

# **ESTUDIO SEDIMENTOLÓGICO EN EL EMBALSE DE AGUAS CORRIENTES PARA LA UBICACIÓN DE LA TOMA PARA LA PLANTA POTABILIZADORA DE MONTEVIDEO Y REGIÓN METROPOLITANA.**

**Rodrigo Alonso, Christian Chreties, Guillermo López y Luis Teixeira.**

Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Uruguay  
Julio Herrera y Reissig 565, Montevideo, Uruguay. CP 11300

E-mail: [ralonso@fing.edu.uy](mailto:ralonso@fing.edu.uy), [chreties@fing.edu.uy](mailto:chreties@fing.edu.uy), [glopez@fing.edu.uy](mailto:glopez@fing.edu.uy), [luistei@fing.edu.uy](mailto:luistei@fing.edu.uy)

## **RESUMEN**

La Administración Nacional de las Obras Sanitarias del Estado (OSE) está proyectando la construcción de una nueva línea aductora de agua potable (6ta línea) para Montevideo y Región Metropolitana. El proyecto de la nueva línea, incluye la construcción de una nueva toma del río Santa Lucía en la zona de la presa reguladora de Aguas Corrientes; sitio donde se ubican las tomas de las restantes líneas aductoras, actualmente en servicio. El río Santa Lucía, en la zona de estudio, se desarrolla en su tramo medio y tiene una configuración meandriforme, muchas veces con barras alternadas especialmente en zonas de curva. Específicamente la zona de tomas se ubica en la parte externa de una curva abrupta, aguas arriba de la presa de regulación de nivel de Aguas Corrientes. La ubicación en planta y en altura de la nueva toma proyectada resulta determinante desde el punto de vista de su funcionamiento hidro-sedimentológico. En este trabajo se presenta la metodología y los resultados obtenidos en el estudio sedimentológico del embalse de de Aguas Corrientes, que permiten establecer las recomendaciones desde el punto de vista hidro-sedimentológico para la ubicación de la nueva toma de aducción de agua para Montevideo y la Región Metropolitana.

## **ABSTRACT**

The National Administration of Sanitary Works (OSE) is planning to build a new pipe line (6th line) to Montevideo and Metropolitan Region. This new pipe line implies the construction of a new intake on the Santa Lucia River, in Aguas Corrientes dam reservoir; where the other lines (currently in service) are located. The study zone of Santa Lucia River, is located in the middle part of the river and has a meandering configuration with alternate bars, particularly in curved zones. The intake zone is located on the external side of a sharp bend, upstream of the Aguas Corrientes regulation dam. The correct location of the new intake, both in plant and elevation, is decisive for its hydro-sedimentological operation. In this paper the methodology and results of the sedimentological study for the location of the new intake are presented.

## INTRODUCCIÓN

La Administración Nacional de Obras Sanitarias del Estado (OSE) tiene a su cargo el abastecimiento de agua potable de todo el Uruguay. Particularmente, en cuanto a la Región Metropolitana (Montevideo y alrededores), el sistema de abastecimiento tiene como fuente el río Santa Lucía, afluente del Río de la Plata, localizado al oeste de la ciudad de Montevideo. Este sistema de abastecimiento consta de una planta de potabilización ubicada en la localidad de Aguas Corrientes (50 Km. al noroeste de Montevideo) y actualmente 5 líneas de bombeo y distribución. La planta de Aguas Corrientes brinda el abastecimiento de agua a una población de 1.700.000 habitantes. El suministro de agua bruta hacia la planta potabilizadora se realiza por medio de un conjunto de bombas que toman agua en forma directa del embalse de una presa de regulación del nivel, emplazada en el curso principal del río Santa Lucía. (Figura 1).

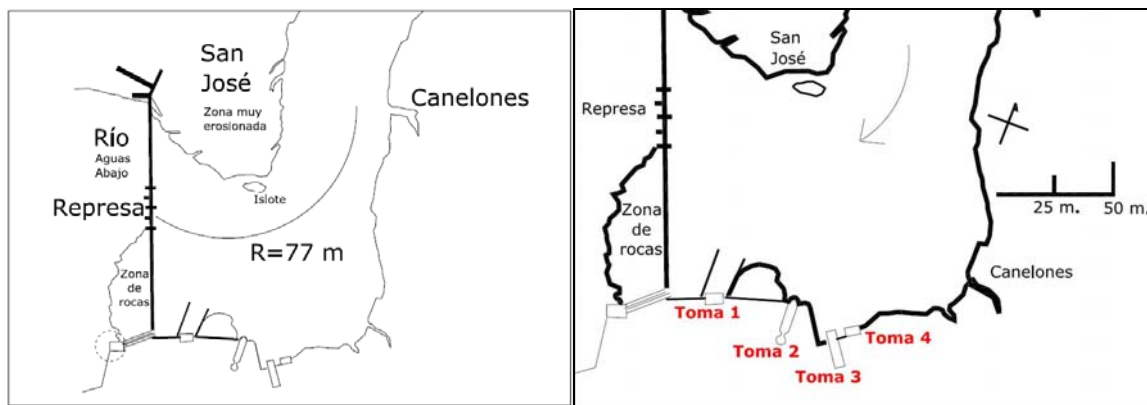


Figura 1.- Presa y embalse de Aguas Corrientes (Izquierda). Ubicación de tomas existentes (Derecha).

El embalse generado por la presa de Aguas Corrientes tiene una profundidad media de 3.5 m, siendo capaz de almacenar a cota de vertido 1.800.000 m<sup>3</sup>. La presa admite la operación de 2 compuertas de fondo que permiten la descarga del embalse en situación de crecida. Esta operación habilita el transporte de sedimentos a través de la presa. Particularmente el emplazamiento de las tomas ocurre en una zona en curva del río cuyo desarrollo natural (meandro) se ve alterado por la presencia de la presa de regulación. Esta zona presenta una fuerte curvatura donde tiene lugar un cambio en la dirección del flujo mayor a 90°. El radio de curvatura es de 77 metros y la profundidad media de flujo es de 3.5 metros. Por otra parte, el sedimento de fondo del río tiene diámetros medios pasibles de ser transportados por el flujo. Estas particularidades dificultan la comprensión de la dinámica hidro-sedimentológica de la zona de estudio ya que se trata de un flujo tri-dimensional no-estacionario y en presencia de transporte de sedimentos.

La OSE tiene proyectado la construcción de una nueva línea de bombeo (6ta línea), lo que implica la construcción de una nueva obra de toma en el río. Su ubicación en planta y en altura resulta determinante desde el punto de vista de su funcionamiento hidro-sedimentológico. En particular se debe asegurar:

- 1.- Minimizar el ingreso de sedimento del lecho a la toma y los efectos erosivos sobre el lecho del cauce-embalse
- 2.- Minimizar el ingreso de aire a la toma vinculada al desarrollo de estructuras vorticosas que

alcancen la superficie libre del flujo.

3.- Asegurar un correcto funcionamiento hidráulico del sistema de toma para el nivel mínimo hidrológico del embalse.

En este marco, OSE realizó un Convenio con el Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA) de la Facultad de Ingeniería, para que dicho Instituto efectúe a la OSE recomiende la ubicación de la nueva toma asegurando los criterios arriba explicitados. En este trabajo, se presenta un resumen de la metodología y principales resultados obtenidos en el citado Convenio.

## **OBJETIVOS**

El objetivo de este trabajo es presentar la metodología empleada para la caracterización del funcionamiento hidro-sedimentológico del río Santa Lucía en la zona del embalse y la propuesta de ubicación para la nueva toma que permita cumplir con los criterios hidro-sedimentológicos requeridos para su adecuado funcionamiento.

## **METODOLOGÍA**

El problema fue abordado esencialmente mediante el análisis de la evolución histórica de la traza del río y la batimetría del embalse. Se dispuso de un conjunto de fotos aéreas e imágenes satelitales abarcando el período 1960-2008, donde se analizaron los cambios de traza en planta del río.

Por otra parte, se dispuso de 5 batimetrías del embalse abarcando un período de 80 años de evolución, en las siguientes fechas: 1928, 1950, 1988, 2006 y 2008. El análisis de la evolución sedimentológica del embalse se realizó en base al tratamiento numérico de la información batimétrica. En este sentido, se realizó un modelo digital del terreno para cada una de las batimetrías siguiendo el método TIN (Triangular Irregular Net).

Se realizó una campaña de muestreo del sedimento del fondo del embalse a los efectos de caracterizar la distribución espacial de tamaños granulométricos. Se tomaron 10 muestras cubriendo la zona del embalse y la zona del río aguas arriba (Figura 2). Los tamaños medios encontrados varían entre 0.2 y 1.05 mm, con dispersiones granulométricas ( $\sigma_g$ ) entre 1.80 y 2.30, por lo que se trata de sedimento con granulometría no uniforme.

Finalmente, se dispuso de información hidrométrica diaria de niveles históricos en el embalse, con la cual a partir de un análisis estadístico se determinaron los valores medios, mínimos históricos y la curva de permanencia de niveles.

En base a la información hidrométrica, la información batimétrica analizada, la caracterización de tamaños de sedimento del lecho y considerando los aspectos teóricos del flujo en una curva en ríos aluviales, se establecieron los patrones generales hidro-sedimentológicos y las recomendaciones para la ubicación en planta y cota de la nueva toma.

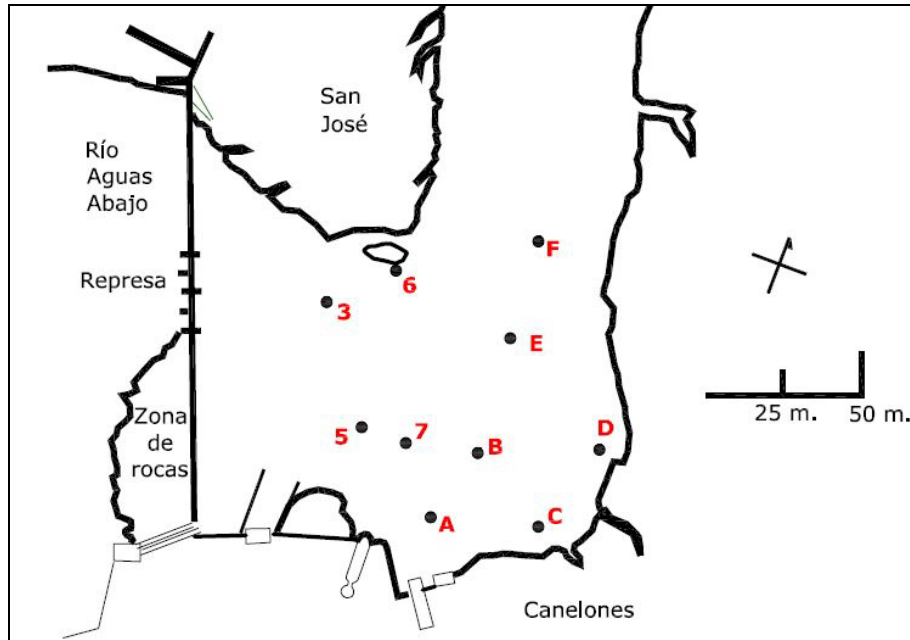


Figura 2.- Puntos de muestreo de sedimento del fondo.

## RESULTADOS

### Caracterización general del tramo en estudio

A partir de los datos geométricos e hidrométricos (caudal medio y formativo) del río y considerando la clasificación de Schumm y los criterios de Leopold y Wolman (García, 2008), se obtiene que la zona del río bajo estudio pertenece al tramo medio del curso, teniendo una configuración en planta básicamente meandriforme y presentando en algunos casos la configuración típica de barras alternadas, esencialmente en las zonas de curvas. (Figura 3).



Figura 3.- Tramo medio del río Santa Lucía próximo a la zona de estudio. Configuración en planta meandriforme. Izquierda: Tramo Paso Severino-Ciudad de Santa Lucía. Configuración típica de barras alternadas en la zona de curvas. Derecha: Zona de estudio. Configuración netamente meandriforme.

Desde el punto de vista de la estabilidad general de su traza, se encontró que no existen cambios ni tendencias de evolución significativas registradas en los últimos 50 años, a partir del análisis de las fotos aéreas e imágenes satelitales disponibles.

### Análisis hidrológico.

Por su parte, fue estudiada la permanencia de los niveles de agua en la zona de tomas. Esto permite establecer los elementos necesarios para la fijación de la cota máxima de la nueva toma desde el punto de vista hidrológico. Para ello se contó con un registro continuo de 9 años de niveles diarios en el embalse. En la Figura 4 se presenta la curva de permanencia de niveles y se indica además el nivel correspondiente al caudal medio del río así como el nivel de vertido de la represa (nivel de la represa) que corresponde a 2.90 m. Se observa que niveles inferiores a 2.90 m. tienen una frecuencia inferior al 90%.

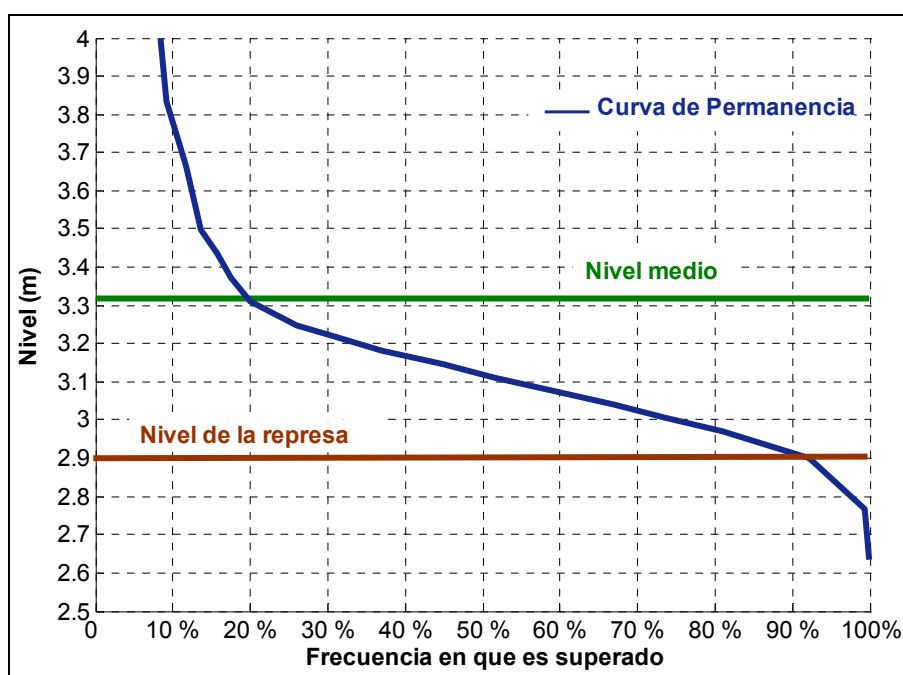
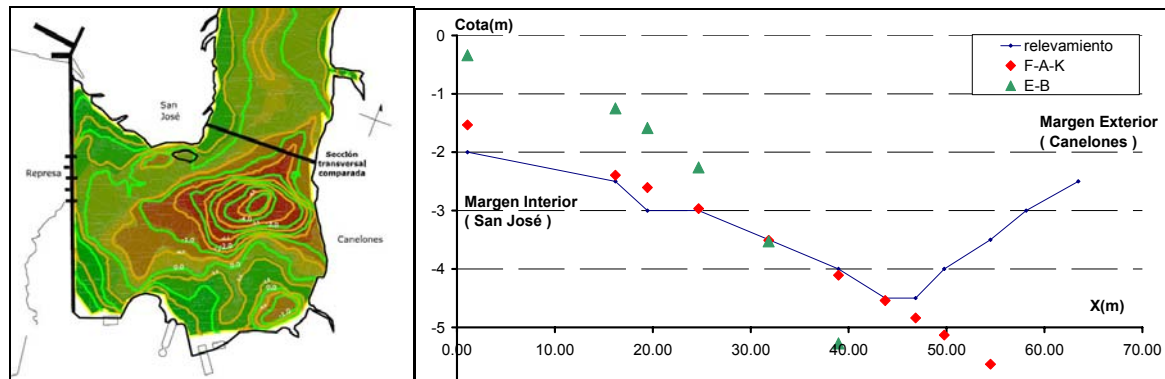


Figura 4.- Curva de permanencia de niveles diarios en el embalse. (Zona de tomas)

### Análisis Sedimentológico de la zona del embalse.

El análisis de las distintas batimetrías dentro del embalse (zona de tomas) permitió identificar en términos globales mayores profundidades en la zona exterior de la curva respecto a las que se observan en la margen interior. En particular existen zonas de erosión ("pozos") que se ubican en la parte externa de la curva. En este sentido, se realizó un análisis del perfil batimétrico teórico, Julien (2002), y se comparó con el perfil batimétrico existente. Se calcularon dos modelos perfiles batimétricos teóricos para flujo en curva propuestas el primero (verde en Figura 5) propuesto por Engenlund-Bridge (E-B) y el segundo (rojo en Figura 5) propuesto por Falcon-Ascancio-Kennedy (F-A-K). En la Figura 5 se presenta la comparación para uno de los perfiles alejados de la presa. Los resultados muestran que el patrón teórico de flujo en curva se respeta en la zona de curva más alejada a la presa, pero no así en la zona de curva próxima a la misma.



**Figura 5.-** Comparación de un perfil transversal teórico y el observado (batimetría 2006) Izquierda: ubicación del perfil transversal. Derecha: comparación entre el relevamiento (batimetría 2006) y los modelos teóricos de Englund-Bridge (E-B) y Falcon-Ascancio-Kennedy (F-A-K)

Otra de las características que presentan los meandros de un lecho aluvial, es que el tamaño del sedimento no se distribuye uniformemente en una sección transversal sino que presenta mayores tamaños en la zona exterior de la curva respecto a la interior. Los resultados granulométricos encontrados muestran que este comportamiento ocurre en buena parte del dominio. Sin embargo, en algunas de las muestras ubicadas en las proximidades de uno de los pozos contra la margen exterior se encontró la presencia de material fino.

Las características batimétricas y sedimentológicas del tramo fluvial analizado se corresponden en gran medida con los resultados expuestos en la teoría del flujo en curva sobre un lecho aluvial. En este sentido, se destacan las mayores profundidades y tamaños de sedimento que se presentan en la zona exterior de la curva. Sin embargo, se presentan algunas diferencias entre lo relevado y la teoría, tanto en los perfiles transversales como en el tamaño de sedimento, en el cual para el pozo contra la margen exterior se constató la presencia de material fino. Esto ocurre debido a la modificación que sufre la hidro-sedimentología de la zona como consecuencia de la existencia de la presa y la gestión de sus compuertas.

### **Evolución de la batimetría en la zona del embalse. Ubicación en Planta.**

Las superficies generadas a partir de los modelos digitales de terreno realizados para cada una de las batimetrías disponibles, fueron comparadas entre sí. Esto permitió analizar de forma cualitativa y cuantitativa los cambios en la batimetría del embalse. En la Figura 6 se presenta la batimetría correspondiente a 1928 y en la Figura 7 la batimetría correspondiente a 2008. Se presentan estas debido a que son los relevamientos con mayor detalle en la zona próxima a las tomas, a la vez que permiten abarcar el mayor período de tiempo posible

El volumen acumulado en los 80 años fue del orden de  $2500 \text{ m}^3$ , lo que se corresponde con un aumento de la elevación media del embalse del orden de 30 cm. Si bien esta sedimentación en el embalse no se distribuye de manera uniforme ya que existen algunas zonas que muestran muy pocos cambios en cada una de las batimetrías analizadas en el período de 80 años. En particular, se encuentran dos zonas socavadas (“pozos”) típicos de la zona externa de curvas en cursos aluviales, cuyas profundidades registran muy pocos cambios a lo largo de los 80 años.



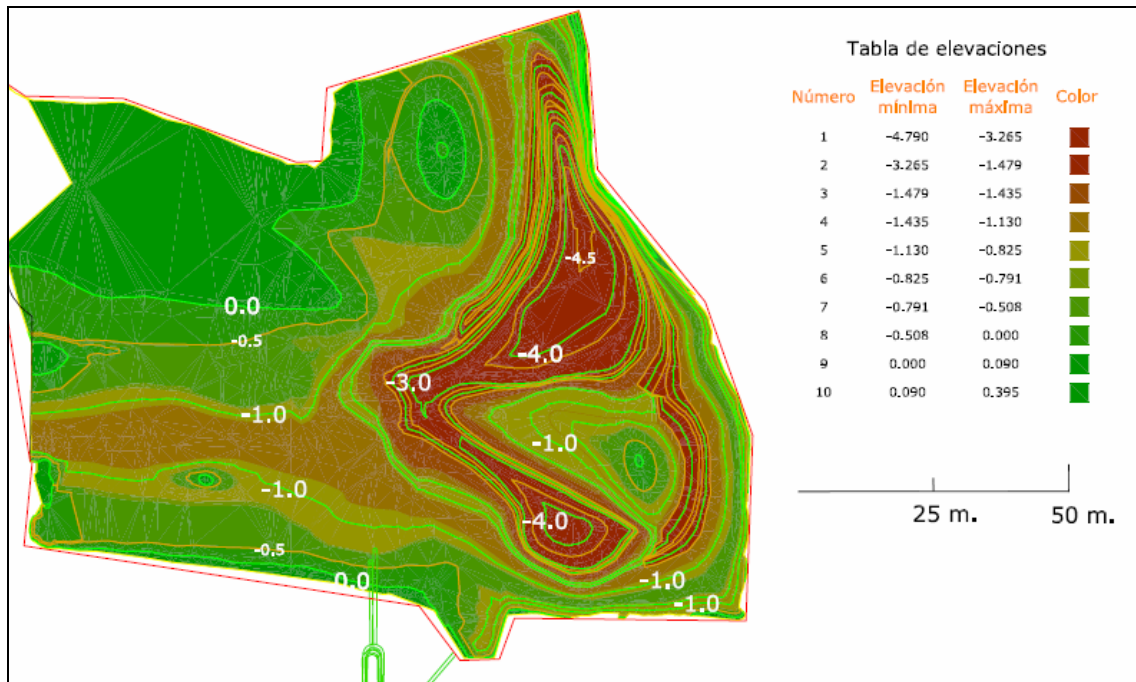


Figura 6.- Modelo numérico de Terreno. Batimetría del embalse 1928.

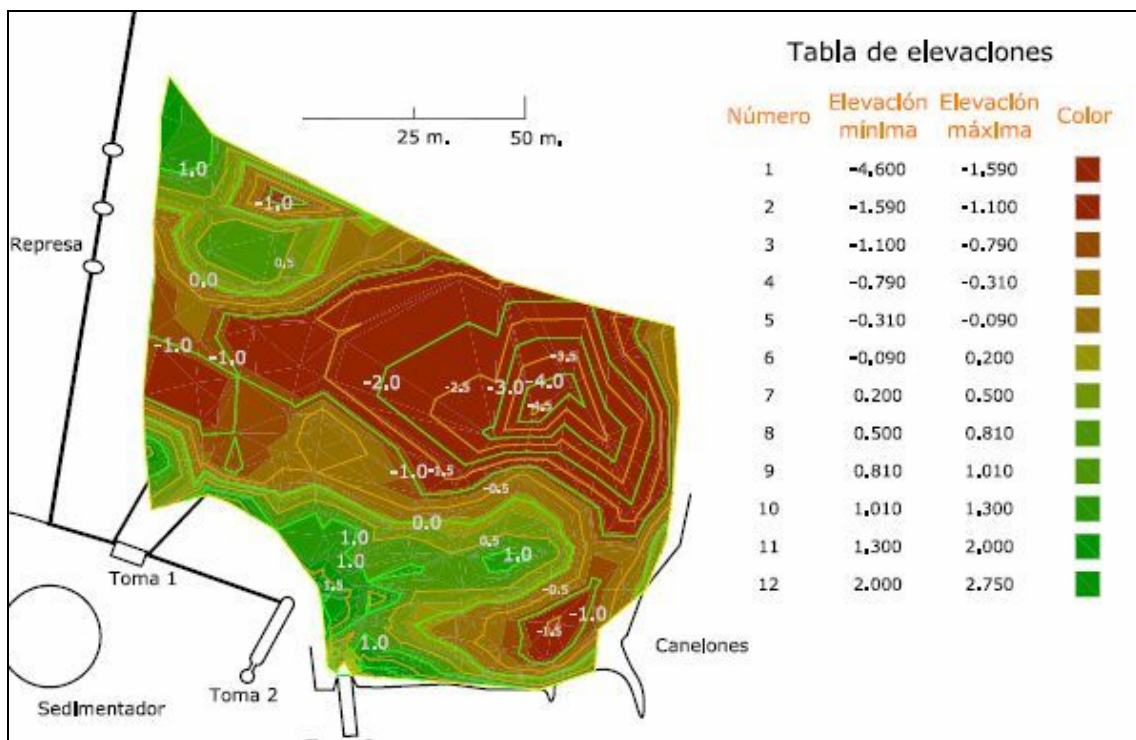


Figura 7.- Modelo numérico de Terreno. Batimetría del embalse 2008

En particular en la Figura 8 se muestra, mediante una comparación entre todas las batimetrías disponibles, que la zona donde se presenta uno de estos pozos (“pozo chico”) no ha sufrido variaciones significativas en sus dimensiones principales a lo largo de los 80 años. A la luz de este resultado y considerando que el pozo señalado se encuentra en la zona exterior de la curva, este lugar presenta condiciones propicias para proponer la ubicación de la nueva obra de toma.

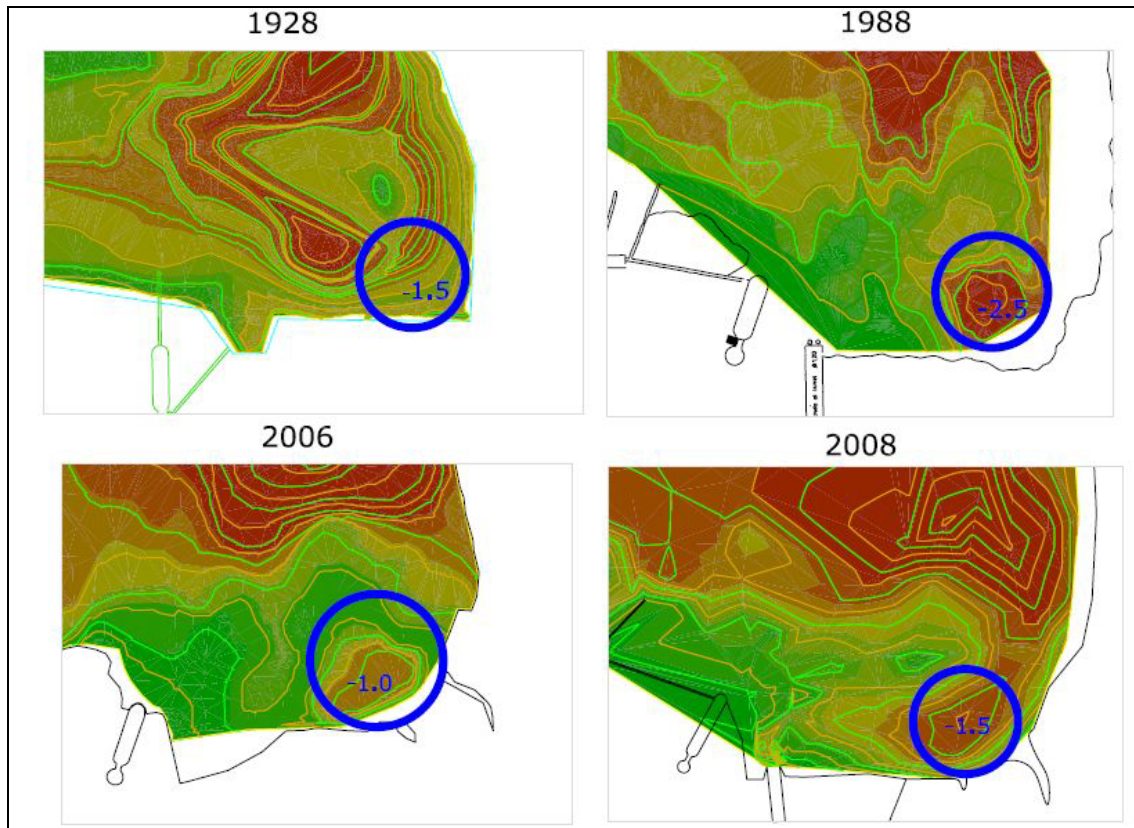


Figura 8.- Evolución temporal del pozo contra la margen exterior. En azul se indica la cota del fondo del pozo.

### Ubicación en altura.

A los efectos de determinar la ubicación óptima de la toma fueron considerados algunos criterios de funcionamiento deseables para la misma. En particular se pretendió asegurar las siguientes condiciones:

- 1.- Minimizar el ingreso de sedimento del fondo a la toma y los efectos erosivos sobre el lecho del cauce.
- 2.- Minimizar el ingreso de aire a la toma vinculada al desarrollo de estructuras vorticosas que alcancen la superficie libre del flujo.
- 3.- Asegurar un correcto funcionamiento hidráulico del sistema de toma para el nivel mínimo hidrológico del embalse.

El cumplimiento de las tres condiciones planteadas requiere que la toma se ubique a distancias adecuadas tanto del fondo como de la superficie libre. En este sentido se buscó la zona que presente la mayor profundidad posible y cuyo lecho se presente estable, de forma de no comprometer las condiciones exigidas a lo largo de la vida útil de la toma. Para ello, se analizó el resultado de la evolución batimétrica para fijar una zona que cumpla con las características indicadas. En este sentido, la zona denominada en el punto anterior como “pozo pequeño”, cuya evolución temporal se presentó en la Figura 8, resulta la más adecuada.



Las ventajas que presenta la zona elegida son las siguientes: garantizar una profundidad de agua de 4 metros (considerando como nivel de trabajo 2.90 m) lo cual brinda un mayor margen para fijar la cota y el diámetro de la toma, el lecho se ha mantenido estable durante un período de 80 años y se presenta próximo a la margen en comparación con el denominado “pozo grande”, lo cual representa menores costos en infraestructura sumergida y una menor obstaculización del flujo principal.

A los efectos de minimizar el ingreso de aire a la toma vinculada al desarrollo de estructuras vorticosas que alcancen la superficie libre del flujo, se siguieron las recomendaciones de Knauss (1987), resultando una sumergencia mínima de 1.5 veces el diámetro de toma.

En cuanto al ingreso de sedimento del fondo a la toma y los efectos erosivos sobre el lecho del embalse se consideraron los planteos de Razvan (1989) y Knauss (1987) para ríos aluviales meandriiformes, resultando para este caso una distancia mínima del fondo de no intrusión igual al diámetro de la toma.

Considerando que el diámetro de la tubería de toma será 1.75 m, la sumergencia mínima resultó 2.63 m y la distancia mínima al fondo para no intrusión resulta 1.75 m.

## CONCLUSIONES

Se realizó una caracterización hidro-sedimentológica del río Santa Lucía y el embalse regulador en la zona de Aguas Corrientes. Se utilizó información batimétrica del embalse (80 años), información de la traza del río en planta (50 años), información del sedimento del lecho e información histórica hidrométrica. En este sentido se encontró que la zona de estudio corresponde a un flujo en curva abrupta en un cauce aluvial modificado por la presencia de un embalse y por la gestión de sus compuertas. Por tal motivo, el patrón de flujo en curva teórico se representa adecuadamente en la zona de la curva más alejada del embalse pero resulta alterado en la zona de la curva próxima al embalse. Se encontró así que existen zonas de erosión (pozos) en la zona externa de la curva (alejadas de la presa) que presentan muy poca variación histórica. Se recomendó la ubicación en planta de la toma, en la zona de erosión (“pozo”) más cercana a la costa, lo que permite disponer de una profundidad adecuada para cumplir con los requerimientos de sumergencia y distancia al fondo (Figura 9). Por otra parte, esa zona tiene la estabilidad sedimentológica requerida para el correcto funcionamiento de la toma.

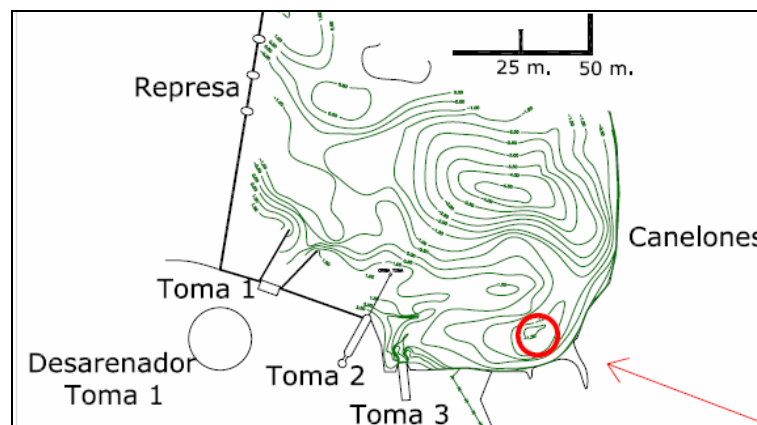


Figura 9.- Ubicación en planta propuesta para la nueva toma.

Por otra parte, se propuso la ubicación en altura de la nueva toma de forma de cumplir con los criterios establecidos de servicio, evitar succión de aire y de sedimentos del fondo. En la Figura 10 se presenta un esquema en corte de la posición propuesta para la nueva toma que cumple con el mínimo de sumergencia (2.63 m), el mínimo hidrológico de servicio (cota inferior a 2.90 m) y la distancia mínima del fondo (1.75 m), todo referido al diámetro de la tubería proyectado 1.75 m.

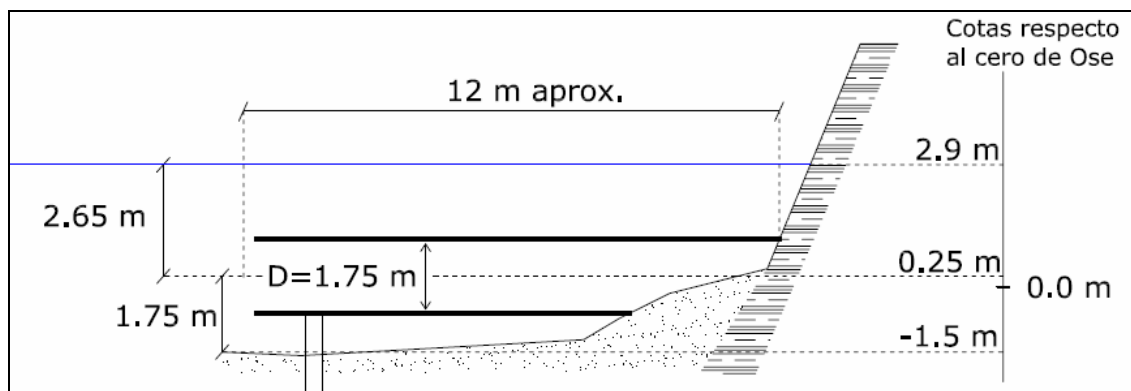


Figura 10.- Ubicación en corte propuesta para la nueva toma.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**Bridge, J.** (1992) "A revised model for water flow, sediments transport, bed topography and grain size sorting in natural river bends", *Water Resources Research*, Vol 28, N° 4, pp 999-1013.

**IMFIA** (2008). "Estudio Hidro-Sedimentológico para la ubicación de la toma del nuevo sistema de bombeo de agua bruta de la planta de Aguas Corrientes", Convenio: Administración Nacional de las Obras Sanitarias del Estado (OSE) -UdelaR IMFIA, Informe Final.

**García, M.** (2008) "Sedimentation Engineering. Processes, Measurements, Modeling, and Practice". ASCE.

**Julien, P. Y.** (2002) "River Mechanics". Cambridge University Press.

**Knauss, J.** (1987) "Swirling Flow Problems at Intakes", Taylor and Francis.

**Razvan, E.** (1989). "Rivers Intakes and Diversion Dams". Elsevier