

MINISTERIO DE PLANIFICACIÓN FEDERAL, INVERSIÓN PÚBLICA Y SERVICIOS
SECRETARÍA DE OBRAS PÚBLICAS
SUBSECRETARÍA DE RECURSOS HÍDRICOS



DEFENSA COSTERA EN POSADAS (MISIONES)

EVALUACIÓN DEL OLEAJE

INFORME FINAL

*Informe LHA -266- 01-06
Octubre, 2006*

LABORATORIO DE HIDRAULICA



DEFENSA COSTERA EN POSADAS (MISIONES)

EVALUACIÓN DEL OLEAJE

INFORME FINAL

RESUMEN: Se presentan resultados de un análisis de vientos extremos y de las olas generadas en el entorno de una obra de defensa costera en la ciudad de Posadas (Misiones). Las simulaciones numéricas para el cómputo del oleaje generado por el viento se realizaron mediante el modelo matemático SWAN. En particular se consideró para el cálculo que el embalse de Yacyretá se encuentra a la máxima cota de operación de + 83m.

PALABRAS CLAVE defensa de costas - régimen de viento - pronóstico de olas – propagación de olas - modelos matemáticos - Embalse Yacyretá - Río Paraná - Posadas

Informe	LHA 266-01-06
Fecha	Octubre, 2006
PROYECTO	656
COMITENTE	CORIPA S.A.



Director del Laboratorio de Hidráulica

Ing. Julio De Lio

Jefe del Programa de Hidráulica Marítima

Ing. R. D. Castellano

EQUIPO DE TRABAJO

Téc. Mec. Carlos Haspert

Ing. Nicolás Tomazin

M.M.O. Sebastián Peralta



INDICE DE MATERIAS

1	INTRODUCCIÓN	1
2	OBJETIVOS GENERALES	2
3	DATOS DE BASE	3
	3.1 DESCRIPCIÓN DE LA OBRA DE DEFENSA.....	3
	3.2 TOPOBATIMETRÍA	6
	3.3 VIENTOS.....	7
	3.4 NIVELES LÍQUIDOS	7
4	ANÁLISIS DE VIENTOS	11
5	COMPUTO DEL OLEAJE	16
	5.1 MODELO MATEMÁTICO	16
	5.2 EL MODELO NUMÉRICO	17
	5.3 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO.....	18
	5.3.1 Área modelada.....	18
	5.3.2 Nivel líquido.....	19
	5.3.3 Dirección, intensidad y duración del viento.....	19
	5.4 ESCENARIOS DE CÁLCULO	24
	5.5 RESULTADOS.....	24
6	CONCLUSIONES	28

1 INTRODUCCIÓN

El presente Informe describe las tareas realizadas en el marco de un requerimiento realizado por CORIPA S.A. al INSTITUTO NACIONAL DEL AGUA (INA) en relación con la evaluación del oleaje probable sobre una defensa costera en la ciudad de Posadas (Misiones).

2 OBJETIVOS GENERALES

Los estudios que se realizan tienen como objetivo general la evaluación de la ola máxima probable de ocurrir sobre una protección de talud ubicada sobre el río Paraná, Km 1585, margen izquierda, en la ciudad de Posadas, Provincia de Misiones.

El estudio se lleva a cabo sobre la base de simulaciones numéricas, mediante un modelo matemático.

Para ello se desarrollan los siguientes objetivos parciales:

- Evaluación del régimen de vientos en el área. Determinación de condiciones extremas.
- Implementación de un modelo matemático de predicción de olas por acción del viento.
- Evaluación de los escenarios de cálculo.
- Utilización del modelo matemático para predicción de eventos extremos de ola.

3 DATOS DE BASE

3.1 Descripción de la obra de defensa

La obra de defensa costera se halla ubicada en el Río Paraná, a la altura del Km 1585 (ver **Figura 1**), y se integra con una remodelación de una avenida costanera de la ciudad de Posadas (Provincia de Misiones).

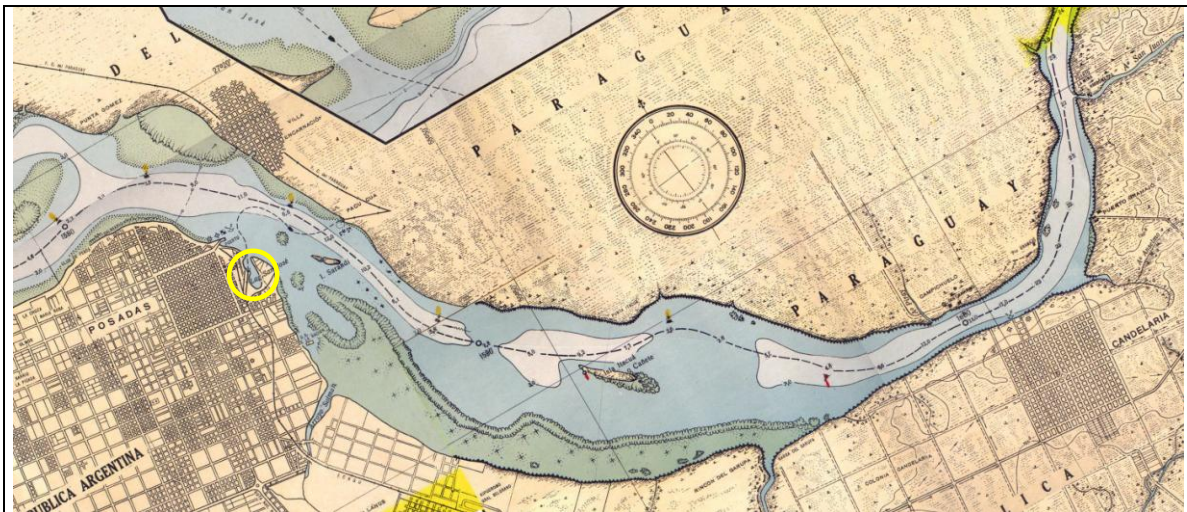


Figura 1 – Ubicación de la obra de defensa

La imagen satelital de la **Figura 2** muestra la inserción del tramo de la obra de defensa estudiado. La misma se halla inmediatamente al norte del puente que vincula Posadas con la ciudad paraguaya de Encarnación.

La obra se desarrolla a lo largo de unos 1100 m sobre la margen sur y oeste de la denominada Laguna San José, una entrada del río Paraná separada del cauce principal por la península Heller. Con el embalse de Yacyretá a cota +83, esta península quedará sumergida.



Figura 2. **Detalle de la ubicación del tramo de obra de defensa**

La obra está destinada a la defensa y fijación de la margen del río, y a la protección del área urbana que se desarrolla detrás de la misma, en previsión de la elevación de la cota de operación de la represa de Yacypetá del actual valor de +76 m a la máxima de +83 m.

Como se observa en la Figura 3, la obra describe aproximadamente un arco con su eje modificando la alineación en prácticamente 90° entre ambos extremos, por lo que se estima que las condiciones de oleaje a lo largo de su traza serán fuertemente cambiantes.

3.2 Topobatemetría

Se dispuso de una base de datos topobatemétrica provista por CORIPA, para el tramo del río Paraná comprendido entre Posadas y Candelaria. La misma consistió en curvas de nivel para la altimetría y curvas de nivel y puntos acotados para la batimetría.

En la **Figura 5** se muestra la batimetría en el entorno de las obras.

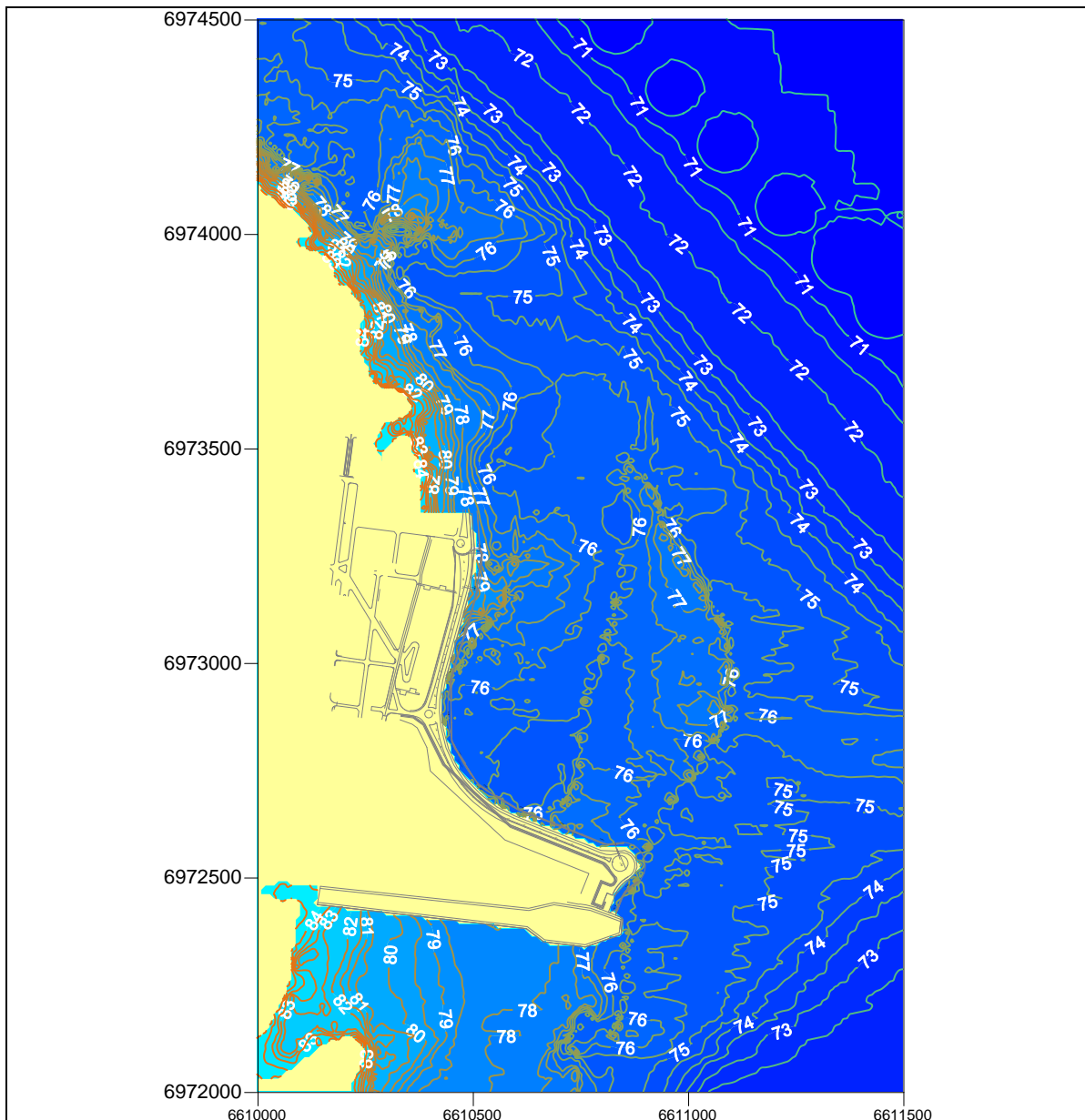


Figura 5 . Batimetría del lecho fluvial en las proximidades de las obras

3.3 Vientos

El viento que sopla sobre la superficie del agua es el mecanismo generador de las olas que pueden llegar hasta la obra de defensa. Estas a su vez constituyen la sollicitación dinámica sobre la que se apoya el diseño estructural y funcional de la misma.

La información de vientos utilizada en este informe fue provista por CORIPA y consistió en el resultado de un análisis de valores extremos de intensidades y duración realizado¹ sobre la base de datos registrados en Posadas por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) para el período comprendido entre 1961 y 1980.

3.4 Niveles líquidos

La presencia del embalse de Yacyretá, aproximadamente 90 Km al Este de Posadas, produce una modificación de los niveles naturales del río. La influencia de este remanso es importante para evaluar los niveles líquidos esperables en el tramo del río Paraná ubicado frente a Posadas, para determinados niveles de operación del embalse y condiciones hidrológicas del río.

Se presenta aquí² un corte longitudinal del pelo de agua, utilizado para caracterizar el remanso producido por la obra para diferentes condiciones hidrológicas y de operación.

Las condiciones hidrológicas analizadas fueron el caudal medio (15.000 m³/s, determinado a partir de la serie histórica de caudales registrados desde enero de 1991 hasta diciembre de 2002), un caudal bajo (alrededor de 10.000 m³/s, obtenido como el valor medio de la serie histórica menos la desviación estándar) y uno alto (alrededor de 20.000 m³/s, obtenido como el valor medio más la desviación estándar de la serie histórica). Adicionalmente se simuló caudales de 30.000 y 40.000 m³/s.

¹ Informe de Diseño N° 1 – 10-04-016-B/R2. Tema: Olas y Vientos en el Embalse . HARZA Y CONSORCIADOS CIDY. 1984

² Simulación Numérica de la Hidrodinámica y el Transporte de Sólidos Suspendidos en el Embalse de Yacyretá. Christian Uriel ÁLVAREZ TAGLIABUE. Tesis de Grado en Ingeniería Civil. Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ingeniería. Septiembre 2004

El corte corresponde al brazo principal (**Figura 6**) y abarca la totalidad del embalse desde la zona fluvial hasta la obra.

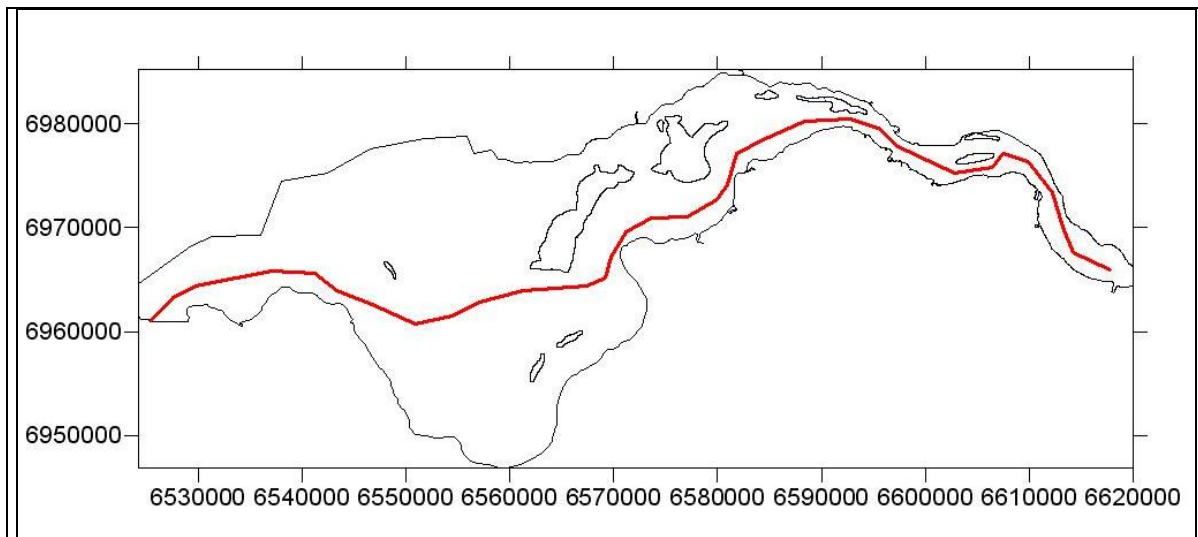


Figura 6 **Corte longitudinal, Brazo Principal**

Las **Figuras 7** y **8** presentan los perfiles de niveles líquidos correspondientes al corte sobre el brazo principal para cotas de operación del embalse de +76 m y +83 m respectivamente, para los distintos escenarios hidrológicos. Se observa la disminución significativa de los efectos de remanso al aumentar el nivel de agua: por ejemplo, para el caudal medio de $15.000 \text{ m}^3/\text{s}$, el desnivel del pelo de agua entre Posadas y el vertedero principal es de aproximadamente 1,40 m a cota 76 m, y cae a 0,34 m cuando se eleva la cota del embalse a +83 m.

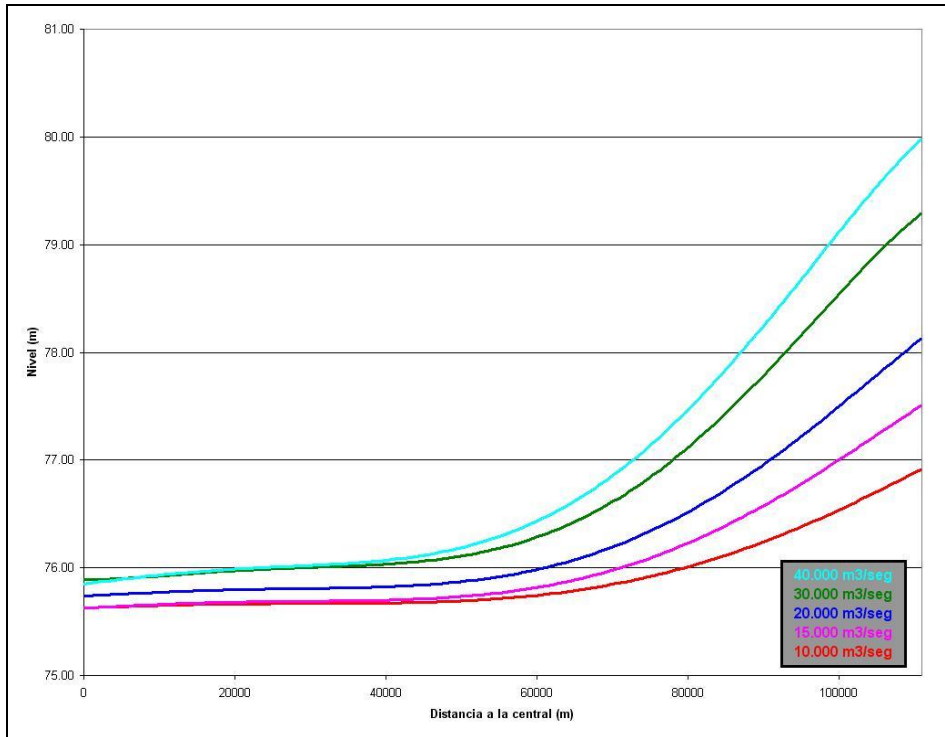


Figura 7 Niveles líquidos para cota de embalse + 76 m, Brazo Principal

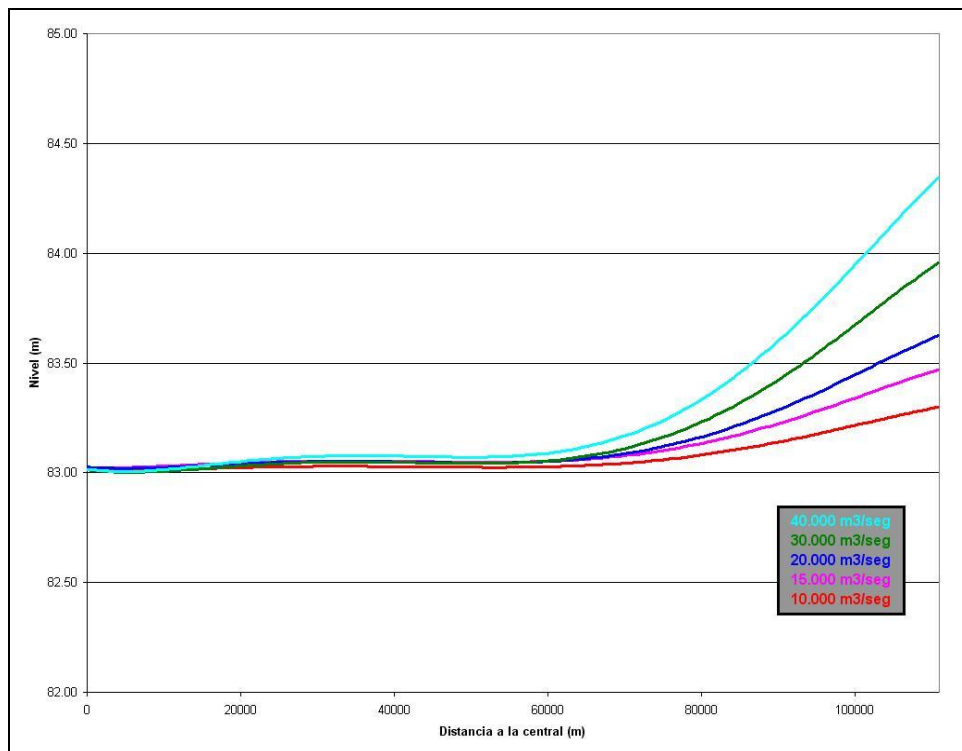


Figura 8 Niveles líquidos para cota de embalse +83 m, Brazo Principal

Considerando que el tramo de la obra de defensa costera de la ciudad de Posadas que se analiza se halla ubicada aproximadamente en la progresiva 100.000 del corte indicado en la **Figura 8**, se confeccionó la siguiente **Tabla 1** que presenta las cotas de agua estimadas en esa ubicación para las distintas condiciones hidrológicas y para cota de operación del embalse de +83m.

Tabla 1 Niveles líquidos en Posadas (Fuente: Ref. 2)

Caudal (m³/s)	Cota en Posadas (m)
10.000	83,21
15.000 (medio)	83,34
20.000	83,43
30.000	83,66
40.000	83,95

4 ANÁLISIS DE VIENTOS

La información provista por CORIPA consistió en el resultado de un análisis estadístico para el ajuste de datos donde se utilizaron diferentes series de valores constituidas por duraciones máximas anuales de vientos asociados a distintas intensidades. Para ello se utilizó información registrada en Posadas por el SMN para el período 1961-1980.

Cada una de estas series fue ajustada por una función de distribución de probabilidades Pearson III, con lo cual, mediante la proyección de valores con distintos períodos de retorno (Tr), fue posible construir las curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) correspondientes a los cuadrantes de dirección Sur, Este y Norte presentadas en las **Figuras 9, 10 y 11**

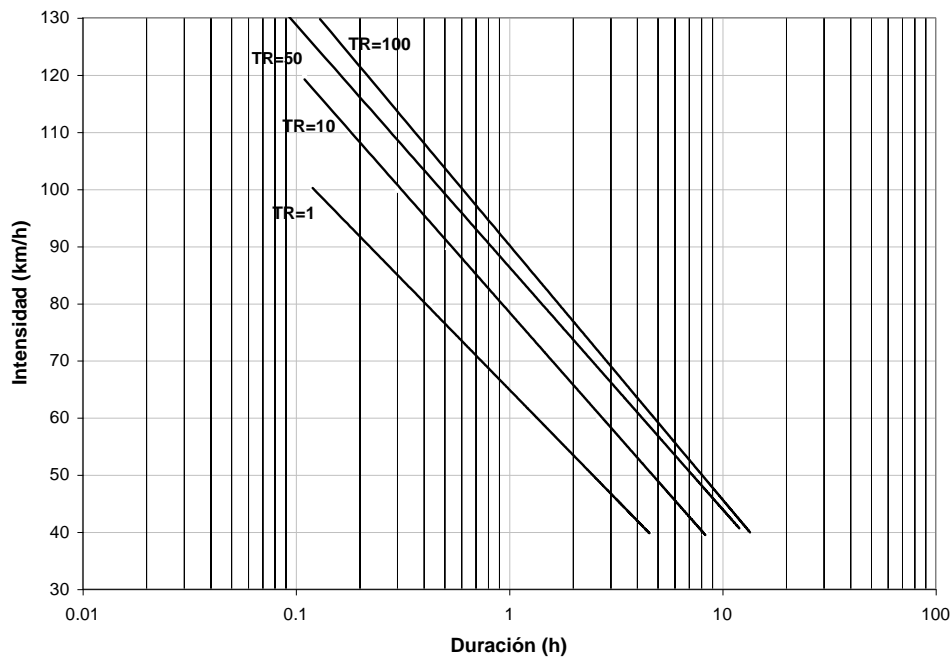


Figura 9. Curva IDF correspondiente al cuadrante Sur (Registro SMN, Posadas 1961-1980)

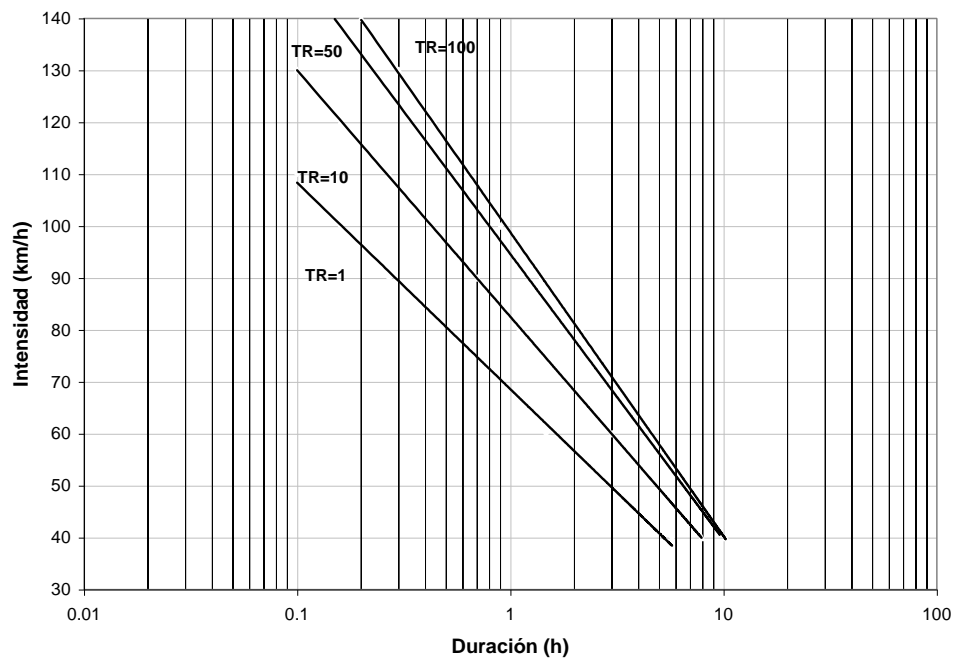


Figura 10. Curva IDF correspondiente al cuadrante Este (Registro SMN, Posadas 1961-1980)

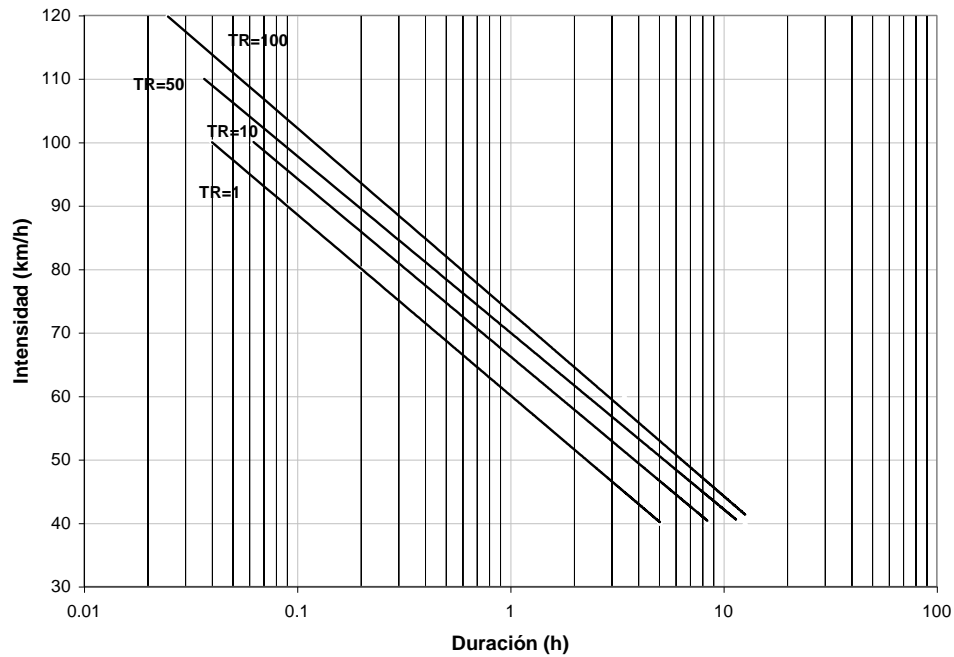


Figura 11. Curva IDF correspondiente al cuadrante Norte (Registro SMN, Posadas 1961-1980)

Dada la necesidad de evaluar diferentes escenarios para la determinación de las olas generadas por el viento, las curvas IDF permiten obtener las duraciones máximas de eventos con vientos de distintas intensidades para un período de retorno determinado. En las **Tablas 2 a 4** se presentan los valores obtenidos del análisis realizado para Posadas correspondientes a las **Figuras 9, 10 y 11**, presentadas anteriormente.

Tabla 2. Duración (hs) para eventos con distinta intensidad y período de retorno.
Cuadrante Sur.

Intensidad del viento (km/h)	Período de retorno (años)			
	Tr=1	Tr=10	Tr=50	Tr=100
130	---	---	0.09	0.13
120	---	0.11	0.16	0.21
110	---	0.18	0.27	0.36
100	0.12	0.30	0.47	0.60
90	0.22	0.52	0.81	1.05
80	0.43	0.96	1.61	1.70
60	1.29	2.63	4.08	4.69
40	4.55	8.32	12.01	13.50

**Tabla 3. Duración (hs) para eventos con distinta intensidad y período de retorno.
Cuadrante Sur.**

Intensidad del viento (km/h)	Período de retorno (años)			
	Tr=1	Tr=10	Tr=50	Tr=100
140	---	---	0.15	0.20
130	---	0.11	0.23	0.30
120	---	0.16	0.35	0.44
110	0.12	0.27	0.52	0.63
100	0.16	0.43	0.79	0.90
90	0.27	0.71	1.20	1.40
80	0.52	1.10	1.82	2.15
60	1.47	3.00	4.46	4.60
40	5.73	7.90	9.60	10.24

**Tabla 4. Duración (hs) para eventos con distinta intensidad y período de retorno.
Cuadrante Norte**

Intensidad del viento (km/h)	Período de retorno (años)			
	Tr=1	Tr=10	Tr=50	Tr=100
120	---	---	---	0.02
110	---	---	0.04	0.05
100	0.04	0.06	0.08	0.12
90	0.09	0.14	0.19	0.26
80	0.20	0.32	0.43	0.56
60	1.03	1.76	2.48	3.43
40	5.03	8.40	11.44	12.64

Debido a que este análisis fue realizado con series de datos constituidas por veinte valores (máximos anuales del período 1961-1980) es preciso señalar que los valores estimados para períodos de retorno de 100 años se encuentran asociados a una incertidumbre natural vinculada a la escasa longitud de la serie. No obstante, fueron incluidos en las figuras y las tablas por su valor comparativo.

Desde el punto de vista estadístico, los valores obtenidos en este análisis para períodos de retorno de 50 presentan mayores niveles de confianza que los anteriores, y dadas las

características de la obra proyectada y la vida útil esperada para la misma, se consideró que los valores asociados a $T_R=50$ años resultan ser los de mayor conveniencia para su utilización en el estudio de generación del oleaje desarrollado en este informe.

La elección de un período de retorno para una variable de diseño X (en este caso el viento) constituye una manera implícita de adoptar un margen de seguridad. Si se escoge un período de retorno de 50 años para caracterizar la variable de diseño X^{50} , esto significa que *en promedio X^{50} será excedida una vez cada 50 años.*

Es posible además introducir el concepto de *probabilidad de encuentro*, es decir la probabilidad de que la ola de diseño sea superada *durante la vida útil L de la estructura*, y que se expresa³ :

$$p = 1 - \exp\left(-\frac{L}{T_R}\right) \quad (1)$$

expresión que tiene en cuenta el carácter aleatorio de los eventos extremos en la vida útil L de la estructura, y en la cual T_R es el período de retorno de la ola de diseño. Para el caso de $T_R = 50$ años y $L = 20$ años, resulta $p = 33\%$.

³ *Design wave height related to structure lifetime.* Zhou Liu, Hans Burchart, ASCE, Coastal Engineering Conference, 1996

5 COMPUTO DEL OLEAJE

El estudio de las características del oleaje generadas por la acción del viento tiene como objetivo proveer datos de altura, período y dirección en distintos puntos de interés y particularmente sobre los tramos de la obra de protección costera.

Para la ejecución de ambas tareas se aplicó el modelo **SWAN** (**S**imulating **W**aves **N**earshore, L.H. Holthuijsen, N. Booij y otros) versión 40.41 (2004), desarrollado en Delft University of Technology, Holanda.

5.1 Modelo matemático

SWAN es un modelo numérico que permite estimar los parámetros de oleaje en regiones costeras, lagos o estuarios para determinadas condiciones de viento, corrientes y batimetría. El modelo se basa en una representación espectral de la ecuación de balance de la densidad de acción de olas $N(\sigma, \theta)$ y todos los procesos físicos están modelados explícitamente.

La densidad acción de ola se define como $N = E/\sigma$, donde E es la densidad energía (energía cinética más potencial por unidad de superficie), σ la frecuencia relativa y θ la dirección de propagación.

La ecuación de balance de la acción se escribe como:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial (C_x N)}{\partial x} + \frac{\partial (C_y N)}{\partial y} + \frac{\partial (C_\sigma N)}{\partial \sigma} + \frac{\partial (C_\theta N)}{\partial \theta} = \frac{S}{\sigma} \quad (2)$$

El primer término a la izquierda expresa el cambio local en el tiempo de la densidad de acción de ola, el segundo y tercero representan la propagación de la densidad de acción en el espacio con velocidades C_x y C_y . El cuarto describe los cambios de la frecuencia relativa debido a cambios en profundidad o a corrientes. El quinto término es el cambio debido a refracción.

El término S del miembro derecho de la ecuación representa las fuentes y sumideros de energía y puede ser descripto como la suma de varios y diferentes procesos físicos:

$$S = S_{in} + S_{ds} + S_{nl} \quad (3)$$

donde:

- S_{in} es la energía transferida por el viento,
- S_{ds} es la disipación de energía
- S_{nl} representa la transferencia de energía entre olas por efectos no lineales.

El término de disipación S_{ds} consta a su vez de tres componentes principales:

- Las “crestas blancas” o *whitecapping*, pequeñas rompientes sobre las crestas de las olas que ocurren por un exceso de entrada de energía .
- La fricción con el fondo.
- La rompiente inducida por el fondo.

También se hallan incorporados en la modelación las interacciones no lineales entre olas, que son las responsables del intercambio de energía entre componentes de diferentes frecuencias del mismo espectro, redistribuyendo la energía entre dichas componentes.

5.2 El modelo numérico

La ecuación de balance (2) es una ecuación diferencial de primer orden, en la que las cinco variables independientes son tiempo t , las coordenadas espaciales x, y , la frecuencia relativa σ y la dirección de propagación θ . La variable dependiente a resolver es la densidad de acción de ola N .

La integración se implementa en un *esquema en diferencias finitas*, con paso de tiempo Δt (el mismo para los términos de propagación y el término fuente). El espacio geográfico se

discretiza mediante una grilla de paso Δx y Δy . El espectro (direccional) se representa con una resolución $\Delta\theta$ en la dirección y una resolución constante $\Delta\sigma/\sigma$ en frecuencia.

El esquema de resolución utilizado es de tipo implícito, el que resulta incondicionalmente estable, permitiendo escoger pasos de tiempo prolongados. El modelo está implementado en lenguaje FORTRAN.

El modelo provee de información de oleaje (H_s , T_m , T_p , L , etc.) sobre toda la grilla computacional si así se requiere o en posiciones específicas. También es posible caracterizar la distribución en frecuencia del espectro de densidad energía en un conjunto de posiciones. Opcionalmente pueden utilizarse grillas de detalle anidadas, con mayor resolución espacial, y que abarquen áreas parciales del embalse donde fuera de interés el conocimiento detallado de la distribución del oleaje.

5.3 Implementación del modelo

5.3.1 Área modelada

La implementación del modelo requirió la construcción de dos grillas anidadas, la primera un tramo del río Paraná aproximadamente desde el Km 1580 al 1600 y la segunda, un detalle frente a la obra de defensa estudiada.

La grilla 1 se implementó con 240 x 400 nodos, con espaciamiento entre nodos $\Delta x = \Delta y = 75\text{m}$, representando una región de 18 x 33 Km.

La grilla 2 abarcó un área de 1500 m x 2500 m y se implementó con un paso espacial $\Delta x = \Delta y = 10\text{m}$ (150 nodos x 250 nodos).

Las simulaciones fueron ejecutadas en modo estacionario. En este caso el resultado es el estado final de completo desarrollo al que haya llegado el campo de olas en función de la intensidad del viento, el fetch y la profundidad local.

5.3.2 Nivel líquido

Se escogió como nivel del río la cota líquida correspondiente a un caudal medio de 15.000 m³/s para una cota de embalse de la represa de Yacyretá de +83 m. Esto significa, en la ubicación de las obras en Posadas, una cota de +83,34 m.

5.3.3 Dirección, intensidad y duración del viento

Las condiciones de viento se definieron como los eventos probables de ocurrir una vez en 50 años en promedio, es decir con un período de retorno $T_r = 50$ años. Adicionalmente se efectuó una evaluación para vientos de menor intensidad, correspondientes a un período de retorno de 10 años.

Se consideraron las direcciones de viento que pueden generar olas incidiendo sobre el tramo de defensa costera analizado, es decir vientos soplando desde el N, NE, E y SE.

Las olas generadas por un viento de determinada intensidad, pasan por una etapa de crecimiento hasta alcanzar su desarrollado completo y adquirir una altura constante, que dependerá de las condiciones geográficas (Fetch, profundidad) y de la intensidad del viento. Siempre que no existan limitaciones geográficas, los vientos más intensos necesitarán mayor duración para desarrollar el oleaje.

Desde el punto de vista meteorológico se ha visto (apartado 4, **Figuras 9 a 11**) que estadísticamente es posible establecer una relación entre la intensidad del viento y su persistencia o duración. Los vientos muy intensos tienen duración corta. A medida que se consideran vientos de menor intensidad, la duración media o persistencia asociada a los mismos aumenta.

Las olas más altas posibles serán aquellas generadas por un viento de intensidad y duración tales que ésta última sea equivalente a la mínima duración necesaria para desarrollar completamente el oleaje.

A los efectos de evitar un excesivo número de simulaciones y el consecuente tiempo de cálculo, necesario para la búsqueda de la condición (intensidad - duración) más

desfavorable, se realizó una evaluación preliminar aplicando un modelo simplificado de generación de olas. Como producto de este análisis surgieron los escenarios de cálculo definitivos para la posterior aplicación del modelo numérico SWAN.

El cálculo se efectuó mediante la aplicación de las las funciones adimensionalizadas para pronóstico de olas basadas en las funciones de profundidad de Bretschneider y las relaciones para aguas profundas del proyecto el **JOint North Sea WAve Project** (JONSWAP). Las relaciones son alternativas al método de estimación desarrollado por Svedrup-Munk y Bretschneider (SMB), y se expresan como⁴:

$$gH_s / u_*^2 = 200 \tanh\left[0.003877 \left(gd / u_*^2\right)^{3/8}\right] x \tanh\left\{\frac{0.0002129 \left(gF / u_*^2\right)^{1/2}}{\tanh\left[0.003877 \left(gd / u_*^2\right)^{3/4}\right]}\right\} \quad (4)$$

$$gT_m / u_* = 200 \tanh\left[0.07125 \left(gd / u_*^2\right)^{3/8}\right] x \tanh\left\{\frac{0.00426 \left(gF / u_*^2\right)^{1/2}}{\tanh\left[0.07125 \left(gd / u_*^2\right)^{3/8}\right]}\right\}$$

En estas relaciones g es la aceleración de la gravedad, H_s es la *altura significativa*, T_m el *período medio*, u^* la velocidad friccional del viento, que representa la transmisión de esfuerzo entre el viento y la superficie del agua. F es el fetch, d la profundidad. Como puede notarse, las variables están agrupadas conformando valores adimensionales.

La velocidad friccional u^* se determina a partir de la velocidad del viento u a 10 m de altura. La relación entre ambas es:

$$\begin{aligned} u_* &= \sqrt{c_d} u_{10} \\ c_d &= 10^{-3} (0.75 + 0.067 u_{10}) \end{aligned} \quad (5)$$

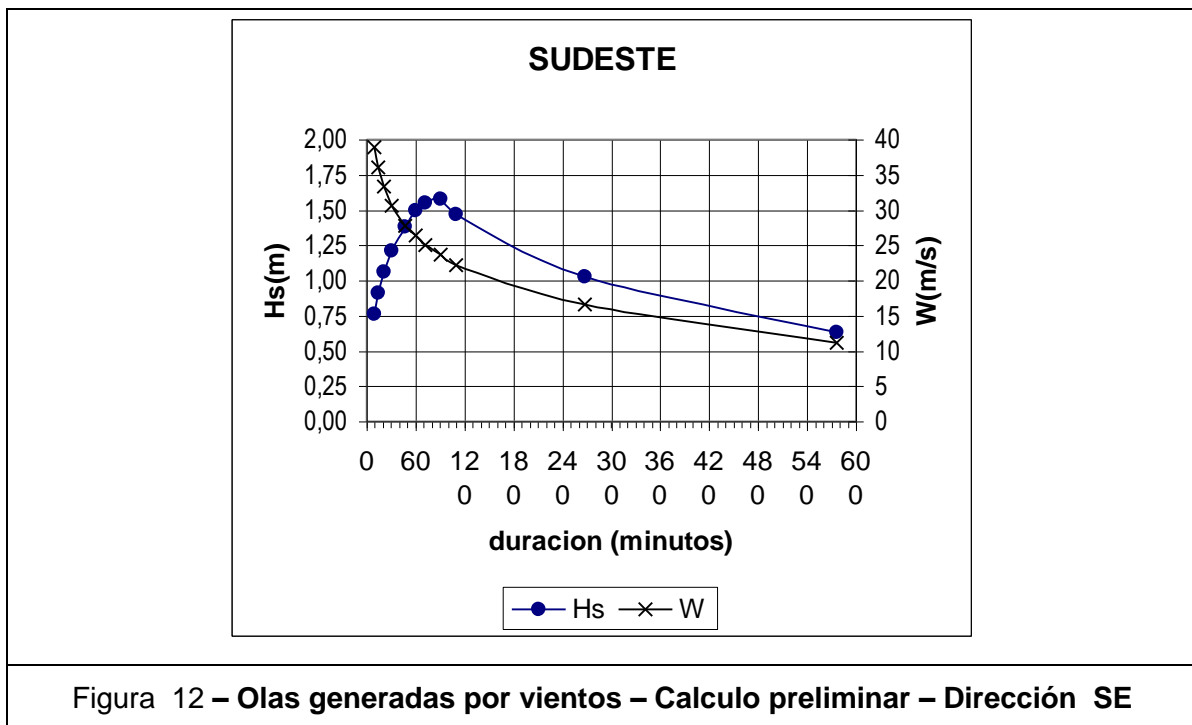
⁴ Handbook of Coastal and Ocean Engineering. Gulf Publishing Company, 1991

En el caso de estas curvas también se han incorporado relaciones que permiten evaluar durante la etapa de *crecimiento*, la altura de ola y el período medio en función del *tiempo*. Estas relaciones son como sigue:

$$\frac{g H_s}{u_*^2} = 5.767 \times 10^{-3} \left(\frac{g t}{u_*} \right)^{5/7} \quad (6)$$

$$\frac{g T_m}{u_*} = 4.86 \times 10^{-1} \left(\frac{g t}{u_*} \right)^{0.411}$$

Como resultado de lo expuesto se presentan las **Figuras 12 y 13** donde se ha incorporado la curva intensidad-duración del viento correspondiente al cuadrante para un período de retorno de 50 años y se ha calculado la ola generada para un conjunto de pares de valores intensidad-duración del viento.



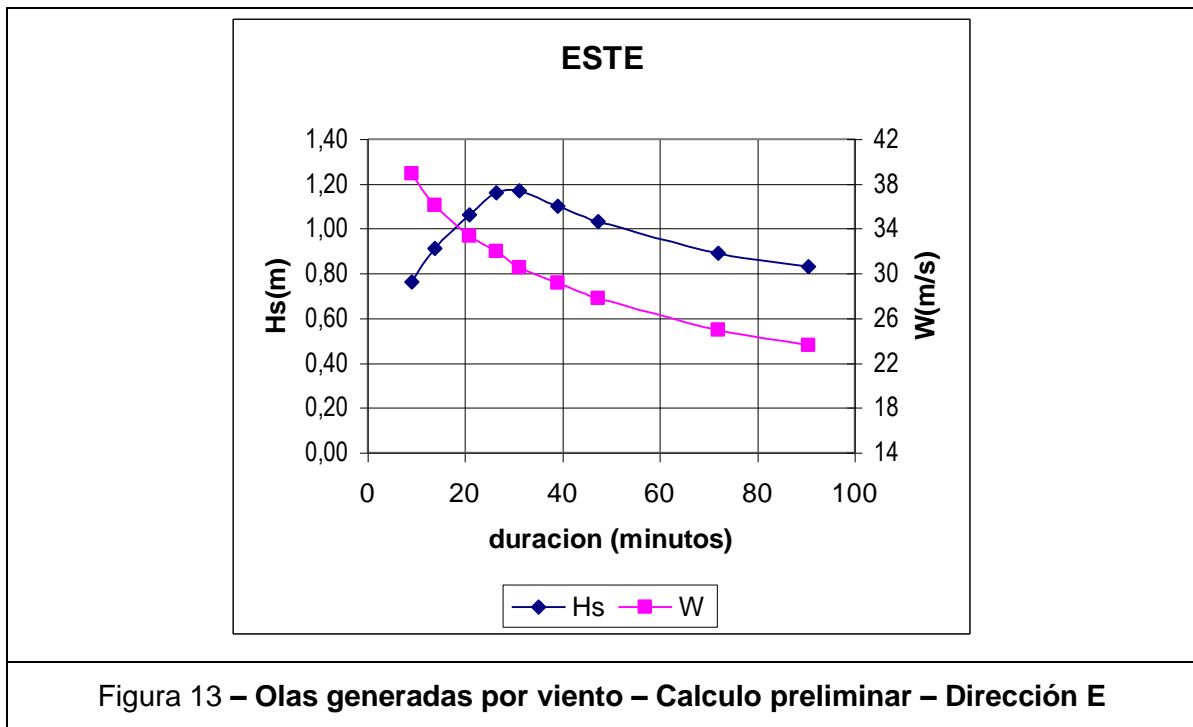


Figura 13 – Olas generadas por viento – Calculo preliminar – Dirección E

A la izquierda de las **Figuras 12 y 13**, debido a que los vientos muy intensos son de corta duración, el crecimiento de las olas está limitado por el tiempo durante el cual sopla el viento. Más hacia la derecha la intensidad disminuye, pero la duración (que es la limitante en este sector de los gráficos) aumenta, y en consecuencia aumenta la altura de ola. Más hacia la derecha la duración del viento es suficiente para desarrollar completamente las olas, pero la menor intensidad asociada limita la altura máxima de las olas.

Las **Tablas 5 y 6** muestran los valores correspondientes a las **Figura 12 y 13** respectivamente.

Tabla 5 - Olas generadas por viento – Cálculo preliminar

SUDESTE F=12500 m

U		Dur		H
Km/h	m/s	Horas	minutos	m
140	38,89	0,15	9	0,76
130	36,11	0,23	13,8	0,91
120	33,33	0,35	21	1,06
110	30,56	0,52	31,2	1,21
100	27,78	0,79	47,4	1,38
95	26,39	1	60	1,5
90	25,00	1,2	72	1,55
85	23,61	1,51	90,6	1,58
80	22,22	1,82	109,2	1,47
60	16,67	4,46	267,6	1,03
40	11,11	9,6	576	0,63

Tabla 6 - Olas generadas por viento – Cálculo preliminar

ESTE F=3000 m

U		Dur		H
Km/h	m/s	Horas	minutos	m
140	38,89	0,15	9	0,76
130	36,11	0,23	13,8	0,91
120	33,33	0,35	21	1,06
115	31,94	0,44	26,4	1,16
110	30,56	0,52	31,2	1,17
105	29,17	0,65	39	1,10
100	27,78	0,79	47,4	1,03
90	25,00	1,2	72	0,89
85	23,61	1,51	90,6	0,83
80	22,22	1,82	109,2	0,77

Con idéntica metodología se determinaron los restantes escenarios de viento. La **Tabla 7**, muestra los valores obtenidos. En la tabla se indica: fetch, velocidad del viento, duración del viento y altura de ola resultante de la aplicación de las ecuaciones (4) y (6).

Tabla 7 - Condiciones de viento para máximo oleaje

Dirección	Fetch (m)	U10 (m/s)	Dur mínima (minutos)
N	5000	19,4	87

NE	2500	31,9	26,4
E	3000	30,6	31,2
SE	12.500	23.6	90

5.4 Escenarios de cálculo

De acuerdo a lo expuesto, y sobre la base de los resultados obtenidos preliminarmente con las fórmulas simplificadas, se ha realizado la aplicación del modelo SWAN con el propósito de obtener resultados más ajustados para los siguientes escenarios de interés:

Tabla 8 Escenarios de cálculo para la aplicación de SWAN

Escenario	Tr (años)	Viento		Cota líquida (m)
		Dirección	Intensidad (m/s)	
E1	50	SE	23,6	83,30
E2	50	E	30,6	83,30
E3	50	NE	31,9	83,30
E4	50	N	19,4	83,30
E5	10	E	26,4	83,30
E6	10	NE	27,8	83,30

5.5 Resultados

Los resultados se presentan como perfiles de altura significativa de ola (H_s) a lo largo de la obra de defensa, y (en el Anexo I) como curvas de isoamplitud de altura de ola en el área .

Para los perfiles, la altura de ola se indica al pie del talud. La progresiva 0 corresponde al extremo Norte de la obra.

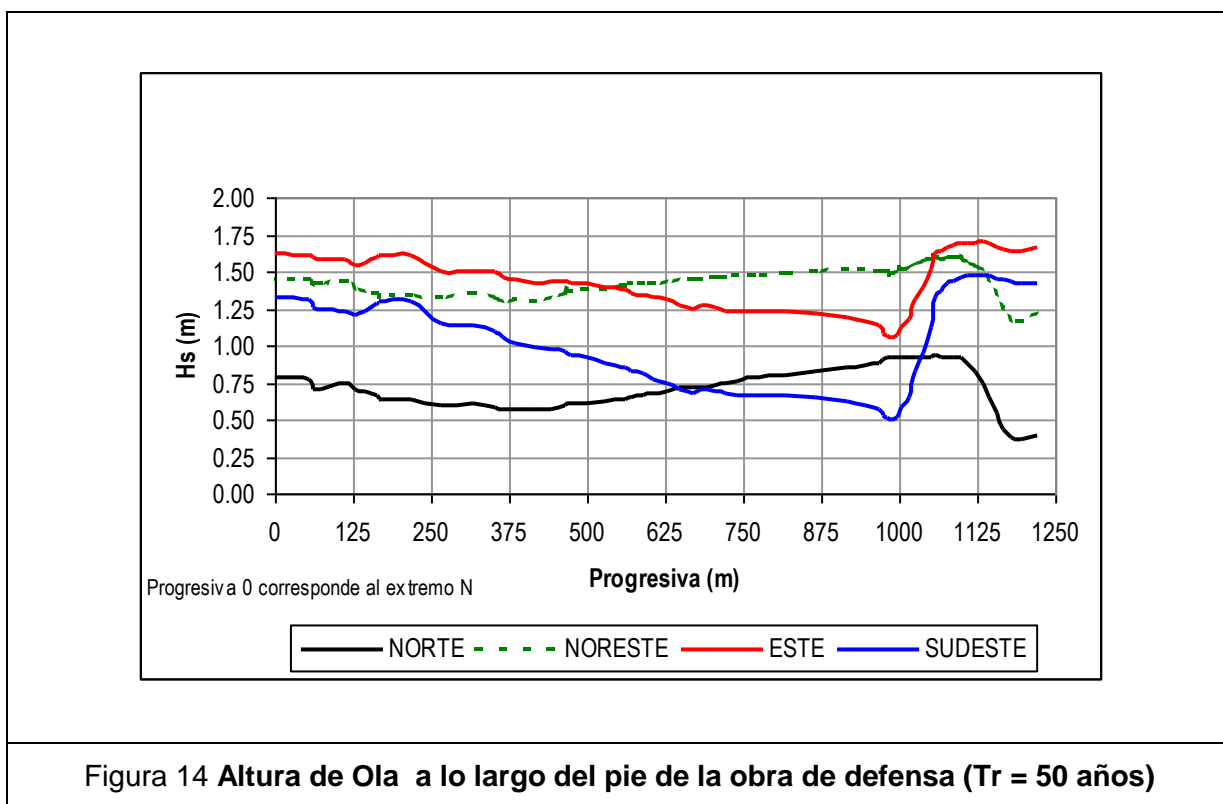


Figura 14 **Altura de Ola a lo largo del pie de la obra de defensa (Tr = 50 años)**

La **Figura 14** muestra los resultados para los escenarios E1 a E4. El extremo sur de la obra resulta el más expuesto en todos los casos, con olas que pueden alcanzar 1,70 m. En el extremo norte las olas más altas resultaron de 1,60 m. En el tramo central (progresiva 200 m a 1.000 m) las olas más altas resultaron de 1,50m

Para las direcciones E y especialmente SE, la altura de ola decrece rápidamente debido a la fuerte refracción originada en la dirección de propagación de las olas respecto de la orientación de la obra en este tramo. En el sector norte, el cambio gradual de dirección del eje de obra produce un aumento de la altura de las olas al pie de la misma.

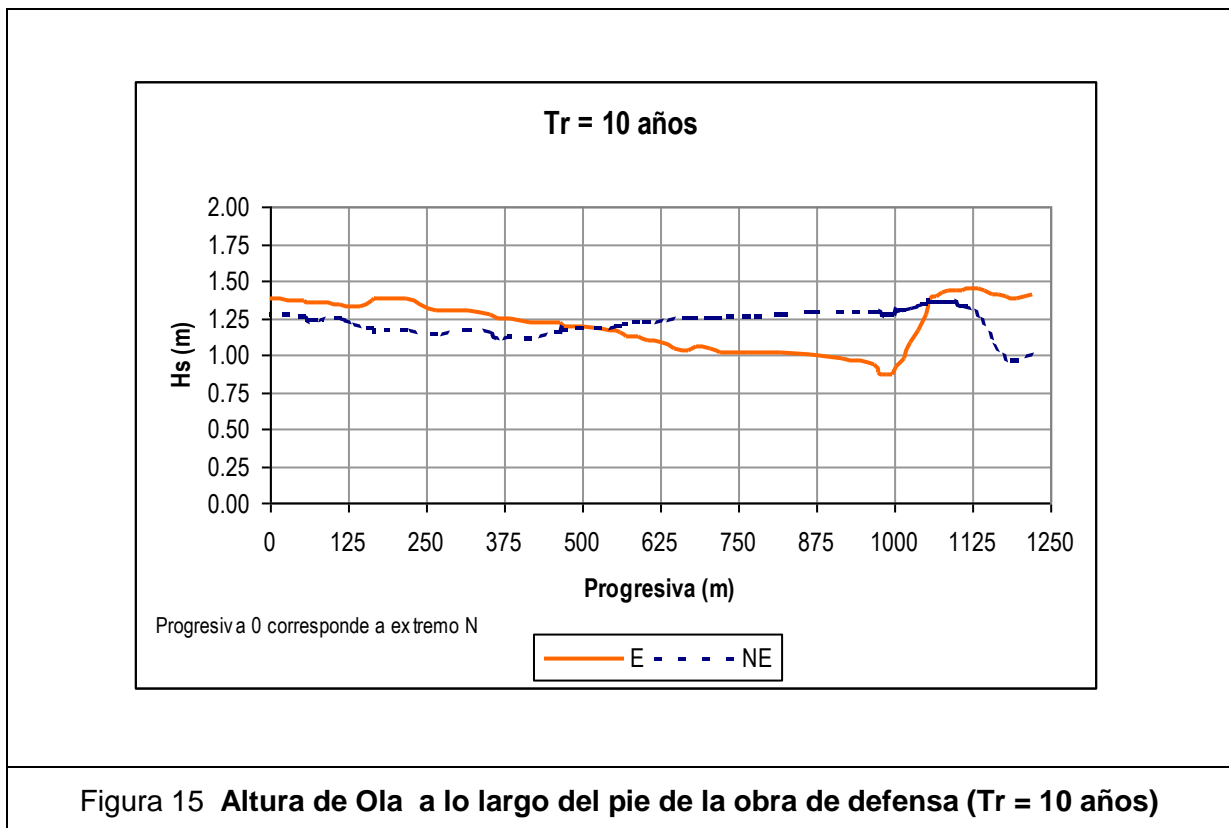
Las olas del NE son las que inciden de manera más frontal a la obra por lo que los efectos de refracción son más uniformes, resultando en una distribución de olas más homogénea a lo largo de toda la obra de defensa.

Los vientos del N son de menor intensidad y las olas generadas son las menores de los cuatro escenarios correspondientes a este período de retorno de 50 años. En este caso es

el tramo sur de la obra el que resulta más frontal al oleaje generado, lo que justifica que las mayores olas se produzcan en este tramo, aunque no superan 1 m de altura.

Para los escenarios E5 y E6, correspondientes a condiciones de viento de recurrencia 10 años, los valores de oleaje resultantes al pie de la estructura son algo menores, observándose (**Figura 15**) que se mantiene el mismo patrón de distribución espacial.

Los vientos considerados en este último análisis son menos intensos pero de mayor duración. La reducción en altura de ola al considerar estos escenarios menos extremos, es en términos generales del orden de 15 a 20%.



Las **Figuras A1 a A6** en el Anexo I muestran la distribución espacial de las olas generadas para los escenarios E1 a E6 respectivamente en la grillas computacional 1.

Las **Figuras A7 a A12** en el Anexo I muestran la distribución espacial de las olas generadas para los escenarios E1 a E6 respectivamente en la grillas computacional 2.

Con referencia a los períodos de las olas, la **Tabla 9** muestra los valores promedio a lo largo de la traza del período medio T_{01} y del período de pico espectral T_p . Para el conjunto de escenarios analizados.

Tabla 9 – Periodo medio (T_{01}) y de pico (T_p)

Escenario	Tr	Dir	T_{01} (s)	T_p (s)
E1	50	N	2,5	3,3
E2	50	NE	3,0	4,0
E3	50	E	3,2	4,0
E4	50	SE	3,0	3,7
E5	10	E	3,0	3,8
E6	10	NE	2,8	3,2

6 CONCLUSIONES

- Se llevó a cabo una descripción del régimen de vientos, con referencia a las características de la intensidad, duración y frecuencia de los mismos. El análisis se basó en registros efectuados en el período 1961-1980 en Posadas.
- Se aplicó un modelo espectral de generación de oleaje por vientos (SWAN) que incorpora procesos de refracción, difracción y bajío, además de los mecanismos de disipación de energía por fricción del fondo y rotura de ola.
- Los vientos de cálculo se determinaron a partir de un análisis de factibilidad combinada de ocurrencia eventos de determinada intensidad y persistencia, habiéndose escogido el par de valores (intensidad-duración) que permite el desarrollo de las mayores olas para cada una de las direcciones escogidas. Se consideraron situaciones con un período de retorno de 50 años y para algunos casos de 10 años.
- El nivel de agua en Posadas (+83,34 m) se determinó considerando un nivel de embalse en la represa de Yacyretá de +83 m y un caudal medio del río Paraná de 15.000 m³/s.
- Para eventos con período de retorno de 50 años los extremos norte y sur de la obra resultan los más expuestos, con olas próximas a 1,70 m de altura significativa Hs. El tramo central (progresiva 200 a 1000) la altura significativa máxima calculada resultó de 1,50 m. En el extremo norte la altura significativa máxima resultó de 1,60 m
- Para las direcciones NE y E se consideran adicionalmente eventos probables de ocurrir en promedio una vez cada 10 años. Las alturas de ola resultantes para esta situación fueron de entre 15 y 20 % menores que la situación equivalente a 50 años.

ANEXO I

FIGURAS

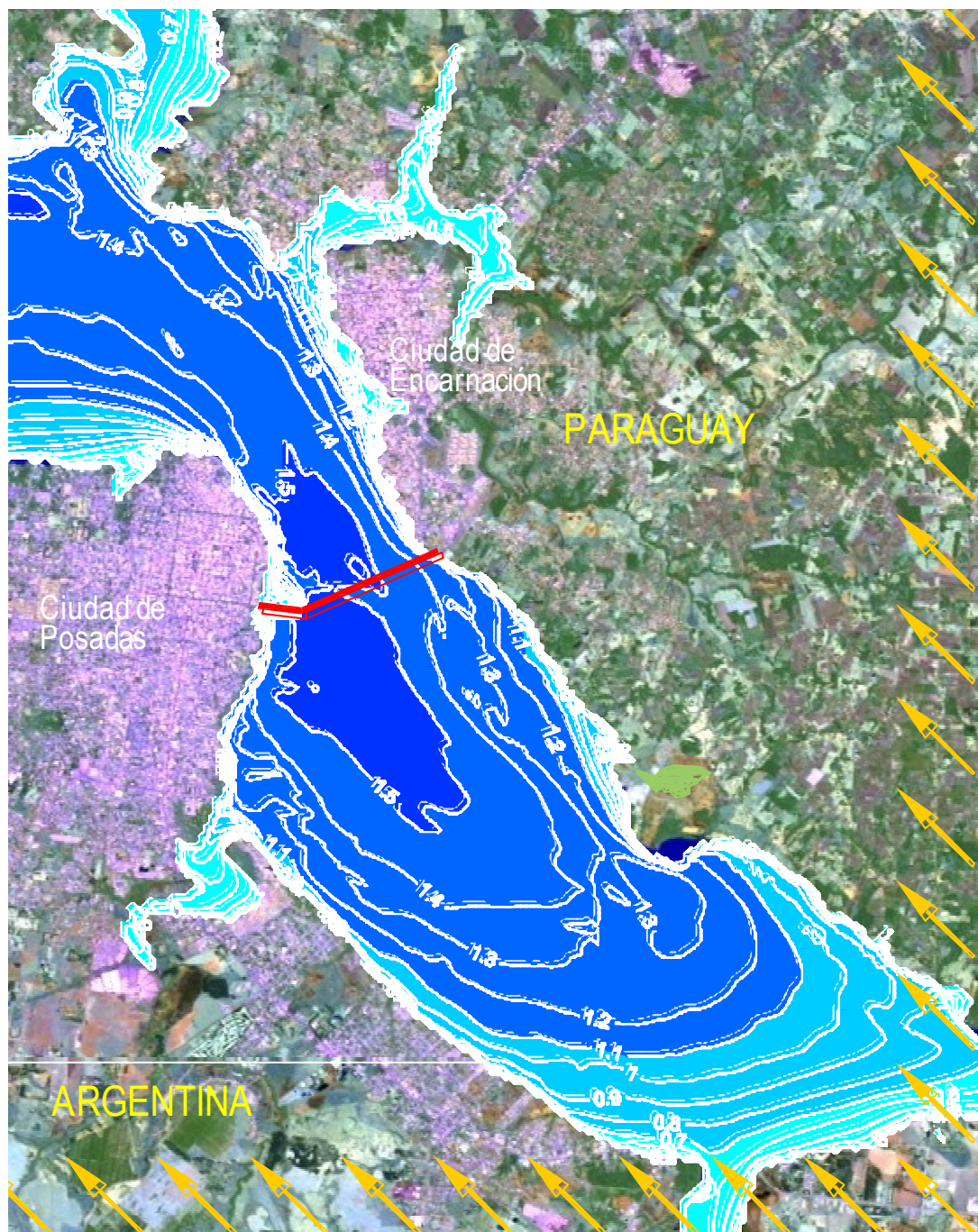
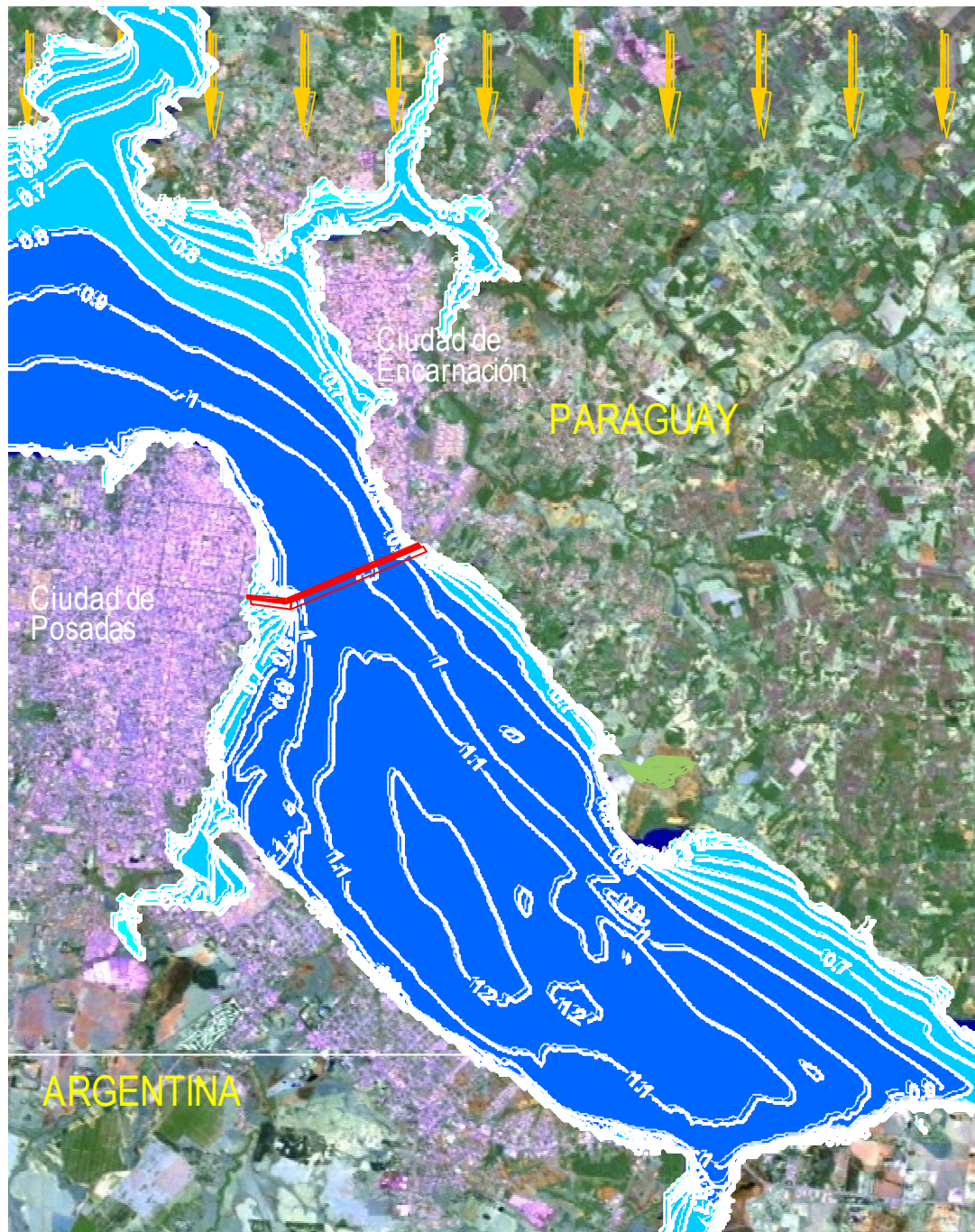


FIGURA A1

DIRECCION SE - W 23.61 m/s



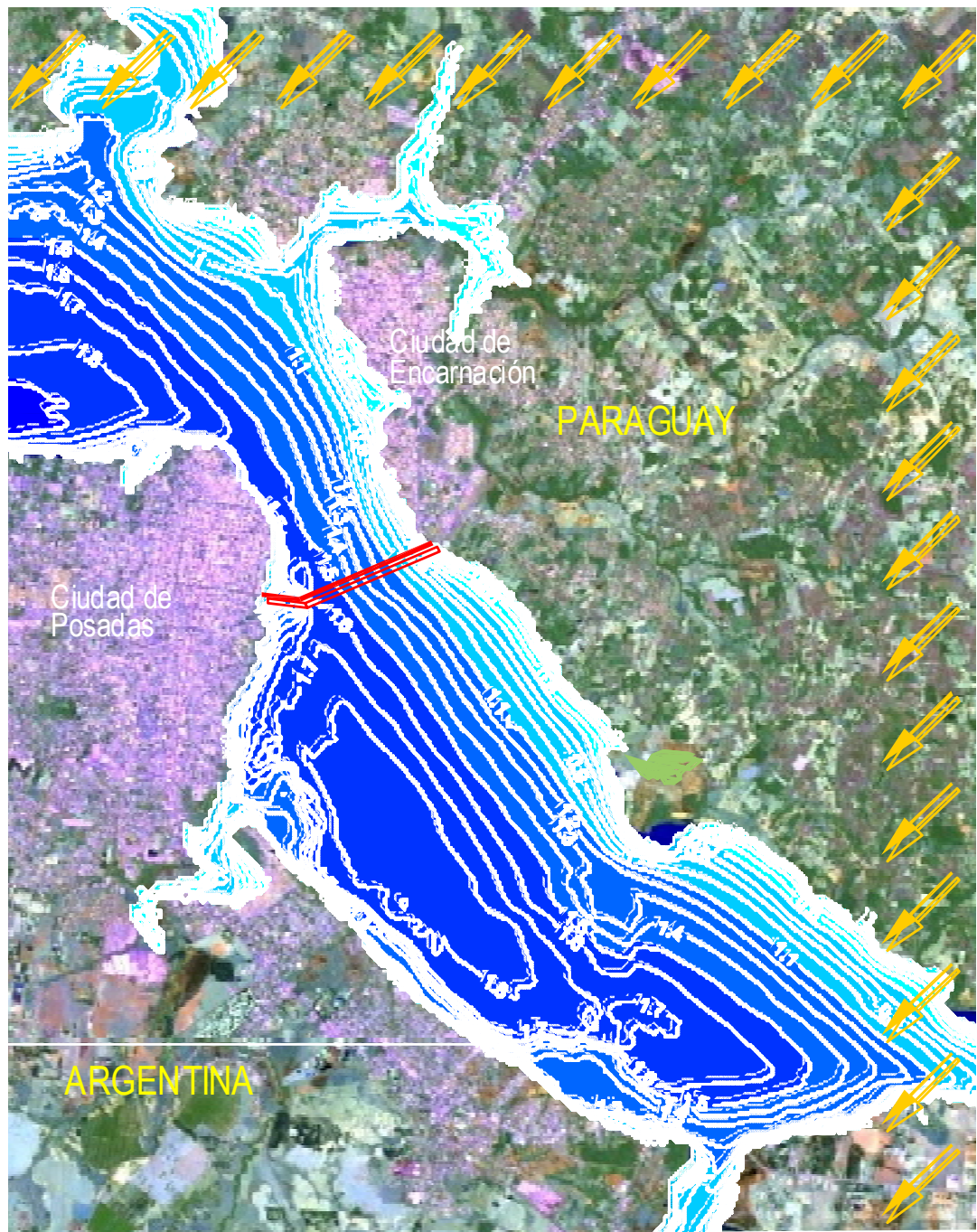


FIGURA A4

DIRECCION NE - W 31.94 m/s

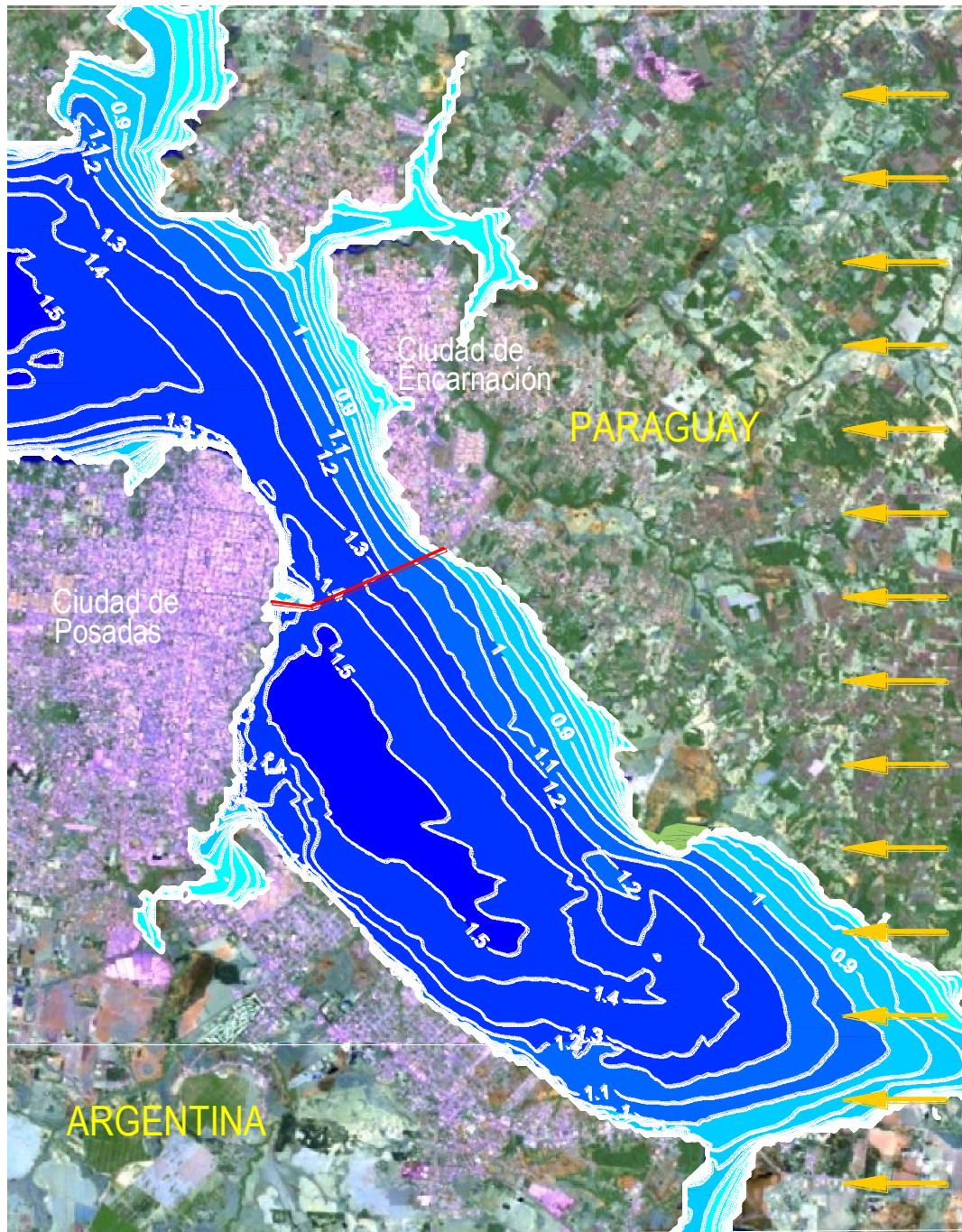


FIGURA A5

DIRECCION E - W 26.39 m/s

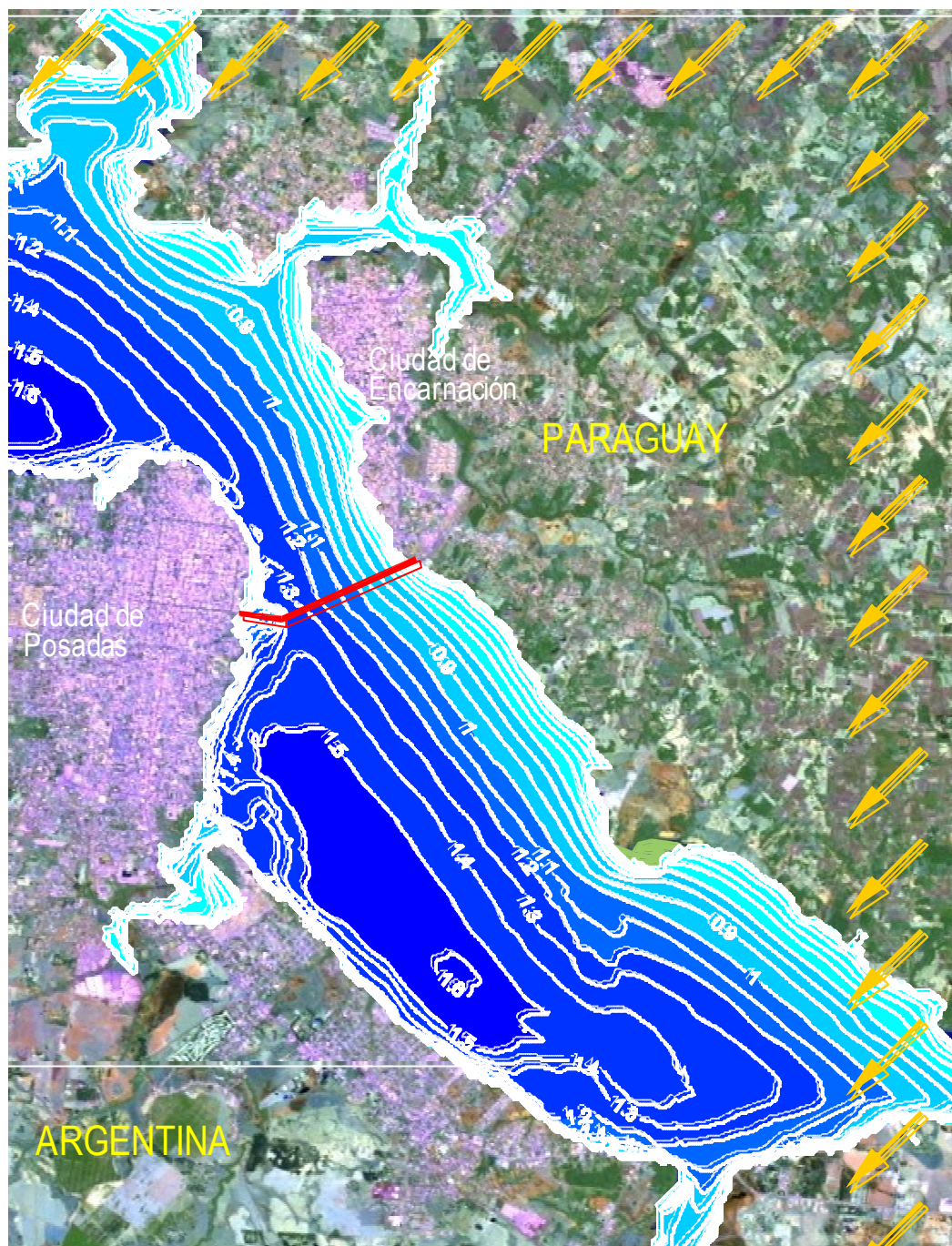
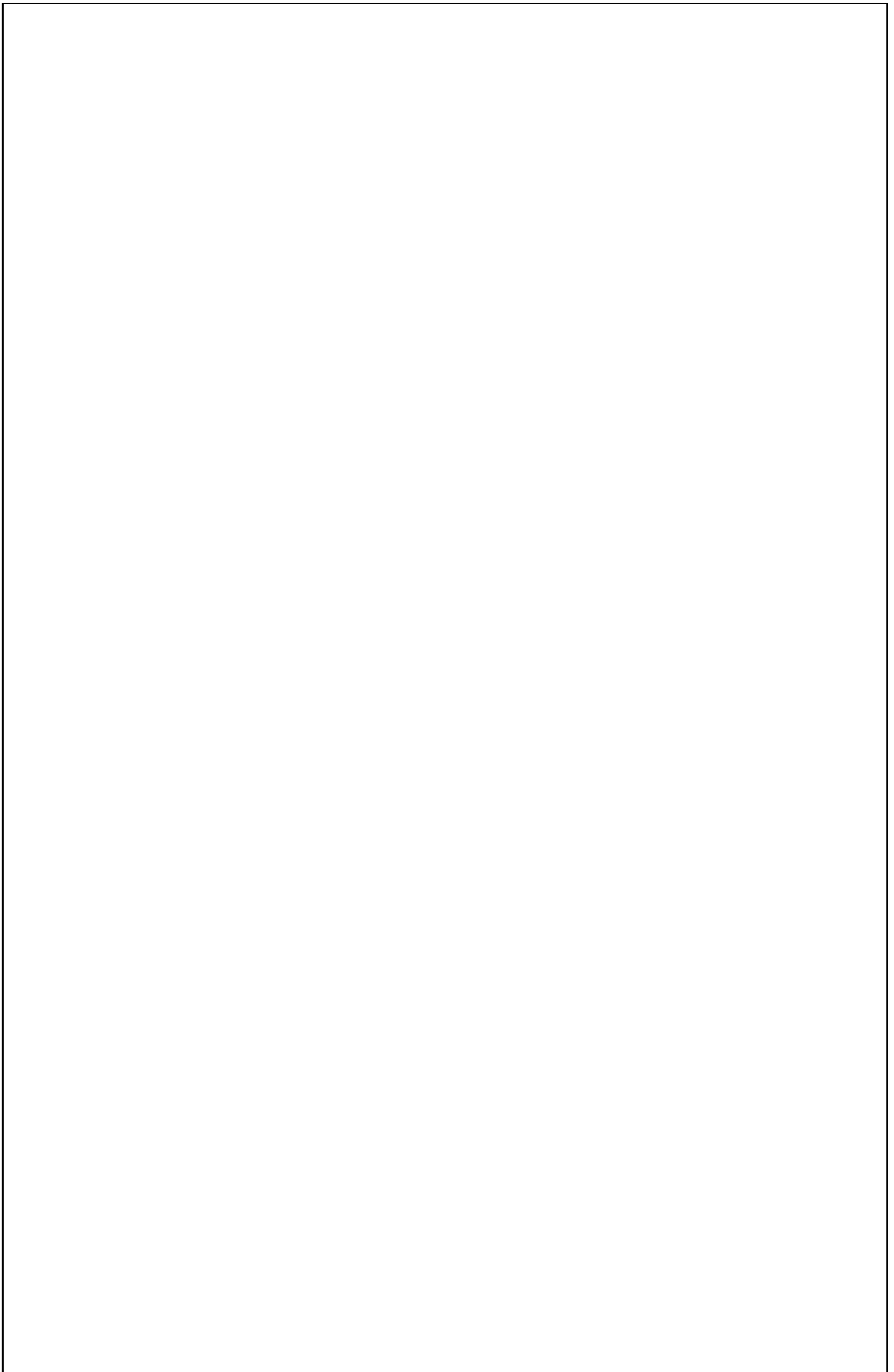


FIGURA A6

DIRECCION NE - W 27.78 m/s



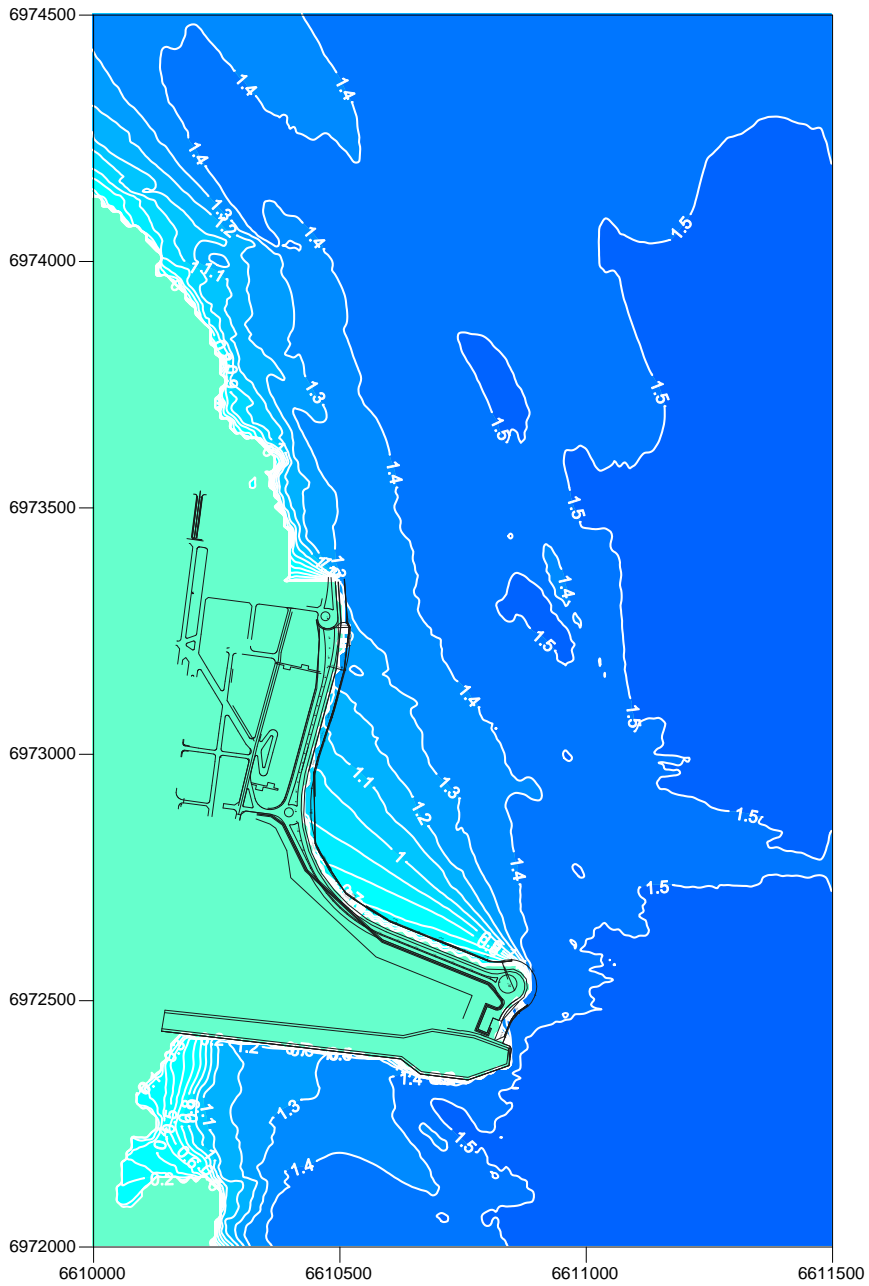


FIGURA A7

DIRECCION SE - W 23.61 m/s

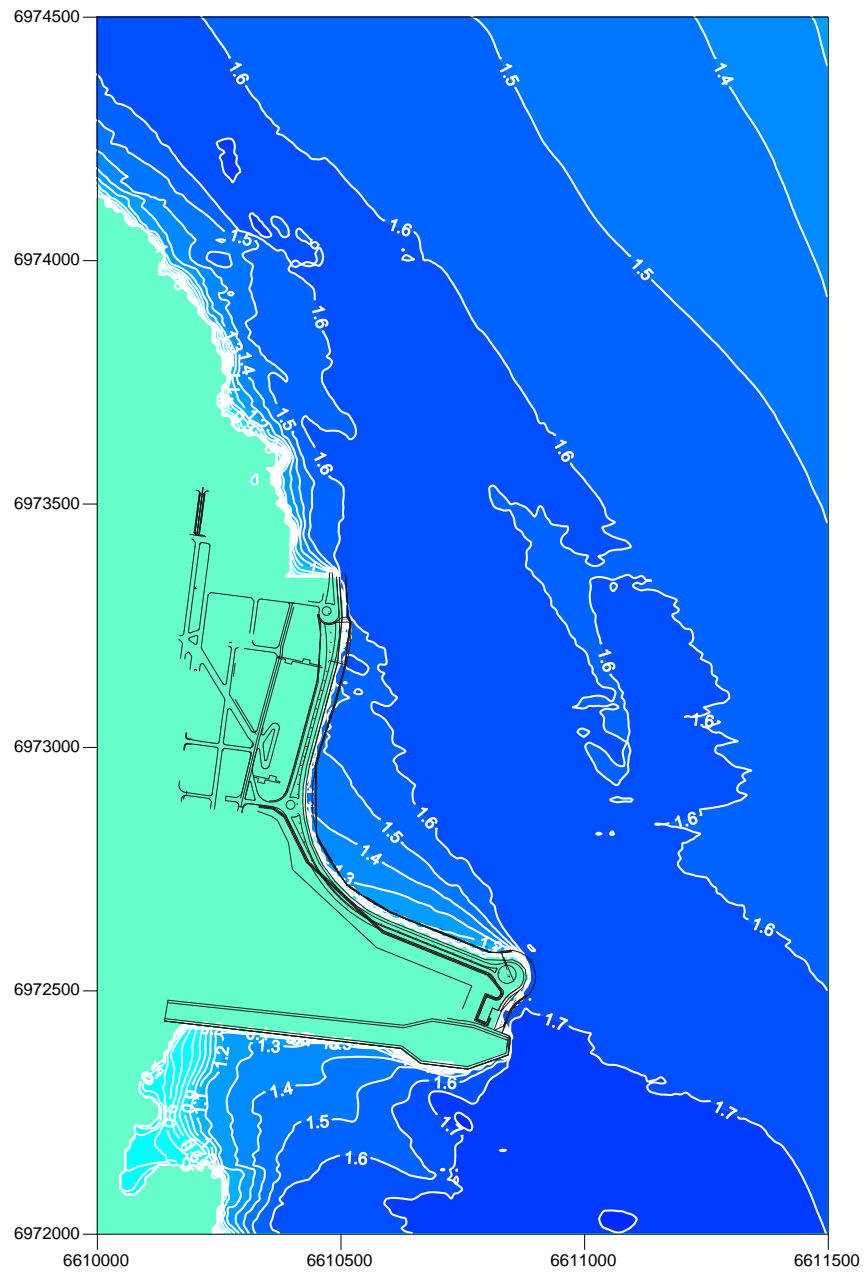


FIGURA A8

DIRECCION E - W 30.6 m/s

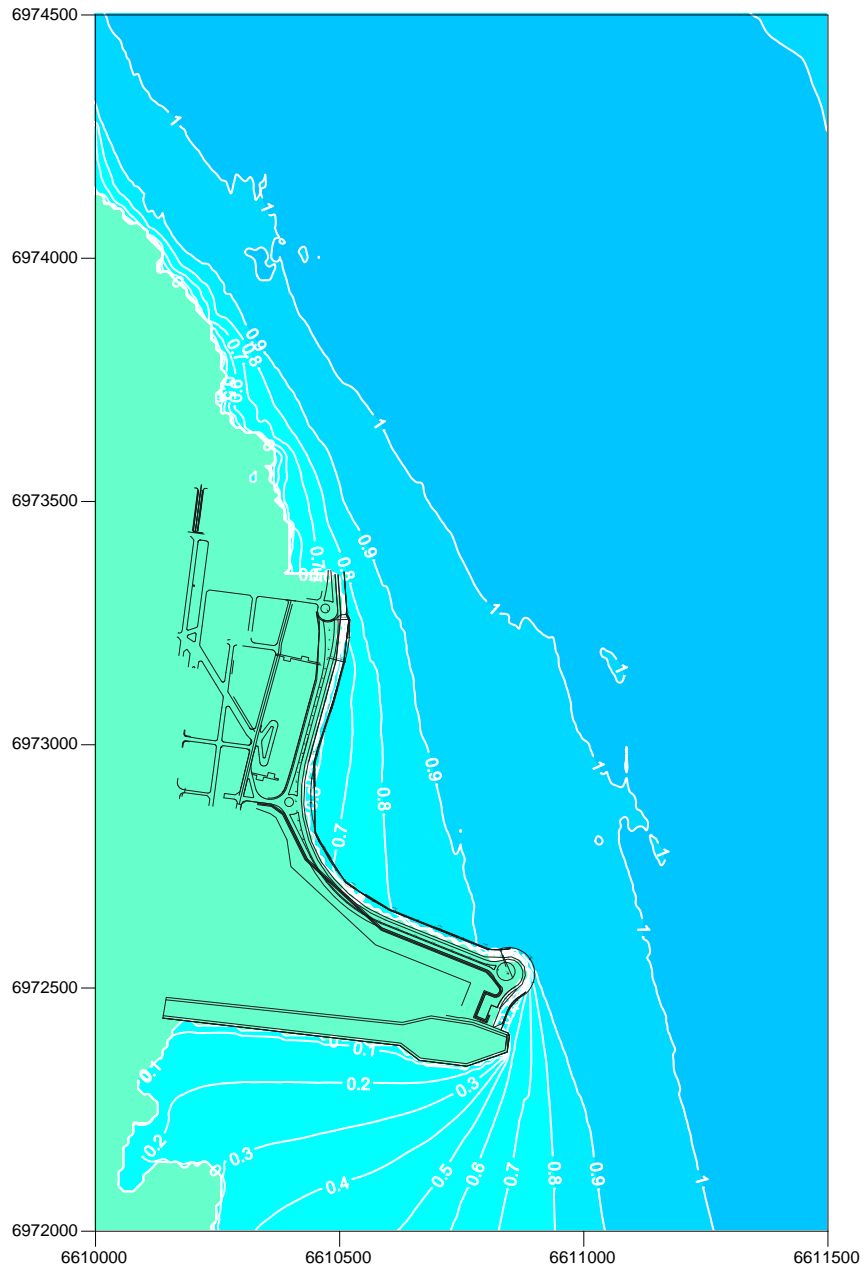


FIGURA A9

DIRECCION N - W 19.4 m/s

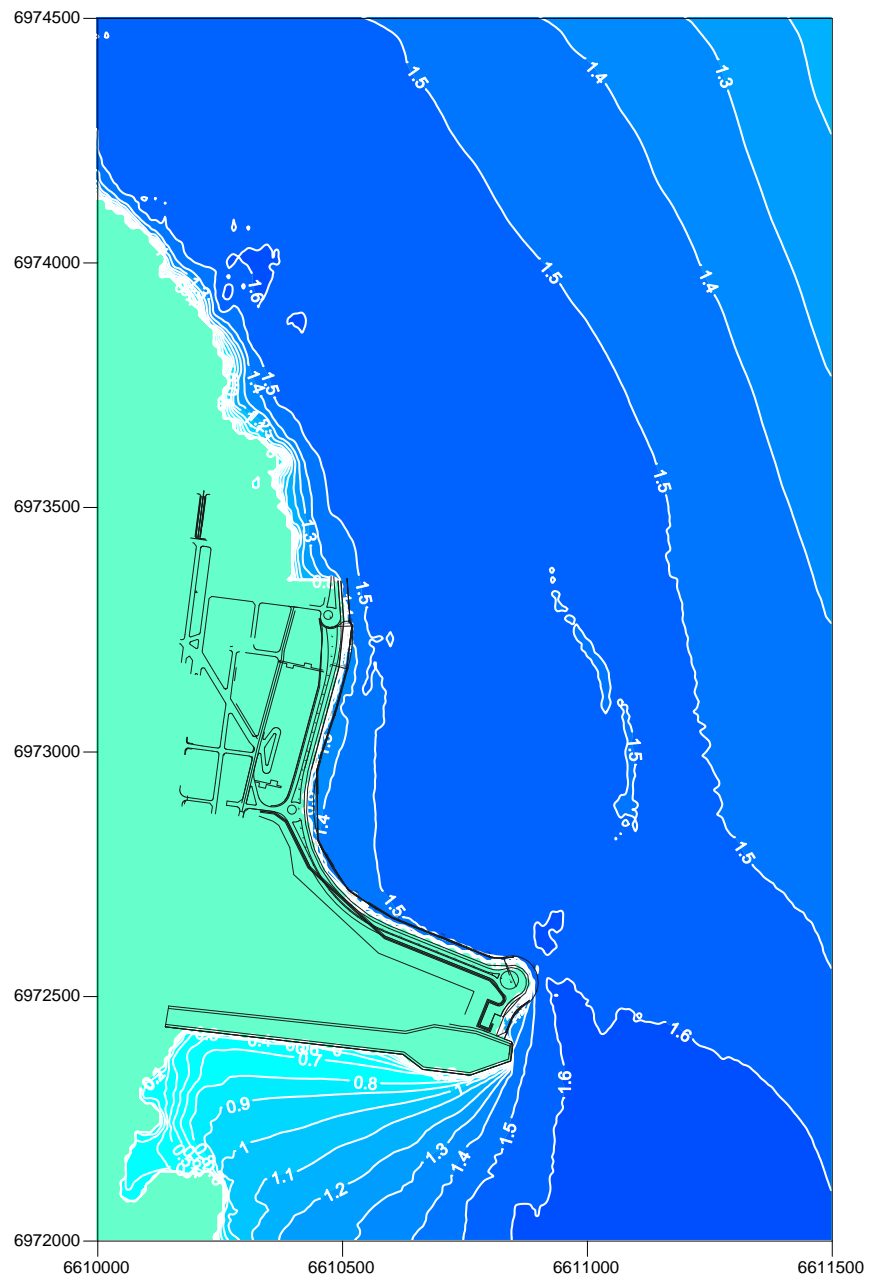


FIGURA A10

DIRECCION NE - W 31.94 m/s

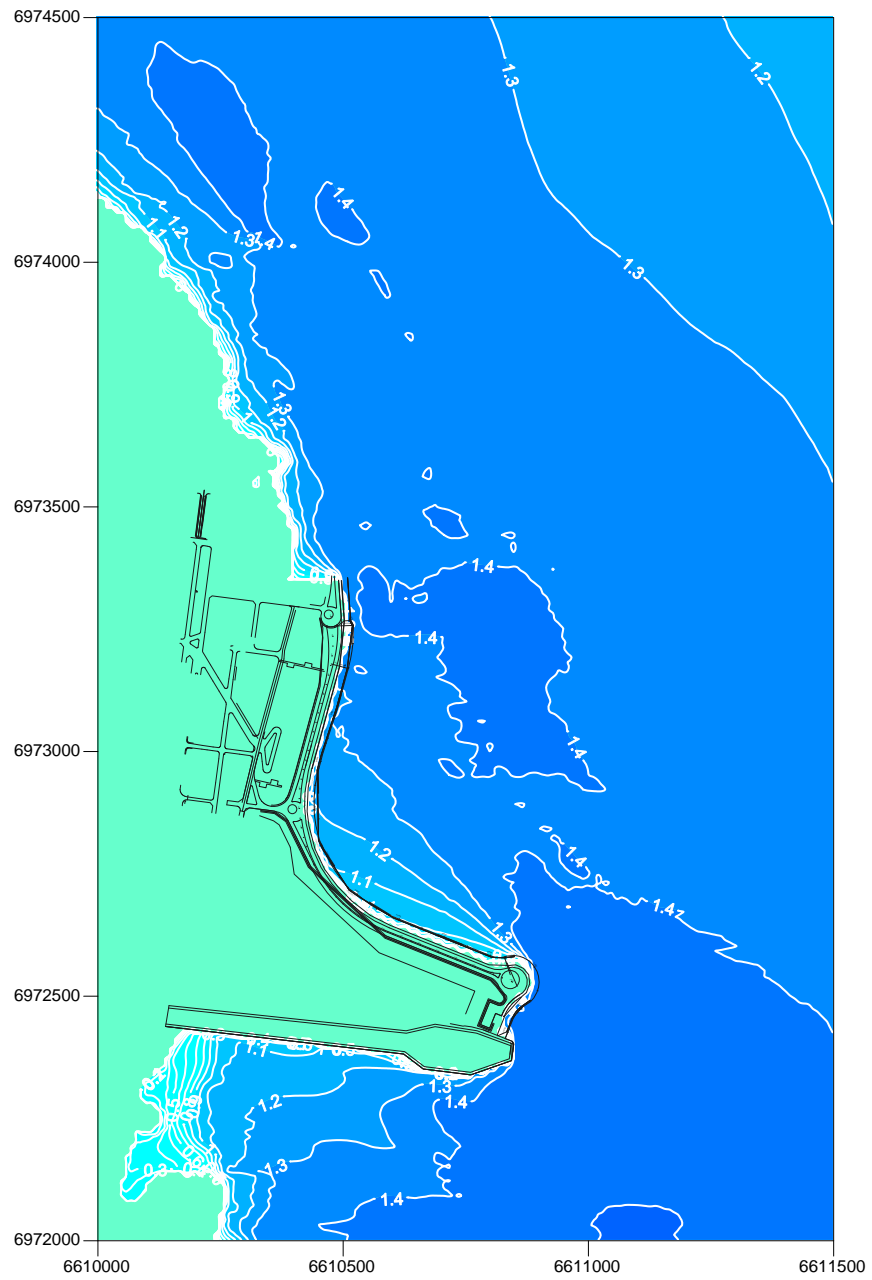


FIGURA A11

DIRECCION E - W 26.39 m/s

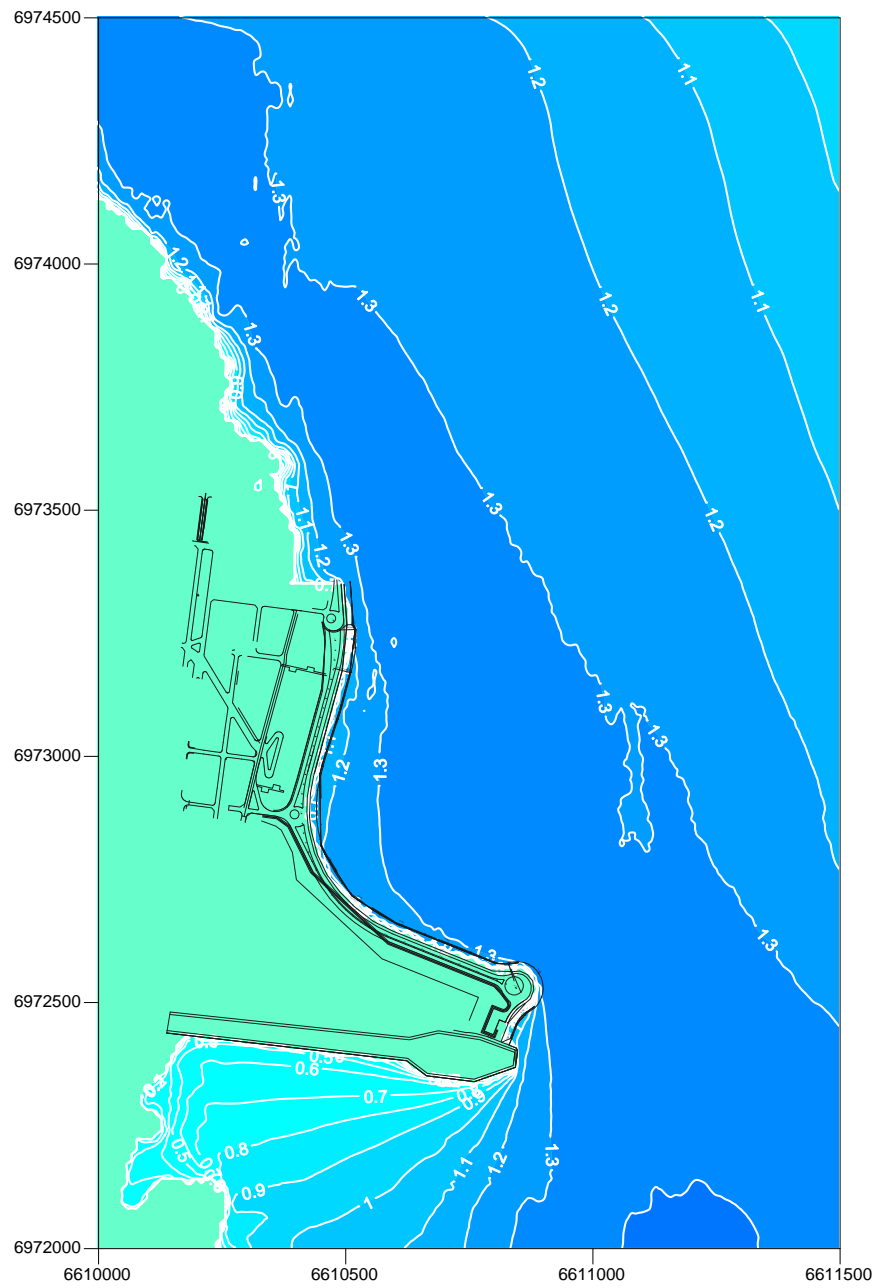


FIGURA A12

DIRECCION NE - W 27.78 m/s