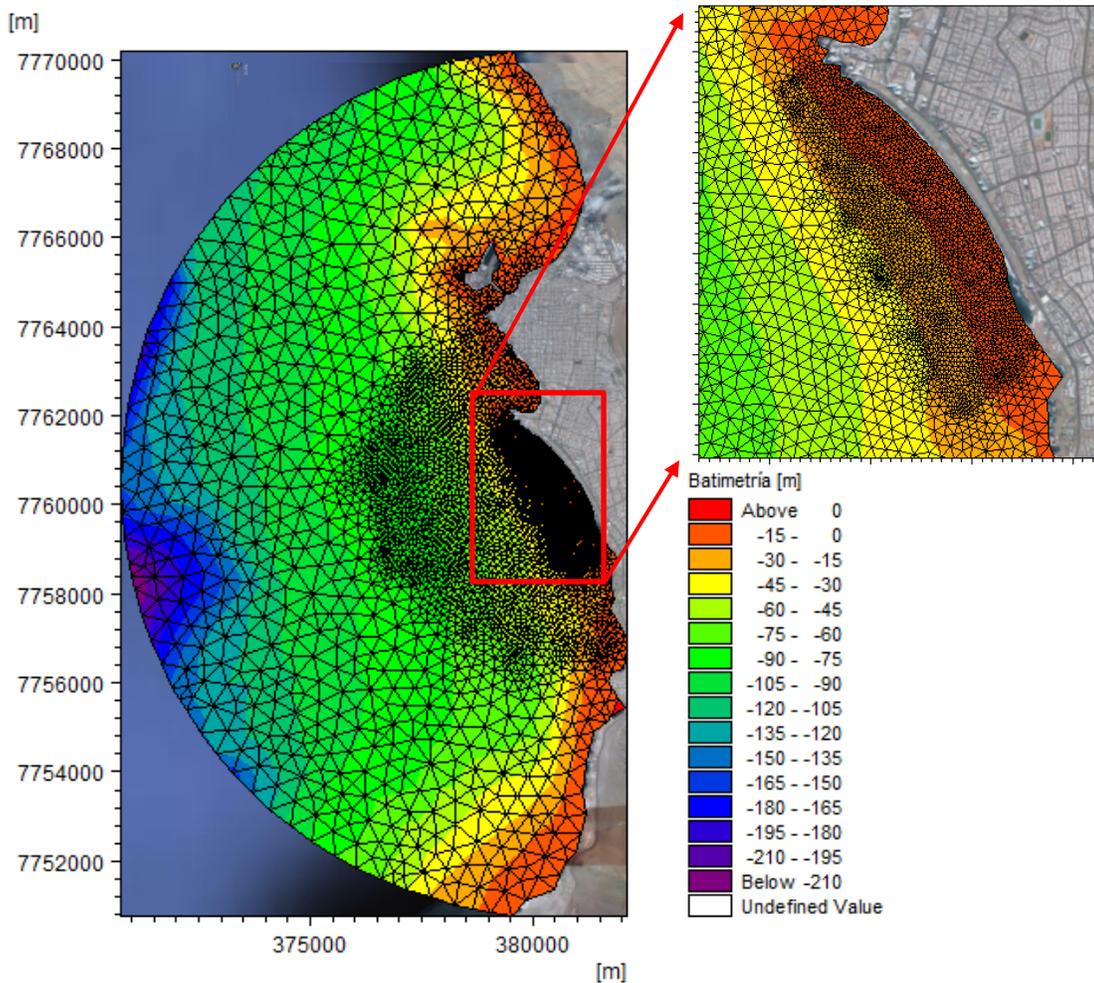
Figura 5-69: Modelación de Oleaje, Mike21 SW. Caso 1.  
Fuente: Elaboración propia.

### 5.7.2.3 CONFIGURACIÓN MODELO MIKE 21 HD

Siguiendo la metodología propuesta de la Figura 4-1, se procedió a implementar el modelo hidrodinámico a través del modelo MIKE 21 HD para las condiciones vistas en la Tabla 5-32.

Para la modelación hidrodinámica se generó una malla del sector de estudio con un contorno abierto de forma circular, la cual abarcó un área total de 154 [Km<sup>2</sup>], con una longitud y ancho de 19500 [m] y 11300 [m], respectivamente. Los bordes extremos están alejados a la zona de estudio con la finalidad de evitar sombras numéricas.

El tamaño de los elementos depende del espaciado entre nodos y el timestep del modelo. Estos criterios están relacionados al número de Courant (5.6.2.1), cuyo valor máximo permitido por el modelo es de 1. Para asegurar la estabilidad del modelo, se setó en forma conservadora un valor de 0.8.



**Figura 5-70: Malla Circular Batimétrica interpolada, Mike 21 HD.  
Fuente: Elaboración propia.**

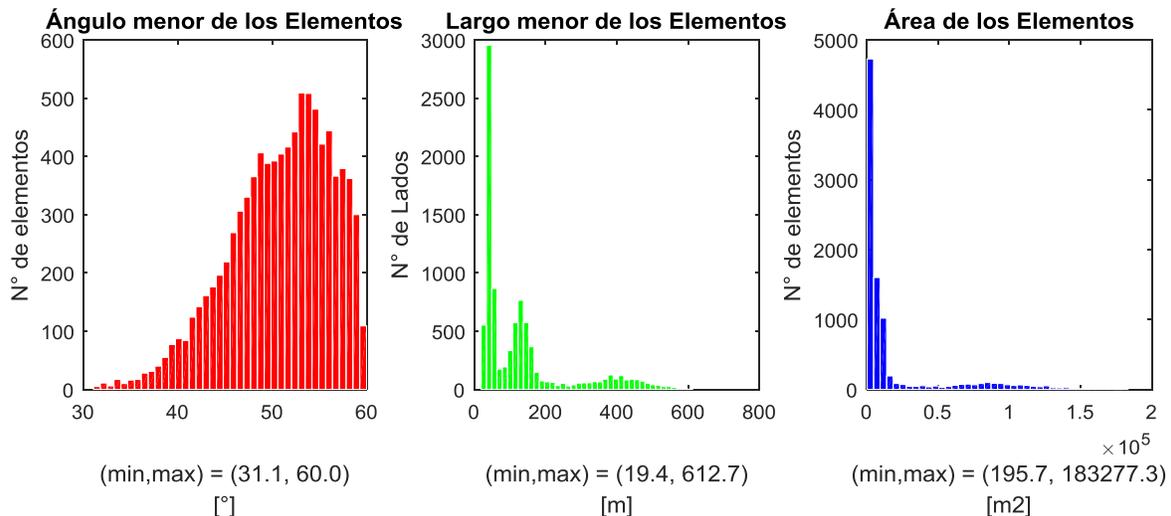
Al mallado se le realizó un análisis estadístico de calidad. En la Tabla 5-34, se aprecia algunos datos básicos de éste.

Información	Valor
Número de nodos	4692
Número de elementos	9099
Área elemento menor [m <sup>2</sup> ]	195
Área elemento mayor [m <sup>2</sup> ]	183277
Ángulo mínimo menor [°]	31
Ángulo mínimo mayor [°]	60

**Tabla 5-34: Información de malla circular para modelo de 22 años, Mike HD.**  
Fuente: Elaboración propia.

Las profundidades del mallado oscilan entre los 5 y 200 [m] aproximadamente. La malla contiene un total de 4692 nodos y 9099 de elementos.

En la Figura 5-70 se observa que los tamaños de los elementos varían desde 195 [m<sup>2</sup>] hasta 183277 [m<sup>2</sup>] aproximadamente.



**Figura 5-71: Parámetros de elementos para modelo de 22 años, Mike SW.**  
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 5-71 se observa que más del 50% de los triángulos tienen un ángulo mínimo mayor a 40°, lo que expresa una buena distribución de estos.

Los contornos del modelo se configuraron en el modo “zero normal velocity”, en los cuales no hubo un forzamiento de marea al dominio del modelo.

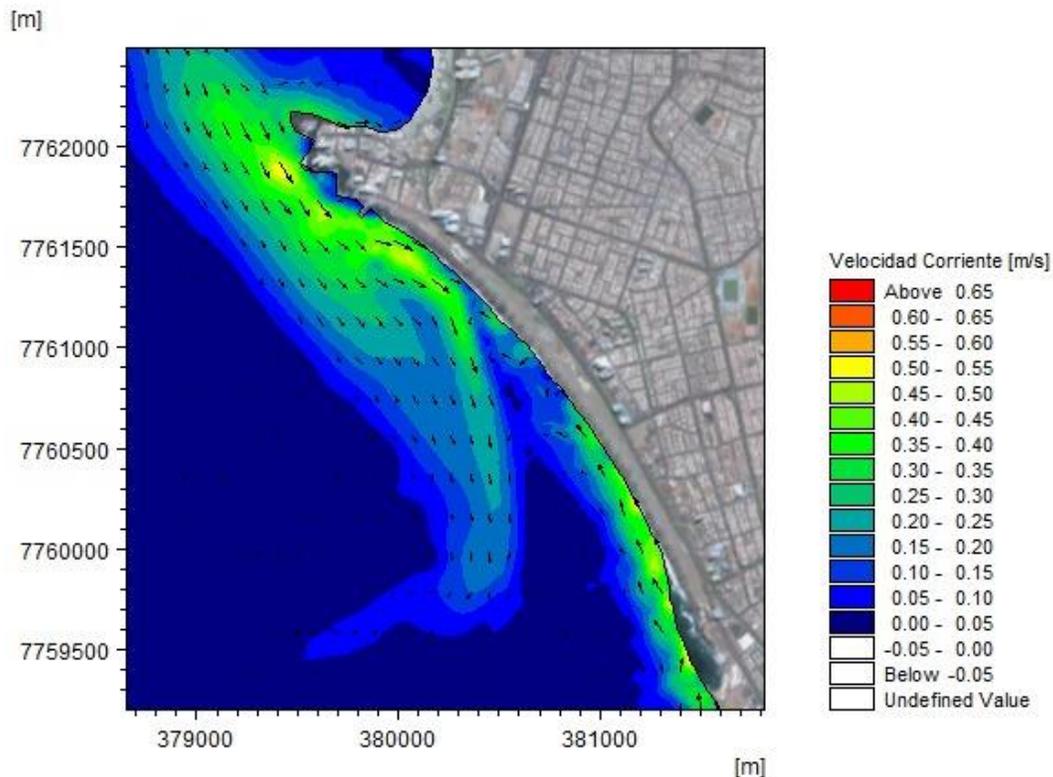
Dentro de las forzantes empleadas, se encuentran los tensores de radiación de oleaje, vistos en la sección 5.7.2.2.1. También se utilizó la condición inicial de marea de 0.8 [cm] para todos los casos.

En cada caso se modeló el tiempo suficiente hasta alcanzar un estado estacionario.

### 5.7.2.3.1 RESULTADOS DEL MOLDELO HIDRODINAMICO

La Figura 5-72 muestra, a modo de ejemplo, las corrientes cercanas a la costa correspondientes a la zona de estudio para las condiciones de oleaje en el caso 1. Este y todos los casos restantes se encuentran en el Anexo B.

Analizando la Figura 5-72, se advierte que hay un sistema establecido de corrientes litorales a lo largo de la playa que fluyen hacia el norte en el sector sur, mientras que en el sector norte tienden a ir hacia el sur y paralelas a la costa.



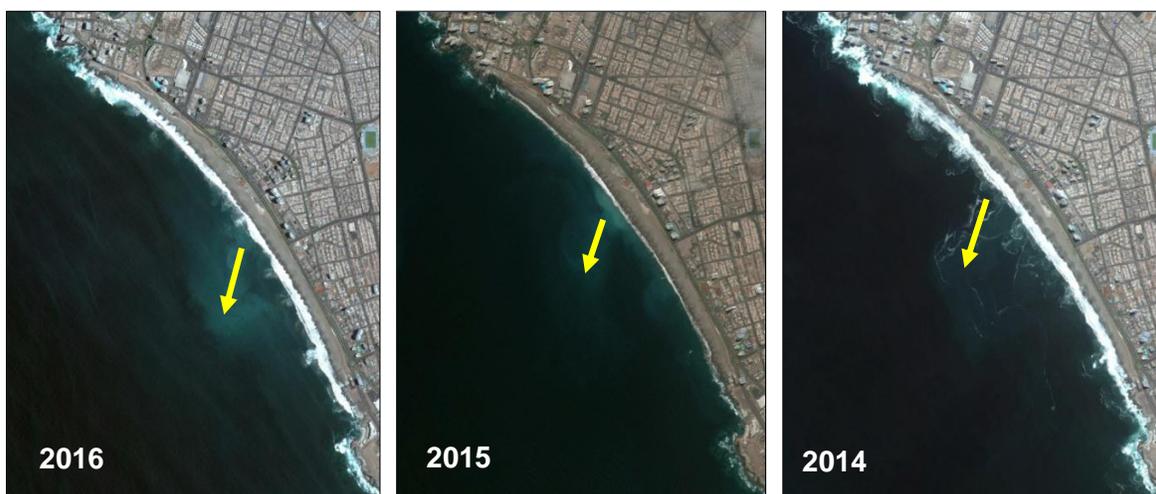
**Figura 5-72: Modelación de corrientes, Mike21 HD. Caso 1.**  
**Fuente: Elaboración propia.**

Los resultados del campo de corrientes obtenidos son concordantes con los resultados de los modelos de oleaje ya que la mayor zona de rotura con las mayores alturas ocurren en el norte de ésta, generando corrientes litorales significativas en la hidrodinámica litoral de la playa. Éstas al emplazarse a mayor distancia desde la costa tienden a cambiar su dirección hacia mar adentro al encontrarse con las corrientes generadas en el sector sur de la playa las cuales tienen similar magnitud con la diferencia que son generadas por la zona

rotura del oleaje más cercano a la costa que ocurre en un sector menor en comparación a la zona norte.

Se debe destacar que las corrientes generadas están exentas de turbulencias y de otras características propias de la dinámica de la rompiente y efectos cíclicos del oleaje, debido a que son producidas por tensores de radiación generados por el modelo numérico Mike 21 SW, el cual promedia la fase de la onda (DHI, año ‘por el manual de SW y HD’). Por ende éstas corrientes generalmente se desplazan de modo paralelo a la costa. Junto con lo anterior, la simulación hidrodinámica no considera efectos en 3D al ser integrados en la vertical.

En la realidad es ocurrenciente en la zona de estudio encontrar corrientes que se dirijan a mar adentro en la zona central de la playa, lo que se puede apreciar en la Figura 5-73.



**Figura 5-73: Análisis imágenes Google Earth.  
Fuente: Google earth.**

En la Figura 5-73, se incluyen tres imágenes correspondientes desde el año 2014 al 2016 de la playa, en las cuales se aprecia visualmente la ocurrencia de corrientes en la zona central saliendo de la playa hacia mar adentro, lo que evidencia que el resultado del caso mostrado por el modelo numérico es congruente con el sistema de corrientes litorales presentes en Playa Brava.

#### **5.7.2.4 SIMULACIÓN DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS**

Para simular y cuantificar el transporte potencial de sedimentos se utilizó el software MIKE 21 ST. De esta forma, se ingresaron los campos de corrientes y de oleaje analizados en cada caso (sección 5.7.2.3.1) junto a la tabla de transporte de sedimentos la que considera la interacción ola-corriente (sección 4.3).

La variación del nivel de fondo marino se calculó por el mismo software, a través de la fórmula de continuidad de sedimento vista en la sección 3.3.

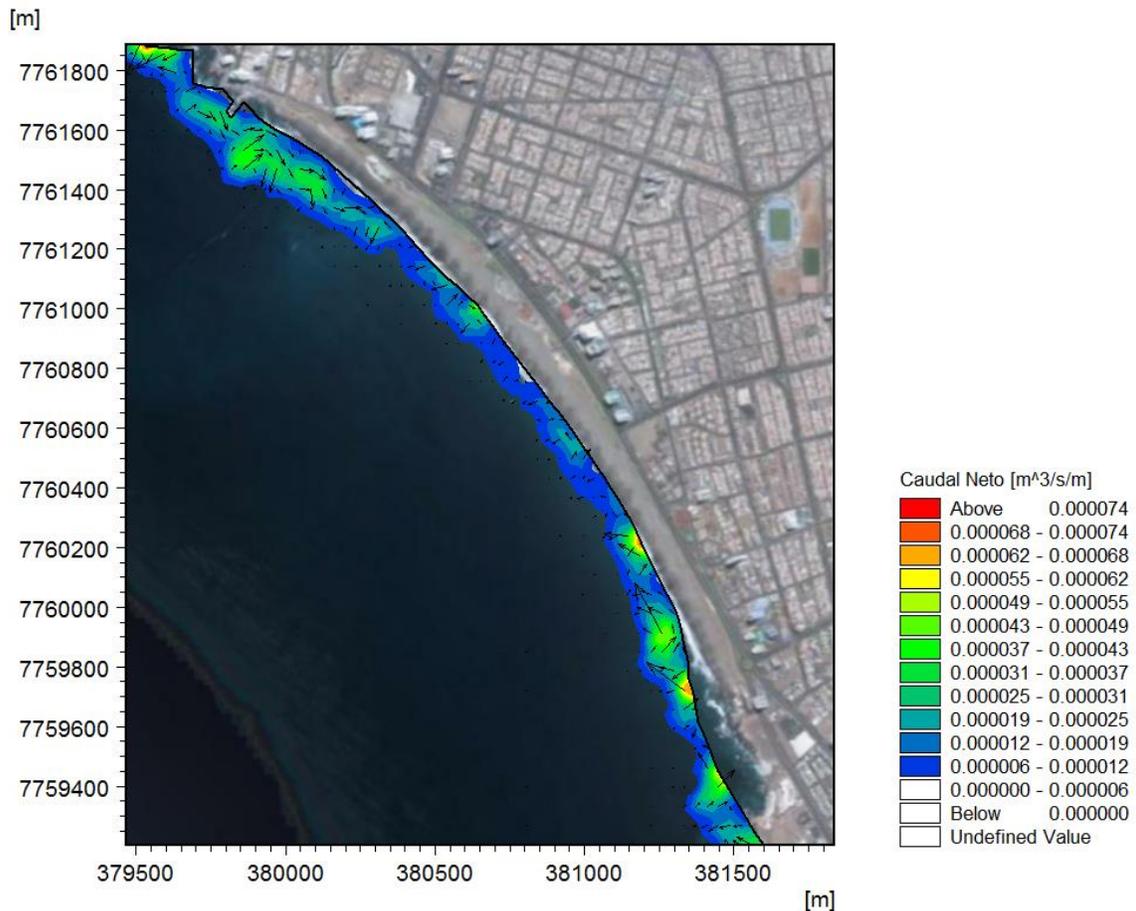
Para la creación de la tabla de transporte de sedimentos se utilizaron los diámetros del sedimento  $d_{50}$  de 0.24 [mm],  $d_{16}$  de 0.18 [mm] y  $d_{84}$  de 0.31 [mm] que corresponden al

promedio de las muestras de la zona sumergida de la playa, con lo que se obtuvo una desviación geométrica de 1.32 (Ecuación 39). La porosidad que se aplicó es de 40%.

Con lo anterior, se consideraron los resultados finales de las cargas de fondo, realizados para las condiciones estacionarias dadas por el modelo hidrodinámico MIKE 21 HD.

#### 5.7.2.4.1 RESULTADOS OBTENIDOS DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

En la Figura 5-74, se muestra el resultado del mapa de la variación de la carga total<sup>3</sup> para el caso 1. Los resultados del resto de los casos de la Tabla 5-32 se visualizan en el anexo C.



**Figura 5-74: Simulación de transporte de sedimentos, caudal neto. Caso 1.**  
**Fuente: Elaboración propia.**

Los resultados de los casos simulados a través del modelo Mike 21 ST (Sección 4.3) indicaron una carga total en los extremos. En la zona norte se observó una carga potencial hacia el sur, mientras que en el sector sur se observó una carga potencial hacia el norte.

<sup>3</sup> El lector debe tener en cuenta que los resultados del modelo Mike 21 ST corresponde al transporte potencial del sedimento, el cual puede variar significativamente del transporte real en el sitio.

De igual forma en la zona central se observó un estado de equilibrio en el movimiento de las arenas.

#### 5.7.2.4.2 PONDERACIÓN TOTAL DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

El transporte de sedimentos de un año promedio de los casos simulados en la Tabla 5-32, se obtiene a través de una ponderación estadística de las tasas individuales de cada caso, de esta forma se obtiene un caudal del transporte de sedimentos integrado. Lo anterior se expresa en la siguiente fórmula:

$$Q_T = \sum_{i=1}^n (f_i \cdot q_i)$$

**Ecuación 54**

Donde:

$Q_T$  : Caudal Ponderado Total.

$f_i$  : Frecuencia del caso  $i$ .

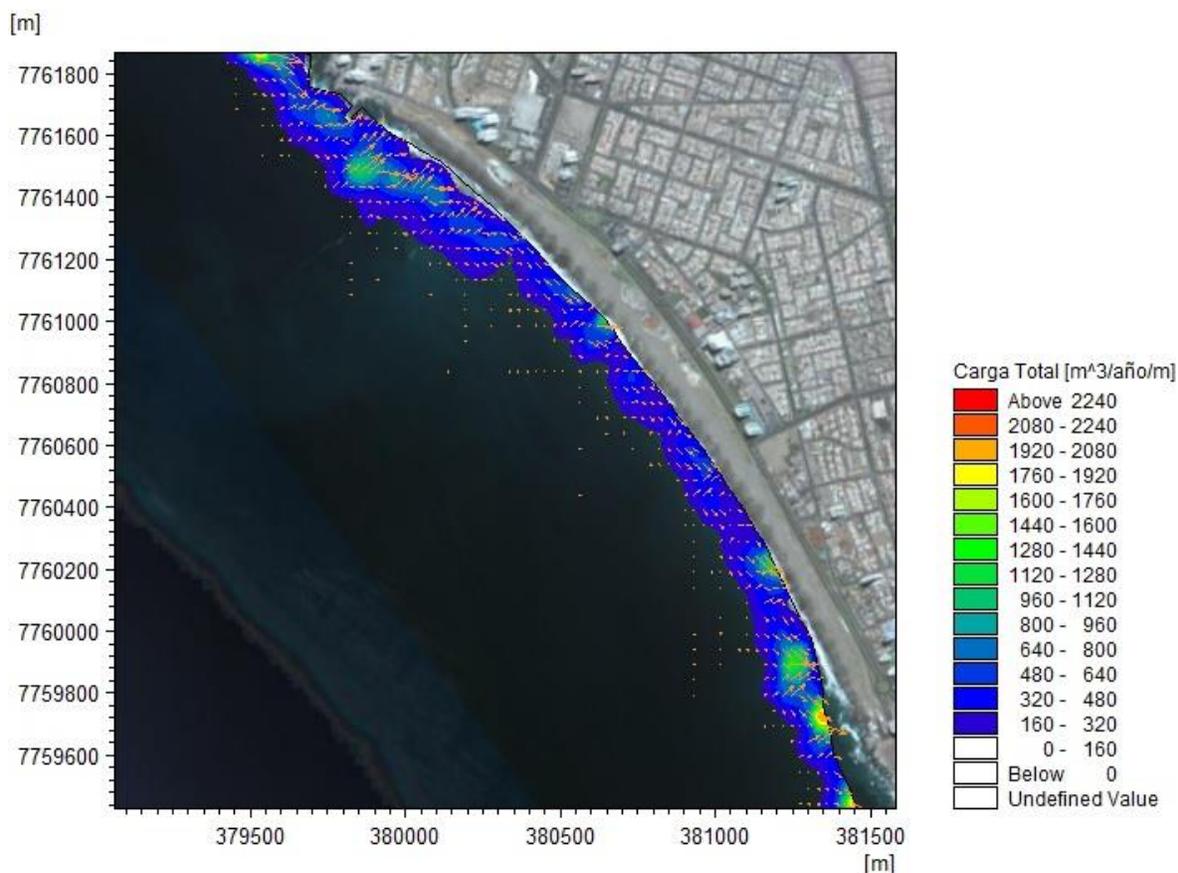
$q_i$  : Caudal en caso  $i$ .

Este procedimiento es descrito como un estado de arte de la simulación de transporte de sedimentos y morfodinámica según Roelvink (2011).

Utilizando el procedimiento descrito, se obtuvo el caudal ponderado total de acuerdo a todos los casos en el dominio completo de la malla numérica utilizada.

Es pertinente mencionar que durante el proceso de ponderación, se consideraron las componentes en eje  $x$  e  $y$ , por lo que el caudal ponderado resultante corresponde a un caudal Neto, según el esquema presentado en la sección 3.3.1.1.1.

En la Figura 5-75, se muestra el caudal ponderado final en el sector de estudio, el cual se mencionará en adelante como “Carga Total”.



**Figura 5-75: Simulación de transporte de sedimentos, caudal neto, carga total.**  
**Fuente: Elaboración propia.**

A partir del resultado de la Carga Total, se realizó los análisis para la evaluación del comportamiento morfodinámico de Playa Brava.

### **Análisis de carga total neto**

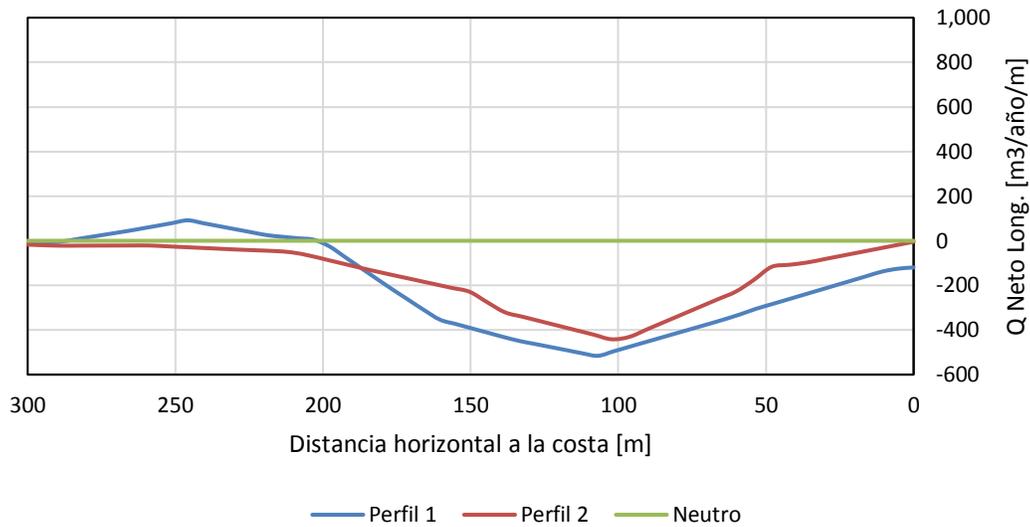
Para analizar la morfología general de Playa Brava, de acuerdo a los resultados obtenidos, se optó por trazar perfiles a lo largo del sector de estudio, los cuales se inician desde la línea de costa hasta una longitud aproximada de 500 [m] mar adentro. De este modo se atraviesa la zona de rompiente, asegurándose así llegar hasta la profundidad activa, la cual considera los movimientos de arenas.



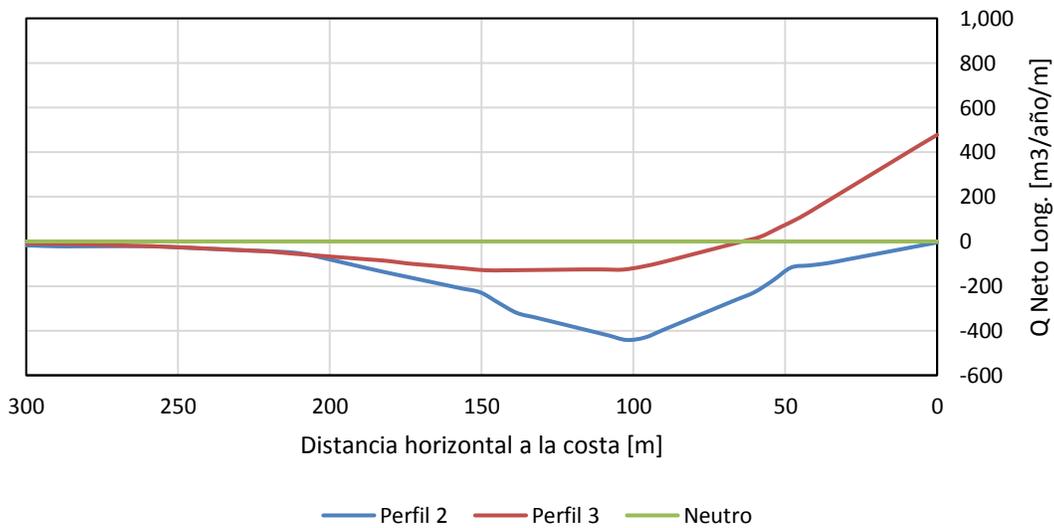
**Figura 5-76: Distribución de perfiles.**  
**Fuente: Elaboración propia.**

Para realizar el análisis a lo largo de cada uno de los perfiles, se obtuvieron las componentes longitudinales de la playa (transversal a los perfiles) y las magnitudes de las cargas totales.

Desde la Figura 5-77 a la Figura 5-86, se observa la carga total de los perfiles a lo largo de cada uno por tramos. Se define cada tramo como la sección entre perfiles aledaños, siendo el tramo 1 el que se encuentra entre el perfil 1 y perfil 2, hasta el tramo 10 entre el perfil 10 y perfil 11. La carga es mostrada con signo negativo en dirección SE y positivo en dirección NW. Por consiguiente se analizó cada tramo de norte a sur, aunque se advierte que solo se consideró el caudal longitudinal, sin tener en cuenta los componentes transversales del transporte de los sedimentos.



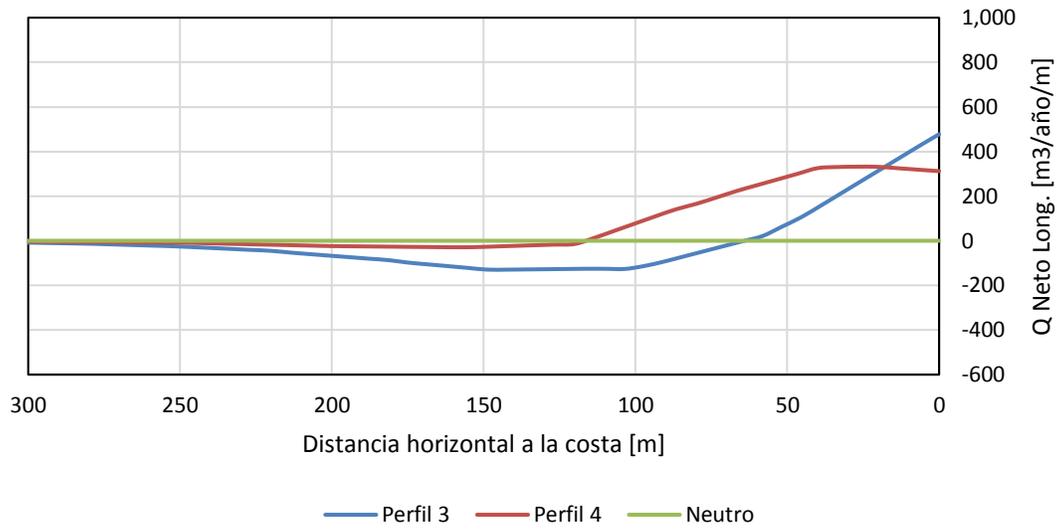
**Figura 5-77: Tramo 1, variación entre perfil 1 y 2, carga total.**  
**Fuente: Elaboración propia.**



**Figura 5-78: Tramo 2, variación entre perfil 2 y 3, carga total.**  
**Fuente: Elaboración propia.**

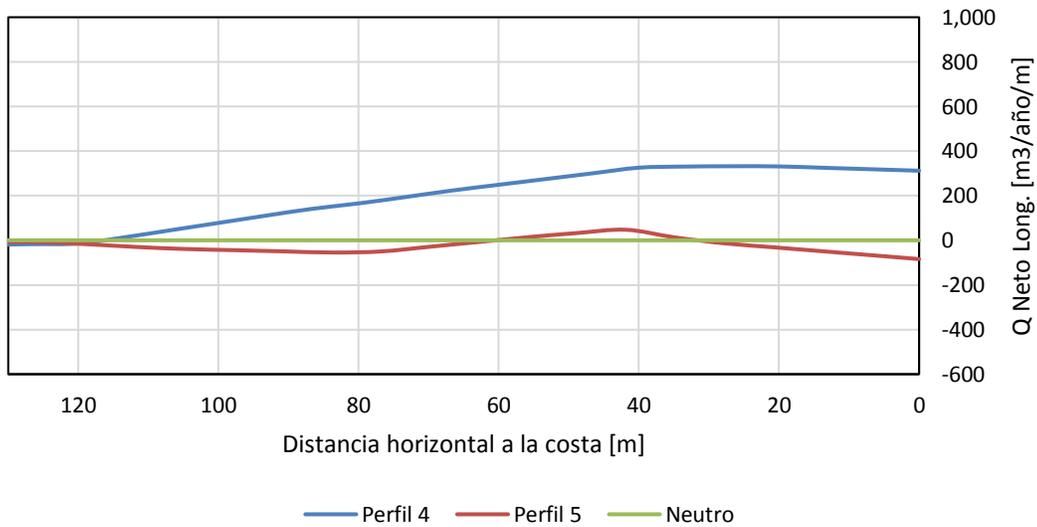
Para el tramo 1, se muestra que al recorrer desde norte a sur la capacidad potencial de transporte total no demuestra un cambio significativo, por lo que este sector en la línea de costa puede no mostrar cambios.

El tramo 2 sugiere un retroceso de costa, debido a que en el sector norte el caudal disminuye generando una erosión mar adentro. En el perfil 3 (sector sur) los sedimentos se mueven hacia NW, por ende en la zona de costa va decreciendo su magnitud al tocar profundidades mayores. Por tanto, la línea de costa puede mostrar un retroceso.



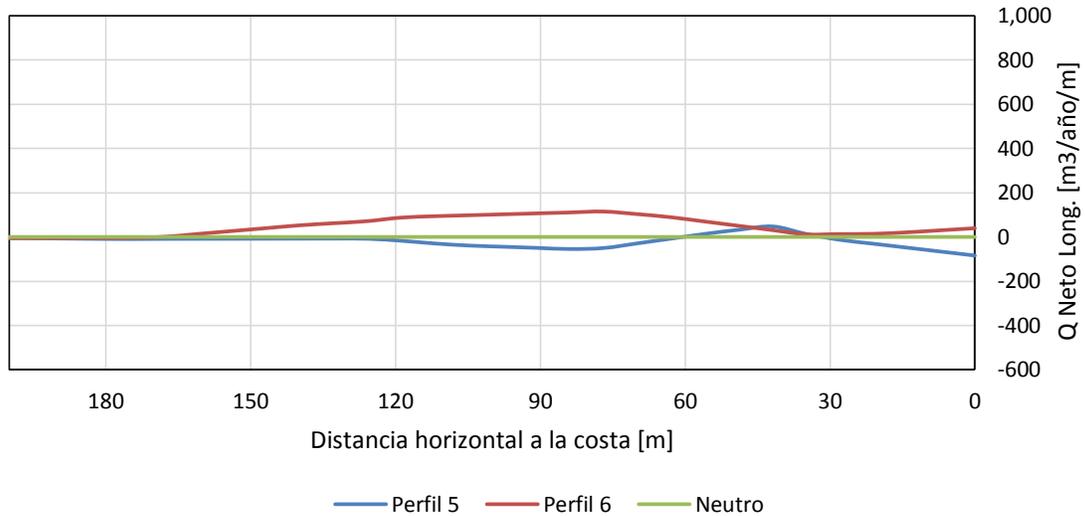
**Figura 5-79: Tramo 3, variación entre perfil 3 y 4, carga total.**  
**Fuente: Elaboración propia.**

Entre los perfiles 3 y 4, existe un leve aumento en la capacidad de transporte, por lo que no existiría una erosión denotada ni acreción en el tramo 3.



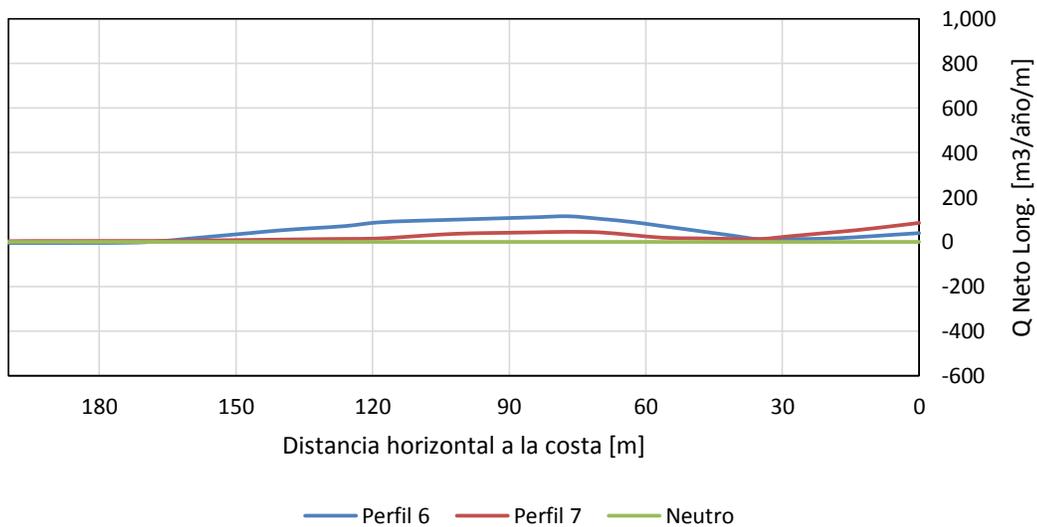
**Figura 5-80: Tramo 4, variación entre perfil 4 y 5, carga total.**  
**Fuente: Elaboración propia.**

En el tramo 4, existe una diferencia de capacidad de transporte, siendo el perfil 4 mayor en dirección NW mientras que en el perfil 5 es casi nula, lo que advierte una erosión potencial del fondo y de línea de costa.



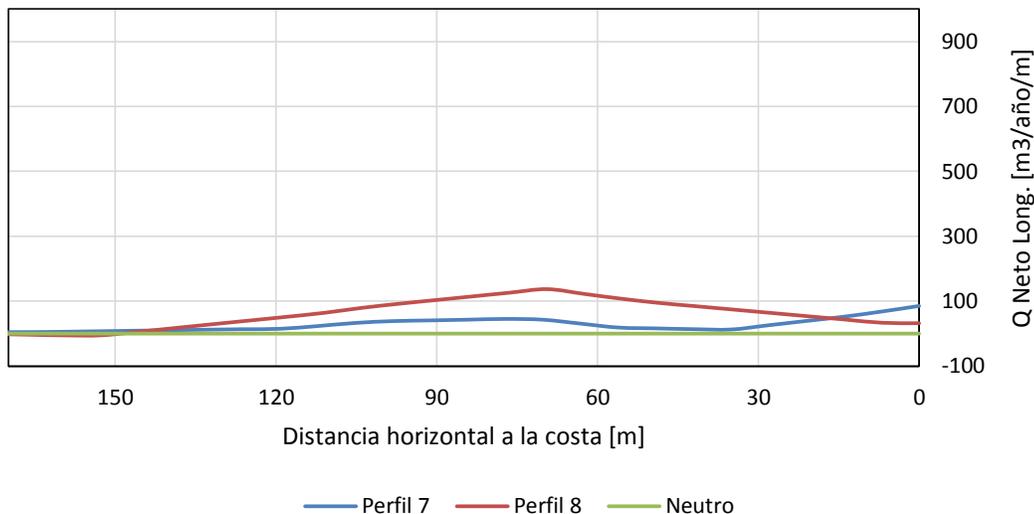
**Figura 5-81: Tramo 5, variación entre perfil 5 y 6, carga total.**  
Fuente: Elaboración propia.

En el tramo 5, no existe un cambio notorio, ya que las cargas bajas no generan cambios en el sector.



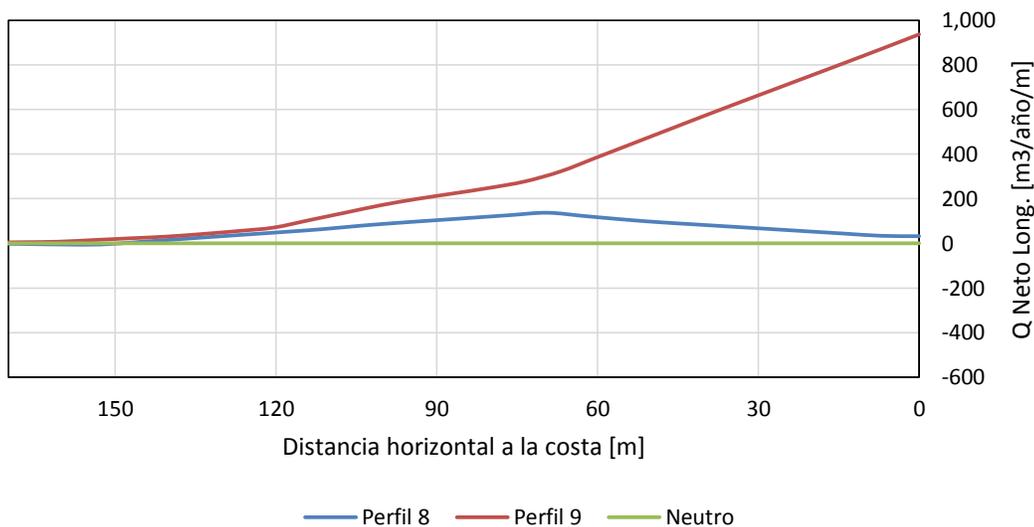
**Figura 5-82: Tramo 6, variación entre perfil 6 y 7, carga total.**  
Fuente: Elaboración propia.

De modo similar al tramo anterior, en el tramo 6 no existen caudales abruptos ni diferencias entre los perfiles, por lo que el sector estaría en equilibrio.



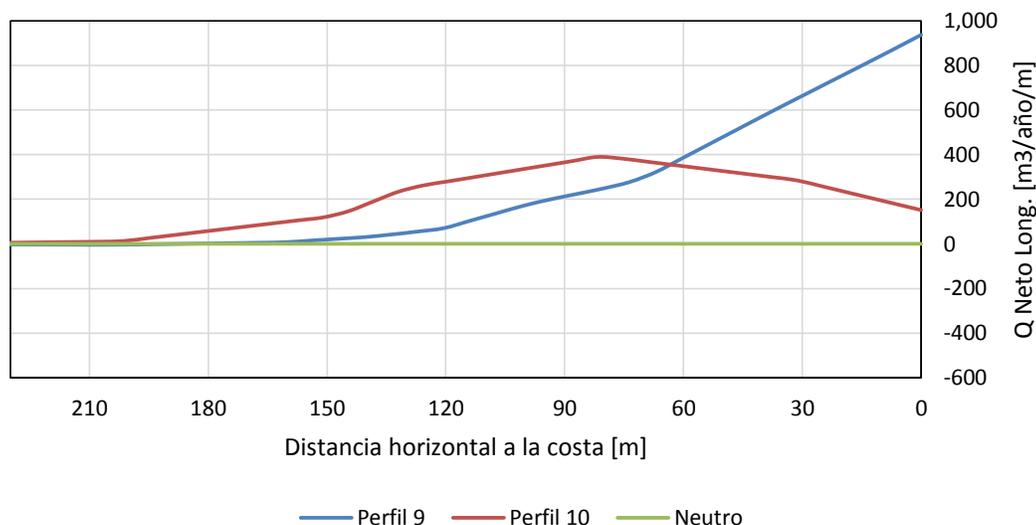
**Figura 5-83: Tramo 7, variación entre perfil 7 y 8, carga total.**  
**Fuente: Elaboración propia.**

En el tramo 7, no se registran diferencias en la capacidad de caudales sólidos, por lo que los resultados reflejan un equilibrio en el trecho.



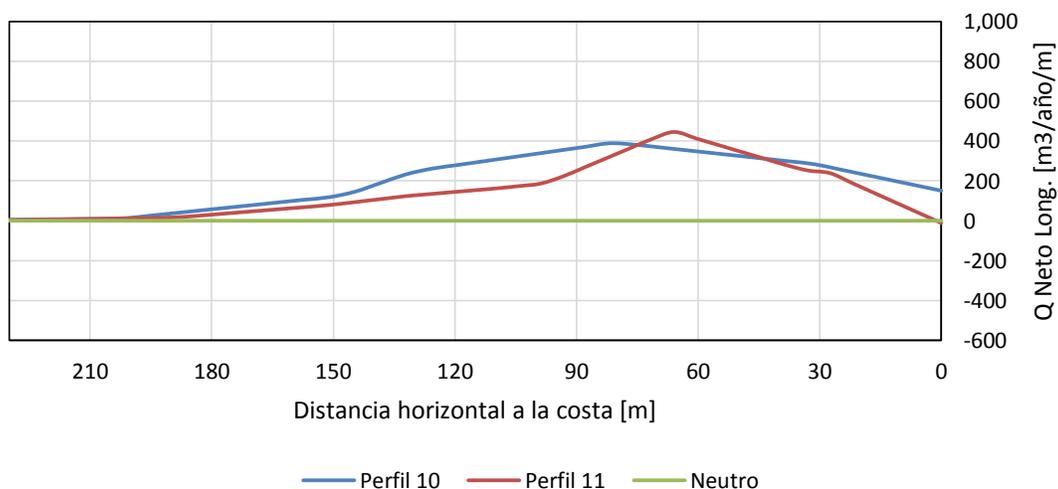
**Figura 5-84: Tramo 8, variación entre perfil 8 y 9, carga total.**  
**Fuente: Elaboración propia.**

En el tramo 8, existe una significativa diferencia entre el perfil 8 (norte) y perfil 9 (sur), debido a que en el borde norte el caudal es prácticamente nulo, mientras que en el borde sur el caudal aumenta abruptamente hacia el NW. Con estos resultados se debiera mostrar un aumento en el fondo y un avance de la línea de costa hacia mar adentro.



**Figura 5-85: Tramo 9, variación entre perfil 9 y 10, carga total.**  
Fuente: Elaboración propia.

En el tramo 9, existe un cambio significativo entre los perfiles, aumentando el perfil 9 hacia el NW considerablemente, mientras que el perfil 10 acrece hasta los 90 [m] de distancia de la costa.



**Figura 5-86: Tramo 10, variación entre perfil 10 y 11, carga total.**  
Fuente: Elaboración propia.

En el tramo 10, Figura 5-86, ambos perfiles presentan un leve aumento hacia la dirección NW, generando una zona de poca variación morfológica.

A partir del análisis general de los tramos, en la zona norte de la playa, se aprecian las mayores tasas de movimientos de arenas provocando así zonas de erosión. Mientras que en la zona centro existen algunos sectores de estabilidad morfológica, y en el sector sur existe un movimiento de sedimento hacia el norte generando de esta forma algunos tramos con acumulación. Cabe mencionar que los análisis se basan en los resultados del transporte neto potencial de las simulaciones numéricas realizadas.

Estas diferencias de transporte son las responsables de generar una zona de erosión como también de acumulación. Del perfil 5 al 8, no se advierten mayores diferencias en sus distribuciones transversales, por lo cual todas estas zonas corresponderían a sectores en equilibrio dinámico que solo presentan variaciones estacionales en la línea de costa.

Realizando una pequeña comparación entre la realidad morfodinámica y los resultados del modelo, se puede deducir que las simulaciones no reflejan en su totalidad las características morfológicas de Playa Brava, debido a que los resultados de la técnica de modelación sugiere un cambio en la línea de costa, escenario que no se asemeja a la situación actual de la zona de estudio.

## **5.8 CARACTERIZACIÓN TEMPORAL DE LINEA DE COSTA**

Para realizar una validación de los resultados del proceso de modelado de la dinámica general de la Playa Brava, se optó por describir las formas de la línea de playa en variados años, comprendiendo al menos una década.

Para este análisis se utilizó fotografías extraídas de Google Earth del sector de estudio correspondientes a los años 2005, 2007, 2011, 2013 y 2016, de las cuales se digitalizaron las líneas de costa. Estas se pueden apreciar en la Figura 5-87.

Analizando los resultados morfológicos del modelo, se puede inferir que en su totalidad no representan la realidad morfodinámica de Playa Brava, ya que si bien existen movimientos de arenas en toda la extensión de la línea de costa, esta circulación de granos se realiza de manera equilibrada, provocando un leve cambio en la línea de costa.

En la Figura 5-87 se muestra la variación de la línea de costa entre el año 2005 y 2016, revelando de manera simple y sencilla, la baja variación que ha ocurrido con el paso del tiempo.

El modelo numérico, reflejó una variación en los extremos de la playa, pero además evidenció una acumulación de arenas en la zona central que no ocurre.

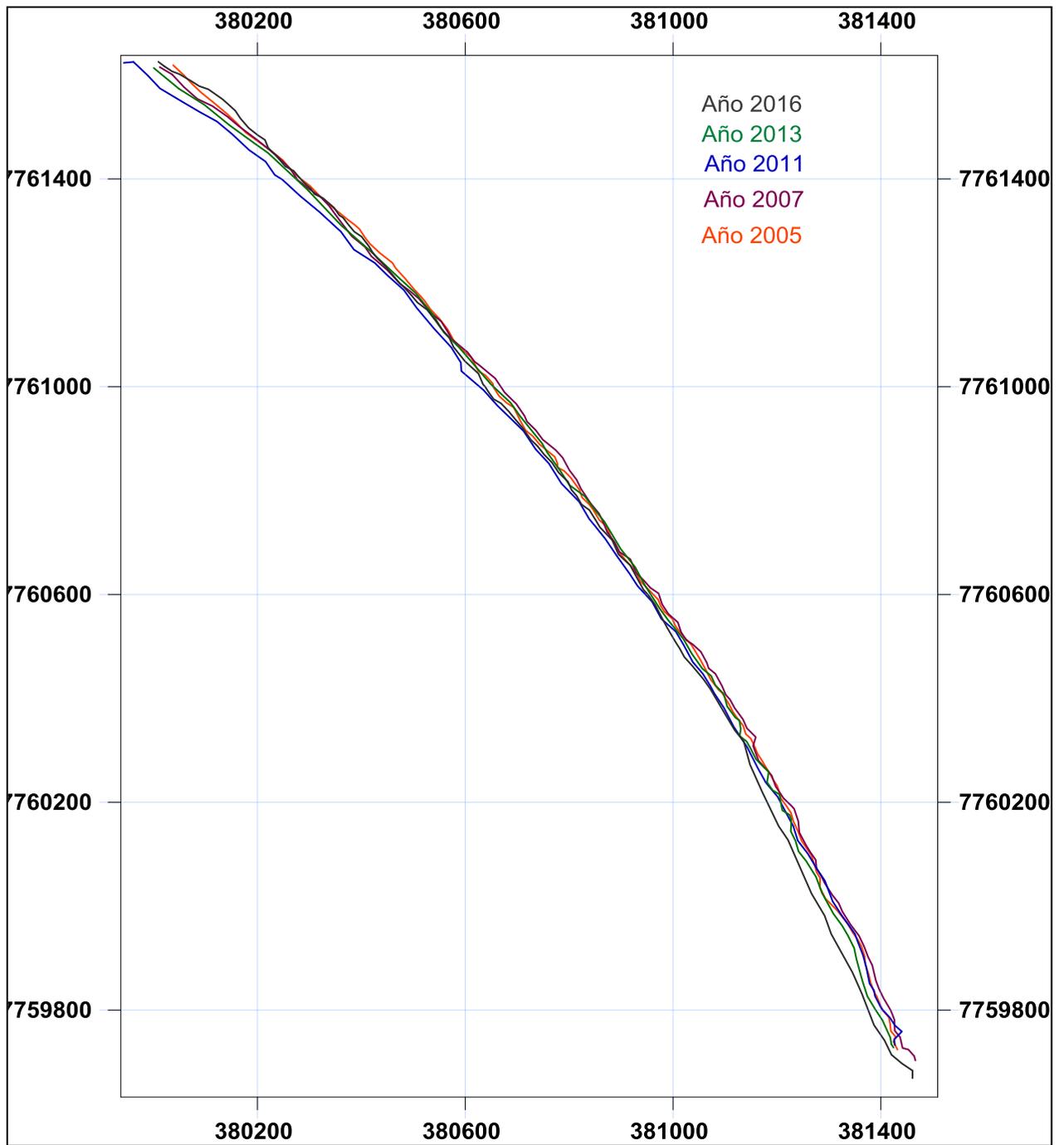


Figura 5-87: Líneas de costa en el tiempo.  
Fuente: Elaboración propia.

## 5.9 SIMULACIÓN DE TORMENTA

Durante el presente proyecto de título, se realizaron análisis del oleaje, corrientes y transporte de sedimentos cuyo objetivo es cuantificar la morfodinámica general de Playa Brava por medio de la estimación del transporte potencial del sedimento presente en el sitio de estudio. A modo de complemento, se realizó un análisis de la respuesta de la playa ante una eventual tormenta.

Este análisis se basa en el análisis extremal descrito en el informe de estudio de oleaje (DOP 2010) para aguas profundas. Se consideran tormentas provenientes del SW, debido al clima de oleaje ya descrito en el sector (Tabla 5-15). En la Tabla 5-35 se muestran los valores de las tormentas.

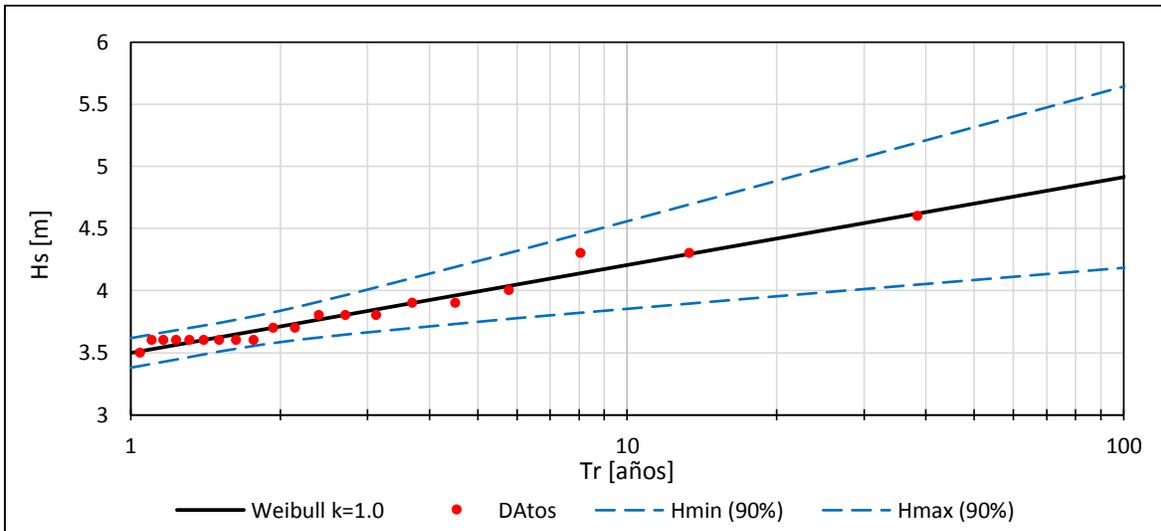
De los datos de la Tabla 5-35, se realizó ajustes de Weibull ( $k= 0.75, 1, 1.4$  y  $2$ ) y Gumbel, de los cuales el mejor ajuste se obtuvo con Weibull ( $k=1.0$ ). Estos resultados se muestran en la Tabla 5-36 y en la Figura 5-88.

Fecha del Peak (Tormenta)	Hs [m]	Tp [s]	DPK [°]
26-Julio-1987	4.6	14.8	226
23-Junio-1997	4.3	15.2	222
2-Noviembre-2006	4.3	16.3	213
6-Junio-2006	4	14.9	222
9-Septiembre-1988	3.9	17.5	217
6-Junio-2009	3.9	17.4	225
22-Noviembre-1988	3.8	15.9	220
2-October-1998	3.8	17.5	219
19-Junio-1994	3.8	15.1	221
22-Junio-1998	3.7	16.4	216
3-Mayo-2002	3.7	17	212
28-October-2003	3.6	15	212
14-Julio-2005	3.6	16.3	220
27-Mayo-1985	3.6	14.9	219
15-Agosto-1988	3.6	13.9	220
23-Junio-1989	3.6	16.7	214
16-October-1990	3.6	16.4	208
3-Junio-2006	3.6	15.3	221
16-Septiembre-1999	3.6	16.8	216
3-Septiembre-2004	3.5	16.2	208

**Tabla 5-35: Tormentas seleccionadas en análisis extremal**  
Fuente: DOP, (2010)

Ajuste	2 años	5 años	10 años	20 años	50 años	100 años
Límite superior (90%)	3.84	4.24	4.56	4.99	5.32	5.64
Cálculo Promedio	3.71	3.99	4.21	4.49	4.7	4.91
Límite Inferior (90%)	3.59	3.75	3.85	3.99	4.08	4.18

**Tabla 5-36: Alturas Hs extrémales por periodo de Retorno.**  
Fuente: Elaboración propia.



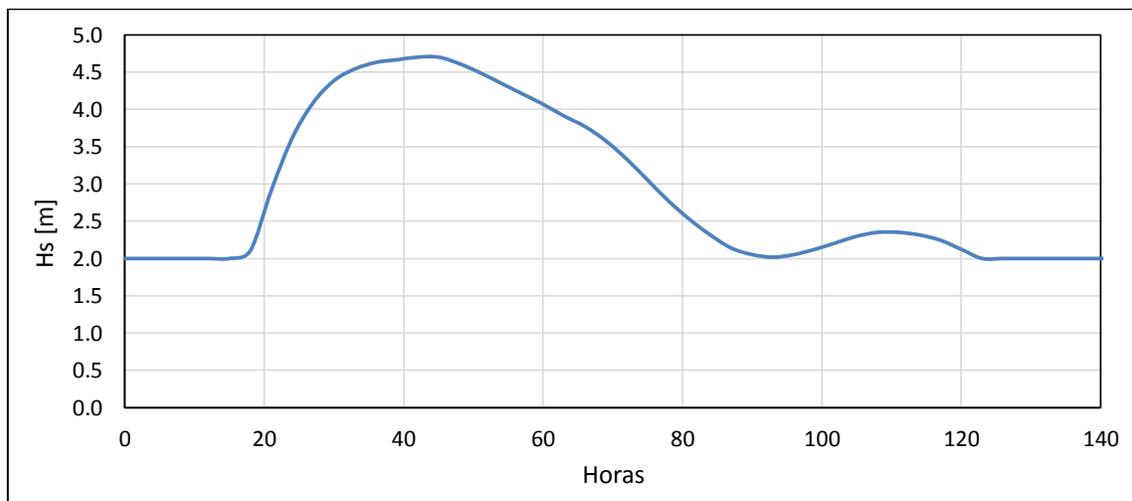
**Figura 5-88: Estimación extremal, 3er cuadrante.**  
**Fuente: Elaboración propia.**

Se simuló una tormenta con una altura de un periodo de retorno de 50 años, lo que corresponde a una altura de 4.7 [m] en aguas profundas.

De la Tabla 5-9, Tabla 5-10 y Tabla 5-11, correspondientes al nodo de trabajo, se verifica que el oleaje de mayor magnitud proviene de la dirección SW con un periodo medio de 15 [s].

Con lo anterior, se obtuvo una tormenta en aguas profundas con una altura máxima de 4.7 [m], un periodo entre los 14 y 16 [s] y una dirección SW.

Para la creación de la tormenta, se obtuvo la duración máxima de la tormenta mayor registrada en la fecha 26/07/1987, la cual alcanzó un tiempo de aproximadamente 100 horas (Figura 5-89).



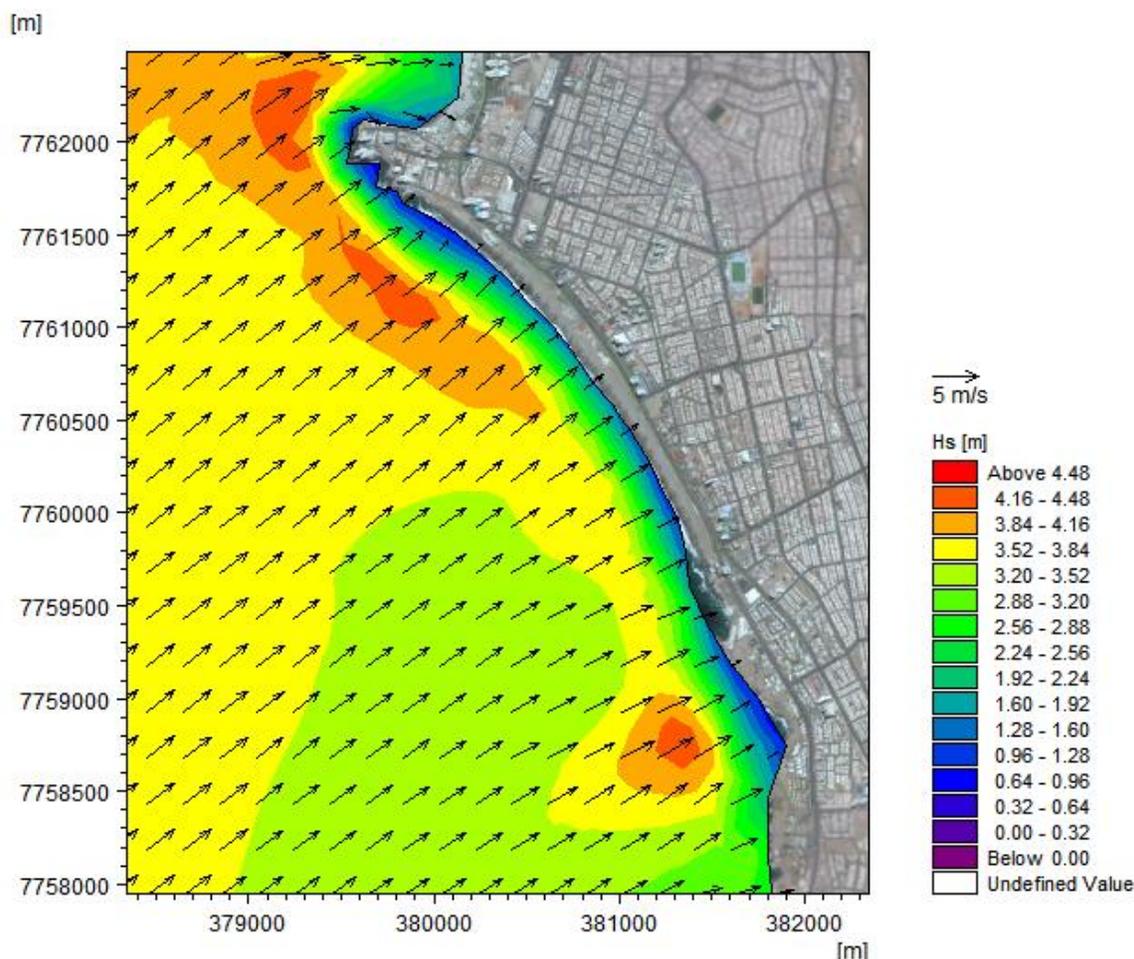
**Figura 5-89: Tormenta con peak de Hs = 4.7 [m].**  
**Fuente: Elaboración propia.**

### 5.9.1 SIMULACIÓN DE TORMENTA, RESULTADOS OLEAJE

Se propagó la tormenta descrita anteriormente con el mismo dominio de malla utilizado en la sección 3.5.3, con la finalidad de obtener el campo de oleaje y los tensores de radiación en el sector de estudio.

En la Figura 5-90 se observa el momento en que aparece la simulación una máxima altura significativa, donde el oleaje arriba paralelo a la costa.

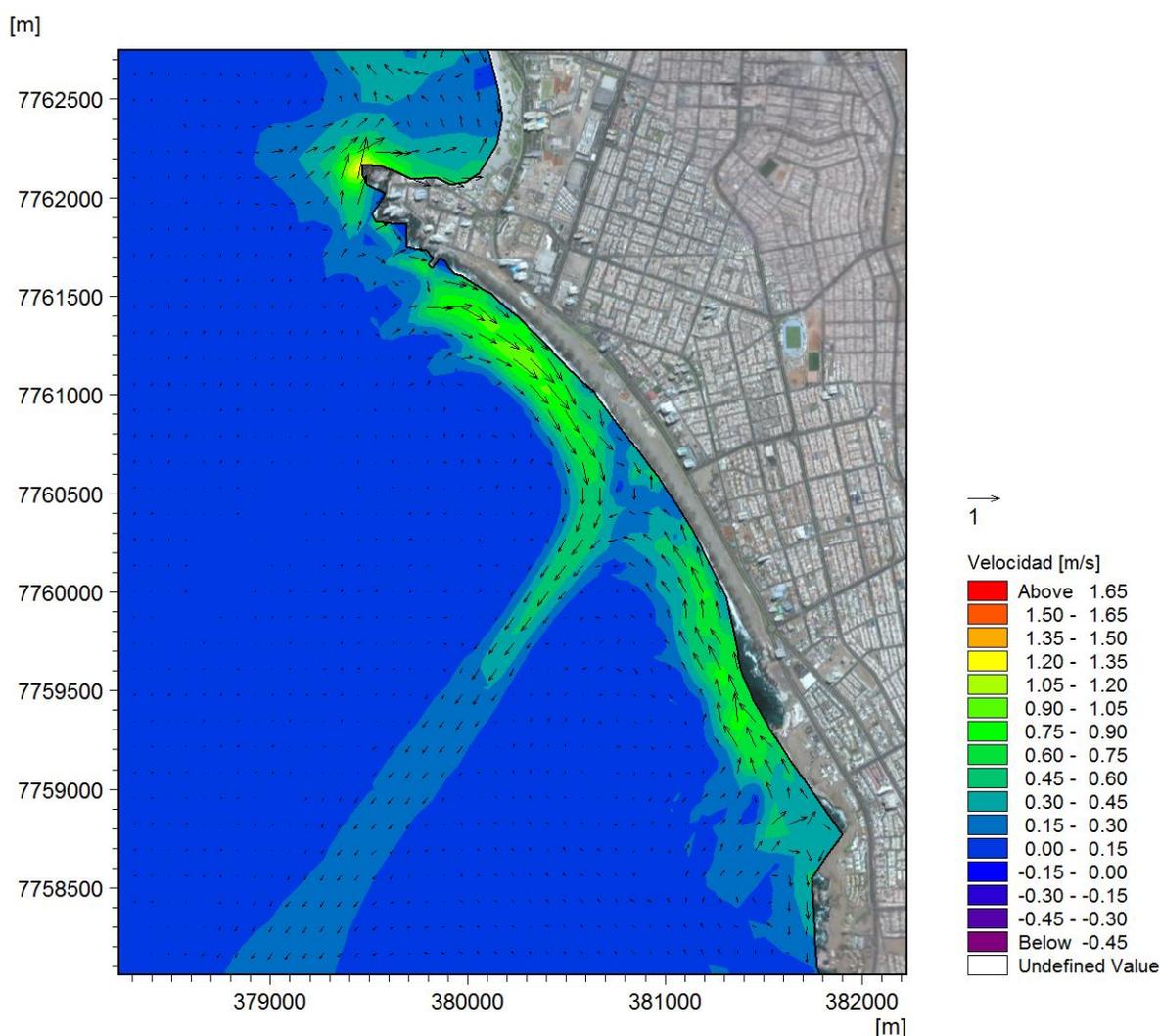
A lo largo de la costa en los primeros metros se denota el gradiente de altura de oleaje, debido a la rotura existente en el lugar.



**Figura 5-90: Simulación de Hs [m]. Periodo de tormenta, playa Brava.**  
Fuente: Elaboración propia.

### 5.9.2 SIMULACIÓN DE TORMENTA, RESULTADOS CORRIENTES

Con los tensores de radiación obtenidos en el módulo SW (acápito 5.9.1), se procedió a simular las corrientes producidas por el periodo de tormenta, originando las máximas corrientes en la zona norte de la playa, las cuales coinciden con las roturas de oleaje en el mismo sector. La Figura 5-91 muestra el resultado de la simulación de corrientes.



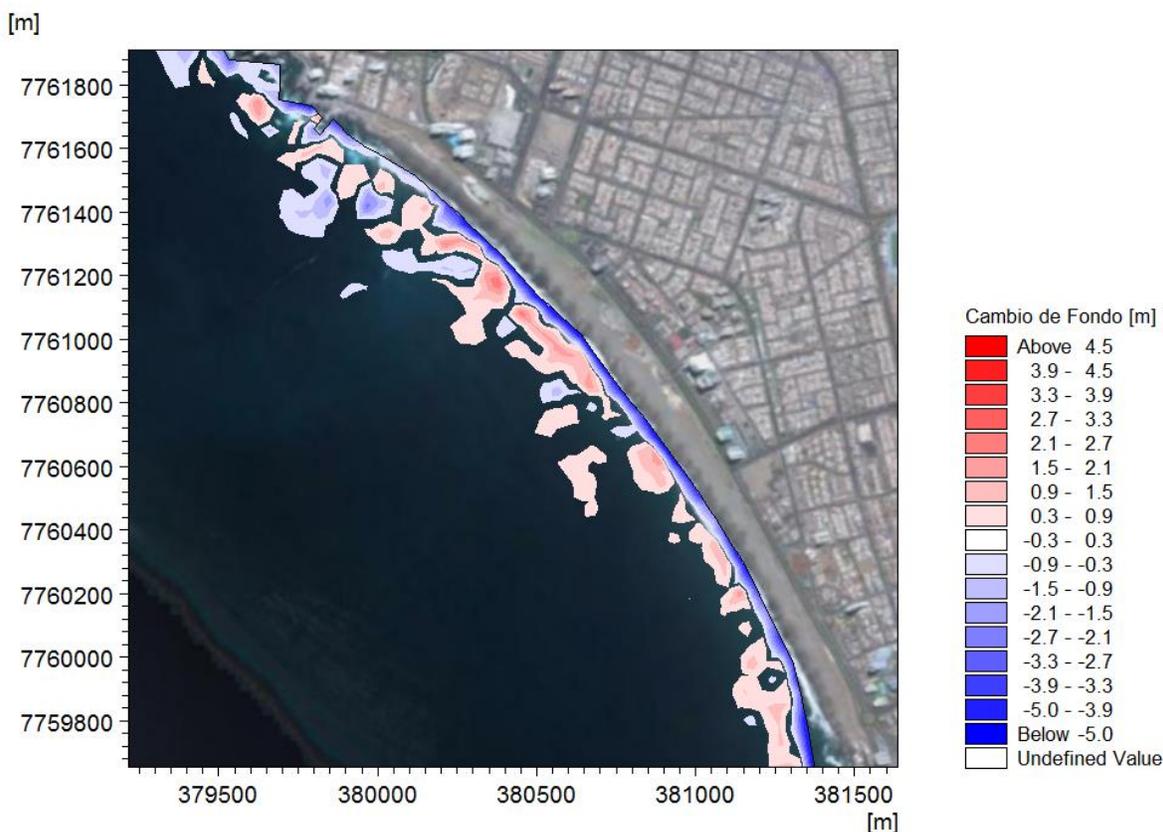
**Figura 5-91: Simulación de corrientes en peak de tormenta, Playa Brava.**  
Fuente: Elaboración propia.

Del análisis de la Figura 5-91 se advierte que hay un sistema de corrientes litorales establecido a lo largo de la costa, la cual en el norte tienen dirección hacia el sur paralela a la costa mientras que en el sector sur de la playa tienen sentido contrario, y al encontrarse en el sector medio de la playa éstas se encuentran y escapan hacia mar de un modo prácticamente paralelo a la costa.

### 5.9.3 MODELACIÓN DE RESPUESTA TRANSVERSAL DE LA PLAYA

La respuesta de la playa corresponde a la variación del fondo, la cual se estimó con el software MIKE 21 ST, con los mismos parámetros utilizados en el análisis de los 22 años de datos. Este cálculo se realizó de acuerdo a la formulación de continuidad de sedimento (sección 4.3).

En la Figura 5-92 se muestra el mapa del resultado de la variación final del modelo, donde se observan las zonas de acreción (color rojo) y erosión (color azul).

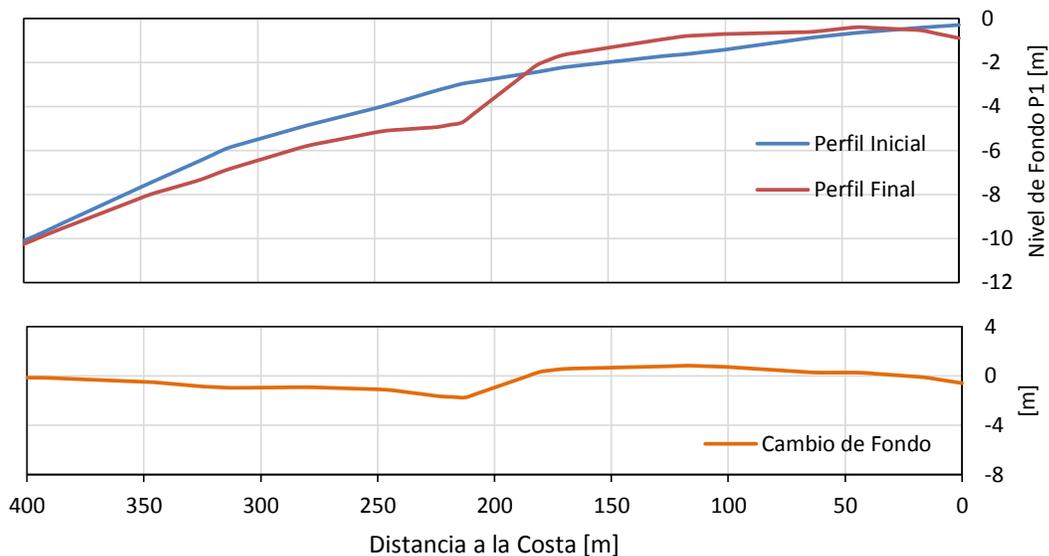


**Figura 5-92: Simulación de cambio total de fondo, Playa Brava.**  
**Fuente: Elaboración propia.**

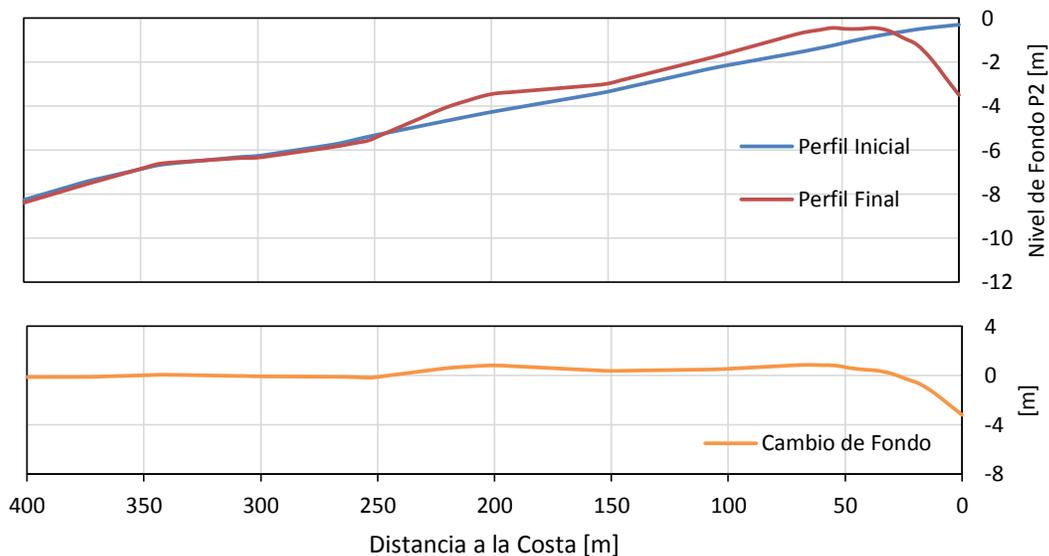
En general, desde la zona centro al sur de la playa, se producen áreas de erosión cercanas a la línea de costa, debido a la rotura del oleaje. Mientras que en el sector norte la rotura ocurre en las zonas más profundas, generando zonas de erosión más alejadas de la costa.

Para analizar cuantitativamente la variación del fondo de la playa después de la tormenta simulada, es necesario trazar perfiles paralelos, de modo de hacer un análisis cuantitativo. Los perfiles analizados son los descritos en la Figura 5-76.

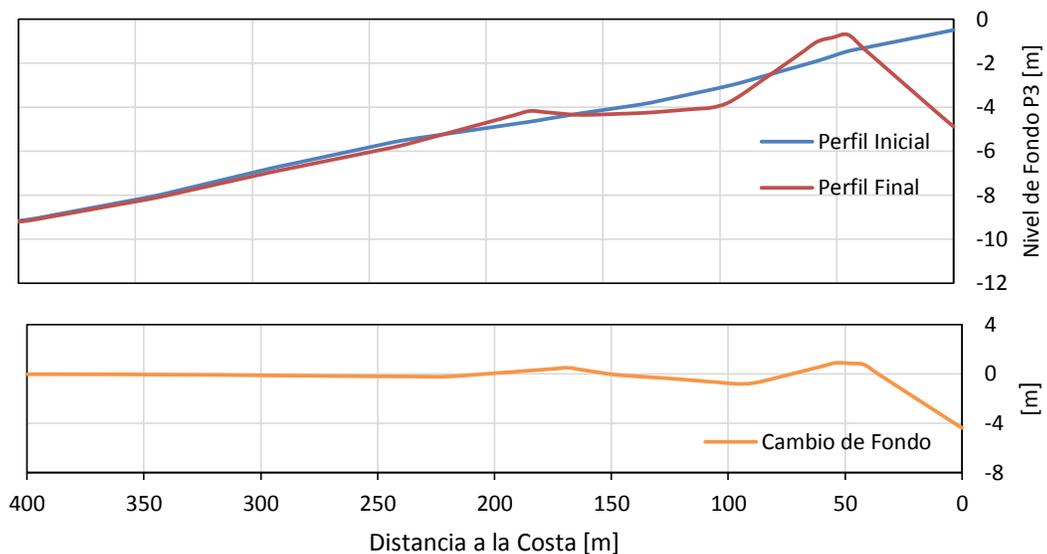
De la Figura 5-93 a la Figura 5-103, se muestra el resultado de las modelaciones de los 11 perfiles analizados.



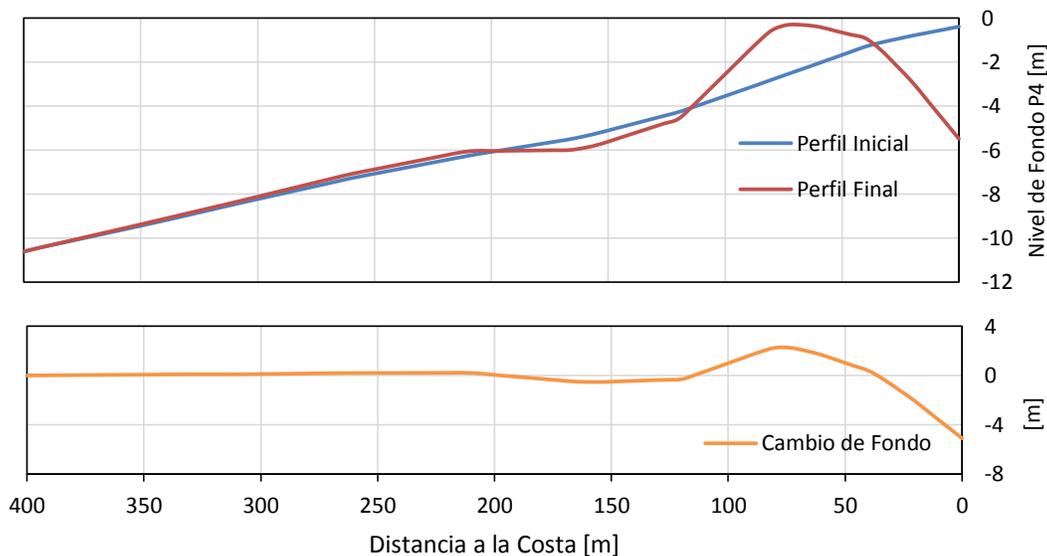
**Figura 5-93: Perfil 1.**  
Fuente: Elaboración propia.



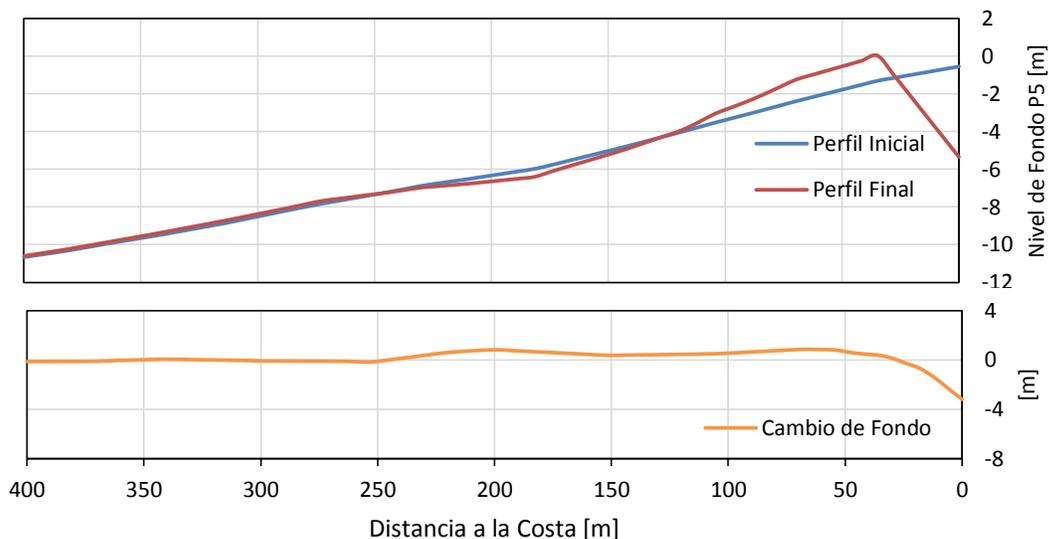
**Figura 5-94: Perfil 2.**  
Fuente: Elaboración propia.



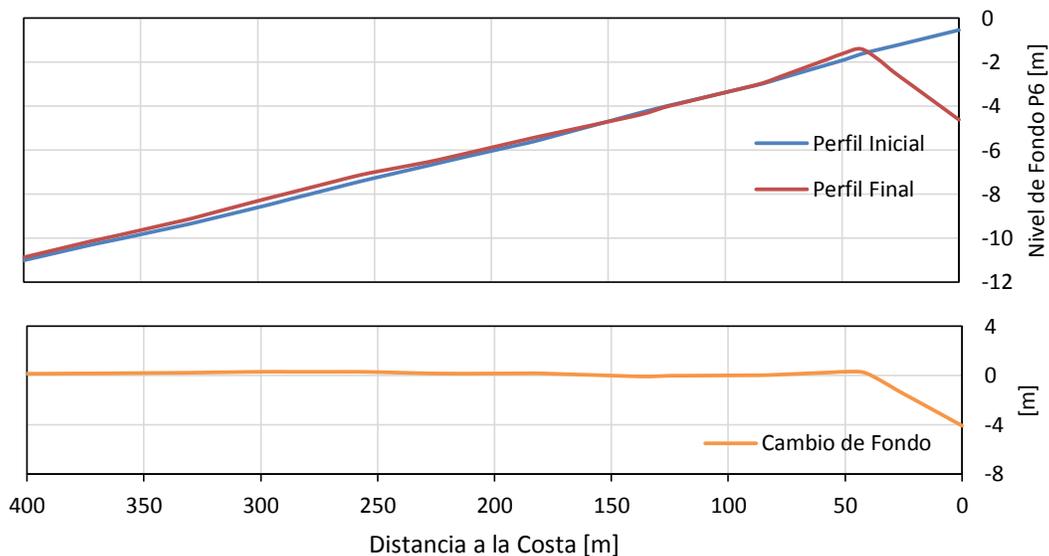
**Figura 5-95: Perfil 3.**  
Fuente: Elaboración propia.



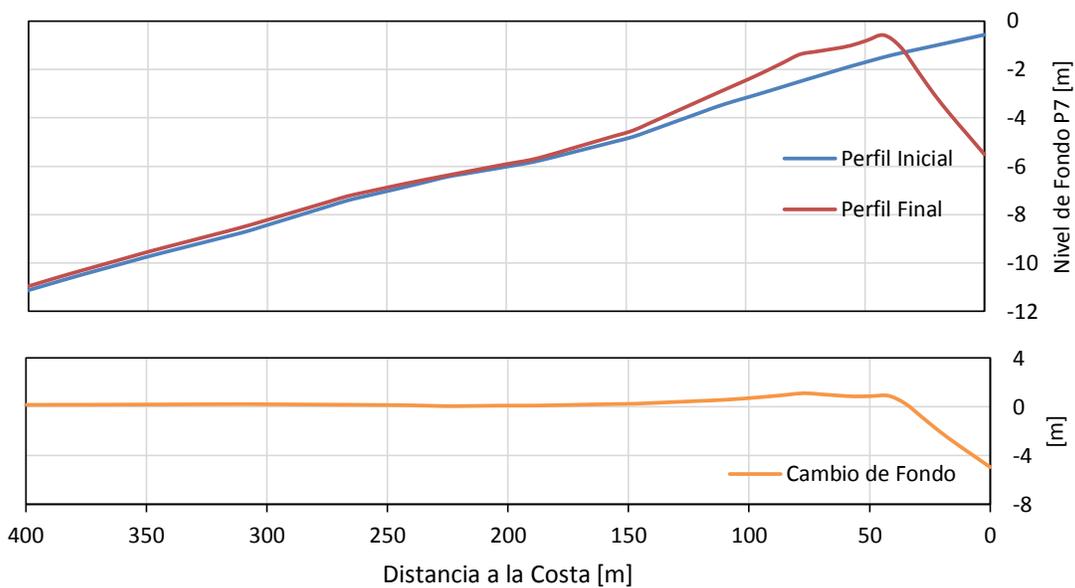
**Figura 5-96: Perfil 4.**  
Fuente: Elaboración propia.



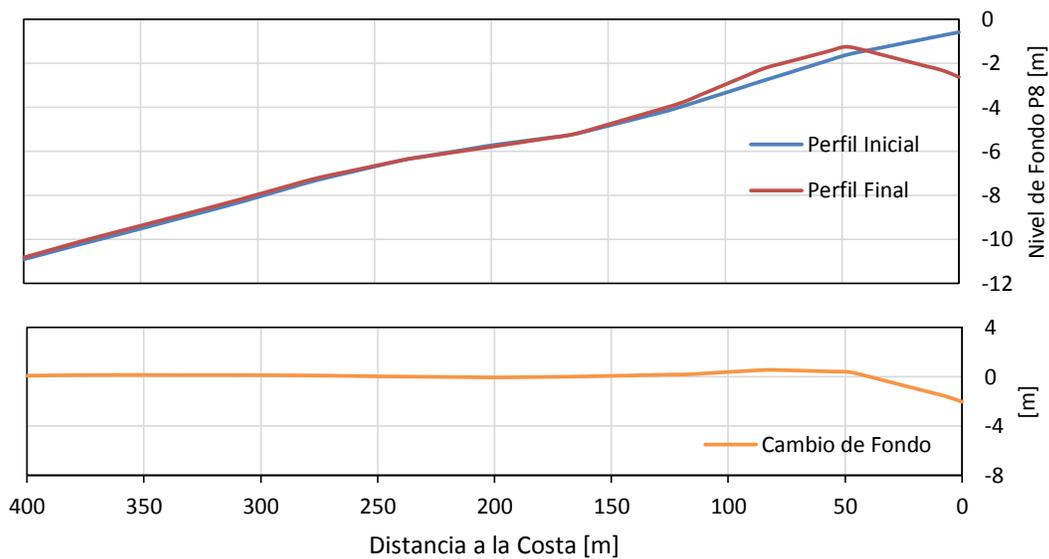
**Figura 5-97: Perfil 5.**  
Fuente: Elaboración propia.



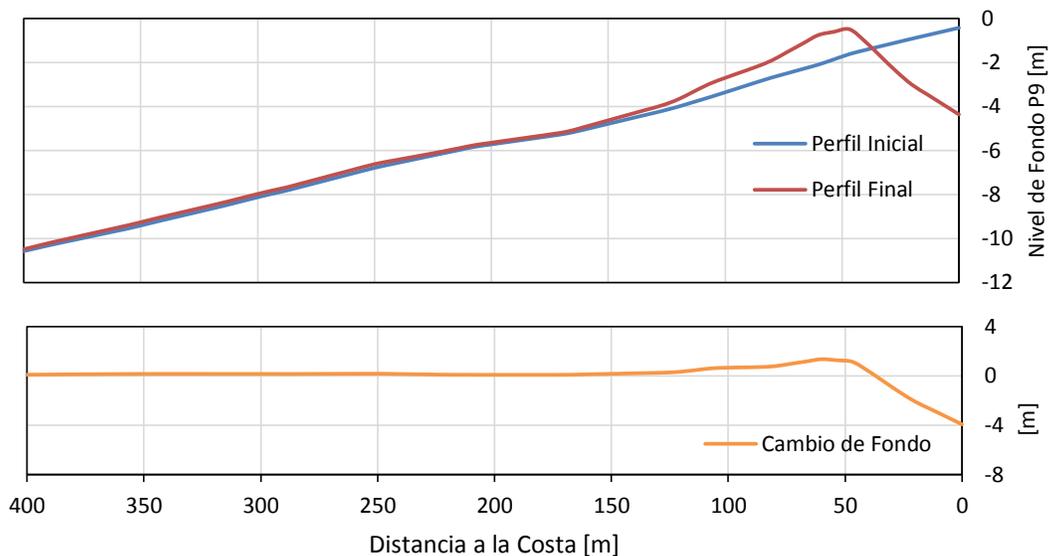
**Figura 5-98: Perfil 6.**  
Fuente: Elaboración propia.



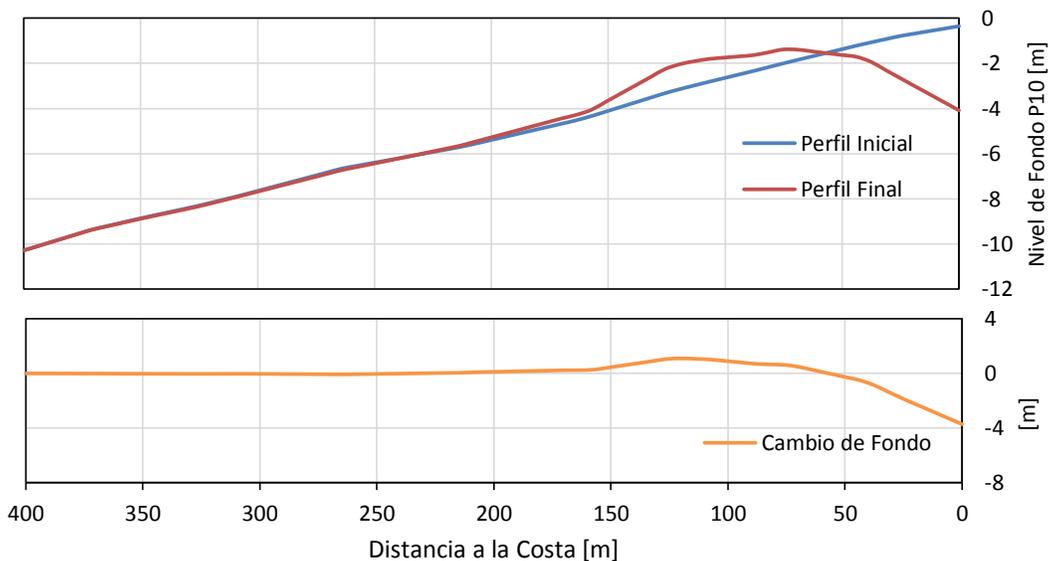
**Figura 5-99: Perfil 7.**  
Fuente: Elaboración propia.



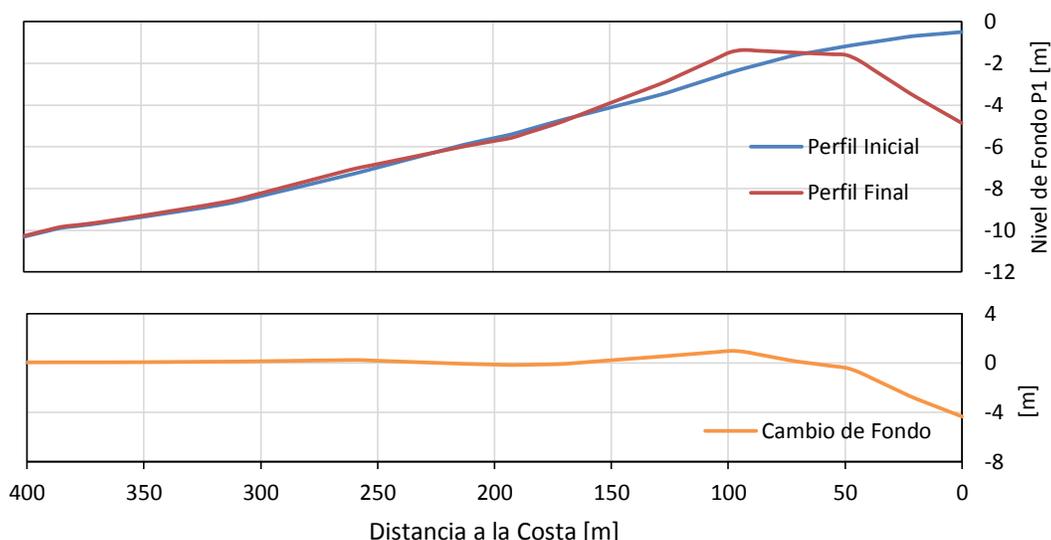
**Figura 5-100: Perfil 8.**  
Fuente: Elaboración propia.



**Figura 5-101: Perfil 9.**  
**Fuente: Elaboración propia.**



**Figura 5-102: Perfil 10.**  
**Fuente: Elaboración propia.**



**Figura 5-103: Perfil 11.**  
**Fuente: Elaboración propia.**

Al analizar los perfiles, se puede deducir que existe un cambio en la línea de costa, debido a la erosión provocada por la tormenta. El perfil 1 es el menos afectado al nivel de línea de costa, mientras que desde el perfil 2 al 11, se puede inferir que la rotura del oleaje afecta desde los 25 [m] hacia mar adentro. A partir de este punto existen zonas de acumulación de arenas, las cuales van disminuyendo hasta encontrar un sitio sin cambio en el fondo (app. a los 200 [m]). Con lo anterior se demuestra que con la simulación de la tormenta se obtiene el perfil típico de temporada de invierno.

Las diferencias de volúmenes de acreción y erosión obtenidos se muestran en la Tabla 5-37, en la que se aprecia que los volúmenes totales tienen una baja diferencia entre sí, lo que sugiere que las arenas movidas desde un sitio a otro, no generan pérdidas ni ganancias de sedimento.

Volúmenes [m <sup>3</sup> ]		
Perfiles	Acreción	Erosión
T1	20829.8	27662.9
T2	12634.4	19542.2
T3	13705.1	25938.2
T4	23561.2	22194.3
T5	15787.7	17104.0
T6	22585.3	18109.5
T7	22007.9	13617.2
T8	18319.2	12852.4
T9	19945.7	18244.8
T10	15750.5	24210.0
Total	185126.8	199475.6

**Tabla 5-37: Calculo de volúmenes.**  
**Fuente: Elaboración propia.**

## **6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **6.1 RESPECTO DE LA CARACTERIZACIÓN DEL MEDIO**

Para el nodo de trabajo el oleaje medio en Playa Brava tiene los parámetros más representativos provenientes principalmente del 3° cuadrante, con alturas promedios de 1.25 [m] y periodos de 13 [s].

La base de datos desde aguas profundas, al igual que el nodo de trabajo, tiene una predominancia del 3° cuadrante, con una altura promedio de 1.5 [m] y 13 [s].

Las corrientes litorales presentes en Playa Brava van de sur a norte, de manera que en la zona norte se generan corrientes hacia el sur. Fuera de la zona de rompiente en mayores profundidades, las corrientes no tienen un patrón claro en las direcciones mientras que, las magnitudes tienen una media de 7 [cm/s] según las mediciones.

Respecto a la caracterización de los sedimentos, la playa se subdividió en tres sectores, a saber, seco, intermedio y sumergido. En ella se pudo observar que los diámetros en el sector seco son gruesos y que al avanzar a la zona sumergida el grano va disminuyendo en tamaños. En la zona seca el promedio va desde los 0.19 a los 0.50 [mm] y en la zona sumergida desde los 0.18 a 0.31 [mm]. Para la realización del análisis morfodinámica se utilizaron los datos de la zona sumergida.

En cuanto a las validaciones de los modelos numéricos tanto de oleaje como de corrientes. Ambas demostraron diferentes resultados. El modelo de oleaje mostró un ajuste similar respecto al patrón de olas medidas del ADCP. Las direcciones tienen un patrón semejante. El modelo de corrientes mostró magnitudes similares a las corrientes medidas insitu. Las direcciones no obstante difieren debido a las forzantes ingresadas al modelo, las cuales fueron marea y oleaje.

### **6.2 RESPECTO DEL ESTUDIO DE MORFOLOGIA.**

Se realizó una caracterización de la morfología de la zona de estudio, a través de una técnica de modelación numérica de oleaje, corrientes y transporte de sedimentos. De esta forma se analizaron las características que presentó el clima del oleaje el nodo de trabajo. En base a la data histórica se escogieron los casos que presentaron mayor frecuencia entre los años 1985 a 2006, simulando la hidrodinámica y el transporte de sedimento, para cada caso.

En base a los casos estudiados, se analizó el potencial del transporte de sedimentos, identificándose las zonas en que los resultados sugieren el cambio de la línea de costa, como también la existencia de zonas de equilibrio morfodinámico. De esta forma se presenció que en algunos sectores existen retrocesos en la línea de costa, debido a un cambio del potencial de transporte longitudinal.

Posteriormente se describió las formas de la línea de costa de Playa Brava para los años 2005, 2007, 2011, 2013 y 2016, las cuales muestran una baja variación a lo largo de la playa, evidenciando que la zona no sufre variaciones en su forma ni posición a lo largo de esta, lo que evidencia que la playa se encuentra en su equilibrio.

Con lo anterior, los modelos representan no en su totalidad la dinámica de la playa, pero si muestran una buena similitud en los resultados generales en comparación al estado de la línea de playa. Se observó en las simulaciones que Playa Brava posee transportes potenciales de sedimentos a lo largo de ésta, destacando que las mayores magnitudes se encuentran en los sectores donde no se encuentran disponibles en abundancia (sectores de roqueríos en los extremos norte y sur), apuntando a que la playa es alimentada en los extremos, situación que se contrasta con la realidad. Con lo anterior, se deduce que el transporte real no es reflejado por los resultados de la ponderación total. En resumen, se concluye que en el sector de estudio no existe un sistema dinámico de sedimentos muy activo, sugiriendo un equilibrio de ésta, lo que se puede afirmar con la comparación de las líneas de costas de distintos años de la playa.

En cuanto al análisis de la respuesta ante una tormenta, desde la zona centro al sur de la playa, se produce áreas de erosión cercana a la línea de costa, debido a la rotura del oleaje, mientras que en el sector norte la rotura ocurre en las zonas más profundas, generando zonas de erosión más alejadas de la costa.

### **6.3 RECOMENDACIONES GENERALES**

En el presente proyecto se utilizaron supuestos que permitieron el desarrollo, realización y alcance de los objetivos tanto generales como específicos planteados inicialmente. En base a las metodologías realizadas y resultados obtenidos, se recomienda lo siguiente:

1. Trabajar el análisis de oleaje con datos provenientes de aguas profundas, idealmente con información espectral de un hindcasting de larga data (desde 20 años), para obtener los campos de oleaje en el área completa y simular los efectos 2D en el área completa del sitio de estudio.
2. Realizar una campaña de medición de vientos y mareas en el sector de Playa Brava, un ejemplo de campañas de este tipo son descritas por White (1998), con la finalidad de obtener una mejor validación de la herramienta o una metodología más cercana a la realidad.
3. Realizar dos campañas de medición (verano – Invierno) tanto para oleaje y corrientes, para obtener una mejor caracterización de la zona de estudio en todo periodo del año.
4. Se aconseja efectuar una medición de transporte de sedimentos en la zona norte, central y sur de la playa. Así también obtener muestras de sedimentos en el fondo en áreas de aguas someras, para los periodos de verano e invierno.

5. Realizar mediciones topo- batimétricas de la playa para ambos periodos estivales, con la finalidad de complementar el estudio de análisis de cambios en la playa entre las estaciones del año.
6. Para un futuro estudio se propone realizar una propuesta de diseño de diques, para solucionar la problemática propuesta en la introducción del informe, con la finalidad de hacer apta para el baño toda la extensión de la playa.
7. Las caracterizaciones obtenidas en esta presente memoria se pueden utilizar como base para un nuevo diseño de mejora de uso en playas largas.
8. Utilizar modelos de oleaje que resuelvan la fase, para así considerar la evaluación de éstos y disminuir el error en la dirección.

Este proyecto de título podría ser considerado como una de las escasas aplicaciones de modelos de hidrodinámica en playas largas costeras en Chile.

## **7 BIBLIOGRAFÍA**

- Arce Diego. (2014). Caracterización en terreno y por modelación numérica de la hidrodinámica del estuario del río Maule, Chile. Santiago: Universidad de Chile.
- Baird & Associates S.A. (2010). *Construcción Rompeolas para Habilitar Playa Brava para el Baño, Iquique. Informe Etapa I*. Santiago.
- Battjes, J. A. (1994). *Shallow water wave modelling*. Proceedings of the International Symposium on Waves-Physical and Numerical Modelling, Vol.I, pp.1-23.
- Berkhoff, J. (1976). *Mathematical models for simple harmonic linear water waves; wave refraction and diffraction*. PhD thesis, Delft Technical University of Technology.
- Berkhoff, J. W. (1972). *Computation of combined refraction and diffraction*. Proceedings of the 13th International Coastal Engineering Conference, ASCE, 471-490.
- Bolaños, R. (2004). *Tormentas de oleaje en el Mediterraneo: Física y Predicción*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Silvar, R. (2005). *Análisis y descripción estadística del oleaje*. Serie Docencia ISBN 970-32-0710-3, Instituto de Ingeniería UNAM ISBN 970-32-2813-5.
- Dalrymple., R. G. (1984). *Water wave mechanics for engineers and scientists*. Prentice Hall, Inc.
- DHI (2014). *MIKE21 Toolbox, Global Tide Model-Tidal prediction*.
- DHI (s.f.). <http://www.mikebydhi.es/>. Recuperado el 5 de mayo de 2013, de <http://www.mikebydhi.es/Products/CoastAndSea/MIKE21/Waves.aspx>
- Dirección de Obras Portuarias. (2010). *Construcción Rompeolas para Habilitar Playa Brava para el Baño Iquique, Informe Etapa H*. Santiago.
- Engineers, U. S. (1984). Shore Protection Manual. Volumen I and II.
- Foreman M. (1977). *Manual for Tidal Heights, Analysis and Prediction*. Institute of Oceans Sciences.
- Frigaard, Z. L. (2001). *Generation and Analysis of Random Waves*. Instituttet for Vand, Jord og Miljøteknik- Aalborg Universitet.
- GIOC. (2000a). *Documento de Referencia V1 - Dinámicas*. España: Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas, Universidad de Cantabria.
- Geomar (2010). *Informe Técnico de Olas, Playa Brava - Iquique*. Viña del Mar.
- González, E. (1995). *Morfología de playas en equilibrio: Planta y Perfil*. Santander, España.: Universidad de Cantabria.
- Guisado, E., Malvárez, G., & Navas., F. (2010). *Los modelos de propagación de oleaje, simulación morfodinámica y las TIG*. Sevilla: Universidad de Sevilla. Pp.861-872. ISBN: 978-84-472-1294-1.
- Holthuijsen, L. H. (2007). *Waves in Oceanic and Coastal Waters*. NEW YORK: Delft University of Technology and UNESCO -IHE - Cambridge UNIVERSITY PRESS The Edinburgh building, Cambridge CB2 8RU, UK.

- IDEAM. (2010). Instituto de Hidrología, Meteorología y estudios ambientales. Estudio sobre la Determinación de las Componentes Armónicas de la Marea y descripción de su comportamiento en diferentes puntos de las costas Colombianas. Bogotá. Obtenido de: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/23877/Caracteristicas+Mareas.pdf/f300280f-2cc6-4a21-99e5-9f6aa9237a74>
- INE (Agosto de 2010). Anuario Anual . Obtenido de INE: [http://www.ine.cl/canales/chile\\_estadistico/estadisticas\\_economicas/turismo/infoanual/pdf\\_anuarios/turismo03.pdf](http://www.ine.cl/canales/chile_estadistico/estadisticas_economicas/turismo/infoanual/pdf_anuarios/turismo03.pdf).
- Iñigo J. Losada, P. L. (2000b). Modelos Matemáticos y Numéricos para el Estudio de la Agitación Portuaria. Cantabria: Universidad de Cantabria.
- Kamphuis J. William. (2000). Introduction To Coastal Engineering and Management. Canada.: World Scientific.
- Kinsman, B. (1965). Wind Waves, Their generation and propagation on the ocean surface. Toronto: Englewood Cliffs, N.J : Prentice-Hall, ISBN 0-486-49511-6.
- Komar, P. (1976). Beach Processes and Sedimentation. New Jersey
- Larsen J., P. M. (1987). An Efficient Finite- Difference Approach to the Mild-Slope Equation. Amsterdam- Printed in the Netherlands: Coastal Engineering, 11 329.251 Elsevier Science Publishers B.V.
- López Gutierrez, J. S. (2004). Analisis de sensibilidad de observaciones visuales de oleaje en zonas de escasez de datos instrumentales. Madrid: Tesis Doctoral, Tomo I. Universidad Politecnica de Madrid; E.T.S. Ingenieros de caminos, canales y puertos.
- Martínez Antonio . (2005). Diputación de Almería . Obtenido de [http://www.dipalme.org/Servicios/Anexos/anexosiea.nsf/VAnexos/IEA-ALA-c12/\\$File/ALA-c12.pdf](http://www.dipalme.org/Servicios/Anexos/anexosiea.nsf/VAnexos/IEA-ALA-c12/$File/ALA-c12.pdf).
- Massel, S. (1996). Ocean Surface Waves: Their physics and Predictions. Advanced Series On Ocean Engineering, Volume 11 Edit. World Scientific, 491 pp.
- McCormick, M. (2007). Ocean Wave Energy Conversion. Mineola: Dover.
- Monbaliu, J. P.-H. (2000). The spectral wave model, WAM adapted for applications with high spatial resolution. Coastal Engineering, 41, pp. 41-62.
- Munk, W. (1951). Origin and Generation of Waves. First Conference on Coastal Engineering. Berkeley: University of California.
- Olivas, J. M. (2007). Manual de Costas. Madrid: Colegio de Ingenieros de caminos canales y puertos.
- Patricio Winckler Grez,. (2012). Non Linear Wave Theories. Department of Civil and Environmental Engineering, Cornell University.
- L. Philip.-F.Liu,. (2000). El modelado matematico de la propagacion del oleaje en ingenieria de costas. Cantabria- España: Ingeniería del Agua. Vol. 7 N°1 .
- Reyes, E. R. (1977). Climatología e Interacción Océano-Atmósfera en la Bahía de Valparaíso. Valparaíso: Rev. Biología Marina. Facultad de Ciencias del Mar. Universidad de Chile.

- Ris, R. (1997). Spectral modelling of wind waves in coastal areas. The Netherlands. 160 p.: (Ph.D. Dissertation Delft University of Technology, Department of Civil Engineering), Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering, Report No. 97-4, Delft University of Technology.
- Rosales. (2005). Transmisión del oleaje irregular en rompeolas superficiales permeables a talud. México D.F: Tesis de maestría en Ciencias, Instituto Politécnico nacional, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura U.Z.
- Roelvink, D., Reniers, A., (2011). A Guide to Modeling Coastal Morphology. Serie Advances in Coastal and Ocean Engineering, Volum 12. Edit. World Scientific, 292 pp.
- Ruessink, B.G, Wijnberg, K.M., Holman, R.A., Kuriyama, Y. and Van Enckevort, I.M.J., (2003). Intersite comparison of interannual nearshore bar behavior. Journal of Geophysical Research, 108: doi:10.1029/2002JC001505.
- Sepúlveda Ignacio. (2010). Simulación de turbinas hidráulicas para extracción de energía de mareas en modelos hidrodinámicos y aplicación en canal Chacao. Valparaíso: Universidad Técnica Federico Santa María.
- SHOA , Servicio hidrográfico y oceanográfico de la armada de Chile. (2002). Glosario de Mareas y Corrientes. Valparaíso.
- SHOA. (1992). Glosario de mareas y corrientes. Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile, Valparaíso.
- Svendsen, I. A. (2006). Introduction to Nearshore Hydrodynamics. Singapore: University of Delaware, USA. Advanced series on ocean Engineering - Volume 24 World Scientific publishing Co. Pte. Ltd.
- USACE. (2003). Coastal Engineering Manual. Volumen II, chapter 1. Volumen III, chapter 1,2 and 3.
- Vidal César. (s.f.). oceanicos-unalmed.edu.co. Obtenido de Modelos estadísticos de oleaje.: [http://www.oceanicos.unalmed.edu.co/cursos/ingCostas/pdf/lecturas/lectura\\_tema\\_2\\_2\\_estadisticaOleaje.pdf](http://www.oceanicos.unalmed.edu.co/cursos/ingCostas/pdf/lecturas/lectura_tema_2_2_estadisticaOleaje.pdf)
- Villaverde, M. (2009). Ingeniería Marítima y Costas. Madrid: Nautilus.
- White, T. E. (1998) Status of measurement techniques for coastal sediment transport. Coastal Engineering, Volumen 100 Issues 1-2, pág. 17-45.
- Wiegel, R. (1964). oceanographic Engineering, Prentice Hall, Englewood Cliffs.
- Winckler, P. (2009). Apuntes del curso Mecánica de olas (COI 414). Viña del Mar, Chile: Universidad de Valparaíso.
- Winckler, P. (2009). Apuntes del curso Mecánica de olas (COI 414). Viña del Mar: Universidad de Valparaíso.
- Winckler, P. (2012). Non Linear Wave Theories. Department of Civil and Environmental Engineering, Cornell University.
- Wright L.D, C. J. (1973). Variations in morphology of major river deltas as functions of ocean wave and river discharge regimes. . Am. Assoc. Petroleum Geologist Bull 57(2), 370-398.

Zurita, O. C. (2005). Análisis espacial y temporal de la dinámica de las corrientes en la bahía de Valparaíso. Santiago: Universidad Santiago de Chile.

## **8 ANEXOS**

**ANEXO A:**

Salidas gráficas modelo MIKE 21 SW

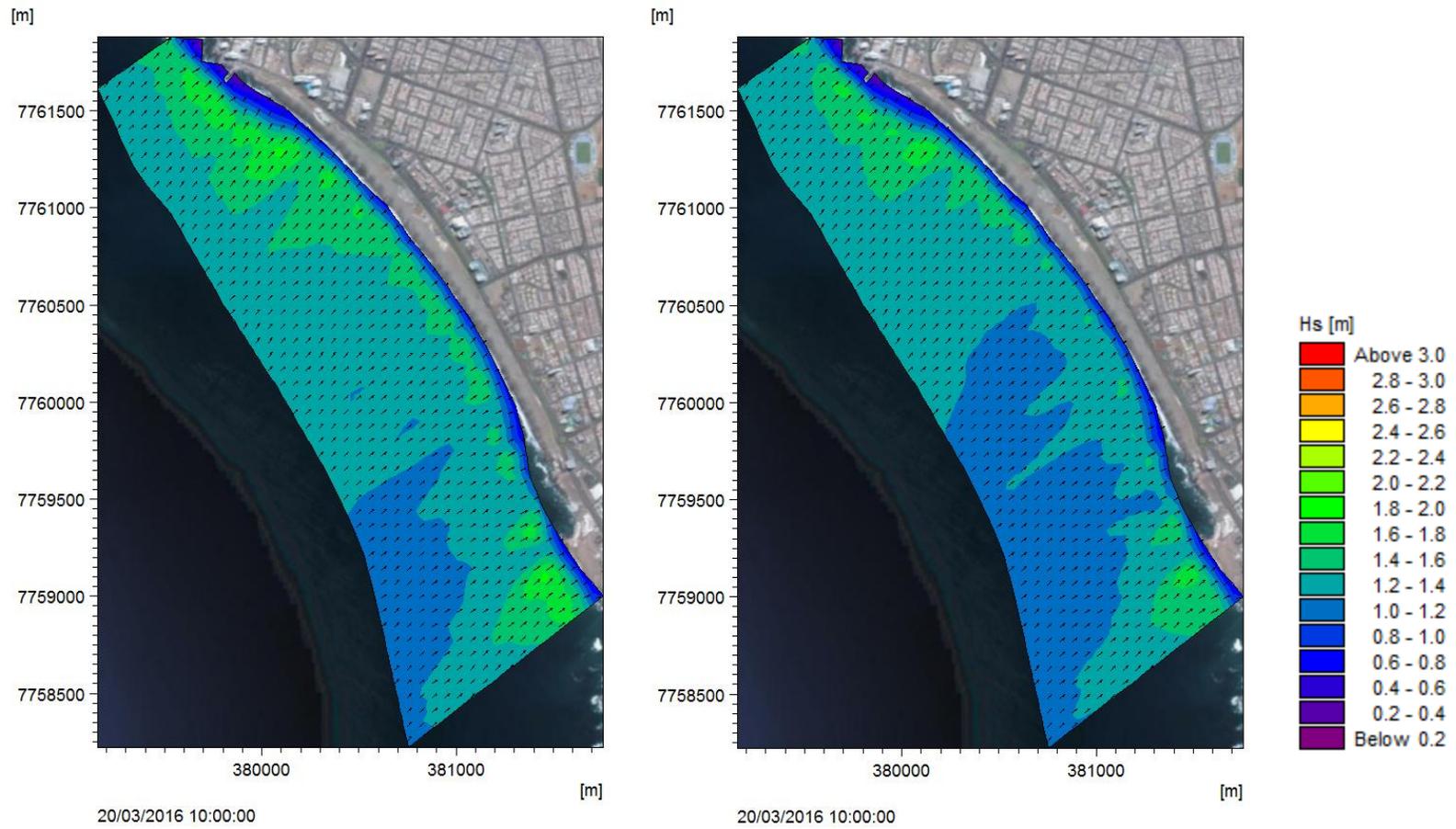


Figura 8-1: Modelación de Oleaje, Mike21 SW. Caso 1 (izquierda) y Caso 2 (derecha).

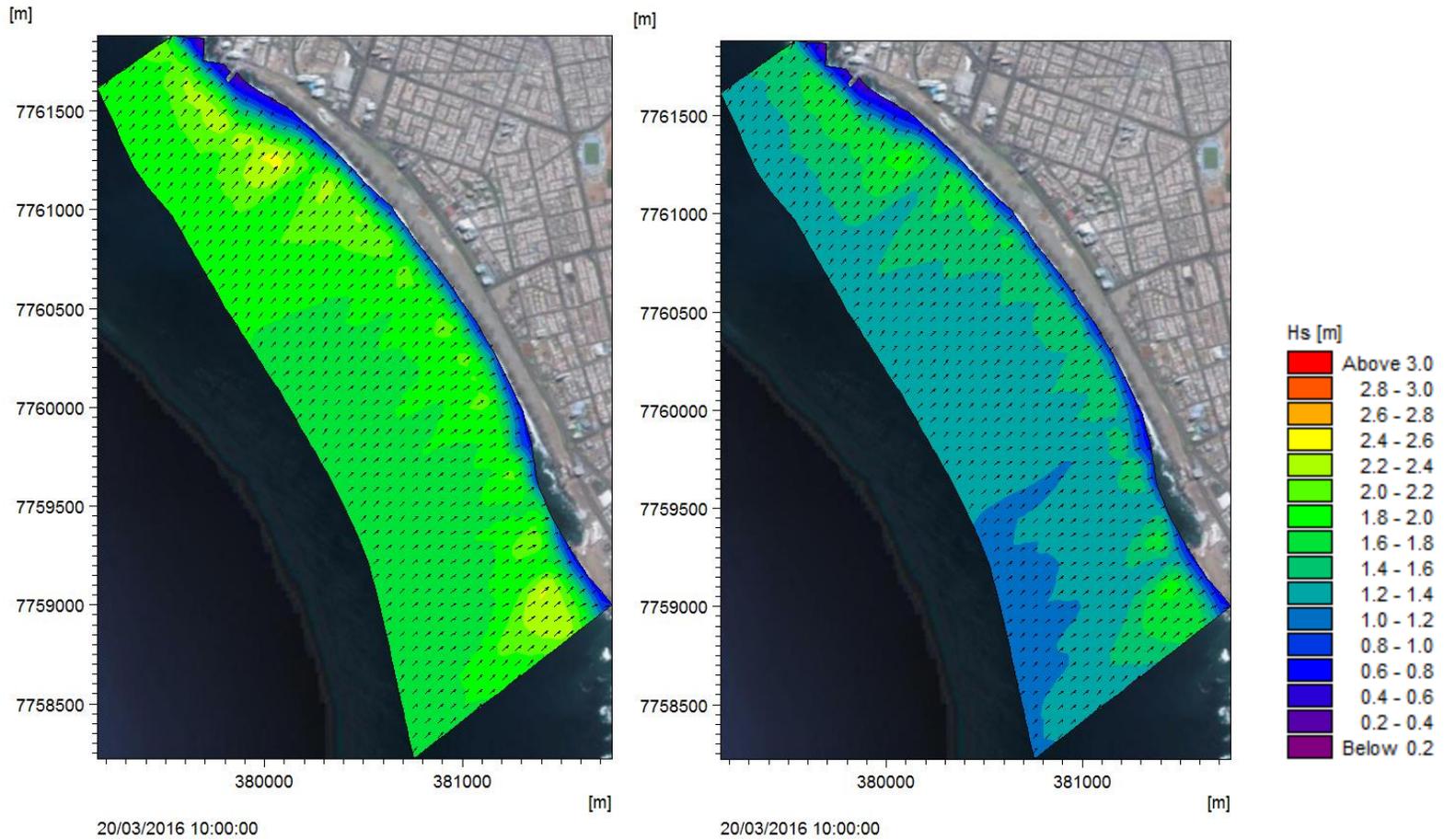


Figura 8-2: Modelación de Oleaje, Mike21 SW. Caso 3 (izquierda) y Caso 4 (derecha).

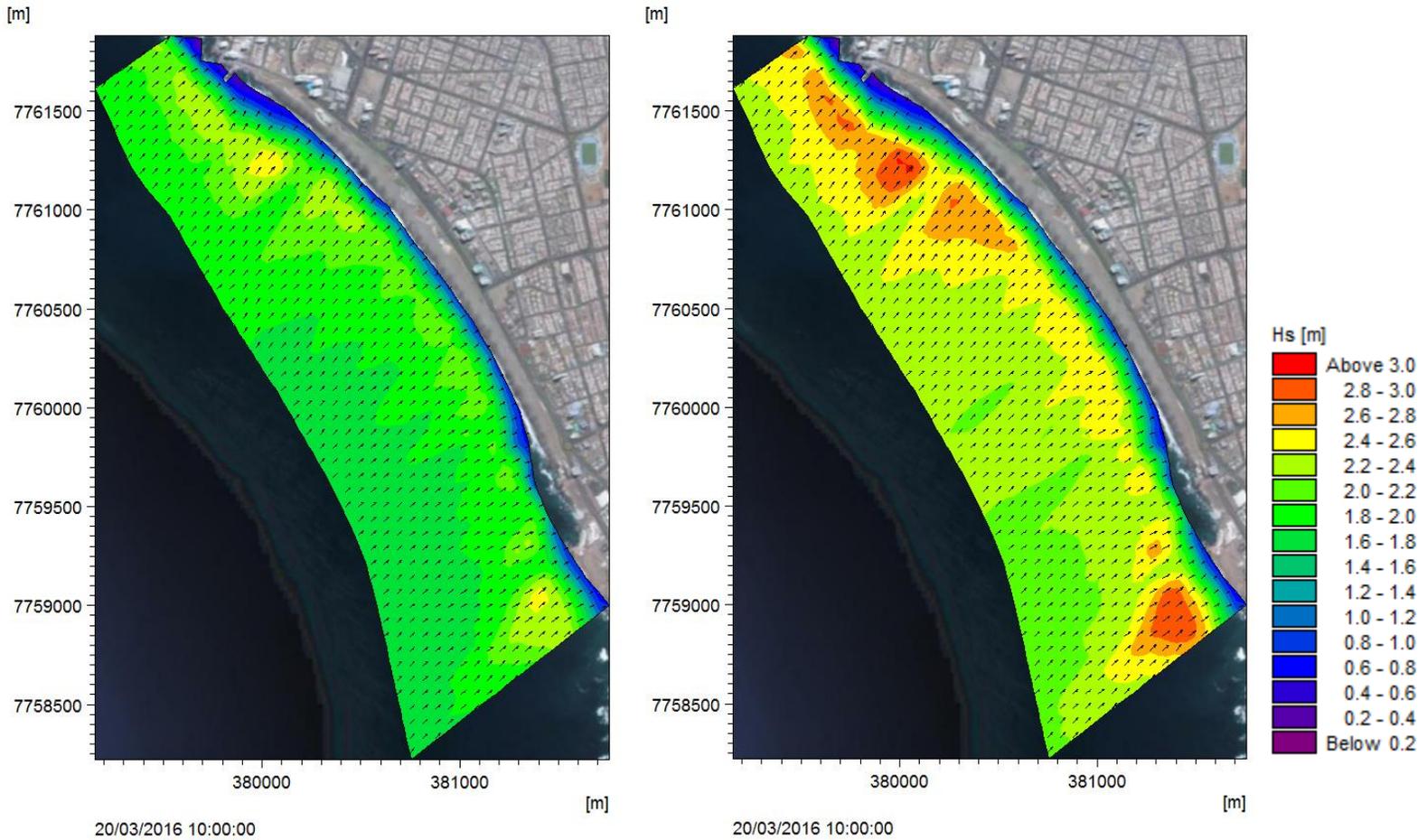
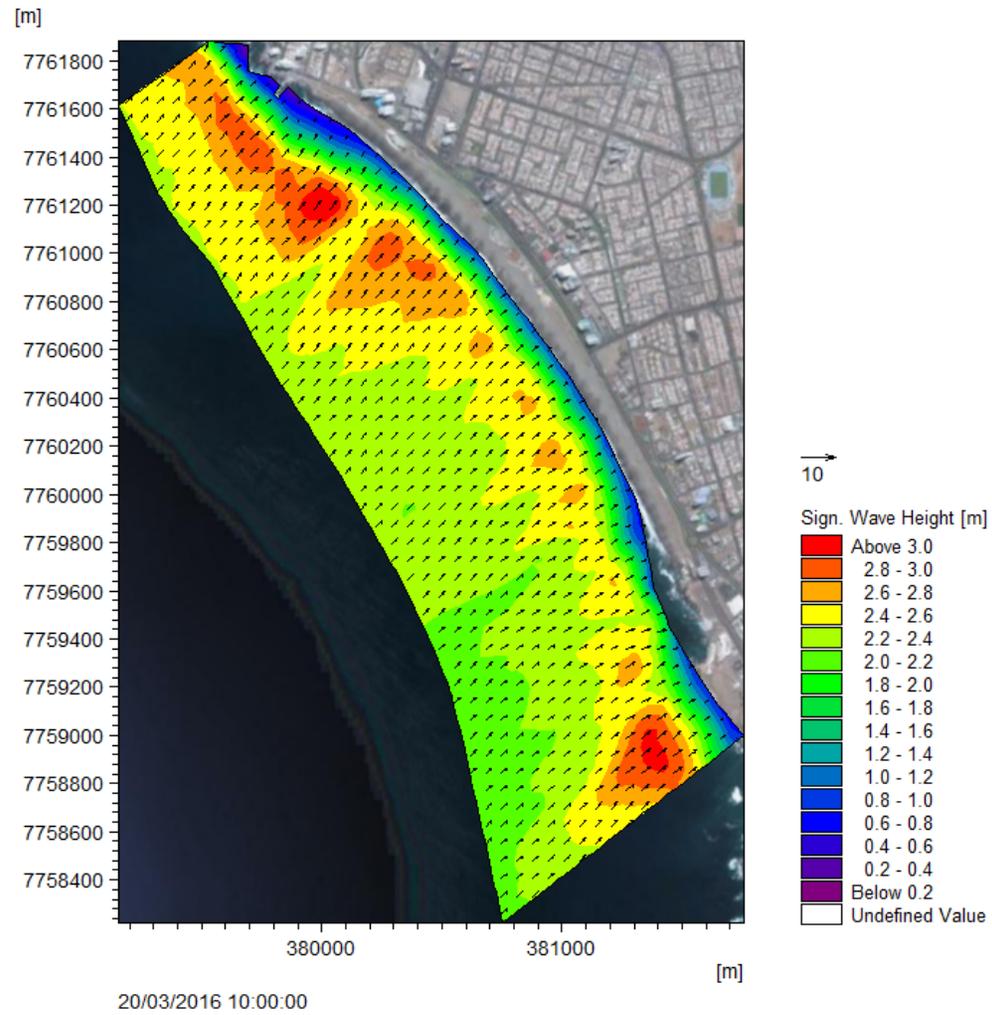


Figura 8-3: Modelación de Oleaje, Mike21 SW. Caso 5 (izquierda) y Caso 6 (derecha).



**Figura 8-4: Modelación de Oleaje, Mike21 SW. Caso 7.**

**ANEXO B:**

Salidas gráficas modelo Mike 21 HD.

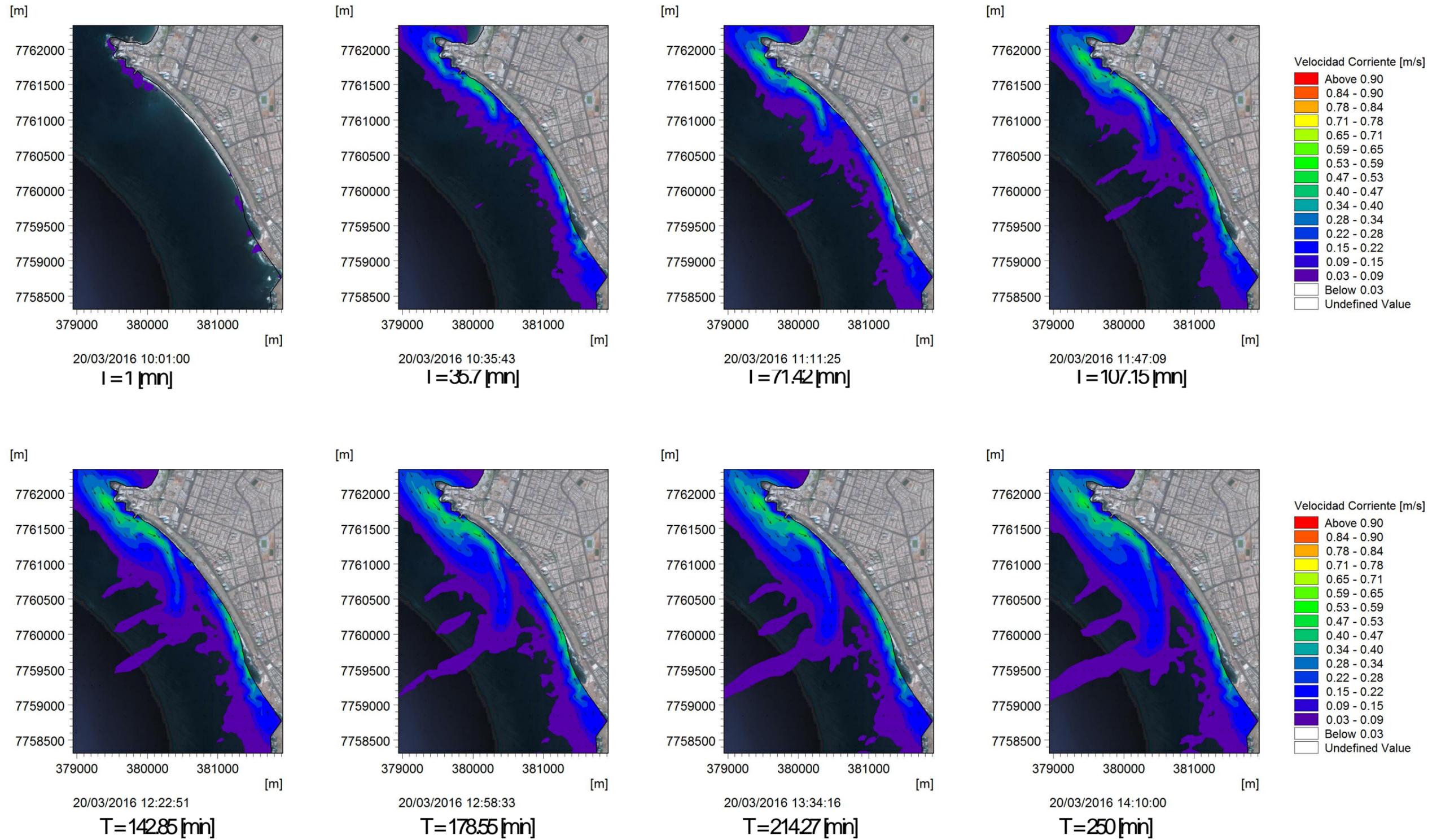


Figura 8-5: Salida gráfica por timesteps Mike 21 HD, Caso 1

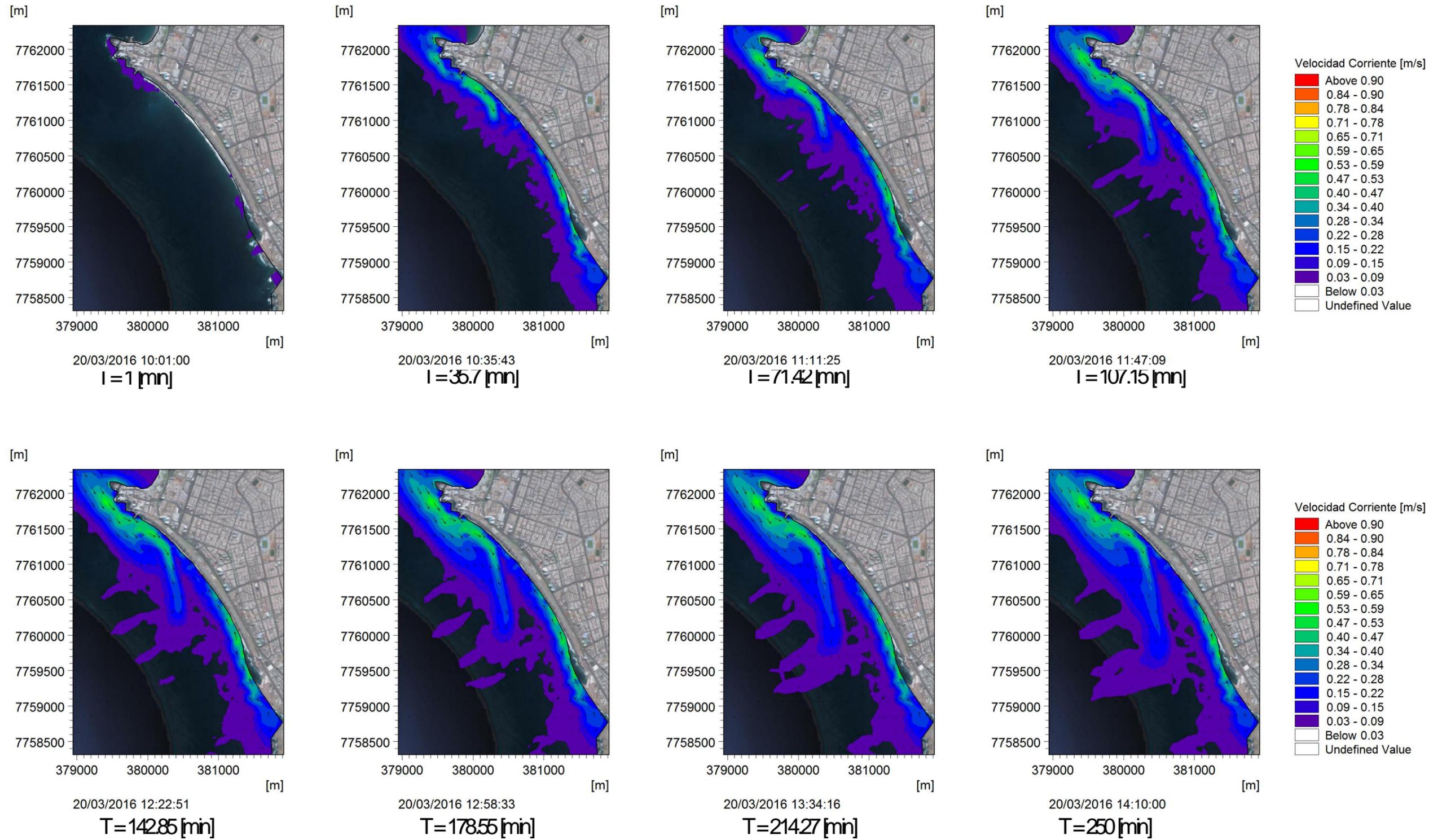


Figura 8-6: Salida gráfica por timesteps Mike 21 HD, Caso 2.

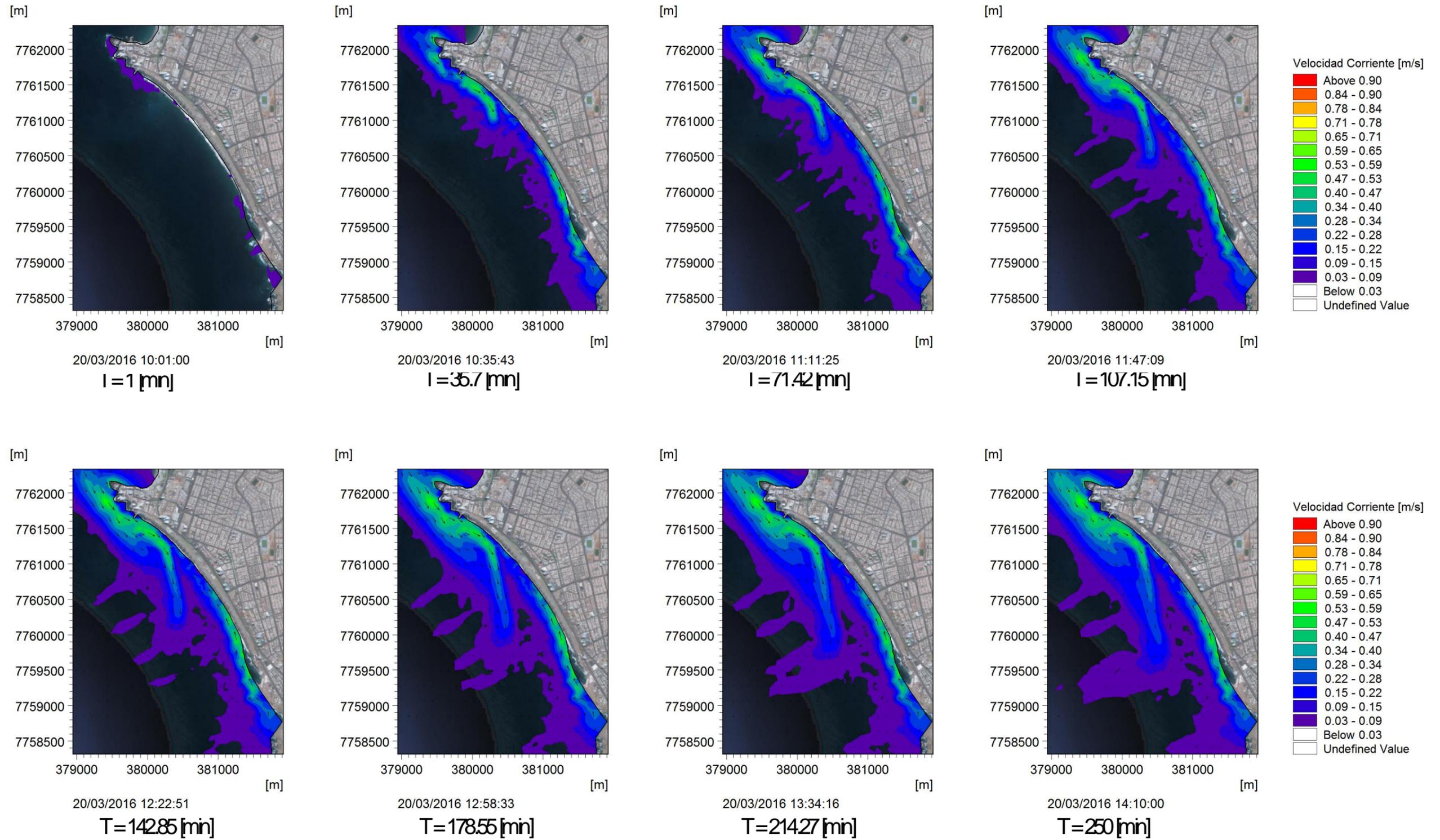


Figura 8-7: Salida gráfica por timesteps Mike 21 HD, Caso 3.

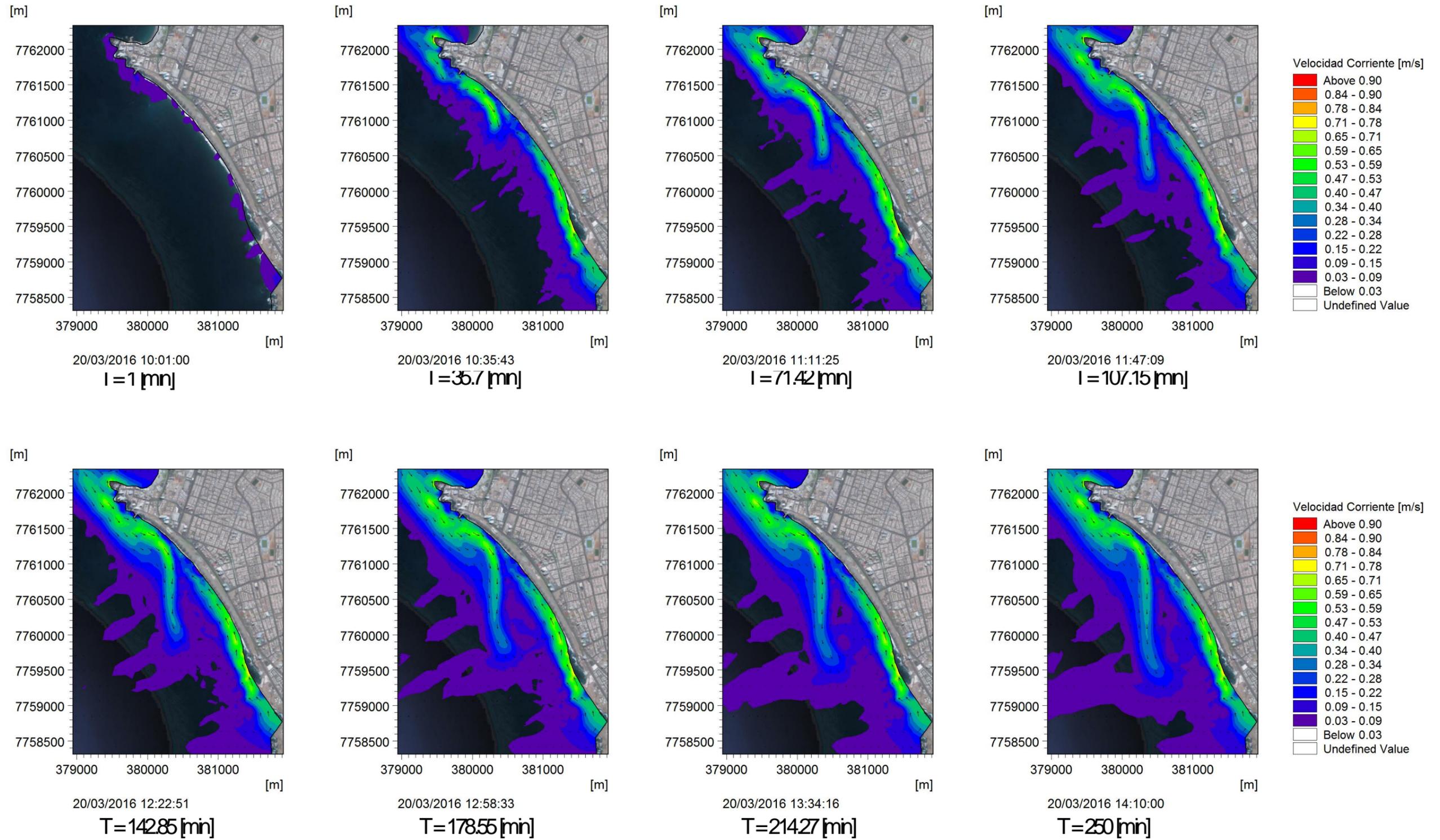


Figura 8-8: Salida gráfica por timesteps Mike 21 HD, Caso 4.

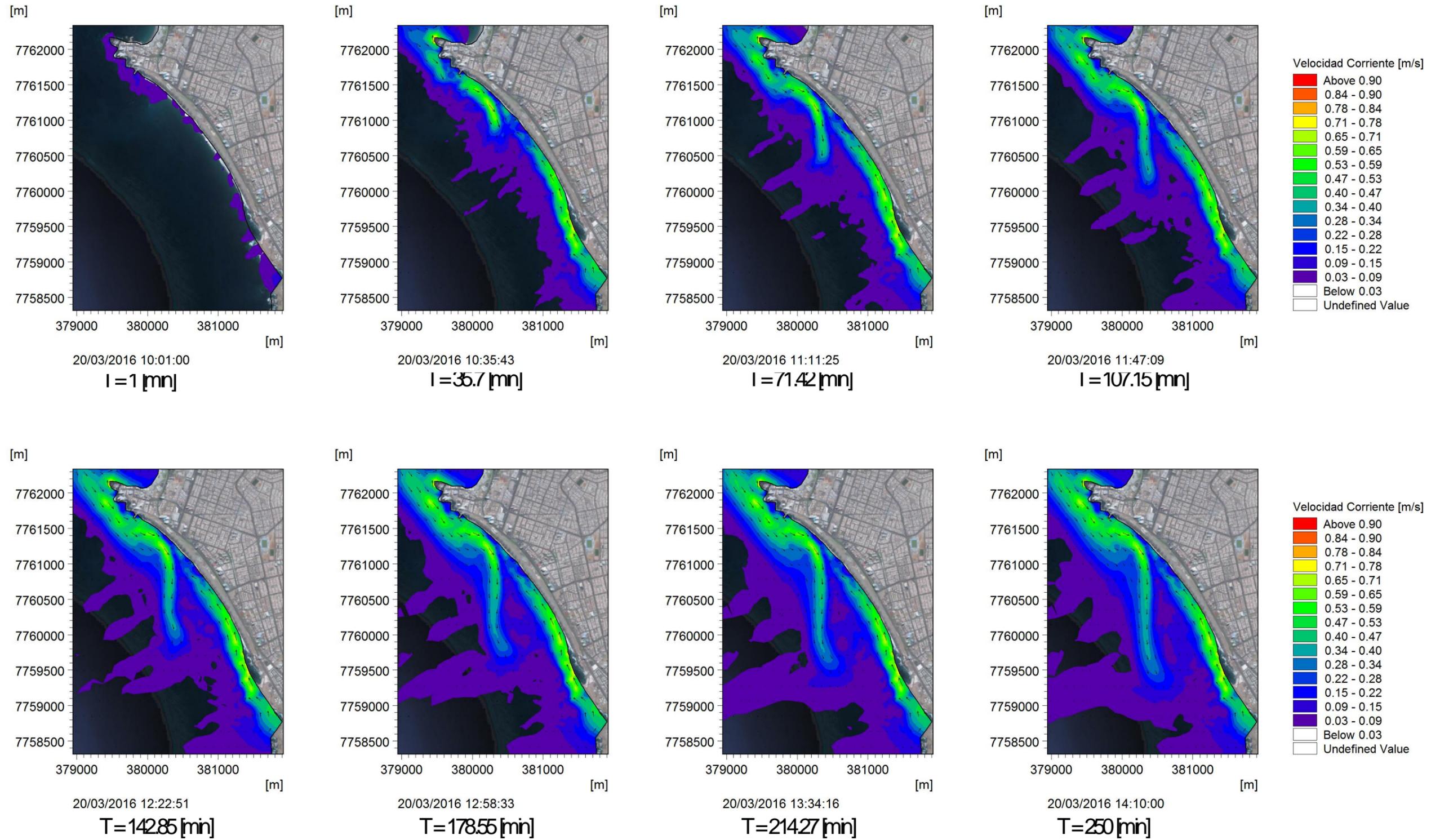


Figura 8-9: Salida gráfica por timesteps Mike 21 HD, Caso 5.

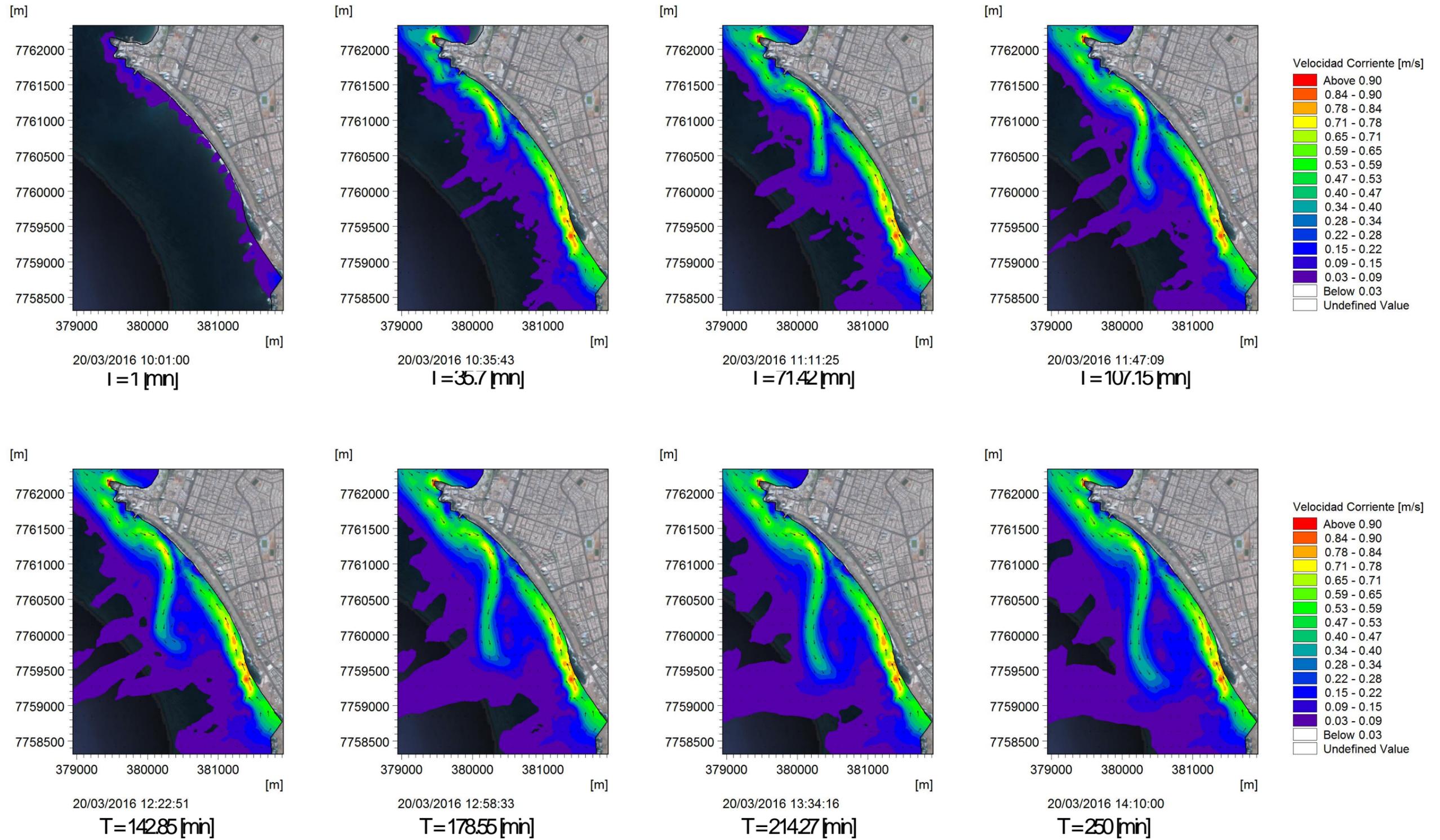


Figura 8-10: Salida gráfica por timesteps Mike 21 HD, Caso 6.

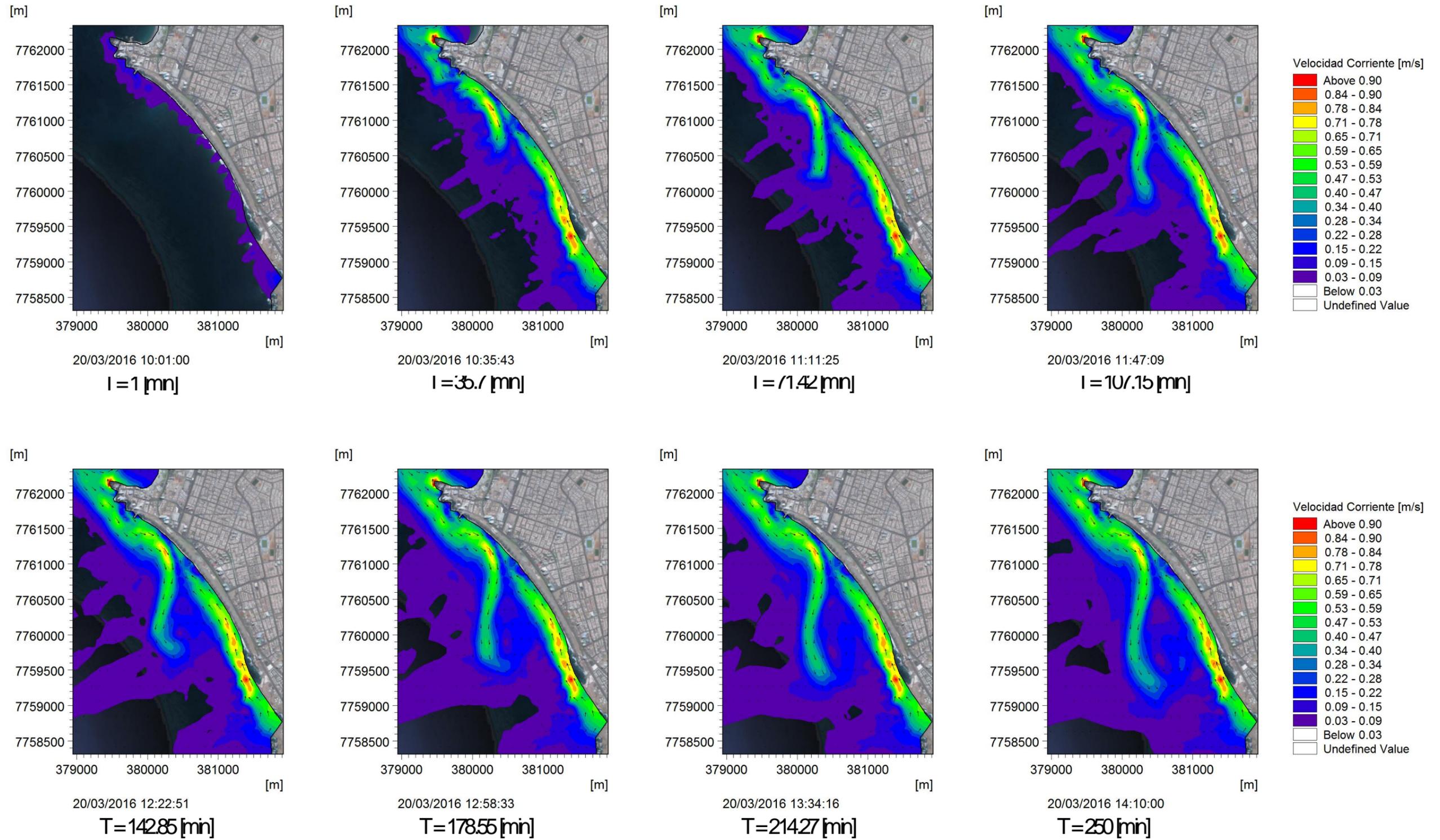


Figura 8-11: Salida gráfica por timesteps Mike 21 HD, Caso 7.

**ANEXO C:**

Salidas gráficas Modelo MIKE 21 ST.

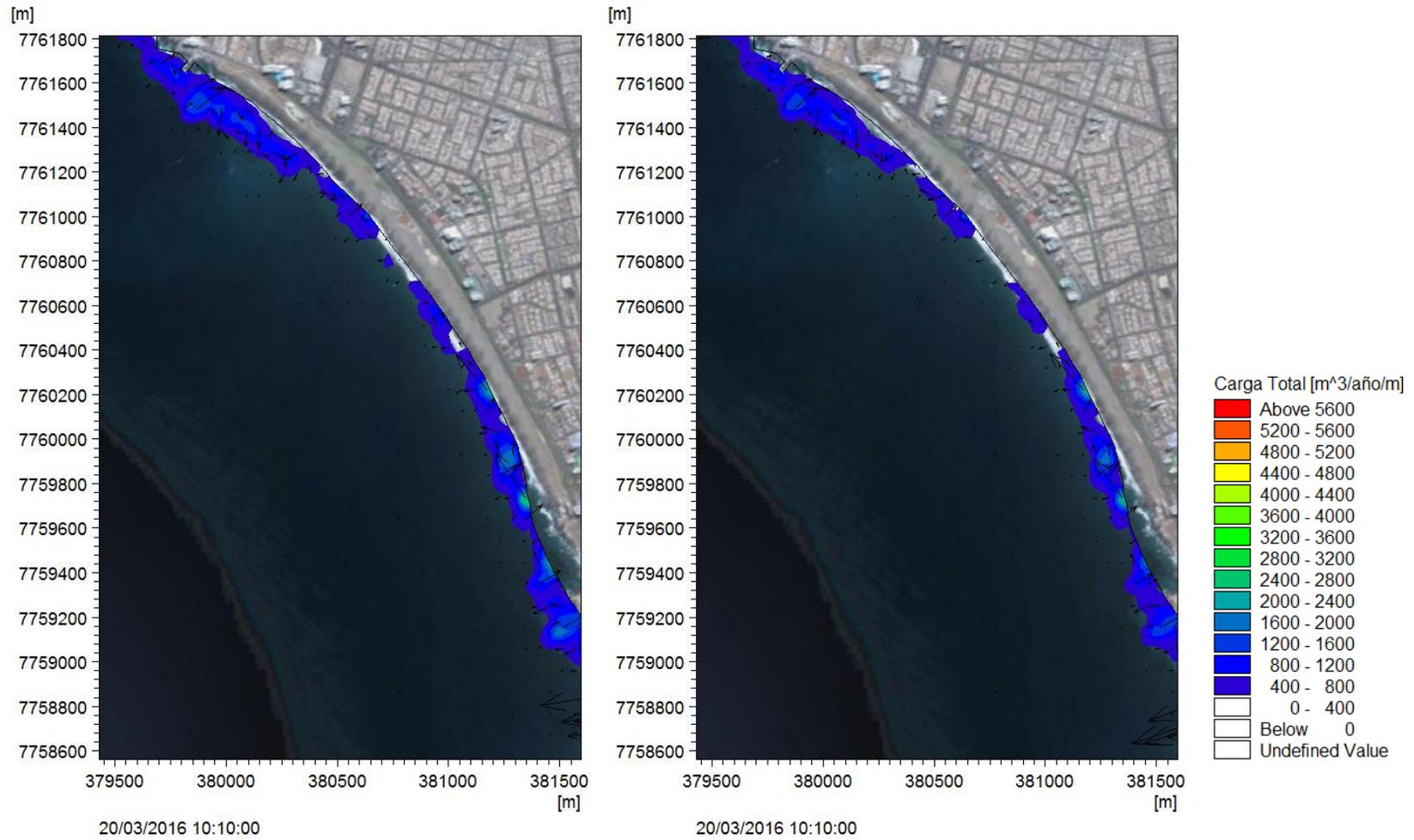


Figura 8-12: Simulación de transporte de sedimentos, caudal neto. Caso 1 (izquierda) y Caso 2 (derecha).

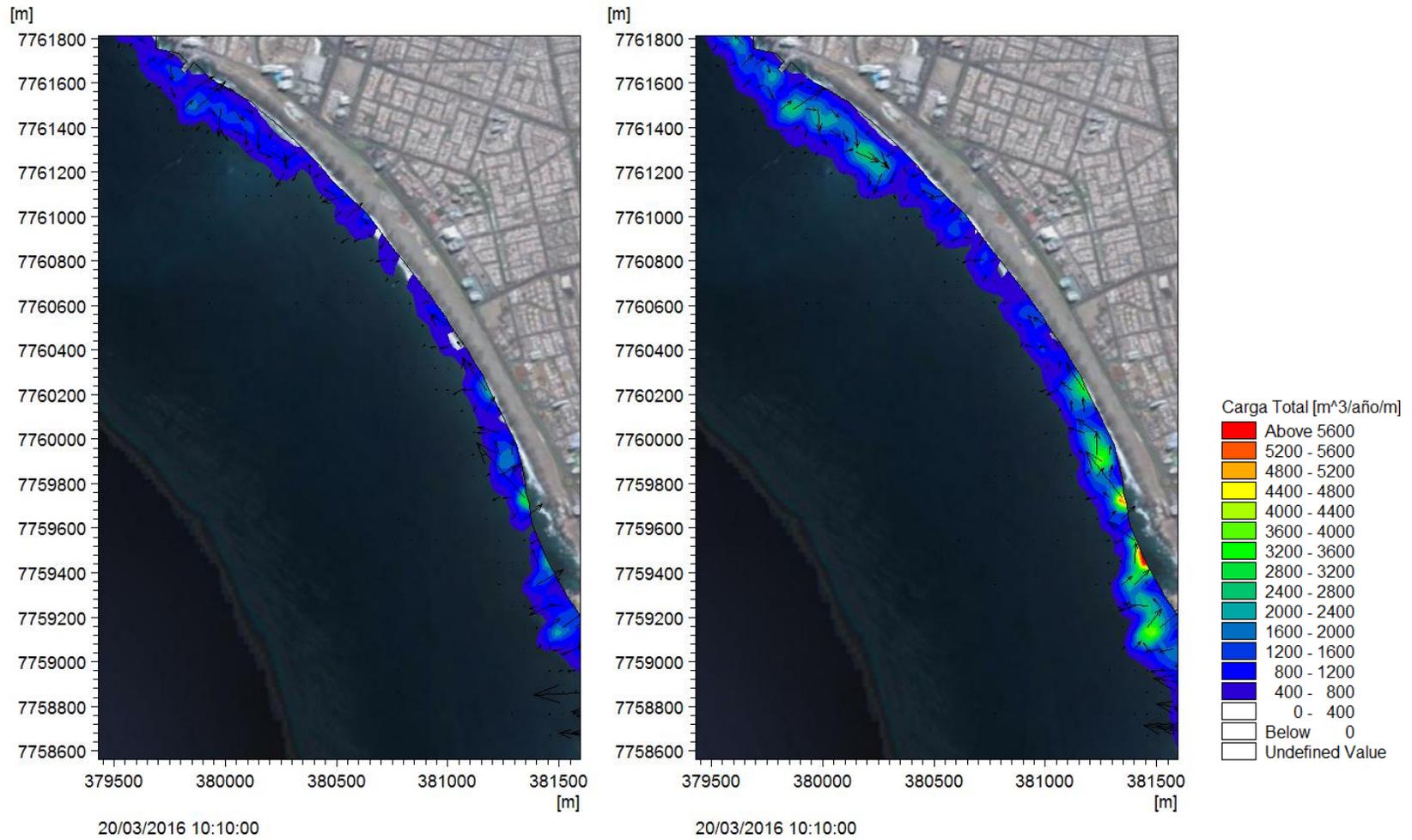


Figura 8-13: Simulación de transporte de sedimentos, caudal neto. Caso 3 (izquierda) y Caso 4 (derecha).

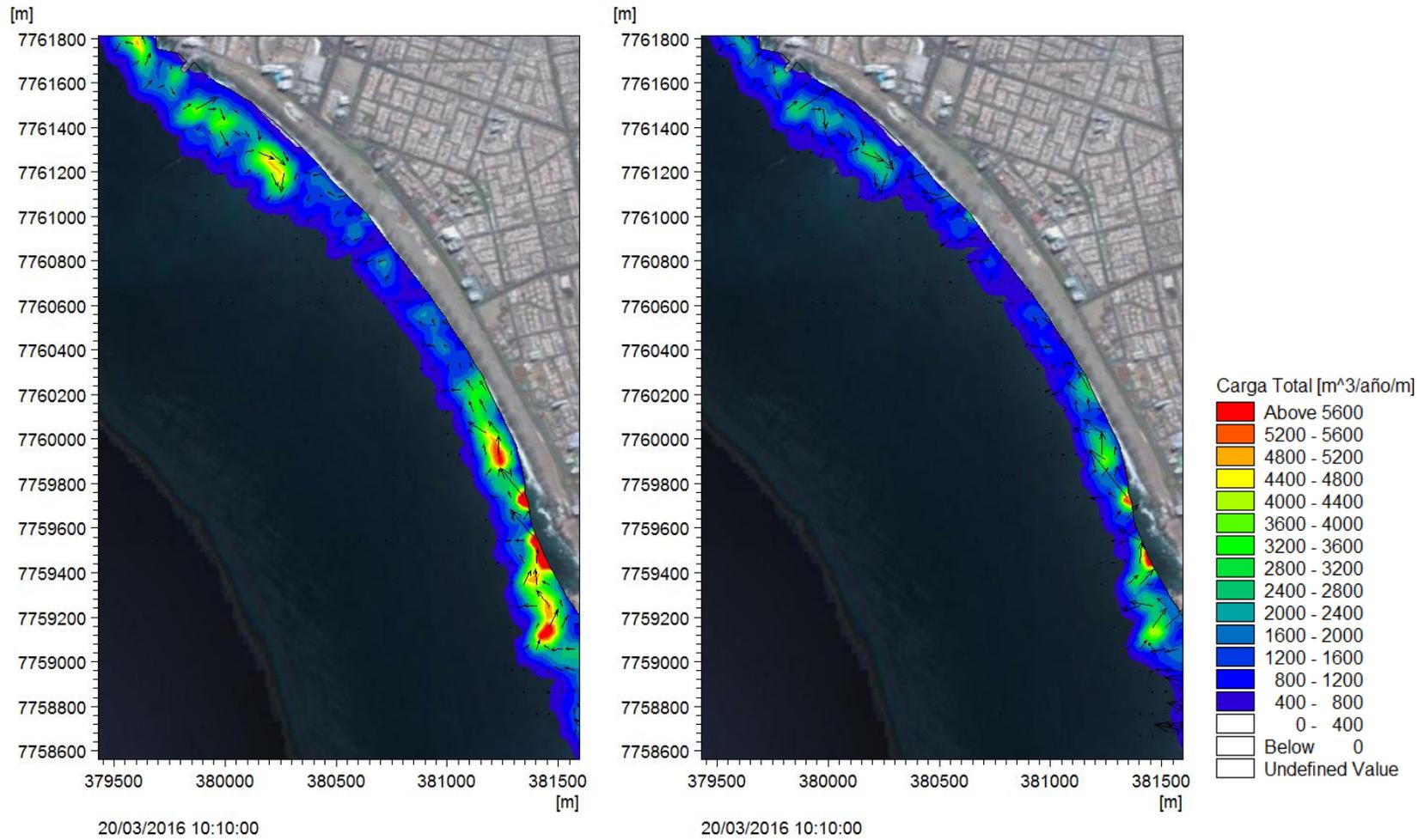


Figura 8-14: Simulación de transporte de sedimentos, caudal neto. Caso 5 (izquierda) y Caso 6 (derecha).

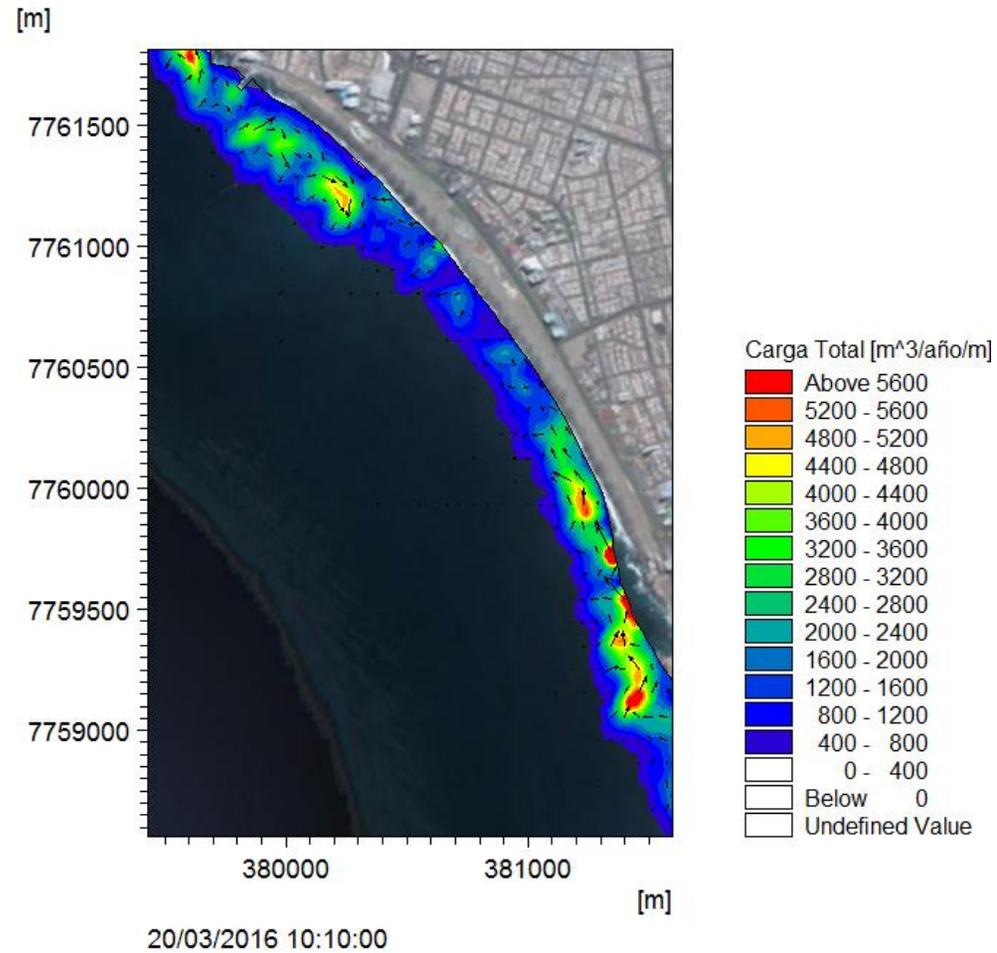


Figura 8-15: Simulación de transporte de sedimentos, caudal neto. Caso 7.