

MINISTERIO DE PLANIFICACIÓN FEDERAL, INVERSIÓN PÚBLICA Y SERVICIOS
SECRETARIA DE OBRAS PÚBLICAS
SUBSECRETARIA DE RECURSOS HIDRICOS



PROVINCIA DEL CHUBUT

ESTUDIO HIDRAULICO DE OBRAS PORTUARIAS EN EL LAGO PUELO

PARTE 2 - AGITACION POR OLEAJE

Noviembre 2009

Informe LH-303-02-09

LABORATORIO DE HIDRAULICA

PROVINCIA DEL CHUBUT

ESTUDIO HIDRAULICO DE OBRAS PORTUARIAS
EN EL LAGO PUELO

PARTE 2 – AGITACION POR OLEAJE

RESUMEN

Como parte de los estudios relativos al proyecto de obras portuarias en el Lago Puelo, se presenta una evaluación de la capacidad de abrigo al oleaje de distintas alternativas de proyecto para cada uno de los tres sitios en los que se prevé su construcción. La evaluación se realizó mediante modelación matemática y en esta etapa se consideraron olas extremas para un período de retorno de 100 años.

PALABRAS CLAVE

Olas –Puertos - Modelos matemáticos - Lago Puelo - Provincia del Chubut

Informe	LHA-303-02-09
Fecha	Noviembre, 2009
PROYECTO	890
COMITENTE	Provincia del Chubut Dirección General de Puertos

INA
LABORATORIO DE HIDRAULICA

DIRECTOR

Ing. J.C. DE LIO

JEFE DEL PROGRAMA DE HIDRÁULICA MARÍTIMA

Ing. R. D. CASTELLANO

Informe producido por

Ing. R. CASTELLANO

Equipo de trabajo

Ing. N. TOMAZIN

Ing. R. A. CÁCERES

Sr. C. A. HASPERT

Sr. L. S. PERALTA

INDICE DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCION.....	6
2	OBJETIVOS.....	6
3	METODOLOGIA.....	7
4	DESCRIPCION DE LAS OBRAS.....	7
4.1	Muelle central.....	8
4.2	Los Hitos.....	9
4.3	El Turbio.....	9
5	NIVEL DEL LAGO.....	11
6	REGIMEN DE VIENTOS.....	13
7	MODELACIÓN MATEMÁTICA DE LA AGITACIÓN POR OLEAJE.....	16
7.1	Metodología de cálculo.....	16
7.2	Implementación del modelo.....	18
7.2.1	Red de elementos finitos.....	18
7.2.2	Representación del espectro de olas incidentes.....	19
7.3	Escenarios de cálculo.....	20
7.4	Resultados.....	21
7.4.1	Muelle Central.....	22
7.4.2	Los Hitos.....	24
7.4.3	El Turbio.....	26
8	CONCLUSIONES.....	28
9	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	29

ANEXO I: Esquemas de obra

ANEXO II: Modelo Matemático

ANEXO III: Resultados. Isolíneas de amplitud de oleaje

ANEXO IV: Resultados. Campo vectorial de olas.

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Ubicación de las obras proyectadas	8
Figura 2 Frecuencia de excedencia del nivel del lago (1960-2008).....	12

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Resultado del ajuste de valores extremos	14
Tabla 2. Escenarios de cálculo utilizados para la generación del oleaje	14
Tabla 3 Coeficiente de reflexión	19
Tabla 4 Escenarios de cálculo para Muelle Central	20
Tabla 5 Escenarios de cálculo para Los Hitos	21
Tabla 6 Escenarios de cálculo para El Turbio	21
Tabla 7 Altura de ola significativa para obras en Muelle Central (Tr = 100 años) Viento Oeste	23
Tabla 8 Altura de ola significativa para obras en Muelle Central (Tr = 100 años) Viento Sur.....	23
Tabla 9 Altura de ola significativa para obras en Los Hitos	25
Tabla 10 Altura de ola significativa para obras en El Turbio.....	26

PROVINCIA DEL CHUBUT

ESTUDIO HIDRAULICO DE OBRAS PORTUARIAS EN EL LAGO PUELO

PARTE 2 – AGITACION POR OLEAJE

Noviembre, 2009

1 INTRODUCCION

El proyecto de mejoramiento y ampliación de los tres muelles ubicados en las cabeceras del lago Puelo (Muelle Central, Los Hitos y El Turbio) prevé la construcción de nuevas instalaciones destinadas al amarre de embarcaciones deportivas y, en el caso de los dos primeros, a la operación de un trasbordador para el transporte de pasajeros y vehículos entre las cabeceras Este y Oeste del lago.

La materialización de las obras contempla la realización de excavaciones para la construcción de dársenas portuarias, las que adecuadamente defendidas del oleaje mediante rompeolas, brindarán el refugio necesario para las embarcaciones. La configuración final de la planta portuaria para cada una de las cabeceras del lago demanda la evaluación de distintos aspectos funcionales, como así también estructurales y constructivos.

2 OBJETIVOS

Como parte de la optimización del proyecto se requiere el desarrollo de estudios destinadas a la evaluar la eficiencia hidráulica desde el punto de vista de la agitación interior inducida por el oleaje generado por el viento para las distintas configuraciones propuestas. En este sentido, el objetivo de esta etapa de los estudios ha sido la evaluación de algunas alternativas de obras desde el punto de vista del ingreso del oleaje a las áreas de operación portuaria.

3 METODOLOGIA

Para la realización de los estudios de propagación del oleaje se utilizó un modelo matemático. Como condición de borde se utilizaron valores de altura y período del oleaje determinados a partir de un estudio previo (Informe LHA 303-01-09). En esta etapa del estudio se estudió la eficiencia de cada alternativa de proyecto para un conjunto limitado de escenarios (en este caso oleaje extremo correspondiente a un período de retorno de 100 años), con la intención de encontrar en cada caso la alternativa más apropiada para satisfacer las necesidades generales del proyecto y al mismo tiempo minimizar los tiempos computacionales. En una tercera etapa cada alternativa será estudiada en detalle, analizando su comportamiento ante distintos climas de ola y niveles del lago y se realizarán sobre ella todas las modificaciones que lleven a su optimización.

4 DESCRIPCION DE LAS OBRAS

A continuación se presenta una breve descripción con las características generales para cada uno de los sitios de emplazamiento que se indican en la Figura 1 y las respectivas alternativas de configuración evaluadas para cada ubicación. En el Anexo I se incorporan los esquemas de obra estudiados.

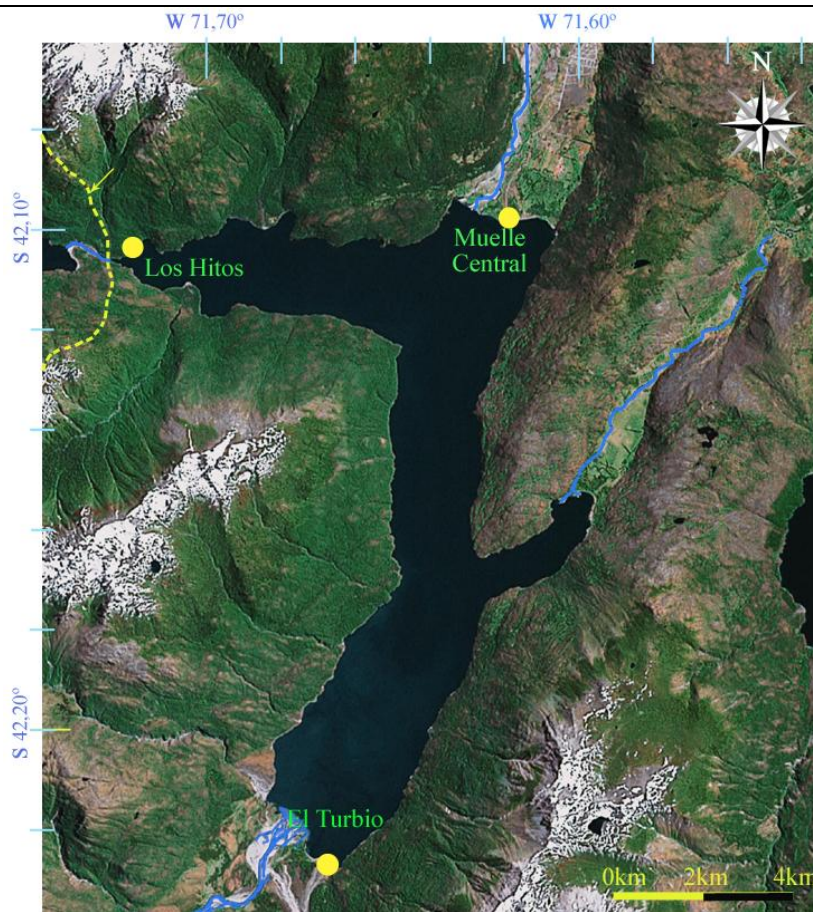


Figura 1 Ubicación de las obras proyectadas

4.1 Muelle central

Se halla ubicado en la cabecera norte del Lago Puelo, en cercanías de la localidad de Lago Puelo y próximo a la desembocadura del río Azul

Para este sitio se evalúan cuatro alternativas diferentes, denominadas en este informe como: **Área Central**, **Alternativa I**, **Alternativa I-B**, y **Alternativa V**. El área total requerida varía considerablemente según el proyecto contemplado para cada alternativa, estableciéndose como límites los casos de **Alternativa I** con aproximadamente 3000 m², y **Área Central** con aproximadamente 7800 m². La superficie de las dársenas se distribuye en una Dársena General destinada a embarcaciones deportivas y turísticas zonificada en un sector para embarcaciones pequeñas (6 m de eslora x 2 m de manga), y otro sector para embarcaciones medianas (15 m de eslora x 4 m de manga). Se ha previsto igualmente una Dársena para Transbordadores que permitirán la vinculación

con la cabecera oeste del lago, en Los Hitos. En el **Anexo I** (FIGURA A I- 1 a FIGURA A I- 4, respectivamente) se presentan los planos correspondientes al detalle de cada una de estas alternativa.

Como puede apreciarse en las Figuras indicadas, las alternativas “Área Central” y “Alternativa 5” se componen de dársenas independientes una para embarcaciones turísticas y deportivas, y otra destinada a la operación del transbordador, mientras que las alternativas I y Ib la dársena del transbordador se halla adosada a continuación de la dársena de embarcaciones menores.

4.2 Los Hitos

Se encuentra ubicado en la cabecera oeste del Lago Puelo, en cercanías del límite internacional con la república de Chile y próximo a la desembocadura del río Puelo. Para este sitio se evalúan dos alternativas diferentes, denominadas en este informe como: **Alternativa I** y **Alternativa II** (FIGURA A I- 5, FIGURA A I- 6). En este caso el área total requerida varía entre los 4200 m² y los 6100 m², respectivamente; se distribuye en una Dársena General zonificada en un sector destinado a embarcaciones pequeñas, otro sector para embarcaciones medianas, y una dársena independiente destinada a las operaciones del trasbordador. Una diferencia importante entre ambas soluciones es la resolución de los contornos internos de la dársena general de embarcaciones, que en un caso es a talud y en otro de paredes verticales.

4.3 El Turbio

Ubicado en la cabecera sur del Lago Puelo, en proximidades a la desembocadura del río Turbio. Para este sitio hay dos configuraciones a evaluar: **Alternativa I** y **Alternativa III**, con un área total que varía entre el orden de 2000 m² y los 1800 m², respectivamente; distribuyéndose en un sector destinado a embarcaciones pequeñas y otro sector para embarcaciones medianas (en este caso no se prevé la operación de un transbordador). En la FIGURA A I- 7 y FIGURA A I- 8 se presentan los planos de detalle correspondientes a cada configuración alternativa. Aunque el espejo de agua protegido es aproximadamente equivalente, la Alternativa I presenta un acceso más

estrecho a la dársena y contornos verticales (salvo el lado S) mientras que la Alternativa III presenta una entrada más amplia pero contornos a talud que favorecen la disipación del oleaje.

5 NIVEL DEL LAGO

En un Informe previo (*Estudio Hidráulico de Obras Portuarias en el Lago Puelo. Parte 1 - Clima de Olas*, LHA-303-01-09, Mayo, 2009) se indicó la existencia de un registro de niveles del lago Puelo obtenidos mediante una regla hidrométrica ubicada en el Muelle Central.

Se presentó además un análisis de los niveles del lago realizado por Nores Caballero (2008), para el período 1967-1997. El análisis se realizó para los niveles referidos al cero de la escala.

La serie completa se inicia el 1/05/1948 y consiste en un valor diario, con excepción del año 1976, en el que se determinaron 3 valores diarios. La serie tiene algunas interrupciones importantes. A los efectos de este estudio sólo se utilizó el período comprendido entre el 9/6/1960 al 30/11/2008. Esto obedeció al hecho de que en 1960 hubo una reubicación de la regla y la cota del cero hidrométrico fue modificada, desconociéndose su valor para la primera parte de la serie. Para el período 1960 a 2008 la cota IGM del cero de la escala es de 185,929 m.

La Figura 2 muestra la curva de frecuencia acumulativa de niveles del lago. El máximo nivel (cota IGM) fue 192,659 m, en agosto de 1999. En ese evento la cota del lago se mantuvo por encima de los 190 m durante algo más de 4 días.

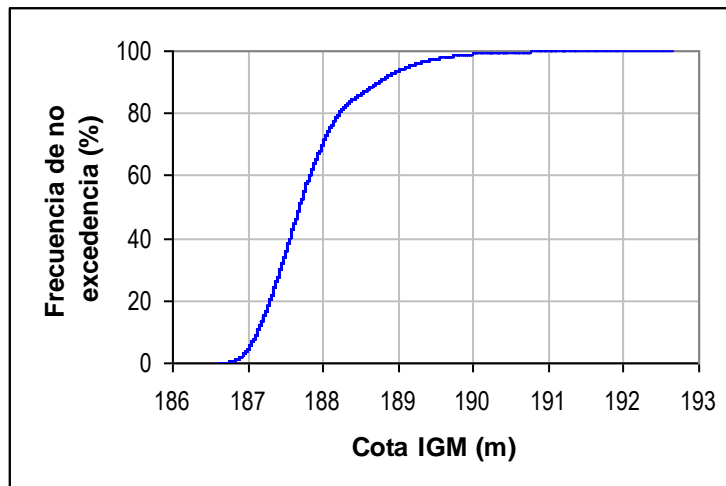


Figura 2 Frecuencia de excedencia del nivel del lago (1960-2008)

En cambio el valor medio (correspondiente a una frecuencia de 50%) es de 187,7 m. El nivel mínimo es de 186,6 m. Un 10% de los datos supera la cota 188,7 m y sólo el 1% excede 189 m.

6 REGIMEN DE VIENTOS

En un informe previo (*Estudio Hidráulico de Obras Portuarias en el Lago Puelo. Parte I - Clima de Olas*, LHA-303-01-09, Mayo, 2009) se presentaron los resultados de una búsqueda y análisis de diversas fuentes de información climatológicas, y en particular del régimen de vientos en la región. La caracterización del régimen de vientos, sus características direccionales y la estimación de las velocidades extremas para distintos períodos de retorno, es la base para la caracterización del régimen de olas en el lago.

De dicha evaluación surgió la conveniencia de adoptar para el presente estudio, los registros de viento de la estación meteorológica Esquel, del Servicio Meteorológico Nacional. Cabe señalar que esta estación meteorológica se halla a casi 100 Km al SE del Lago Puelo.

La observación de valores llamativamente elevados de intensidad de viento estimados a partir del análisis estadístico previo para algunas direcciones, motivó la revisión de la metodología utilizada.

Particularmente, se observó que para la dirección SSW la intensidad de viento estimada para distintos períodos de retorno resultaba notablemente superior a los valores equivalentes correspondientes a las direcciones contiguas S y SW.

Consecuentemente se revisaron los procedimientos de cálculo utilizados para la estimación de los parámetros de las funciones de ajuste, y los resultados correspondientes para la prueba de Kolmogorov-Smirnov. Ello permitió establecer la conveniencia de utilizar la función de Gumbel en lugar de la de Weibull para la representación de valores extremos asociados a la dirección SSW, manteniendo no obstante la calidad del ajuste dentro de los rangos requeridos para ser considerado como válido.

Con esta modificación metodológica pudo observarse que los valores de intensidad de viento asociados a distintos períodos de retorno para la dirección SSW presentan una adecuada correspondencia en comparación con los pertenecientes a las direcciones

contiguas. Esto resulta expresado en la Tabla 1, en la cual se incorporó la modificación mencionada.

Tabla 1 Resultado del ajuste de valores extremos

Tr (años)	Intensidad del viento (m/s)															
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
2	11.4	12.4	12.6	10.4	8.9	7.2	7.4	8.3	10.2	13.4	15.9	19.8	24.2	25.5	15.8	11.0
5	15.2	15.5	15.1	12.6	11.5	9.7	9.6	10.2	14.2	16.7	19.7	24.9	27.6	28.2	19.8	15.3
10	17.7	17.6	16.6	14.1	13.2	11.3	10.9	11.2	16.9	18.9	22.1	28.4	30.1	30.1	22.3	18.1
20	20.2	19.5	17.8	15.3	14.9	12.6	11.9	12.0	19.4	21	24.2	31.7	32.5	31.8	24.5	20.7
50	23.3	22.1	19.3	16.9	17.0	14.3	13.2	13.0	22.6	23.8	26.8	35.7	35.5	34.1	27.2	24.2
100	25.6	24.0	20.3	18.0	18.6	15.4	14.0	13.7	24.9	25.8	28.6	38.7	37.8	35.8	29.0	26.8

De esta Tabla 1 surgieron los nuevos escenarios seleccionados para la modelación de la generación del oleaje dentro del Lago Puelo por acción del viento. Teniendo en consideración la ubicación geográfica de las tres cabeceras del lago que revisten interés para este estudio, se eligieron los valores de intensidad de viento asociados a períodos de retorno de $Tr=100$ años para cada ubicación los que se indican en la Tabla 2.

Tabla 2. Escenarios de cálculo utilizados para la generación del oleaje

Ubicación	Dirección	Intensidad (m/s)
Muelle Central	WSW	38.7
	SSW	25.8
Los Hitos	NE	20.3
	E	18.6
El Turbio	N	25.6
	NNE	24.0

Dada su ubicación (ver Figura 1) el Muelle Central se verá afectado por el oleaje generado tanto por vientos provenientes del sector Sur como de vientos provenientes del Oeste. Ambas situaciones revisten interés para la modelación debido a que en la dirección WSW se observan los vientos de mayor intensidad y en la dirección SSW se presenta el fetch más extenso.

En Los Hitos las mayores alturas de ola serán originadas por vientos del cuadrante Este. Si bien, dada la orientación del lago, las direcciones E y ESE son las que presentan

mayores posibilidades de generar olas de importancia en esta ubicación, se decidió incluir en este análisis al valor correspondiente a una intensidad de $T_r=100$ años para la dirección NE, puesto que un posible efecto de confinamiento del flujo inducido por la presencia de las altas montañas podría favorecer el redireccionamiento del viento en la dirección del eje del lago. Por otra parte, la observación por parte de los habitantes de esa zona de elevadas alturas de ola en ese sector del lago hace suponer que las intensidades de viento pueden ser superiores a las que indican los registros para la dirección E.

Sobre la ubicación de El Turbio incide puntualmente el viento del cuadrante Norte. En particular interesa analizar los efectos generados por las direcciones N y NNE, las cuales presentan a priori mayores posibilidades de generar el oleaje más importante.

7 MODELACIÓN MATEMÁTICA DE LA AGITACIÓN POR OLEAJE

La modelación de la agitación del oleaje dentro de un recinto portuario, y en zonas aledañas, tiene como principal objetivo la optimización de la configuración definitiva de la planta portuaria, sirviendo como herramienta para evaluar el funcionamiento de las distintas alternativas que se proponen.

Se estudiaron las condiciones de oleaje producidas por situaciones climáticas de 100 años de período de retorno, y para un nivel del lago correspondiente a su cota media (188 m IGM). La modelación realizada permitió cuantificar la interacción entre las olas que se propagan hacia la costa y las estructuras internas de las dársenas. El análisis del campo de olas resultante en el área portuaria se utilizó para verificar el cumplimiento de las condiciones de agitación admisibles para la seguridad de las embarcaciones para las cuales están destinadas las obras, y así brindar criterios para la selección de una alternativa en particular. Al mismo tiempo esos resultados permitirán establecer las condiciones para el diseño estructural de las obras portuarias.

7.1 Metodología de cálculo

La simulación numérica de la agitación en un recinto portuario requiere de un modelo matemático relativamente sofisticado que debe contemplar los mecanismos dominantes de transformación de las olas: la difracción, la reflexión y la refracción.

El modelo matemático básico de agitación en recintos portuarios fue desarrollado por Berkhoff. Combinando su ecuación para los taludes suaves con apropiadas condiciones de borde, es posible simular adecuadamente cualquier problema práctico, una vez definida la ola incidente.

La solución del problema matemático planteado se encara, en general, por el método de los elementos finitos, especialmente apto para problemas diferenciales elípticos. La red de cálculo se genera de modo tal de ajustarse al contorno de la región de interés por una parte y, de tener un además un paso suficientemente pequeño respecto de la longitud de onda de la ola más corta, de modo de representarla adecuadamente. El contorno de la región de cálculo está caracterizada por bordes físicos coincidentes con tramos de costa,

muelles, escolleras, u otras estructuras, y por bordes radiantes en los que se impone la condición de ola del caso, es decir su altura, período y dirección de propagación

Como solución del problema se obtiene la distribución espacial de alturas de ola en todo el interior de la red computacional, que es el resultado de mayor interés ingenieril y, eventualmente, también es posible conocer el campo de direcciones de propagación y corrientes generadas por el oleaje.

Para esta aplicación se utilizó el modelo CGWAVE, el cual fue desarrollado por un equipo de profesionales pertenecientes a la Universidad de Maine en colaboración con el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de EE.UU. Se trata de un modelo numérico basado en la técnica matemática de elementos finitos que ha sido incorporado dentro del sistema SMS (Surface-Water Modeling System), lo cual agiliza su implementación facilitando considerablemente las tareas de pre- y post-procesamiento de cálculo. En el **ANEXO II** se presenta una descripción referida a los aspectos principales de la base teórica empleada por dicho modelo.

Este modelo puede ser aplicado a olas que responden a una distribución espectral en frecuencia y dirección, apelando al principio de superposición, dado el carácter lineal de las ecuaciones. Para ello los espectros se discretizan y se obtienen soluciones para todas las combinaciones de frecuencias y dirección. La solución final resulta de la suma de las soluciones particulares para cada banda de frecuencia en que se ha discretizado el espectro.

Para el espectro de frecuencia se utilizó la expresión del **Joint North Sea Wave Project** (JONSWAP) que proporciona una relación funcional entre la densidad de energía $S(f)$ contenida en un entorno infinitamente pequeño de la frecuencia f :

$$S(f) = \beta_j H^2 T_p^{-4} f^{-5} \exp\left[-\frac{5}{4}(T_p f)^{-4}\right] \cdot \gamma^{\exp\left[-\left(\frac{f}{f_p} - 1\right)^2 / 2\sigma^2\right]} \quad (1)$$

donde

$$\beta_j = \frac{0.06238}{0.230 + 0.0336 \cdot \gamma - 0.185 (1.9 + \gamma)^{-1}} [1.094 - 0.01915 \cdot \ln \gamma]$$

$H_{1/3}$ es la altura significativa (una medida de la energía total contenida), T_p el período de pico espectral ($T_p = 1/f_p$), $\sigma = 0.07$ para frecuencias menores que la de pico y $\sigma = 0.09$ para frecuencias mayores; γ es el coeficiente de apuntamiento del espectro, variable entre 1 y 7 y con un valor promedio de 3,3 adoptado en el presente estudio.

La dispersión de la energía en función de la dirección se realiza mediante una expresión de la potencia del coseno, definida de la siguiente manera:

$$D(\theta) = \frac{\Gamma(s+1)}{\sqrt{\pi}\Gamma(s+1/2)} \cos^{2s}(\theta - \theta_p)$$

donde θ_f es la dirección principal de propagación y Γ es la función Gamma. El parámetro s representa el grado de dispersión direccional, con $s \rightarrow \infty$ para la representación de un campo de oleaje unidireccional.

7.2 Implementación del modelo

7.2.1 Red de elementos finitos

Se generó una red de elementos finitos para cada una de las configuraciones portuarias analizadas. Las dimensiones de los elementos que conforman la malla de cálculo son determinadas por la necesidad contar con un mínimo de 10 elementos por longitud de las ondas modeladas.

Las mallas de cálculo de se encuentran conformadas por elementos triangulares de dimensión variable en función del detalle que se desea representar y en función de la profundidad local asociada a cada elemento. El número de elementos varía para cada configuración, siendo del orden de 18.500 para Muelle Central, 9000 para Los Hitos y 6500 para El Turbio. En promedio, estos triángulos tienen un área de alrededor de 0.6 m² dentro de la dársena y de 11 m² en la región del borde exterior.

Los contornos del área de cálculo están compuestos por límites físicos (muelles, escolleras) y por bordes matemáticos. Los primeros, poseen determinadas propiedades reflejantes para las ondas que inciden sobre los mismos. La capacidad de reflexión se cuantifica mediante el coeficiente de reflexión $K_r = H_r/H_i$. En este estudio se utilizaron

los valores indicados en la Tabla 3 para el coeficiente de reflexión K_r de los distintos tramos de contorno:

Tabla 3 Coeficiente de reflexión

Tipo de contorno	Valor de K_r
Talud interno de dársenas (colchonetas de gaviones)	0.5
Sector de muelles verticales (muro de gaviones)	0.8
Sector de costa natural del lago (playa de gravas)	0.3

Estos valores fueron seleccionados en función de las características geométricas de dichos bordes, tomando como fuente de información resultados de ensayos en modelos físicos realizados en condiciones similares.

Los bordes matemáticos son tratados como fronteras radiantes, lo que significa que la energía de olas puede entrar al dominio de cálculo a través de ellos (mediante la imposición de una condición de borde dada por un valor de altura, período y dirección) o ser radiada hacia el exterior.

7.2.2 Representación del espectro de olas incidentes

Para cada escenario estudiado se construyó el espectro de frecuencia según la expresión del espectro JONSWAP con un coeficiente de apuntamiento $\gamma = 3.3$. La altura significativa H_s puede definirse a partir de la función de densidad espectral como:

$$H_s = 4 m_o^{1/2} \quad (3)$$

donde m_o es el momento de orden cero de la función de densidad de energía $S(f)$, y se define como:

$$m_o = \int_0^{\infty} S(f) df \quad (4)$$

El espectro fue discretizado en 30 bandas de frecuencia. La elección de la cantidad de bandas de frecuencia de discretización del espectro es una solución de compromiso entre el tiempo de cálculo (cada banda de frecuencia requiere ser resuelta separadamente) y la resolución del espectro, que mejora con mayor cantidad de bandas.

Esta discretización se realiza definiendo valores prácticos para las frecuencias de corte mínimas y máximas, y para el ancho de bandas de frecuencia Δf .

Por otra parte, para la discretización del espectro en bandas direccionales se consideró un valor $\Delta\theta$ de 11.25°.

7.3 Escenarios de cálculo

Los escenarios de análisis utilizados para el estudio de la agitación por oleaje fueron obtenidos a partir de la aplicación del modelo de generación de olas. De la grilla de cálculo construida para las simulaciones de SWAN (*Informe LHA 303-01-09*) se extrajeron valores de altura, período y dirección de olas correspondientes a la región en la que se ubica la el borde matemático de las mallas de discretización construidas para la modelación de CGWAVE, donde la profundidad promedio es del orden de 40 m.

Los escenarios analizados corresponden a condiciones extremas y condiciones medias del viento. En esta etapa el nivel del lago utilizado para el cálculo correspondió a un valor de 188 m IGM que corresponde a un valor medio. Los valores de H_s , T_p y dirección, correspondientes a cada escenario de análisis, y utilizados como condición de borde en la modelación de detalle son presentados en las Tabla 4 a Tabla 6

Tabla 4 Escenarios de cálculo para Muelle Central

Viento de generación del oleaje		Ola en el borde de entrada para CGWAVE		
		Hs (m)	Tp (seg)	Dirección
Viento WSW	TR= 2 años	1.05	3.5	WSW
	TR= 100 años	2.10	5.2	SW
Viento SSW	TR= 2 años	0.79	3.5	SSW
	TR= 100 años	1.77	4.3	SW

Tabla 5 Escenarios de cálculo para Los Hitos

Viento de generación del oleaje		Ola en el borde de entrada para CGWAVE		
		Hs (m)	Tp (seg)	Dirección
Viento E	TR= 2 años	0.55	2.9	ESE
	TR= 100 años	1.00	4.3	ESE
Viento SE	TR= 2 años	0.36	2.4	SE
	TR= 100 años	0.81	3.5	ESE

Tabla 6 Escenarios de cálculo para El Turbio

Viento de generación del oleaje		Ola en el borde de entrada para CGWAVE		
		Hs (m)	Tp (seg)	Dirección
Viento N	TR= 2 años	0.55	2.9	NNE
	TR= 100 años	1.40	4.3	NNE
Viento NNE	TR= 2 años	0.62	2.5	NNE
	TR= 100 años	1.27	4.3	NNE

7.4 Resultados

En esta sección se presentan los resultados de la aplicación del modelo para los tres sitios de emplazamiento de las obras con sus respectivas alternativas de configuración. En esta primera instancia de evaluación se han considerado solamente los escenarios de simulación correspondientes a oleajes extremos, asociados a períodos de retorno de $Tr=100$ años con el propósito de analizar la respuesta de cada una de las alternativas propuestas frente a ocurrencia de situaciones de máxima exigencia.

Mediante la comparación los resultados obtenidos para cada alternativa podrán obtenerse conclusiones que sirvan de orientación en el proceso de selección de la alternativa más adecuada para cada sitio de emplazamiento así como para su dimensionamiento estructural. En una segunda instancia de evaluación se estudiará con mayor detalle la configuración seleccionada para cada sitio, analizando en esa oportunidad la ocurrencia de diferentes escenarios de oleaje (frecuentes y extremos) y

nivel del lago, como así también la influencia de distintas condiciones de reflexión para los contornos.

Los resultados de la modelación realizada con CGWAVE se presentan, por una parte en forma gráfica, como líneas de isoamplitud en el área de detalle modelada (**ANEXO III**) y como campo vectorial, abarcando la totalidad del área modelada (**ANEXO IV**).

Por otra parte, una síntesis de la información generada se indica en formato de tabla, donde se han volcado los valores de Hs calculados para un conjunto de puntos de control de interés seleccionados por su ubicación. Esas ubicaciones se indican en las Figuras del **Anexo III**. En todos los casos se ha conservado la nomenclatura de las alternativas de proyecto tal como fueron producidas por la Provincia del Chubut.

7.4.1 *Muelle Central*

Como se indicó precedentemente, dado su emplazamiento dentro del lago Puelo, el área de Muelle Central resulta expuesta a oleajes generados por vientos tanto del sector Oeste como del sector Sur. Es por ello que para esta ubicación se presentan dos conjuntos de resultados correspondiente a ambas situaciones. En la Tabla 7 y la Tabla 8 se muestran los valores puntuales de Hs (m) obtenidos para cada una de las alternativas (en sus diferentes puntos de control) para las situaciones de oleaje generado por viento del Oeste y del Sur, respectivamente.

La ubicación de los puntos de control correspondientes a cada alternativa puede observarse en la FIGURA A III - 1 a la FIGURA A III - 8 del **ANEXO III**, donde se muestra además el campo de distribución de la altura de olas obtenido en las simulaciones bajo la forma de isolíneas con equidistancia de 0,25 m.

Con el fin de hacer comparables los resultados, promediando valores puntuales en cada alternativa se obtuvieron valores representativos de tres sectores de interés en la configuración de la dársena: **Boca de acceso, Dársena Transbordador y Dársena General**. En el caso de alternativas con dársenas separadas (Área Central y 5) el punto 1 corresponde a la boca de acceso a la dársena general.

**Tabla 7 Altura de ola significativa para obras en Muelle Central (Tr = 100 años)
Viento Oeste**

Ubicación	Punto	Valores puntuales de Hs (m)			
		Area Central	Alternativa 1	Alternativa 1b	Alternativa 5
Boca	1	0.86	0.84	1.01	0.68
	2	0.92	0.6	0.43	0.98
Dársena Transbordador	3	0.62	0.33	0.28	0.91
	4	0.42	0.32	*	0.54
	5	0.72	*	*	0.57
	Promedio	0.67	0.42	0.36	0.75
Dársena General	6	0.37	0.7	0.7	0.58
	7	0.32	0.5	0.36	0.32
	8	0.36	0.47	0.42	0.36
	9	0.33	0.78	0.75	0.63
	10	0.36	0.74	0.43	0.4
	11	0.39	0.71	1.28	0.37
	12	0.46	0.59	1.09	0.32
	13	0.68	*	1.25	0.36
	14	*	*	*	0.33
	15	*	*	*	0.21
16	*	*	*	0.44	
Promedio	0.41	0.64	0.79	0.39	

**Tabla 8 Altura de ola significativa para obras en Muelle Central (Tr = 100 años)
Viento Sur**

Ubicación	Punto	Valores puntuales de Hs (m)			
		Area Central	Alternativa 1	Alternativa 1b	Alternativa 5
Boca	1	1.01	1.22	1.34	1.17
Dársena Transbordador	2	0.97	0.81	0.52	1.3
	3	0.83	0.45	0.32	1.1
	4	0.36	0.68	*	0.51
	5	0.63	*	*	0.55
Promedio	0.70	0.65	0.42	0.87	
Dársena General	6	0.52	0.86	0.84	0.91
	7	0.36	0.49	0.38	0.42
	8	0.6	0.68	0.47	0.61
	9	0.46	0.8	0.98	0.9
	10	0.66	0.85	0.58	0.45
	11	0.44	0.84	1.46	0.59
	12	0.53	0.67	1.07	0.39
	13	0.72	*	1.21	0.52
	14	*	*	*	0.43
	15	*	*	*	0.24
16	*	*	*	0.46	
Promedio	0.54	0.74	0.87	0.54	

Como primera observación de interés, puede señalarse que a partir de los valores indicados en ambas tablas (Tabla 7 y Tabla 8) se aprecia que las alturas de ola promedio generadas por el viento del Sur resultan claramente superiores a las del Oeste en los tres sectores indicados.

La altura de ola significativa en la zona de las bocas de acceso a las dársenas puede variar de una alternativa a otra en función de la orientación que presenta cada una, pero para todos los casos, considerando que se simuló una situación de oleaje extremo, puede admitirse que los valores de Hs se mantienen dentro de valores aceptables. La situación más comprometida se establece para el oleaje generado por el viento Sur, particularmente para las **Alternativas 1 y 1b**, donde las alturas de ola superan los valores de Hs=1.20 m y Hs=1.30 m, respectivamente.

En el sector de trasbordador las alturas de ola obtenidas para las alternativas **Área Central y Alternativa 5** resultaron significativamente superiores a las de **Alternativa I y Alternativa Ib**, lo cual era esperable dado que en éstas dos últimas la dársena propia del trasbordador se encuentra en el interior de la dársena general. De todos modos los valores de Hs observados para las dos primeras alternativas indicadas, en las que la dársena de transbordadores se halla expuesta en forma directa al oleaje del lago, pueden considerarse aceptables (Hs promedio < 1 m) para el tipo de embarcación y la condición climática analizada.

Para la dársena general de embarcaciones se observa que en el caso de **Área Central y Alternativa 5** se obtienen buenas condiciones de abrigo, con alturas de ola promedio inferiores a Hs=0.5 m para el viento del Oeste, y levemente superiores al mismo para el viento Sur. En las **Alternativas 1 y 1b** se supera con claridad el valor de Hs=0.5 m para ambos escenarios, siendo más desfavorable la situación de la **Alternativa 1b**.

7.4.2 Los Hitos

Para esta ubicación se evaluaron dos alternativas diferentes: **A1 (C)** y **A2 (F)**; ambas sometidas a la acción del oleaje generado por vientos del sector Este asociados a períodos de retorno de Tr=100 años.

Los resultados se presentan en la Tabla 9, la cual señala los valores puntuales de Hs (m) obtenidos para cada una de las alternativas (en sus diferentes puntos de control). La

ubicación de los puntos de control correspondientes a cada alternativa puede observarse en la FIGURA A III - 9 y FIGURA A III - 10 del ANEXO III, donde se muestra además el campo de distribución de la altura de olas obtenido en las simulaciones.

Tabla 9 Altura de ola significativa para obras en Los Hitos (Tr = 100 años)

Ubicación	Punto	Valores puntuales de Hs (m)	
		A1 (C)	A2 (F)
Boca	1	0.6	0.59
Dársena Transbordador	2	0.57	0.61
	3	0.56	0.28
	4	0.35	0.22
	5	0.36	0.21
	Promedio	0.46	0.33
Dársena General	6	0.52	0.39
	7	0.25	0.24
	8	0.51	0.2
	9	0.6	0.47
	10	0.46	0.23
	11	0.28	0.04
	12	0.21	0.07
	13	0.29	0.08
	14	0.55	0.04
	15	*	0.01
	16	*	0.02
	17	*	0.18
Promedio	0.41	0.16	

Como puede apreciarse en la Tabla 9, las alturas de ola esperables para la ubicación de Los Hitos resultan considerablemente inferiores a las observadas para Muelle Central. Esto se explica debido a la baja intensidad de los vientos del Este (en comparación con los del Sur y los del Oeste que afectan al área de Muelle central) y a la relativamente corta extensión de la distancia de generación sobre la superficie del lago (fetch) que se observa en dicha dirección.

Por tales motivos, ambas alternativas evaluadas en este informe (**A1** y **A2**) presentan condiciones de agitación admisibles en los tres sectores de interés para la configuración de la dársena: **Boca de acceso, Dársena de transbordador, y Dársena General.**

Si bien la comparación de valores promedio de Hs que surge de la Tabla 9 indica menores alturas de ola asociados a la variante de proyecto **A2**, los resultados obtenidos

para la alternativa **A1** se encuentran igualmente dentro de los márgenes de admisibilidad recomendados por las normas.

7.4.3 El Turbio

Análogamente a el caso de Los Hitos, para ubicación de El Turbio se evaluaron dos alternativas diferentes: **A1** (córdoba) y **A2** (Fer); ambas sometidas a la acción del oleaje generado por vientos del sector Norte asociados a períodos de retorno de $Tr=100$ años.

Los resultados se presentan en la Tabla 10, señalándose valores puntuales de H_s (m) obtenidos para cada una de las alternativas. La ubicación de los puntos de control correspondientes a cada alternativa puede observarse en la FIGURA A III - 11 y FIGURA A III - 12 del ANEXO III, junto con el campo de distribución de la altura de olas obtenido en para cada caso.

Tabla 10 Altura de ola significativa para obras en El Turbio

Ubicación	Punto	Valores puntuales de H_s (m)	
		A1 (C)	A2 (F)
Boca	1	0.99	0.75
Dársena General	2	0.93	0.66
	3	1.13	0.46
	4	1.08	0.59
	5	0.62	0.6
	6	0.45	0.62
	7	0.42	0.42
	8	0.46	0.33
	9	0.52	0.41
	10	*	0.43
		Promedio	0.70

De la comparación de los resultados para ambas alternativas presentados la Tabla 10 surge que para la **boca de acceso** los valores de H_s obtenidos en **A2** son del orden del 25% inferiores a los obtenidos en **A1**.

Por otra parte, en el interior de la dársena la altura de ola promedio para **A2** resulta del orden de $H_s=0.5$ m, lo cual la mantiene dentro de valores admisibles mientras que para

A1 el promedio de alturas de ola en la zona de amarre asciende a $H_s = 0.7$ m, superando así el límite recomendado ($H_s = 0.5$ m). Ello se debe a la mayor capacidad disipativa de los taludes que conforman el contorno interno de la alternativa A2.

A partir de estos resultados, desde el punto de vista de la atenuación de la agitación, para la ubicación de El Turbio la Alternativa A2 presenta claras ventajas sobre A1.

8 CONCLUSIONES

1. Se evaluó desde el punto de vista de la eficiencia en la protección al oleaje, un conjunto de alternativas de proyecto portuario para tres sitios emplazados sobre las márgenes del Lago Puelo: Muelle Central, sobre la margen NE (4 alternativas de proyecto), Los Hitos ubicada sobre la margen W (2 alternativas) y El Turbio (margen S, 2 alternativas).
2. La evaluación se efectuó mediante la simulación numérica de propagación del oleaje desde la región costera próxima a cada emplazamiento hasta el interior de las dársenas portuaria, habiéndose obtenido como resultado la altura de ola significativa, su período de pico y dirección de propagación en toda el área portuaria.
3. A los efectos de evaluar las alternativas de proyecto, se modelaron en esta etapa del estudio situaciones extremas, con un período de retorno de 100 años. El nivel del lago se fijó en su valor medio. Las condiciones de borde para las simulaciones surgieron de un análisis previo referido al régimen de vientos en el área y de la aplicación de un modelo numérico de generación de oleaje.
4. En el sitio Muelle Central, las alternativas con Dársena de Transbordadores separada de la Dársena General permiten lograr mejores condiciones de aquietamiento en esta última, destinada a embarcaciones turísticas y deportivas. Las alternativas en que la Dársena de Transbordadores es interna, mejora como es de esperar las condiciones en ésta última pero expone a la Dársena General a un mayor oleaje.
5. Tanto en el emplazamiento Los Hitos como en El Turbio, la Alternativa A2 mostró una mayor eficiencia en las condiciones de aquietamiento, debido a la presencia de contornos internos a talud, que proveen de una mejor capacidad para disipar el oleaje.
6. Los resultados obtenidos a partir de las simulaciones numéricas realizadas, conjuntamente con la evaluación de otros aspectos técnicos y económicos, permitirán seleccionar la alternativa más conveniente para cada emplazamiento, la que en una etapa posterior será estudiada en mayor profundidad y para una más variada gama de escenarios, incluyendo situaciones frecuentes y extremas de oleaje y niveles del lago, hasta lograr el diseño más conveniente desde el punto de vista técnico y económico.

9 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Nores Caballero, Roberto “*Proyecto de muelles Lago Puelo*”, Enero 2008

ANEXO I

ESQUEMAS DE OBRAS

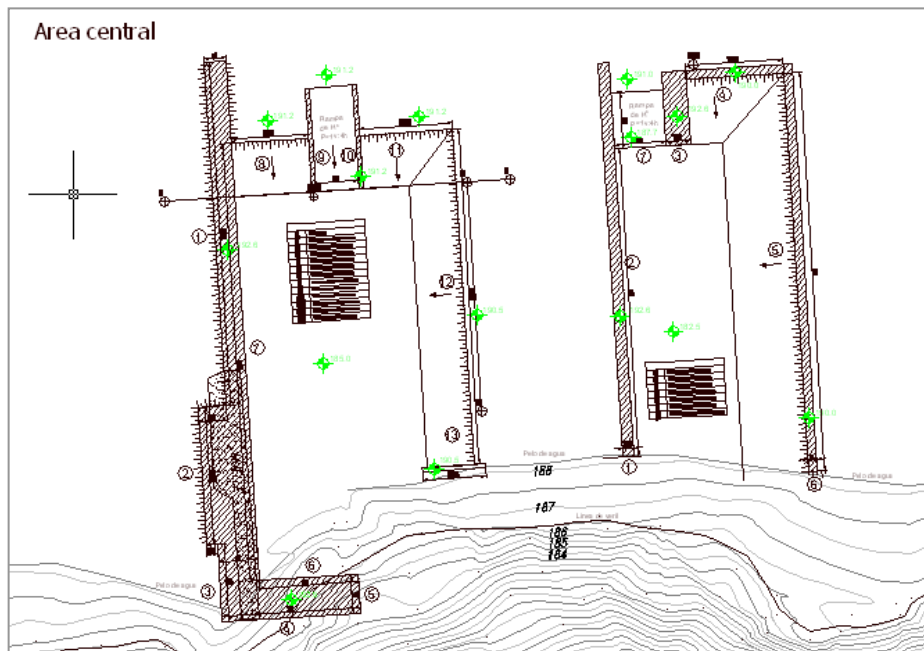


FIGURA A I- 1 Muelle Central-Área Central

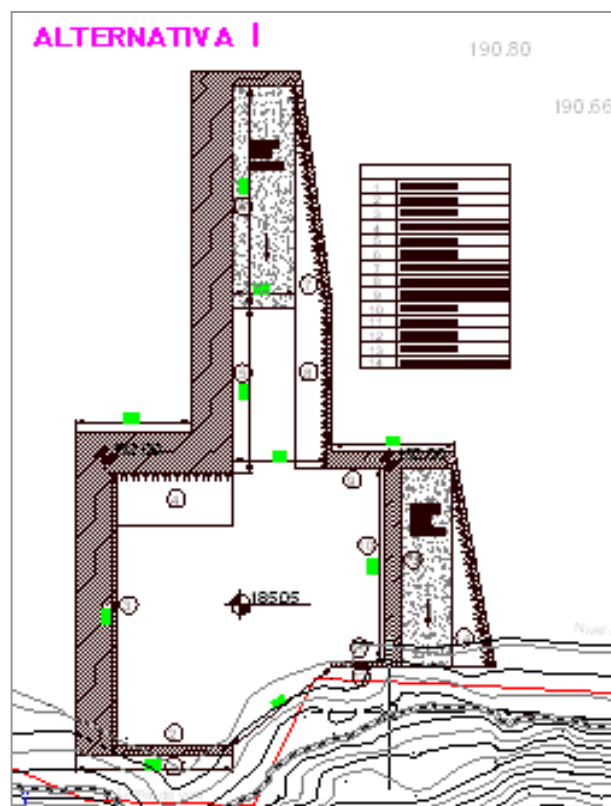


FIGURA A I- 2 Muelle Central-Alternativa 1

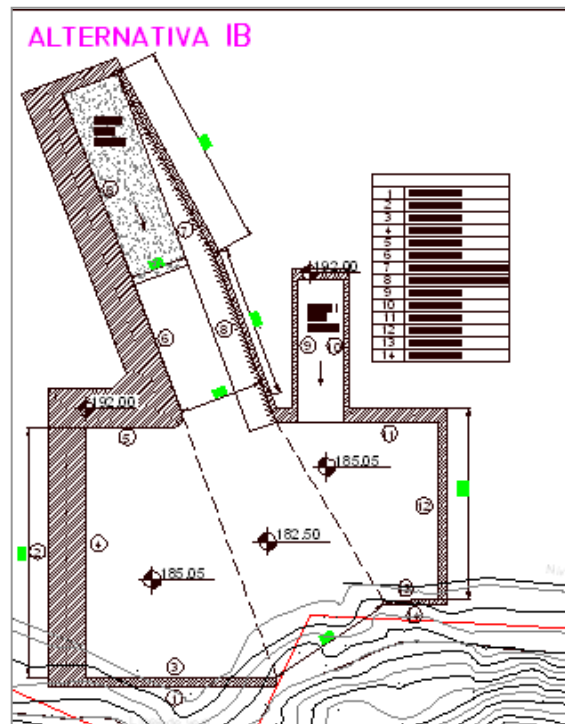


FIGURA A I- 3 Muelle Central-Alternativa 1b

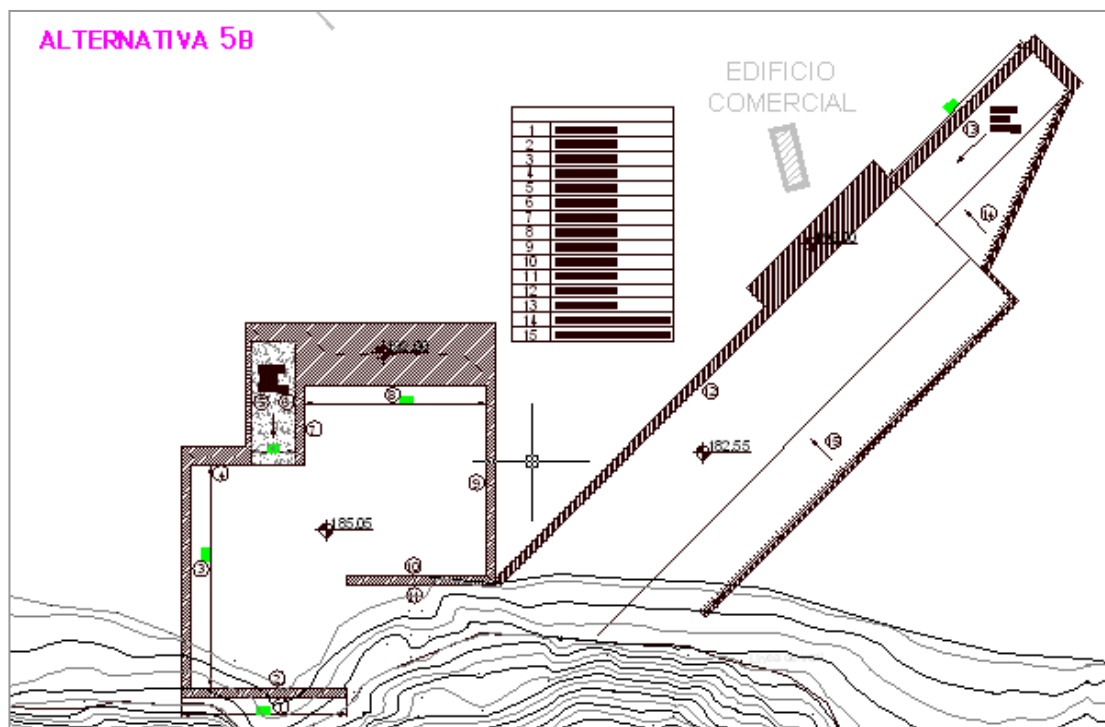


FIGURA A I- 4 Muelle Central – Alternativa 5

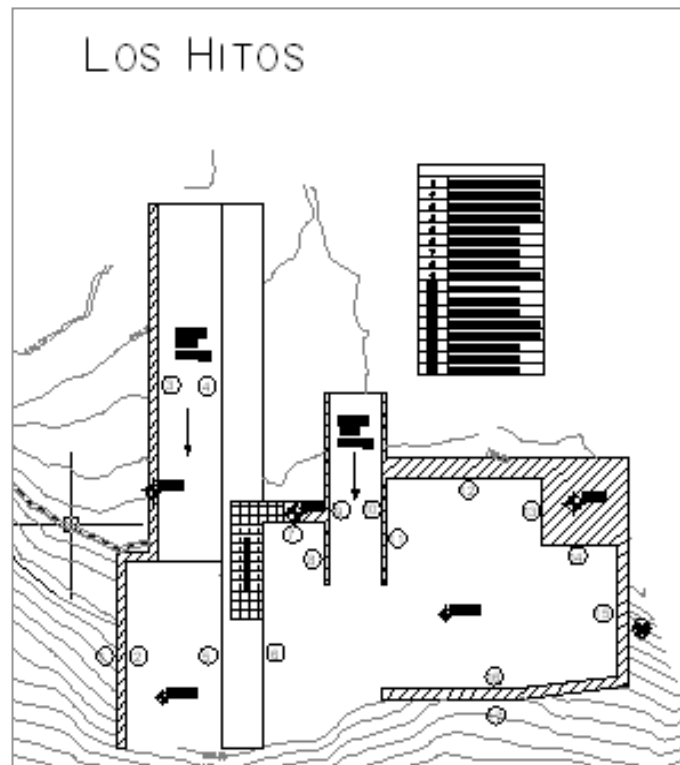


FIGURA A I- 5 Los Hitos-A1

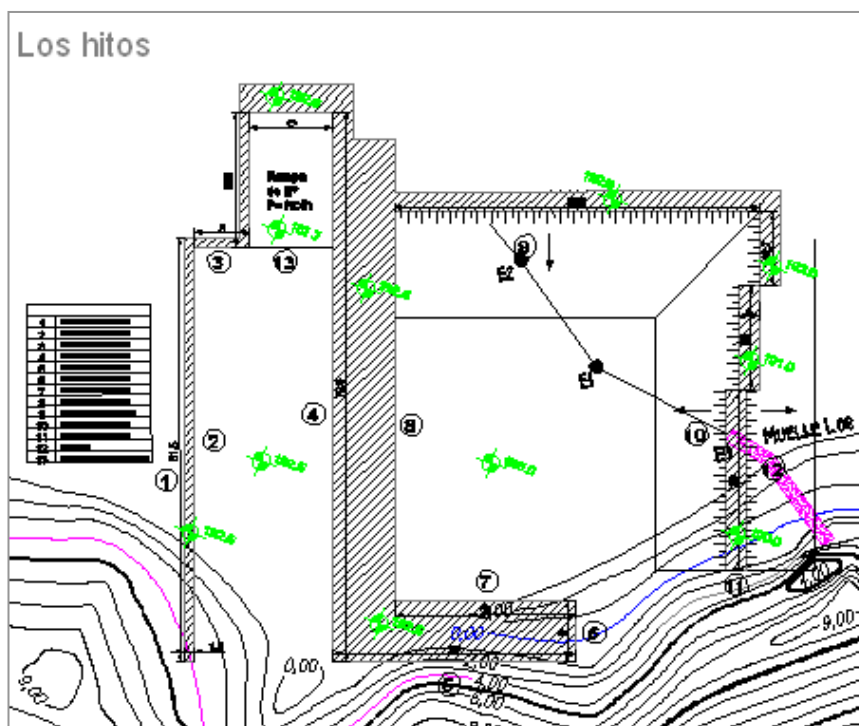


FIGURA A I- 6 Los Hitos-A2

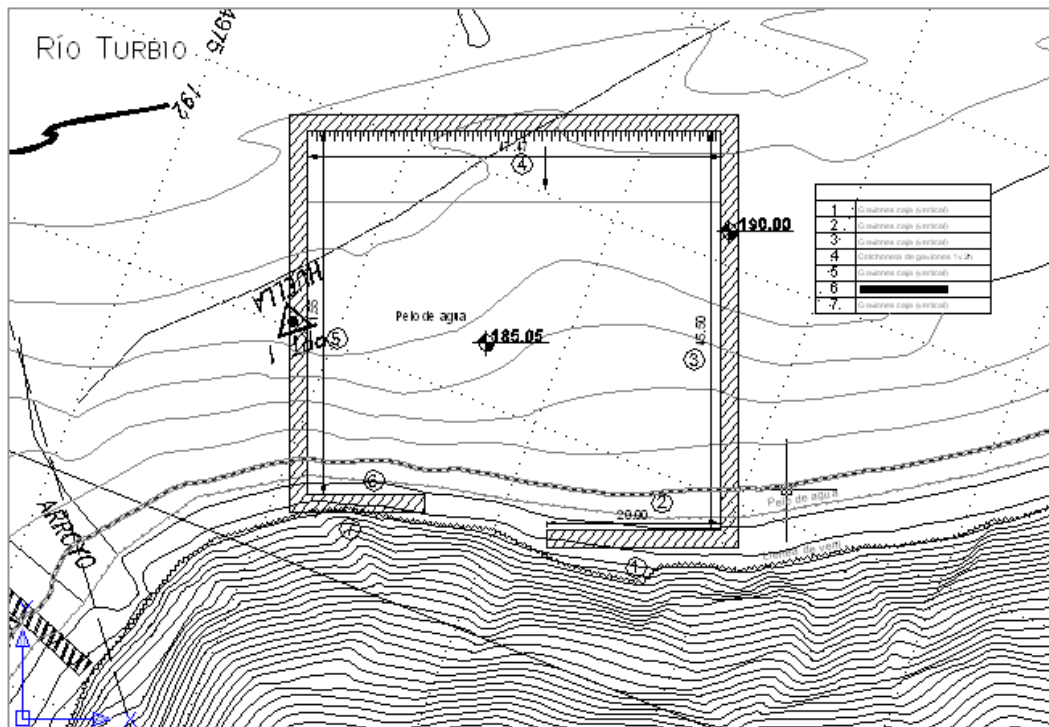


FIGURA A I- 7 El Turbio-A1

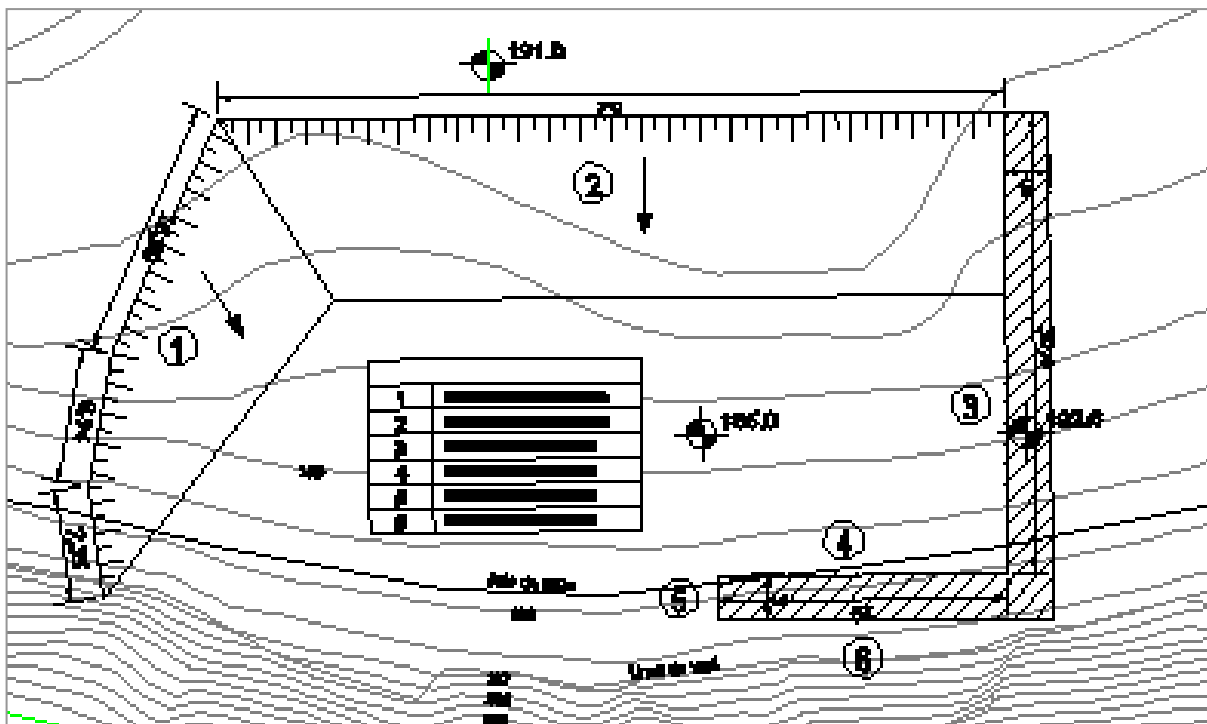


FIGURA A I- 8 El Turbio-A2

ANEXO III

ISOLINEAS DE ALTURA SIGNIFICATIVA DE OLA

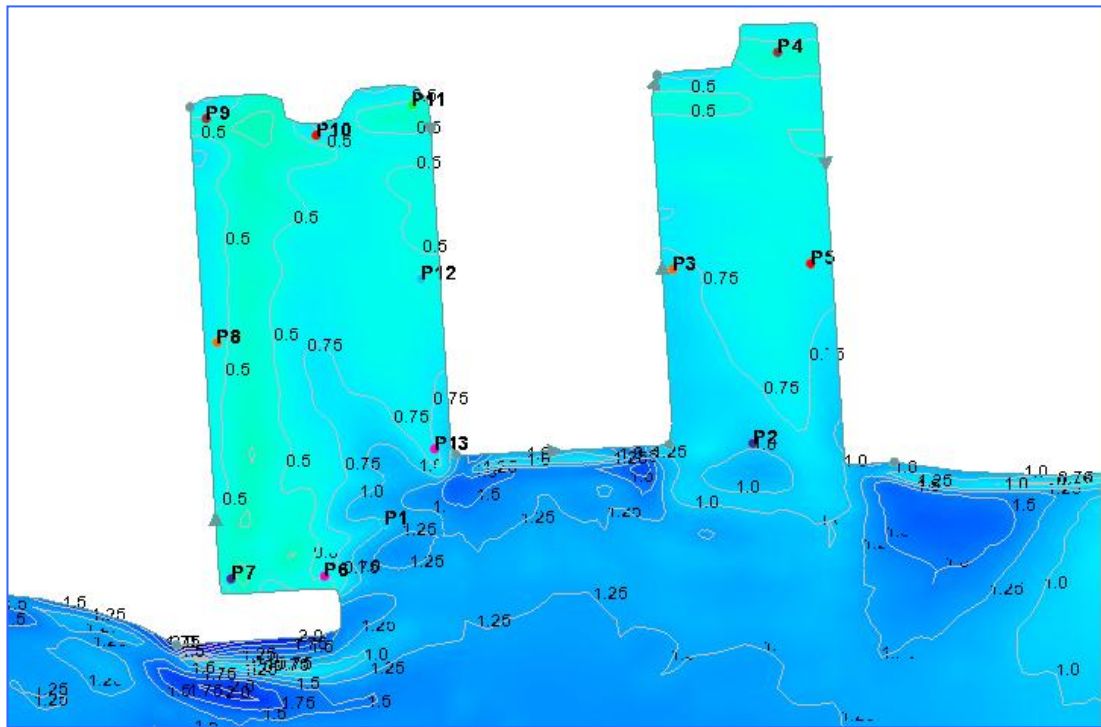


FIGURA A III - 1 Area Central Hs 1.73 m Tp 4.29 s Dir Sur

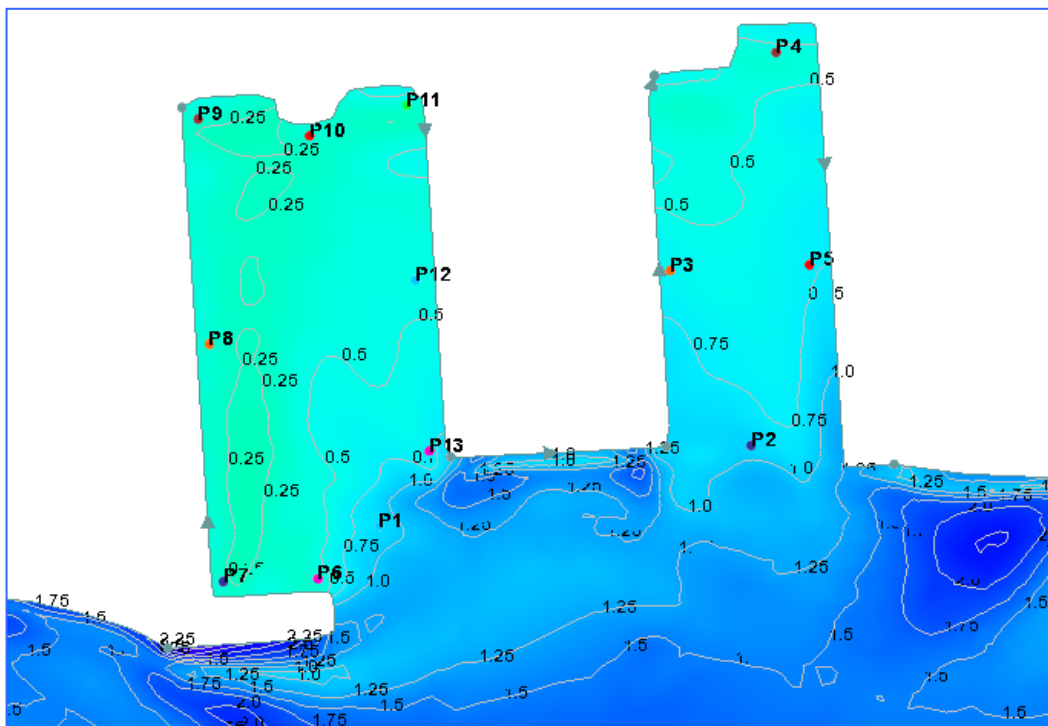


FIGURA A III - 2 Area Central Hs 2.10m Tp 5.20 s Dir West

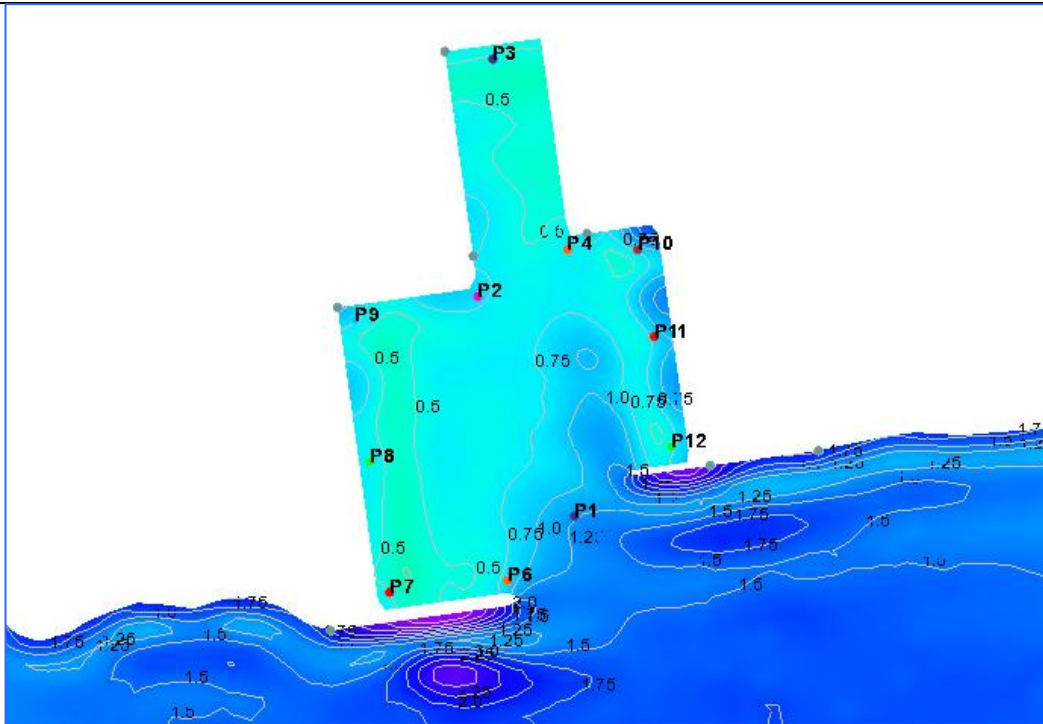


FIGURA A III - 3 Muelle central A1 Hs 1.73 m Tp 4.29 s Dir Sur

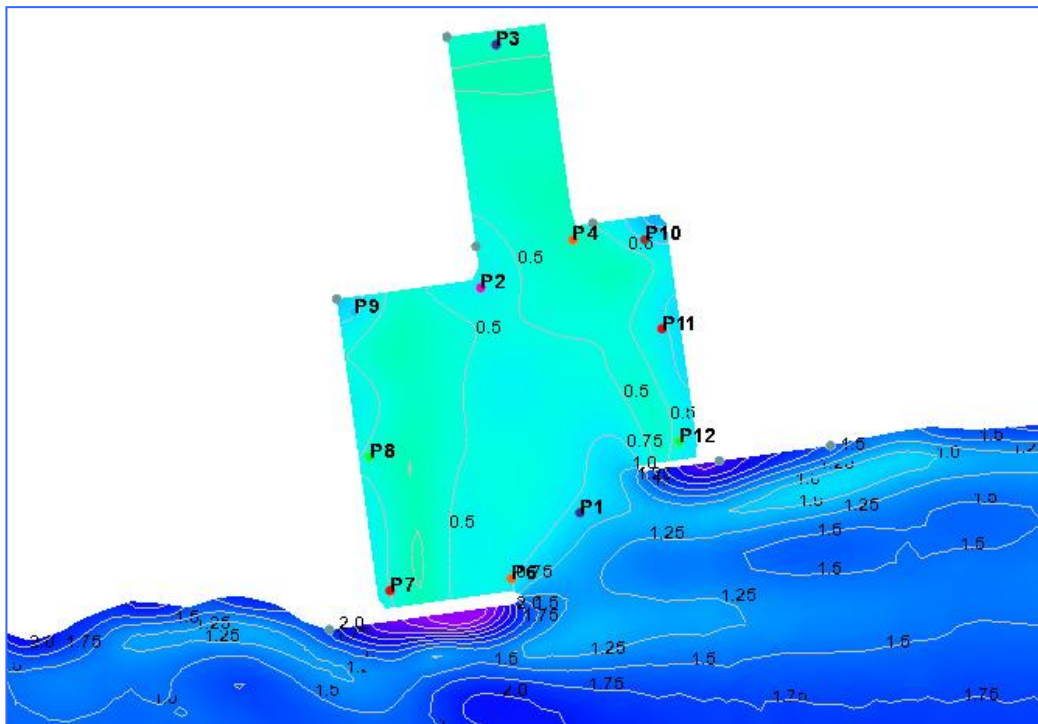


FIGURA A III - 4 Muelle Central A1 Hs 2.10 m Tp 5.20 s Dir W

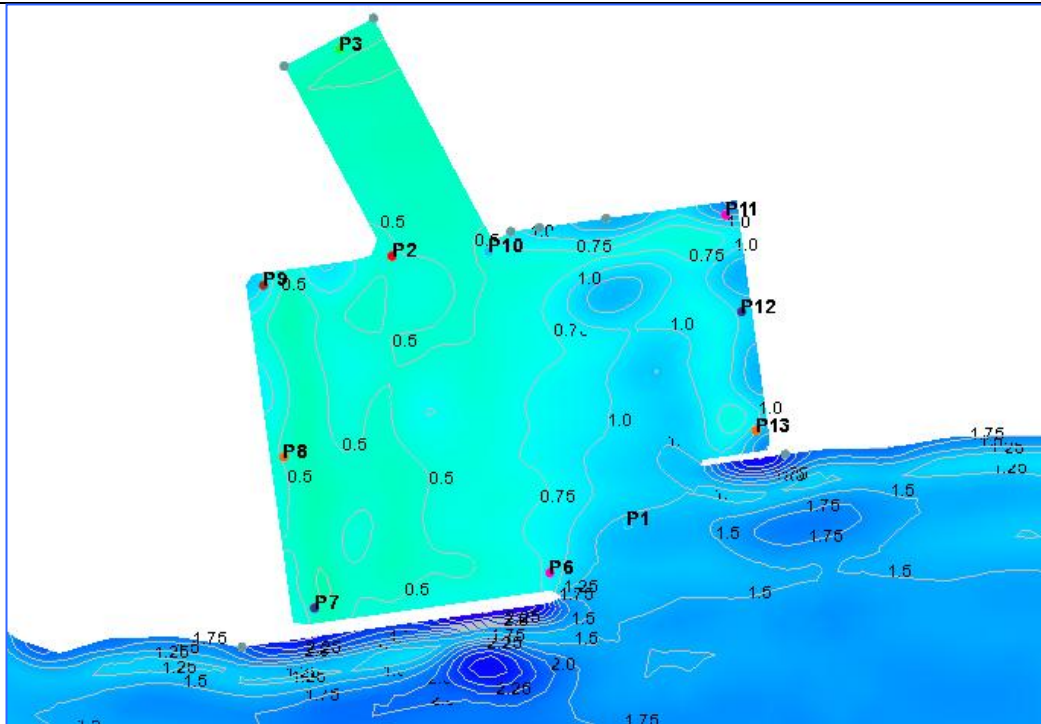


FIGURA A III - 5 Muelle Central A1b Hs 1.73 m Tp 4.29 s Dir Sur

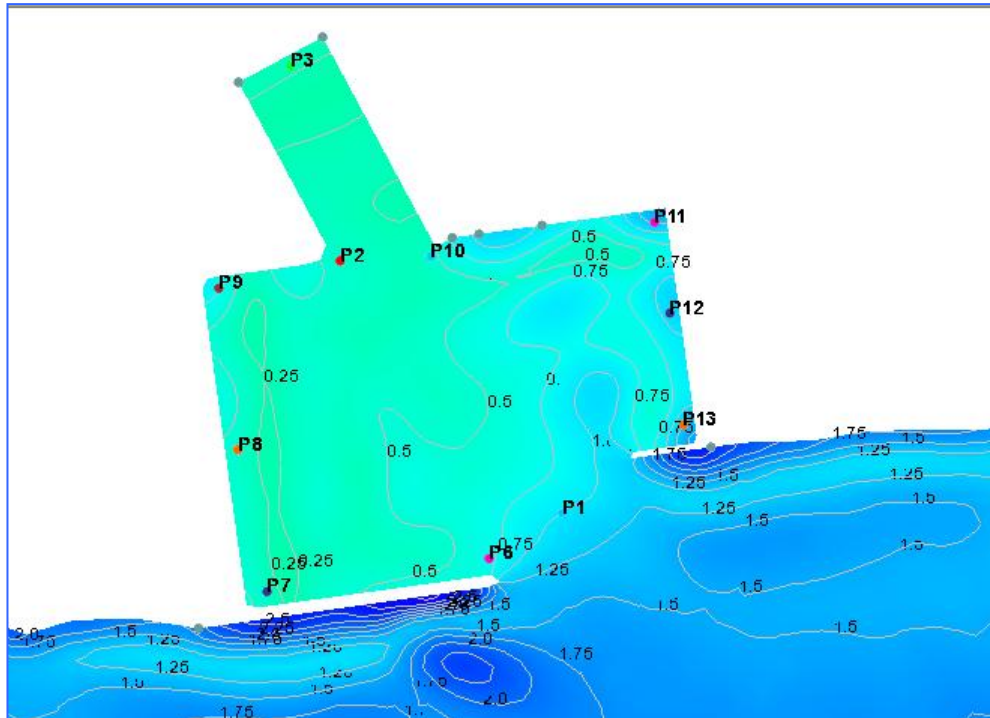


FIGURA A III - 6 Muelle Central A1b Hs 2.10 m Tp 5.20 s Dir W

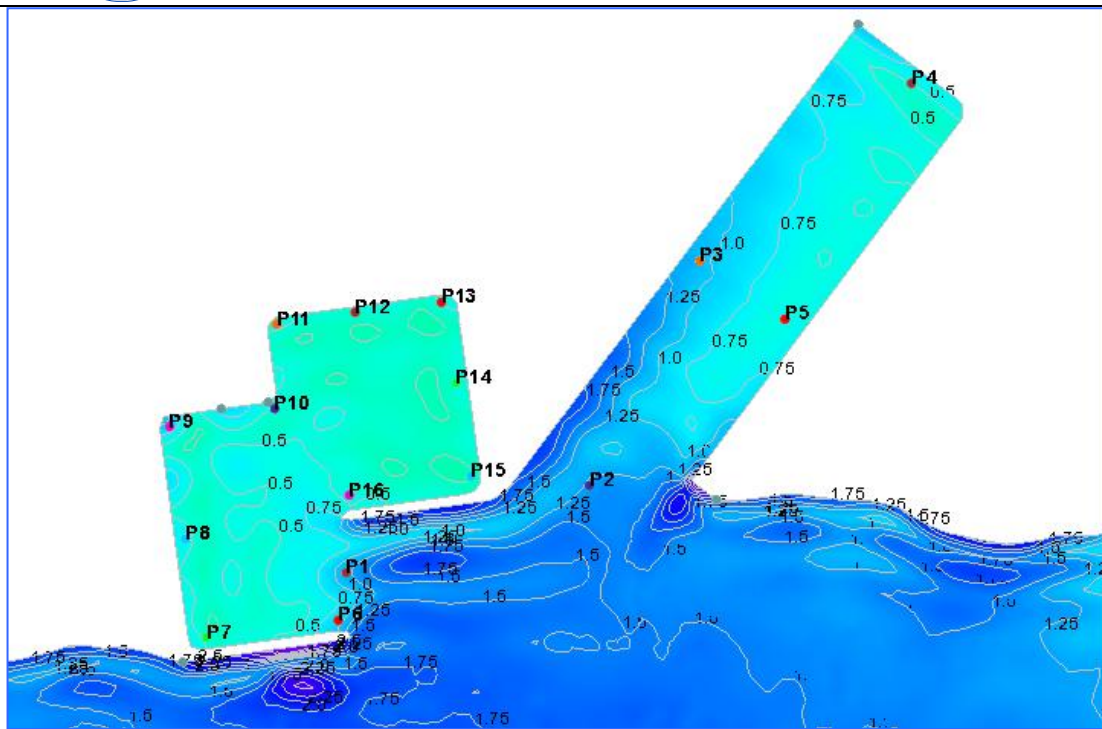


FIGURA A III - 7 Muelle Central A 5 Hs 1.73 m Tp 4.29 s Sur

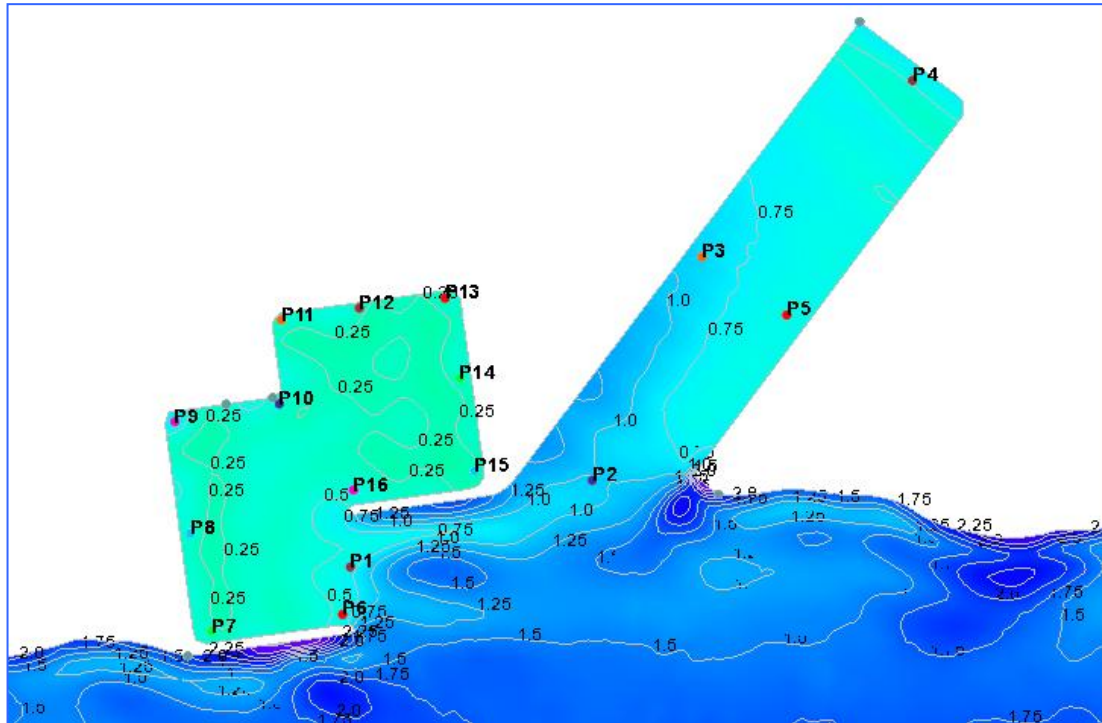


FIGURA A III - 8 Muelle Central A 5 Hs 2.10 m Tp 5.20 s Dir W

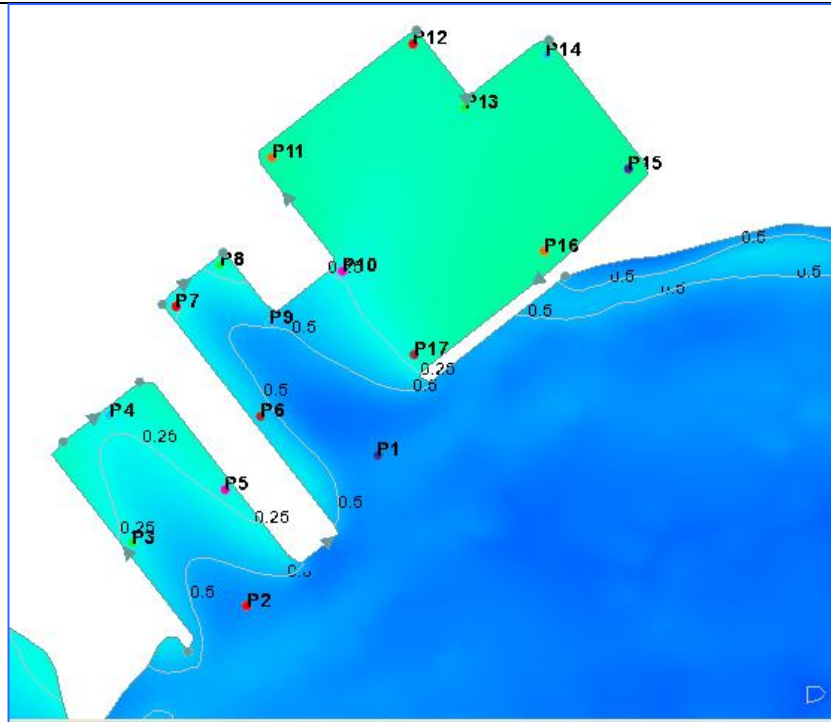


FIGURA A III - 9 Los Hitos (Fer) Hs 1.00 m Tp 4.30 s

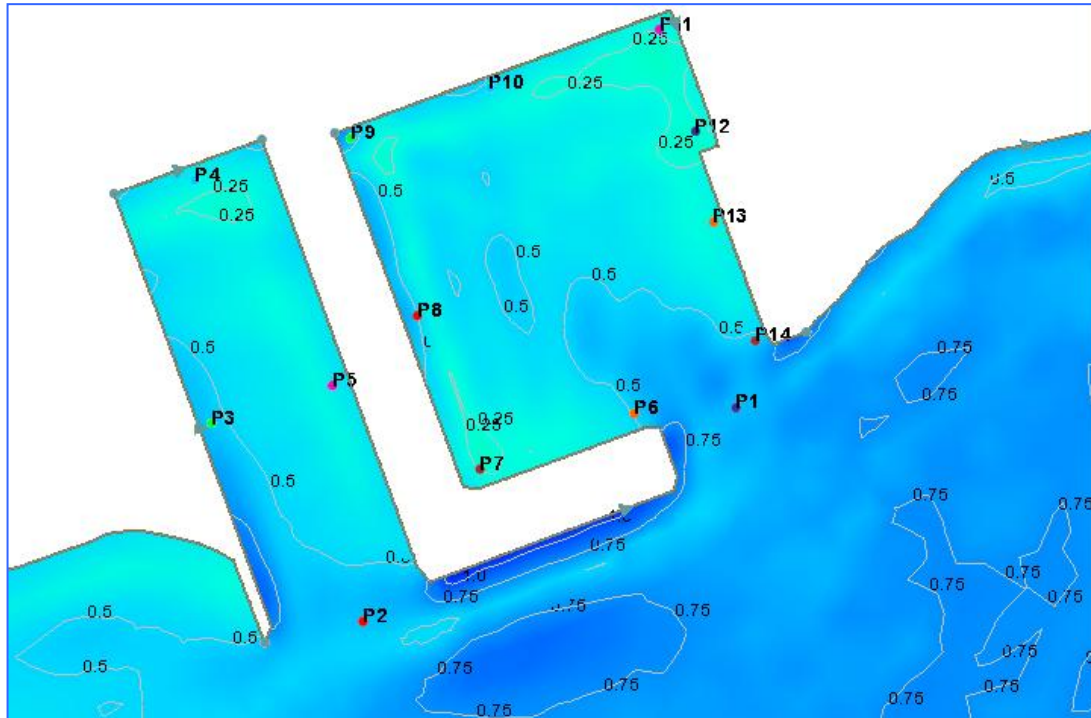


FIGURA A III - 10 Los Hitos (C) Hs 1.00 m Tp 4.30 s

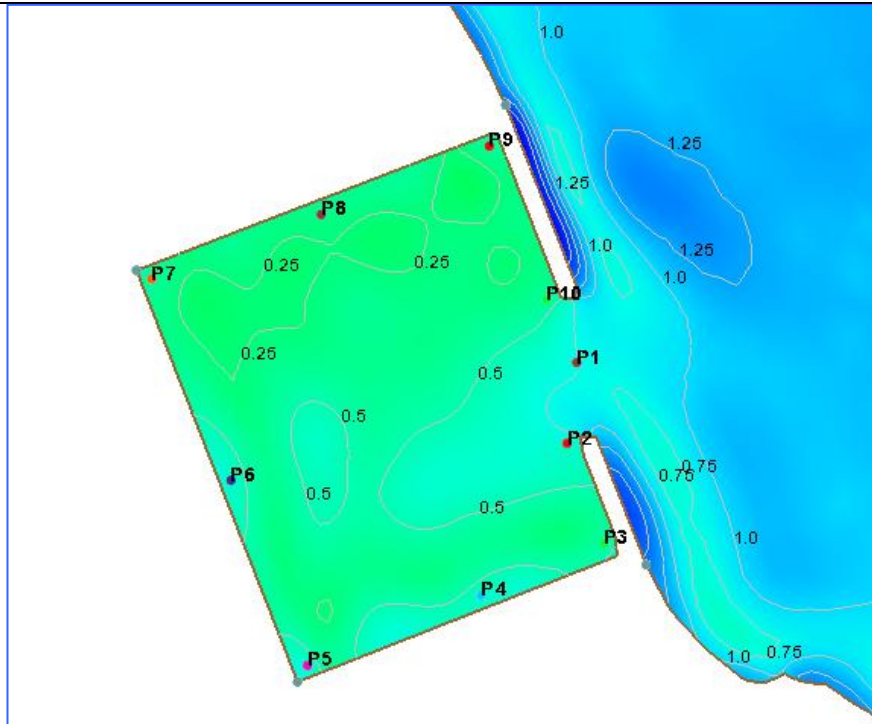


FIGURA A III - 11 Turbio (F) Hs 1.40 m Tp 4.30 s

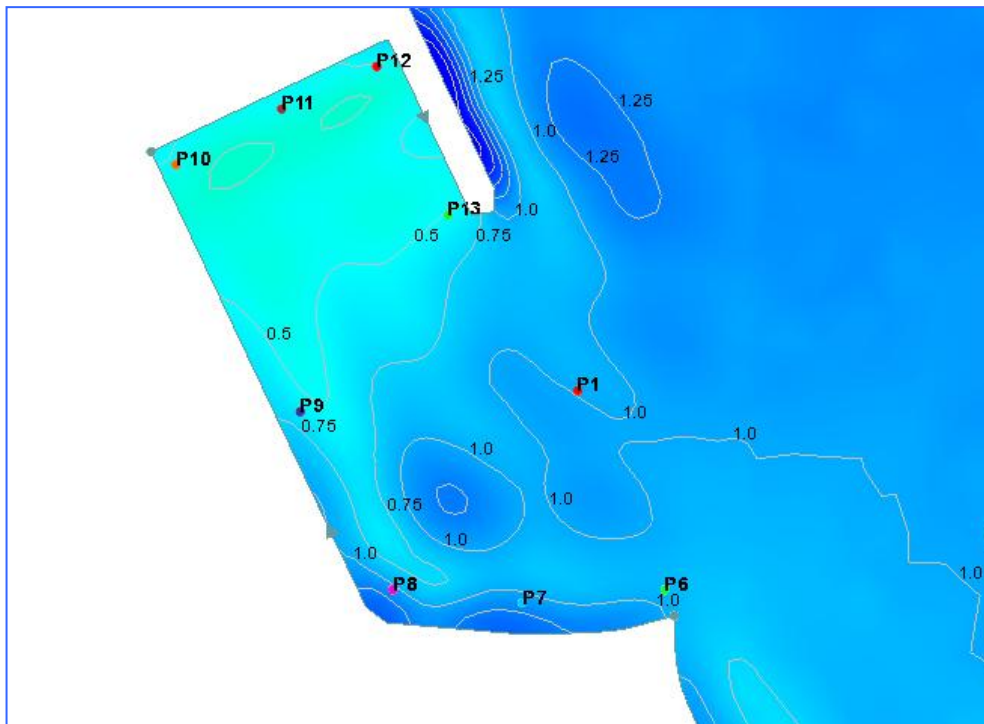


FIGURA A III - 12 Turbio (C) Hs 1.40 m Tp 4.30 s

ANEXO IV

GRÁFICOS VECTORIALES

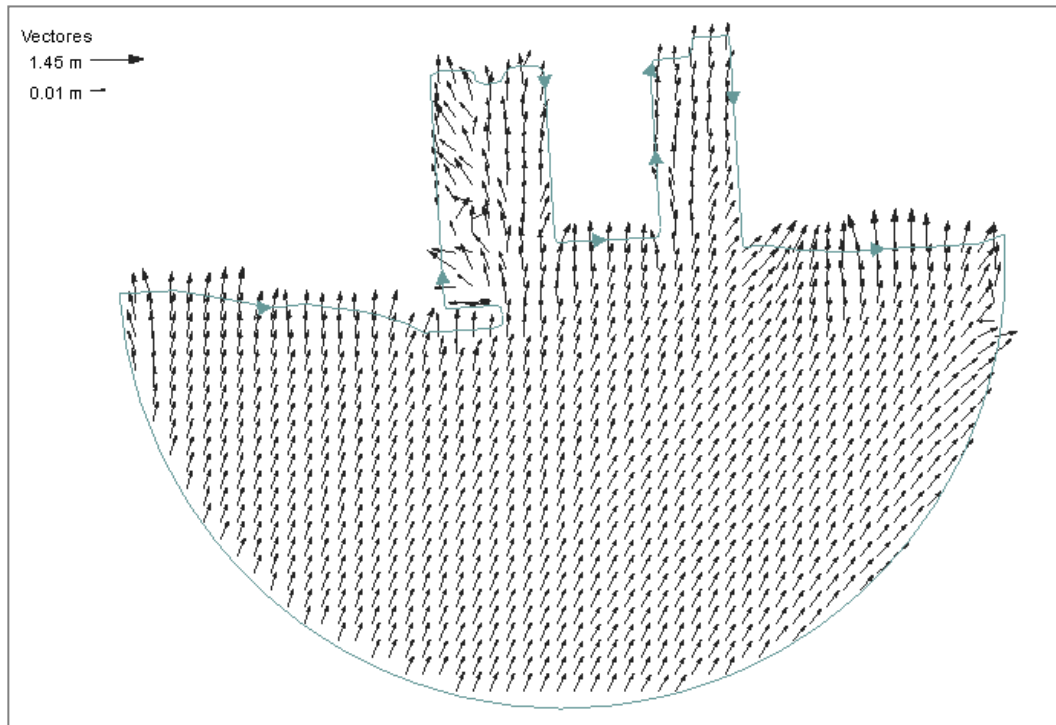


FIGURA A IV - 1 - Área Central Hs 1.73 TP 4.29 s – Dir Sur

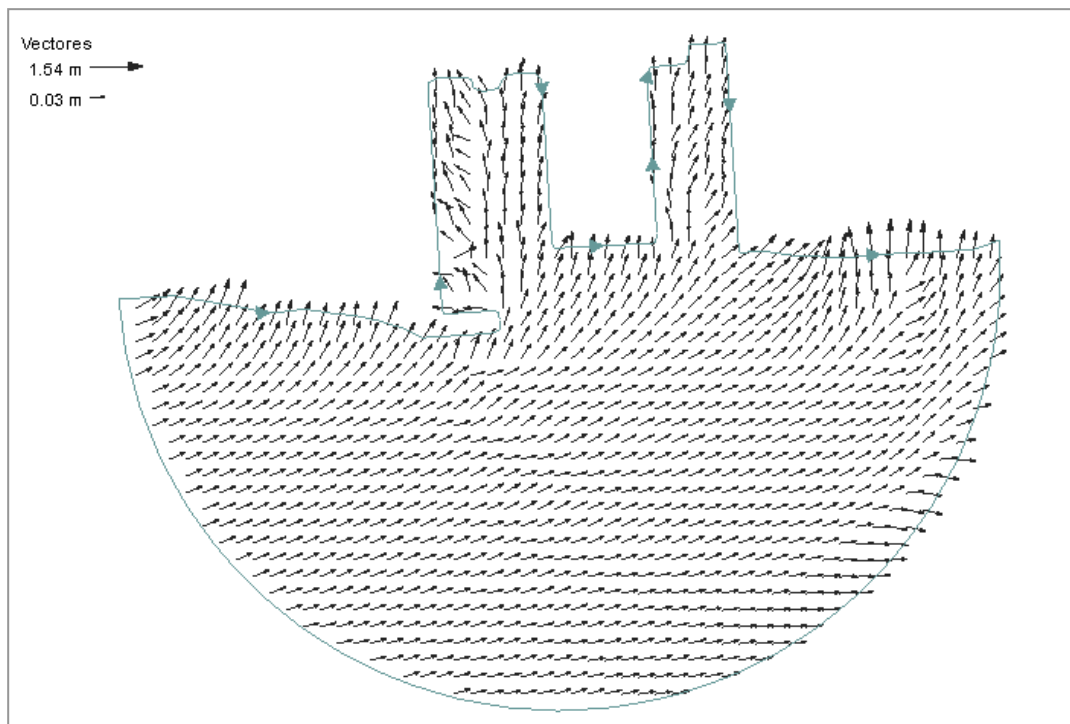


FIGURA A IV - 1 Área Central Hs 2.10m TP 5.20 s Dir W

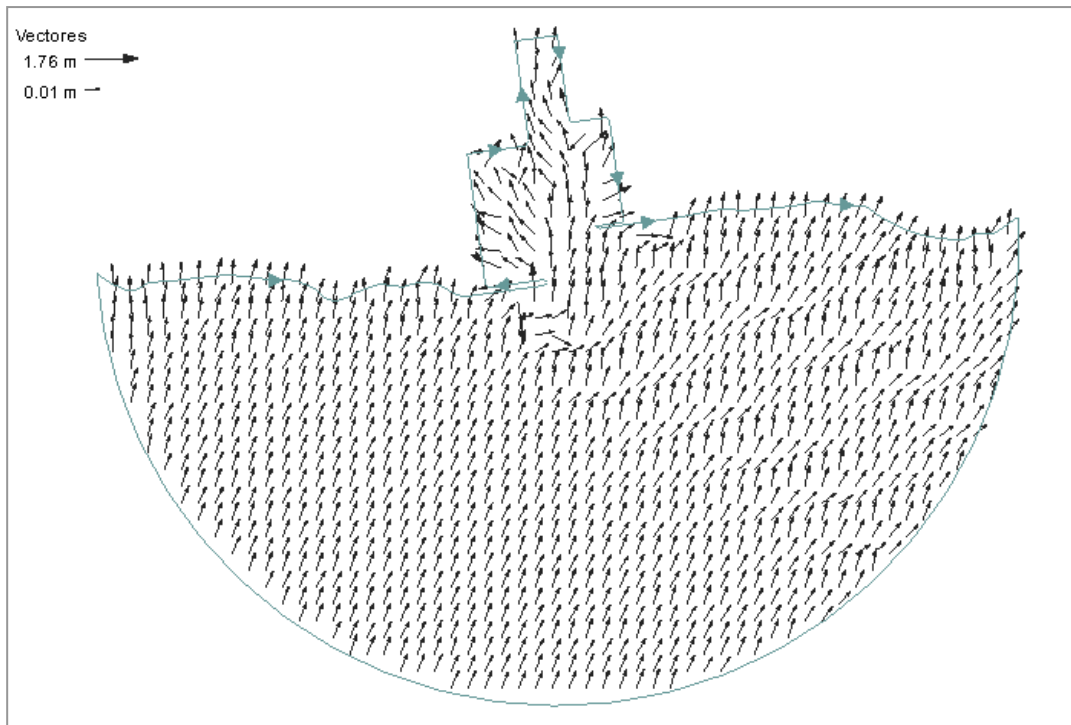


FIGURA A IV - 2 Muelle Central Alternativa 1 Hs 1.73 Tp 4.29 s Dir Sur

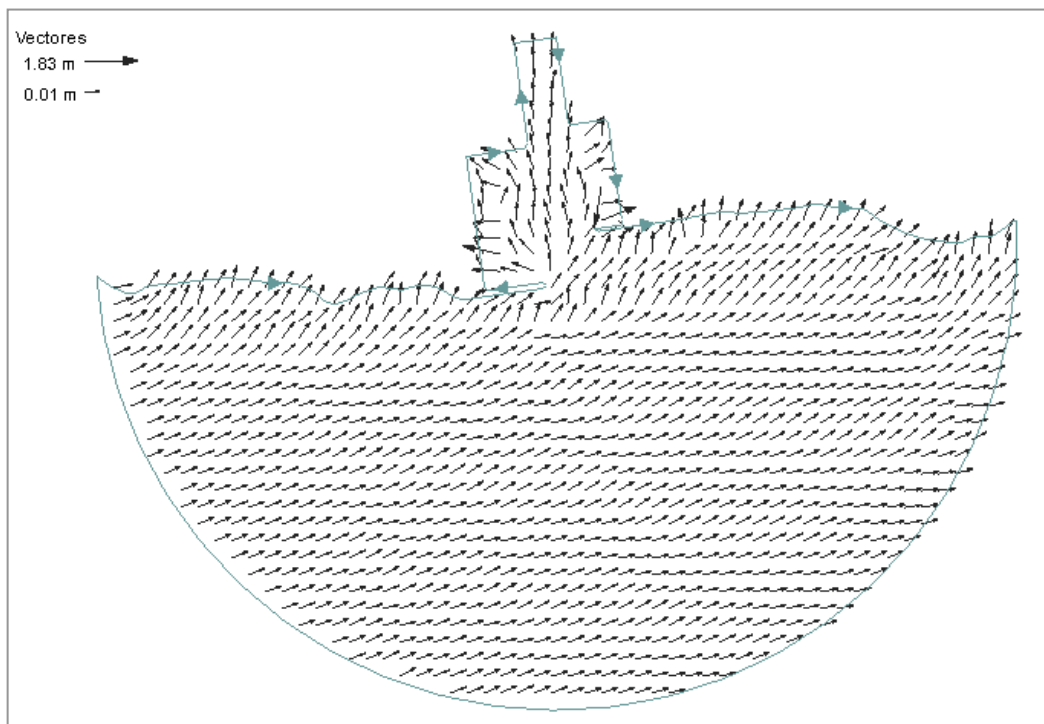


FIGURA A IV - 3 Muelle Central Alternativa 1 Hs 2.10 Tp 5.20 s Dir W

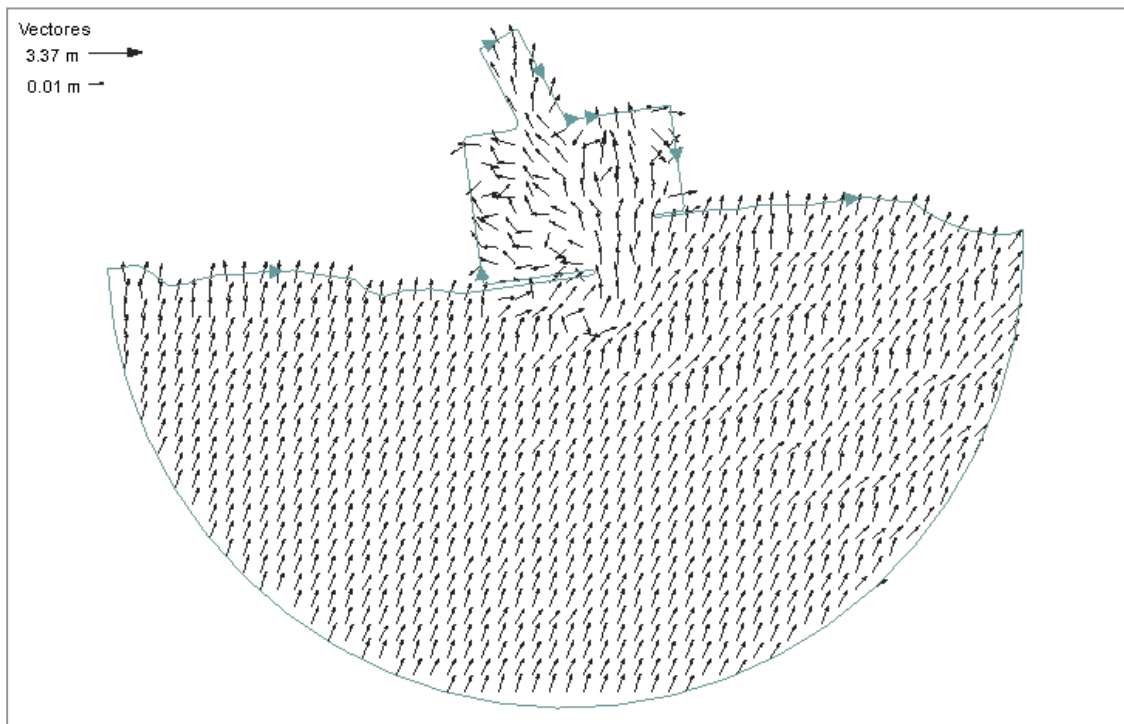


FIGURA A IV - 4 Muelle Central Alternativa 1b Hs 1.73 Tp 4.20 s Dir Sur

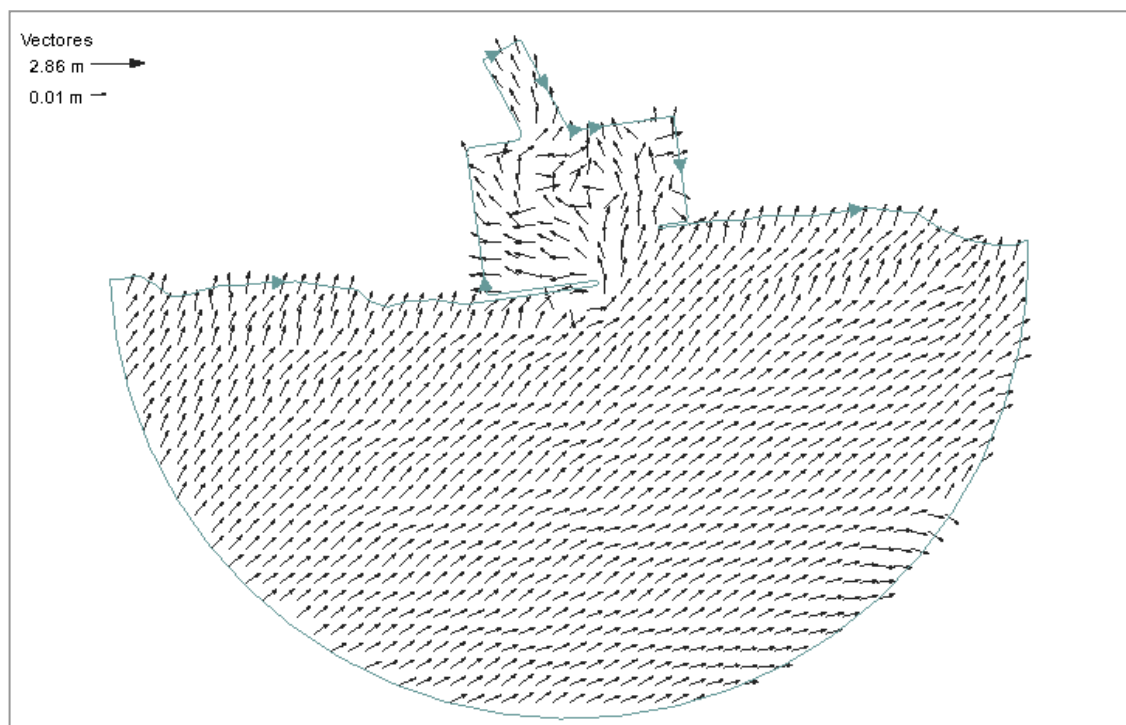


FIGURA A IV - 5 Muelle Central Alternativa 1b Hs 2.10 m TP 5.20 s Dir W

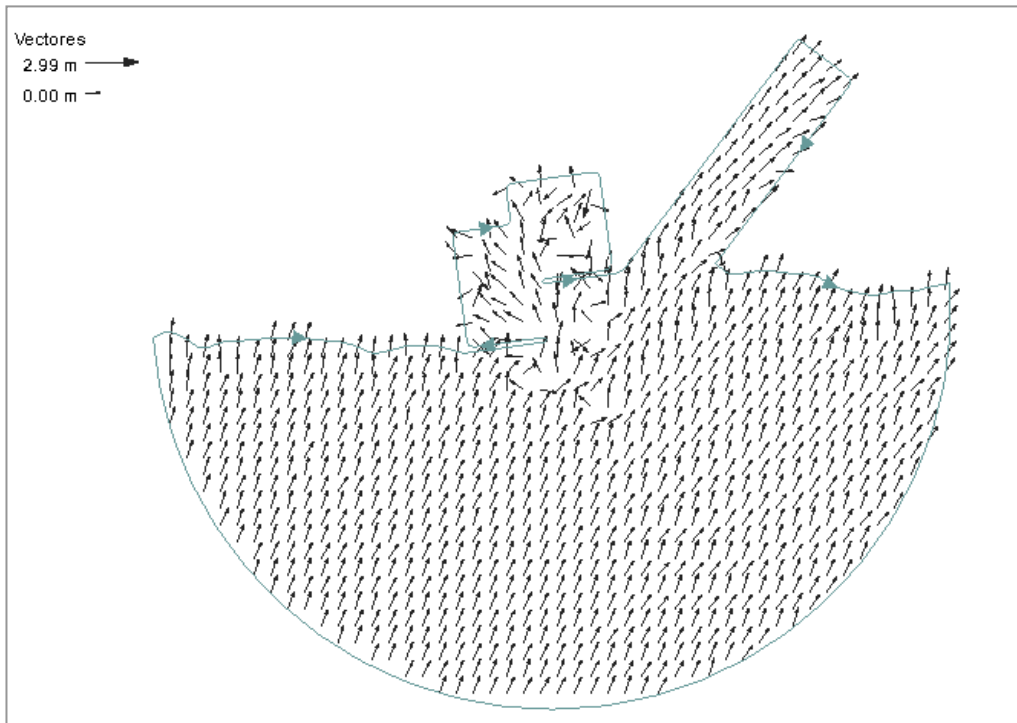


FIGURA A IV - 6 Muelle Central Alternativa 1-5 Hs 1.73 Tp 4.29 s Dir S

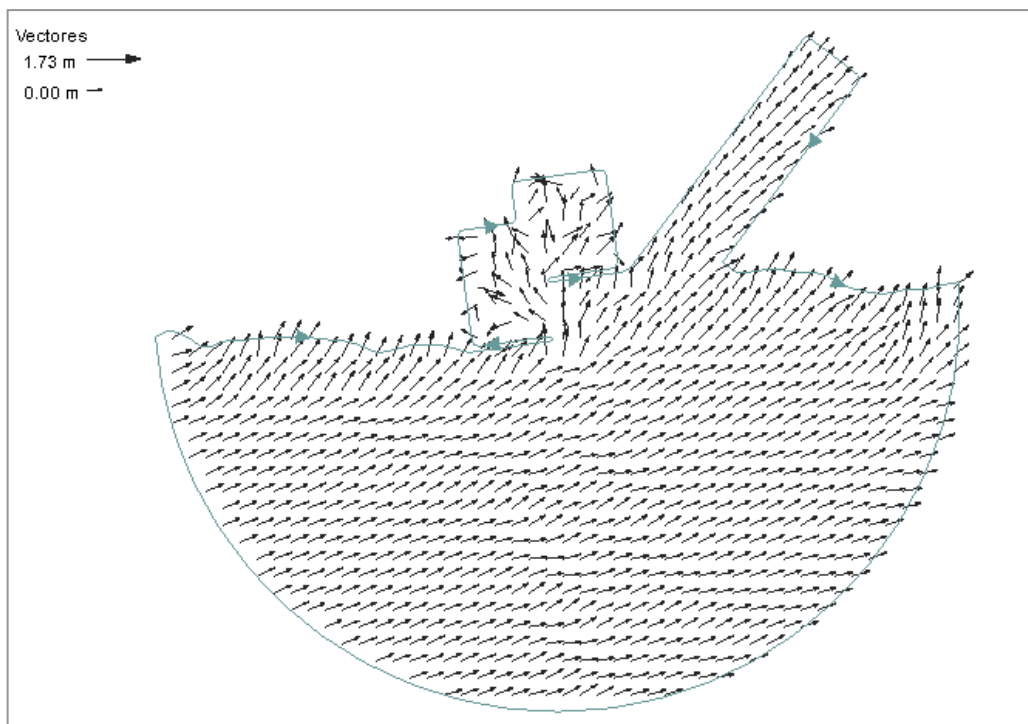


FIGURA A IV - 7 Muelle Central Alternativa 1-5 Hs 2.10 m Tp 5.20 seg Dir W

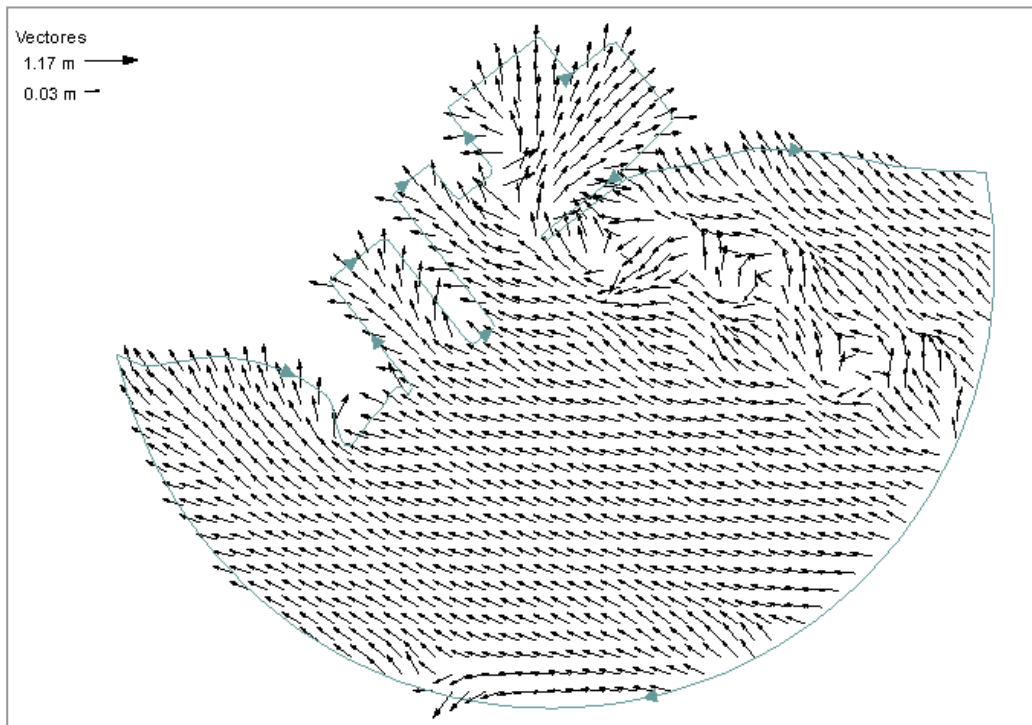


FIGURA A IV - 8 Los Hitos (Fer) Hs 1.00 m Tp 4.30 seg

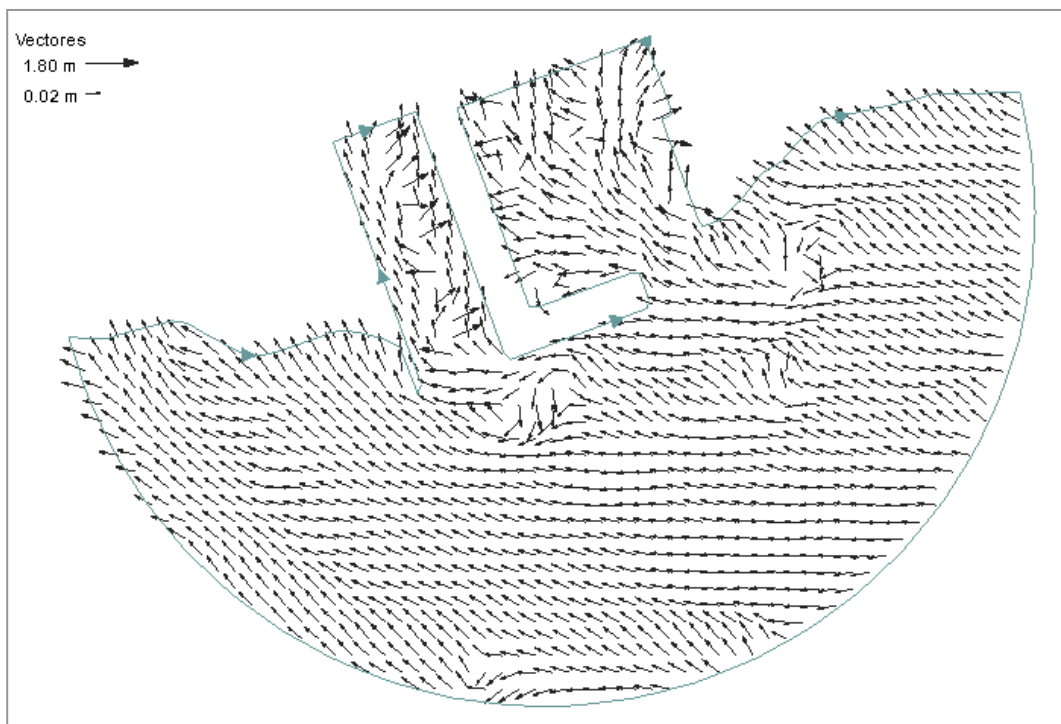


FIGURA A IV - 9 Los Hitos (Cor) Hs 1.00 m Tp 4.30 seg

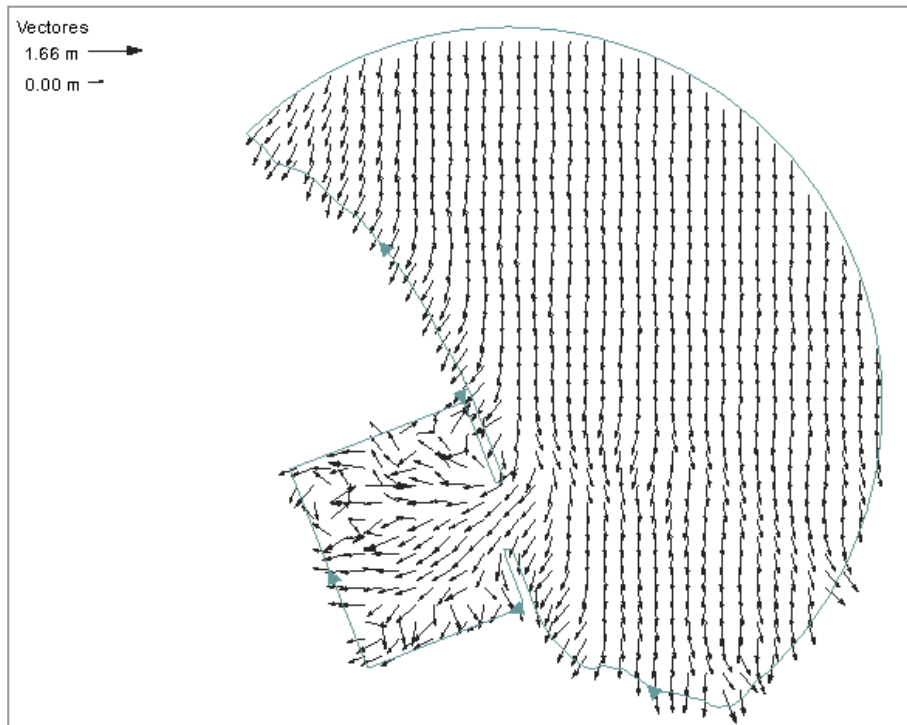


FIGURA A IV - 10 El Turbio (Fer) Hs 1.40 m Tp 4.30 seg

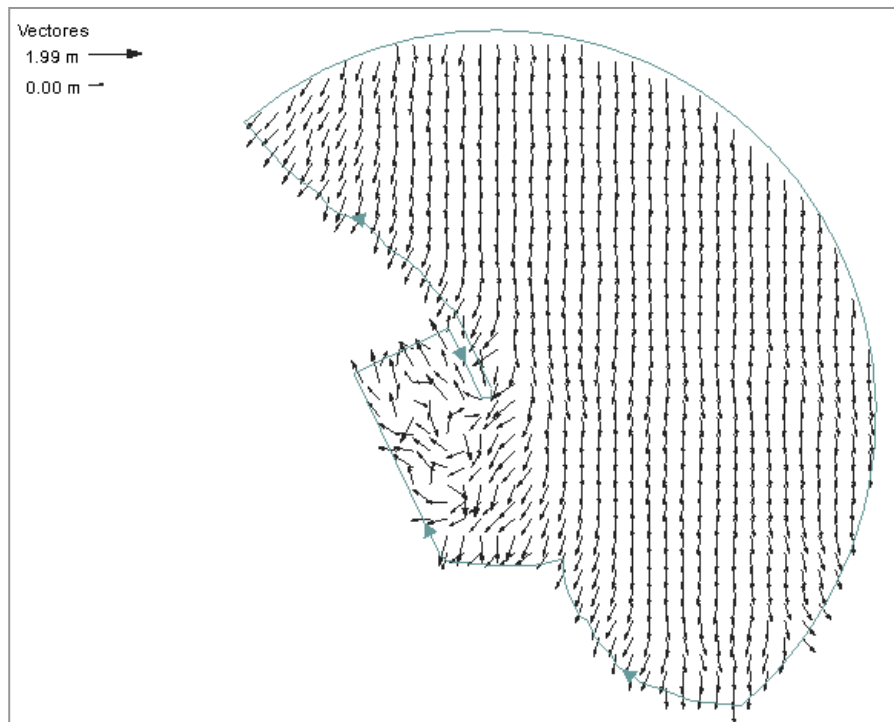


FIGURA A IV - 11 El Turbio (Cor) Hs 1.40 m Tp 4.30 seg