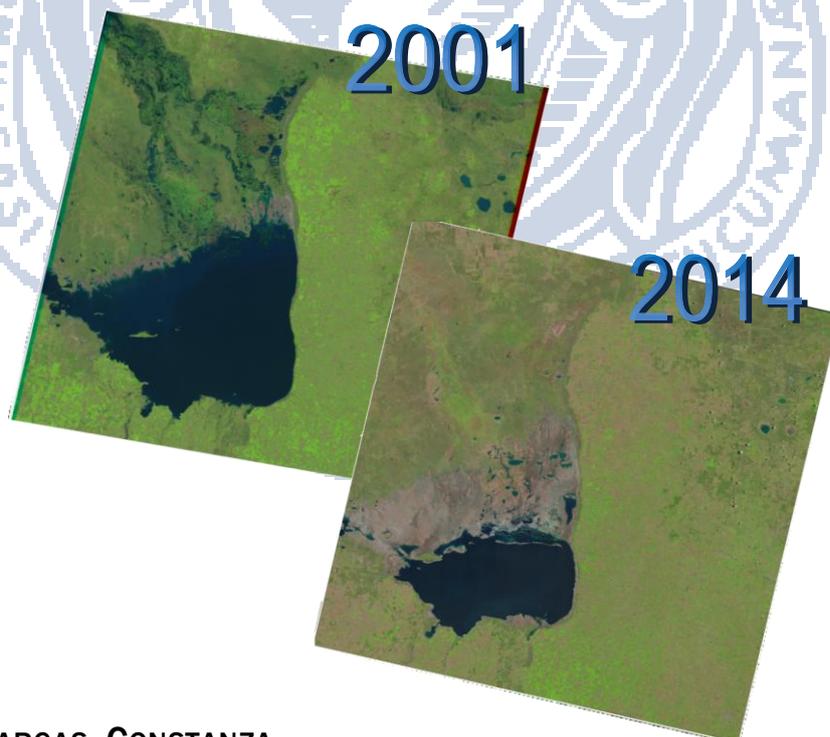


**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA**  
**FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES**

**PRÁCTICA SUPERVISADA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**ANÁLISIS DE LA DINÁMICA HÍDRICA ESPACIAL**  
**DE LA LAGUNA MAR CHIQUITA**  
**PERÍODO 2001 - 2014**



**ALUMNO: VARGAS, CONSTANZA**

**TUTOR: MG. ING. PAGOT, MARIANA**

**SUPERVISOR EXTERNO: MG. ING. GERARDO HILLMAN**

**ABRIL, 2014**

# ANÁLISIS DE LA DINÁMICA HÍDRICA ESPACIAL DE LA LAGUNA MAR CHIQUITA DURANTE EL PERÍODO 2001-2014

## ÍNDICE

1. RESUMEN .....	6
2. INTRODUCCIÓN.....	7
3. PROBLEMÁTICA DEL SISTEMA Y JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO .....	8
4. OBJETIVOS .....	10
5. GENERALIDADES DEL SISTEMA.....	10
6. MARCO TEÓRICO .....	12
7. REVISIÓN DE ANTECEDENTES .....	15
a. Antecedentes de niveles y batimétricos de la Laguna Mar Chiquita .....	15
b. Antecedentes con relación al estudio del sistema Bañados del río Dulce .....	15
c. Antecedentes con relación a otros lugares con dinámica similar .....	18
I. Mar de Aral.....	18
II. Mar Menor.....	20
8. METODOLOGÍA DE TRABAJO .....	21
1. Esquema de Trabajo .....	21
2. Programas utilizados .....	23
I. ENVI .....	23
II. AutoCAD y CivilCAD .....	24

<b>9. ACTUALIZACIÓN DE LAS SERIES DE NIVELES DE LA LAGUNA MAR CHIQUITA.....</b>	<b>24</b>
a.    Niveles diarios de la Laguna Mar Chiquita.....	24
b.    Niveles mensuales de la Laguna Mar Chiquita .....	27
<b>10. ACTUALIZACIÓN DE LA SERIE DE IMÁGENES SATELITALES.....</b>	<b>28</b>
a.    Obtención y Selección de Imágenes Satelitales de la Laguna Mar Chiquita .....	28
b.    Antecedentes de batimétricos de la Laguna Mar Chiquita .....	32
c.    Obtención y Selección de Imágenes Satelitales de los Bañados del río Dulce .....	33
<b>11. PROCESAMIENTO DE IMÁGENES SATELITALES.....</b>	<b>35</b>
a.    Análisis de las imágenes satelitales de la Laguna Mar Chiquita.....	36
b.    Análisis de las Áreas de Bañados .....	38
<b>12. CARACTERIZACIÓN TOPOBATIMÉTRICA DE LA LAGUNA MAR CHIQUITA.....</b>	<b>43</b>
<b>13. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>	<b>51</b>
a.    Curva Área-Nivel .....	51
b.    Curva Volumen - Área .....	53
c.    Curva Nivel – Volumen .....	56
d.    Relación Bañados - Laguna .....	57
<b>14. CONCLUSIONES .....</b>	<b>59</b>
<b>15. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>61</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Fauna en la región de la Laguna Mar Chiquita (Mery, 2010). .....	8
<b>Figura 2.</b> Problemáticas asociadas al sitio en estudio. (Bucher, 2006).....	9
<b>Figura 3.</b> Sistema de la Laguna Mar Chiquita. Fuente: SSRRHH, 2012. ....	11
<b>Figura 4.</b> Aportes hídricos del río Dulce para períodos hidrológicos 1926-27 a 2010-11. Fuente: SSRRHH, 2012. ....	13
<b>Figura 5.</b> Curva de variación del nivel del lago modificada y corregida. Fuente: Piovano <i>et al.</i> (2002).....	13
<b>Figura 6.</b> Subregiones definidas: 1) Río Dulce Medio (azul), 2) Bañados del Río Dulce (verde) y 3) Laguna Mar Chiquita. Fuente: Pagot, 2003. ....	16
<b>Figura 7.</b> División de los Bañados en 3 áreas. Fuente: Mery, 2010. ....	16
<b>Figura 8.</b> Áreas de Bañados medidas. Periodo: 1997-2009. Fuente: Mery, 2010. ....	17
<b>Figura 9.</b> Escenarios posibles con valores de volumen desbordado y área de los Bañados del río Dulce. Fuente: Mery (2010).....	18
<b>Figura 10.</b> Mar de Aral de 1989 y 2008. Fuente: <a href="http://es.wikipedia.org/">http://es.wikipedia.org/</a> .....	19
<b>Figura 11.</b> Mapa batimétrico resultante del Mar Menor. Fuente: Castejón y González (2009).21	
<b>Figura 12.</b> Esquema con la metodología de trabajo. ....	23
<b>Figura 13.</b> Ubicación en planta de las escalas limnimétricas colocadas frente al Destacamento de la Reserva de la Laguna Mar Chiquita. Imagen de Google Earth del año 2011. ....	25
<b>Figura 14.</b> Escala C6. Marzo de 2014.....	26
<b>Figura 15.</b> Niveles diarios LMCH. Período 2001-2014.....	26
<b>Figura 16.</b> Niveles mensuales LMCH. Período 2001-2014.....	27
<b>Figura 17.</b> Niveles mensuales LMCH con línea de tendencia. Período 2001-2014. ....	27
<b>Figura 18.</b> Niveles mensuales LMCH. Período 1967-2014.....	28
<b>Figura 19.</b> Imágenes satelitales procesadas y serie de niveles diarios de la Laguna Mar Chiquita.....	32

<b>Figura 20.</b> Mosaico de imágenes satelitales correspondientes a los días 10 y 11/05/10. ....	34
<b>Figura 21.</b> Banda 4 de la imagen adquirida el día 13/12/2007. ....	36
<b>Figura 22.</b> Contorno de la LMCH correspondiente al día 13/12/2007. ....	37
<b>Figura 23.</b> Zona norte de la Laguna. Extraída de la imagen satelital del día 29/03/12. ....	37
<b>Figura 24.</b> Banda verde en escala de grises. Imagen correspondiente al día 19/07/2012. ....	39
<b>Figura 25.</b> Contornos de Bañados Sur y Este. Imagen correspondiente al día 11/09/11.....	40
<b>Figura 26.</b> Áreas de Bañados medidas con apoyo satelital durante el período 2009 - 2013. ...	41
<b>Figura 27.</b> Serie actualizada de área total de Bañados. Período 1997 - 2013. ....	42
<b>Figura 28.</b> Serie actualizada de áreas de Bañados: A <sub>1</sub> , A <sub>2</sub> , A <sub>3</sub> y Área total. Período 2006 - 2013. ....	43
<b>Figura 29.</b> Mapa batimétrico de la Laguna Mar Chiquita. La escala de colores se asocia al nivel de agua en (m s.n.m.).....	44
<b>Figura 30.</b> Modelo topobatimétrico de la Laguna Mar Chiquita. Vista sureste isométrica. (Generación propia). ....	45
<b>Figura 31.</b> Estimación de volúmenes de la Laguna Mar Chiquita. ....	47
<b>Figura 32.</b> Mapa de profundidades de la Laguna Mar Chiquita. ....	47
<b>Figura 33.</b> Mapa de pendientes de la Laguna Mar Chiquita. ....	48
<b>Figura 34.</b> Perfiles norte, sur, este y oeste de la Laguna Mar Chiquita.....	50
<b>Figura 35.</b> Áreas y niveles medidos en la Laguna Mar Chiquita. ....	51
<b>Figura 36.</b> Curvas Áreas-Niveles para la Laguna Mar Chiquita. ....	52
<b>Figura 37.</b> Áreas medidas y Volúmenes estimados para la Laguna Mar Chiquita. ....	53
<b>Figura 38.</b> Curvas Volúmenes-Áreas para la Laguna Mar Chiquita. ....	54
<b>Figura 39.</b> Mapa de pendientes y rangos de niveles definidos para la Laguna Mar Chiquita. ..	55
<b>Figura 40.</b> Curva Volúmenes-Niveles de agua para la Laguna Mar Chiquita. ....	57
<b>Figura 41.</b> Volúmenes de la Laguna estimados como función de áreas medidas y de niveles. 57	
<b>Figura 42.</b> Áreas de Bañados medidas y volúmenes a través del tiempo. ....	58
<b>Figura 43.</b> Curva Nivel - Volumen con imágenes satelitales.....	60

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Relevamiento topográfico de las escalas en la Laguna Mar Chiquita. Fuente: LH-UNC, 2012. ....	24
<b>Tabla 2.</b> Imágenes satelitales LMCH utilizadas para batimetría. Fuente: USGS. ....	29
<b>Tabla 3.</b> Otras imágenes satelitales analizadas de la Laguna Mar Chiquita. (Descargadas de la página web del USGS). ....	31
<b>Tabla 4.</b> Datos batimétricos utilizados. Fuente: Hillman, 1999; CIRSA, 1979. ....	33
<b>Tabla 5.</b> Imágenes analizadas de los Bañados. Fuente: CONAE. ....	34
<b>Tabla 6.</b> Áreas de la Laguna Mar Chiquita medidas con apoyo satelital. Período 2001-2014. .	38
<b>Tabla 7.</b> Áreas de Bañados medidas con apoyo satelital. Período 2009 - 2013. ....	40
<b>Tabla 8.</b> Niveles de agua y áreas medidas y digitalizadas de la Laguna Mar Chiquita. ....	44
<b>Tabla 9.</b> Cálculo de volúmenes de agua de la Laguna. ....	46

## 1. RESUMEN

En el presente trabajo se realizó el estudio de la dinámica hídrica de la Laguna Mar Chiquita enfocado en las variaciones de áreas como función de los niveles de agua durante el período 2001-2014. Se cuantificaron y analizaron las relaciones entre las variables de niveles de agua, áreas y volúmenes. Se utilizaron técnicas de teledetección combinadas con mediciones directas en campo. El procesamiento digital de imágenes satelitales permitió generar y actualizar mapas topobatimétricos de este cuerpo de agua. Esta técnica digital se aplicó para la extracción de los contornos de agua tanto de la Laguna como de los Bañados del río Dulce, para evaluar a nivel local y regional el sistema de interés.

Los resultados alcanzados permitieron definir funciones matemáticas que vincularon las variables de nivel de agua con área y volumen de la Laguna Mar Chiquita. Estos avances permitieron mejorar en el conocimiento de los principales términos que componen el balance hídrico del sistema.

Este trabajo se desarrolló en el marco de la Práctica Supervisada de la carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Córdoba. La misma fue llevada a cabo en el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

## 2. INTRODUCCIÓN

La Laguna Mar Chiquita se encuentra en el noreste de Córdoba y, en su máxima extensión comprende parte del sudeste de Santiago del Estero. Constituye, históricamente, el cuerpo de agua con mayor extensión de la región, y el lago salado más extenso de Sudamérica.

Para plantear un balance hidrometeorológico de este sistema, se define que el ingreso de agua se produce principalmente, en forma superficial, por el río Dulce desde el norte, y en menor medida por los aportes, desde el sur, de los ríos Suquia y Xanaes. Las salidas de este sistema endorreico se producen principalmente por la variable de evaporación. Este cuerpo de agua, se encuentra fuertemente condicionado por su morfología ya que se emplaza en una zona de llanura, donde se logra un delicado equilibrio entre su nivel de agua y el hábitat que permite un alto grado de biodiversidad.

Su mayor cobertura de agua se extendió hasta los 6500 km<sup>2</sup> durante el año 2003, a partir del cual se registró una notable disminución llegando a los 2500 km<sup>2</sup> en la actualidad.

En el presente Informe de Práctica Supervisada se presenta un análisis de la dinámica hídrica de la Laguna Mar Chiquita, basado principalmente en la caracterización espacial del sistema a través de la interpretación de imágenes satelitales adquiridas por la serie LANDSAT (5, 7 y 8). Se definieron relaciones numéricas que vinculan las variables del nivel del agua de la laguna con las áreas medidas con apoyo satelital y los volúmenes derivados de un nuevo y actualizado modelo digital topobatimétrico del cuerpo de agua. Estos resultados permitieron alcanzar un mayor conocimiento en el funcionamiento hidrológico característico de la región. Se logró mejorar la estimación de los términos relacionados con la variación espacial del sistema para avanzar en la definición de un futuro balance hídrico.

### 3. PROBLEMÁTICA DEL SISTEMA Y JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO

La cuenca en la que se encuentra la Laguna Mar Chiquita, se distribuye en cinco provincias de Argentina. Estas provincias son: Catamarca, Salta, Tucumán, Santiago del Estero y Córdoba, con mayor participación de las tres últimas, tanto en los aportes hídricos como en los derechos de uso y las obligaciones de conservación del recurso. Este complejo sistema hidroecológico cerrado constituye un importante hábitat para regiones semiáridas (Montenegro, 1998). Por este motivo, en el año 1994 se creó la "Reserva Natural Provincial de Mar Chiquita" y en 2001 se incorporaron los Bañados del río Dulce y la Laguna Mar Chiquita a los "Sitios Ramsar" creados por la Convención de Ramsar sobre Humedales (Ley Nacional de adhesión Nº 23.919/91). En el plano internacional, ha sido denominado sitio de valor hemisférico por la Red de Aves Playeras (1991), ya que es la región más importante de la provincia de Córdoba en cuanto a abundancia y diversidad de aves (**Figura 1**) y al mismo tiempo comprende el humedal de mayor importancia regional por el número de especies e individuos de aves acuáticas residentes y migratorias (Torres y Michelutti, 2005).



**Figura 1.** Fauna en la región de la Laguna Mar Chiquita (Mery, 2010).

Durante las últimas décadas, las importantes fluctuaciones del nivel de agua en el sistema, definieron periodos históricos ricos a muy pobres, como los analizados en este trabajo. Estas variaciones impactaron directamente en el sistema, tanto a nivel ecológico como en el desarrollo social y económico de las comunidades asentadas en las proximidades de la Laguna. Se manifestaron situaciones de distintas escalas ambientales, desde la ausencia de pejerrey como consecuencia de una importante concentración salina, hasta el aprovechamiento económico de una comunidad costera como Miramar al mejorar el desarrollo turístico de la costa debido al marcado descenso del agua. Esta misma localidad, había sufrido en la década del '80, situaciones de inundación de un importante sector urbano, y nuevamente sobre la zona costera durante el año 2003, como se muestra en la **Figura 2**.

En Bucher (2006) se distinguen algunos de los problemas importantes que aquejan a este sistema, como son en periodos húmedos: las inundaciones en Miramar (única ciudad costera

de la Laguna Mar Chiquita) y los efectos negativos de acciones antropicas no controladas que han provocado mortandad de peces, como el manejo del caudal erogado por el embalse Río Hondo.

En la necesidad de mantener la sustentabilidad del sistema debe prevalecer la protección de la flora y fauna autóctona y el mantenimiento de los ciclos hidrológicos de anegamiento en los Bañados del Río Dulce.



**Figura 2.** Problemáticas asociadas al sitio en estudio. (Bucher, 2006)

La Laguna Mar Chiquita o Mar de Ansenusa se emplaza en una zona de llanura que es responsable de su escasa profundidad, del orden de 5,5 m en la actualidad, cubriendo un área cercana a 2.500 km<sup>2</sup>, con un nivel de agua de 67,5 m s.n.m. Estos parámetros han pasado por grandes modificaciones históricas debido a que la costa de la Laguna presenta pendiente muy suave, por lo que la superficie varía de manera muy marcada aun para pequeños cambios de nivel. El máximo nivel medido se observó en el año 2003 con un valor próximo a los 72 m s.n.m., lo que corresponde a una profundidad máxima promedio de 12 m y un área cubierta por agua de 6500 km<sup>2</sup>.

Las disminuciones de nivel que afectan principalmente la extensión areal de la Laguna, condicionan la biodiversidad del sistema. Este cuerpo de agua incrementa su salinidad al disminuir su volumen de agua modificando las condiciones del hábitat. Estos aspectos y los reconocimientos de área nacional e internacionalmente protegida avalan el interés de mejorar su conocimiento, escaso por la gran extensión, la complejidad hidrológica y la baja densidad poblacional.

A su vez es importante analizar la dinámica areal de la Laguna para evaluar este nuevo período de niveles bajos, y así aportar bases técnicas para definir políticas de planificación y usos del suelo acordes a estas condiciones; de manera tal de prevenir ante la ocupación de zonas que en períodos húmedos serán inundables, entre otras acciones.

## 4. OBJETIVOS

El principal objetivo de este trabajo es evaluar la dinámica hídrica espacial del sistema Laguna Mar Chiquita durante el período 2001-2014.

Para alcanzar este objetivo se planteó el desarrollo de las siguientes tareas:

1. Medición y análisis de las áreas de la Laguna Mar Chiquita a través del procesamiento digital de imágenes satelitales.
2. Medición y análisis de las áreas de Bañados del río Dulce a través del procesamiento digital de imágenes satelitales.
3. Análisis de la variación del área de la Laguna Mar Chiquita y del Bañado del río Dulce a través del tiempo.
4. Actualización topobatemétrica del sistema de la Laguna. Generación de Modelos Digitales de Elevación para el cuerpo de agua de la Laguna Mar Chiquita.
5. Estudio de la relación entre el área de la Laguna medida y el correspondiente nivel de agua.
6. Estudio de la relación entre el área de la Laguna medida y el correspondiente volumen de agua. Definición de curvas entre el volumen de la Laguna y el nivel de agua.

## 5. GENERALIDADES DEL SISTEMA

El sistema integrado por la cuenca endorreica de la Laguna Mar Chiquita (o Mar de Ansenusa) y los Bañados del río Dulce, recibe los aportes de los ríos Dulce, Suquia y Xanaes (**Figura 3**). Conforman el mayor sistema hidro-ecológico cerrado de un lago salado en América del Sur.

En particular, la Laguna Mar Chiquita se ubica al noreste de la Provincia de Córdoba (República Argentina), entre los 30°20' y 31° de latitud sur y los 62°40' y 63°10' de longitud oeste, ocupando también una pequeña porción de la región sureste de Santiago del Estero. Hacia el norte de la Laguna y por las características topográficas del terreno (pendiente <1%) se forman los Bañados del Río Dulce, ocupando el sureste de la Provincia de Santiago del

Estero y norte de Córdoba. Este subsistema posee una gran fluctuación de superficie inundada, entre 150 km<sup>2</sup> en la época seca y 4000-5000 km<sup>2</sup> en época húmeda.

El río Dulce(o Petri) es el principal tributario de este sistema, en general sus aportes representan el 80% del total(Hillman, 1999). Los afluentes que llegan desde el sur de la Laguna, son los ríos Suquia(o río Primero) y Xanaes(o río Segundo), junto a arroyos menores desde el oeste, llegando a ser esporádicos en períodos de sequía. Sus cuencas se localizan completamente en la provincia de Córdoba, mientras que la cuenca del río Salí-Dulce incluye las provincias de Salta, Catamarca, Tucumán, Santiago del Estero y Córdoba. La cuenca del río Dulce, cuyo límite al norte es el Embalse de Río Hondo, abarca un área total de 37.300 km<sup>2</sup>.

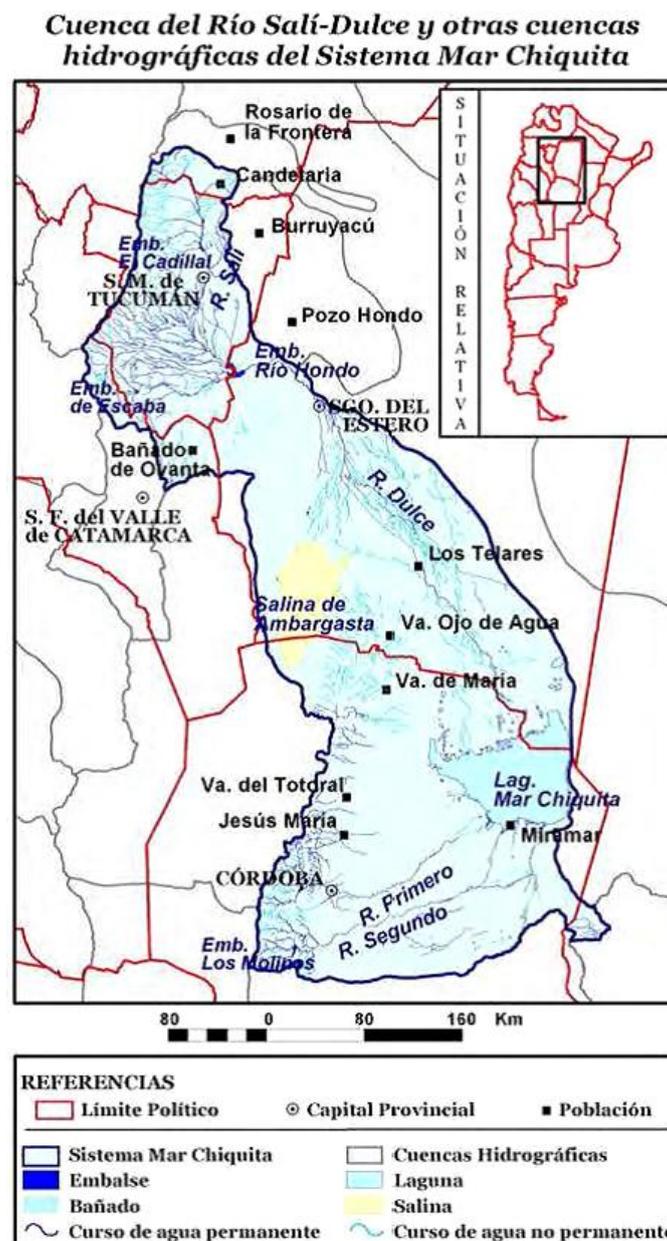


Figura 3. Sistema de la Laguna Mar Chiquita. Fuente: SSRRHH, 2012.

El río Dulce escurre con sentido dominante noroeste-sudeste y, sin recibir más afluentes, recorre por una planicie de escasa pendiente (0,025%), principalmente a lo largo del último tramo de 350 km (entre Los Telares y la Laguna Mar Chiquita). Estas características topográficas favorecen las frecuentes divagaciones, cambios de curso y pérdida del cauce principal en algunas secciones (CFI, 1965). Superada su escasa capacidad de conducción durante las crecidas estivales (alrededor de los 100 m<sup>3</sup>/s), los terrenos se anegan formando así los Bañados del Río Dulce, de benéfica influencia sobre suelos y pasturas de la región. El área máxima de estos Bañados durante un año hídrico depende de las condiciones de suelo previas (seco, húmedo o muy húmedo). En Pagot (2003) y Mery (2010) se encuentran antecedentes en el estudio de su dinámica hídrica, definiendo un área máxima entre los meses de abril a junio, cubriendo una superficie máxima de 4500 km<sup>2</sup>.

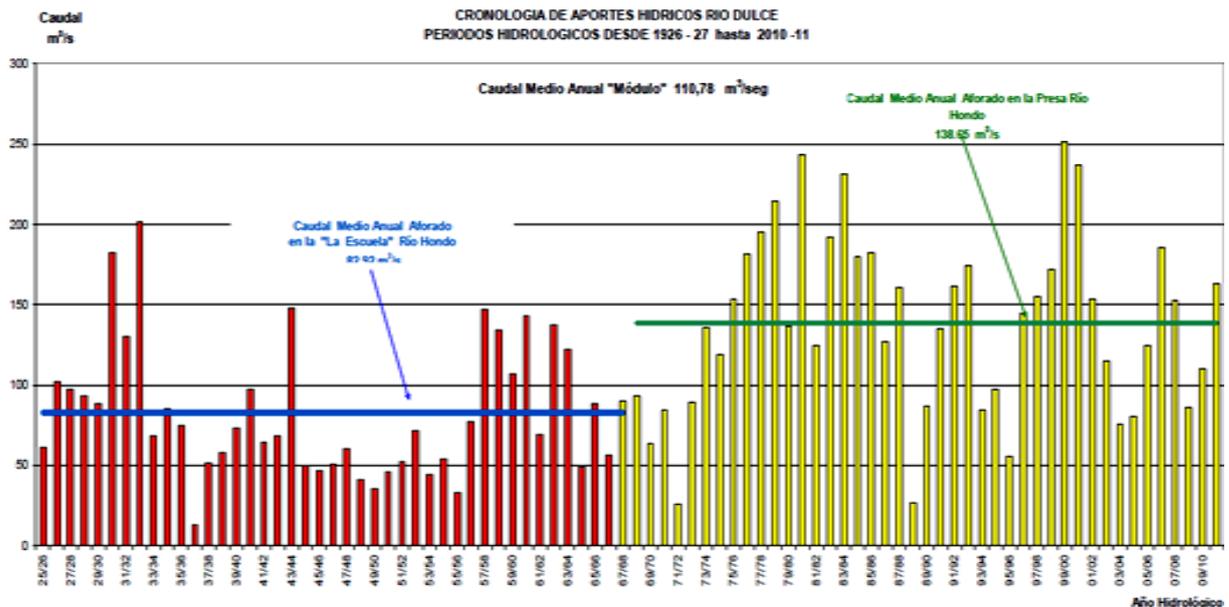
El río Dulce, a lo largo de su cuenca, está regulado principalmente por obras hídricas menores con fines de riego, y por el embalse de Río Hondo para la generación de energía y el control de crecidas. Esta regulación antropocéntrica domina la variación del caudal que descarga en la Laguna Mar Chiquita. A su vez, los ríos Suquia y Xanaes están regulados por los embalses San Roque y Los Molinos, respectivamente.

## 6. MARCO TEÓRICO

Durante las últimas décadas, se han observado importantes fluctuaciones en el sistema, pasando de períodos históricos ricos a intensas sequías.

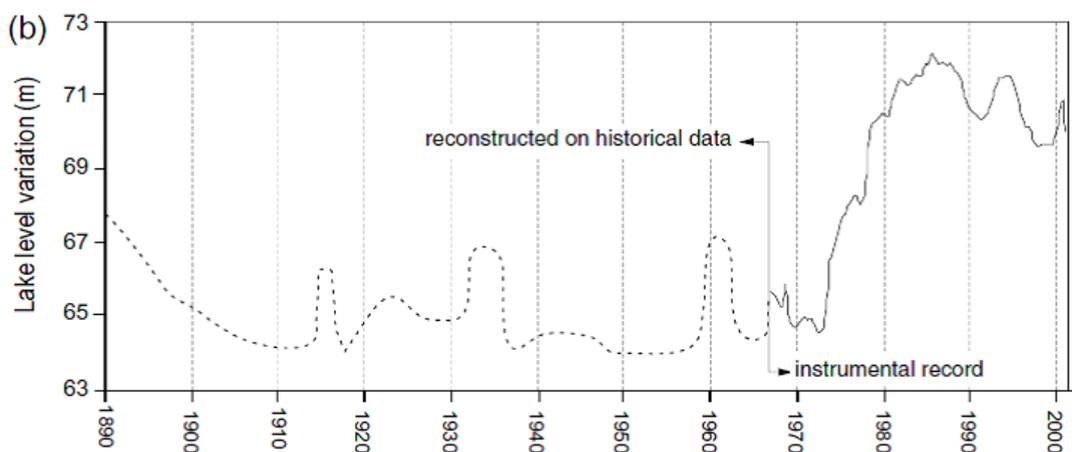
En un Informe de la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Provincia de Córdoba (SSRRHH, 2012) se presenta un análisis de los caudales del río Dulce registrados durante el último siglo. En esta serie pueden distinguirse dos periodos (**Figura 4**). El primero desde 1926 hasta 1972 con un valor de caudal medio anual de 83 m<sup>3</sup>/s y otro desde 1972 hasta 2010 con un valor de caudal medio anual de 139 m<sup>3</sup>/s. En el primer periodo las sequías se caracterizan por su gran extensión temporal y magnitud, mientras que en el segundo periodo son de corta duración. El estudio de los periodos de sequía en las cuencas de los ríos Suquia, Xanaes y Dulce, presentado en Díaz (2013) permitió identificar una fuerte dependencia temporal entre las mismas.

Como se señaló anteriormente, estos ríos son los principales tributarios de la Laguna Mar Chiquita, por lo tanto el período de excesos se corresponde con un marcado aumento del nivel de la Laguna a partir de la década del '70. A una escala regional y a partir de comparaciones con los datos obtenidos de la Cuenca del Plata, se ha sugerido que el aumento de los niveles de la Laguna podría atribuirse a un aumento de las precipitaciones y de la descarga de los ríos afluentes (Piovanotto *et al.*, 2002). Este aumento de nivel ha sido sostenido hasta el año 2003, a partir del cual se observa que el nivel de la Laguna decrece anualmente (Fuente propia).



**Figura 4.** Aportes hídricos del río Dulce para períodos hidrológicos 1926-27 a 2010-11. Fuente: SSRRHH, 2012.

Además, con base en datos indirectos de sedimentos lacustres, las variaciones de la Laguna han sido reconstruidas durante los últimos 230 años (Piovano *et al.*, 2002) (**Figura 5**). Aquí se muestra que la Laguna se caracteriza por condiciones secas dominantes hasta el inicio del último cuarto del siglo 20, con un aumento del nivel desde principios de 1970, el más importante en extensión y magnitud.



**Figura 5.** Curva de variación del nivel del lago modificada y corregida. Fuente: Piovano *et al.* (2002).

En esta **Figura 5**, el intervalo de 1890 a 1966 fue reconstruido a partir de datos históricos (registros instrumentales durante niveles bajos desde 1967 hasta 1975 se han corregido a posteriori por Hillman (2003)).

Las técnicas del balance hídrico son un medio para solucionar importantes problemas hidrológicos teóricos y prácticos. A partir de un estudio del balance hídrico es posible plantear

una evaluación cuantitativa de los recursos de agua y sus modificaciones por influencia de las actividades del hombre.

La ecuación dinámica de balance hídrico que puede aplicarse a una laguna presenta la siguiente forma:

$$\Delta V/\Delta T = (Q_i - Q_s) + A_L (P - E) + (G_i - G_s) \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde  $\Delta V$  es la variación de volumen de la laguna (L),  $\Delta T$  es el intervalo de tiempo,  $Q_i$  son los caudales de entrada aportados por los tributarios al sistema, y  $Q_s$  los caudales de salida,  $A_L$  es el área de la laguna,  $P$  la precipitación media areal sobre la laguna,  $E$  es evaporación, y  $G_i$  y  $G_s$  son los aportes y salidas de agua subterránea.

El sistema en estudio formado por la Laguna Mar Chiquita es endorreico, por lo tanto la variable de caudal de salida superficial es nula ( $Q_s = 0$ ). Además en Piovano *et al.* (2010) el estudio de un balance de cloruros indicó que el lago está hidrológicamente cerrado sin salida de agua subterránea significativa, por lo tanto la salida subterránea también se puede considerar nula ( $G_s = 0$ ) resultando:

$$\Delta V/\Delta T = (Q_i) + A_L (P - E) + G_i \quad (\text{Ec. 2})$$

Finalmente, el conocimiento del balance hídrico permite una evaluación indirecta de cualquier componente desconocido dentro de este, por diferencia entre los componentes conocidos. En este sentido, las variables a la derecha de la (Ec. 2) presentan ciertas dificultades en su definición, ya que existen incertidumbres en la medición de sus componentes, principalmente los del agua subterránea ( $G_i$ ) y el caudal que ingresa al cuerpo de agua ( $Q_i$ ) luego de escurrir por los Bañados del río Dulce y las derivaciones por canales de riego no relevados en su totalidad. En este trabajo, se presentan los avances en las definiciones de las relaciones del Área y Volumen en función del nivel de agua.

Se destaca que, en el marco de dos Prácticas Supervisadas que se encuentran en desarrollo, se realizan los estudios de los caudales que ingresan a la Provincia de Córdoba y de las variables meteorológicas asociadas al balance vertical del sistema (P-E). En cuanto a la variable del agua subterránea ( $G_i$ ) que ingresa a la Laguna Mar Chiquita, se considera que es un término presente en la llanura que rodea el lago, ya que la capa freática se encuentra a pocos metros bajo la superficie del suelo. Sin embargo, no hay monitoreo piezométrico disponible para la región que permita la cuantificación de los aportes de las aguas subterráneas a esta laguna, por lo que es necesario plantear su estudio y cuantificación.

## 7. REVISIÓN DE ANTECEDENTES

### a. ANTECEDENTES DE NIVELES Y BATIMÉTRICOS DE LA LAGUNA MAR CHIQUITA

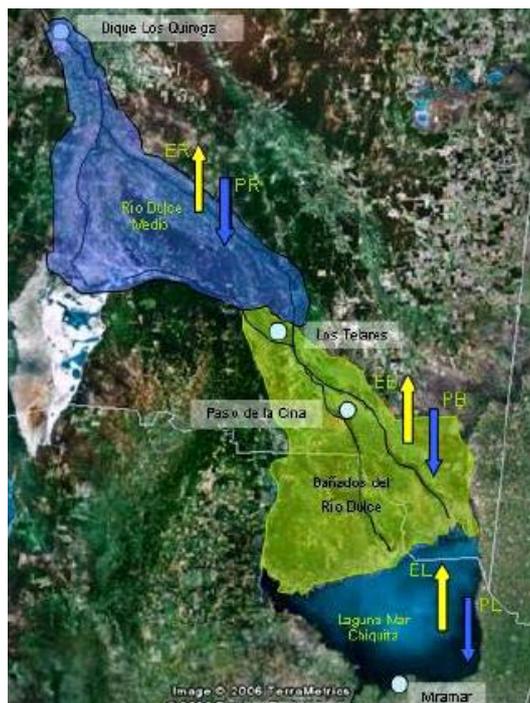
Se realizó una revisión de las series de niveles de agua medidos en la costa sur de la Laguna Mar Chiquita, presentas en Hillman(2003), en LH-UNC (2011), y niveles históricos estimados en Piovano *et al.* (2002)

Con relación a los datos batimétricos del cuerpo de agua de la Laguna Mar Chiquita, se contó con mapeos presentados en Hillman(1999), Pagot(2003), Pozzi(2006) y LH-UNC (2011). En los tres antecedentes citados, se analizaron imágenes satelitales de la serie Landsat. En el último antecedentes mencionado, se utilizaron datos de la misión SRTM (USGS, 2004) para cubrir curvas de nivel con cota superior a 72 m s.n.m.

### b. ANTECEDENTES CON RELACIÓN AL ESTUDIO DEL SISTEMA BAÑADOS DEL RÍO DULCE

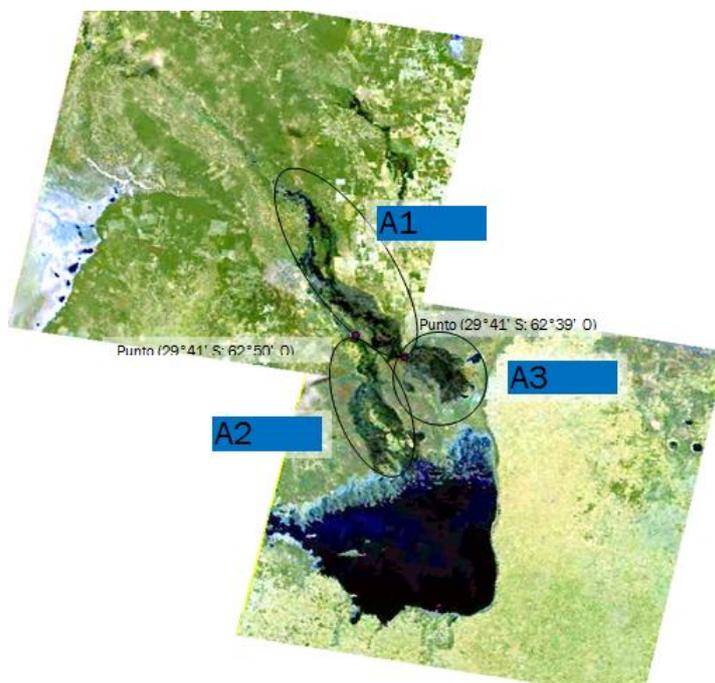
En Pagot (2003) se realiza el análisis y simulación hidrológica del sistema formado por los Bañados del río Dulce. En este contexto de midió el área de Bañados en el período 1997 - 2001. Los límites superior e inferior fijados para el sistema fueron: una línea horizontal que cruza el río Dulce en Los Telares como límite superior, y la desembocadura de los diversos brazos en que se divide el río Dulce como límite inferior (ver **Figura 6**).

En LH-UNC (2007) se presenta una actualización de las áreas medidas hasta 2005.



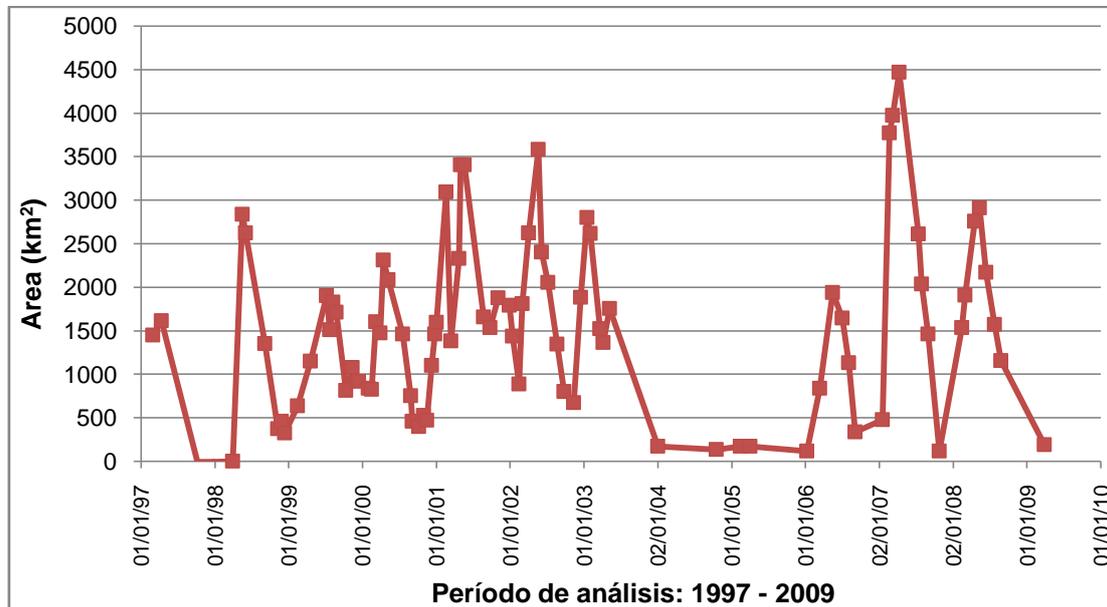
**Figura 6.** Subregiones definidas: 1) Río Dulce Medio (azul), 2) Bañados del Río Dulce (verde) y 3) Laguna Mar Chiquita. Fuente: Pagot, 2003.

En el trabajo de Mery (2010) se midieron las áreas durante el período 2006 - 2009. Se diferenciaron 3 zonas de Bañados: Bañado Norte (A1), Sur (A2) y Este (A3); separándolos por puntos de coordenadas conocidas, que surgieron de la identificación de puntos críticos del río Dulce (o secciones de desborde) con coordenadas conocidas (ver **Figura 7**).



**Figura 7.** División de los Bañados en 3 áreas. Fuente: Mery, 2010.

Se considera que la diferencia en la delimitación del sistema en los estudios anteriores no es relevante con respecto a la magnitud de la medida del área. Por lo tanto, se presenta la variación del área de Bañados en función del tiempo cubriendo el periodo 1997-2009 (**Figura 8**).



**Figura 8.** Áreas de Bañados medidas. Período: 1997-2009. Fuente: Mery, 2010.

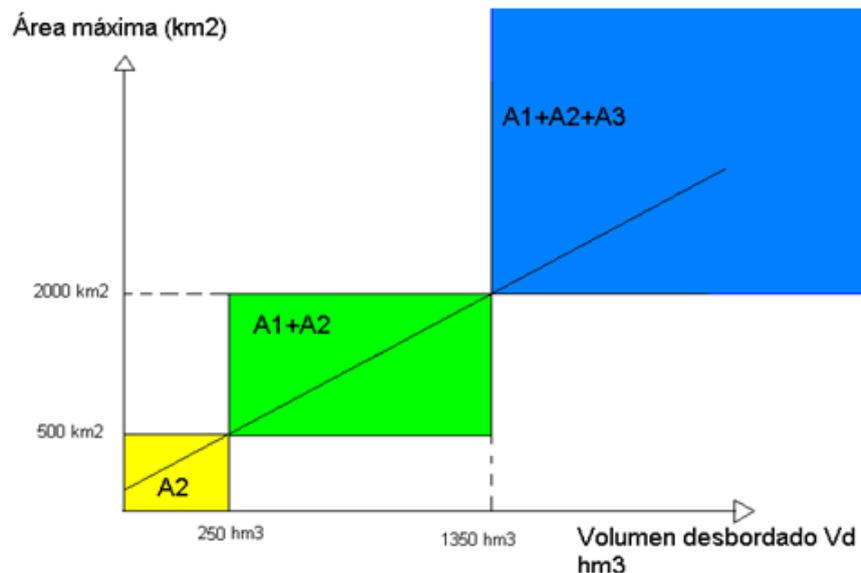
En Pagot (2003) se determinó que las variables más influyentes sobre las áreas de Bañados son: las descargas del río Dulce (medidas como caudales erogados por el embalse Río Hondo) y los niveles de la Laguna Mar Chiquita. La relación con la primera variable se expresó a través del concepto de *caudal de desborde*, o excedente de la capacidad de conducción del cauce principal, y es aquel a partir del cual los Bañados comienzan a crecer. Entonces los *volúmenes desbordados* surgieron como la diferencia entre caudales erogados por Río Hondo y el caudal de desborde.

La relación del área de Bañados con los niveles de la Laguna se basó en un concepto básico de la hidráulica de flujo a superficie libre debido a que con muy bajas pendientes, cualquier obstáculo en la corriente genera una sobre elevación del nivel de agua que se extiende a grandes distancias aguas arriba (curva de remanso), PERD (1983).

En Mery (2010) se determinó la función que relaciona área de Bañados con volúmenes desbordados (**Ec. 3**), y se la relacionó con la activación de las distintas zonas de Bañados citadas anteriormente. En la **Figura 9** se presenta la relación numérica entre las áreas medidas y los volúmenes desbordados estimados.

$$\text{Área máxima (km}^2\text{)} = 1,38 \times \text{Volumen desbordado (hm}^3\text{)} + 137,7 \quad (\text{Ec. 3})$$

El término independiente equivalente a 137,7 km<sup>2</sup> corresponde al área persistente de Bañados.



**Figura 9.** Escenarios posibles con valores de volumen desbordado y área de los Bañados del río Dulce. Fuente: Mery (2010).

Se definieron los escenarios de formación de los Bañados sobre un año hídrico son:

- **Bañados chicos:** Para una cantidad desbordada de  $250 \text{ hm}^3$ , el área de los Bañados no superara los  $500 \text{ km}^2$ .
- **Bañados medios:** Corresponde a los años donde la cantidad de agua desbordada es suficiente para formar los Bañados Norte y Sur, pero no para activar el Bañado Este. El volumen desbordado mínimo para activar este escenario es de  $250 \text{ hm}^3$ .
- **Bañados grandes:** Se da en los años donde el volumen desbordado supera  $1350 \text{ hm}^3$ , por lo que se activa también el Bañado Este. El área total de los Bañados crece hasta los  $3000 \text{ km}^2$ .
- **Bañado excepcional:** Corresponde a los años donde el volumen desbordado es muy alto. El periodo de desborde sigue aún cuando el Bañado Este empieza a crecer, y dura como mínimo 2 a 3 meses seguidos. El área total de los Bañados puede llegar hasta  $5000 \text{ km}^2$ .

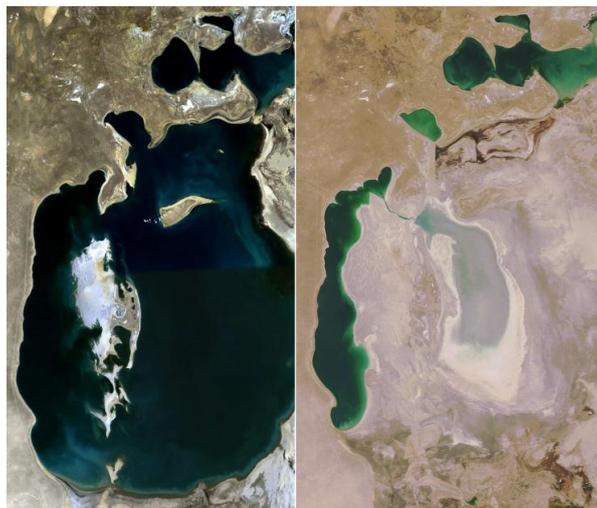
Finalmente en lo que respecta a la dinámica Bañados - Laguna, se estimó que el efecto retardador de los Bañados en el escurrimiento del agua que ingresa a la Laguna, es de 4 semanas aproximadamente (SSRRHH, 2007).

### C. ANTECEDENTES CON RELACIÓN A OTROS LUGARES CON DINÁMICA SIMILAR

#### I. MAR DE ARAL

Hace varias décadas el mar de Aral del Asia Central era el cuarto lago más grande del mundo. Alimentado por dos ríos importantes -el Amu Darya en el sur y el SyrDarya en el norte- abarcó una superficie de 66 mil km<sup>2</sup>, con un volumen de más de 1000 km<sup>3</sup>. La pesca comercial era ampliamente practicada, y los deltas de sus principales tributarios alojaban docenas de lagos menores y pantanos con gran variedad biológica, así como una superficie de 550 mil Ha. de tierras húmedas.

Desde 1960, el fomento del riego en la parte soviética de la cuenca del mar de Aral fue espectacular. Además la población local aumentó de 14 millones a cerca de 27 millones en 30 años. Por estos motivos el total de agua extraída casi se duplicó. A su vez se explotaron en exceso diversos tributarios menores de los ríos Amu Darya y SyrDarya.



**Figura 10.** Mar de Aral de 1989 y 2008. Fuente: <http://es.wikipedia.org/>

La consecuencia fue una "alteración del balance hídrico predominante" en la cuenca del Aral. La baja eficiencia del riego -por falta de recubrimiento de los canales y deficientes sistemas de drenaje- produjo graves inundaciones y salinidad de los suelos. El exceso de aplicación de plaguicidas y fertilizantes contaminó las aguas superficiales y los mantos freáticos, y los ecosistemas de los deltas murieron.

De 1960 a 1990 el Mar de Aral disminuyó su nivel de 53 a 36 m s.n.m., su superficie se redujo la mitad y su volumen tres cuartas partes. El contenido mineral de las aguas se cuadruplicó, lo que impidió la supervivencia de la mayor parte de las variedades de peces y fauna silvestre locales. Esto imposibilitó la pesca comercial, sumado el hecho de que las antiguas aldeas y poblaciones ribereñas quedaron lejanas a las orillas del lago. En 1990 más del 95% de los pantanos y tierras húmedas se habían convertido en desiertos, y más de 50 lagos de los deltas, con una superficie de 60 mil Ha, se habían secado. Así, el lago quedó dividido en tres secciones: el mar Menor o del Norte en Kazajstán, el mar Central y el Occidental, situados casi por completo en Uzbekistán.

La parte del lecho del lago que quedó descubierta está compuesta de vastos trechos de sal, y el viento se lleva una gran cantidad de esa arena y polvo, contaminados de plaguicidas, a grandes distancias. Por otro lado, la disminución de la superficie del mar de Aral modificó el

clima circundante, con veranos más breves y calientes, sin lluvia, e inviernos más prolongados, más fríos y sin nieve. Otra grave problemática desencadenada fueron los problemas de salud de las comunidades cercanas, debido a la salinidad y grado de contaminación del agua para beber.

Ya desde la década de 1980 las soluciones más viables se concentraron en elaborar modelos de aprovechamiento de los recursos hídricos para las cuencas de los ríos SyrDarya y Amu Darya, fijando límites a la explotación del agua. Se busca gestionar la demanda, con el propósito de reducir la explotación hídrica por hectárea y elevar la eficiencia global de la irrigación, lo que supone rehabilitar los canales y recubrirlos para reducir la filtración, y reglamentar su uso para programar mejor el riego. Así se ha avanzado mucho: la reducción total del agua en la cuenca se ha estabilizado. En algunos sectores ha podido restablecerse a la flora y la fauna silvestres, deteniendo la erosión del lecho lacustre y aumentando la pesca anual.

Los datos anteriores fueron extraídos de la Revista de la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación - Departamento de Agricultura y Protección al Consumidor), septiembre 1998.

En 2007 se construyó el dique Kokaral, que separa la parte norte del mar de Aral, de modo que se elevó el nivel del agua en ese sector y se redujeron los niveles de salinidad (Mañueco, 2008).

Por razones económicas, el mar de Aral Sur ha sido abandonado a su suerte. En las partes más profundas, las aguas más bajas tienen mayor concentración de sal que las superficiales, conformando dos tipos de agua que no se mezclan. Por esto, sólo la parte superficial se calienta en verano, y se evapora a mayor velocidad (Jones, 2008).

El antecedente del mar de Aral es un claro ejemplo de las consecuencias graves que puede ocasionar la planificación deficiente del uso del agua sobre un sistema lacustre. Se ha estudiado como antecedente por este motivo. Aunque la variabilidad que presenta el nivel de la Laguna Mar Chiquita tiene como causa principal factores climáticos, y no el mal manejo de recursos hídricos, es importante entender las virtudes de un buen manejo hídrico.

---

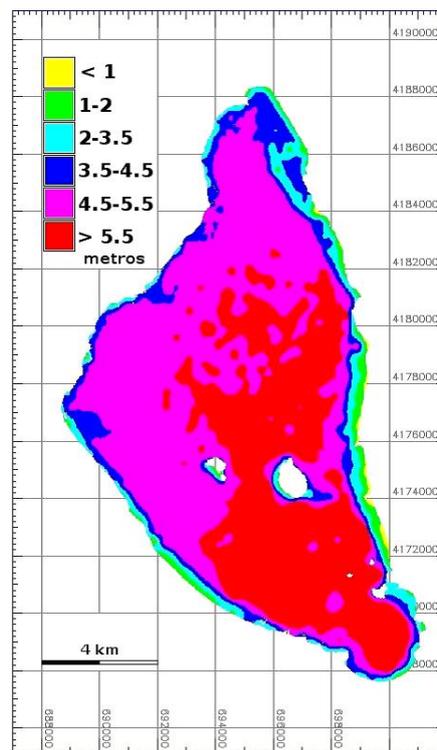
## II. MAR MENOR

El Mar Menor es la laguna salada más grande de Europa. Es una laguna litoral situada al Este de la Región de Murcia. De forma semicircular, tiene una longitud de 21 km por una anchura de 10 km y una profundidad máxima cercana a los 7 m; y ocupa una extensión de alrededor de 180 km<sup>2</sup> con un perímetro litoral de unos 73 km de costa.

En el informe de Castejón y González (2009), se determinó la utilidad de las imágenes LANDSAT 7 para la determinación de la profundidad de la lámina de agua en la laguna. A su vez se comprobó la validez del Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI) en la elaboración de un mapa batimétrico del Mar Menor.

Se utilizaron imágenes LANDSAT 7 con una resolución espacial de 30 metros. Estas se analizaron mediante la aplicación del método del Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI), que hace uso de los canales espectrales del verde e infrarrojo cercano. La utilización en el índice de estos rangos del espectro se basa en maximizar las características espectrales típicas del agua en la longitud de onda del verde y minimizar la baja reflectancia que presenta el agua en el infrarrojo cercano.

El mapa resultante de la aplicación de la metodología planteada se compara y relaciona con información batimétrica de la zona de estudio para la determinación de los rangos de profundidad. Los resultados obtenidos respaldan la metodología aplicada para la elaboración del mapa batimétrico de la zona en estudio.



**Figura 11.** Mapa batimétrico resultante del Mar Menor. Fuente: Castejón y González (2009).

Este antecedente indica la utilidad del empleo de imágenes LANDSAT para la realización de mapas batimétricos. En el presente trabajo el análisis de las imágenes se realiza siguiendo una metodología diferente a la empleada para el Mar Menor.

## 8. METODOLOGÍA DE TRABAJO

### 1. ESQUEMA DE TRABAJO

Al comenzar el estudio, se realizó una revisión y análisis de antecedentes sobre la temática abordada, para conocer el estado del arte.

Se continuó con la recopilación de datos necesarios, los mismos fueron extraídos de diversas fuentes; y a su vez se actualizaron las series de datos con los valores obtenidos en el marco de esta investigación. Las variables actualizadas hasta el año 2014 fueron los niveles de agua medidos de la Laguna Mar Chiquita y las imágenes satelitales de la zona en estudio (Laguna y Bañados del río Dulce).

Una vez obtenidos los datos necesarios, se procedió con el análisis de los niveles de agua de la Laguna, también con el procesamiento de las imágenes satelitales. Como resultado de esta etapa se obtuvo un modelo digital topobatimétrico de la Laguna.

A partir del modelo digital generado, se estudiaron las funciones relevantes que involucran los parámetros de Nivel, Área y Volumen de la Laguna. Las relaciones planteadas fueron:  $\text{Área} = f(\text{Nivel})$ ,  $\text{Volumen} = f(\text{Área})$  y  $\text{Volumen} = f(\text{Nivel})$ .

Las imágenes satelitales de la zona de los Bañados del río Dulce también fueron analizadas y procesadas. Como resultado se midió el área de los Bañados del río Dulce, la cual fue relacionada con los volúmenes de la Laguna para un mejor entendimiento de la dinámica del sistema.

Un esquema con la metodología de trabajo antes descrita se presenta en la

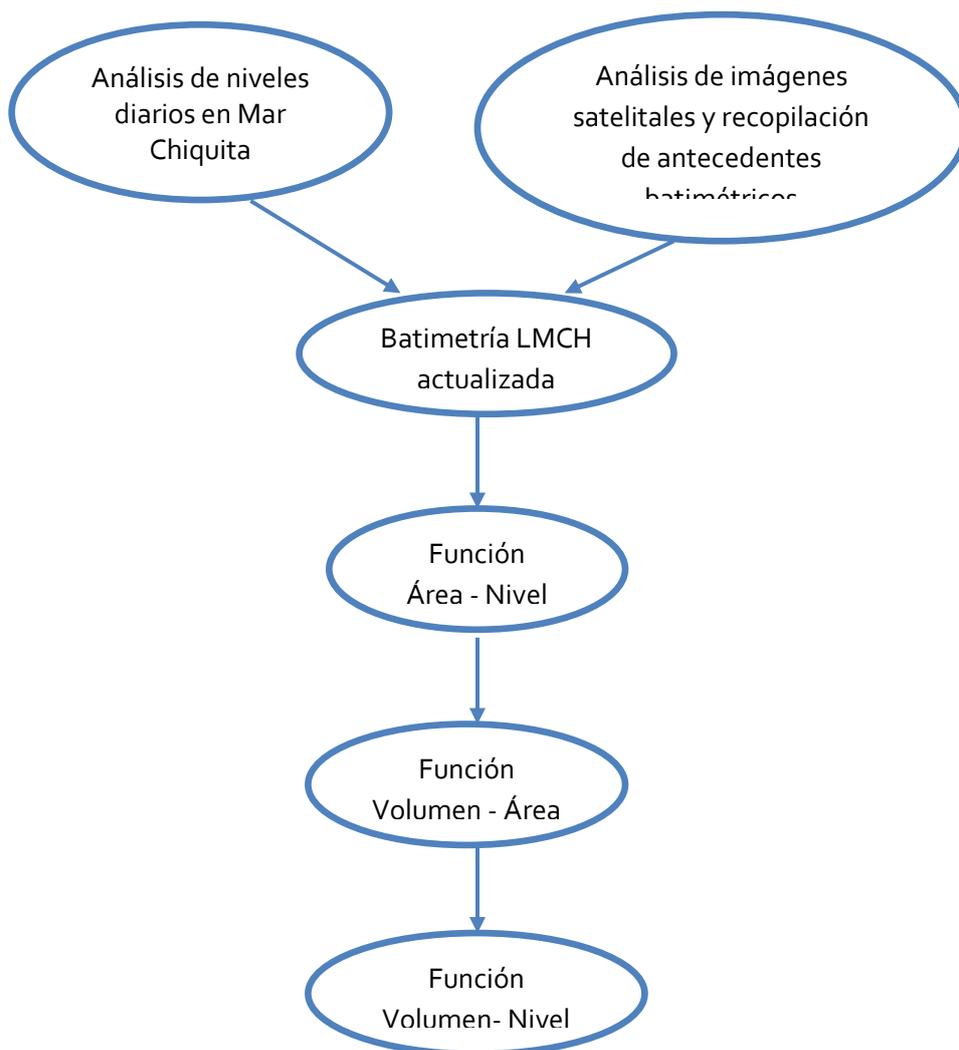


Figura 12. Esquema con la metodología de trabajo.

## 2. PROGRAMAS UTILIZADOS

### 1. ENVI

ENVI es un software para el procesamiento y análisis de imágenes geospaciales utilizado por profesionales, científicos, investigadores y analistas de imágenes de todo el mundo. Combina procesamiento de las imágenes espectrales más recientes con tecnología de análisis mediante una interfaz intuitiva y de fácil uso permitiendo obtener información significativa de las mismas.

En nuestro caso, ENVI fue utilizado con imágenes satelitales LANDSAT 8, LANDSAT 7 y LANDSAT 5 de alta resolución que fueron vectorizadas. El objetivo fue aislar la línea de contorno de agua ocupada por la Laguna Mar Chiquita.

## II. AUTOCAD Y CIVILCAD

AutoCAD es uno de los programas más utilizados por profesionales de todas las ramas de la arquitectura, ingeniería y ciencias para el diseño de objetos, dibujos y planos. También permite crear y trabajar con objetos en 3D.

CivilCAD permite procesar datos tridimensionales y generar mallas por triangulación entre nodos. Sobre el modelo digital de elevaciones generado es posible definir perfiles transversales 3D.

## 9. ACTUALIZACIÓN DE LAS SERIES DE NIVELES DE LA LAGUNA MAR CHIQUITA

### a. NIVELES DIARIOS DE LA LAGUNA MAR CHIQUITA

Durante el período de estudio, se contó con mediciones diarias de niveles de agua de la Laguna realizadas sobre escalas limnimétricas en Miramar, en la sede de la Reserva “Bañados del río Dulce y Mar de Ansenúza” por el Guardaparque Pablo Michelutti. Esta serie comprende el período 2001-2014.

Se actualizó la Base de Datos del Laboratorio de Hidráulica (de la FCEfyN, UNC), correspondiente a las variables de niveles diarios y mensuales, tomando como base aquellas series presentadas en Hillman (2003), Pozzi (2006), Cereceda (2009), LH-UNC (2012) y con actualización propia desde el año 2011.

Las mediciones de nivel se registran sobre un conjunto de 6 (seis) escalas limnimétricas, ubicadas sobre la costa sur de la Laguna Mar Chiquita, detrás del Destacamento de la Reserva Natural en Miramar.

Los valores asociados a los ceros de cada escala resultaron los presentados en la **Tabla 1**, donde además se indica la ubicación de cada una asociada al sistema de referencia Gauss-Kruger Posgar 94.

**Tabla 1.** Relevamiento topográfico de las escalas en la Laguna Mar Chiquita. Fuente: LH-UNC, 2012.

Escala	Gauss Kruger (Zona 4)		COTA IGM (ms.n.m.)
	N (m)	E (m)	

ESCALA C1	6579635,51	4530097,89	70,03
ESCALA C2	6579614,01	4530115,09	71,26
ESCALA C3	6579646,20	4530049,79	69,05
ESCALA C4	6579662,47	4529974,79	68,65
ESCALA C5	6579696,41	4529939,77	69,36
ESCALA C6	6579758,87	4529726,01	67,88

La **Figura 13** corresponde a una imagen satelital de la zona de la Reserva adquirida durante el año 2011. Se indican las ubicaciones en planta de las seis escalas limnimétricas colocadas estratégicamente frente a la Reserva provincial de Miramar. Actualmente los niveles se miden sobre la escala C6 (ver emplazamiento en la **Figura 14**), aunque debido al descenso del nivel se hace necesaria la pronta ubicación de una nueva escala, como se muestra en la **Figura 14**, cuya base de la escala se encuentra fuera del agua.



**Figura 13.** Ubicación en planta de las escalas limnimétricas colocadas frente al Destacamento de la Reserva de la Laguna Mar Chiquita. Imagen de Google Earth del año 2011.



Figura 14. Escala C6. Marzo de 2014.

A raíz de observar que la regla utilizada en la laguna para la medición de estos nuevos rangos de niveles bajos, se recomendó colocar una nueva escala en la misma sección para mantener los ceros asociados a la nivelación realizada en el año 2011.

En la **Figura 15** se presenta la serie actualizada de niveles diarios para el período 2001-2014.

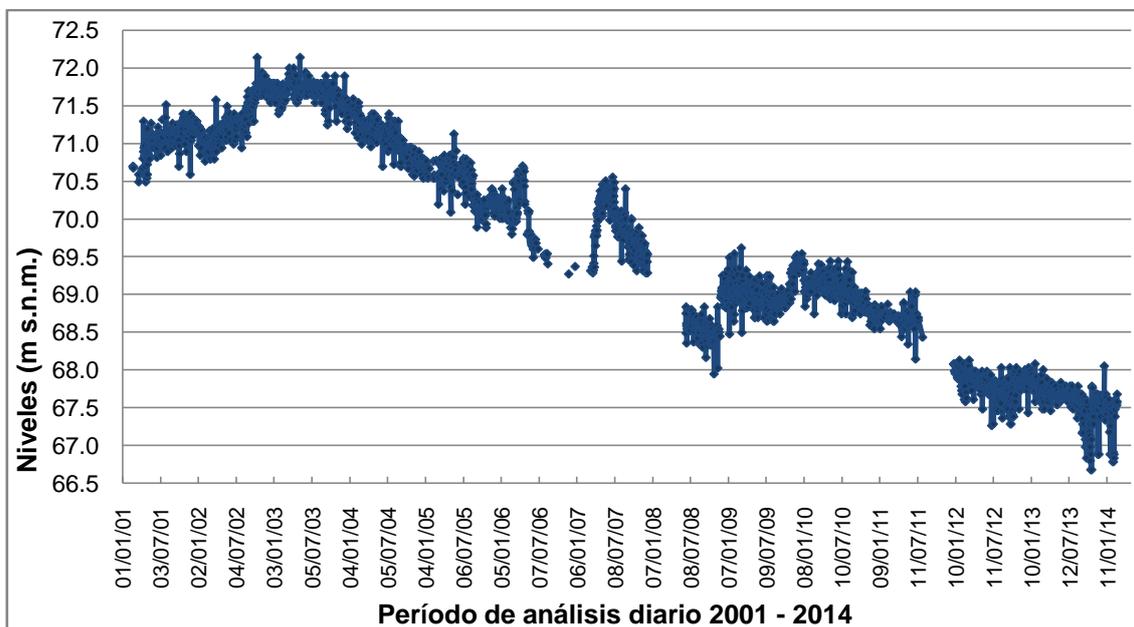
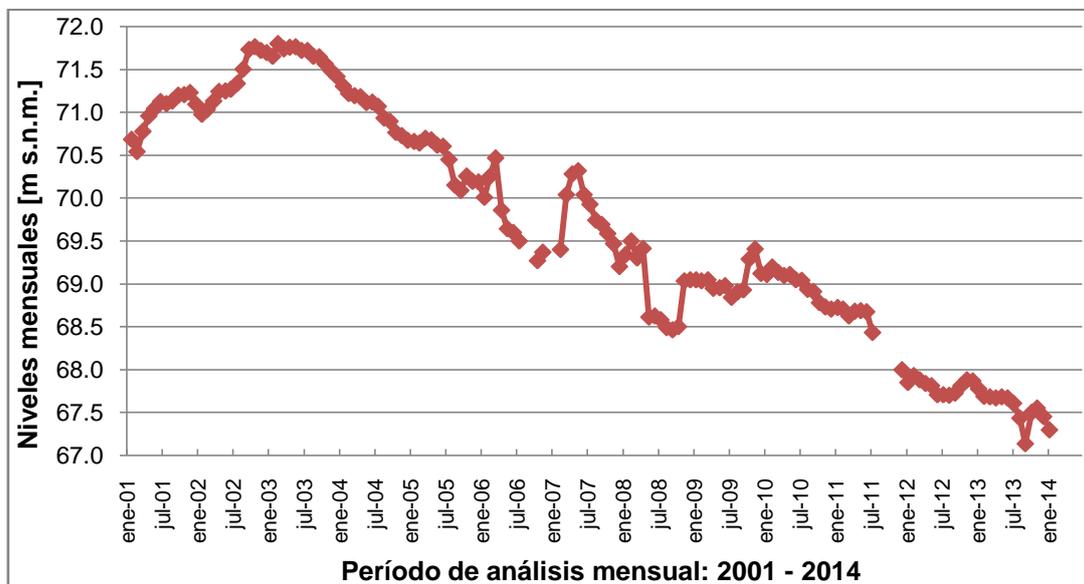


Figura 15. Niveles diarios LMCH. Período 2001-2014.

El nivel de agua se ve influenciado por la presencia de viento con direcciones predominantes norte y sur principalmente. En estos casos se genera un incremento o disminución del nivel en la costa sur de la Laguna donde se realizan las mediciones. Por esta razón se promediaron los niveles que presentaron diferencias significativas ( $\pm 0,2$  m) entre días consecutivos, según estimaciones presentadas en Pozzi (2006) y LH-UNC (2012).

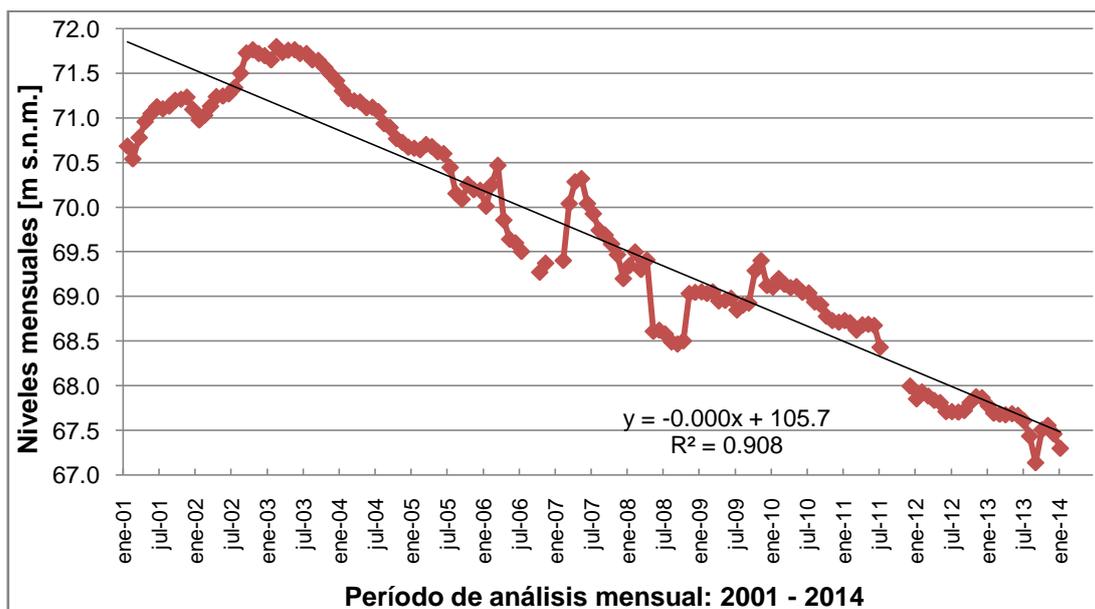
## b. NIVELES MENSUALES DE LA LAGUNA MAR CHIQUITA

La serie de niveles mensuales para el período de estudio se presenta en la **Figura 16**.



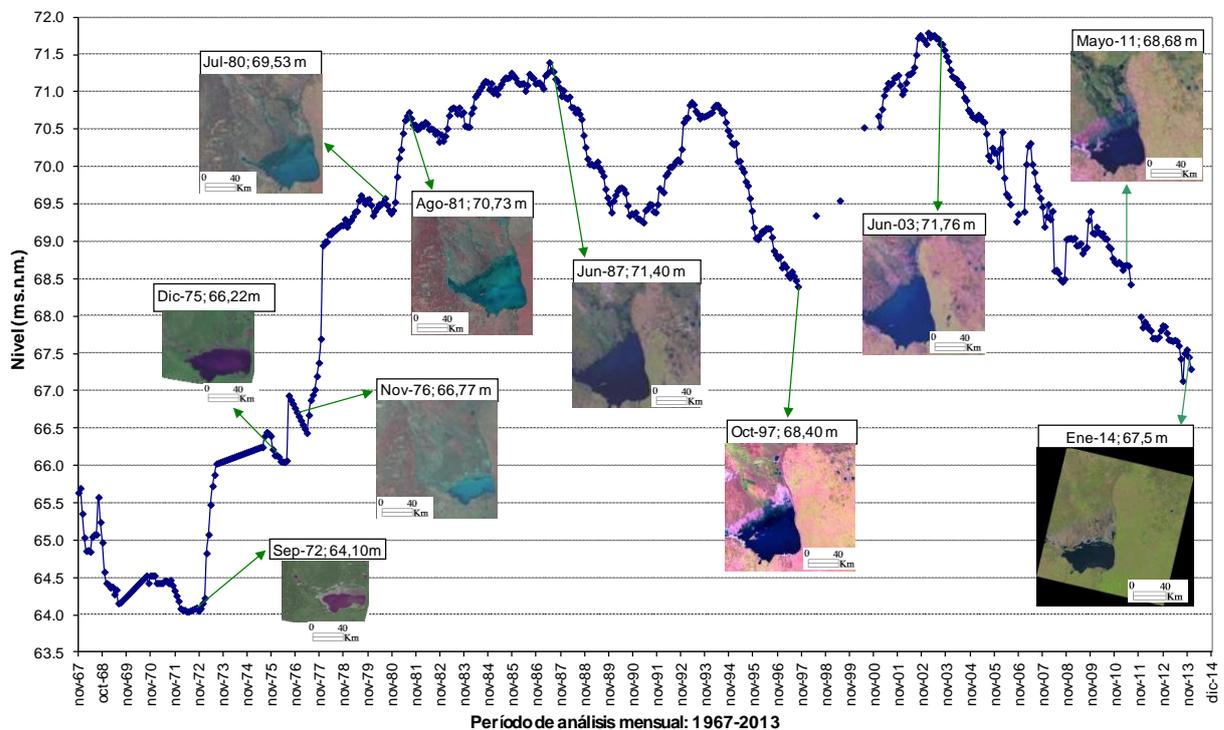
**Figura 16.** Niveles mensuales LMCH. Período 2001-2014.

Se observa que durante el año 2003 se alcanzan los máximos niveles de agua de la Laguna, y a partir de allí comienzan a descender. La curva de descenso presenta una marcada variación durante el intervalo comprendido entre los años 2006 y 2008. Como vemos en la **Figura 17**, la pendiente de la curva que desciende es sostenida hasta la actualidad.



**Figura 17.** Niveles mensuales LMCH con línea de tendencia. Período 2001-2014.

Con estos datos fue actualizada la serie definitiva de niveles mensuales del período 1967-2014, mostrada en la **Figura 18**.



**Figura 18.** Niveles mensuales LMCH. Período 1967-2014.

En la figura precedente, se observa el marcado ascenso de niveles de agua a partir de la década '70, alcanzando los mayores niveles a mediados de la década de los '80 y luego también durante el año 2003. Se destacan los tres ciclos definidos desde la década del 80, con picos entre los años 1982, 1993 y 2003. El periodo de descensos luego de cada ciclo, presentasimilar pendiente descendiendo medio metro por año en promedio.

En la actualidad, los niveles son similares a los que presentaba la Laguna a finesdel año 1977, contando con un nivel decreciente desde el año 2003.

## 10. ACTUALIZACIÓN DE LA SERIE DE IMÁGENES SATELITALES

### a. OBTENCIÓN Y SELECCIÓN DE IMÁGENES SATELITALES DE LA LAGUNA MAR CHIQUITA

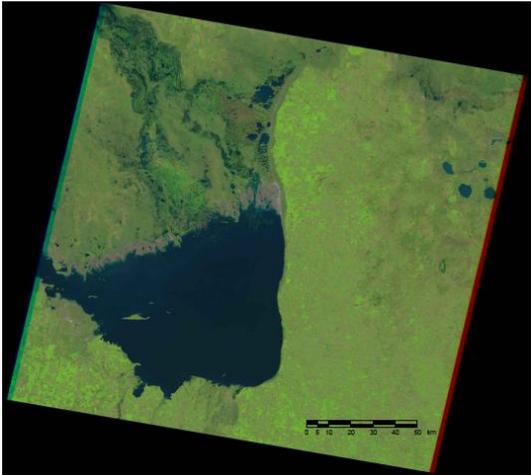
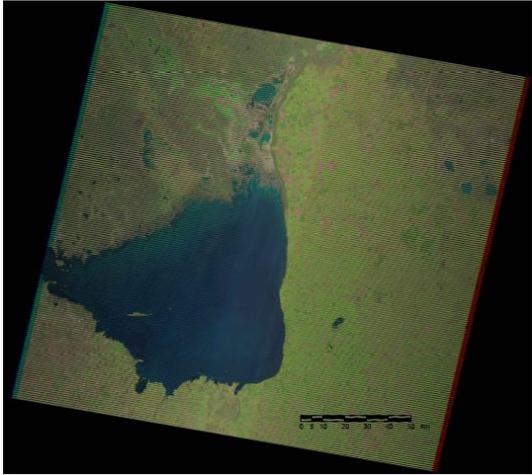
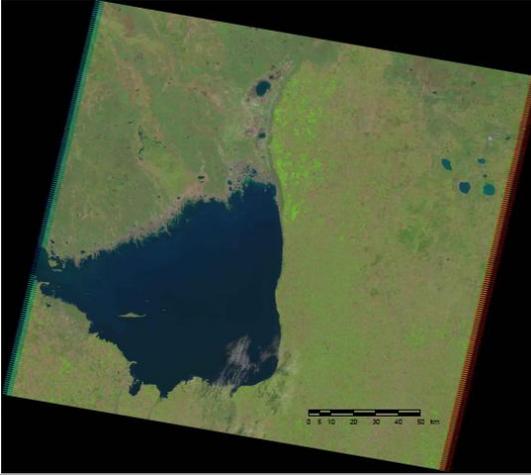
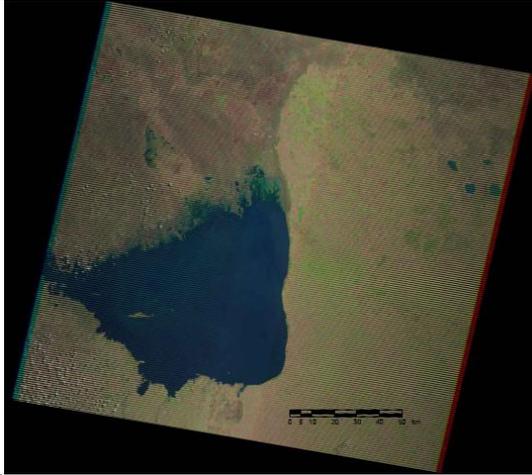
En este trabajo se procesaron 25 imágenes de alta resolución disponibles en la página del U.S. Geological Survey (USGS): [www.glovis.usgs.gov](http://www.glovis.usgs.gov). Éstas tienen formato *tiff*, con resolución

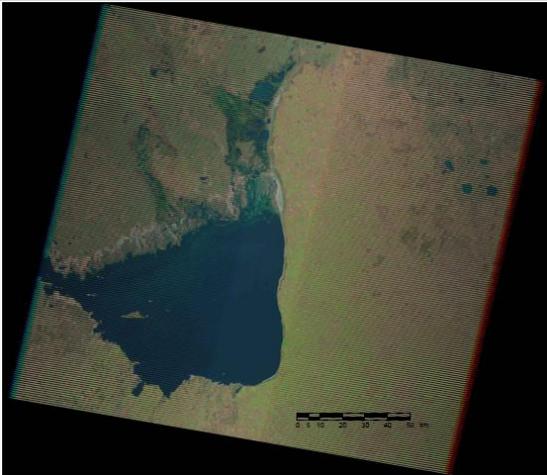
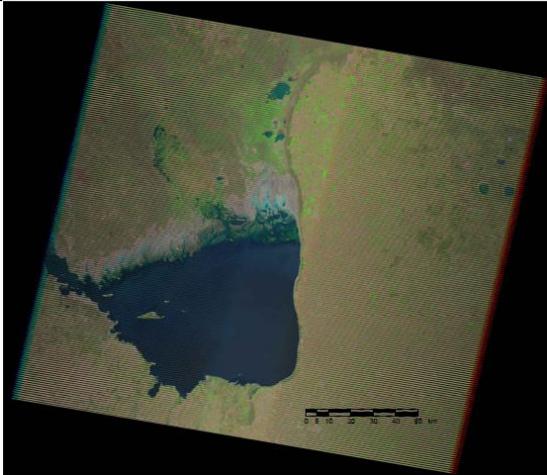
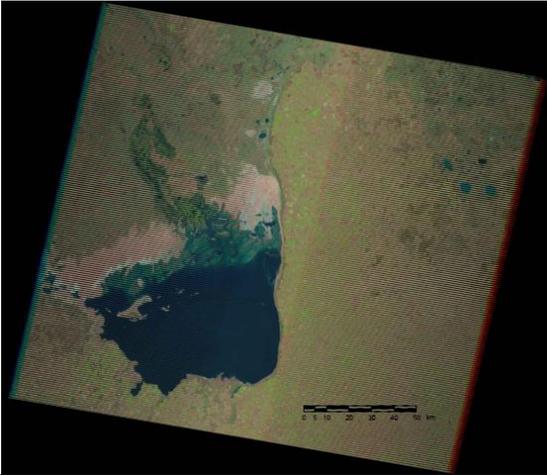
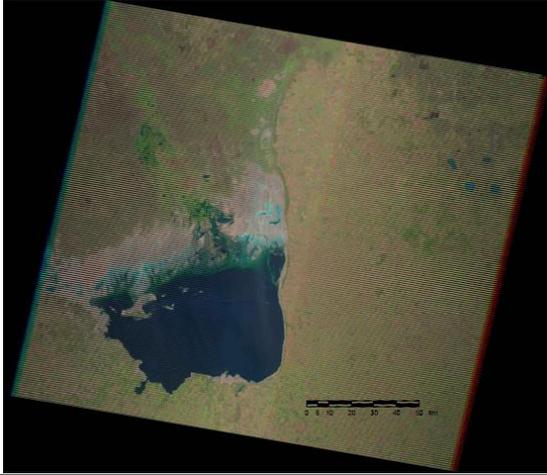
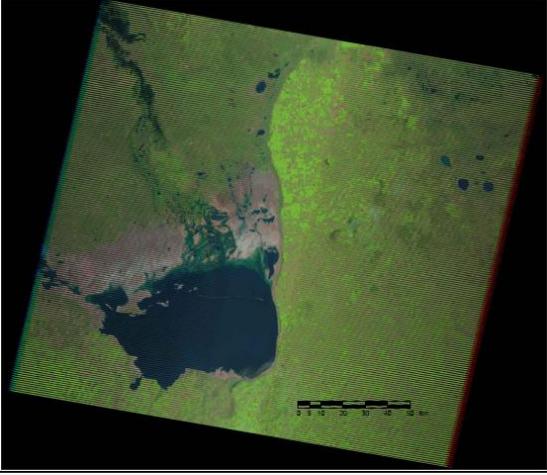
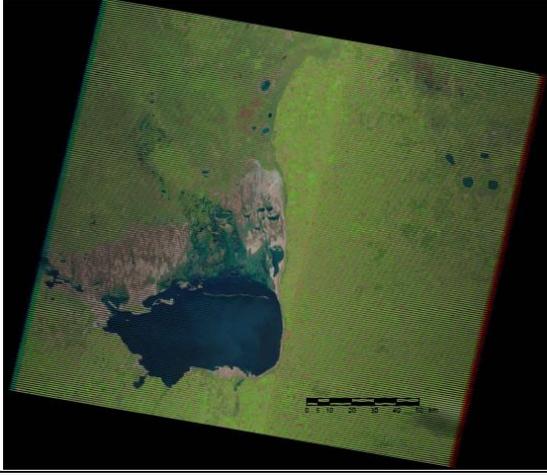
espacial de 30 m x 30 m (tamaño de pixel), y abarcan una superficie de aproximadamente 180 km x 180 km (tamaño por escena).

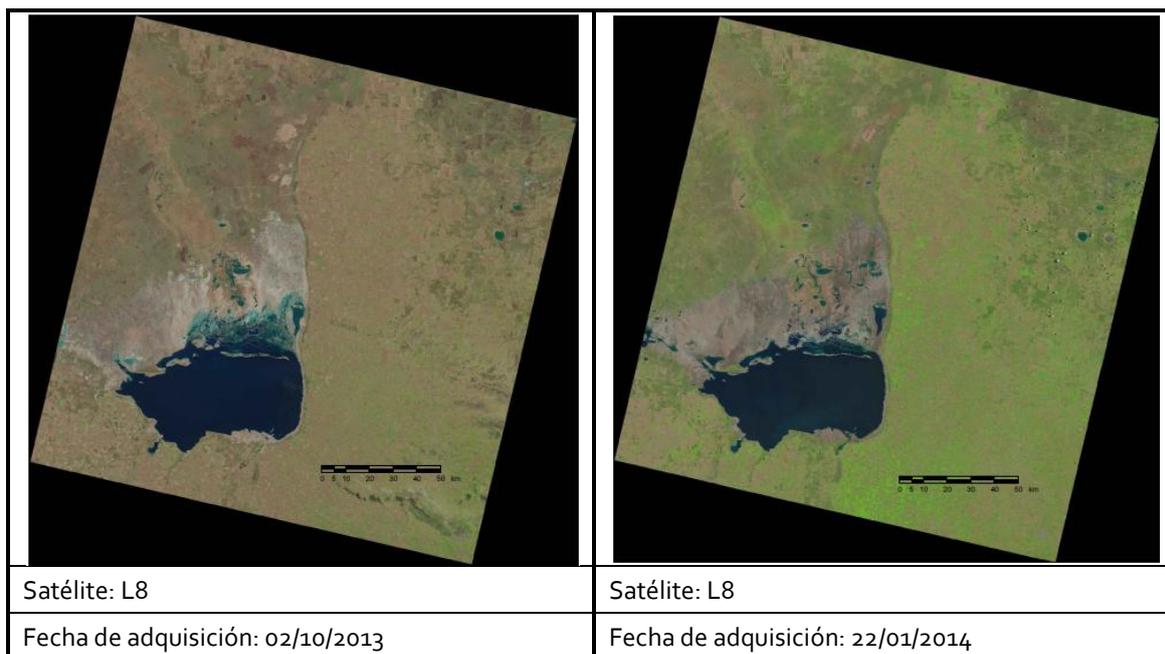
Las imágenes fueron adquiridas por los satélites de la serie LANDSAT (5, 7 y 8). La resolución temporal o intervalo entre dos tomas consecutivas de cada satélite es de 16 días, y de 8 días entre los mismos. Sin embargo la cantidad de imágenes utilizables se reduce, respecto de las disponibles, por la presencia de nubes sobre el espejo de agua, ya que se tratan de satélites ópticos (que reciben las respuestas de cada objeto iluminado por el sol). La disponibilidad de imágenes fue limitada debido a que el satélite LANDSAT 5 dejó de adquirir imágenes a mediados de Noviembre de 2011; y el satélite LANDSAT 7 comenzó a tener dificultades en el año 2008. El satélite LANDSAT 8 comenzó a obtener imágenes durante abril de 2013.

En la **Tabla 2** se presentan 12 de las imágenes analizadas en este estudio utilizadas para generar el modelo digital topobatimétrico; mientras que en la **Tabla 3** se presentan las demás imágenes analizadas. Se indica para cada escena el satélite por el cual fue capturada, y su fecha de adquisición.

**Tabla 2.** Imágenes satelitales LMCH utilizadas para batimetría. Fuente: USGS.

	
Satélite: L5	Satélite: L7
Fecha de adquisición: 19/02/2001	Fecha de adquisición: 15/10/2003
	

Satélite: L5	Satélite: L7
Fecha de adquisición: 27/01/2004	Fecha de adquisición: 17/10/2004
	
Satélite: L7	Satélite: L7
Fecha de adquisición: 23/08/2007	Fecha de adquisición: 13/12/2007
	
Satélite: L7	Satélite: L7
Fecha de adquisición: 15/08/2010	Fecha de adquisición: 13/11/2010
	
Satélite: L7	Satélite: L7
Fecha de adquisición: 11/03/2011	Fecha de adquisición: 29/03/2012

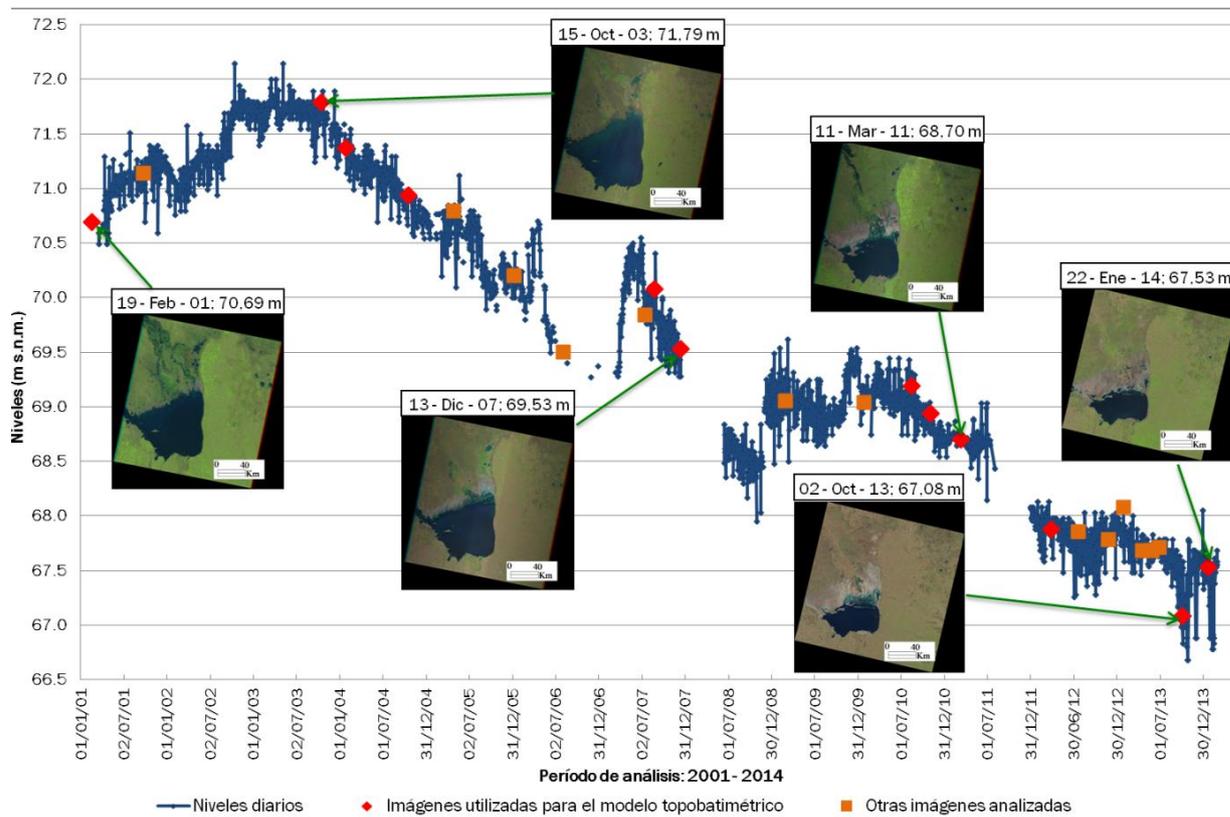


**Tabla 3.** Otras imágenes satelitales analizadas de la Laguna Mar Chiquita. (Descargadas de la página web del USGS).

Fecha de adquisición	Satélite
23/09/2001	L7
27/04/2005	L7
08/01/2006	L7
04/08/2006	L7
14/07/2007	L5
27/02/2009	L5
27/01/2010	L5
27/01/2013	L7
19/07/2012	L7
24/11/2012	L7
17/04/2013	L7
27/05/2013	L8
28/06/2013	L8

Las 25 imágenes satelitales analizadas se seleccionaron con el criterio que cubran los distintos estados de la Laguna durante el período de estudio: Laguna alta, baja y estados intermedios. Luego se seleccionaron 12 imágenes satelitales para realizar el modelo topobatimétrico, considerando que la variación entre niveles de agua ( $\Delta N$ ) no sea demasiado pequeña, ya que los contornos de agua serían muy similares.

En la **Figura 19** se indican los días correspondientes a las imágenes satelitales sobre la curva de niveles diarios actualizados, con algunas imágenes a modo ilustrativo. Se diferencia entre las imágenes utilizadas para el modelo topobatimétrico (**Tabla 2**), y las imágenes que se analizaron, pero se descartaron para la realización del modelo (**Tabla 3**).



**Figura 19.** Imágenes satelitales procesadas y serie de niveles diarios de la Laguna Mar Chiquita.

## b. ANTECEDENTES DE BATIMÉTRICOS DE LA LAGUNA MAR CHIQUITA

La información batimétrica utilizada proviene de las siguientes fuentes:

- Batimetrías utilizadas en modelaciones previas: UNC (1998), Hillman (2003) y Pozzi (2006).
- Cartas con relevamientos batimétricos de la zona relevados por el Centro de la Región Semi árida (CIRSA) del año 1979, presentado en Hillman (1999).

Para completar la batimetría se utilizaron los contornos de la Laguna correspondientes a niveles menores a los alcanzados en el período analizado. Los datos utilizados se presentan en la **Tabla 4**

**Tabla 4.** Datos batimétricos utilizados. Fuente: Hillman, 1999; CIRSA, 1979.

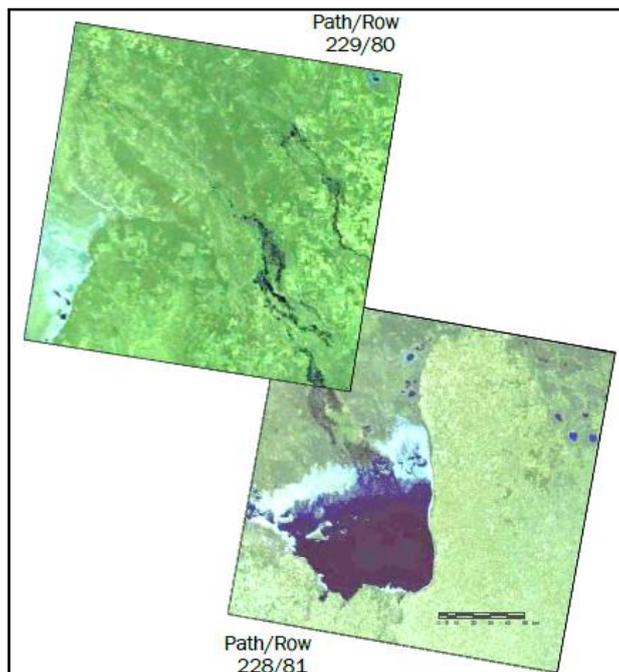
Fuente	Nivel [m]	Área [km <sup>2</sup> ]
Hillman (2003)	66.22	1786
Hillman (2003)	64.10	1101
CIRSA (1979)	62.60	378
CIRSA (1979)	62.10	55

### c. OBTENCIÓN Y SELECCIÓN DE IMÁGENES SATELITALES DE LOS BAÑADOS DEL RÍO DULCE

Se analizaron 26 imágenes satelitales de la serie LANDSAT (5 y 7), extraídas del Catálogo de Imágenes de la página web de la CONAE ([www.conae.gov.ar](http://www.conae.gov.ar)).

De las imágenes analizadas, 20 imágenes corresponden al Path/Row: 228-81, zona donde se presentan los Bañados Sur (A2) y Este (A3); y 6 imágenes corresponden al Path/Row: 229-80, zona donde se forma el Bañado Norte (A1).

A diferencia de las imágenes satelitales utilizadas para la medición del área de la Laguna, las imágenes utilizadas para medir el área de los Bañados son de baja resolución, cada píxel abarca un área de 360 m x 360 m, y cada imagen cubre un área de 180 km x 180 km aproximadamente. Se muestran dos de las imágenes analizadas en la **Figura 20**.



**Figura 20.** Mosaico de imágenes satelitales correspondientes a los días 10 y 11/05/10.

En Mery (2010) se analizaron imágenes satelitales con las mismas características detalladas en el párrafo precedente, correspondientes al período desde enero 2006 a marzo de 2009. En el presente trabajo se realizó una actualización del mencionado estudio hasta diciembre de 2013.

Se analizaron entre 375 imágenes por año, cubriendo períodos con mayor presencia de Bañados y otros períodos en los que el área de Bañados resultó inferior. En la **Tabla 5** se presentan la fecha de adquisición, el satélite que la obtuvo y el Path/Row de cada imagen analizada.

**Tabla 5.** Imágenes analizadas de los Bañados. Fuente: CONAE.

Fecha de adquisición	Satélite	PathRow
05/04/09	L7	229-80
06/04/09	L7	228-81
08/05/09	L7	228-81
10/07/09	L7	229-80
11/07/09	L7	228-81
13/09/09	L7	228-81
11/02/10	L5	229-80
12/02/10	L5	228-81
10/05/10	L7	229-80
11/05/10	L7	228-81

Fecha de adquisición	Satélite	PathRow
26/10/10	L5	228-81
06/01/11	L7	228-81
14/02/11	L5	229-80
15/02/11	L5	228-81
05/05/11	L5	229-80
06/05/11	L5	228-81
11/09/11	L7	228-81
21/10/11	L7	228-81
10/02/12	L7	228-81
30/04/12	L7	228-81
19/07/12	L7	228-81
24/11/12	L7	228-81
11/01/13	L7	228-81
17/04/13	L7	228-81
04/06/13	L7	228-81
08/09/13	L7	228-81

## 11. PROCESAMIENTO DE IMÁGENES SATELITALES

Tal como se mencionó en el apartado precedente, los datos adquiridos a través de los satélites de la serie LANDSAT fueron utilizados en este estudio como una importante herramienta para monitorear los ambientes lacustres en la región de la Laguna y los Bañados.

Como se señaló anteriormente, se analizaron imágenes de alta resolución espacial (30 m de tamaño de pixel) y de baja resolución (360 m de tamaño de pixel). La relación entre ambos tipos de imágenes indica que 12 píxeles de las imágenes de alta resolución corresponde a 1 de las imágenes de baja resolución, disponibles con la misma frecuencia o resolución temporal, con un periodo de revisita de estos sensores de 16 días.

Las imágenes disponibles cubren un área de 180x175 km<sup>2</sup> aproximadamente. Las mismas se pueden identificar a través de la nomenclatura utilizada para definir el recorrido que utiliza el tipo de sensor que las captura. En este caso los satélites LANDSAT 5, 7 y 8, utilizan una cuadrícula definida por filas y columnas (Path/Row). En particular, la región en estudio se encuentra en el Path/Row: 228-081 con centro en las coordenadas: Latitud Sur: -30,18 Longitud Oeste: -62,14 para el estudio de la Laguna y los Bañados Sur y Este del río Dulce. Mientras que para el estudio del Bañado Norte se utilizaron imágenes del Path/Row: 229-080.

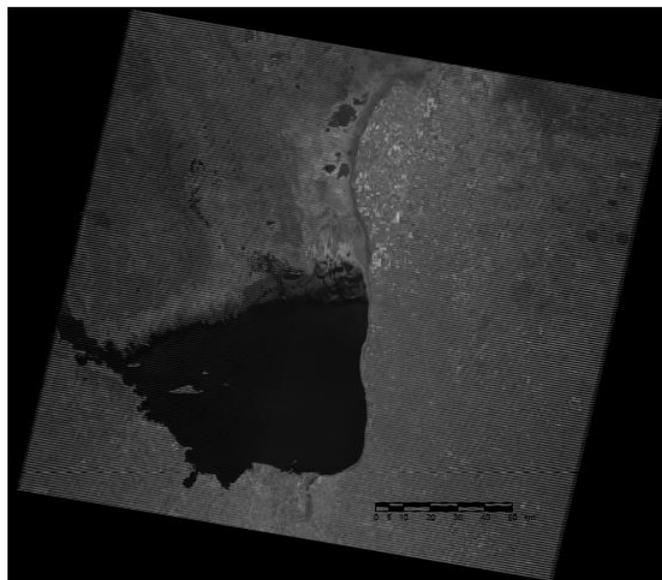
El objetivo planteado en esta etapa del estudio fue definir la banda o conjunto de bandas a combinar, que logre resaltar superficies con agua, luego extraer y medir el contorno de agua que cubre la zona de interés en cada escena analizada.

De esta manera se pudo diferenciar las superficies de agua a través del contraste entre las tonalidades de lo que correspondería a vegetación en los Bañados, islas, o tierra firme, cultivos, etc.

Como se refirió anteriormente, el procesamiento de las imágenes satelitales utilizadas en el estudio de la Laguna Mar Chiquita se realizó con el programa ENVI (ESRI, 2004).

### a. ANÁLISIS DE LAS IMÁGENES SATELITALES DE LA LAGUNA MAR CHIQUITA

Se procesaron en todos los casos las imágenes asociadas a la banda 4 del espectro electromagnético, correspondiente al infrarrojo cercano. Esta banda comprende al rango de 0,76 a 0,90  $\mu\text{m}$  para los satélites LANDSAT 5 y LANDSAT 7 y de 0,63 a 0,68  $\mu\text{m}$  para LANDSAT 8. La banda 4 es la que permite una mejor diferenciación del espejo de agua respecto de su entorno, ya que el agua presenta una firma espectral característica para el valor del espectro cercano a 0,70  $\mu\text{m}$ . Se muestra como ejemplo la **Figura 21** que corresponde a una imagen en banda 4 del día 13 de diciembre de 2007.



**Figura 21.** Banda 4 de la imagen adquirida el día 13/12/2007.

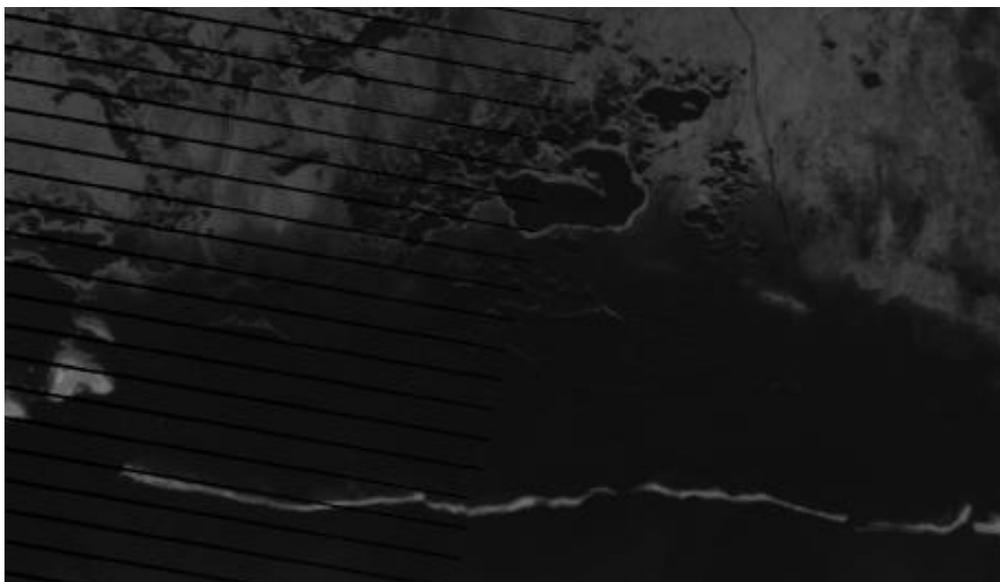
Identificando con procesamiento de imágenes el contorno de agua, se obtuvo para cada imagen una polilínea correspondiente al área de la Laguna, la cual fue luego exportada y georreferenciada en formato CAD. El contorno extraído de la imagen de la **Figura 21** se

muestra en la **Figura 22**. A partir de este contorno se midió el área de la Laguna. Este procesamiento fue aplicado a cada imagen analizada.



**Figura 22.** Contorno de la LMCH correspondiente al día 13/12/2007.

La determinación de contornos del cuerpo de agua en las escenas analizadas sobre superficies donde se registra la influencia de los Bañados del río Dulce, principalmente sobre la costa norte de la Laguna Mar Chiquita, no resultó simple debido a la presencia de pequeñas lagunas que se van activando al aumentar el nivel. Un detalle de esta zona se presenta en la **Figura 23**. Para eliminarla incertidumbre creada por este motivo se trazaron los contornos con el procedimiento descrito anteriormente y luego se redefinieron los contornos mediante un análisis digital e interpretación visual en conjunto de los contornos de los distintos niveles.



**Figura 23.** Zona norte de la Laguna. Extraída de la imagen satelital del día 29/03/12.

Como resultado de las mediciones, se presentan en la **Tabla 6** las imágenes analizadas y sus áreas medidas. También se muestra el nivel de agua medido el día en que cada imagen fue adquirida. Se destaca que la toma de cada imagen se produce en el mismo rango horario que la medición de la lectura de la escala limnimétrica, generalmente entre las 9 y 10 a.m. Por lo

que se elimina la incertidumbre que se puede producir por el desfase del efecto del viento y el nivel de agua en la costa sur.

**Tabla 6.** Áreas de la Laguna Mar Chiquita medidas con apoyo satelital. Período 2001-2014.

Fecha de adquisición	Nivel de agua [m s.n.m.]	Área medida (km <sup>2</sup> )
19/02/2001	70,69	5630 <sup>(1)</sup>
23/09/2001	71,14	6106 <sup>(1)</sup>
15/10/2003	71,79	6553 <sup>(1)</sup>
27/01/2004	71,37	6313 <sup>(1)</sup>
17/10/2004	70,94	5863 <sup>(1)</sup>
27/04/2005	70,79	5759 <sup>(1)</sup>
08/01/2006	70,20	4963 <sup>(1)</sup>
04/08/2006	69,5	5012 <sup>(1)</sup>
14/07/2007	69,84	5374 <sup>(1)</sup>
23/08/2007	70,08	5305 <sup>(1)</sup>
13/12/2007	69,53	4735 <sup>(1)</sup>
27/02/2009	69,06	3394
27/01/2010	69,04	3449
15/08/2010	69,19	3321
03/11/2010	68,94	3124
11/03/2011	68,70	3034
29/03/2012	67,88	2664
19/07/2012	67,854	2691
24/11/2012	67,78	2711
27/01/2013	68,08	2640
17/04/2013	67,68	2629
27/05/2013	67,68	2656
28/06/2013	67,71	2595
02/10/2013	67,08	2322
22/01/2014	67,53	2461

Nota: <sup>(1)</sup> Los contornos correspondientes a niveles iguales o mayores a 69,5 m s.n.m. fueron corregidos en el extremo oeste de la Laguna. Se adoptó el criterio de trazar una línea limitando los contornos al oeste de la misma, ya que las imágenes satelitales abarcaban esta zona en diferente medida.

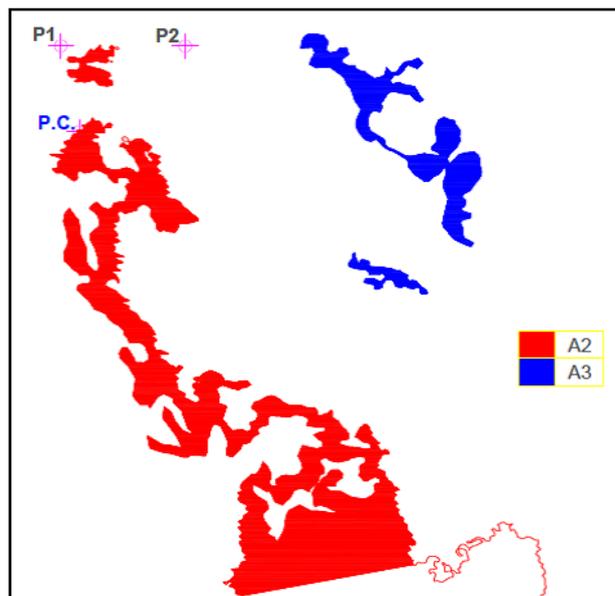
## b. ANÁLISIS DE LAS ÁREAS DE BAÑADOS

Como se mencionó anteriormente, en el caso de los Bañados, se trabajó con imágenes satelitales de baja resolución. Dependiendo del caso en estudio, se asignó a la banda verde o roja una escala de grises para vectorizar los contornos con el programa ENVI (**Figura 24**).



**Figura 24.** Banda verde en escala de grises. Imagen correspondiente al día 19/07/2012.

En AUTOCAD se procedió a georreferenciar cada imagen satelital y el contorno de los Bañados. Para esto se trabajó también en coordenadas UTM; tomando como puntos de referencia las esquinas de cada imagen satelital, cuyas coordenadas se identifican en la página de la CONAE. Entonces se escaló y referenció la imagen junto a los contornos resultantes de la clasificación. Las áreas medidas se presentan en la **Figura 25** para la fecha de adquisición del día 11 de septiembre de 2011.



**Figura 25.** Contornos de Bañados Sur y Este. Imagen correspondiente al día 11/09/11.

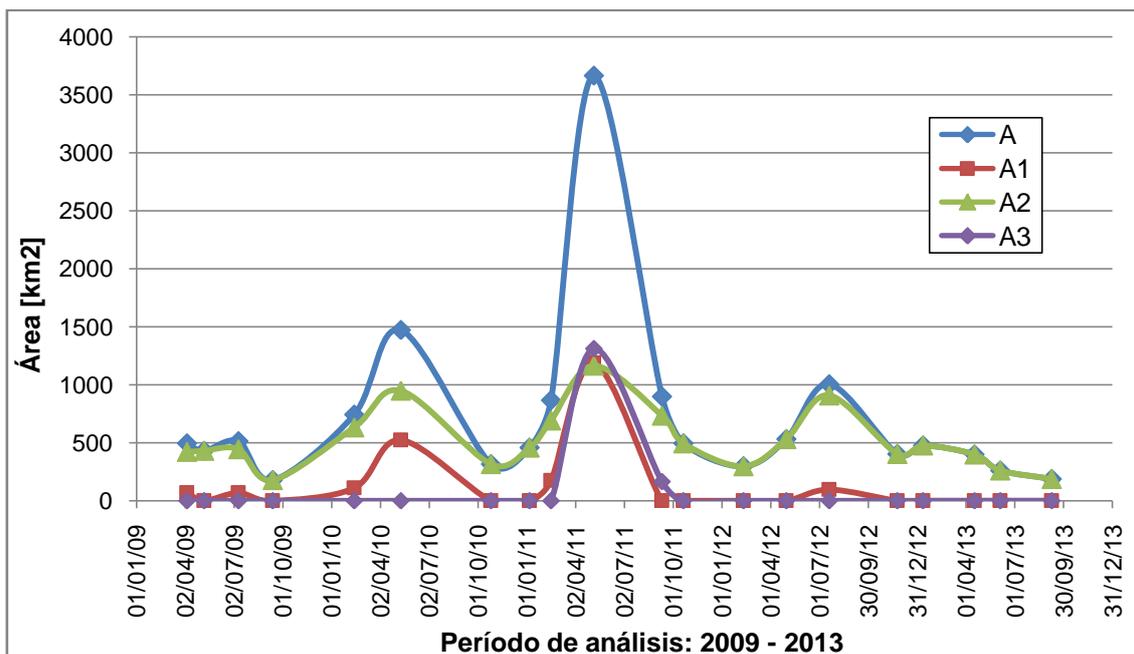
Cabe aclarar que los contornos corresponden tanto a superficies inundadas como a terrenos húmedos, ya que la humedad refleja la presencia de agua infiltrada. Es decir que un corto periodo anterior estos terrenos estuvieron inundados. Las áreas resultantes de este análisis se muestran en la **Tabla 7**. Se diferencia entre las áreas de Bañados Norte (A1), Sur (A2) y Este (A3).

**Tabla 7.** Áreas de Bañados medidas con apoyo satelital. Período 2009 - 2013.

Fecha	A1 (km <sup>2</sup> )	A2 (km <sup>2</sup> )	A3 (km <sup>2</sup> )	A1+A2+A3 Área total (km <sup>2</sup> )
06/04/09	71	424	0	495
08/05/09	0	431	0	431
11/07/09	69	445	0	514
13/09/09	0	180	0	180
12/02/10	109	635	0	744
11/05/10	523	949	0	1472
26/10/10	0	316	0	316
06/01/11	0	460	0	460
15/02/11	174	692	0	866
06/05/11	1191	1164	1311	3666
11/09/11	0	733	164	898
21/10/11	0	494	0	494
10/02/12	0	298	0	298
30/04/12	0	532	0	532
19/07/12	98	909	0	1006
24/11/12	0	405	0	405

Fecha	A1 (km <sup>2</sup> )	A2 (km <sup>2</sup> )	A3 (km <sup>2</sup> )	A1+A2+A3 Área total (km <sup>2</sup> )
11/01/13	0	478	0	478
17/04/13	0	400	0	400
04/06/13	0	262	0	262
08/09/13	0	189	0	189

La **Figura 26** corresponde a las áreas medidas cubriendo el período de análisis.



**Figura 26.** Áreas de Bañados medidas con apoyo satelital durante el período 2009 - 2013.

Observando el gráfico se puede realizar un breve análisis del comportamiento de los Bañados para cada año:

- Durante el año 2009: sólo se activó el Bañado Sur. En Mery (2010) se mencionó que en el año 2008 se formaron los Bañados, alcanzando 2900 km<sup>2</sup>. Por lo tanto la situación de Bañados secos o chicos del año 2009, no parece asociarse a las condiciones previas del terreno.
- Durante el año 2010: Se activaron los Bañados Norte y Sur. Según la clasificación de Mery (2010) se conformó un escenario de Bañados medios, alcanzando un área máxima de 1500 km<sup>2</sup>.
- Durante el año 2011: Se activó también el Bañado Este. A este nivel de análisis, se presentan dos escenarios posibles: Bañados grandes o excepcionales. Debería complementarse con el estudio de volúmenes desbordados para definir la situación.
- Durante el año 2012: Se presentó la situación de Bañados medios: se activó el Bañado Sur y también el Norte durante un breve período. El área máxima alcanzada fue de 1000 km<sup>2</sup>.

- Durante el año 2013: No hubo activación de Bañados, por lo tanto el Bañado Sur ocupa un área mínima.

Con este análisis se actualizó la serie de áreas totales de Bañados para el período 1997-2013 (Figura 27).

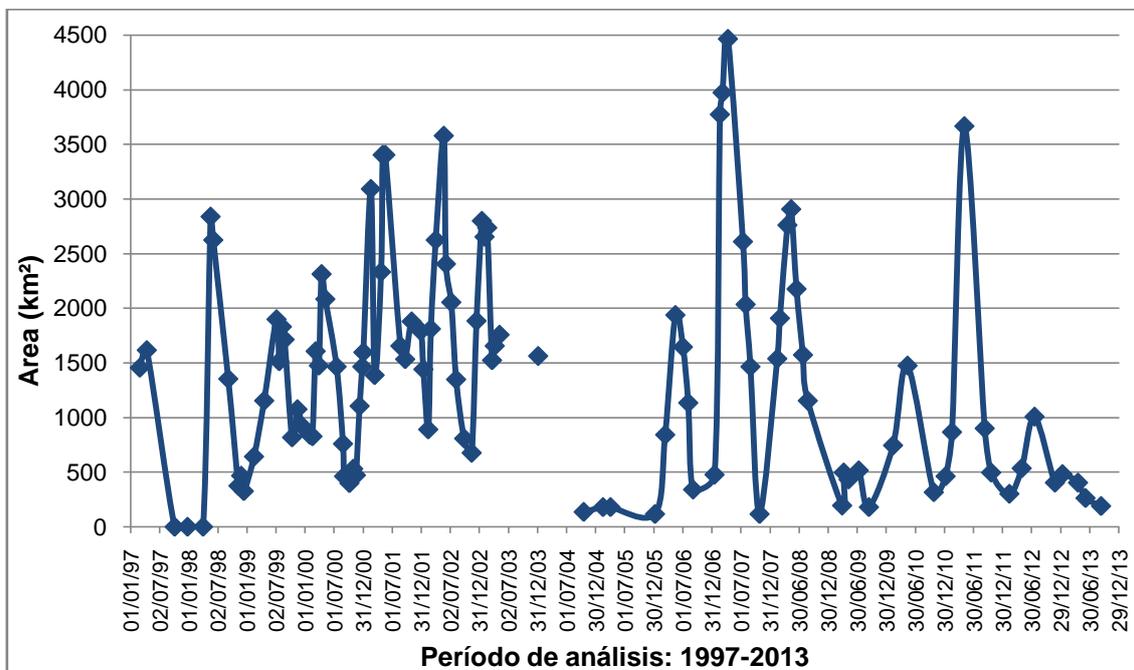
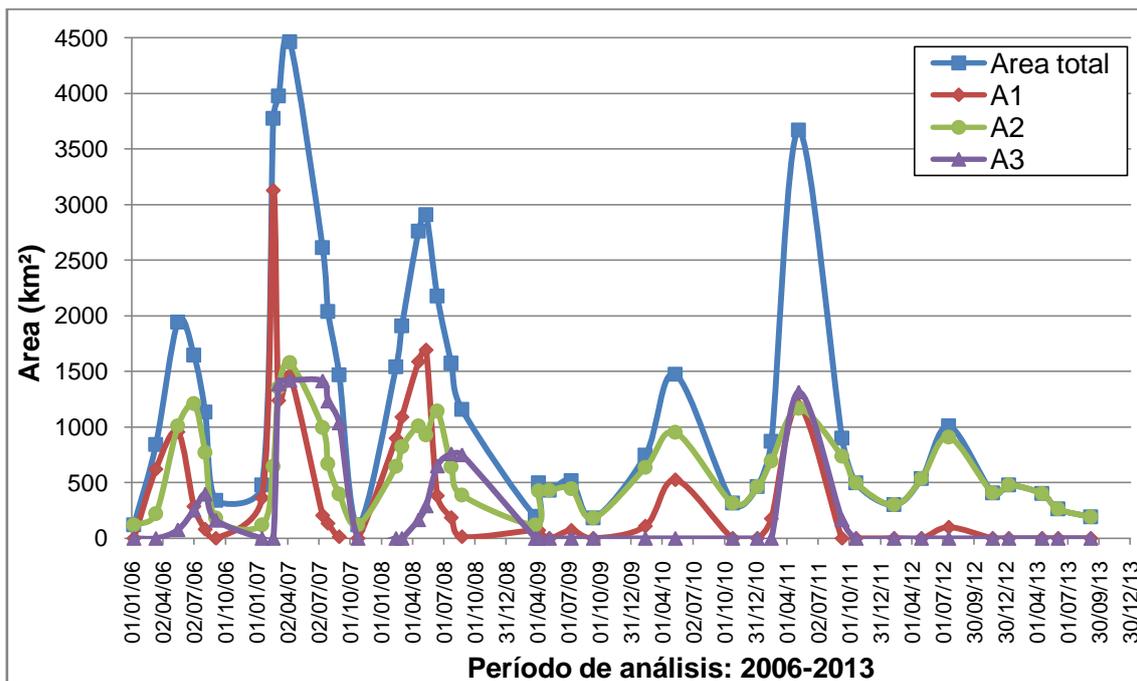


Figura 27. Serie actualizada de área total de Bañados. Período 1997 - 2013.

Notamos que en el intervalo que comprende desde el año 2001 hasta el 2003 el área de Bañados nunca alcanzó a ser mínima. Mientras que el área mínima se registró en casi todos los años siguientes. Además se observa que desde el año 2003 hasta la actualidad, la formación de Bañados no ha sido anual, disminuyendo con respecto al período anterior a 2003, acentuándose esta situación desde el año 2009.

En la **Figura 28** se presenta la actualización de las series de áreas de Bañados definidas en Mery (2010) con el período analizado en este trabajo. En la misma es posible interpretar que durante los últimos 2 años de análisis no se registró un área de Bañados superior a 1000 km<sup>2</sup>. Además, durante el año 2013, el área de Bañados no superó los 500 km<sup>2</sup>, condición que sí se registró durante cada año del período previo analizado (2006-2012).

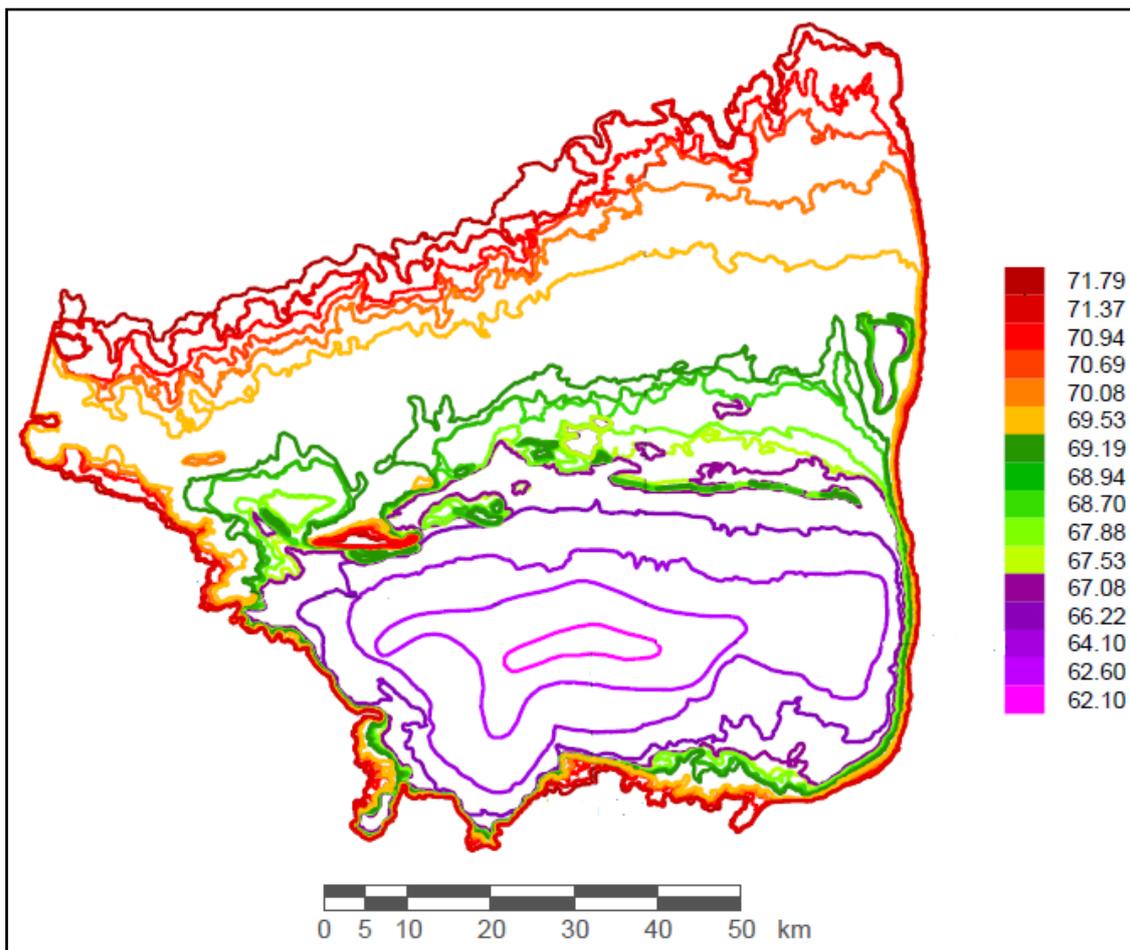


**Figura 28.** Serie actualizada de áreas de Bañados: A1, A2, A3 y Área total. Período 2006 - 2013.

Con relación al Bañado Sur, específicamente, en Mery (2010) se señala que el área máxima de este Bañado no presentó gran variabilidad entre los años muy húmedos, húmedos y medianamente secos: generalmente alcanza entre 1000 y 1500 km<sup>2</sup>. Este rango de áreas máximas se verifica también para los años 2010, 2011 y 2012, aquí analizados.

## 12. CARACTERIZACIÓN TOPOBATIMÉTRICA DE LA LAGUNA MAR CHIQUITA

Para generar la batimetría de la Laguna Mar Chiquita se superpusieron 12 de los contornos medidos, presentados en la **Tabla 2**. Éstos se complementaron con los contornos recopilados de batimetrías previas presentadas en la **Tabla 4** para incluir los niveles menores a los registrados en el período de estudio. El conjunto de contornos definidos se presenta en la **Figura 29**. Mientras que en la **Tabla 8**, se presentan los correspondientes niveles y áreas (medidas y digitalizadas) para el rango de niveles de agua con elevación entre 62,10 y 71,79 m s.n.m.



**Figura 29.** Mapa batimétrico de la Laguna Mar Chiquita. La escala de colores se asocia al nivel de agua en (m s.n.m.).

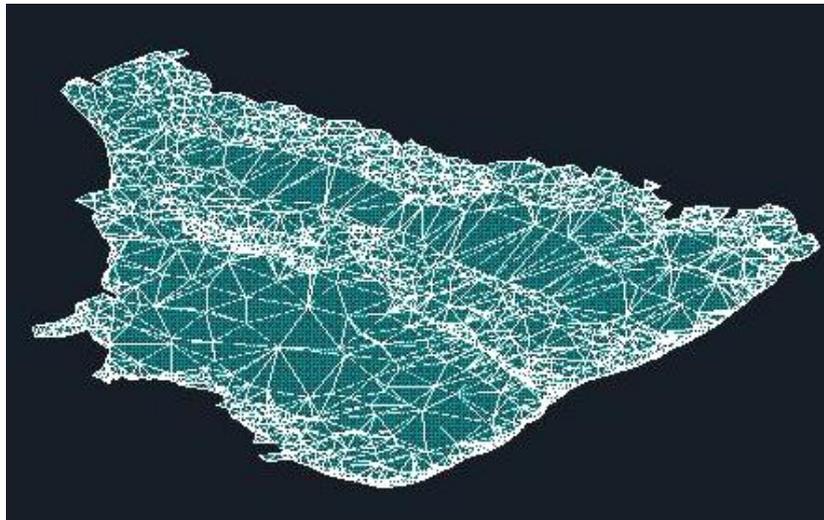
**Tabla 8.** Niveles de agua y áreas medidas y digitalizadas de la Laguna Mar Chiquita.

Nivel de agua [m s.n.m.]	Área medida [km <sup>2</sup> ]
71,79	6553
71,37	6311
70,94	5863
70,69	5630
70,08	5305
69,53	4734
69,19	3324
68,94	3123
68,70	3032
67,88	2665
67,53	2460
67,08	2322

Nivel de agua [m s.n.m.]	Área medida [km <sup>2</sup> ]
66,22	1786
64,10	1099
62,60	378
62,10	55

Empleando el programa AutoCAD Civil 3D se asignó a cada contorno su nivel correspondiente a la fecha de adquisición de cada imagen satelital analizada.

Además en Hillman (1999) se definió como cota de fondo de la Laguna 62,03 m s.n.m. De esta manera, se obtuvo un modelo digital topobatimétrico del terreno de la Laguna Mar Chiquita generado por cada nivel medido y su correspondiente *curva de nivel*. El modelo resultante se observa en la **Figura 30**.



**Figura 30.** Modelo topobatimétrico de la Laguna Mar Chiquita. Vista sureste isométrica. (Generación propia).

A partir de este modelo se calcularon los volúmenes correspondientes a los distintos niveles analizados. Los mismos se estimaron a partir de la comparación entre dos superficies, tomando como superficie base al modelo topobatimétrico generado, y como superficie de comparación al contorno correspondiente a cada nivel. De esta comparación surge el volumen de corte, de relleno y el volumen neto entre ambas superficies (volumen neto = volumen de relleno - volumen de corte). En este caso nos interesa el volumen de agua entre las superficies, por lo tanto computamos volúmenes de relleno. Los resultados se presentan en la **Tabla 9**.

Tabla 9. Cálculo de volúmenes de agua de la Laguna.

Nivel de agua [m s.n.m.]	Área medida [km <sup>2</sup> ]	$\Delta H$ [m]	$\Delta A$ [km <sup>2</sup> ]	V Modelo [km <sup>3</sup> ]	$\Delta V$ Modelo [km <sup>3</sup> ]	$\Delta V$ Formula [km <sup>3</sup> ]	V Formula [km <sup>3</sup> ]
71,79	6553	0,42	242	25,86	2,71	2,701	26,24
71,37	6311	0,43	448	23,15	2,61	2,617	23,54
70,94	5863	0,25	233	20,54	1,44	1,437	20,92
70,69	5630	0,61	325	19,11	3,33	3,335	19,49
70,08	5305	0,55	571	15,78	2,75	2,761	16,15
69,53	4734	0,34	1410	13,02	1,47	1,377	13,39
69,19	3324	0,25	201	11,55	0,85	0,816	12,01
68,94	3123	0,24	91	10,70	0,58	0,747	11,20
68,70	3032	0,82	367	10,12	2,42	2,367	10,45
67,88	2665	0,35	205	7,70	0,91	0,917	8,08
67,53	2460	0,45	139	6,79	1,06	1,105	7,17
67,08	2322	0,86	536	5,73	1,70	1,787	6,06
66,22	1786	2,12	687	4,03	2,99	3,058	4,28
64,10	1099	1,50	722	1,04	0,96	1,108	1,22
62,60	378	0,50	323	0,08	0,08	0,108	0,11
62,10	55	0,07	55	0,00	0,00	0,002	0,002
62,03	0	0	0	0,00	0,00	0,000	0,000

Se observa que la variación nivel a nivel de los volúmenes calculados resultó semejante cuantitativamente a la calculada por una función matemática (Ec. 4). Esta expresión supone una forma troncocónica del terreno entre cada nivel analizado. La función matemática que representa esta última variación es la siguiente:

$$\Delta V = (A_2 \times \Delta N) + \left[ (A_1 - A_2) \times \frac{\Delta N}{2} \right] \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde:  $\Delta V$  es el volumen entre las áreas  $A_1$  y  $A_2$  correspondientes a dos niveles de agua consecutivos,

$\Delta N$  es la diferencia entre esos dos niveles de agua,

$A_1$  es el área inferior del volumen  $\Delta V$  analizado, y

$A_2$  es el área superior del volumen  $\Delta V$  analizado.

Analizando los volúmenes medidos y los estimados con la función teórica se obtuvo, como se observa en la Figura 31, un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) igual a 0,996. Esto indica la buena representatividad de la función teórica para aplicar según la forma del cuerpo de agua de la Laguna Mar Chiquita.

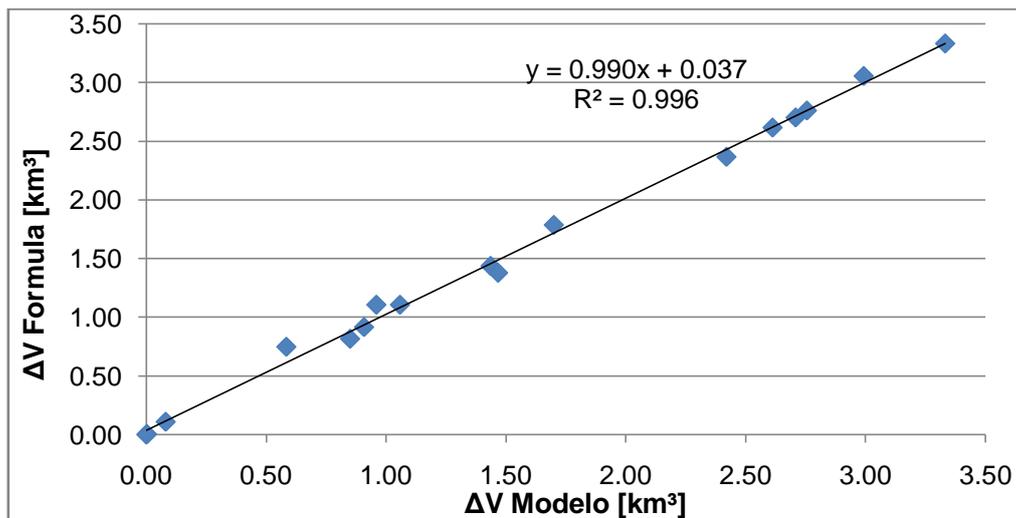


Figura 31. Estimación de volúmenes de la Laguna Mar Chiquita.

A partir del modelo generado, se realizó un mapa de profundidades de la Laguna que se muestra a continuación en la Figura 32.

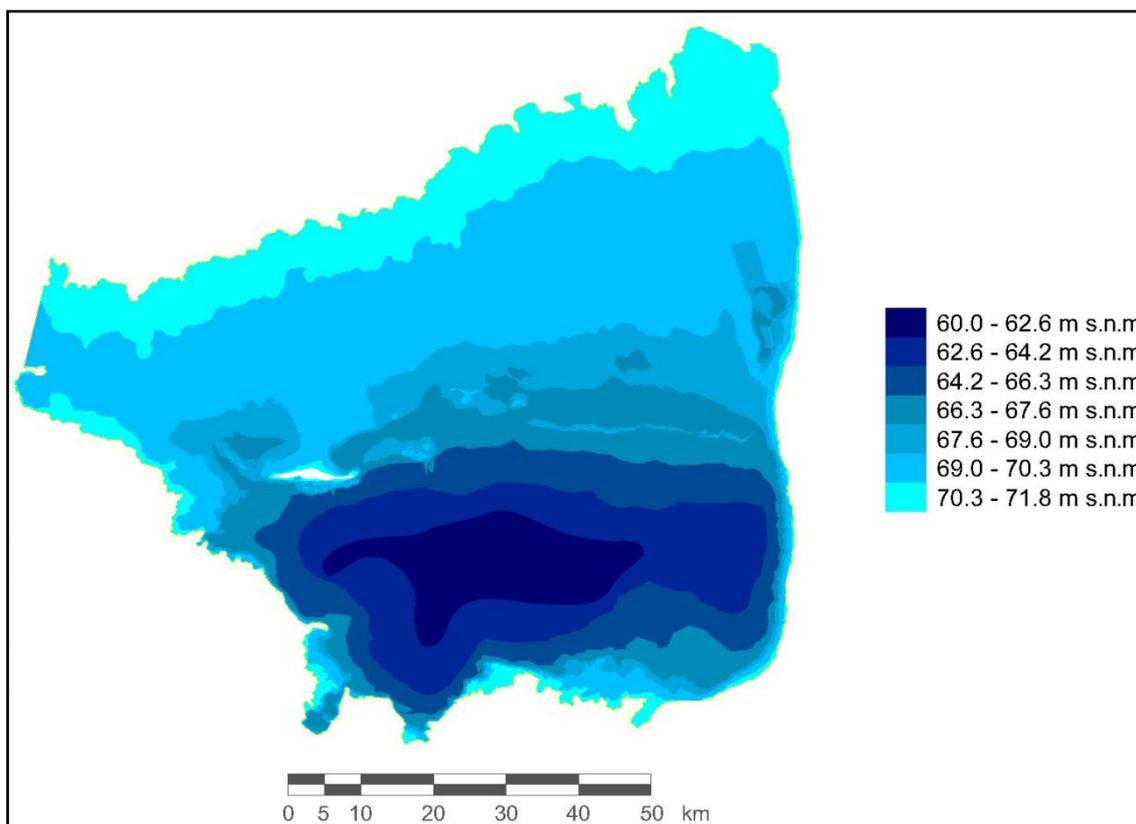


Figura 32. Mapa de profundidades de la Laguna Mar Chiquita.

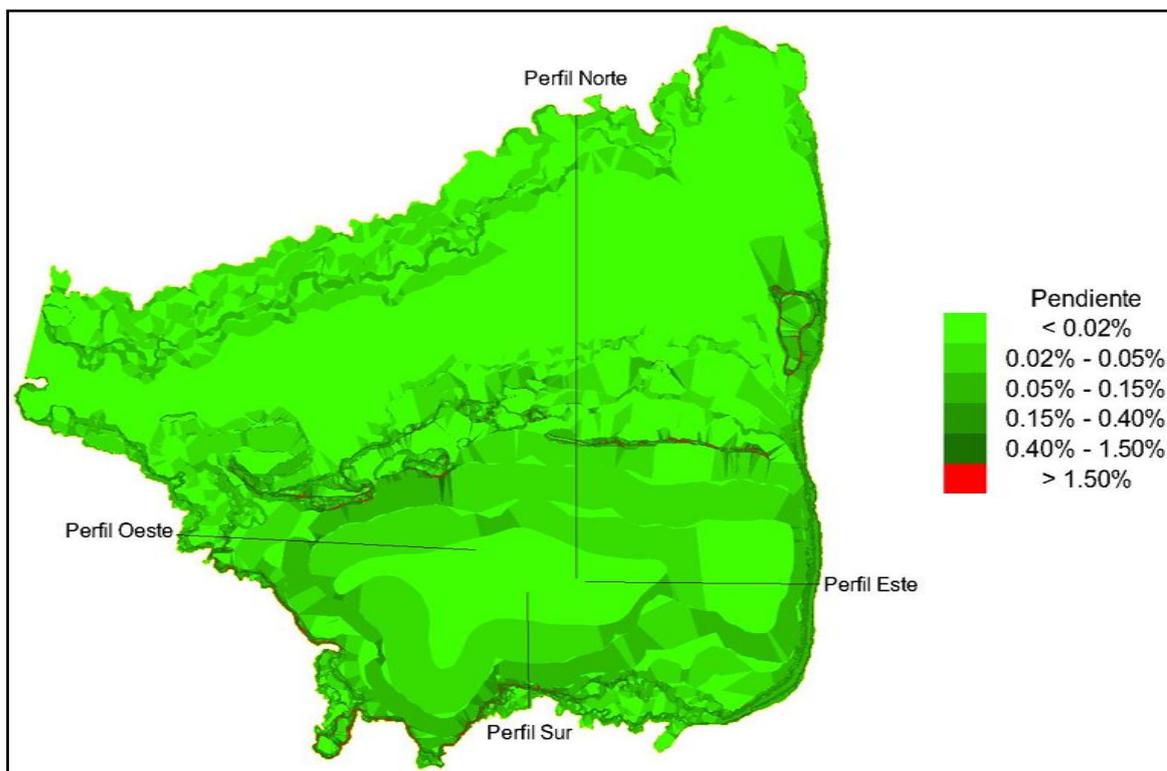
Las mayores profundidades se dan hacia la mitad sur de la Laguna. Hacia el norte las profundidades van disminuyendo.

Durante “años húmedos” la Laguna Mar Chiquita se encuentra con cotas que superan los 69 m s.n.m., en estas condiciones la isla El Mistolar queda aislada de la costa, y disminuyen notablemente las amplias playas barrosas de la costa norte.

Cuando el nivel de la Laguna baja, en la zona norte queda expuesta dando lugar a las playas salinas, responsables de las llamadas *tormentas de sal*, como se registró en varios años, principalmente durante el mes de agosto. A su vez para “años medios” con niveles de agua entre 69 y 66 m s.n.m. queda expuesta la línea de islas al norte de la Laguna, característica de esta condición.

Por último para “años secos” con niveles muy bajos (menores a 67 m s.n.m.) esta línea de islas queda fuera del contorno lagunar.

En la **Figura 33** se presenta el mapa de pendientes asociado al modelo topobatemétrico generado.



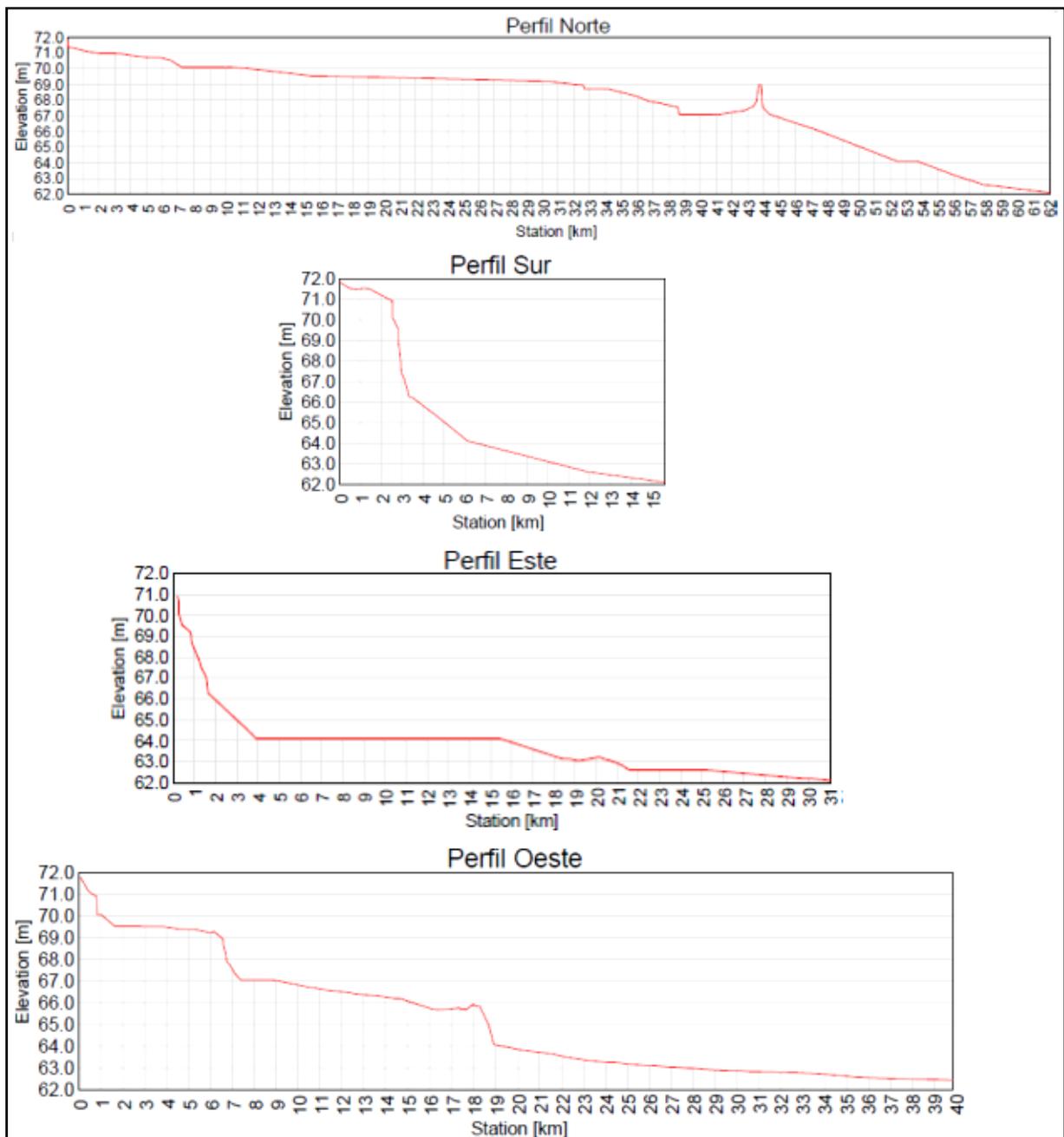
**Figura 33.** Mapa de pendientes de la Laguna Mar Chiquita.

Se observa que las menores pendientes se encuentran hacia el norte de la Laguna, en la zona donde se presentan las playas de sal cuando el nivel de agua es bajo. Un terreno más irregular se presenta más al norte, en la zona donde se forman bañados, y en la región central, alrededor de las islas y donde se activan las pequeñas lagunas mostradas en la **Figura 23**. Las pendientes también son bajas en la zona de mayor profundidad, es decir en el fondo de la Laguna ubicado en la mitad sur, como se presentó en la **Figura 32**.

Pendientes más pronunciadas se encuentran alrededor de la isla El Mistolar, y de la línea de islas al este; también alrededor de la Laguna del Plata, resultando un contorno definido de estos cuerpos.

La costa este de la Laguna presenta pendientes relativamente altas, debido a la presencia de los Altos de Mar Chiquita. En la mitad oeste de la costa sur también se observan pendientes considerables.

A continuación se presentan los perfiles sobre las costas norte, sur, este y oeste señalados en el mapa de pendientes de la **Figura 33**. En todos los gráficos la escala del eje y está exagerada 1000 veces con respecto a la del eje x para una mejor visualización.



**Figura 34.** Perfiles norte, sur, este y oeste de la Laguna Mar Chiquita.

En el perfil norte se destaca la elevación de la línea de islas en la progresiva 44 km. En cuanto a la pendiente, se observa lo mencionado anteriormente: la pendiente es muy baja en la zona norte, en la zona media (unos kilómetros antes y después de la línea de islas) la variación es más marcada, y finalmente en el último tramo es nuevamente baja (fondo de la Laguna).

En el perfil sur se observa el descenso brusco del terreno entre los 71 y 66 m s.n.m. A continuación la pendiente disminuye gradualmente.

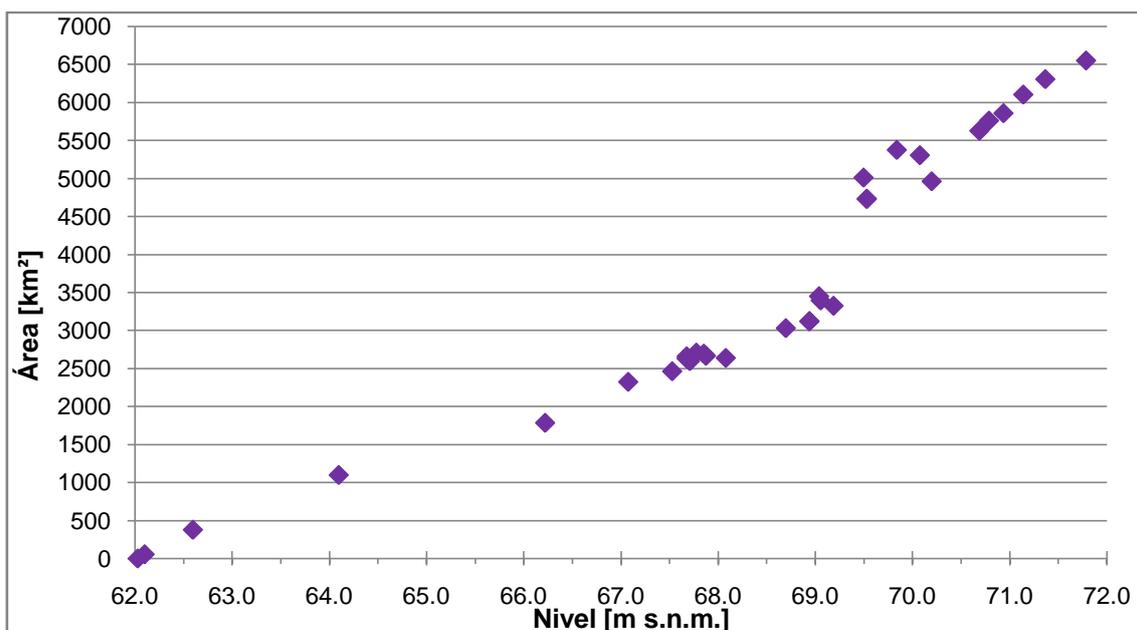
En el perfil este se observa una marcada pendiente cerca de la costa. A partir de la progresiva 4 km la pendiente resulta muy baja.

Por último en el perfil oeste la pendiente es pareja, y disminuye en el último tramo, presentando 3 saltos en las progresivas 1, 6 y 18km.

## 13. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### a. CURVA ÁREA-NIVEL

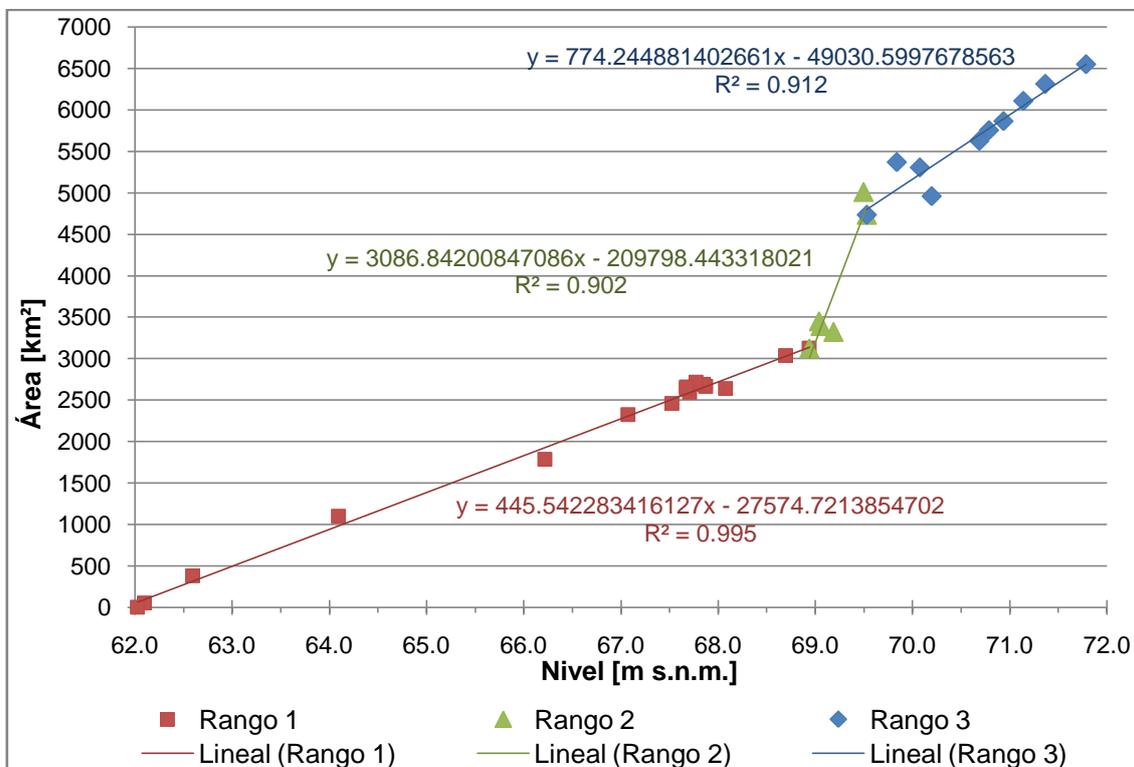
Los valores de Niveles (N) y Áreas (A) de la Laguna Mar Chiquita se presentan en la **Figura 35**. Las áreas evaluadas resultaron del análisis de imágenes satelitales. Los valores de áreas medidas y los niveles de agua a los que corresponden se presentaron en la **Tabla 6** de la **Sección 11.a**.



**Figura 35.** Áreas y niveles medidos en la Laguna Mar Chiquita.

La interpretación de estos pares de valores, permite observar, en primer lugar que los niveles que varían entre elevación 69 y 69,5 m s.n.m. representan en un incremento del área de la Laguna de alrededor de 2000 km<sup>2</sup>. En segundo lugar, puede notarse que estos pares de valores presentan una marcada alineación para niveles menores a 69 m s.n.m. y mayores a 70,5 m s.n.m. Esto indica que la relación Niveles-Área no es única, pero sí lineal para el rango comprendido entre 62 y 72 m s.n.m.

Para definir matemáticamente, las relaciones entre estas dos variables, se dividió el análisis en 3 rangos según se presenta en la **Figura 36**. Cada rango de A-N puede ser representado por una relación numérica lineal. Así se plantean 3 rectas con distintas pendientes, lo que permitió una mayor representatividad numérica de los pares de valores analizados.



**Figura 36.** Curvas Áreas-Niveles para la Laguna Mar Chiquita.

Las ecuaciones correspondientes a cada recta se presentan a continuación:

(Las constantes numéricas se presentan con 12 decimales para una mejor reconstrucción de las variables).

Para el Rango 1 ( $62 \leq N \leq 69$ ):

$$A \text{ (km}^2\text{)} = 445.542283416127 \times N - 27574.7213854702 \quad R^2 = 0.995 \quad (\text{Ec. 5})$$

Para el Rango 2 ( $69 \leq N \leq 69,5$ ):

$$A \text{ (km}^2\text{)} = 3086.84200847086 \times N - 209798.443318021 \quad R^2 = 0.902 \quad (\text{Ec. 6})$$

Para el Rango 3 ( $69,5 \leq N \leq 71,8$ ):

$$A \text{ (km}^2\text{)} = 774.244881402661 \times N - 49030.5997678563 \quad R^2 = 0.912 \quad (\text{Ec. 7})$$

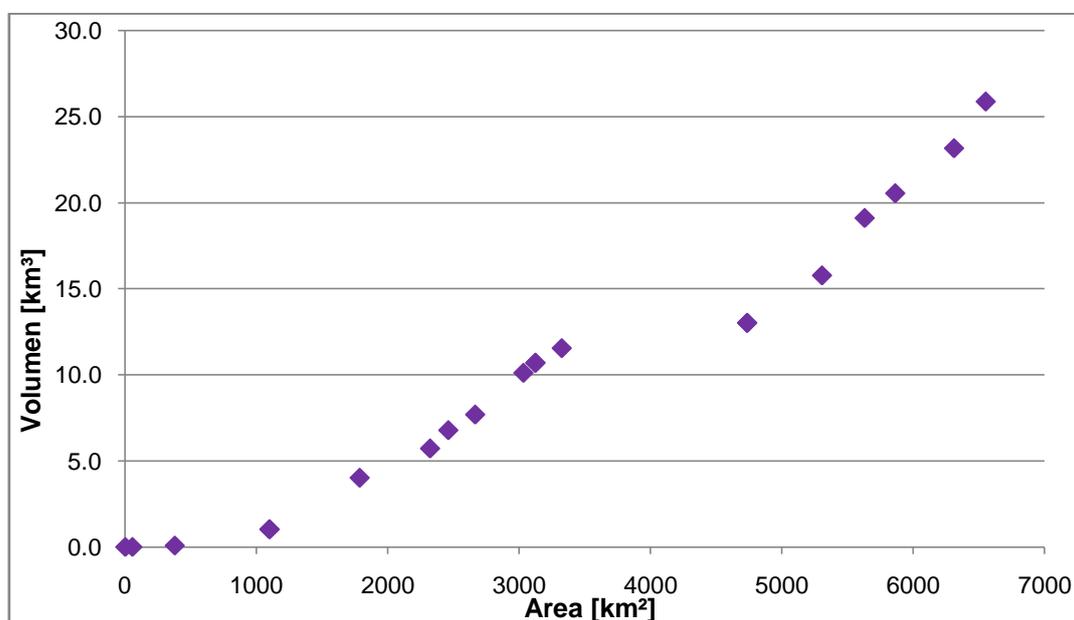
En los tres rangos de niveles planteados, el coeficiente de determinación de cada recta ( $R^2$ ) resultó superior a 0,90; lo que indica una marcada correlación entre áreas y niveles agrupados.

Se destaca una notable diferencia entre las pendientes de cada recta: para el Rango 1 la recta es relativamente tendida; para Rango 2 la pendiente es mucho mayor (casi 7 veces mayor que la primera); y para el Rango 3 la pendiente está entre las anteriores. Esto se justifica por la batimetría definida en la Laguna, la cual presenta para los niveles bajos del Rango 1, un área cubierta de llanura (escaso desnivel, con gran extensión), para los niveles del Rango 2, un área con mayor pendiente; y un área intermedia para los niveles superiores dentro del Rango 3.

Cabe mencionar que los alcances de este estudio llegan hasta el nivel 71.79 m s.n.m., que es el máximo alcanzado en el período que comprende este estudio. El cual coincide con el máximo histórico medido y estimado para la Laguna Mar Chiquita.

### b. CURVA VOLUMEN - ÁREA

Como se mencionó anteriormente, el modelo topobatimétrico a partir del cual se calcularon los volúmenes se realizó con las imágenes satelitales de la **Tabla 2**, cuyos valores de áreas y volúmenes medidos se presentaron en la **Tabla 8**. La **Figura 37** corresponde a los valores de Áreas (A) y Volúmenes (V) analizados para este modelo.

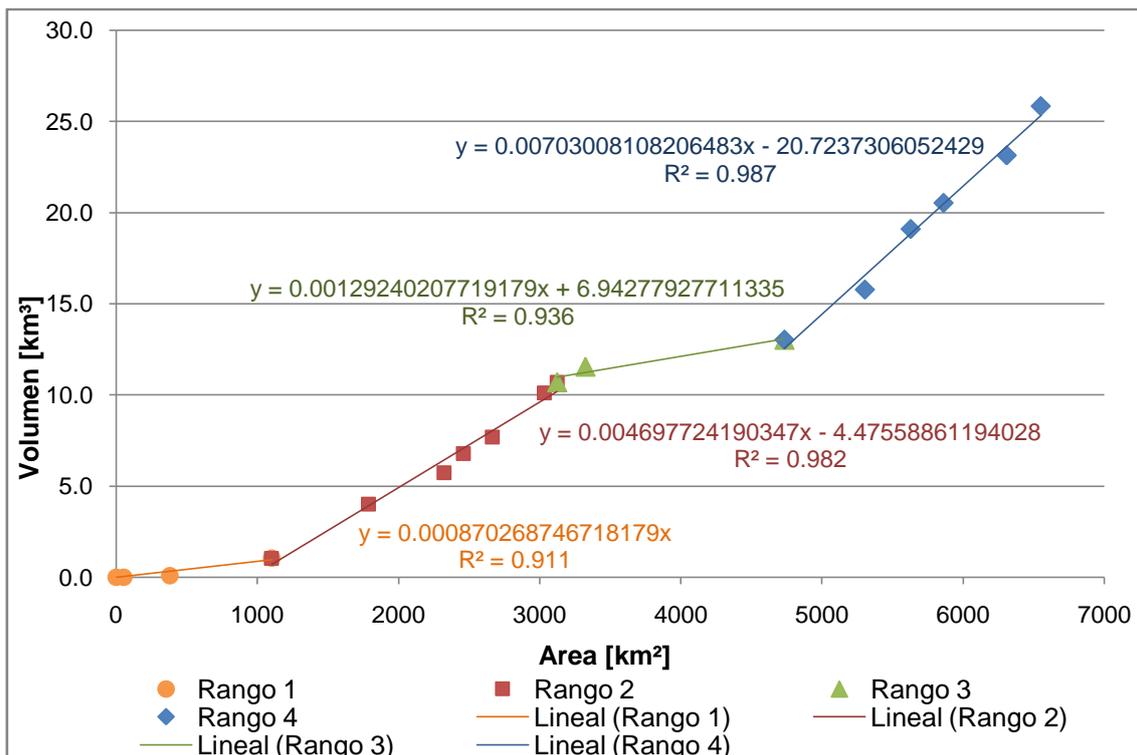


**Figura 37.** Áreas medidas y Volúmenes estimados para la Laguna Mar Chiquita.

A primera vista, sobresale la pequeña variación que sufre el volumen de agua cuando el área de la Laguna asciende de 3000 a 5000 km<sup>2</sup> aproximadamente. Así también para áreas muy pequeñas (menores a 1000 km<sup>2</sup>) el volumen es pequeño, alcanzando 1 km<sup>3</sup>.

Para los rangos de áreas de 1000 a 3000 km<sup>2</sup> y de 5000 a 6500 km<sup>2</sup> la pendiente de la curva A-V es semejante.

Un análisis más detallado de estos valores se presenta en la **Figura 38**. Los pares de valores se dividieron según los mismos rangos analizados en la curva A-Ndelapartado anterior. Esto es por la observación que los rangos previamente definidos se corresponden con los quiebres de la curva V-A. Aquí se adicionó el nuevo rango para cubrir áreas menores a 1000 km<sup>2</sup>. Cada uno de estos 4 rangos puede ser representado también mediante funciones lineales.



**Figura 38.** Curvas Volúmenes-Áreas para la Laguna Mar Chiquita.

Las ecuaciones correspondientes a cada recta se presentan a continuación:

Para el Rango 1 ( $A \leq 1100$  km<sup>2</sup>):

$$V \text{ (km}^3\text{)} = 0.000870268746718179 \times A \quad R^2 = 0.911 \quad \text{(Ec. 8)}$$

Para el Rango 2 ( $1100 \leq A \leq 3124$  km<sup>2</sup>):

$$V \text{ (km}^3\text{)} = 0.004697724190347 \times A - 4.47558861194028 \quad R^2 = 0.982 \quad \text{(Ec. 9)}$$

Para el Rango 3 ( $3124 \leq A \leq 4735$  km<sup>2</sup>):

$$V \text{ (km}^3\text{)} = 0.00129240207719179 \times A + 6.94277927711335 \quad R^2 = 0.936 \quad \text{(Ec. 10)}$$

Para el Rango 4 ( $4735 \leq A \leq 6553 \text{ km}^2$ ):

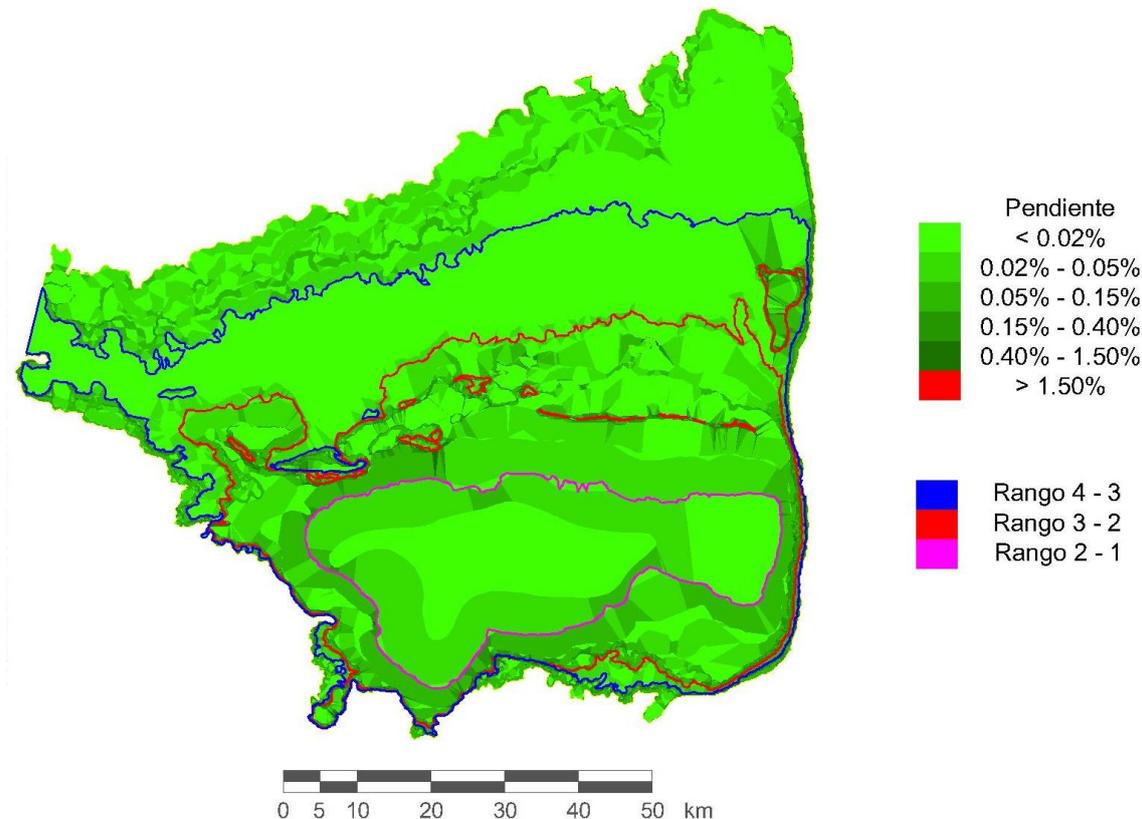
$$V (\text{km}^3) = 0.00703008108206483 \times A - 20.7237306052429 \quad R^2 = 0.987 \quad (\text{Ec. 11})$$

Se observa que el Rango 2 definido en la sección anterior se corresponde con el Rango 3 de esta sección, donde para una variación del área de 3000 a casi 5000  $\text{km}^2$  el volumen aumenta muy poco (de 10,5 a 13  $\text{km}^3$ ).

Por otro lado, la pendiente de la curva cuando el área varía entre 1000 y 3000  $\text{km}^2$  es levemente menor que la pendiente de la curva para una variación del área entre 5000 y 6500  $\text{km}^2$ : éstas son 0,005 y 0,007 respectivamente.

Finalmente la baja pendiente de la curva para áreas menores a 1000  $\text{km}^2$  es evidencia de que el fondo del cuerpo lagunar presenta una topografía de llanura.

Para explicar mejor las diferencias entre los rangos definidos se muestra en la **Figura 39** el mapeo de las pendientes topográficas y superpuestos se presentan los límites asociados a los rangos definidos en el análisis precedente.



**Figura 39.** Mapa de pendientes y rangos de niveles definidos para la Laguna Mar Chiquita.

Dentro del Rango 1 la pendiente del terreno es baja, por lo que el área de la Laguna puede crecer, sin traer como consecuencia un incremento importante del volumen de agua.

Dentro del Rango 2 las pendientes son mayores. Al alcanzar el contorno límite entre los Rangos 2 y 3, se destaca que el área de la Laguna alcanza barreras físicas (pendientes del terreno más importantes) que limitan su expansión hacia el sur y el este de la Laguna.

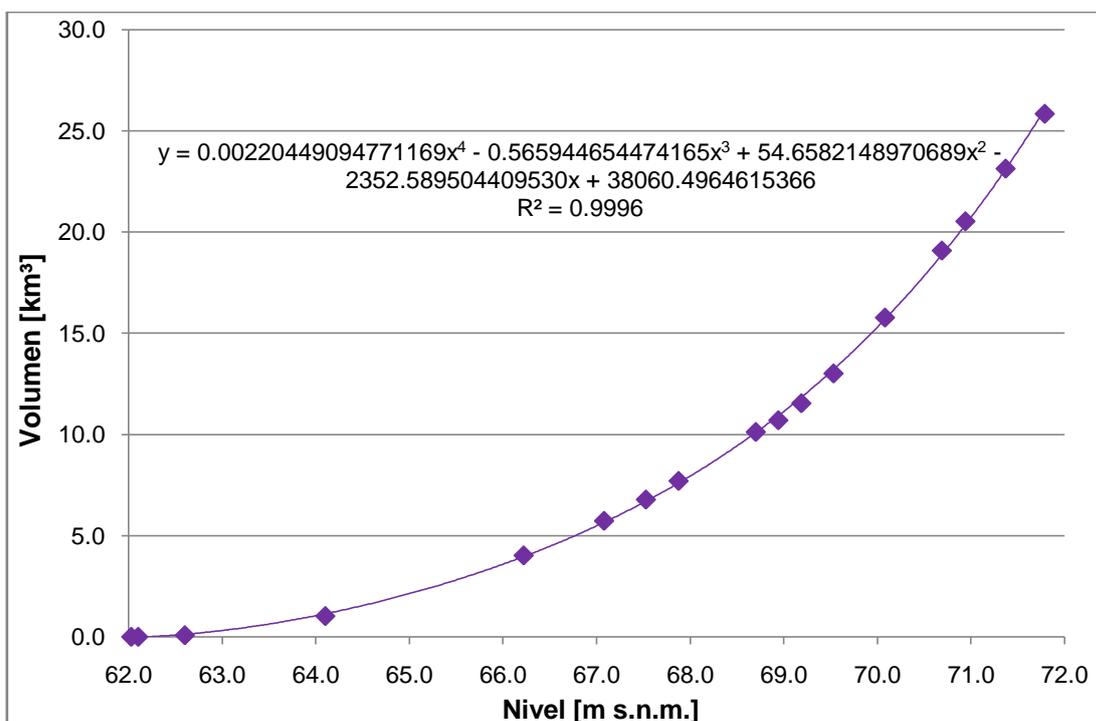
Dentro del Rango 3 el área de la Laguna casi no se expande hacia el sur ni al este por la razón recién expuesta; mientras que hacia el norte se encuentran las llamadas playas de sal, que presentan muy baja pendiente. Esta es la causa por la que en este rango el volumen aumenta muy poco para un gran incremento en el área lagunar.

Finalmente en el Rango 4 las barreras físicas siguen presentándose al sur y este; y la pendiente del terreno al norte no es tan tendida como en el Rango 3, sin embargo se observa que en la zona de desembocadura del río Dulce es relativamente baja.

### C. CURVA NIVEL – VOLUMEN

Definidas las funciones matemáticas previas, para plantear numéricamente las relaciones entre las variables de niveles y áreas junto con las áreas y volúmenes, se presenta en este apartado, la relación que representa las variables de volúmenes en función de los niveles de agua de la Laguna Mar Chiquita.

En base a 17 pares de valores analizados, se alcanza la relación planteada en la **Figura 40**.

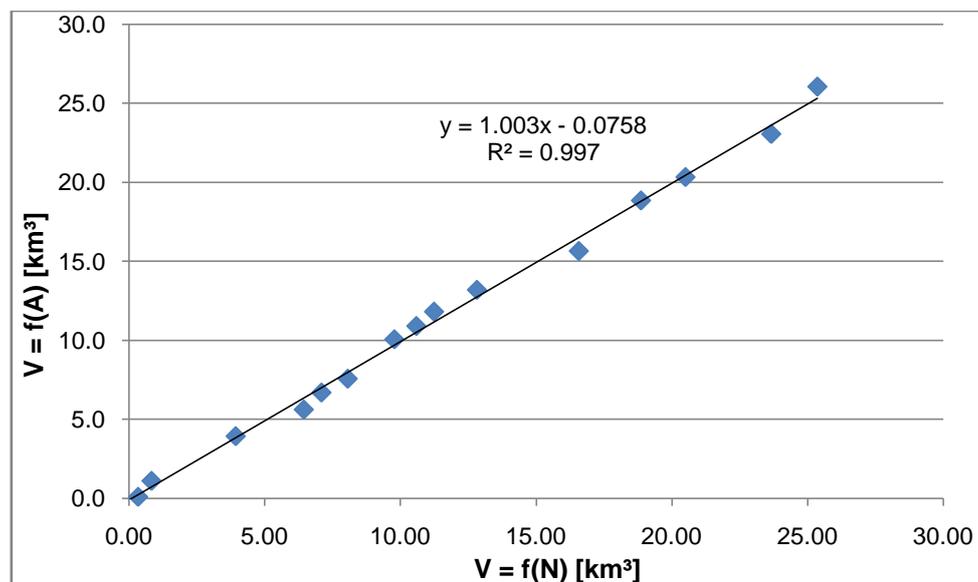


**Figura 40.** Curva Volúmenes-Niveles de agua para la Laguna Mar Chiquita.

La estimación de los volúmenes de agua para la Laguna Mar Chiquita en función de los niveles medidos se propone a través de la siguiente función matemática representada por una ecuación de 4to orden:

$$V = 0.00220449094771169 \times N^4 - 0.565944654474165 \times N^3 + 54.6582148970689 \times N^2 - 2352.58950440953 \times N + 38060.4964615366 \quad R^2 = 0.999 \quad (\text{Ec. 12})$$

Los volúmenes de la Laguna se estimaron utilizando dos parámetros: área y nivel. El cálculo de volúmenes en función de áreas medidas con apoyo satelital se realizó a través de las (Ec. 9), (Ec. 10) y (Ec. 11); por otro lado, para el cálculo de volúmenes en función de niveles se utilizó la (Ec. 12). Los volúmenes resultantes de ambos cálculos se presentan en la **Figura 41**.

**Figura 41.** Volúmenes de la Laguna estimados como función de áreas medidas y de niveles.

Comparando el volumen calculado a partir de las áreas medidas con el calculado a partir de los niveles de la Laguna, se observa una buena representatividad entre los pares de valores analizados, esto se deduce a partir del coeficiente de determinación mayor a 0,99.

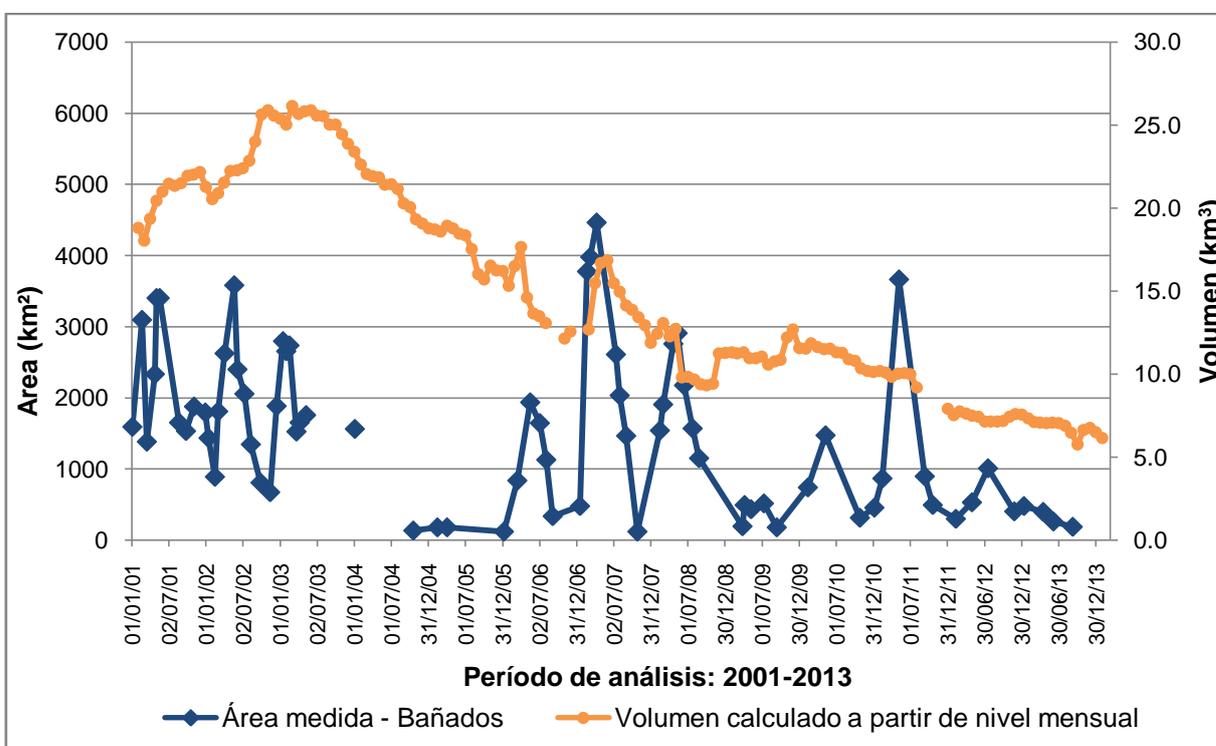
#### d. RELACIÓN BAÑADOS - LAGUNA

Como se señaló anteriormente, una relación importante en el sistema estudiado es la relación Laguna-Bañados. Se conoce que cuando el río Dulce alcanza un caudal superior a la capacidad de conducción del caudal principal (caudal de desborde) en su trayecto entre Los Telares y la

Laguna Mar Chiquita se producen desbordes y comienzan a generarse los Bañados del río Dulce debido a las inundaciones del terreno en la zona. Estos desbordes pueden llegar a cubrir grandes extensiones. Las pérdidas por evapotranspiración en los Bañados son importantes, debido a la extensión de la superficie expuesta, y su escasa profundidad.

Entonces, una parte del caudal desbordado escurre superficialmente hacia la Laguna, otro porcentaje infiltra, y el resto se evapotranspira. De los flujos mencionados, solo el primero debería reflejarse en un incremento del nivel en la Laguna. En la **Sección 7.b** se mencionó que el tiempo que tarda el caudal desbordado en descargar en la Laguna es de aproximadamente 4 semanas (LH-UNC, 2007).

Para expresar la influencia que la relación Bañados - Laguna ha tenido sobre el comportamiento de la Laguna durante el período de estudio, se presentan en la **Figura 42** las áreas medidas de Bañados y el volumen de la Laguna estimado en función de su nivel mensual ( $V = f(N)$ , (Ec. 12)).



**Figura 42.** Áreas de Bañados medidas y volúmenes a través del tiempo.

En esta figura, se observa que entre enero y junio del año 2001 se presentaron períodos de grandes Bañados que dan lugar a un aumento en el volumen de la Laguna. A fines de ese año el volumen sufre un breve descenso, interrumpido por el ascenso que genera el caudal proveniente del Bañado del año 2002, el cual llega a cubrir 3600 km<sup>2</sup>. En el año 2003 se presenta un escenario de Bañados grandes, sin embargo no causan un incremento del volumen lagunar, el cual se mantiene hasta que a fines del año 2003 comienza a descender.

No se tiene información sobre la presencia de Bañados durante la primera mitad del año 2004, pero muy posiblemente hayan sido de pequeños a mínimos. Esta hipótesis se basa en el hecho

de que no se registra un aumento de volumen de la Laguna, ni una atenuación en su disminución.

En el año 2006 se registró un aumento del nivel de agua en la Laguna durante un breve período. Los Bañados este año son de tamaño medio. Los Bañados del año 2007 fueron excepcionales (área máxima de  $4500 \text{ km}^2$ ) e influyeron en el marcado escalón de  $5 \text{ km}^3$  que experimentó el volumen medio.

Durante el año 2008 se registró un escenario de Bañados grandes. Sin embargo no generaron un aumento en el volumen de la Laguna.

El área de los Bañados en los años 2009 y 2010 fue pequeña, por lo tanto sus aportes a la Laguna fueron poco significantes. En 2011 el área de Bañados fue grande, sin embargo no impulsó un aumento en el volumen de la Laguna. Finalmente, durante los años 2012 y 2013 el área ocupada por los Bañados fue mínima.

A primera vista, puede decirse que el área de Bañados que genera un aumento en el volumen de la Laguna es alrededor de  $2500 \text{ km}^2$ . Excepciones son los años 2009 y 2011. Durante el año 2009, el área alcanzó  $2900 \text{ km}^2$ , y durante el año 2011 donde ascendió a  $3600 \text{ km}^2$  y sin embargo no se registró una influencia en la Laguna.

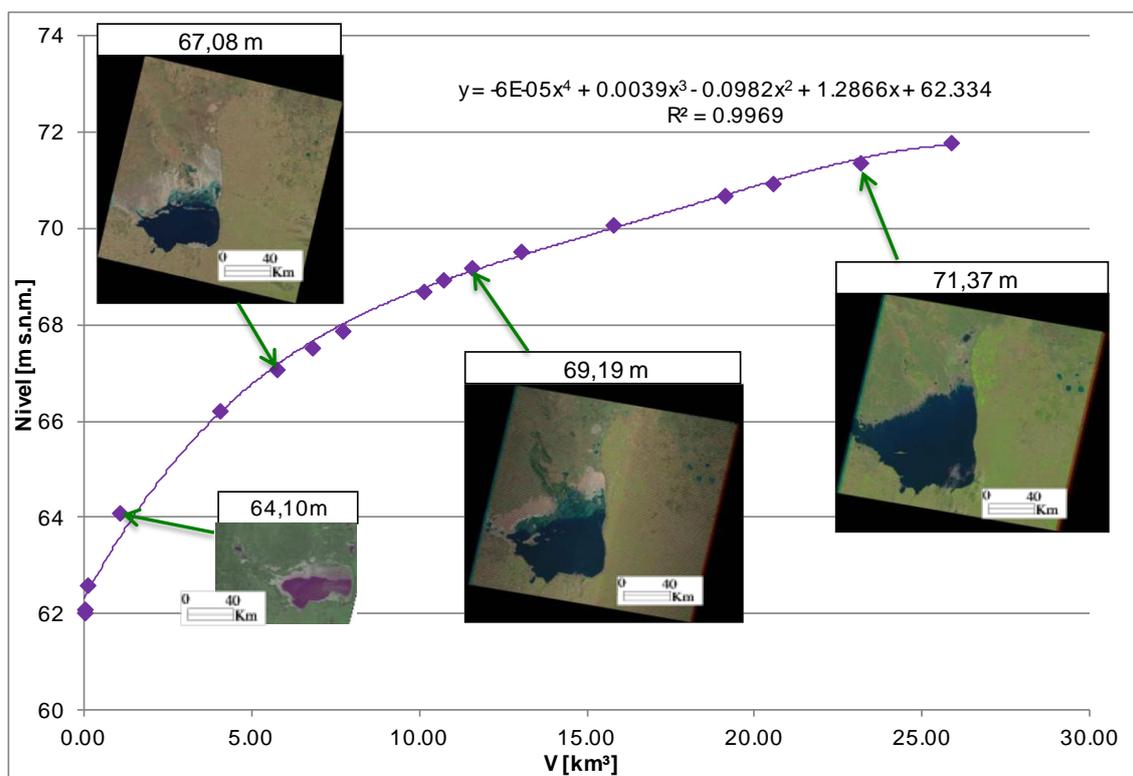
Para explicar adecuadamente la relación sería necesario complementar este apartado con un estudio de balance vertical: precipitaciones para conocer las condiciones previas del terreno, que son determinantes en la infiltración, principalmente luego de períodos secos (como sucede en los años 2007 y 2011); y evaporación durante el período de estudio para cuantificar las pérdidas por este proceso.

## 14. CONCLUSIONES

A continuación se presentan las principales conclusiones alcanzadas a partir del desarrollo de esta Práctica Supervisada.

- Se actualizó la serie de niveles de agua diarios y mensuales en Mar Chiquita, cubriendo hasta el mes de febrero de 2014. Las últimas mediciones indican un nivel diario de la Laguna de  $67,68 \text{ m s.n.m.}$  el día 28 de febrero y un nivel mensual de  $67,3 \text{ m s.n.m.}$ . Esta condición se asemeja a la observada en el mes de octubre de 1977.
- Se analizaron 25 imágenes satelitales de la Laguna Mar Chiquita y 26 imágenes satelitales de los Bañados del río Dulce, con el objetivo de cuantificar el área cubierta por agua. La última medición areal de la Laguna corresponde a fines del mes de enero de 2014, y fue de  $2483 \text{ km}^2$ .

- Durante el periodo en análisis el área máxima medida de la Laguna resultó de 6553 km<sup>2</sup>, durante el año 2003. la mínima área medida fue de 2322 km<sup>2</sup> durante octubre de 2013. Se estimó que la máxima variación areal de la Laguna fue del 65%.
- Se generó un nuevo modelo digital topobatemétrico de la Laguna, basado en la medición de los contornos de agua medidos sobre imágenes satelitales de la serie LANDSAT, cubriendo niveles de 62 a 72 m s.n.m.
- Se definió la relación Niveles - Áreas, la cual fue asociada a relaciones lineales entre 3 rangos de niveles.
- Se definió la relación Áreas-Volúmenes, la cual fue asociada a relaciones lineales entre 4 rangos de áreas.
- Se definió la relación Volúmenes - Niveles, asociada a una expresión polinómica de cuarto orden. En la figura se grafica la relación Niveles - Volúmenes, y se adjuntan imágenes satelitales representativas.



**Figura 43.** Curva Nivel - Volumen con imágenes satelitales.

- Se puede interpretar que los Bañados desarrollados durante esta década no fueron suficientes para permitir que la Laguna modifique su tendencia decreciente.

Se considera que se logró realizar un importante aporte para plantear un balance hídrico de la Laguna, abordando temas relacionados con la variación espacial de la misma durante el periodo 2001-2014.

Como propuesta para trabajos futuros relacionados con el estudio de la dinámica espacial de este sistema, se propone un estudio más detallado de la relación Bañados - Laguna a través del análisis temporal a menor escala de la formación y recesión de los Bañados, y su influencia en el comportamiento de la Laguna Mar Chiquita.

## 15. BIBLIOGRAFÍA

Bucher, E. Bañados del Río Dulce y Laguna Mar Chiquita, Córdoba, Argentina. 2006. Academia Nacional de Ciencias, Córdoba, Argentina.

Castejón y González (2009). Batimetría del Mar Menor (Murcia) elaborada con imágenes Landsat 7.

Cereceda Botella, A. (2009). Propuesta de volúmenes ambientales para el sistema Laguna Mar Chiquita. Trabajo final de grado. Universidad Nacional de Córdoba.

CIRSA (1979). Estudio batimétrico de la Laguna Mar Chiquita. Centro de Investigaciones Hídricas de la Región Semiárida, INCYTH CONICET, Va. Carlos Paz.

CFI. Comisión del Río Dulce, 1965. Proyecto del Río Dulce. Informe preliminar para el Banco Interamericano de desarrollo. Tomo I.

Díaz, E. (2013). Identificación y Caracterización de Sequías Hidrológicas en el Centro y Norte de la República Argentina. Trabajo Final de Maestría en Ciencias de la Ingeniería. Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.

ESRI, (2004). Manual de Usuario del Programa ENVI 4.3. Environmental System Research. Institute. Redlands. California, Estados Unidos. Pp. 750.

FAO (septiembre 1998). Revista de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación - Departamento de Agricultura y Protección al Consumidor.

Hillman, G. (1999) Análisis y simulación hidrológica del sistema Laguna de Mar Chiquita. Trabajo Final de Grado en la Carrera de Ingeniería Civil. Universidad Nacional de Córdoba, Argentina, 345.

Hillman, G., (2003). Análisis y simulación hidrológica del sistema Laguna de Mar Chiquita. Trabajo Final de Maestría en Ciencias de la Ingeniería. Universidad Nacional de Córdoba, Argentina, 160.

Jones, N. «South Aral Sea 'gone in 15 years'». newscientist.com.

LH-UNC (2011). Estudio de la Cota Máxima de Inundación en la Zona Sur Sur-Oeste de la Laguna Mar Chiquita.

Mery, Julien (2010). Dinámica de los Bañados del Río Dulce: caudales erogados, volúmenes desbordados y área cubierta. Proyecto Final de Carrera de la Ingeniería en Energía y Medio Ambiente del INSA Lyon, realizado en el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba.

Mañueco, R. El mar de Aral se recupera» (en español). abc.es.

Pagot, M. (2003) Análisis y simulación hidrológica del sistema Bañados del Río Dulce. Trabajo Final de Maestría en Ciencias de la Ingeniería. Universidad Nacional de Córdoba, Argentina, 192.

Piovano, E.L., Damatto Moreira, S., Ariztegui, D. (2002). Recent environmental changes in Laguna Mar Chiquita (central Argentina): a sedimentary model for a highly variable saline lake. *Sedimentology* 49, 1371–1384.

Plencovich G. (2011). Simulación hidrológica de los humedales de Mar Chiquita con apoyo satelital. Tesis de Maestría en Ciencias de la Ingeniería, Mención Recursos Hídricos. Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Córdoba, Argentina.

Pozzi, C., Plencovich, G., Hillman, G., Pagot, M., Rodríguez, A., Caamaño Nelli, G., Michelutti, P., Salio, P. (2005). Monitoreo Hidroambiental de la Laguna Mar Chiquita, Córdoba, Argentina. Aplicación al Diseño de las Defensas Costeras de Miramar. XX Congreso Nacional de Agua y III Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur.

SSRRHH (2007). Estudio Hidrológico – Ambiental del Sistema Mar Chiquita - Bañados y tramo inferior del Río Dulce.

SSRRHH (2012). Informe final de la Comisión de Evaluación del Impacto de las nubes de polvo y sal generadas en el área de Mar Chiquita.

Torres, R. y P. Michelutti. 2005. Reserva de Uso Múltiple Bañados del Río Dulce y Laguna Mar Chiquita.