

ANÁLISIS BATIMÉTRICO DE LAGUNAS POCO PROFUNDAS MEDIANTE TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN Y SIG: APLICACIÓN A LA LAGUNA LA VICTORIA

Magalí V. Soria⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾, Vanina A. Piñero⁽²⁾⁽³⁾, Nicolás Ledesma⁽²⁾, Pedro A. Basile⁽⁴⁾, Gerardo Riccardi⁽⁴⁾⁽⁵⁾

⁽¹⁾ Becaria Doctoral UTN

⁽²⁾ Laboratorio de Teledetección, FRVT-UTN

⁽³⁾ Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica, FRVT-UTN

⁽⁴⁾ Departamento de Hidráulica-EIC y CURIHAM, FCEIA-UNR

⁽⁵⁾ Consejo de Investigaciones de la UNR, CIUNR

Laprida 651, (2600) Venado Tuerto, Santa Fe, Argentina.

e-mail: magali.soria.988@gmail.com

RESUMEN

En el presente artículo se describe la implementación de técnicas de Teledetección, conjuntamente con Sistemas de Información Geográfica, para determinar batimetrías de lagunas poco profundas. La metodología propuesta es aplicada para determinar la batimetría de la laguna La Victoria, perteneciente a la cuenca de "Las Encadenadas", en el sur de la provincia de Santa Fe. Se obtuvieron valores altimétricos distribuidos precisos empleando el modelo SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), siendo el mismo calibrado y corregido. Además, con la finalidad de alcanzar una adecuada representación de las curvas altimétricas, mediante técnicas aplicadas a imágenes satelitales, seleccionadas de acuerdo a eventos climáticos variados, se realizaron máscaras de superficie de agua. A través de la vinculación de las máscaras de agua y las superficies altimétricas del modelo de elevación del terreno corregido, fueron determinadas las superficies asociadas con los correspondientes valores altimétricos. Consecuentemente, mediante la interpolación de las capas generadas se obtuvieron valores de altimetría escalados y se determinó la batimetría de la laguna.

Palabras clave: Batimetría, Lagunas, Teledetección, Sistemas de Información Geográfica, Modelos Digitales de Terreno.

ABSTRACT

In the present paper the implementation of remote sensing techniques, together with Geographic Information Systems, to determine bathymetry of shallow lagoons is described. The proposed methodology is applied to determine the bathymetry of La Victoria lagoon, belonging to the "Las Encadenadas" basin in the southern part of the Santa Fe province. Accurate altimetric values were obtained using the SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) model, which was calibrated and corrected. Moreover, in order to achieve an adequate representation of the altimetric curves, by means of techniques applied to satellite images, selected according to varied climatic events, water surface masks were made. Through the linking of the water masks and the altimetric surfaces of the corrected digital terrain model, certain surfaces with altimetric values were determined. Consequently, by means of interpolation of generated layers, scaled altimetry values were obtained and the bathymetry of the lagoon was determined.

Keywords: Bathymetry, Lagoons, Teledetection, Geographic Information System, Digital Terrain Models.

INTRODUCCIÓN

La laguna La Victoria, ubicada en la Ciudad de Venado Tuerto al sur de la provincia de Santa Fe, pertenece a la parte alta del Sistema Hidrológico “Las Encadenadas”, el cual a su vez, es cabecera de la cuenca del río Salado (del Sur).

Esta región fue conformada durante el Cuaternario Superior por procesos eólicos, siendo sometida actualmente a un clima húmedo y en consecuencia a una dinámica hídrica de llanura. El proceso sedimentario dominante es el transporte de sales en solución. Debido a la secuencia de eventos descritos anteriormente, las cabeceras del río Salado conforman una típica cuenca de llanura, caracterizada por divisorias amplias y bajas (campos de arena holocenos, en este caso), numerosas lagunas y pantanos y una red hidrográfica formada por cañadas interconectadas (Iriondo y Drago, 2004). La dinámica hídrica actual está así definida por factores geológicos y climáticos, encontrándose entre los factores geológicos de mayor importancia la geomorfología eólica y la alta permeabilidad del terreno (Iriondo, 1986).

El clima de la región es definido como templado húmedo con estación seca. Posee temperatura media en invierno de 9.4 °C y en verano de 22.3 °C características del clima templado, humedad superior al 65 % en todos los meses del año y estación de invierno seca, motivo de la gran diferencia de volumen entre las lluvias de invierno y las de verano (Martín, 2014). La precipitación media anual es de 970 mm.

Para la modelación hidrológica-hidráulica distribuida y semi-distribuida, en éstas zonas de llanura, es de fundamental importancia contar con las relaciones cota-área y cota-volumen de los cuerpos lagunares presentes en la cuenca. El objetivo del presente trabajo es determinar la batimetría de la laguna La Victoria mediante la aplicación de técnicas de Teledetección y Sistemas de Información Geográfica. Asimismo, la metodología de análisis propuesta puede ser extrapolada al estudio de lagunas morfológicamente similares localizadas en áreas de llanura.

DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

Análisis altimétrico

Para la creación de los DEM – Modelos Digitales de Elevación hay tres fuentes básicas de datos: datos de mapas topográficos digitalizados, datos de campo recopilados con receptores GPS o nivelación total de estaciones, y fotografías aéreas digitales o imágenes de satélite. Estas técnicas se pueden comparar teniendo en cuenta cuatro aspectos, es decir, precio, precisión, densidad de muestreo, requisitos de pre-procesamiento. Cada técnica tiene sus ventajas particulares, pero también algunas desventajas. Actualmente, se utilizan frecuentemente sensores remotos en lugar de datos directos para obtener un DEM. La importancia de la observación aeroespacial es evidente: los satélites que transportan una variedad de sensores y miran hacia la tierra pueden recopilar datos, a costos relativamente bajos, en general consistentes con las resoluciones espaciales, espectrales y temporales requeridas para interpolar nuevos DEM (Kobrick, 2006).

En este estudio de caso fue empleado el modelo digital de elevación SRTM-Shuttle Radar Topography Mission de 1 arco segundo de resolución de píxel (30 m). Debido a que los conjuntos de datos de elevación global están inevitablemente sujetos a errores, debido principalmente a la metodología seguida para extraer la información de elevación y a los diversos pasos de procesamiento que han experimentado los modelos (Nikolakopoulos et al., 2006), mediante comparación con valores de campo georreferenciados y acotados del IGN - Instituto Geográfico Nacional (ver Figura 1) fueron corregidos los valores altimétricos del modelo.

La ecuación de corrección del modelo SRTM queda definida por (ver Figura 2):

$$h_{IGN} = 0.9676 \cdot h_{SRTM} + 1.0106 \quad (1)$$

Mediante el Software de soporte de análisis de recursos geográficos GRASS, versión 7.2 (Open Source Geospatial Foundation, 2015), se realizaron operaciones sobre el ráster corregido con la finalidad de obtener el área de aporte de la laguna La Victoria.

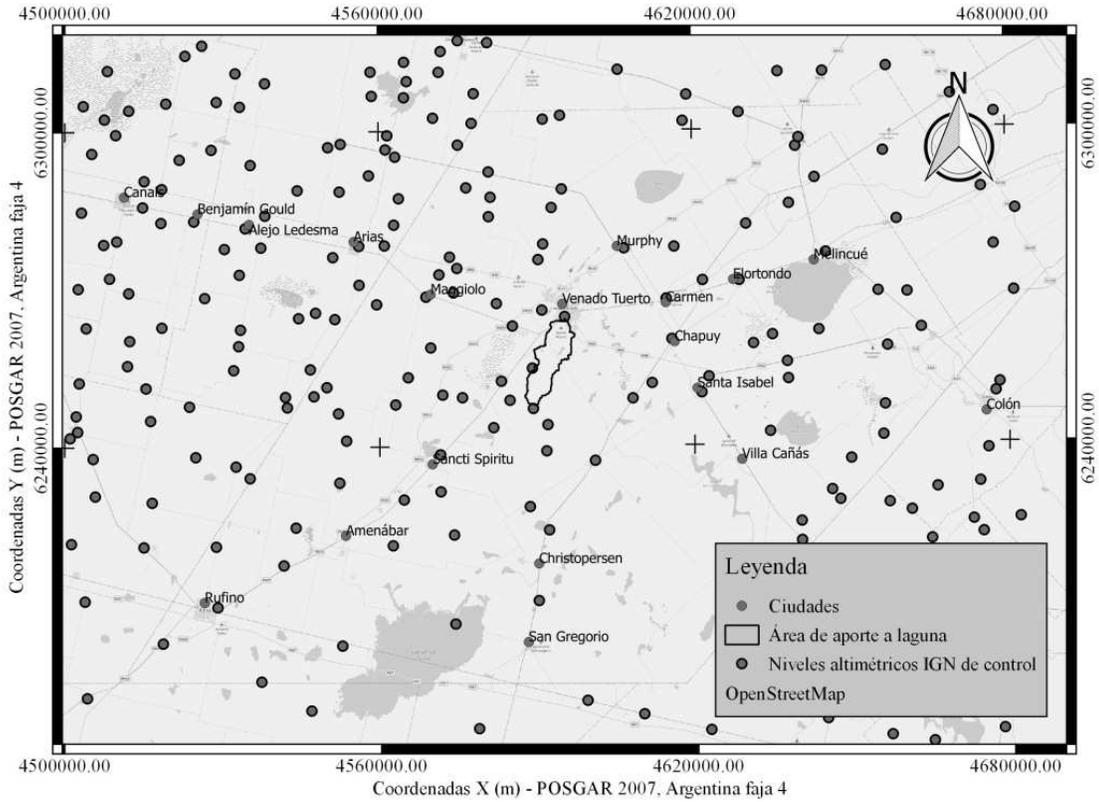


Figura 1: Ubicación de los puntos altimétricos de control del IGN respecto al área de aporte de la laguna.

Dichas operaciones consistieron en:

- *Relleno de vacíos*: con motivo de que las elevaciones sean continuamente decrecientes y se eliminen sumideros.

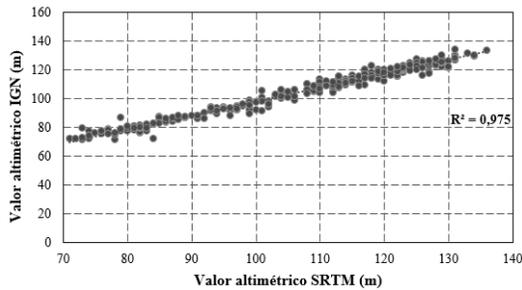


Figura 2: Correlación entre niveles altimétricos IGN y valores de SRTM.

- *Filtrado de paso bajo*: puesto que el modelo SRTM es un modelo de superficie, es decir, que representa la altura del terreno incluyendo todos los elementos enlazados en el mismo, fue aplicado un filtro de ventana móvil de promedio de píxeles vecinos, con un rango de 9 píxeles vecinos, con la finalidad de obtener un modelo digital de terreno. En la Figura 3 se observa el modelo del área de aporte a la laguna ya delimitada, habiéndose realizados el relleno de vacíos y el filtrado de paso bajo.

- *Determinación de parámetros hidrológicos*: Tales como acumulación de flujo, índice topográfico y redes de drenaje.

En la Figura 4 se observan definidas las redes de escurrimiento y el área de aporte a la laguna.

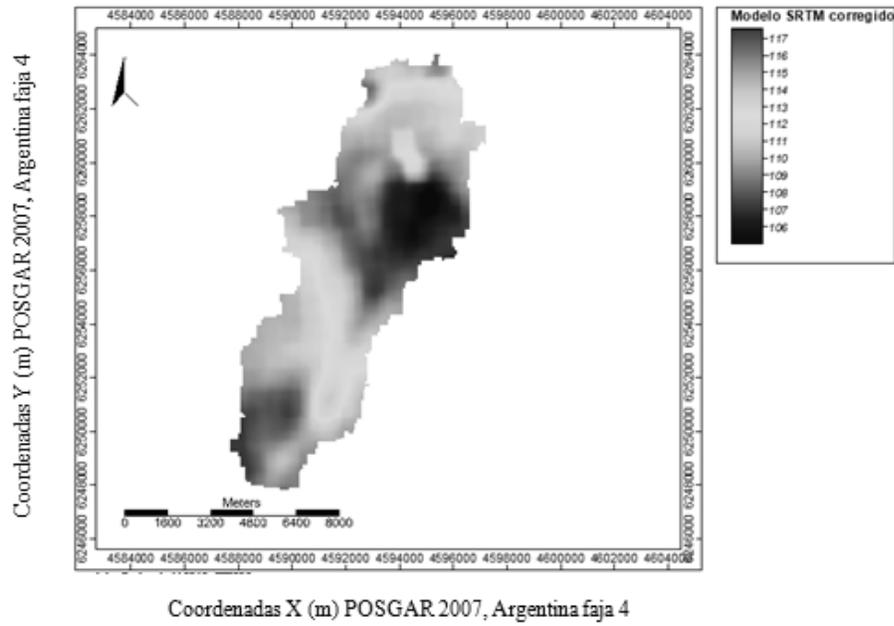


Figura 3: Modelo SRTM corregido.

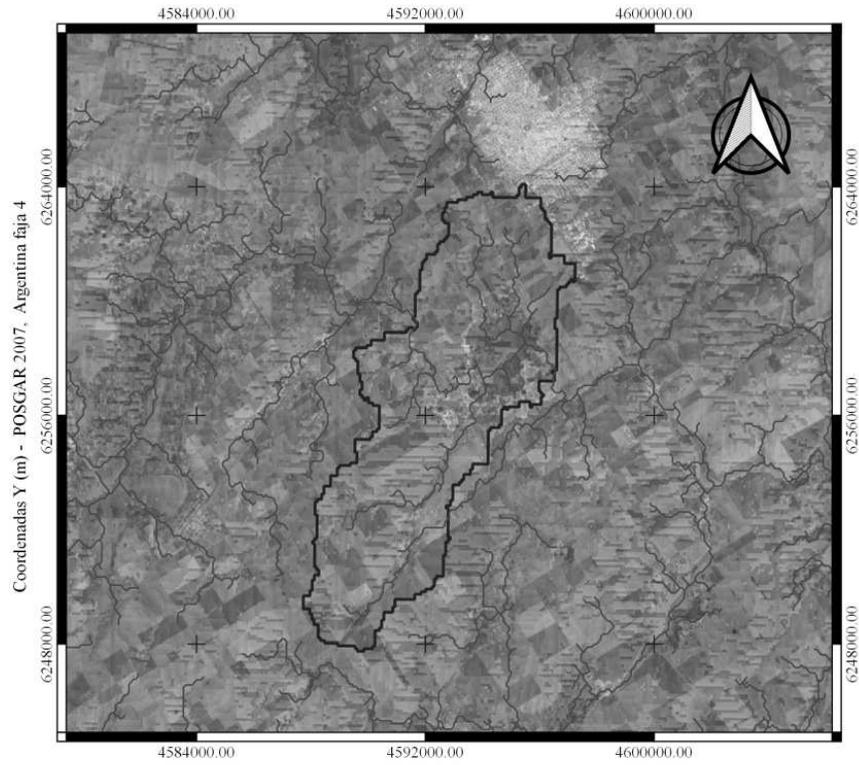


Figura 4: Delimitación del área de estudio mediante parámetros hidrológicos.

Análisis de superficies

Puesto que el modelo SRTM, conforme fue mencionado anteriormente, es un modelo de superficie y debido a que en las correcciones del mismo fueron aplicados filtros de paso bajo, es esperable que el mismo no defina con alto grado de precisión la forma de las superficies de igual nivel, obteniendo superficies aproximadas.

Por ello, para el análisis de la variación de superficies de agua de laguna La Victoria se emplearon imágenes obtenidas por los satélites Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM y Landsat 8 OLI, las cuales poseen una resolución de píxel de 30 m y un período de revisita de 16 días. Las fechas de adquisición de las imágenes que fueron utilizadas corresponden al período 2003 – 2018.

Mediante el análisis de información pluviométrica brindada por el Servicio Meteorológico Nacional se obtuvieron precipitaciones acumuladas a 30 días para cada fecha del período, siendo a su vez categorizadas por rango de precipitaciones acumuladas. En la Figura 5 se observa el rango establecido.

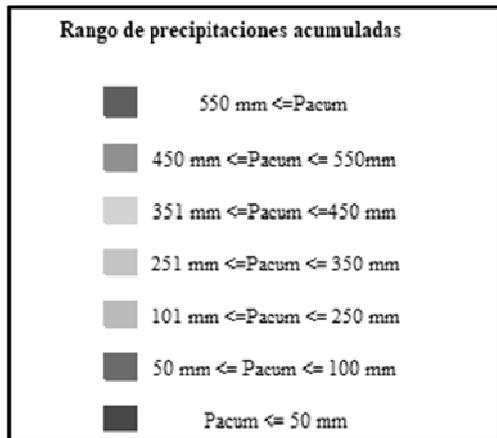


Figura 5: Rango de precipitaciones acumuladas a 30 días.

Conforme a las variaciones de precipitaciones acumuladas, y puesto que la variación de área de la laguna presenta un comportamiento acorde a la variación de las precipitaciones acumuladas para las estaciones de primavera-verano (Soria et al., 2017), fueron seleccionadas las imágenes satelitales a tratar.

Los valores de niveles digitales de las imágenes fueron transformados a valores de radiancia con la finalidad de obtener resultados más precisos al realizar los índices normalizados.

Además, las mismas fueron corregidas geoméricamente a través de una imagen satelital de coordenadas precisas brindada por la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE).

Posterior a las correcciones, se realizaron índices normalizados de vegetación (NDVI), de humedad de suelos (NDMI) y de diferencia de agua modificado (MNDWI) con el objeto de destacar las coberturas más relevantes del área de estudio y discriminarlas.

Índice normalizado de la diferencia de humedad:

$$NDMI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR} \quad (2)$$

donde NIR: banda situada en la longitud de onda del infrarrojo cercano, SWIR: banda situada en la longitud de onda del infrarrojo de onda corta.

Índice de vegetación diferencial normalizado:

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (3)$$

donde R: banda situada en la longitud de rojo visible.

Índice de la diferencia de agua normalizado, modificado.

$$MNDWI = \frac{G - SWIR}{G + SWIR} \quad (4)$$

donde G: banda situada en la longitud de onda verde visible.

En la Figura 6 se presenta a la izquierda la imagen satelital de fecha 23 de Enero de 2017, el sector de la laguna La Victoria en combinación falso color real, y a la derecha los índices obtenidos para dicha fecha, los cuales fueron descritos anteriormente, en los canales del rojo, verde y azul (RGB).

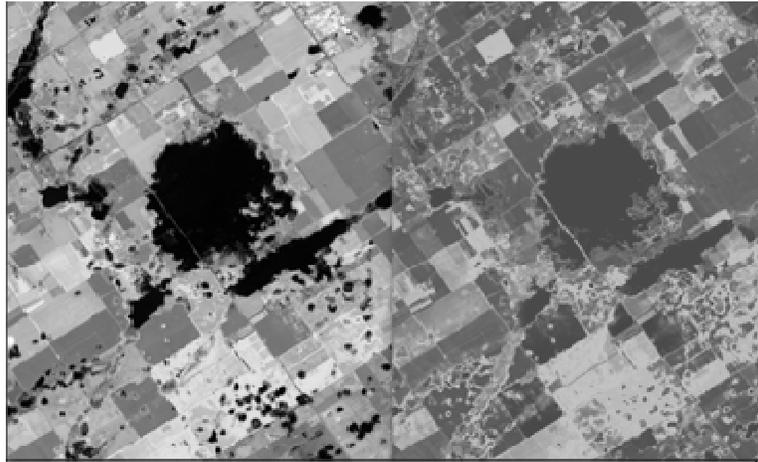


Figura 6: Izq: Imagen satelital en combinación R: infrarrojo cercano, G: Infrarrojo medio, B: Rojo. Der: Índices normalizados en combinación R: NDMI, G: NDVI, B: MNDWI.

Para la obtención de las máscaras de agua fue realizada una clasificación no supervisada para cada una de las imágenes seleccionadas, con un rango de obtención de clases de 30 a 50, un máximo de iteraciones de 6 y un mínimo de

píxeles por clase de 30. Luego de obtenidas, se realizó una supervisión y reclasificación de las mismas, basada en los índices elaborados, logrando imágenes clasificadas en agua y no-agua, como se observa en la Figura 7.

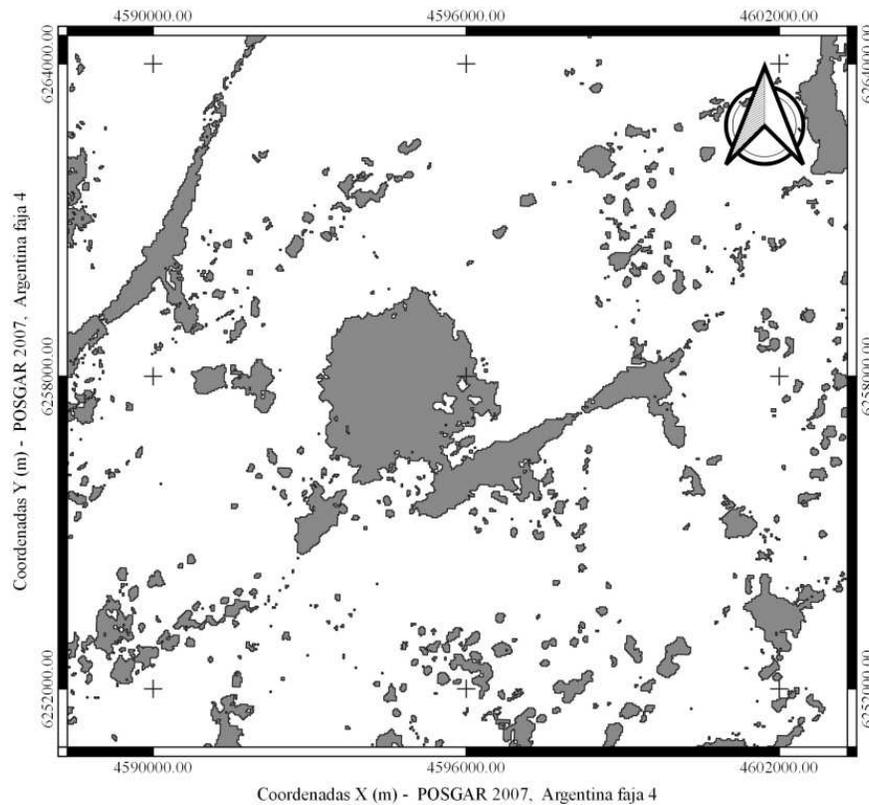


Figura 7. Imagen modelo clasificada en agua - no agua para la fecha 23 de enero de 2017.

Para un mejor manejo de las máscaras de cobertura de agua, las cuales en la etapa de clasificación se presentan en formato ráster, fueron transformadas a polígonos adquiriendo formato vectorial.

Para conocer el nivel de certeza de cada clasificación, se utilizó una ventana cuadrada de 5 km la cual abarca las superficies de agua de la laguna, y dentro de la misma se distribuyeron aleatoriamente 250 puntos (cantidad representativa del área). Luego, se realizó el control de las máscaras de agua mediante la caracterización de los puntos, con el soporte de las

imágenes de índices espectrales y conforme a las siguientes premisas: Es un píxel de agua y pertenece (o no) a la máscara de agua o, no es un píxel de agua y no pertenece (o sí) a la máscara de agua. En la Figura 8 puede observarse la ubicación de la ventana y la distribución de los puntos aleatorios para la fecha 23 de enero de 2017 y, en la Tabla 1, los resultados de la validación para dicha fecha.

Para todas las máscaras de agua, el nivel de certeza fue superior al 95% lo cual demuestra que la metodología de clasificación es acertada.

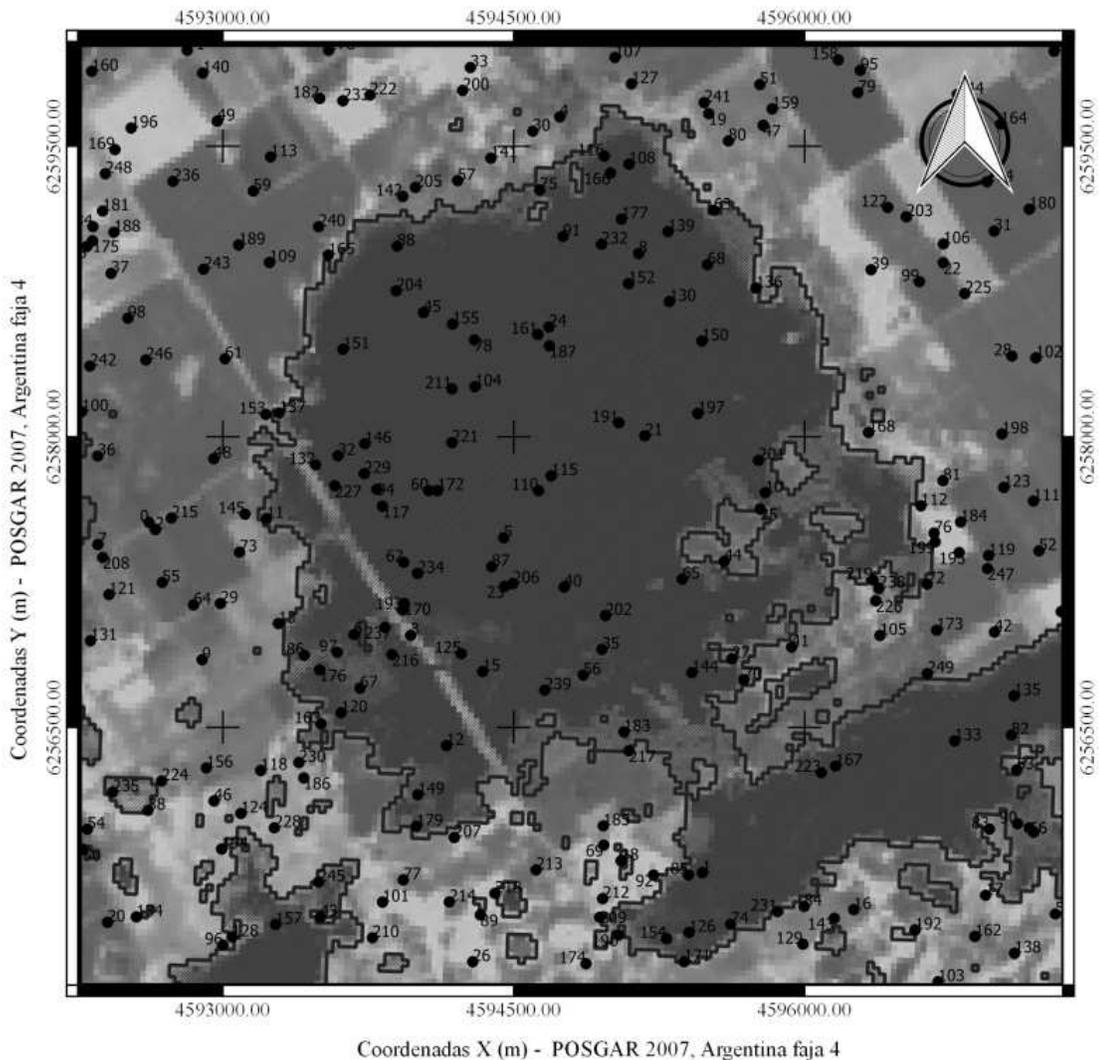


Figura 8: Distribución de puntos de control para la máscara de 23 de enero de 2017.

Tabla 1. Validación de máscara de agua.

Validación máscara de agua 23/01/2017	PIXEL ES AGUA	PIXEL NO ES AGUA
PERTENECE A MÁSCARA AGUA	89	8
NO PERTENECE A MÁSCARA DE AGUA	0	153

Porcentaje de certeza: 96,8%

El sistema de coordenadas empleado para trabajar las máscaras y sus derivados fue POSGAR 2007–Argentina 4, conforme al marco de referencia oficial.

Se extrajo de cada máscara la superficie perteneciente a la laguna.

Vinculación del modelo corregido y las máscaras de agua

Con el objeto de vincular las máscaras de agua a valores altimétricos, se extrajo en forma de puntos con coordenadas los vértices perimetrales de cada máscara y, mediante la unión de los mismos con el modelo SRTM corregido y transformado en formato vectorial, los contornos de laguna adquirieron valor altimétrico.

Para asignar un valor de altura único a cada máscara de agua, puesto que cada una de ellas representa agua a superficie libre, se graficaron otorgando a la superficie el valor de mayor tendencia entre los mismos.

En la Figura 9 se observa el gráfico de tendencia de valores altimétricos de una máscara de agua tipo.

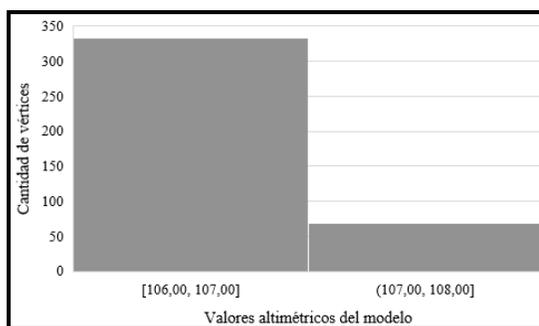


Figura 9: Tendencia de niveles altimétricos IGN del modelo para superficie de agua tipo.

A su vez, al categorizar el modelo corregido por rango de alturas, se realizaron inspecciones

visuales para cotejar las máscaras de agua y los valores altimétricos.

Con motivo de obtener una precisión exacta, las superficies altimétricas fueron además controladas con lecturas de niveles de la campaña de campo realizada por la empresa (EVARSA, 1995).

Para finalizar, se realizaron interpolaciones entre las superficies de agua con motivo de obtener curvas isobatas progresivas en rangos de alturas acotados.

RESULTADOS

En la Figura 10 se observa el resultado obtenido del estudio batimétrico de laguna La Victoria.

En la Figura 11, se aprecia para los diferentes niveles altimétricos, la superficie y el volumen que alcanza la laguna. La misma posee un nivel de agua permanente, el cual se encuentra en 104 m IGN, con lo cual la superficie de agua permanente de la laguna es próxima a 80 Ha, y el volumen 350000 m³. El crecimiento de la misma conforme a los niveles altimétricos es polinómico, alcanzando una superficie máxima de 1000 Ha, y un volumen de 5000000 de m³ para la cota de 106.50 m IGN.

A continuación, se presentan las ecuaciones de la parametrización de área y volumen de agua de la laguna respecto a los niveles altimétricos IGN.

Área de laguna (Ha) conforme a niveles altimétricos IGN:

$$\text{Área} = 88.27 \cdot x^2 - 18204 \cdot x + 938545 \quad (5)$$

Volumen de agua de la laguna (m³) conforme a niveles altimétricos IGN:

$$\text{Vol} = 441360 \cdot x^2 - 91021081 \cdot x + 4692722768 \quad (6)$$

donde x (m) es el nivel altimétrico referido a IGN. El ajuste de la curva obtuvo una correlación de $R^2=0.977$ y un error porcentual del sesgo que va desde $\text{PBIAS}=0.14\%$ para volumen y $\text{PBIAS}=5\%$ para superficie respectivamente.

En las Figuras 12 y 13, pueden observarse las diferencias tanto de posición como de área cercada, de las curvas isobatas de 104.0 m y 105.0 m logradas en este estudio con respecto a las de IGN.

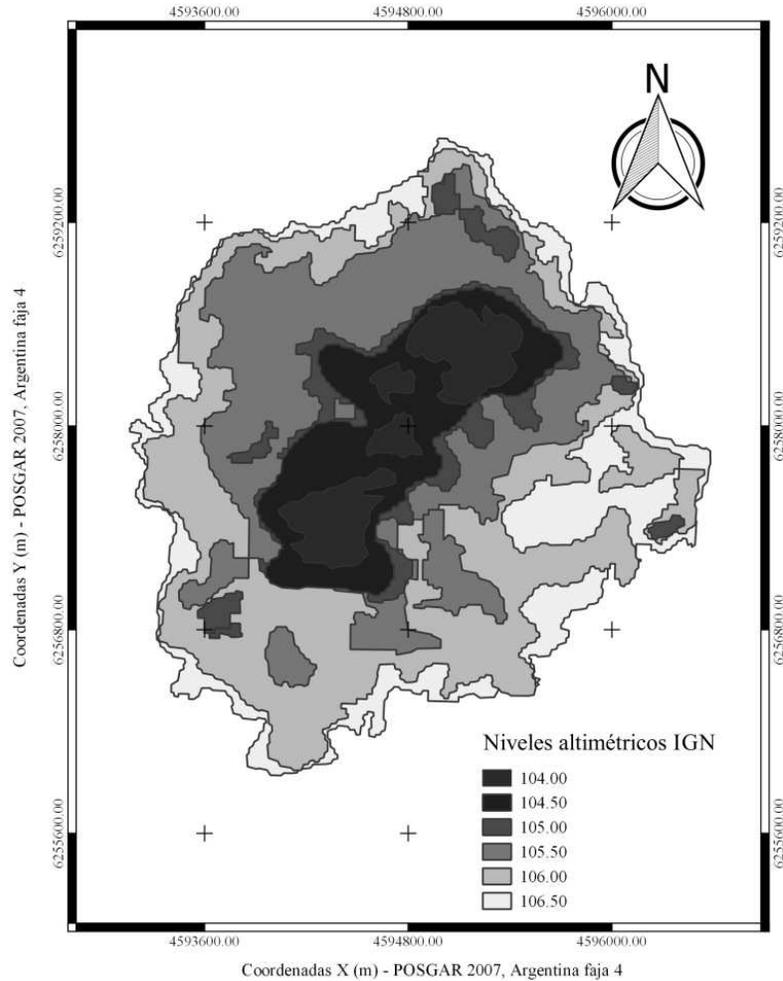


Figura 10: Batimetría de laguna La Victoria.

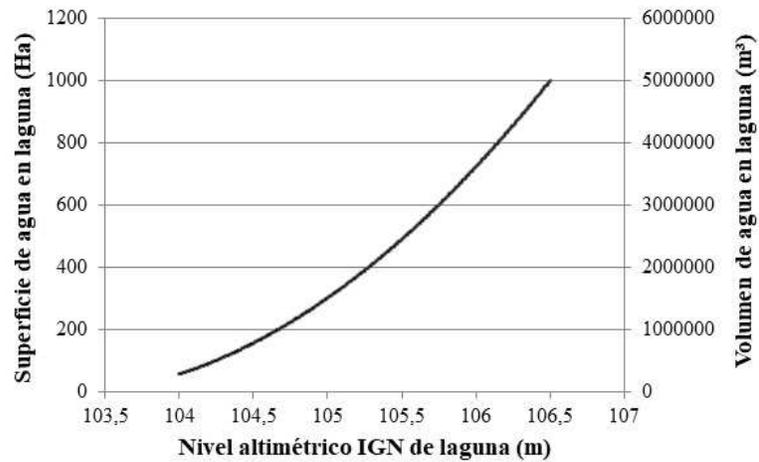


Figura 11: Variación superficial y volumétrica de la laguna conforme a niveles altimétricos IGN.

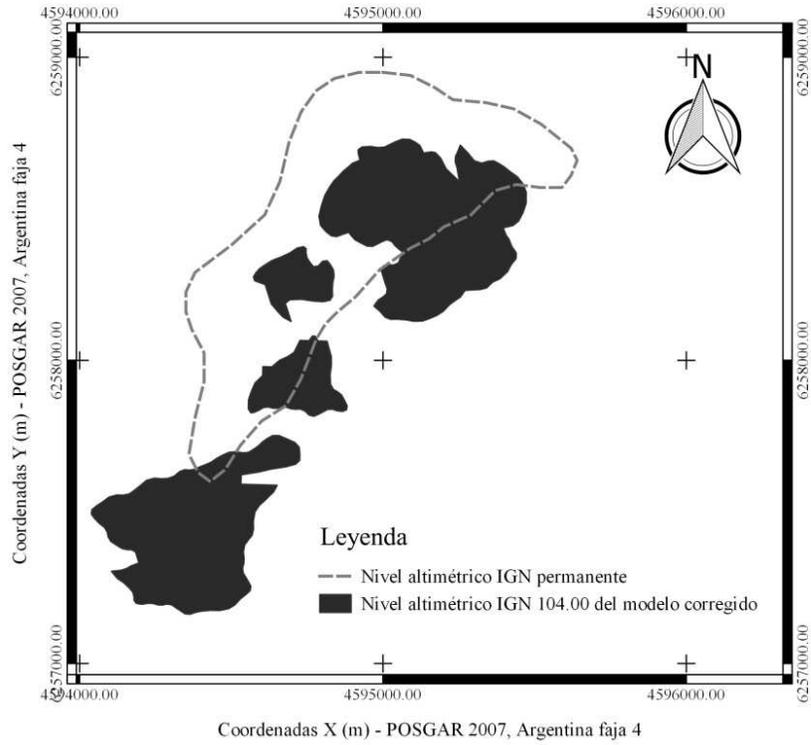


Figura 12: Diferencia espacial de nivel altimétrico IGN permanente de laguna.

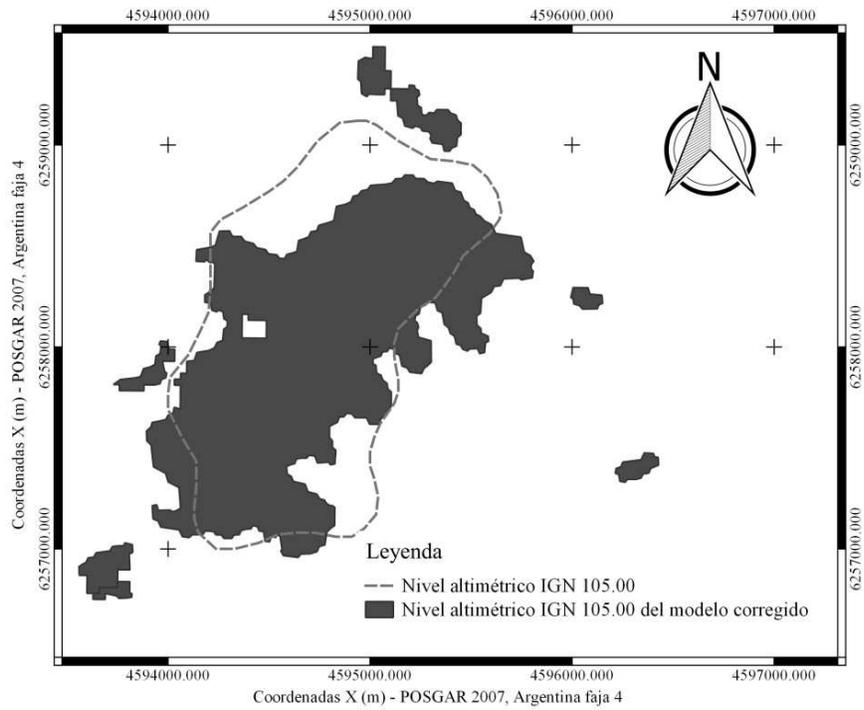


Figura 13: Diferencia espacial para nivel altimétrico IGN 105 m.

CONCLUSIONES

Se establece que el modelo SRTM con la aplicación de filtros de paso bajo, que promedien los valores altimétricos conforme a píxeles cercanos y ajustado con valores de campo, es una herramienta muy útil para obtener los valores altimétricos en lagunas poco profundas.

A su vez, se expone que la creación de máscaras de agua, estratégicamente seleccionadas, es un indicador clave para definir la forma de la distribución de los valores altimétricos en la superficie.

El estudio realizado brinda información a mayor nivel de detalle respecto a la adquirida en las cartas topográficas del IGN: Desde una distancia entre curvas de 0.50 m., respecto a 2.5 m de IGN hasta mejor precisión en las posiciones y áreas encerradas.

Por lo tanto, y conforme lo demuestran los valores obtenidos en campo, puede concluirse que el método empleado para la obtención de la batimetría de laguna La Victoria, es altamente aceptable.

REFERENCIAS

- Evarsa S.A., 1995. *Proyecto ejecutivo obras de evacuación laguna El Basural*. Informe Final Tomo II. Municipalidad de Venado Tuerto, provincia de Santa Fe.
- Iriondo, M., 1986. *Modelos sedimentarios de cuencas continentales: las llanuras de agradación*. Primer Congreso Latinoamericano de Hidrocarburos Conexpo/Arpel, Actas I:81-98, Buenos Aires.
- Iriondo, M. y E. Drago, 2004. *The headwater hydrographic characteristics of large plains: the Pampa case*. *Ecohydrology & Hydrobiology* 4(1):7-16.
- Kobrick M. 2006. *On the toes of giants –how SRTM was born*. *Photogramm Eng Remote Sens*; 72: 206-10.
- Martín, R., 2014. *Meteorología Regional: El Clima en la Pampa Húmeda*. Iracema ediciones. Rosario, Argentina.
- Nikolakopoulos KG, Kamaratakis EK, Chrysoulakis N., 2006. *SRTM vs ASTER elevation products. Comparison for two regions in Crete, Greece*. *Int J Remote Sens*; 27(21):4819-38.
- Open Source Geospatial Foundation, 2015. *Geographic Resources Analysis Support System (GRASS). Version 7.2*. <https://grass.osgeo.org/documentation/general-overview/#AboutGRASS7>.
- Soria, M.; Piñero, V.; Reyes López, D.; Moya, R. y O'Donohoe, T., 2017. *Parametrización de la Superficie de la Laguna La Victoria Mediante Precipitaciones Acumuladas*. Tecnología y Ciencia de la UTN. En prensa.
- Artículo recibido el 04/2018 y aprobado para su publicación el 06/2018.