

Fig. 11

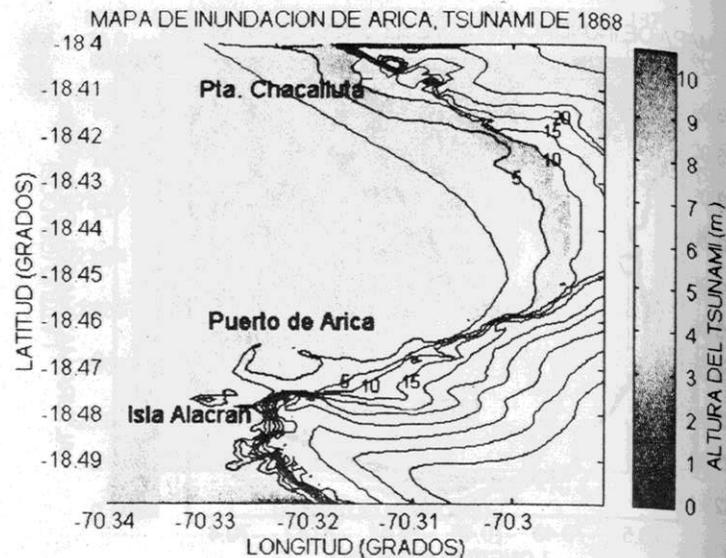
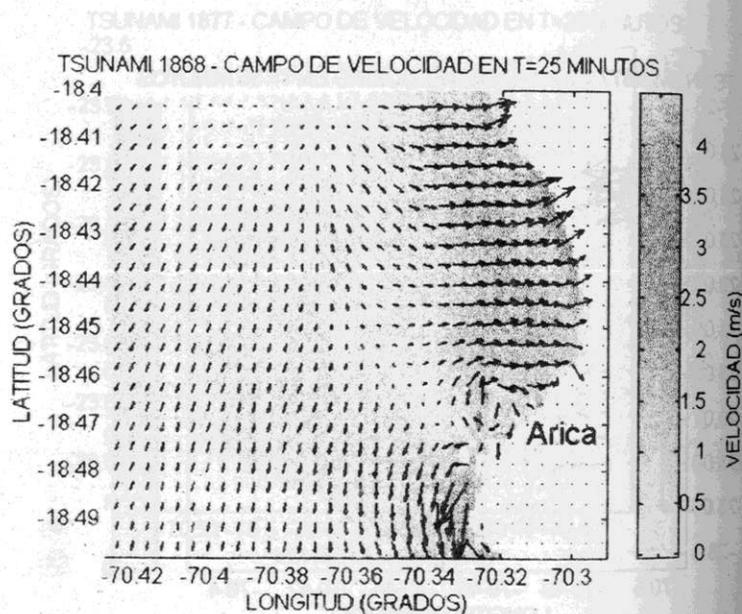


Fig. 12



3.3.- ESTUDIO DE AGITACIÓN EN MODELO NUMÉRICO DEL PUERTO DE ARICA

JOSÉ LUIS MONSÓ DE PRAT ¹
 JAVIER ESCARTÍN ²
 JAIME SERRANO C. ³
 ENRIQUE BOLLMANN S. ⁴

RESUMEN:

En este artículo se presenta un análisis de la problemática de agitación existente en el Puerto de Arica, efectuado mediante modelación matemática.

En dicha modelación se efectúa en primer lugar una propagación del oleaje mediante un modelo «Mild-Slope» y posteriormente un análisis de la agitación interior del Puerto mediante un modelo bidimensional de Boussinesq. Este modelo permite analizar tanto la penetración de oleaje de viento como la agitación y amplificación debida a ondas largas. El estudio efectuado ha permitido sacar valiosas conclusiones acerca de la operatividad del puerto, tanto para la configuración actual como para diversas alternativas de ampliación.

¹ Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Consejero Delegado INHA
² Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Europrincipia
³ Ingeniero Civil. Jefe División Planificación y Desarrollo. EMPORCHI
⁴ Ingeniero Civil. Gerente General Asintota Ltda.

1.- OBJETO DEL ESTUDIO

El objeto final del «Estudio de Agitación en Modelo Numérico del Puerto de Arica» ha sido la caracterización del Puerto de Arica desde un punto de vista de la operatividad portuaria tanto para la situación actual como para posibles alternativas de ampliación. Para ello se cuantificaron los niveles de agitación considerados como críticos para el correcto desarrollo de distintas operaciones portuarias, tales como:

- * la navegación por la bocana del puerto,
- * el atraque/amarre y permanencia de naves en los sitios, y
- * la carga/descarga de naves.

2.- METODOLOGÍA EMPLEADA

En este estudio se ha seguido la metodología a continuación expuesta:

- obtención de la información de base para tener el conocimiento del medio físico y medioambiental de la zona de implantación del Puerto de Arica en lo referente a su situación actual y proyectos de futuro;
- estudio de clima marítimo, que incluye la caracterización del oleaje, mareas, corrientes y vientos en la zona;
- propagación del oleaje desde aguas profundas hasta las proximidades del Puerto, mediante la utilización del modelo numérico RD-2DH desarrollado por INHA;
- propagación del oleaje por el interior del puerto, mediante la utilización del modelo numérico WAVES - 2DH desarrollado por INHA. El estudio se ha efectuado tanto para la configuración actual (Figura 1), como para dos propuestas de ampliación (Figuras 2 y 3);
- estudios de ondas largas y resonancia, abarcando un abanico de periodos entre los 50 y 500 segundos aproximadamente; y
- análisis de la operatividad portuaria, estimando en primer lugar las alturas de ola críticas para las diferentes operaciones portuarias y posteriormente sus probabilidades de excedencia.

3.- ESTUDIO DEL CLIMA MARÍTIMO

La caracterización del oleaje se efectuó en base a los registros completos de información climatológica registrada por barcos en ruta desde el año 1.850 hasta 1.984 en el área 10°-20° S 70°-80° W, suministrada por el National Climatic Data Center (NCDC) de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). A partir de esta información se ha efectuado un completo análisis de los regímenes medio y extremal del oleaje en alta mar.

Asimismo, en base a información registrada por boya de tipo Waverider se han obtenido las funciones de distribución de la altura de ola significativa, altura de ola máxima y periodo de oleaje, la tabla de encuentros altura de ola significativa-periodo medio y las funciones de correlación entre la altura de ola significativa y el periodo medio.

De este modo se ha efectuado la completa caracterización direccional del oleaje medio, obteniéndose las direcciones reales de incidencia (SSW, SW, WSW, W y WNW), las funciones de distribución de la altura de ola visual por direcciones, la función de distribución escalar del periodo

visual, la tabla de encuentros altura de ola visual-periodo visual y las funciones de correlación entre la altura de ola visual y el periodo visual. Asimismo se ha calculado la correlación entre datos instrumentales y datos visuales, obteniéndose la función de correlación entre la altura de ola visual y la altura de ola visual y la función de correlación entre el periodo medio y el periodo visual. Por último se ha elaborado un completo análisis del clima extremal del oleaje, obteniéndose las funciones de distribución extremales por direcciones.

4.- PROPAGACIÓN DEL OLEAJE HACIA LA COSTA

A partir de la información de oleaje disponible, se ha establecido un total de quince (15) casos representativos del clima marítimo que puede incidir en el Puerto de Arica, y que están clasificados en cinco (5) direcciones y tres (3) periodos: SSW, SW, WSW, W y WNW, y T = 10, 15 y 20 segundos.

Posteriormente se ha procedido a simular numéricamente su propagación desde aguas profundas hasta la costa mediante el modelo RD-2DH elaborado por INHA y que incluye los efectos combinados de «shoaling» o asomeramiento, refracción, difracción, fricción de fondo y altura.

Los resultados de las propagaciones muestran los coeficientes de propagación K_r (definidos como la relación entre la altura de ola en un punto y la altura de ola en aguas profundas) y las direcciones de oleaje propagadas.

Por lo que respecta a los coeficientes de propagación, para los tres periodos los valores máximos se alcanzan con las direcciones W y/o WSW, ya que se propagan muy perpendicularmente a las líneas batimétricas y el efecto de la refracción es por tanto menor, predominando el «shoaling».

Los coeficientes de propagación asociados a las direcciones W y WSW con T = 20s son los mayores de los quince obtenidos y muy superiores al resto. De hecho en ambos casos se obtiene K_r = 1.4, es decir, unos valores considerablemente elevados. Esto es debido a la presencia de dos salientes o cabos «sumergidos» a unas profundidades de entre 125 y 175 metros, tal como puede apreciarse en la batimetría de la Figura 4.

La forma que tienen las líneas batimétricas en esa zona provoca que las ortogonales del oleaje giren, converjan y tiendan a cortarse, pudiendo provocar la presencia de cáusticos, que se caracterizan por una fuerte concentración de energía detrás de ambos salientes (como puede observarse en las Figuras 5 y 6, que representan el campo vectorial y los coeficientes de propagación, respectivamente).

5.- PROPAGACIÓN DEL OLEAJE POR EL INTERIOR DEL PUERTO. AGITACIÓN INTERIOR

Una vez determinadas las características del oleaje en las proximidades del Puerto de Arica se ha procedido a realizar el estudio de propagación del oleaje en su interior, con objeto de poder conocer los niveles de agitación interna en diferentes zonas del mismo. Se han simulado los mismos quince casos de oleaje que se analizaron en la propagación hasta la costa.

Para ello se empleó el modelo numérico WAVES-2DH, elaborado por INHA, que permite tener en cuenta los efectos combinados de «Shoaling» o asomeramiento, refracción, difracción,

fricción de fondo, rotura y reflexión total o parcial del oleaje en los diferentes contornos.

Los resultados de las propagaciones muestran los coeficientes de atenuación K_a (de como la relación entre la altura de ola en un punto interior del puerto y la altura de ola en profundas) en seis zonas diferenciadas del puerto: Sitio N°3, Sitio N°4, Sitio N°5, Sitio N°6, Muelle de Graneles y Bocana (entrada a la poza), para las tres configuraciones ya señaladas (Figura 7).

Análisis de resultados

- Por norma general los coeficientes de atenuación asociados a $T=10s$ son inferiores a los asociados a $T=15s$ y éstos inferiores a los asociados a $T=20s$. Esto sucede tanto para la situación actual como para las dos alternativas de ampliación analizadas.
- En la situación actual para el período de 15s los máximos coeficientes de atenuación (es decir, los mayores niveles de agitación) se obtienen para la dirección WSW, mientras que los mínimos se producen para las direcciones SSW y WNW. Para $T=20s$ los máximos coeficientes de atenuación se obtienen para la dirección W seguida de muy cerca por la dirección WSW, mientras que los mínimos se producen para las direcciones SSW y WNW. Es decir, para 15s y 20s se reproduce fielmente en el interior del Puerto la distribución de la altura de ola en función del período que se produce en las proximidades del muelle.
- En las dos alternativas de ampliación para el período de 15s los máximos coeficientes de atenuación se obtienen en general para la dirección WSW, mientras que los mínimos se producen para las direcciones SSW y W. Para el período de 20s los máximos coeficientes de atenuación se obtienen para las direcciones W y WSW, mientras que los mínimos se producen para las direcciones SSW y WNW. Es decir, para 15s y 20s se sigue reproduciendo bastante fielmente en el interior del Puerto la distribución de la altura de ola en función del período que se produce en sus proximidades.
- En todos los casos, los coeficientes de atenuación asociados a ambas alternativas de ampliación son bastante inferiores a los de la situación actual, siendo la diferencia más acusada para $T=10s$ y menos notoria para $T=20s$.
- Por último, resulta interesante señalar el efecto provocado por el bajo existente a unos 1.000 metros al poniente del dique de abrigo, donde la batimetría presenta un máximo relativo de 14,6 metros. La existencia de este bajo provoca que los frentes de onda se curven detrás suyo y tiendan a cortarse, provocando la presencia de cústicos, es decir, una importante concentración de energía (algo similar ya sucedía en la propagación desde aguas profundas). En función de la dirección de incidencia del oleaje este efecto se propaga directamente hacia la bocana contribuyendo a un incremento de la agitación interior. Así acontece en la situación actual para los oleajes del WSW y parcialmente para los del W. (Ver Figuras 8, 9, 10, 11 y 12). En las dos alternativas de ampliación al alargarse el dique la concentración de energía incide en la bocana para los oleajes del SW y parcialmente los del WSW y SSW, pero la antigua zona de maniobras/bocana al estar ahora protegida por la ampliación del dique presenta unos coeficientes de atenuación menores.

6.- ESTUDIO DE ONDAS LARGAS Y RESONANCIA

Para completar el análisis hidrodinámico del Puerto se ha estudiado la posible existencia de amplificaciones por resonancia producidas por la incidencia de ondas largas en el Puerto de Arica.

Para ello se han determinado los períodos asociados a los principales modos de resonancia del puerto obtenidos previamente por métodos analíticos. Posteriormente se ha simulado su propagación por el interior del puerto (tanto en la hipótesis de la situación actual como de las dos alternativas de ampliación), para lo cual se ha empleado el modelo WAVES - 2DH desarrollado por INIA.

La conclusión principal es que tanto para la situación actual como para la alternativa 1 de ampliación el período más perjudicial es $T=511$ segundos (asociado al primer modo de resonancia o principal), para el cual se registran unos coeficientes de amplificación máximos de 3,02 y 3,19 respectivamente; mientras que para la alternativa 2 de ampliación el período más perjudicial es $T=461$ segundos (también asociado al primer modo de resonancia o principal, pero distinto al anterior ya que esta alternativa incluye un dragado de la poza) para el cual se registra un coeficiente de amplificación máximo de 7,59. Para el resto de modos de oscilación los coeficientes de amplificación son inferiores a 1,7.

7.- ANÁLISIS DE LA OPERATIVIDAD PORTUARIA

7.1.- Determinación de las alturas de ola críticas

En primer lugar se han determinado las alturas de ola críticas, es decir, aquellas a partir de las cuales los movimientos de las embarcaciones son superiores a los máximos admisibles para las diferentes operaciones que pueden efectuarse en la dársena: navegación en la bocana, atraque/amarre/permanencia en los muelles y carga/descarga.

La selección de las alturas de ola crítica dependen de varios factores, tales como el tipo de nave respecto a la nave (de través o de proa), el tipo de nave, y las dimensiones de la misma.

En el caso del Puerto de Arica se han considerado tres naves tipo para las cuales se ha efectuado el análisis de operatividad, cuyas características principales se exponen en la Tabla 1.

Teniendo en cuenta estos antecedentes, y en base a información bibliográfica, se ha elaborado la Tabla 2 en la que para cada tipo de nave y zona del Puerto se presentan los valores de las alturas de ola crítica de carga/descarga y atraque/amarre de naves y permanencia en el muelle. Por lo que respecta al análisis de la navegabilidad de la bocana, se decidió efectuar un barrido de alturas de ola entre 0,5 y 3,0 metros.

7.2.- Factor de utilización

Una vez determinadas estas alturas se ha procedido a calcular el factor de utilización del puerto, definido como la probabilidad de excedencia de las diferentes alturas de ola críticas en las diferentes zonas del Puerto, lo cual da una idea de la operatividad del Puerto de Arica.

Básicamente existen dos agentes que pueden causar inoperatividad en un Puerto: el oleaje asociado a los temporales (y que por tanto presenta alturas de ola elevadas), y las ondas largas, caracterizadas por un período elevado y una amplitud de onda en mar abierto baja, y que sin embargo pueden producir problemas a los barcos atracados por fenómenos de resonancia.

7.3.- Inoperatividad por oleaje

Por lo que respecta al cálculo de la inoperatividad provocada por el oleaje se han considerado dos situaciones: la determinación de las probabilidades de excedencia medias de las alturas de oleaje crítica en las diferentes zonas del Puerto (esto es, oleaje medio) y la determinación de las alturas de oleaje crítica en el interior del Puerto asociados a un temporal con un periodo de retorno de los años y su comparación con las alturas de ola crítica (esto es, oleaje extremo).

7.4.- Inoperatividad causada por ondas largas

Se calcularon los coeficientes de amplificación de una serie de ondas largas con periodos entre los 50 y los 500 segundos aproximadamente para las tres configuraciones analizadas. Con estos datos se puede determinar la amplitud de una onda larga en el interior del Puerto conociendo sus características en el exterior, esto es, antes de modificarlas como consecuencia de la interacción con dique y muelles. Asimismo el modelo numérico empleado permite determinar el campo de velocidades asociado a dichas ondas largas.

Desgraciadamente, al no disponerse de información fiable acerca de la existencia de ondas largas en esta zona del Océano Pacífico, así como de su posible caracterización por medio de sus periodos (de gran trascendencia), amplitudes y direcciones de propagación, no se pudo efectuar el tratamiento estadístico de este fenómeno.

8.- RESULTADOS Y CONCLUSIONES

La principal conclusión del estudio realizado es que los problemas de inoperatividad que presenta el Puerto de Arica en la actualidad no parecen ser motivados por el oleaje (considerando éste como ondas con un periodo inferior a un valor en torno a los 20 segundos).

Esta afirmación se basa en que la configuración actual no parece presentar problemas de permanencia de las naves en los diferentes muelles, ya que las probabilidades de excedencia de las alturas de ola crítica son nulas.

Tampoco, en la situación actual, las operaciones de carga y descarga de las naves presentan unas probabilidades de excedencia demasiado elevadas; así, la peor situación tiene lugar en el Muelle N°6 durante la operación de carga o descarga del portacontenedor, para la cual se produce una excedencia de la altura de ola crítica de 67 horas al año.

Por último, en cuanto a la navegabilidad de la bocana, puede apreciarse que en la situación actual las alturas de ola pequeña presentan cierta probabilidad de excedencia, pero estos valores no son en principio preocupantes ya que la excedencia de alturas de cierta importancia ($H > 1.5$ metros) es prácticamente nula.

En lo que respecta a las dos alternativas de ampliación consideradas, ambas reducen dichas probabilidades de excedencia a valores todavía inferiores, sin producirse efectos negativos por esta configuración.

Otra de las conclusiones importantes del estudio es que no se dispone de ninguna información fiable acerca de la existencia de ondas largas en esta zona del Océano Pacífico, por lo que no

está en disposición de cuantificar en términos de horas al año la inoperatividad del Puerto de Arica debido a la incidencia de ondas largas.

RECOMENDACIONES

Por lo expresado, se ha recomendado una campaña de toma de datos en el interior del Puerto de Arica por medio de una adecuada instrumentación que permita determinar la gama completa de periodos de las ondas incidentes. Gracias a dicha instrumentación se dispondría de una serie de registros brutos a los cuales se les debería aplicar un completo estudio espectral que permitiese determinar los periodos de las ondas incidentes, incluyendo los de oleajes y la presencia de ondas largas.

Adicionalmente y durante los intervalos de inoperatividad del Puerto convendría efectuar una grabación de las naves atracadas en los diferentes amarres para poder estimar los tipos de movimientos que impiden efectuar las operaciones portuarias, así como sus amplitudes y periodos de resonancia.

Otras recomendaciones más genéricas en el caso de que se efectúen obras en el puerto de Arica son:

- Evitar geometrías en planta que sean excesivamente rectangulares o cuadradas;
- La introducción de sistemas de amarre apropiados;
- Evitar atraques en las zonas de los nodos.

REFERENCIAS

- MONSÓ, J. L. (1986) - Modelado numérico del flujo costero. Tesis doctoral. Servicio de publ. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, España, Enero de 1986.
- PHILPOTT, K. L. (1969) - Ship movements and wave agitation. Considerations on the adoption of standard criteria for harbour design, Danish Institute of Applied Hydraulics, July 1964.
- BRATTELAND, E. (1974) - A survey on acceptable ship movements in harbours, The Dock & Harbours Authority, Vol. LV, N.647, September 1974.
- Le MÉHAUTÉ, B. (1977) - Wave agitation criteria for harbours. Proceedings, Forth Annual Symposium of the Waterways, Port and Coastal and Ocean Division of ASCE (PORTS 77), Long Beach, March 1977.
- HARRIS (1981) - Concept master plan for the expansion of the port of Sines, PRC Harris Inc., Lisbon, August 1981.
- HARRIS (1982) - Port of Sines. Comparative layout report, PRC Harris Inc., Lisbon, July 1981.

Tabla 1 Características de Naves Tipo

Tipo de buque	Carguero general	Portacontenedores	Granelero sólido
Eslora (m)	172	270	
Calado (m)	9,1	12	208
Manga (m)	22	32	11,4
DWT	15.000	36.000	30,2 40.000

Tabla 2 Alturas de olas críticas en cada zona

Zona	Hcritica (m)	Criterio
Sitio nº 3	0,50	Carga y descarga del carguero general y portacontenedores. Permanencia en muelle de carguero general y portacontenedores.
	0,80	
Sitio nº 4	0,30	Carga y descarga del portacontenedores. Carga y descarga del carguero general. Permanencia en muelle del carguero general y portacontenedores.
	0,50	
	1,20	
Sitio nº 5	0,30	Carga y descarga del portacontenedores. Carga y descarga del carguero general. Permanencia en muelle del carguero general y portacontenedores.
	0,50	
	1,20	
Sitio nº 6	0,30	Carga y descarga del portacontenedores. Carga y descarga del carguero general. Permanencia en muelle del carguero general y portacontenedores.
	0,50	
	1,20	
Muelle Granelero	0,80	Carga y descarga del granelero. Permanencia en muelle del granelero.
	1,20	
Bocana	0,50	Criterios de navegabilidad.
	1,00	
	1,50	
	2,00	
	2,50	
	3,00	

Figura 1
Puerto de Arica
Configuración Actual

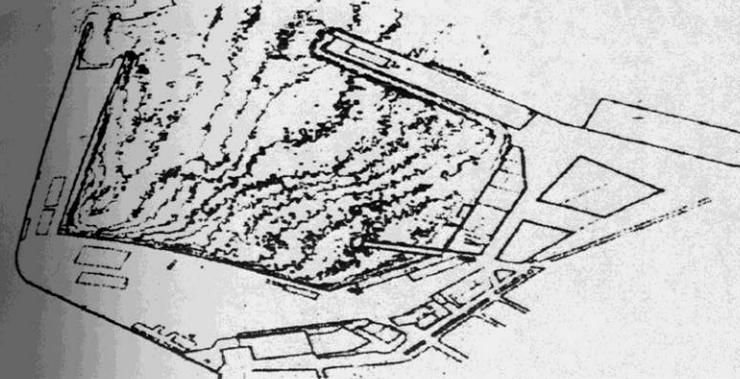


Figura 2
Puerto de Arica
Alt.1 de Ampliación

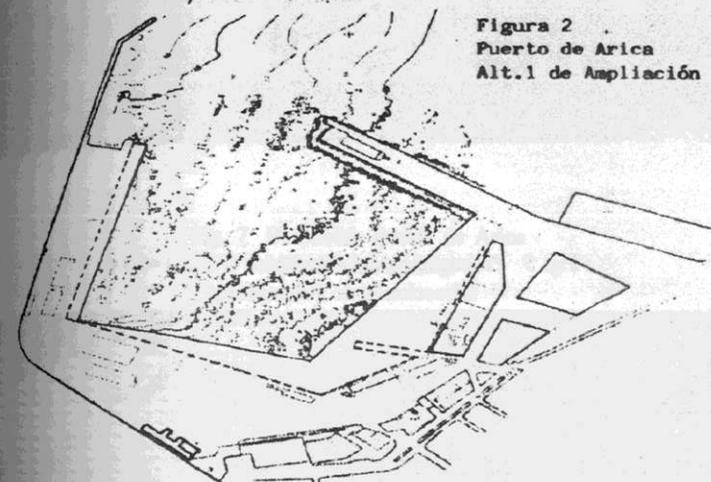


Figura 3
Puerto de Arica
Alt.2 de Ampliación

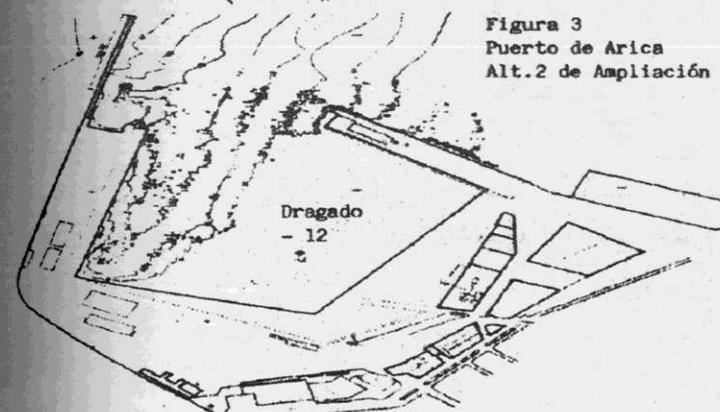


Fig. 4 Batimetría Costera

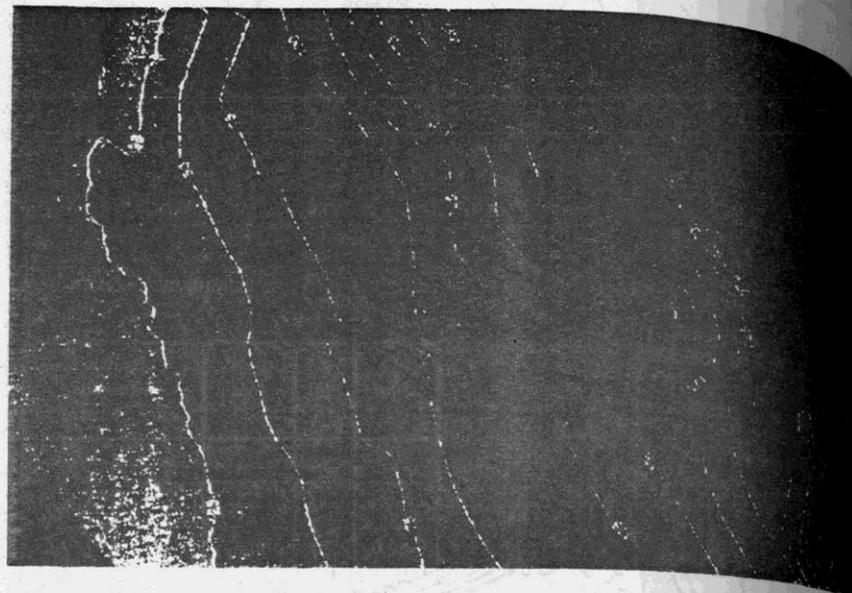


Fig. 5 Propagación del Oleaje del WSW T=20 s
Direcciones de Propagación

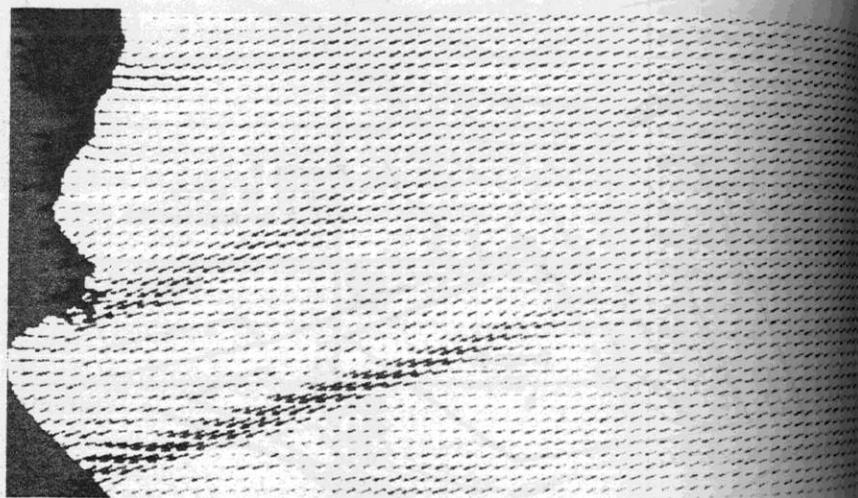


Fig. 6 Propagación del Oleaje del WSW T=20 s
Coeficiente de Propagación K_r

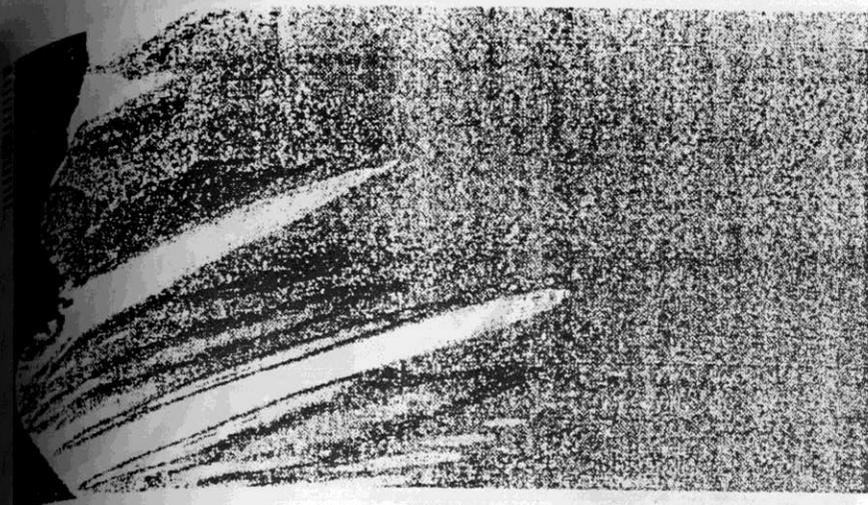


Fig. 7 Batimetría Puerto de Arica
Situación Actual

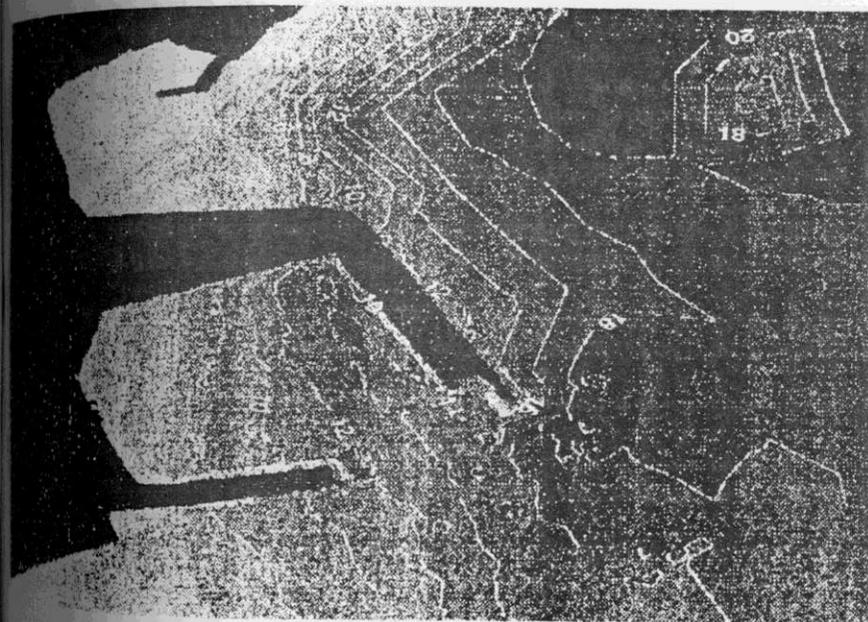


Fig. 8 Oleaje del WSW $T=20$ s
Coeficiente de Atenuación
Situación Actual

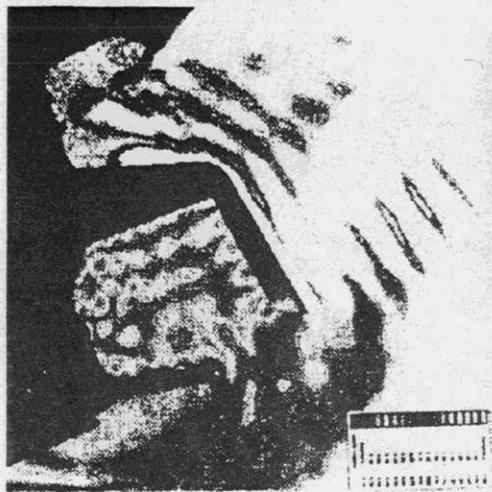


Fig. 9 Oleaje del WSW $T=20$ s
Superficie Libre
Situación Actual

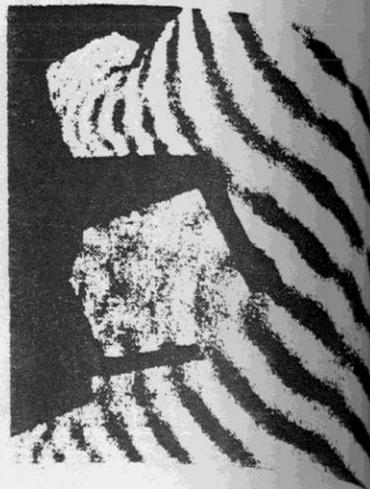


Fig. 10 Oleaje del WSW $T=20$ s
Coeficiente de Atenuación



Fig. 8 Oleaje del WSW $T=20$ s
Coeficiente de Atenuación
Alt. 2 de Ampliación



SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XIII CONGRESO CHILENO



UNIVERSIDAD
DE SANTIAGO DE CHILE



SOCIEDAD CHILENA DE
INGENIERÍA HIDRÁULICA

LUIS AYALA R.¹
ALEJANDRO LOPEZ A.²

PARTE 4

HIDRÁULICA APLICADA