



MODELACIÓN HIDRODINÁMICA PARA ESTIMAR PARÁMETROS DE DISEÑO EN UNA OBRA DE CAPTACIÓN PARA ACUEDUCTO. EMBALSE RÍO HONDO (ARG)

Paolo Gyssels¹, Hector Daniel Farias², Mariano A. Corral¹, Jorge Prieto Villarroya²

(1) Centro de Estudios y Tecnología del Agua. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de Córdoba - E-mail: pgyssels@efn.uncor.edu - Web: <http://www.efn.uncor.edu/investigacion/hidraulica/>

(2) Instituto de Recursos Hídricos. Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías. Universidad Nacional de Santiago del Estero - E-mail: hdf@unse.edu.ar - Web: <http://irh-fce.unse.edu.ar/hdf>

RESUMEN

En este trabajo se presentan los estudios y modelaciones hidrodinámicas llevadas a cabo con la finalidad de estimar los campos de velocidades actuantes en el entorno de la tubería sumergida de captación para la Obra de Toma del Acueducto del Oeste, Embalse de Río Hondo (Santiago del Estero).

En particular, es necesario calcular los esfuerzos y sollicitaciones estructurales actuantes sobre la tubería durante las etapas de manipulación, colocación y operación para una serie de escenarios hidrodinámicos posibles de presentarse en el entorno inmediato del conducto. Para ello se estimaron las velocidades esperables a nivel del extremo superior del conducto, en la vecindad inmediata del lecho lacustre.

Se realizó un análisis estadística de los datos de viento disponibles y de los niveles históricos en el embalse, se estimó el período de retorno para el cual se diseñan las obras objeto de los presentes análisis y se definieron diferentes escenarios de cálculo. Se implementó una modelación detallada de la hidrodinámica local, oleaje y corrientes inducidas por viento, incluyendo la calibración del modelo con mediciones en campo.

El software utilizado en todos los casos ha sido el Delft3D desarrollado por Deltares, el cual permite la modelación hidrodinámica a régimen no permanente del flujo en tres dimensiones.

ABSTRACT

In this paper, hydrodynamic studies and modeling are presented in order to estimate the velocity fields acting on the submerged pipe environment for the Western Aqueduct work, in the reservoir of Rio Hondo (Santiago del Estero).

In particular, it is necessary to calculate the forces and structural stresses acting on the pipe during handling steps, placement and operation for a number of possible hydrodynamic scenarios presented in the immediate environment of the pipe. For these reasons velocities were estimated at the upper level of the pipe, in the immediate vicinity of the lake bed.

Statistical analysis was performed over the available wind data and historical levels in the reservoir, the return period was estimated for the design conditions, object of this work and different scenario calculations were defined. A detailed modeling of hydrodynamics, waves and wind-induced currents, including the calibration of the model with field measurements have been implemented.

The software used in all cases has been developed by Deltares Delft3D, which allows modeling no-permanent hydrodynamic flow regime in three dimensions.

INTRODUCCIÓN

En el presente informe se presentan los Estudios y Modelaciones Hidrodinámicas llevadas a cabo con la finalidad de estimar los campos de velocidades actuantes en el entorno de la tubería sumergida de captación para la Obra de Toma del Acueducto del Oeste, Embalse de Río Hondo, Provincia de Santiago del Estero.

Un diagnóstico preliminar del problema indica la necesidad de calcular los esfuerzos y sollicitaciones estructurales actuantes sobre la tubería durante las etapas de manipulación, colocación y operación para una serie de escenarios hidrodinámicos posibles de presentarse en el entorno inmediato del conducto.

La “Zona de Estudio” detallada comprende el entorno inmediato de la Obra de Toma del Acueducto del Oeste, la que se ubica sobre la margen Sud del Embalse de Río Hondo, en la Provincia de Santiago del Estero (Figura1).



Figura1.- Imagen general del embalse de Río Hondo y del área de estudio.

En el caso de obras de toma y conductos ubicados en cuerpos de agua, para la estimación de las fuerzas hidrodinámicas (arrastre F_D y sustentación F_L) es necesario estimar las velocidades esperables a nivel del extremo superior del conducto, en la vecindad inmediata del lecho lacustre, a una distancia vertical “D” del mismo. Estas velocidades dependen de la hidrodinámica general del reservorio, de la hidrodinámica local, del oleaje y de las velocidades generadas por efecto de la fricción en la superficie libre del flujo inducidas por el viento. En el caso de la Obra de Toma del Acueducto del Oeste (Embalse Río Hondo, Santiago del Estero, Argentina) resultó necesario estimar los campos de velocidades actuantes en el entorno de la tubería sumergida de captación y conducción inicial mediante el empleo de modelaciones numéricas calibradas con datos de campo.

OBJETIVOS

El objetivo principal del estudio fue la estimación de los parámetros de diseño para el anclaje y protección de la tubería y obra de captación. El diseño de la estructura se basa en la determinación de las fuerzas actuantes, el oleaje y las corrientes que inciden sobre la tubería y pueden determinar su inestabilidad y colapso. En este caso, el viento es el término impulsor que genera el oleaje y las corrientes en el embalse.

Para conseguir el objetivo general se han llevado a cabo una serie de actividades preliminares: (i) recopilación, análisis y depuración de antecedentes; (ii) elaboración de Cartografía Digital del Area de Estudio usando técnicas de percepción remota y GIS; (iii) estudio Hidrometeorológico Regional (régimen de vientos, análisis estadístico de valores medios y extremos –máximos y mínimos-, Simulación de Escenarios); (iv) estudio estadístico de Niveles Históricos en el Embalse, incluyendo caudales ingresantes y erogados por las estructuras hidráulica de descarga de la presa.

A partir del producto de estos estudios preliminares básicos, se realizó un análisis de escenarios y adopción de un criterio para el diseño, después del cual se implementó una modelación hidrodinámica general del reservorio, y a partir de la misma una modelación detallada de la hidrodinámica local, oleaje y corrientes inducidas por viento, incluyendo la calibración del modelo con mediciones en campo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Régimen de vientos

Uno de los aspectos fundamentales para determinar las características del oleaje incidente sobre el área de estudio consiste en una correcta estimación de las velocidades dominantes del viento a escala regional y local. Para ello, se recopilaron una serie de datos en localidades situadas en varios puntos del país (a escala regional) donde se registra esta variable en forma continua.

Para el registro estadístico de datos de viento, se empleó la información disponible correspondiente a dos estaciones meteorológica de mayor proximidad a la zona reestudio, siendo estas la del Aeropuerto de Santiago del Estero (SdE Aero, operada por el Servicio Meteorológico Nacional - SMN) y la del Aeropuerto de San Miguel de Tucumán (Tuc Aero, también operada por el Servicio Meteorológico Nacional).

La información disponible corresponde a los valores medios procedentes de datos de mediciones diarias realizadas entre las 07:00 a.m y 07:00 p.m (Hora Local).

Considerando el promedio anual de los datos registrados en las estaciones mencionadas, se observan las siguientes “Rosas de Vientos” para valores medios de velocidad (Figura2).

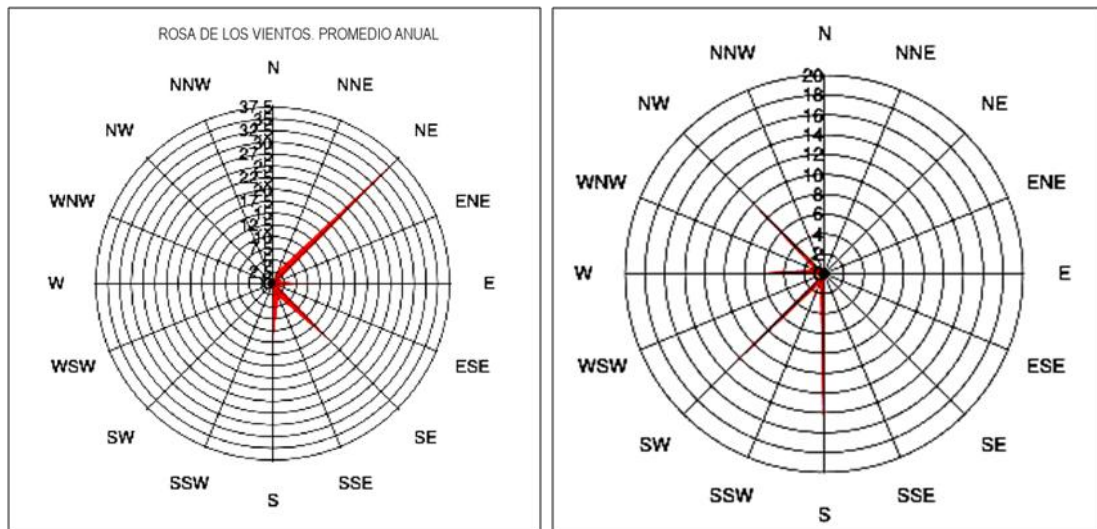


Figura2.- Rosas de Vientos (Media Anual). Estaciones de SdE Aero (izquierda) y de Tuc Aero (derecha).

Se observa que los vientos medios dominantes son del NE en la estación SdE y del S-SW en la estación Tucumán.

Avanzando con la definición de los parámetros de diseño para el estudio de corrientes en el Embalse, si se considera que la velocidad del viento se mantiene constante durante un cierto tiempo sobre la superficie del embalse, las alturas de las olas irán creciendo paulatinamente hasta alcanzar un valor máximo. Este límite queda impuesto por la longitud de la zona de generación (también denominada FETCH), la velocidad del viento y su duración. Para que el oleaje alcance esta altura máxima, es necesario que el viento sople (en forma sostenida) durante un tiempo por lo menos igual a esta duración crítica.

Si se adoptara como referencia a la velocidad correspondiente a una duración promedio de 1 hora, las velocidades de ráfaga pueden alcanzar valores entre 1.5 y 2 veces superiores. De la misma manera, las velocidades correspondientes a 2 y a 6 horas promedio llegan a ser del orden de ~0.95 y ~0.88 de la media horaria, respectivamente. Esta información empírica ha sido usada para construir gráficos y ajustar ecuaciones que permitan disponer de herramientas de cálculo para estimar velocidades distintas a las velocidades “índice” o “de referencia”.

En el gráfico siguiente (extractado a partir de la información publicada en el Manual de Ingeniería codificado como EM-1110-2-1100 Part II) se presenta la relación funcional:

$$V(t)/V(3600)=f(t)$$

para duraciones menores y mayores que 1 hora. Este tipo de ecuaciones permiten determinar la velocidad del viento para cualquier duración, en función del valor para 1 hora de duración.

Teniendo en cuenta la ausencia de registros de máxima (intensidad, dirección y duración) confiables en la zona específica de la obra (Embalse de Río Hondo), se consideraron los mapas y tablas regionales publicadas por el CIRSOC (que se refieren únicamente a intensidades de viento).

Según datos del CIRSOC 102 (Reglamento Argentino de Acción del Viento, Figura 1A: Velocidad Básica del Viento y Tabla C-3: Factores de Reducción para otros Intervalos

Medios de Recurrencia), y realizando la corrección por duración (de ráfaga de 3 seg a una hora de duración) dado por USACE, se pueden estimar las intensidades de viento asociadas a determinadas recurrencias y duraciones, de modo de definir relaciones [V-T_R-t] (Velocidad-tiempo de retorno-duración). Se observó que por la zona de la obra (próxima margen Sud del Embalse de Río Hondo) se sitúa la isolínea de 42 m/s, por lo que se puede adoptar este valor como velocidad de referencia (V_r = 42 m/s) para elaborar los cálculos y las relaciones [V-T_R-t]. Se estimaron las siguientes velocidades para diferentes períodos de retorno (Tabla 1):

Tabla 1.- Velocidades por diferentes duraciones y periodo de retorno estimadas en la zona del embalse, a 10m de altura.

T _R años	V _{TR (3s)} m/s	V _{TR (1h)} m/s	V _{TR (1h)} Km/h
5	32.76	21.72	78.18
10	35.28	23.39	84.19
25	39.06	25.89	93.21
50	42.00	27.84	100.23
100	44.94	29.79	107.24
200	47.88	31.74	114.26
500	51.66	34.24	123.28

Es necesario consignar que los datos anteriores se refieren a velocidades del viento a 10 metros de altura sobre la superficie.

Estas relaciones y valores de referencia fueron usados para configurar los escenarios críticos de comportamiento de corrientes y oleaje inducido por viento en la aplicación del modelo hidrodinámico que se usó para simular los campos de flujo generales y locales en la vecindad de la obra de toma del acueducto.

Estudio de las variaciones de niveles en el embalse

El estudio estadístico de valores extremos de los niveles de agua en el Embalse Río Hondo se llevó a cabo mediante la consideración de las series cronológicas históricas de niveles diarios (de las cuales se extractaron las máximas diarias de las series mensuales primero, y luego anuales) registrados en la escala ubicada en la Presa de Río Hondo, la cual ha sido operada en primera instancia por Agua y Energía Eléctrica (AYEE) (desde el llenado inicial e inicio de operaciones) y posteriormente por la Empresa Hidroeléctrica Río Hondo S.A. (a partir de la década de 1990).

De acuerdo a los objetivos iniciales de la obra (embalse de múltiples propósitos, pero con una importancia predominante del almacenamiento y regulación de caudales para riego, por encima de la generación hidroeléctrica), y teniendo en cuenta que se trata de una obra de regulación estacional (es decir, su volumen máximo es bastante menor al derrame medio anual de la cuenca), el embalse muestra ostensibles variaciones de su nivel a lo largo de su operación desde el inicio del funcionamiento hasta la actualidad. En las imágenes siguientes se muestra un ejemplo de una de esas situaciones, en la que en un lapso de tiempo del orden de 2 años y medio, el nivel experimenta variaciones mayores a los 6 metros, lo cual implica volúmenes asociados del orden de los 900 Hm³ (Figura3).

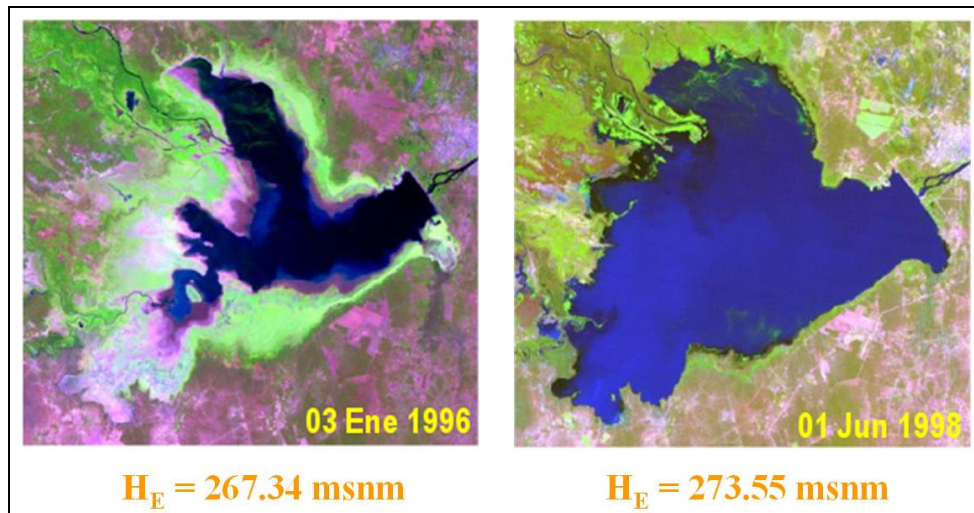


Figura3.- Ejemplo del efecto de las variaciones estacionales del nivel de agua en el lago.

Para los objetivos del presente estudio, sólo se consideraron los valores máximos anuales, que son los de mayor interés en relación a la estimación de las recurrencias (períodos de retorno) asociados a la ocurrencia de esos máximos, que se consideran de importancia para establecer los escenarios de modelación hidrodinámica que representan condiciones de funcionamiento extremo. La serie de datos considerada comprende el período desde el año hidrológico 1968 (inicio de operaciones de la obra luego del llenado inicial del reservorio) hasta 2005, lo que configuró una serie final de 36 registros.

Para esta serie se realizó el análisis estadístico mediante la aplicación de cuatro funciones teóricas de frecuencias que se consideraron apropiadas teniendo en cuenta las características de la variable a analizar: (i) GEV: Distribución Generalizada de Valores Extremos; (ii) LP3: Distribución log-Pearson tipo III; (iii) LN3: Distribución log-Normal de tres parámetros; (iv) P3: Distribución Pearson tipo III.

Para las cuatro distribuciones estudiadas, se aplicó el paquete de software HYDRO-FREQ (HydroTools Software, Inc.; Edmonton, Alberta, Canadá). En este contexto, la distribución que mejor se ajustó resultó ser la GEV (General de Valores Extremos) con errores de estimación levemente mejores de la Log-Pearson III (LP3) (Figura4).

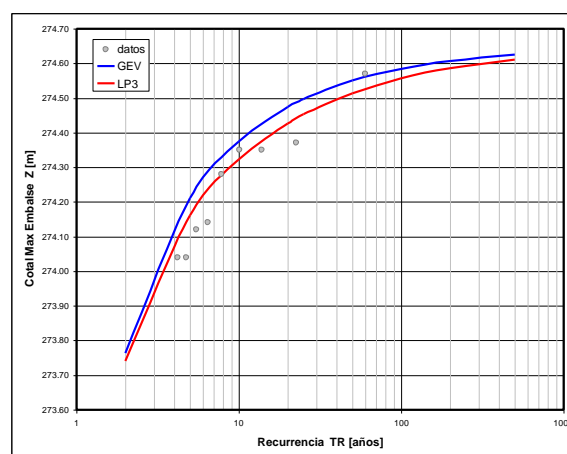


Figura4.- Desempeño de las distribuciones GEV y LP3 para los valores máximos de niveles observados. De acuerdo a estos resultados, el nivel máximo esperable (en el punto de registro de la escala

en la presa) para una recurrencia de 100 años es 274,59 m. El valor mínimo calculado es de 268 m.

Selección del período de retorno T_R

Considerando como guía de carácter orientativo a la normativa española ROM 02-90 “Acciones en el Proyecto de Obras Marítimas y Portuarias”, la elección del período de retorno del elemento forzador se calculó teniendo en cuenta el nivel de seguridad requerido por el carácter específico de la obra. Establecida una Vida Útil $L_f=50$ años (Figura5) y un Riesgo Máximo Admisible $E=0,4$ se calculó el Período de Retorno $T_R=50$ años, dado por la Ecuación1.

VIDAS ÚTILES MÍNIMAS PARA OBRAS O INSTALACIONES DE CARÁCTER DEFINITIVO (en años)			
TIPO DE OBRA O INSTALACIÓN	NIVEL DE SEGURIDAD REQUERIDO		
	NIVEL 1	NIVEL 2	NIVEL 3
INFRAESTRUCTURA DE CARÁCTER GENERAL	25	50	100
DE CARÁCTER INDUSTRIAL ESPECÍFICO	15	25	50

Figura5.- Vida útil mínima para instalaciones de carácter definitivo (ROM 02-90).

$$E = 1 - \left(1 - \left(\frac{1}{T_R} \right) \right)^{L_f} \quad (1)$$

Para el periodo de retorno calculado se determinaron las siguientes dos condiciones más desfavorables:

- a) una velocidad del viento de 50 km/h ($T_R=50$ años), de 24 horas de duración para la generación de las corrientes debidas a viento superpuestas al oleaje inducido por el viento;
- b) una velocidad del viento de 100 km/h ($T_R=100$ años), de 6 horas de duración para la generación del oleaje.

En el segundo caso se evaluó la posibilidad de la existencia de una tormenta con muy alto período de retorno cuya duración no se estima pueda superar las 6 horas, con lo cual no pueden establecerse patrones de corrientes bien definidos pero si pueden generarse oleajes importantes.

Herramientas numéricas

La herramienta empleada en este trabajo, ha sido el módulo FLOW del programa de modelado numérico “open source” llamado Delft3D (Deltares, 2011, Roelvink y van Banning, 1994) para el cálculo del flujo debido al viento, a los ingresos de caudales de los ríos y a la evacuación por vertedero y el modelo WAVE (que utiliza el modelo SWAN -Delft3D WAVE, 2011) para el cálculo de la generación del oleaje y su propagación en el embalse.

Para el cálculo en tres dimensiones se definió una discretización vertical de 10 divisiones en coordenadas sigma.

El modelo hidrodinámico FLOW (Delft3D FLOW, 2011) resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes sobre una malla curvilínea, asume las hipótesis de Boussinesq. El conjunto de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales en combinación con un apropiado conjunto de condiciones iniciales y de contorno es resuelto en una malla de diferencias finitas utilizando el método RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes). Las fluctuaciones turbulentas las incluye el modelo por medio de los esfuerzos de Reynolds, definidos por medio del modelos de cierre de turbulencia, entre los cuales cabe mencionar el k-l o el k-ε (Uittenbogaard, van Kester y Stelling, 1992).

La solución numérica de las ecuaciones hidrodinámicas requiere la discretización espacial (horizontal) del área de estudio. Con este fin se superpone sobre el dominio de cálculo una malla con un número apropiado de celdas, dependiendo del detalle requerido por la tipología del problema a estudiar (oleaje, corrientes, entrada de ríos, ...) y por la cercanía a las zonas de mayor interés (desembocadura de los ríos, punto de toma de agua, ...).

En las simulaciones 3D, la dirección vertical se discretiza a través de una malla con sistema coordenado tipo sigma o “σ”, donde las capas se dividen proporcionalmente y están limitadas por dos planos, de los cuales uno se aproxima a la superficie libre del agua y el otro a la topografía del fondo.

En cada problema examinado se consideró un intervalo temporal apropiado determinado por el tipo de problema involucrado y estimado con el cálculo del número de Courant para no afectar a la calidad de la solución (WL | Delft Hydraulics, 2006).

$$CFL = \frac{\Delta t \sqrt{gH}}{\{\Delta x, \Delta y\}} < 10 \quad (1)$$

Donde Δt es el paso de tiempo, g es la aceleración de gravedad, H es el tirante medio, $\{\Delta x, \Delta y\}$ es un valor característico de las dimensiones de la malla en ambas direcciones, comúnmente el valor mínimo.

El modelo de oleaje SWAN (Simulating Waves Nearshore, en el módulo WAVE), ha sido desarrollado en Holanda por la Delft University of Technology, es un modelo de generación de oleaje por viento y de propagación especialmente desarrollado para ambientes de aguas poco profundas. El modelo está basado en la ecuación de balance de la energía en ausencia de corrientes, con fuentes y sumideros.

El modelo SWAN de tercera generación (Booij; Ris et al., 1999), presenta la posibilidad de usar mallas curvilíneas que no tienen que estar orientadas en la dirección media del oleaje y mallas no estructuradas que se adaptan mejor a las particularidades geométricas de la costa. Una descripción detallada del modelo SWAN se pueden encontrar en el manual de usuario (WL | Delft Hydraulics, 2006).

Dominio de cálculo

La geometría del vaso de almacenamiento fue elaborada a partir de los datos de la última batimetría disponible (Informe de INCOCIV-FICH-UNL elevado a Hidroeléctrica Río Hondo y Secretaría del Agua de Santiago del Estero, 2010). En la figura siguiente se presenta esa batimetría (en forma de curvas de nivel), conjuntamente con la malla de cálculo usada para las corridas iniciales del modelo. Sobre la base de esta información básica, se elaboró el modelo digital de elevación (DEM, Digital Elevation Model), el cual permite trabajar en procesos de refinamiento y optimización del mallado de cálculo con coordenadas curvilíneas en DELFT-3D, según se indicó en la descripción del Modelo previamente presentada. A continuación se presentan los resultados gráficos del DEM y la interpolación topográfica para la optimización (Figura6).

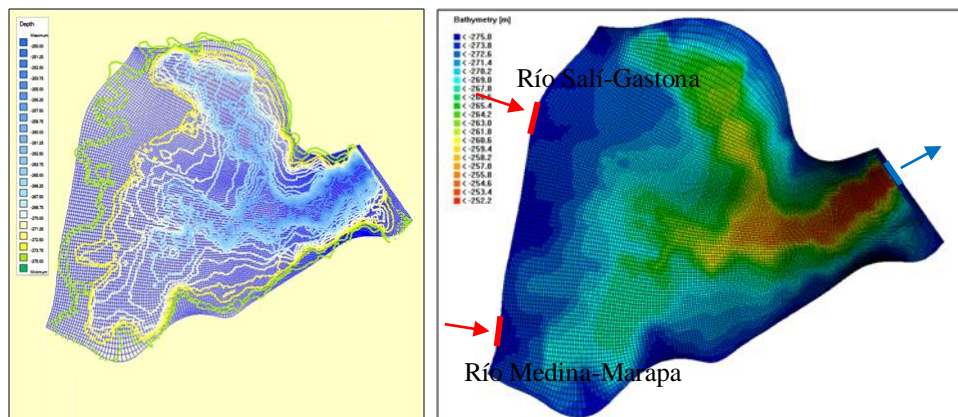


Figura6.- Topografía, discretización de la malla e interpolación sobre la malla. Las flechas indican ingresos de tributarios en rojo y la ubicación del vertedero en azul.

La malla de cálculo está compuesta por elementos rectangulares curvilíneos ortogonales que hacen un total de 23328 elementos de un tamaño medio de 15m de lado y una máxima resolución del orden de 5m.

Las condiciones de borde se definieron en función de los escenarios estudiados, con el objetivo de determinar las situaciones más desfavorables en cuanto a la generación de corrientes en la zona de la toma y conducción:

- Viento de 50 km/h de 24 h de duración, del SW, W, NW: corrientes y oleaje. Embalse a cota máx y mín.
- Viento de 100 km/h de 6 h de duración, del SW, W, NW: solo oleaje. Embalse a cota máx y a cota min.
- Descarga máxima por vertedero y embalse vacío.
- Entrada de caudales de crecida con $T_R = 50$ años por los ríos Salí-Gastona y Medina-Marapa.

El valor del paso de tiempo computacional Δt adoptado fue de 10 segundos.

RESULTADOS

Luego del análisis se ha determinado que las condiciones críticas se pueden presentar por un viento de 50 km/h que sople durante 24 horas generando una corriente que se superpone a un oleaje, o por un viento de 100 km/h que sople durante 6 horas generando un oleaje, ambos

procedentes de la dirección Oeste (W). En efecto, los valores de magnitud de las corrientes inducidas por la abertura del vertedero frontal (Figura7) o por la entrada de caudales de crecidas (Figura8) de los ríos son órdenes de magnitud inferiores a los casos de corrientes debidas a vientos extremales.

Los resultados han sido calibrados con medidas de campo de velocidades en proximidad de la zona de toma (Figura9), realizadas con ADP (Acoustic Doppler Profiler) para condiciones de vientos relativamente suaves que fueron reproducidas con la modelación numérica.

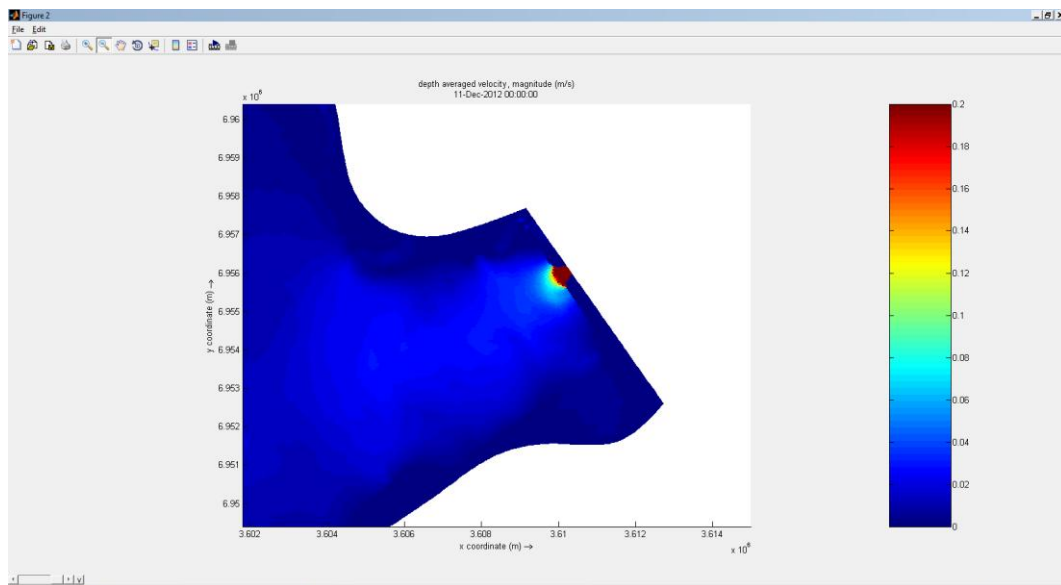


Figura7.- Simulaciones por descarga máxima por vertedero.

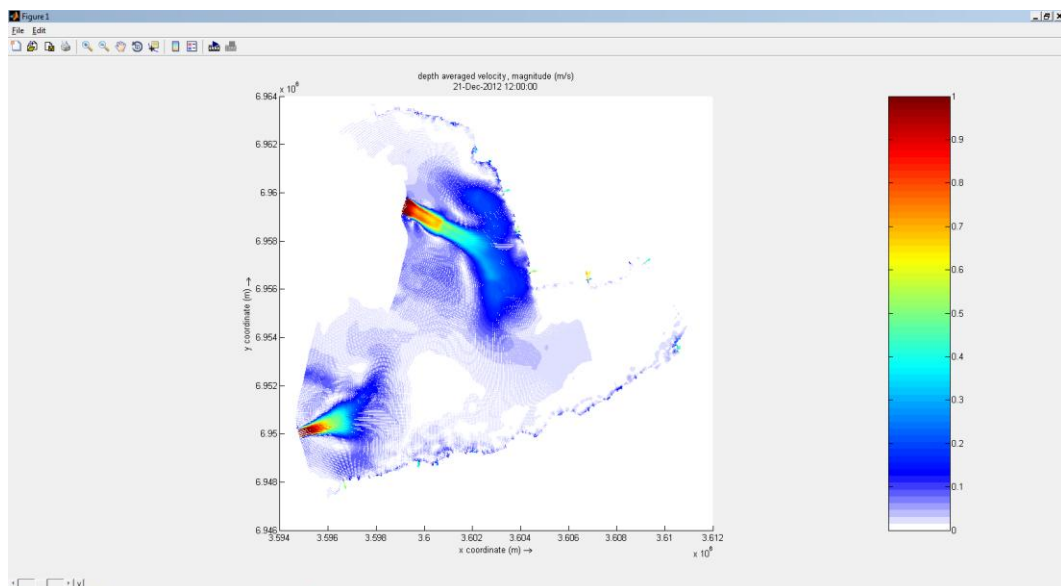


Figura8.- Simulaciones de crecidas con TR de 50 años por embalse lleno.



Figura9.- Localización de los puntos de medición.

A continuación se muestran los resultados de la hidrodinámica para los casos de viento del W de 50 km/h durante 24 horas (Figura10, Figura11 y Figura12. En la Figura13 se muestra un ejemplo de la Altura de ola significativa (H_s) en m generada por un viento del W de 100 km/h de 6 horas de duración.

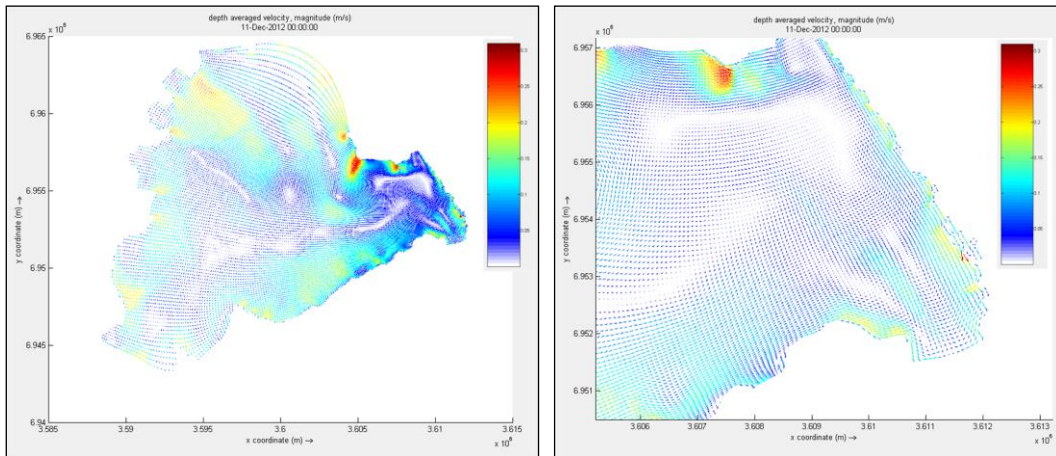


Figura10.- Resultados de corrientes promediadas en la vertical inducidas por viento (dirección: W, $V = 50$ km/h ; embalse lleno).

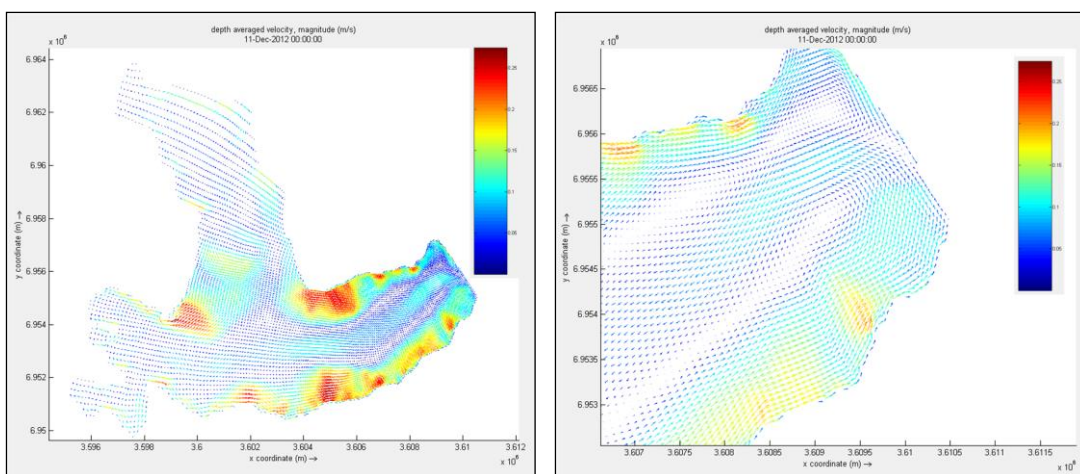


Figura11.- Resultados de corrientes promediadas en la vertical inducidas por viento (dirección: W, $V = 50$ km/h; embalse mínimo).

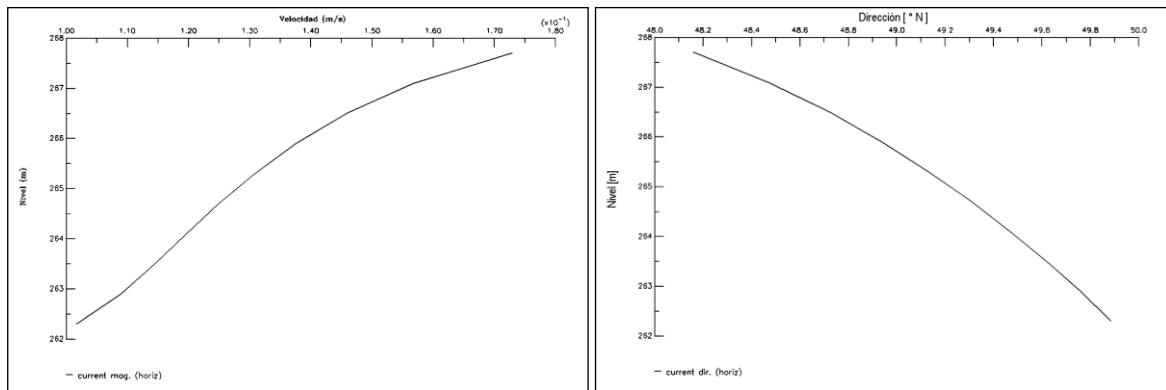


Figura12.- Perfil de Velocidades (izquierda) y Dirección en la vertical en el punto P3 (dirección: W, V = 50 km/h ; embalse mínimo).

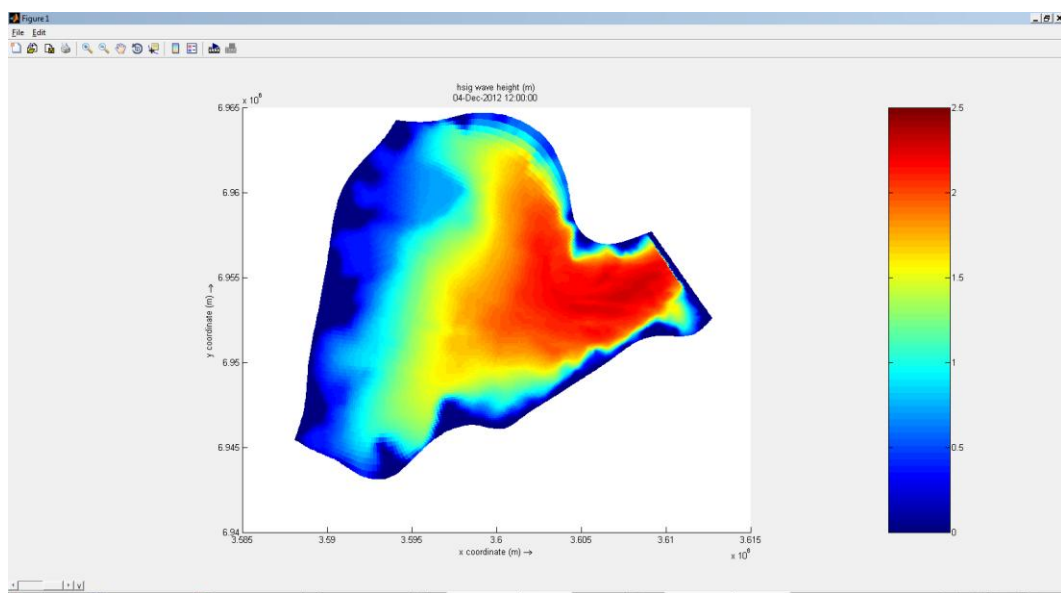


Figura13.- Altura de ola significativa (Hs) en m generada por un viento del W de 100 km/h de 6 horas de duración con embalse lleno.

Una vez llevada a cabo la modelación del comportamiento del sistema con el conjunto de “Escenarios Críticos” antes seleccionados, se obtuvo un conjunto de resultados cuyos aspectos fundamentales e implicancias sobre las probables velocidades en la zona de obra se han detallado previamente.

En la siguiente Tabla 2 se resumen los principales resultados obtenidos.

Puede observarse que los patrones de comportamiento crítico corresponden a los escenarios:

- a) viento W 100 Km/h con solo oleaje por una duración de 6 horas del viento, para el embalse lleno, con una velocidad orbital cerca del fondo del orden de 0,4 m/s;
- b) viento W 100 Km/h con solo oleaje por una duración de 6 horas del viento, para el embalse a nivel mínimo, con una velocidad orbital cerca del fondo del orden de 0,56 m/s;

Tabla 2.- Resumen de los resultados obtenidos con valores de velocidades máximas (orbitales o por viento) en las proximidades del punto de toma a 10,8m de profundidad con embalse lleno.

Velocidad en ultima capa cerca del fondo									
Nivel embalse	Dirección	Duración	h punto	Vel. Viento	Vel. Corriente fondo	Hs	Tp	Vel. Orb. fondo	Vel. Total fondo
		hs	m	Km/h	m/s	m	s	m/s	m/s
max	SW	6	10,8	100		1,94	5,0	0,36	0,36
max	W	6	10,8	100		2,18	5,0	0,40	0,40
max	NW	6	10,8	100		1,97	5,0	0,38	0,38
max	SW	24	10,8	50	0,03	1,20	5,0	0,09	0,12
max	W	24	10,8	50	0,06	1,26	5,0	0,12	0,18
max	NW	24	10,8	50	0,06	1,22	5,0	0,11	0,17
min	SW	6	4	100		1,63	4,0	0,47	0,47
min	W	6	4	100		1,9	4,0	0,56	0,56
min	NW	6	4	100		1,73	3,5	0,50	0,50
min	SW	24	4	50	0,04	0,73	4,0	0,26	0,30
min	W	24	4	50	0,05	0,78	4,0	0,32	0,37
min	NW	24	4	50	0,04	0,76	3,5	0,30	0,34

En el caso de viento de intensidad inferior (50 km/h) que sopla durante 24 horas, los escenarios más críticos son:

- a) viento W 50 Km/h por una duración de 24 horas, para el embalse lleno, con una velocidad orbital cerca del fondo del orden de 0,18 m/s;
- b) viento W 50 Km/h por una duración de 24 horas, para el embalse a nivel mínimo, con una velocidad orbital cerca del fondo del orden de 0,37 m/s;

En relación a la implicancia (directa e indirecta) de estos resultados sobre el potencial efecto en los esfuerzos hidrodinámicos que afectan a la tubería, debe tenerse en cuenta que si se desean calcular los esfuerzos y sollicitaciones estructurales actuantes sobre la conducción durante las etapas de manipulación, colocación y operación, las fuerzas a considerar son las que se indican en la figura siguiente (Figura14).

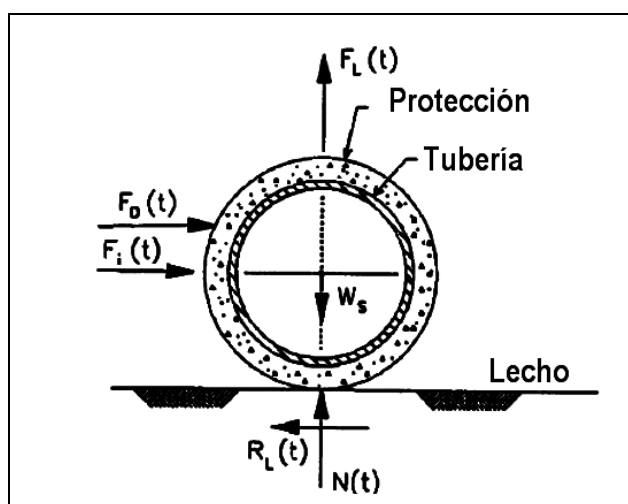


Figura14.- Fuerzas actuantes sobre el conducto apoyado en el lecho

Para la estimación de las fuerzas hidrodinámicas (arrastre F_D y sustentación F_L) es necesario

estimar las velocidades esperables a nivel del extremo superior del conducto, en la vecindad inmediata del lecho lacustre, a una distancia vertical “D” del mismo. En ese caso, considerando las distribuciones de velocidades en una vertical genérica, para estimar la velocidad a una altura del orden del 10% del tirante total, habría que afectar a la velocidad media (la que se consigna en el cuadro resumen) por un factor de reducción del orden del 82% (es decir, $K_V = 0,82$).

CONCLUSIONES

Se aplicó un modelo hidrodinámico 3D para determinar las condiciones forzantes de diseño para la obra de toma y conducción inicial del Acueducto del Oeste, emplazada en las márgenes del Embalse Río Hondo. Un diagnóstico inicial del problema indicó la necesidad de calcular los esfuerzos y solicitaciones estructurales actuantes sobre la tubería durante las etapas de manipulación, colocación y operación para una serie de escenarios hidrodinámicos posibles de presentarse en el entorno inmediato del conducto.

Considerando los estudios preliminares básicos, se realizó un análisis de escenarios y adopción de un criterio para el diseño, a partir del cual se implementó una modelación hidrodinámica general del reservorio, y luego una modelación detallada de la hidrodinámica local, oleaje y corrientes inducidas por viento, incluyendo la calibración del modelo con mediciones en campo. Se estudiaron los campos de corrientes y oleaje inducidos por viento para distintos escenarios asociados a las recurrencias de diseño. También se evaluaron los efectos combinados producidos por descarga de vertedero y de crecida de los ríos tributarios al cuerpo de agua.

Se determinó que las condiciones más desfavorables se verifican por las corrientes generadas por el oleaje impulsado por vientos de 100 km/h de 6 horas de duración con direcciones de procedencia del sector W. El período de retorno asociado a esta magnitud del viento ha sido estimado en 100 años.

El valor de velocidad máxima en la capa más cercana al fondo es del orden de 0,56 m/s en el escenario más crítico. También se han determinado tensiones de corte, alturas de olas y otros parámetros de interés para definir la metodología y las maniobras adecuadas para la colocación del conducto, como para el diseño de estructuras de protección de la tubería y de la obra de toma. Estos valores deberían ser usados para el dimensionamiento de anclajes y estructuras de protección de la tubería.

Debe destacarse que estos escenarios exceden en realidad a los “críticos probables”, ya que velocidades de viento sostenida en 100 km/h tienen una probabilidad de ocurrencia muy baja, pero se consideró este caso extremo para establecer valores de referencia.

Con respecto a la tipología de protección a aplicar para resguardar el conducto de la acción hidrodinámica de los forzantes calculadas, se recomienda explorar sistemas de protección alternativo, como por ejemplo, cubiertas con mantas flexibles materializadas a través de un esquema del bloques tronco-piramidales adheridos a un geotextil, cuyos parámetros de diseño deberán dimensionarse a partir de los resultados obtenidos en el presente estudio.

El estudio de este caso especial pudo demostrar la versatilidad y potencial del paquete de

software aplicado, el cual se presenta como una herramienta informática de apreciable utilidad para el estudio de casos como el presentado en este trabajo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Booij, N., Ris, R. C. and Holthuijsen, L. H. (1999), A third-generation wave model for coastal regions, Part II: Verification, *J. Geophys. Res.* Vol. 104, C4, pp.7667-7681.

Delft3D-Flow (2011). *Simulation of multidimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments.* User Manual, Deltares, The Netherlands. <http://oss.deltares.nl/>.

Delft3D-Wave (2011). *Simulation of short-crested waves with SWAN,* User Manual Part of Hydro-Morphodynamics. Deltares, The Netherlands <http://oss.deltares.nl/>.

Deltares (2011). WL DELFT HYDRAULICS: *DELFT3D-FLOW*, simulation of multidimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. The Netherlands. [<http://oss.deltares.nl/>]

INCOCIV-FICH-UNL (2010). Incociv consultora S.A. y Facultad Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral. Informe elevado a Hidroeléctrica Río Hondo y Secretaría del Agua de Santiago del Estero.

Roelvink, J. A. & van Banning, G.K.F.M. (1994). “Design and development of DELFT3D and application to coastal morphodynamics”. In: Verwey, Minns, Babovic, and Maksimovic (eds.). *Hydroinformatics’ 94*, Balkema, Rotterdam, The Netherlands.

ROM 0.2-90 (1990). Acciones al proyectar Obra Marítima y Portuaria. Serie 0. Puerto del Estado (España).

Uittenbogaard, R. E.; van Kester, J. A. T. M. and Stelling, G. S. (1992). *Implementation of three turbulence models in 3D-TRISULA for rectangular grids.* Report Z81, Delft Hydraulics. The Netherlands.

WL/Delft Hydraulics (2006). *DELFT3D-FLOW, simulation of multidimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments.* User Manual. Delft, The Netherlands.