



## ESTUDIOS BÁSICOS DE CARACTERIZACIÓN DE SEDIMENTOS Y BATIMETRÍA EN EL EMBALSE DEL DIQUE LA FALDA

Carlos Beltramone<sup>1,2</sup>, Juan Serra<sup>1</sup>, Silvio Ambrosino<sup>1,2</sup>, Osvaldo Barbeito, Hector A. Malnero<sup>3</sup>, Roque Sanchez<sup>1</sup>

1. Centro de la Region Semiarida, Instituto Nacional del Agua. Ambrosio Olmos 1100. Cordoba. E-mails: [cbeltramone@ina.gov.ar](mailto:cbeltramone@ina.gov.ar), [jserra@ina.gov.ar](mailto:jserra@ina.gov.ar), [sambrosino@ina.gov.ar](mailto:sambrosino@ina.gov.ar), [obarbeito@ina.gov.ar](mailto:obarbeito@ina.gov.ar), [rsanchez@ina.gov.ar](mailto:rsanchez@ina.gov.ar)

2. Consejo Nacional de investigaciones Cientificas y Tecnicas CONICET

3. Facultad de Ingenieria, Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco.

### RESUMEN

El relevamiento batimétrico del embalse del dique La Falda proporciona el conocimiento de la tasa de colmatación del embalse y la reconstrucción de las curvas de áreas-volumenes a situación actual, información necesaria para una adecuada planificación de sus operaciones.

Asimismo, el estudio de las características granulométricas de los sedimentos acumulados en el embalse aporta información del mecanismo fluvio-geomorfológico con respecto a la colmatación que esta sufriendo el embalse.

La metodología utilizada se basa en la realización de un registro muy denso de posiciones espaciales y de la profundidad (x, y, z) en forma de transectas. Dichos datos son completados con la línea de costa de una imagen satelital actualizada, cuya cota de máximo embalsado es conocida para la fecha correspondiente. Los datos planialtimétricos son usados para la generación de la cartografía actual. La información obtenida de la batimetría fue comparada con la planimetría topográfica original del embalse antes de su llenado para determinar los espesores de sedimentos depositados.

En laboratorio se procesaron las muestras colectadas con una draga de fondo para determinar las fracciones granulométricas de los sedimentos.

A partir de los resultados obtenidos con los cálculos de sedimentación obtenidos se puede decir que el embalse tuvo una reducción del 53% de su volumen original.

Esta información nos da una idea de los procesos erosivos que ocurren en la cuenca hídrica de cabecera y de la importancia de sus efectos negativos, especialmente sobre la vida útil del embalse.

**Palabras clave:** embalse, colmatación, batimetría, sedimentación, Dique La Falda.

### ABSTRACT

The batimetric reports of reservoirs Dique La Falda provide the knowledge of the variation of its capacity and the reconstruction of the curve of areas - volumes, necessary information for the normal planning of its operations. This information gives an idea of the erosive processes that happen in the water basins and of the importance of its negative effects, especially on the useful life of each reservoir. The study of the granulometric characteristics of the accumulated sediments contributes information of the filling mechanism that the reservoirs are suffering.

The methodology this is based on a very dense registry of space positions and on the depth (x, and, z) in spiral shape in each reservoir. Such data is completed with the coastline obtained from near infrared band of an updated satellite image, which level of maximum dammed is well-known for the corresponding date. All data are used for the generation of the Digital Models of Depth - MDP - of the dams. This obtained information was compared with the original mapping of every dam to determine the thicknesses of the deposited sediment the original topographic mapping of every dam to determine the thicknesses of the deposited sediment. In the laboratory the dredged samples were processed to determine the granulometric fractions of the sediments and compositions quimic.

**Key words:** reservoirs, batimetric , sediments, Dique La Falda

## INTRODUCCIÓN

A petición de la Cooperativa de Agua y Servicios Publico de La Falda el Centro de la Región Semiárida (CRSA) del Instituto Nacional del Agua (INA) ha realizado el levantamiento batimétrico y caracterización sedimentaria del embalse del Dique La Falda.

El Dique la Falda fue construido con el propósito de proveer agua a la Localidad de La Falda y el control de crecidas en la cuenca del Río San Francisco. (Fig.1)

El relevamiento batimétrico del embalse proporciona el conocimiento de la tasa de colmatación del embalse y la reconstrucción de las curvas de áreas-volúmenes a situación actual, información necesaria para una adecuada planificación de sus operaciones.

Asimismo, el estudio de las características granulométricas de los sedimentos acumulados en el embalse aporta información del mecanismo fluvio-geomorfológico con respecto a la colmatación que esta sufriendo el embalse.

La metodología utilizada se basa en la realización de un registro muy denso de posiciones espaciales y de la profundidad (x, y, z) en forma de transectas. Dichos datos son completados con la línea de costa de una imagen satelital actualizada, cuya cota de máximo embalsado es conocida para la fecha correspondiente. Los datos planialtimétricos son usados para la generación de la cartografía actual. La información obtenida de la batimetría fue comparada con la planimetría topográfica original del embalse antes de su llenado para determinar los espesores de sedimentos depositados.

En laboratorio se procesaron las muestras colectadas con una draga de fondo para determinar las fracciones granulométricas de los sedimentos.

A partir de los resultados obtenidos con los cálculos de sedimentación obtenidos se puede decir que el embalse tuvo una reducción del 53% de su volumen original.

Esta información nos da una idea de los procesos erosivos que ocurren en la cuenca hídrica de cabecera y de la importancia de sus efectos negativos, especialmente sobre la vida útil del embalse.

Asimismo, el estudio de las características granulométricas de los sedimentos acumulados aporta información del mecanismo de colmatación que está sufriendo el embalse.

La cuenca de alimentación se ubica al NO de la Provincia de Córdoba, entre los 31° 00' y 31° 07" de latitud sur y los 64° 30" y 64° 32' de longitud oeste, abarcando una superficie de 135 km<sup>2</sup> cuyo colector principal es el Río San Francisco o Grande.

Las principales características de la presa según datos tomados del Ministerio de Obras Publica de la Provincia de Córdoba son:

- Curso de agua;: Río Grande o San Francisco de Punilla
- Coordenadas geográficas: 31° 07 latitud sur y 64°30" longitud oeste
- Altura de la presa: 25 mts.
- Volumen máximo: 1.0 Hm<sup>3</sup>
- Volumen cota vertedero: 0,8 Hm<sup>3</sup>
- Longitud de coronamiento: 236 mts
- Modulo anual: 0.80 m<sup>3</sup>/seg.
- Tipo de presa: Mixta- Hormigón- contra fuerte materiales suelto
- Naturaleza del terreno sobre el que se apoya la presa: Basamento cristalino
- Superficie lago a cota vertedero: 15Ha.
- Cota embalse máximo 16 m

- Cota de fundación: 4.67 m sobre cero proyecto
- Cota fondo de cauce 10 m. sobre cero proyecto
- Obra de descarga de fondo: reja

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

El equipo utilizado para el registro de las profundidades del embalse estuvo compuesto por una embarcación con motor fuera de borda, a la cual se le montó un ecosonda portátil RAYTHEON, tipo DE 719-B (Foto1), con la cual se obtuvo un registro gráfico y continuo, con marca de puntos situados planimetricamente, con una precisión de la medición del orden de 10 a 15 cm.

Para la ubicación espacial de las posiciones de registro batimétrico se contó con un equipo GPS marca Garmin Mod. Colorado 300. Adicionalmente, y para el relevamiento del perillago por sobre la cota de p.a., un equipo sistema GPS dinámico, de simple frecuencia (L1) para mediciones Geodésicas en post-proceso (ampliable a RTK), marca MAGELLAN (origen USA) compuesto por dos receptores modelos PROMARK 3, con sus accesorios. Un sistema que representa la conjunción del GPS Geodésico con la tecnología GIS Móvil (Sistemas de Información Geográfica), de precisión centimétrica en modos estático, cinemático continuo y “Stop & Go”.

Se registraron en forma simultánea los posicionamientos satelitales (GPS) y las determinaciones ecográficas de la profundidad con una separación entre 10 y 15 metros y a una velocidad constante de la embarcación.

El plano topográfico -ex Dirección Provincial de Hidráulica- Pcia Córdoba- del estudio previo al llenado del vaso del embalse fue vectorizado usando una tableta digitalizadora; dicha cartografía topográfica, fue considerada como la situación inicial.

Para el procesamiento de los datos se uso un ordenador Notebook Heller Packard. Los programas informáticos utilizados fueron: Idrisi Kilimanjaro, Global Mapper Geomap 2000 para AutoCAD, Magellan Navigation Inc, OziExplorer, AutoCAD 2004/2009

Para la representación gráfica en planos se adoptó el sistema de coordenadas Gauss Kruger Argentina, Faja 3, Datum WGS 84, Datum Altimétrico Geoide EGM96 y escala E 1:2.000.

## **BATIMETRÍA. CÁLCULO DE VOLÚMENES**

El área de estudios se limita al entorno del embalse del Dique La Falda que se identifica en el plano de ubicación.

La evaluación de los cálculos de los volúmenes del embalse desarrollada se compone de los siguientes pasos:

- a. Georreferenciación de una imagen satelital (LANDSAT 7 ETM+) a partir de puntos de campo, de coordenadas conocidas en un sistema de referencia determinado.
- b. Obtención del perímetro del embalse en la fecha correspondiente a la imagen, dato de cota que se toma de las características de la presa por parte de la SSRH (exDIPAS).
- c. Navegación de todo el espejo de agua, registrando las coordenadas y profundidades con intervalos regulares entre 10 y 15 m, según la resolución deseada. En el sector del descargador de fondo de la presa, y toma de agua se realiza un muestreo de detalle de las profundidades para conocer la colmatación en dicho sitio.
- d) Durante la etapa de campo se colectan también muestras de los sedimentos del fondo del embalse para su posterior análisis y presentación de resultados.

e. Preprocesamiento y análisis de los datos colectados para la eliminación de puntos con posicionamiento dudoso o incorrecto y profundidades anómalas por comparación con las vecinas.

f. Generación de un mapa de profundidades – por interpolación a partir de los datos de campo y del perímetro obtenido de la imagen; la interpolación se obtiene utilizando el método utilizando técnicas combinadas de aplicaciones de software Global Mapper, Idrisi y Autocad. El mapa de curvas de nivel del perilago y batimétricas es representado en escala 1:2000 y equidistancia 0,50m. (Fig.2)

g. Cálculo de los volúmenes almacenados en el embalse por el método de semisección entre superficies a cotas equidistantes, Eq. 1m. (Fig3)

h. Obtención de las curvas de ajuste teórico de cota-volumen para la situaciones actual. El mejor ajuste de la nube de puntos se obtiene para una función polinómica de tercer grado, obtenida por aplicación de funciones de Microsoft Excel.

Las tablas y curvas de capacidad de embalse y de sedimentos acumulados a octubre de 2010 se calcularon por el volumen comprendido entre curvas de nivel consecutivas, mediante método de la semisección (1) y método ponderado (2):

$$V_i = \frac{h}{3} [S_i + \sqrt{S_i * S_{i+1}} + S_{i+1}] \quad [1] \quad ; \text{ método de semisección}$$

$$V_i = \frac{h}{2} [S_i + S_{i+1}] \quad [2] \quad ; \text{ método ponderado}$$

$$V = \sum V_i \quad [3]$$

La expresión [3] estima el volumen acumulado, adoptando el valor medio obtenido por ambos métodos.

## **CARACTERIZACIÓN DE SEDIMENTOS**

Para la extracción de muestras se utilizó bote equipado con tomamuestras de fondo para la recolección, compuesto de una draga de acero inoxidable y de 0,25 x 0,25 m de superficie de boca.

Las muestras fueron acondicionadas para determinar contenido de materia orgánica, fósforo y nitrógeno, y la granulometría; contenido y porcentaje de arena – limo y arcilla, representados en tablas que caracterizan los diferentes tipos de sedimentos.

## **RESULTADOS**

Las tareas desarrolladas posibilitaron reconocer la capacidad y superficie del embalse, la identificación de los espesores de sedimentos acumulados y sus principales características físico-químicas.

En la Tabla 1 se puede apreciar el cómputo del volumen de embalse, resultante de estudios batimétricos.

Computo del volumen disponible (a cota del vertedero más bajo)						
Prof.h [m]	Area(m2)			A media	Delta H	Delta V
0.00	137818		137818	128898	0.30	38669
-0.30	119978		119978	106215	1.00	106215
-1.30	92452		92452	82497	1.00	82497
-2.30	61689	10852	72541	64484	1.00	64484
-3.30	52871	3555	56426	49822	1.00	49822
-4.30	43218		43218	38035	1.00	38035
-5.30	31034	1818	32852	28837	1.00	28837
-6.30	24263	558	24821	21017	1.00	21017
-7.30	10284	6929	17212	13585	1.00	13585
-8.30	5836	4121	9957	5934	1.00	5934
-9.30	347	1563	1910	1067	0.50	533
<b>-9.80</b>	223		222.97			
Volumen calculado a partir de las curvas de nivel derivadas de la batimetría (m3)						<b>449627</b>

Tabla 1.- Cálculo de volumen actual de embalse disponible Vs

Los valores de profundidad  $h$ [m] Vs Volumen Acumulado [m<sup>3</sup>] fueron ajustados por una función polinómica de tercer grado, resultando un coeficiente de correlación  $R^2=0.9999$ , ecuación válida para valores de profundidad comprendidos entre  $-8.3 < h < 0$ :

$$(I) \text{Vol}_{m^3} = 400,89h^3_m + 11674h^2_m + 122143h_m + 447354$$

La Figura 4 muestra las gráficas de relaciones entre profundidad  $h$ , superficie y volumen de almacenamiento resultante para la actual batimetría, referido al 'cero' en cota del labio del vertedero menor. Se agrega la función teórica de ajuste para el volumen de almacenamiento, en función de la profundidad  $h$ .

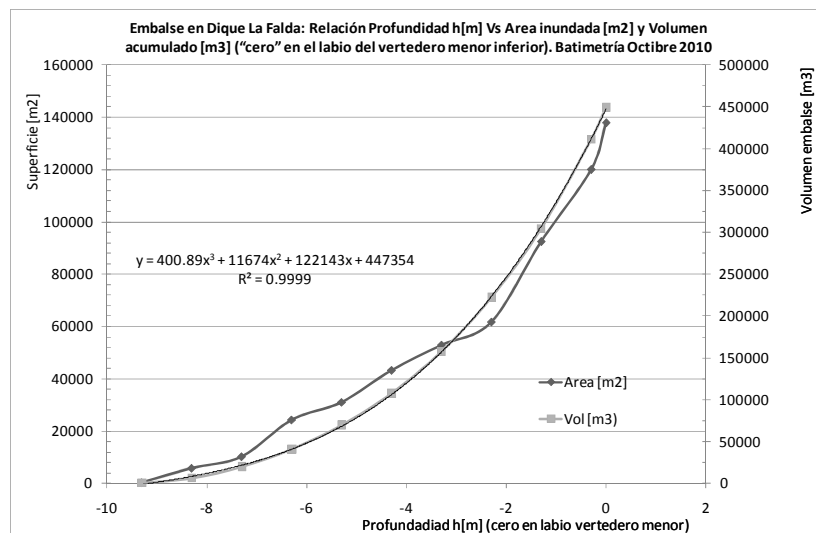


Figura 4.- Curvas Profundidad  $h$ [m] Vs

En la tabla 2 y 3 se expresan la relación de volumen acumulado de sedimento (m<sup>3</sup>) entre isopacas, considerado entre las capas de sedimentos actuales (2010) y las originales -según consta en plano ex DIPAS (1980)-. Se aplican dos métodos de cálculo, de acuerdo a las expresiones vistas [1], [2] y [3].

TABLA DE ISOPACAS				Volúmenes	
dH [m]	Área [m <sup>2</sup> ]	Semisección	dH	dV [m <sup>3</sup> ]	Sedimentos Acumulados [m <sup>3</sup> ]
0	137818	121558	1	121558	121558
1	105297	93103	1	93103	214661
2	80909	68074	1	68074	282735
3	55239	47701	1	47701	330436
4	40162	33871	1	33871	364307
5	27581	22081	1	22081	386388
6	16580	12330	1	12330	398717
7	8079	5865	1	5865	404582
8	3651	2238	1	2238	406820
9	824	414	1	414	407234
10	4	2	1	2	407236
Método de semisecciones [1]			SUMA :	<b>407236</b>	

**Tabla 2.- Curvas isopacas, cálculo de volúmenes de sedimentos acumulados.**

TABLA DE ISOPACAS			Volúmenes	
dH [m]	Area [m <sup>2</sup> ]	dH	dV [m <sup>3</sup> ]	Sedimentos Acumulados [m <sup>3</sup> ]
0	137818	1	121194	121194
1	105297	1	92836	214029
2	80909	1	67667	281697
3	55239	1	47501	329197
4	40162	1	33675	362872
5	27581	1	21849	384721
6	16580	1	12078	396799
7	8079	1	5720	402519
8	3651	1	2070	404589
9	824	1	296	404885
10	4	1	1	404887
Método ponderado [2]		SUMA:	<b>404887</b>	

**Tabla 3.- Curvas isopacas, cálculo de volúmenes de sedimentos acumulados.**

En la figura 5, se muestran los valores obtenidos de la relación volumen sedimentos acumulado Vs altura isopaca, dando un valor de 406.000 m<sup>3</sup> (promedio métodos de semisección y ponderado)

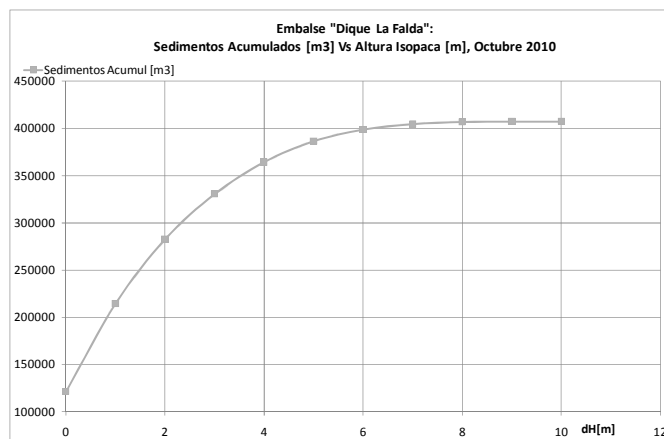


Figura 5.- Relación volumen sedimentos acumulado Vs altura isopaca.

De acuerdo a los valores obtenidos se puede estimar la capacidad total del embalse y la reducción por sedimentación entre el año de llenado 1980 y octubre de 2010, dichos valores están representados en la Tabla 4.

Año	Volumen embalse disponible (m <sup>3</sup> )	Volumen de sedimentos acumulados (m <sup>3</sup> )	Reducción de volumen (%)	Acumulación anual de sedimentos promedio (m <sup>3</sup> )	Reducción de embalse anual promedio (%)
1980	800000	---	-----		-----
2010	449627	406.000	51	13.533	1.7

Tabla 4.- Sedimentos acumulados (período 1980-2010)

## CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DE LOS SEDIMENTOS DEPOSITADOS

Se ha estudiado la granulometría y la composición química (concentración de Fósforo total, nitrógeno total y materia orgánica) del sedimento superficial en cinco puntos de muestreo distribuidos a lo largo del embalse.

En la mayor parte del embalse, el sedimento es de textura limo-arcillosa, con un tamaño medio de partículas inferior a 25 micras, de plasticidad media a alta con presencia de abundante materia orgánica, en la muestra ubicada en la cola del embalse se observa un incremento de la proporción de arena en detrimento de la de arcilla con baja plasticidad determinando un tamaño medio de partículas que varía entre 45 y 100 micras

De acuerdo con las análisis realizados la composición química en; fósforo total, nitrógeno total y materias orgánicas notablemente homogénea tanto verticalmente (para los 10 cm. superiores de sedimento) como horizontalmente a lo largo del embalse.

## CONCLUSIONES

- La evaluación de los depósitos acumulados en el embalse es el resultado de la degradación ocurrida en las cuencas de alimentación, sin tener en cuenta los aportes retenidos por obras construidas aguas arriba de su cuenca.
- En base a la tasa de reducción del volumen embalsado se puede proyectar el tiempo estimado para su colmatación. Considerando un volumen residual del 20%, en la tabla 5 se estima el indicador de tiempo de colmatación al 80%.

Superficie de la cuenca (km <sup>2</sup> )	Tiempo transcurrido desde su llenado (años)	Aporte de sedimento al embalse (m <sup>3</sup> )	Volumen cota vertedero (*) Datos de Dipas 1980 (Hm <sup>3</sup> )	Tiempo estimado para su colmatación a nivel vertedero (años)
135	30	406000	0,8	17

**Tabla N° 5 .- Indicadores de colmatación**

- Hay que contemplar que la vida útil de un embalse se considera en función del objetivo con el cual fue construido; si se considera que el objetivo principal es la toma de agua para su distribución a la localidad de la Falda, la vida útil del embalse se reduce al momento en que los sedimentos llegan a cubrir las boca de toma de agua. En la actualidad ambas bocas de toma de agua (inferior 15 m, superior 18 m) se encuentran por debajo del nivel de colmatación. Por lo cual éste momento es considerablemente menor al estimado como vida útil final.

- Se recomienda realizar un estudio dirigido a controlar y atenuar sus efectos planeado integralmente a nivel cuenca de alimentación referido a los parámetros físicos como a los efectos antrópicos realizando la construcción sistemática de obras que conduzcan al control de los procesos erosivos, las mismas deberán comprender las particularidades fisiográficas de cada cuenca de comenzando por la corrección de las cabeceras, gargantas, cauces, bajadas y por último en la zona del cauce principal.

-Estas modificaciones deberán tener como objetivo reducir la escorrentía superficial, disminuir las pendientes e incrementar la rugosidad, todo lo cual llevará a una mayor estabilidad erosiva.

## **LISTA DE SIMBOLOS**

$V_i$  = Volumen comprendido entre las cotas  $i$  e  $i+1$

$h$  = Distancia entre curvas de nivel consecutivas

$S_i$  = Superficie limitada por la curva de cota  $i$

$S_{i+1}$  = Superficie limitada por la curva de cota  $i+1$

## **AGRADECIMENTOS**

Se desea agradecer al Cuerpo de Bomberos Voluntarios de la ciudad de la Falda por la colaboración prestada durante el desarrollo del trabajo

## **REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS**

**Beltramone Carlos** (2010). Estudio de aporte de sedimentos del Río San Francisco al embalse de Dique La Falda. Cuadernos del CURIHAM. Vol.14.

**Ortt, Richard et al.**, (September 2000) Bathymetric Survey and Sedimentation Analysis of Loch Raven and Prettbody Reservoirs, Coastal and Estuarine Geology File Report No. 99-4.

**U.S. Environmental Protection Agency** (2003) Bathymetric Surveys



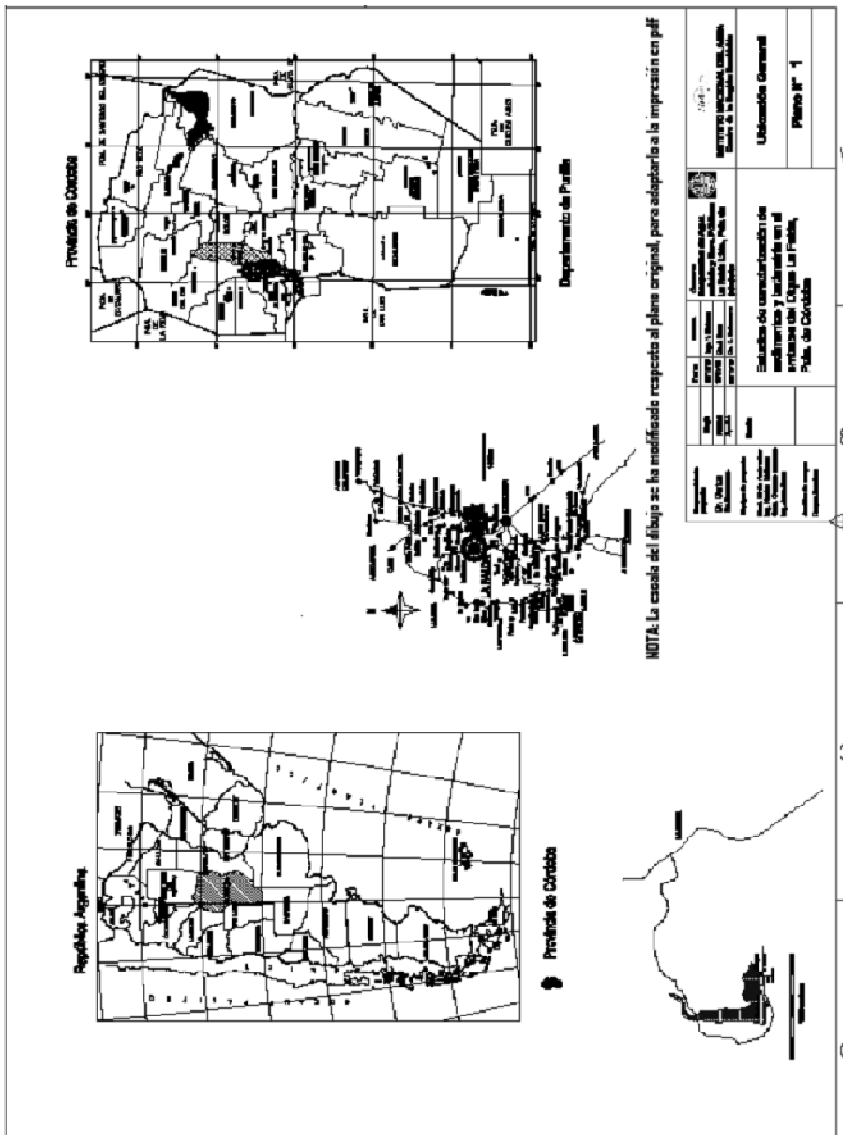
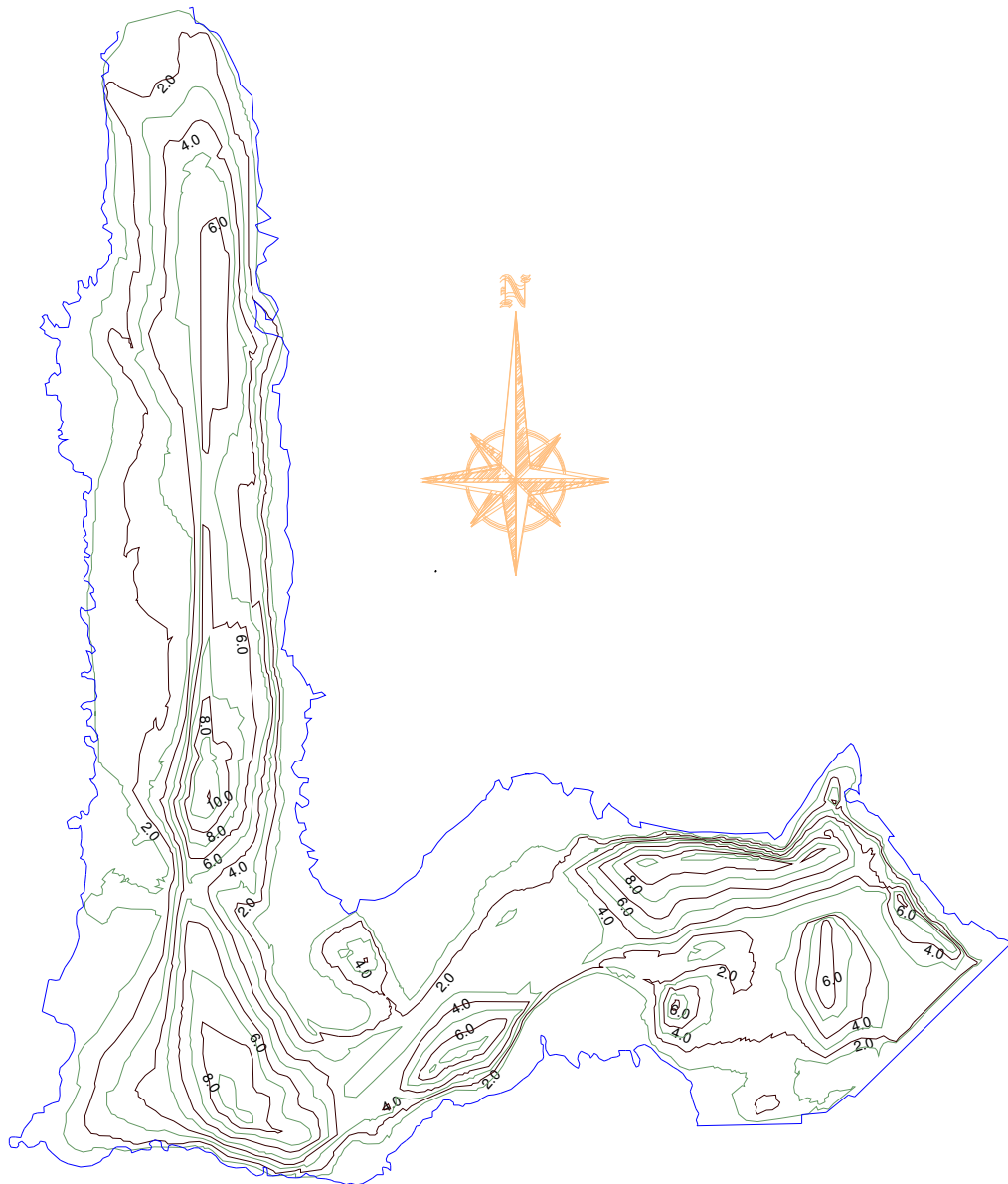


Figura 1.- Ubicación del embalse Dique La Falda



Figura 2.- Mapa Batimetrico



100 mts

500 mts

Figura 3.- Mapa de isopacas



Instituto de Recursos Hídricos



Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías



Universidad Nacional de Santiago del Estero



Instituto Nacional del Agua



Subsecretaría de Recursos Hídricos



Agencia Nacional de Promoción Cient. y Tec.



Gobierno Prov. de Santiago del Estero



Ministerio de la Producción



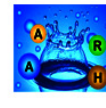
Secretaría del Agua



Secretaría de Desarrollo, Ciencia y Tecnología



Consejo Prof. de la Ingeniería y Arq.



Asociación Argentina de Recursos Hídricos



Asoc. Internacional de Invest. Hidroamb.



Comisión Regional del Río Bermejo



CORPORACION ARGENTINA TECNOLÓGICA s.a. INGENIERIA CIVIL E HIDRAULICA

