

# ACADEMIA NACIONAL DE INGENIERÍA

PREMIO “ING. ANTONIO MARÍN” 2000

otorgado al

Dr. Ing. ANDRÉS RODRIGUEZ



BUENOS AIRES  
REPÚBLICA ARGENTINA

2000

# ACADEMIA NACIONAL DE INGENIERÍA

PREMIO “ING. ANTONIO MARÍN” 2000

otorgado al

**Dr. Ing. ANDRÉS RODRIGUEZ**



**BUENOS AIRES  
REPÚBLICA ARGENTINA  
2000**

# ACADEMIA NACIONAL DE INGENIERÍA

## MESA DIRECTIVA

Presidente: Ing. Arturo J. Bignoli  
Vicepresidente 1°: Ing. Oscar A. Vardé  
Vicepresidente 2°: Ing. Isidoro Marín  
Secretario: Ing. Ricardo A. Schwarz  
Prosecretario: Ing. Tomás A. del Carril  
Tesorero: Ing. Luis U. Jáuregui  
Protesorero: Ing. Antonio A. Quijano

## ACADÉMICO HONORARIO

Ing. Salvador María del Carril (1971)

## ACADÉMICOS DE NÚMERO

Ing. Arturo J. Bignoli (1973)  
Ing. Juan S. Carmona (1973)  
Ing. Eitel H. Lauría (1974)  
Ing. Patricio A.A. Laura (1976)  
Ing. Victor O. Miganne (1983)  
Ing. Alberto H. Puppo (1984)  
Ing. Carlos R. Cavoti (1987)  
Ing. Oscar G. Grimaux (1987)  
Ing. Isidoro Marín (1987)  
Ing. Osacar A. Vardé (1987)  
Ing. Osvaldo C. Garau (1991)  
Ing. Luis U. Jáuregui (1991)  
Ing. Guido M. Vassallo (1991)  
Ing. Antonio A. Quijano (1993)  
Ing. Raúl A. Lopardo (1994)  
Ing. René A. Dubois (1994)  
Ing. Ricardo A. Schwarz (1995)  
Ing. Eduardo A. Pedace (1996)  
Ing. Conrado E. Bauer (1997)  
Ing. Bruno V. Ferrari Bono (1998)  
Ing. Manuel A. Solanet (1998)  
Ing. Francisco J. Sierra (1999)  
Ing. Mario E. Aubert (1999)  
Ing. Tomás A. del Carril (1999)  
Ing. Humberto R. Ciancaglini (1999)  
Ing. Rodolfo F. Danesi (1999) (1985)  
Ing. Osvaldo R. Rosato (2000)  
Ing. Federico B. Camba (2000)  
Ing. Rodolfo E. Biasca (2000)

## ACADÉMICOS EMÉRITOS

Ing. Alberto S. C. Fava (1974)  
Ing. Eduardo R. Abril (1980)

## ACADÉMICOS CORRESPONDIENTES

Ing. Rafaél N. Sánchez (Canadá) (1976)  
Ing. Andrés Lara Saenz (España) (1981)  
Ing. Gunnar Hambræus (Suecia) (1983)  
Ing. José Martiniano de Azevedo Netto (Brasil) (1983)

Ing. Rodrigo Flores Alvarez (Chile) (1984)  
Ing. Joaquim Blessmann (Brasil) (1984)  
Ing. Luis D. Decanini (Italia) (1985)  
Ing. Ramón L. Cerro (Santa Fe, Rep. Arg) (1985)  
Ing. Ernst G. Frankel (Estados Unidos) (1985)  
Ing. George Leitmann (Estados Unidos) (1988)  
Ing. Vitelmo V. Bertero (Estados Unidos) (1989)  
Ing. Máximo E. Valentinuzzi (Tucumán, Rep. Arg.) (1989)  
Ing. Wolfgang Torge (Alemania) (1989)  
Ing. David I. Blockley (Reino Unido) (1990)  
Ing. Jorge D. Riera (Brasil) (1990)  
Ing. Alexander Danilevsky (Estados Unidos) (1991)  
Ing. Aldo J. Viollaz (Tucumán, Rep. Arg.) (1991)  
Ing. Gerhart I. Schuëller (Austria) (1993)  
Ing. Antonio Introcaso (Santa Fe, Rep. Arg.) (1994)  
Ing. Luis Esteva Maraboto (México) (1994)  
Ing. Alberto E. Cassano (Santa Fe, Rep. Arg.) (1994)  
Ing. Victor F.B. de Mello (Brasil) (1995)  
Ing. Piero Pozzati (Italia) (1995)  
Ing. Jorge Santos (Bahía Blanca, Rep. Arg.) (1997)  
Ing. Angelo Miele (Estados Unidos) (1997)  
Ing. Jorge F. Rivera Prudencio (San Juan, Rep. Arg.) (1997)  
Ing. Alberto Ponce Delgado (Uruguay) (1999)  
Ing. Massimo Majowiecki (Italia) (1999)  
Ing. Thomas Paulay (Nueva Zelanda) (1999)  
Ing. Giovanni Lombardi (Suiza) (1999)  
Ing. Francisco L. Giuliani (Río Negro, Rep. Arg.) (1999)  
Ing. José A. Maza Alvarez (México) (2000)  
Ing. Alberto Bernardini (Italia) (2000)  
Ing. Carlos I. Zamitti Mammana (Brasil) (2000)

**SESIÓN PÚBLICA EXTRAORDINARIA  
Casa de las Academia Nacionales  
2 de noviembre de 2000**

**Índice**

Programa.....	7
Reglamento del Premio “Ing. Antonio Marín”.....	8
Premio “Ing. Antonio Marín”: Premiados.....	9
Palabras de apertura del acto por el señor Presidente de la Academia Nacional de Ingeniería, Ing. Arturo J. Bignoli.....	10
Palabras de recepción por el señor Académico de Número Ing. Raúl A. Lopardo.....	11
Simulación hidrológica del sistema laguna-bañados de Mar Chiquita (Córdoba-Santiago del Estero).....	15

# ACADEMIA NACIONAL DE INGENIERÍA

## PROGRAMA

Apertura del acto y entrega del diploma y medalla por el señor Presidente de la Academia Nacional de Ingeniería, Ing. Arturo J. Bignoli

Presentación del premiado por el Sr. Académico de Número, Dr. Ing. Raúl A. Lopardo

Conferencia del Dr. Ing. Andrés Rodríguez sobre el tema: "BALANCE HIDROLÓGICO LAGUNA MAR CHIQUITA Y BAÑADOS DEL RÍO DULCE"

## **PREMIO “ING. ANTONIO MARÍN”**

### **Reglamento**

**Aprobado en Sesión Plenaria el 6 de septiembre de 1999**

- Artículo 1°: El Premio “Ing. Antonio Marín”, creado por la Academia Nacional de Ingeniería para recordar a quien fuera su primer Presidente, eminente hombre público y ejemplar ciudadano, tiene por objeto servir de estímulo a un joven ingeniero argentino por nacimiento o adopción, egresado de una universidad argentina con título reconocido por el Estado.
- Artículo 2°: Para otorgar este premio, se considerarán antecedentes tales como trabajos de tesis, publicaciones y presentaciones a congresos, además de la trayectoria profesional en general.
- Artículo 3°: Los candidatos deberán ser personas de no más de cuarenta años de edad, con domicilio permanente en el país.
- Artículo 4°: El premio será anual y se otorgará al ingeniero premiado una medalla de oro o similar y un diploma que lo acredite. El premio se entregará en sesión pública.
- Artículo 5°: El Jurado para la búsqueda, la evaluación de los candidatos y la selección del mejor, será designado con la debida antelación por la Academia en sesión plenaria, debiendo producir su dictamen antes del 31 de octubre, para que el premio pueda ser otorgado dentro del año académico.
- Artículo 6°: Durante un período de tres meses cuyo principio fijará la Mesa Directiva de la Academia, el Jurado deberá cumplir sus tareas. La Academia podrá nombrar una Comisión o arbitrar otros medios para la búsqueda de candidatos, en los casos que lo crea necesario.
- Artículo 7°: El Jurado a que se refieren los artículos 5° y 6° será integrado por cinco miembros, tres de los cuales, como mínimo, serán Académicos de número o eméritos de esta Academia. Su dictamen será inapelable.
- Artículo 8°: Actuará como secretario del Jurado el Secretario de la Academia. Las decisiones serán tomadas por simple mayoría de votos, correspondiendo al Presidente el voto de desempate. La Mesa Directiva de la Academia aclarará toda duda que surja en la interpretación de estas normas y decidirá sobre cualquier cuestión no prevista en ellas y que no requiera, a su juicio, una decisión del Plenario.

## **PREMIO “ING. ANTONIO MARÍN”**

### **Premiados**

**2000** - Dr. Ing. Andrés Rodríguez

**APERTURA DEL ACTO**  
**Por el Presidente de la Academia Nacional de Ingeniería**  
**Académico de Número Ing. Arturo J. Bignoli**

Hoy vamos a entregar por primera vez el Premio que lleva el nombre de nuestro primer presidente, el Ing. Antonio Marín. Agradecemos la presencia de la hija del Ing. Marín aquí entre nosotros. El Ing. Marín fue presidente de nuestra Academia desde su fundación hasta su fallecimiento en los primeros días del año 1999. El Ing. Marín tenía una preocupación constante por promover a los valiosos ingenieros jóvenes. Estoy seguro, después de haber leído el currículum del Ing. Andrés Rodríguez, aunque yo no soy hidráulico, que el Ing. Marín hubiera estado muy conforme con que se le entregue este premio al Ing. Rodríguez.

Cuando tuve en mis manos el currículum del Ing. Andrés Rodríguez, me pareció de extraordinario y excepcional valor; me alegró muchísimo que fuese un ingeniero egresado de la Universidad Nacional de Córdoba aunque después estuvo trabajando y estudiando, coleccionando honores por el mundo; llegando a obtener también el grado de doctor en la Universidad Politécnica de Catalunya, pero además me alegra muchísimo que sea un cordobés.

Yo tengo mucho cariño por algunas universidades del interior, que conozco mucho, entre ellas está la Universidad de Córdoba, de la que desde hace unos años soy profesor en la manera que podemos ser los octogenarios: soy profesor honorario.

De modo que hoy tenemos motivos de extraordinaria alegría. Como el Ing. Rodríguez se tiene que tomar un avión que sale a las 8:45, teniendo que presentarse a las 7:45, no voy a decir nada más. La presentación del Ing. Rodríguez la va a hacer el Ing. Lopardo. Después lo vamos a escuchar al Ing. Rodríguez que es para lo que hemos venido.

Antes de cederle la palabra a Lopardo, le voy a hacer entrega al Ing. Rodríguez del diploma y la medalla que lo acreditan.

Felicitaciones.

**Presentación del Premiado**  
**Dr. Ing. Andrés Rodríguez por el Académico de Número**  
**Ing. Raúl A. Lopardo**

Señor Presidente de la Academia Nacional de Ingeniería, señor Subsecretario de Recursos Hídricos de la Nación, señor Decano de la Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba, señores Académicos, distinguidos colegas, señoras y señores.

Es para mí un honor y un placer dirigirme a Ustedes para cumplir con una nueva formalidad de la Academia Nacional de Ingeniería, como es la presentación del primer profesional galardonado con el Premio Ing. Antonio Marín, cuya serie se inaugura el presente año, en recuerdo de quien fuera el presidente de nuestra Academia desde su fundación hasta su lamentado reciente fallecimiento.

Este premio tiene por objeto reconocer y estimular a un joven y destacado profesional que haya trascendido por una actividad del más alto nivel y de carácter original en cualquiera de los campos de la Ingeniería. En este caso los miembros del Jurado han seleccionado a una de las personalidades más destacadas a nivel nacional en el campo de la ingeniería hidráulica, el Ing. Dr. Andrés Rodríguez, quien ya es considerado como un destacado exponente argentino tanto en el ámbito universitario como profesional.

Dije un honor y un placer. Es un honor porque otorgar este premio al Dr. Andrés Rodríguez prestigia a nuestra institución y a quienes integramos, y es un placer porque tengo por él un sincero y profundo aprecio personal, alimentado a lo largo de ya algunos años por encuentros siempre muy agradables a nivel humano y sumamente fructíferos a nivel profesional. Estoy inmerso, entonces, en una sensación muy especial, en la que se entremezclan el afecto, el reconocimiento científico y la nostalgia de algunos momentos ya algo lejanos y otros singularmente próximos.

Cuando en el año 1993, por tareas de Naciones Unidas visité en Barcelona a la Universidad de Cataluña, el Profesor José Dolz me informó que uno de los más notables equipos que había adquirido esa universidad en el campo de la hidráulica marítima estaba siendo puesto a punto por un brillante joven argentino. Grande fue mi alegría cuando frente a uno de los generadores de oleaje más modernos del mundo estaba la figura siempre cordial y enjundiosa de Andrés Rodríguez, a quien conocía desde sus primeras armas como ingeniero, cuando fuera becario en Córdoba de nuestro INCYTH, hoy Instituto Nacional del Agua y del Ambiente, bajo la dirección de Alfonso Pujol y posteriormente Juan H. Hopwood. Yo sabía de su interés en especializarse, pues lo había tenido de alumno en los cursos de

posgrado de la Universidad Nacional de Córdoba y no me extrañó su éxito ni me parecieron exagerados los comentarios laudatorios de sus profesores europeos.

Posteriormente, en mayo de 1997, siendo yo Jurado en una compleja serie de concursos para profesor en la Universidad Nacional de Córdoba, tuve la oportunidad de asistir a la clase por oposición que presentó Andrés Rodríguez sobre el futuro experimental de los laboratorios de hidráulica. Nos deslumbró. Sus conocimientos, su personalidad y su pasión desbordante por la hidráulica y por la universidad no dejaron dudas. Naturalmente, encabezó la terna.

En la semana pasada fue factor determinante para el siglo del XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica, desarrollado en Córdoba. Junto a su amigo y compañero de equipo, el Dr. Fabián López, hizo posible el mejor evento en su tipo por la calidad científica, editorial, profesional y hasta social. Siempre su obsesiva capacidad de enfrentar y superar problemas estuvo de manifiesto.

Pasando a aspectos formales, el Doctor Andrés Rodríguez nació en la ciudad de Córdoba en 1961 y obtuvo su diploma de Ingeniero Civil el 10 de mayo de 1985 en la Universidad Nacional de Córdoba. Tiempo después se hizo acreedor al título de Ingeniero de Canales, Caminos y Puertos del Ministerio de Educación y Ciencia de España.

Efectuó todos los cursos de doctorado en su universidad de origen, restando la defensa de su tesis, para continuar en una destacada universidad extranjera. Así, en septiembre de de 1997 alcanzó el grado de Doctor en Ciencias de la Ingeniería en la prestigiosa Universidad Politécnica de Cataluña, con la máxima calificación “apto cum laude por unanimidad”.

Su Tesis Doctoral titulada “Un estudio experimental de la hidrodinámica en la zona de rompientes” presentada al Programa Ciencias del Mar tuvo una calidad excepcional. Tal es así que fue publicada en forma de libro por el International Center for Coastal Resources, en tres generosos volúmenes editados en Barcelona.

Desarrolla una actividad docente de alta jerarquía. Es Profesor Titular del Departamento de Hidráulica de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba, por concurso, desde 1997. Es Profesor Investigador Categoría I de la Secretaría de Políticas Universitarias de España. Llegó al máximo cargo en Córdoba no por generación espontánea, sino luego de una excelente y gradual carrera docente, que iniciara en 1981 como ayudante alumno y continuara como auxiliar docente, jefe de trabajos prácticos, profesor adjunto y docente autorizado. En la Universidad

Politécnica de Cataluña fue primero profesor asociado, profesor ayudante con dedicación exclusiva y finalmente profesor visitante, ya de regreso en la Argentina.

Hoy es Director del Laboratorio de Hidráulica y Director de la Maestría en Ciencias de la Ingeniería de la Universidad Nacional de Córdoba.

Ha participado dentro de su especialidad en numerosos proyectos de investigación y desarrollo: en su primera etapa nacional, se dedicó a temas tales como hidráulica de ríos de montaña, flujo macrorrugoso y conservación ambiental de lagos y embalses. En España, con el Profesor Sánchez-Arcilla, tuvo una fuerte especialización en el campo marítimo y costero, trabajando en diversos temas contaminantes, flujos geofísicos, modelación de puertos y costas, transportes de sedimentos, calidad de aguas costeras, corrientes litorales y simulación numérica.

Al retorno al medio local, tuvo especial atención a temas como la modelación de la calidad de agua en lagos, simulación hidrológica del sistema de Mar Chiquita, recursos hídricos para suministro de agua potable en centros urbanos y actualmente al estudio de la hidrodinámica, eutrofización y evolución de la calidad de agua para el Gran Córdoba.

Sus numerosas publicaciones internacionales forman parte de la bibliografía especializada en las más importantes revistas científicas del exterior. Es autor de diez publicaciones en revistas internacionales de la especialidad con referato, veinticinco artículos en Memorias de Congresos y Simposios Internacionales con comité de evaluación, quince<sup>3</sup> artículos en ese tipo de eventos sin evaluación previa, un trabajo de divulgación y cuatro presentaciones tipo póster en reuniones internacionales. Es autor de nueve publicaciones en Congresos Nacionales en cuarenta y cinco informes técnicos o académicos sobre temas de los diversos campos en los que Andrés Rodríguez ha incursionado.

Asistió, participó y expuso en más de cincuenta reuniones técnicas tales como seminarios, congresos, cursos, talleres, jornadas, y encuentros, en el país y en el exterior. Es además desde 1997 Investigador Asociado del Instituto Nacional del Agua y del Ambiente. Ha dirigido y dirige numerosas tesis de doctorado y maestría, dando un ejemplo notable en su preocupación por la formación de recursos humanos en la especialidad.

Su actividad profesional, prolongada y fructífera, puede ser resumida en cuatro rubros: experto en ingeniería costera y marítima, consultor de ingeniería hidráulica y ambiental, investigador experimental y teórico en mecánica de fluidos aplicada y fundamentalmente docente dedicado con alma y vida a los temas universitarios.

Su éxito y renombre actual están íntimamente ligados a una característica distintiva de Andrés Rodríguez en el contexto de la ingeniería local: su lucha ineludible por un postgrado serio y del más alto nivel en el país.

En un brevísimo resumen, el Dr. Ing. Andrés Rodríguez es un relevante profesional de la Ingeniería moderna, un destacado docente universitario, un joven maestro formador de especialistas, un hombre comprometido con el medio ambiente y con la sociedad y un ser humano de excepcionales cualidades personales.

# BALANCE HIDROLÓGICO LAGUNA MAR CHIQUITA Y BAÑADOS DEL RÍO DULCE

Dr. Ing. Andrés Rodríguez

## RESUMEN

El sistema hidrológico de Mar Chiquita y los Bañados del río Dulce es un ecosistema único en la región, está constituido por la mayor laguna salada de Argentina (Mar Chiquita o Mar de Ansenusa) y humedales (Bañados del río Dulce) de gran extensión. Este sistema se caracteriza por su alta complejidad y si bien existen numerosos antecedentes hidrológicos sobre el mismo, su gran mayoría está disperso lo que no permite disponer de un conocimiento profundo e integrado de su funcionamiento.

Para la realización del presente estudio se continuó la recopilación de una gran cantidad de información hidrometeorológica, la cual fue depurada, rellena y utilizada para simular la evolución de Mar Chiquita a lo largo del período de análisis. Dicha información consistió en series de precipitación, evaporación, temperatura y viento en la región NO de Córdoba y S de Santiago del Estero, al igual que series de niveles y caudales en los principales tributarios a la laguna, y series de mediciones del nivel medio mensual del espejo lagunar. De esta manera se completó un conjunto de información consistente que permitió la realización de un balance hidrológico a paso semestral y anual para los últimos 30 años cubriendo períodos secos, medios y ricos desde el punto de vista de los aportes hídricos.

Los resultados de la simulación numérica del modelo de balance (*"Lambda 1"*) permitieron conocer mejor el funcionamiento de este complejo sistema eco-hidrológico brindando una base sólida para la toma de decisiones y una mejor gestión de los recursos hídricos de esta región. Esto tiene particular utilidad, al analizar los efectos que pueden generar distintos aprovechamientos en estudio o desarrollo sobre el sistema de Mar Chiquita y los Bañados del río Dulce.

El área de estudio está ubicada en la región central de Argentina, involucra el sistema cerrado con la laguna salada más grande del país, e incluye las cuencas de aporte de los ríos Dulce, Suquía y Xanaes alcanzando una superficie total cercana a los 75.000 km<sup>2</sup> (ver Figura 1).

La Laguna Mar Chiquita o Mar de Ansenusa, tiene un área actual cercana a los 6.000 km<sup>2</sup>, y está caracterizada por su poca profundidad, del orden de los 10 m y extensos bañados al N con una alta biodiversidad (ver e.g. Bucher 1992, Reati et al. 1997, UNC 1998).

El río Dulce es el principal tributario y su cuenca involucra parte de las provincias de Salta, Tucumán, Santiago del Estero y Córdoba. El aporte superficial de los ríos Suquía y Xanaes es de menor importancia, como se demostrará en el presente

trabajo, llegando a ser en períodos de sequía sólo esporádico. Sus cuencas de aporte se localizan íntegramente en la provincia de Córdoba.

El principal problema radica en que no se conoce en profundidad la mecánica de funcionamiento de este complejo y extenso sistema hidrogeológico, principalmente por las pocas mediciones sistemáticas de muchos de los parámetros físicos involucrados.

Existen numerosos antecedentes hidrológicos sobre este sistema, pero su gran mayoría está dispersa en forma de informes técnicos inéditos. Entre estos trabajos se pueden mencionar: CADNE 1979/82, CIHRSA 1979/82/83/90, CCRSD 1982, CRD 1984, CFI 1965/77/91, PERD 1982, Micheluti 1994/96.



**Figura 1: Área de localización de la Laguna Mar Chiquita y Bañados del río Dulce**

## Avances en el Modelo LAMBDA

En las últimas dos décadas se han realizado simulaciones hidrológicas del sistema de Mar Chiquita, algunas de las cuales, han constituido el punto de partida del presente trabajo y han permitido plantear escenarios más complejos.

Este modelo consiste básicamente en un balance de “caja” entre el agua que entra y sale del sistema Laguna – Bañados por unidad de tiempo.

El algoritmo original surgió del Estudio del Sistema Hidrológico Laguna Mar Chiquita (Rodríguez y otros, 1990) llamado aquí **Lambda 0** (**L**aguna y sus **A**sociaciones: **M**odelo de **B**alance **D**ulce - **A**nsenuza), y fue el punto de partida para simular el sistema.

El modelo Lambda fue escrito originalmente bajo el formato de FORTRAN 77, luego compilado a FORTRAN 97 y en sus últimas versiones fue adaptado al formato VISUAL FORTRAN.

- 1983: “Simulación hidrológica parcial” (CIRSA, 1987). Hidrología para el dique el Sauzal, en las que se asumen como hipótesis, reducciones de caudal aguas abajo de Los Quiroga.
- 1990: “Simulación hidrológica inicial” por ELTECH y CIRSA, (Rodríguez y otros 1990). Simulación hidrológica de la Laguna Mar Chiquita sin considerar los Bañados del Río Dulce en el período 1967-1987. **Modelo Lambda 0.**
- 1998: “Simulación hidrológica completa preliminar” (UNC, 1998). Simulación hidrológica de la Laguna Mar Chiquita, incorporando los bañados del Río Dulce, en el período 1967-1997. **Modelo Lambda 1.**
- 1999-2000: “Simulación hidrológica completa actual”. Simulación hidrológica del sistema de Mar Chiquita, considerando el mismo subdividido en subsistemas (**Modelo Lambda 2.**).

En los párrafos siguientes se realizó una revisión de la estructura en las distintas etapas que ha pasado el modelo LAMBDA.

### Estructura del modelo LAMBDA 0 de ELTECH / CIHRSA

El modelo LAMBDA 0 planteaba un balance hídrico sólo en la Laguna Mar Chiquita. Este modelo consideraba los siguientes componentes.

**Entradas:** 1) Aporte de los ríos tributarios principales a la Laguna (ríos Dulce, Primero y Segundo), obtenidos a partir de niveles observados en secciones de control próximas a la desembocadura de cada tributario. Los caudales del río Dulce en Paso de la Cina (QPC), se calcularon por regresión múltiple con los caudales erogados en Los Quiroga, con un retardo de 30 y 60 días, ajustados con datos de aforos y niveles en Paso de la Cina (CFI, 1982).

2) Precipitación pluvial sobre la Laguna, calculada como la media a partir de tres polígonos de Thiessen ponderada para un nivel fijo de Laguna (adoptando el nivel medio del periodo simulado). Las series utilizadas correspondieron a las estaciones de Morteros, Marull, Miramar, Balnearia, La Rinconada y El Mistolar, (Rodriguez y otros, 1990)

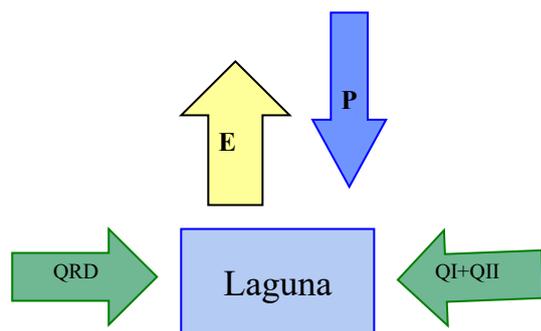
**Salidas:** Evaporación en la Laguna, calculada a partir de correlaciones entre mediciones existentes en Miramar y datos de temperaturas medias mensuales. (Rodriguez y otros, 1990)

**Balance:** Volumen de agua en la laguna Mar Chiquita, considerando variaciones de niveles en Miramar y batimetría realizada por el CIHRSA entre cotas 66 y 71 m s.n.m. En este modelo se consideró la ecuación de balance de masa sólo para la laguna, siguiendo la forma (Rodriguez y otros, 1990):

$$\Delta V = (Q_i + Q_e) \cdot \Delta t$$

Donde:  $Q_i$ : Caudal que ingresa al sistema;  $Q_e$ : Caudal que egresa del sistema;  $\Delta V$ : Variación de volúmenes;  $\Delta t$ : Variación de tiempo.

**Periodo de modelación:** 1967-1987, adoptando un paso de cálculo anual.



**Figura 2: Diagrama esquemático del modelo LAMBDA 0. QRD: caudal río Dulce; QB: caudal bañados; QI: caudal río Primero; QII: caudal río Segundo; E: Evaporación y P: Precipitación.**

1 Estructura del modelo LAMBDA 1 (UNC 1998, Rodriguez y otros 1999)

El modelo LAMBDA 1 planteó, también, un balance hídrico sólo en la Laguna Mar Chiquita pero teniendo en cuenta los Bañados en forma simplificada y constante. Este modelo considera los siguientes componentes.

**Entradas:** 1) Aporte de los ríos tributarios principales a la Laguna (ríos Dulce, Primero y Segundo). Los caudales en los ríos Suquia y Xanaes, se calcularon por regresión múltiple entre los caudales resultantes de series de niveles diarios observados en las estaciones de río Primero

(Suquia) y Campo Plujunta (Xanaes), caudales observados aguas arriba y precipitaciones en la cuenca media y baja. En el río Dulce, se completaron los datos de descargas en Río Hondo en la serie disponible y se incorporaron datos diarios y mensuales en Los Quiroga.

2) Precipitación pluvial ponderada sobre la Laguna en función del nivel y considerando seis sectores cardinales (N-E-SE-S-SW-W), a partir de 20 estaciones de medición. (Hillman y otros 2000)

**Salidas:** Evaporación en la Laguna, calculada a partir de predictores calibrados con valores medidos en Miramar. La serie definitiva se corrigió por salinidad mediante funciones empíricas, de Salinidad - Volumen. La evapotranspiración en los Bañados, se calculó mediante la fórmula de Blaney-Cridley (Chow *et al.*, 1994, Pagot, 1999 y Pagot y otros 2000)

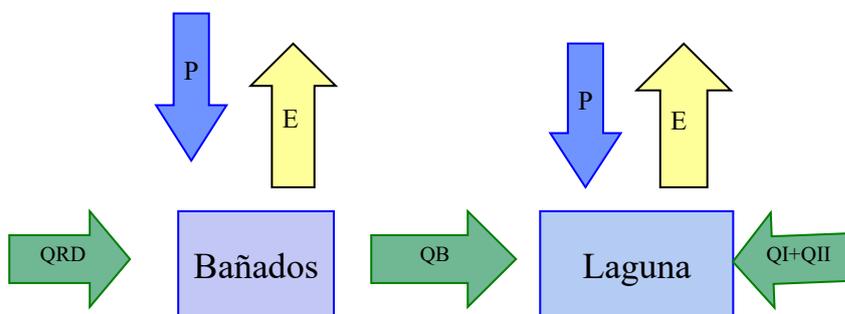
**Balance:** Se determina el volumen de agua en la Laguna Mar Chiquita. La ecuación de balance de masa para la Laguna, considera la presencia de los Bañados en forma simplificada donde se incorpora una función empírica del área de Bañados obtenida por correlación múltiple entre los caudales desbordados del río Dulce, niveles de la Laguna y precipitación: (Hillman y otros 2000)

$$\Delta V = \sum Q_i \cdot \Delta t + A_L \cdot (P_L - E_L) \Delta t + A_B \cdot (P_B - EVT_B) \Delta t - Q_e \cdot \Delta t$$

Donde: *A*: Área; *P*: Precipitación; *E*: Evaporación; *EVT*: Evapotranspiración. El subíndice *L* se refiere a la Laguna y *B* a los Bañados.

El área de la Laguna se calculó a partir de niveles medidos en diversas fuentes, cubriendo el período 1967-1997 y funciones geométricas de la laguna recalculadas a partir de las batimetrías del CIHRSA (1976) y 6 imágenes satelitales, extendiendo y mejorando su rango de precisión, incluyendo la máxima cota registrada de 71,4 m s.n.m. en Junio de 1987.

**Periodo de modelación:** 1967-1997, con un paso de cálculo semestral.



**Figura 3: Diagrama esquemático del modelo LAMBDA 1.**

#### 1.1.1.1 Estructura del modelo LAMBDA 2 (Rodriguez et al., 2000 y 2001)

El modelo LAMBDA 2 planteó el sistema dividido en tres subsistemas (Laguna – Bañados – Río). Se presenta como eje central, el balance hídrico del sector sur, en la Laguna Mar Chiquita. Este modelo consideró los siguientes componentes (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**):

**Entradas:** 1) Aporte de los ríos tributarios principales (ríos Dulce, Primero y Segundo). Los caudales en el río Suquia y Xanaes, fueron los utilizados en **Lambda 1**. En el río Dulce, se realizó un análisis de las series existentes de las secciones ubicadas aguas abajo de Río Hondo, incorporándose datos diarios que permitieron cuantificar en forma preliminar el amortiguamiento y el traslado que sufren los hidrogramas al transitar por el río y los Bañados hasta el ingreso a la Laguna Mar Chiquita.

2) Precipitación pluvial sobre la Laguna, los Bañados y la región media del río Dulce aguas abajo de Río Hondo ponderada por el método de Thiessen en cada sector analizado. La precipitación ponderada en el perímetro lagunar en función del nivel de la misma se consideró como promedio de 23 estaciones agrupadas en ocho sectores cardinales (N-NE-E-SE-S-SW-W-NW).

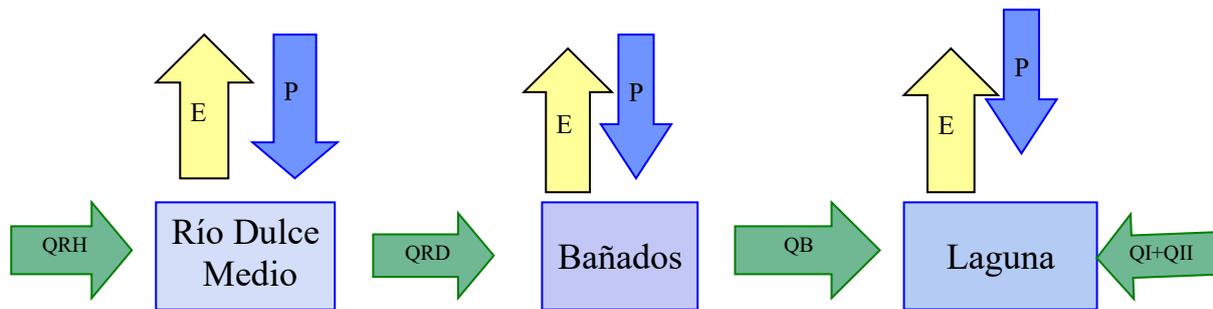
**Salidas:** Evaporación y evapotranspiración en la Laguna y los Bañados respectivamente. Se calcularon dos series de evaporación a partir de predictores calibrados con valores medidos en Miramar y La Rinconada (Pagot, 1999), ubicadas en el subsistema Laguna. La serie definitiva se calculó a partir de una combinación de ambas series en función del área de la Laguna con coeficientes de ponderación variables y se corrigió por salinidad mediante funciones empíricas relacionadas con el volumen de la Laguna. En la zona de Bañados se calcularon series teóricas en los mismos sectores definidos para la precipitación.

**Balance:** Volumen de agua en la Laguna Mar Chiquita, el cual se refleja en un nivel (cota) del lago y el grado de salinidad de sus aguas asociado. La ecuación de balance de masa para la laguna, considera la presencia de los bañados regulando los caudales que ingresan el subsistema sur.

$$\Delta V = \sum Q_i \cdot \Delta t + A_L \cdot (P-E) \cdot \Delta T - Q_e \cdot \Delta t$$

Se utilizaron los niveles de la Laguna diarios del modelo Lambda 1, con los cuales se corrigieron y completaron los valores mensuales necesarios. Se realizó un análisis multitemporal a partir de la incorporación y el análisis de más imágenes satelitales (LANDSAT 5 y 7), definiendo nuevas funciones matemáticas entre las áreas medidas, los niveles y la batimetría de la Laguna. Esto permitió corregir las funciones geométricas calculadas en el modelo Lambda 1, incorporando 8 planos batimétricos adicionales.

**Periodo de modelación:** 1967-1997, con paso de cálculo semestral y trimestral.



**Figura 4: Diagrama esquemático del modelo LAMBDA 2. QRH: caudal erogado por el Dique Río Hondo.**

### HIPÓTESIS ADOPTADAS

El modelo conceptual del Sistema de Mar Chiquita considerado en este trabajo (*Lambda 2*) incluye los siguientes componentes hidrológicos:

- Cuerpo de la Laguna • Área de Bañados del río Dulce
- Tributarios principales: Río Dulce  
Río Suquía o Primero  
Río Xanaes o Segundo
- Aportes superficiales por Precipitación
- Pérdidas superficiales por Evaporación y Evapo-transpiración
- Extracciones de caudales en los tributarios.

Se observa, que la interacción con el agua subterránea no se incluyó en esta etapa.

Los caudales de extracción al sistema fueron supuestos nulos durante el proceso inicial de modelación y variables entre 4 y 60 m<sup>3</sup>/s durante las simulaciones numéricas.

Los intervalos temporales utilizados han variado, según el caso simulado, de paso mensual a pasos semestral y anual. Los resultados finales se presentan con intervalo semestral, por ser el intervalo más adecuado de acuerdo a las dimensiones del sistema físico y a la calidad de los datos disponibles.

El modelo hidrológico desarrollado ha sido utilizado para simular el período 1967 – 1997. Este período se corresponde con el conjunto de datos completos obtenidos, lo cual permite el ajuste de los distintos grados de libertad del sistema. La variable limitante, ha sido los niveles de la laguna.

Para este complejo sistema hidrológico se han identificado numerosas incertidumbres y grados de libertad posibles, destacándose los siguientes:

- La reducción de caudales del Río Dulce en el tramo desde aguas abajo del Dique de Los Quiroga hasta la Laguna Mar Chiquita.  
Estos valores de reducción de caudales del río Dulce, se han obtenido al ajustar el modelo en cada paso temporal, asumiendo todas las otras variables conocidas. Estos caudales se han comparado con los escasos datos de caudales medidos en el tramo, siendo los datos disponibles

caudales diarios, medios y altos (entre 50 y 400 m<sup>3</sup>/s) en un período de tres meses durante 1982 en Los Telares (Santiago del Estero), y caudales, medios y bajos (entre 0 y 50 m<sup>3</sup>/s) para 19 meses comprendidos entre 1971 y 1973 en Paso de la Cina (Córdoba).

- Área de bañados: en *Lambda 1* se incluye una función  $A_B(P,Q,H)$ , a diferencia de *Lambda 0* (1990). (En *Lambda 2* se mejorarán aún más las aproximaciones al área de bañados, incorporándose los resultados obtenidos por Pagot (1999))
- Estimadores de evapotranspiración para el área de los bañados: Thornwhite, Blaney-Criddle, seleccionándose el segundo método.
- Estimadores de evaporación para la Laguna: Lungeon y Meyer, seleccionándose el primero, y adicionándosele la corrección en la evaporación por presencia de salinidades variables.
- Reducción del caudal del Río Suquía desde estaciones hidrométricas cercanas a la laguna (Río Primero y La Para) hasta la misma.
- Reducción del caudal del Río Xanaes desde estaciones hidrométricas cercanas a la laguna (Campo Plujunta y Arroyito) hasta la misma.

La cantidad elevada de incertidumbres y grados de libertad con los cuales se ha debido trabajar, demuestra que la tarea de simulación no ha sido trivial. Esto conduce a afirmar que se necesitan muchos más datos hidrológicos del sistema y que, con los datos que se ha contado, los mejores resultados son los que se presentan en este estudio.

Por otra parte, las variaciones de volumen se han calculado a partir de la serie de niveles medida y las correspondientes funciones geométricas Área (nivel) y Volumen (nivel).

### **METODOLOGÍA EMPLEADA EN LA SIMULACIÓN INICIAL CON EL MODELO “LAMBDA 1”** (Rodríguez y otros 1999, Rodríguez y otros 2000 y Rodríguez et al 2001)

La estrategia adoptada para la utilización del modelo, consistió básicamente en tres procesos de cálculo. Los mismos se describen a continuación:

- a) En la ecuación de balance hídrico (ecuación 1) se ha despejado  $Q_{ing.Río Dulce}$ , que constituye el caudal medio semestral que ingresa a la laguna por el Río Dulce, asumiendo conocidos todos los otros términos de la ecuación en el período de análisis 1967-1997. Esta forma de estimar los aportes del Río Dulce a la laguna, se prefirió, frente a otras opciones, dada la gran incertidumbre en las pérdidas aguas abajo del dique Los Quiroga, ante la carencia de datos completos.

La utilización de los pocos datos disponibles en Los Telares (3 meses (1982)) y Paso de la

Cina (17 meses entre 1971-1973) constituye alguna de las tareas a desarrollar en Trabajos Futuros, y que requerirán un análisis conjunto por subsistema (entre Los Telares y Paso de la Cina).

- b) Con la serie de aportes del Río Dulce obtenida en “a”, para el período en el cual se dispuso de todos los otros datos, se procedió a simular la evolución de la laguna, para distintos escenarios de extracción ( $Q_{ext}$ ,  $0$ ), siendo en este caso el volumen, la incógnita calculada, con la condición  $V \neq 0$ .

La comparación de los aportes a la laguna obtenida en “a” y los caudales del Río Dulce en Los Quiroga, arrojó resultados cualitativamente aceptables, restando como trabajo futuro su análisis en profundidad. Esto se debe, entre otras razones, a la menor escala temporal necesaria para este análisis, la que se debería reducir a un intervalo mensual, por lo menos.

- c) En este proceso de cálculo se han tenido en cuenta algunos términos no lineales, los cuales fueron resueltos en forma iterativa. Por ejemplo, el Área y la Salinidad, que al ser incógnitas en un instante “ $t_i$ ”, se calculan inicialmente con el valor del instante “ $t_{i-1}$ ” (o sea el paso temporal anterior) hasta que el resultado converja a una diferencia menor que una tolerancia arbitraria.

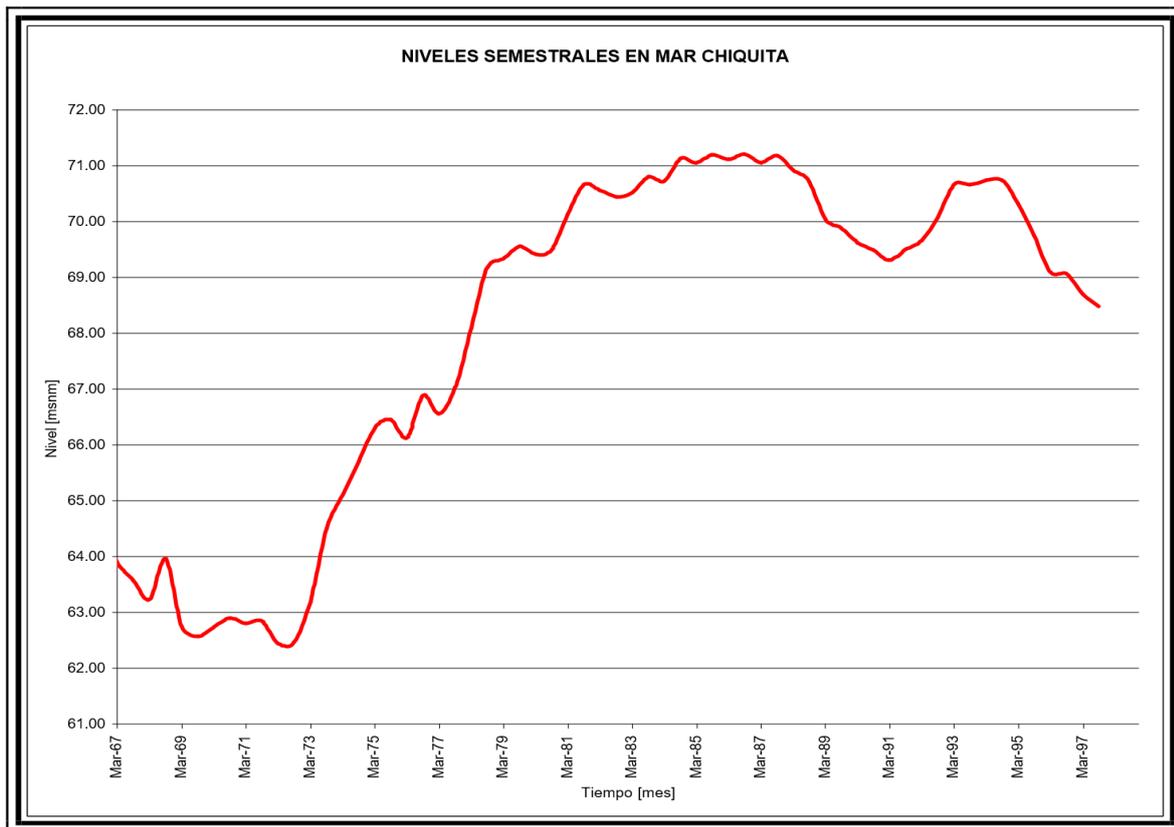
## **Variables intervinientes en la simulación hidrológica de Mar Chiquita**

### **Niveles de la Laguna Mar Chiquita**

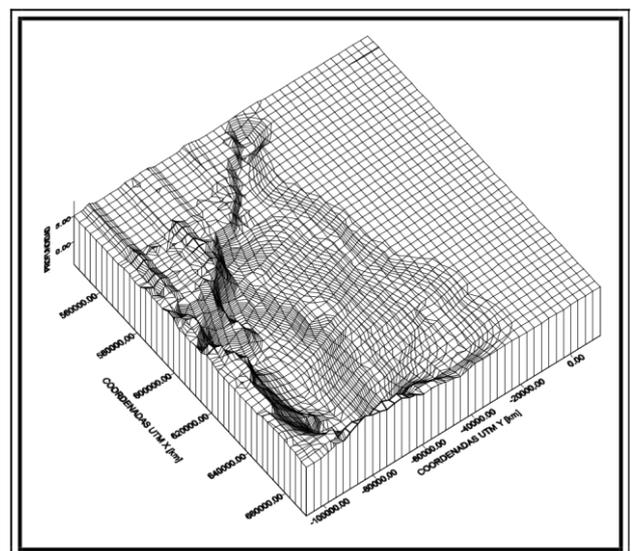
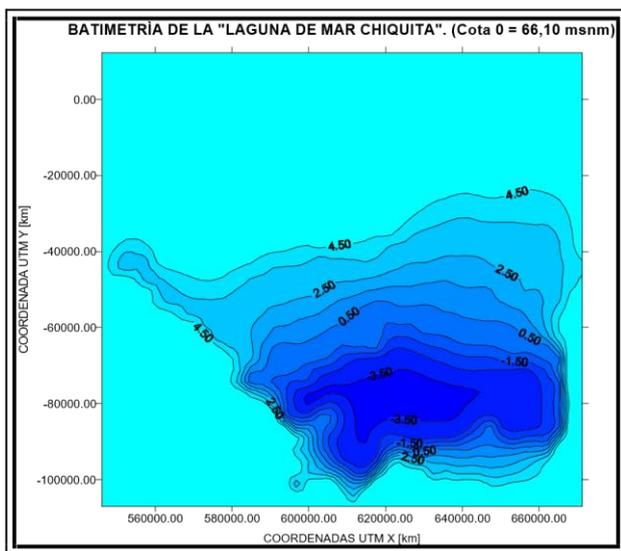
Los niveles fueron medidos en Miramar por la D.A.S. (Provincia de Córdoba). Estas series fueron previamente corregidas por cambios de cero de escalas. Se adoptaron en este trabajo niveles medios mensuales para evitar la influencia de efectos puntuales del viento (“wind set up” que puede afectar en más de 1,0 m las lecturas diarias).

La disponibilidad de niveles medidos desde 1967 a 1997 (Figura 5) ha permitido la simulación del modelo en este período, al cerrar la ecuación de balance de masa por ser todos sus términos conocidos.

Las funciones geométricas de la laguna fueron mejoradas y extendidas, partiendo de las campañas batimétricas realizadas por el CIHRSA (1979) y completadas con 6 imágenes satelitales adicionales. Las mismas correspondieron a los años 1972, 1976, 1981, 1986, 1993 y 1997, cubriendo períodos de niveles bajos, medios y altos de la laguna. EL modelo digital de elevaciones resultante se presenta en el Figura 6.



**Figura 5: Niveles medios semestrales utilizados en el Balance Hídrico de Mar Chiquita (“Lambda1”)**



**Figura 6: Geometría de la Laguna Mar Chiquita**

### Aportes por precipitaciones

Los aportes correspondientes a las precipitaciones se han obtenido a partir de series pluviométricas, generadas en seis subseries, correspondientes a distintos puntos del contorno de la laguna (e.g. N, S, E, O, SE y SO) las cuales se conformaron a su vez

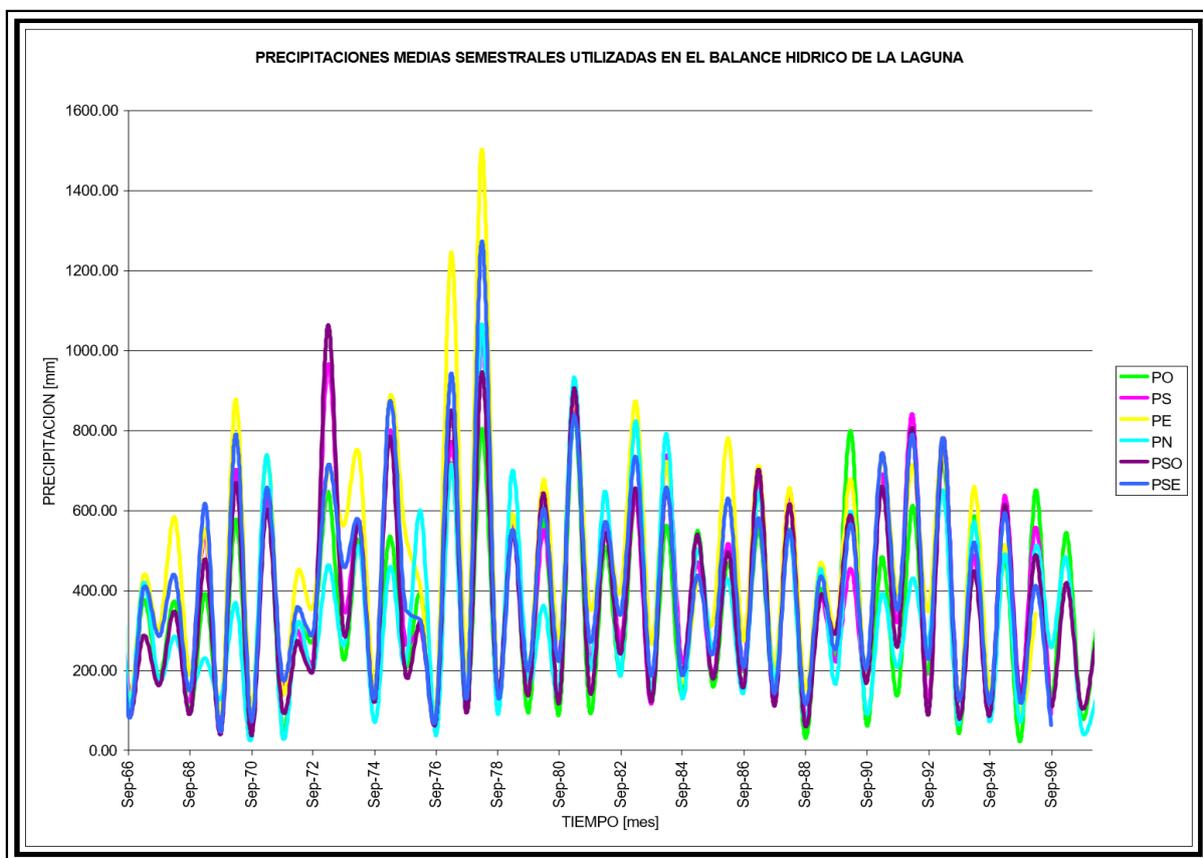
a partir de series medidas por la D.A.S. en numerosas estaciones pluviométricas ubicadas en el contorno de la laguna.

Como aspecto novedoso, el cálculo de la precipitación media areal (**P**), considera la influencia relativa de cada subserie en función del área ocupada por la laguna mediante una expresión de la forma,

$$P = a_N(h) P_N + a_S(h) P_S + a_E(h) P_E + a_O(h) P_O + a_{SE}(h) P_{SE} + a_{SO}(h) P_{SO} \quad (2)$$

con  $Sa_i = 1$ , donde los coeficientes se han obtenido utilizando el método de polígonos de Thiessen.

En la Figura 7 se pueden apreciar las precipitaciones medias semestrales utilizadas en el balance hídrico de Mar Chiquita.



**Figura 7: Precipitaciones medias semestrales utilizadas en el modelo de balance “Lambda 1”**

### **Pérdidas por Evaporación considerando variaciones de Salinidad en la Laguna**

El cálculo de la evaporación se realizó a partir de medidas directas en tanque en Miramar por parte de la D.A.S. (con un factor de corrección de tanque = 0,7), y el cálculo mediante la expresión de Lungeon utilizando datos meteorológicos medidos en los períodos de falta de medidas directas de evaporación. En los intervalos sin medidas meteorológicas se utilizaron series equivalentes generadas a partir de los valores medios mensuales medidos en Miramar.

Otro aspecto novedoso de *Lambda 1* por sobre los antecedentes anteriores fue la corrección de la evaporación en función de las variaciones de salinidad. La cual se determinó mediante la siguiente expresión:

$$EVP_c = EVP (2 - r)$$

donde *r* es la densidad del agua de la laguna, la cual se calcula mediante la siguiente expresión empírica obtenida a partir de datos medidos (Figura 5):

$$r = 0,0007 S + 1$$

donde *S* es el contenido de sales totales disueltas en el agua de la laguna expresada en gr/l.

La serie de Evaporación resultante se presenta en el Figura 9. Mientras que en la Figura 8 se presenta la variación de la concentración de sales totales disueltas con respecto al volumen de la Laguna Mar Chiquita.

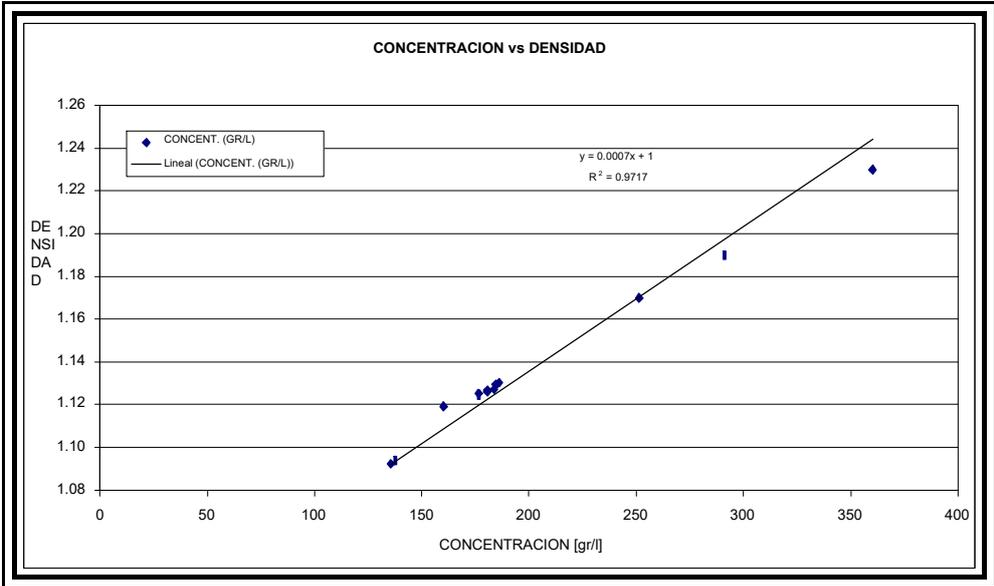
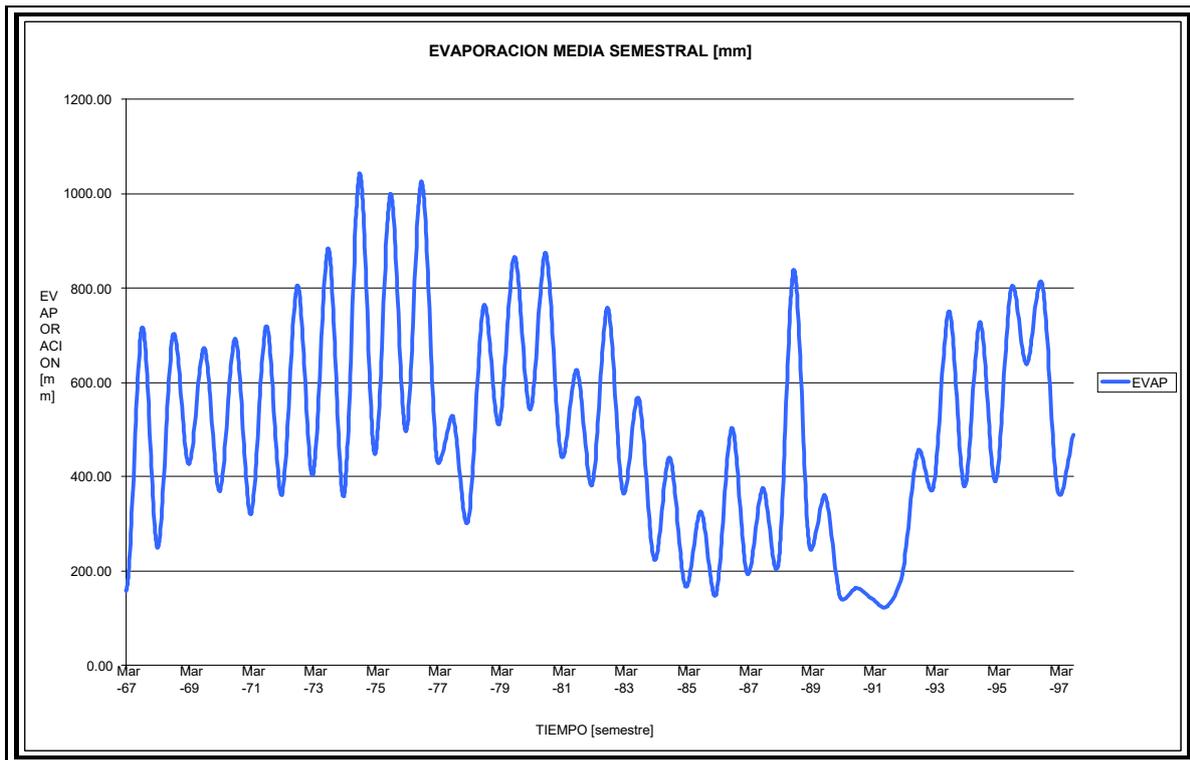
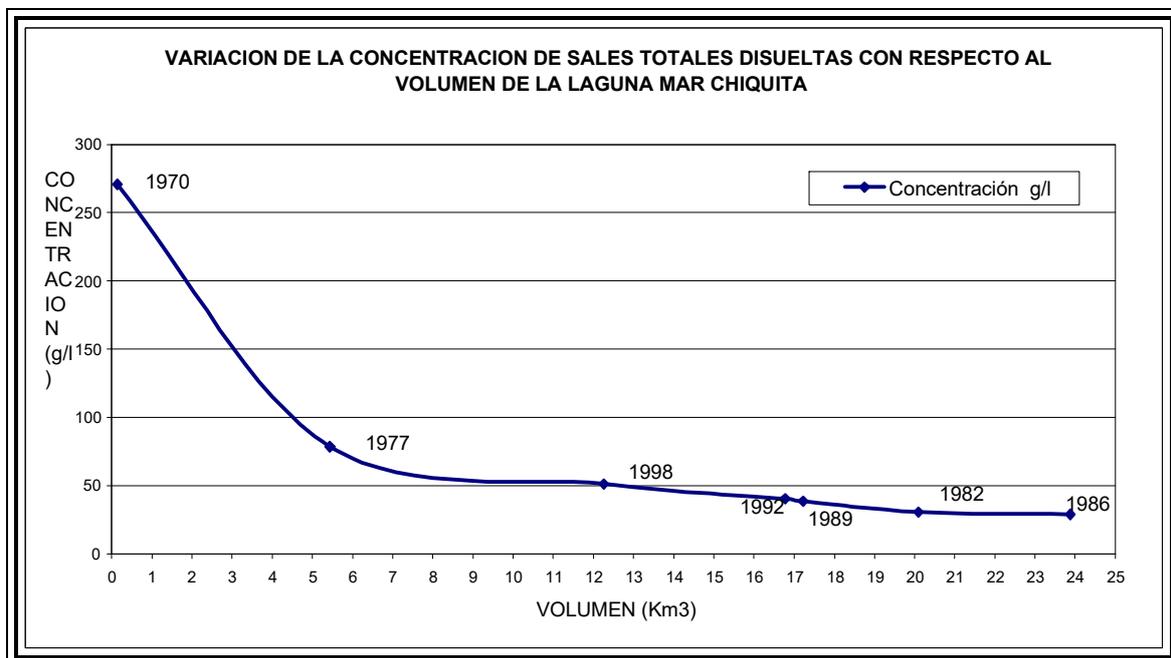


Figura 8: Correlación Densidad Vs Concentración



**Figura 9: Evaporación media semestral utilizada en el Balance Hídrico de Mar Chiquita (“Lambda 1”)**



**Figura 10: Concentración vs Volumen**

Este contenido de sales totales disueltas **S** se obtuvo (como un resultado original) a partir de una relación experimental que combina las mediciones directas de **S** y los volúmenes **V** correspondientes a las fechas de los muestreos (Figura 10). Estas

funciones se incluyeron en el modelo para efectuar en forma automática las transformaciones directas e inversas:

$$V = F(S), \quad S = F^{-1}(V)$$

Siendo:

$$S = F^{-1}(V) = -0.000279176779052426 \times V^5 + 0.0229367892425845 \times V^4 - 0.720388264772665 \times V^3 + 10.7633494977928 \times V^2 - 78.2124396575967 \times V + 277.363983579691$$

### Pérdidas por Evapotranspiración

El cálculo de la evapotranspiración se realizó utilizando la expresión de Blaney-Cridle calibrada para la latitud de la laguna, vegetación tipo pastizal, y coeficientes para el hemisferio Sur. La misma se aplica a la zona de los bañados del Río Dulce y el perímetro de la laguna para períodos de la laguna altos (e.g. niveles superiores a 69 m aproximadamente).

Como se presenta en UNC (1998), el área de los bañados se calculó a partir de una mejora de la función propuesta por el PERD (Cortés et al., 1983), de la siguiente forma

$$A_B = a Q_{RD} + b P_N + g H_L$$

donde la superficie de los bañados  $A_B$  fue obtenida a partir de 7 imágenes satelitales entre 1975 y 1979, y correlacionada con los caudales máximos erogados por el Dique Los Quiroga ( $Q_{RD}$ ), las precipitaciones en la región al norte de la laguna ( $P_N$ ), y el nivel de base de la laguna ( $H_L$ ). Las variables involucradas fueron convenientemente adimensionalizadas, para ello se utilizó un área de bañados mínima de 800 Km<sup>2</sup>, la media de la precipitación Norte, un cierto caudal de desborde y, un nivel de base de la laguna que contribuya en forma significativa a los desbordes adoptado como 69 m.

**Tabla 1: Área de Bañados del río Dulce, niveles de la Laguna Mar Chiquita, Caudales en Los Quiroga y precipitación en la región norte.**

Fecha	Sup. Inun. *1000 ha	Niveles [msnm]	LQ(sal) [m3/s]	precip. N [mm]	niv. Adim	LQ adim	precip adim prom
Mar-75	50	66.30	99.56685	459.00	0.967883	1.244586	1.900059
Sep-75	44	66.45	68.49333	214.00	0.970073	0.856167	0.885866
Mar-76	125	66.12	171.8278	599.00	0.965255	2.147847	2.479598
Sep-76	350	66.88	39.78243	37.00	0.97635	0.49728	0.153164
Sep-77	850	67.02	138.2805	109.00	0.978394	1.728506	0.451212

Sep-78	930	69.20	37.85444	95.00	1.010219	0.473181	0.393258
Sep-79	939	69.57	132.0533	178.00	1.01562	1.650667	0.736842

Con estas hipótesis la regresión lineal múltiple ajusta razonablemente las áreas de los bañados con  $R^2 = 0,88$  y  $R_{aj}^2 = 0,76$ , pudiéndose generar una serie de valores semestrales de Área de bañados abarcando el período 1967-1997. Esta función empírica ha sido mejorada, estando los resultados contenidos en Pagot (1999).

### **Caudales del Río Dulce**

Los caudales del Río Dulce corresponden a los erogados medios por el Dique de Los Quiroga. Estas series se han obtenido desde 1975 a 1997 a partir de datos disponibles a nivel diario. En el período 1967 a 1974 se obtuvieron a partir de correlaciones con datos medios semestrales obtenidos de ELTECH (Rodríguez y otros, 1990). Los caudales utilizados en las simulaciones corresponden a los medios semestrales.

Las series de caudales anteriores a 1967 se dispusieron a partir de los medidos aguas arriba en las estaciones de aforo de La Escuela y El Sauce mencionadas precedentemente y del embalse de Río Hondo, pero no han sido utilizadas en la simulación por no haber sido calibrado el modelo para períodos anteriores a 1967 al no disponerse de datos de niveles medidos en la laguna.

Los caudales medios semestrales utilizados, se adjuntan en la Figura 8.

### **Caudales del Río Suquía**

Los caudales medios mensuales aportados a la Laguna Mar Chiquita por el Río Suquía han sido determinados mediante la metodología siguiente:

- A partir de series de niveles diarios en la sección de aforo perteneciente a la D.A.S., ubicada sobre la localidad de Río Primero (aproximadamente a 75 km de la laguna), y caudales medidos en forma esporádica, se procedió a determinar la relación altura - caudal de la sección.
- Para extrapolar e interpolar la curva H-Q se utilizó la fórmula de Manning asumiendo régimen permanente y uniforme. Para ello se utilizó, la curva altura-área de la sección de aforo con los datos relevados del perfil transversal, se determinó el coeficiente de Manning por calibración a partir de las mediciones de caudales disponibles y se calculó la pendiente de fondo a partir del perfil longitudinal medio del río en el tramo de la sección de aforo.

En una primera etapa la serie obtenida resultó incompleta, procediéndose a completarla y expandirla. Para ello se utilizó una regresión lineal múltiple convenientemente adimensionalizada, utilizando como variables independientes el caudal medio aportado por el Río Suquía en el embalse San Roque (período 1926-1997) en la cuenca alta y, datos de precipitaciones mensuales en la cuenca baja, las cuales se correlacionaron con las medidas de la estación de Río Primero. Los caudales medios semestrales utilizados, se exponen en el Gráfico 5.

### **Caudales del Río Xanaes**

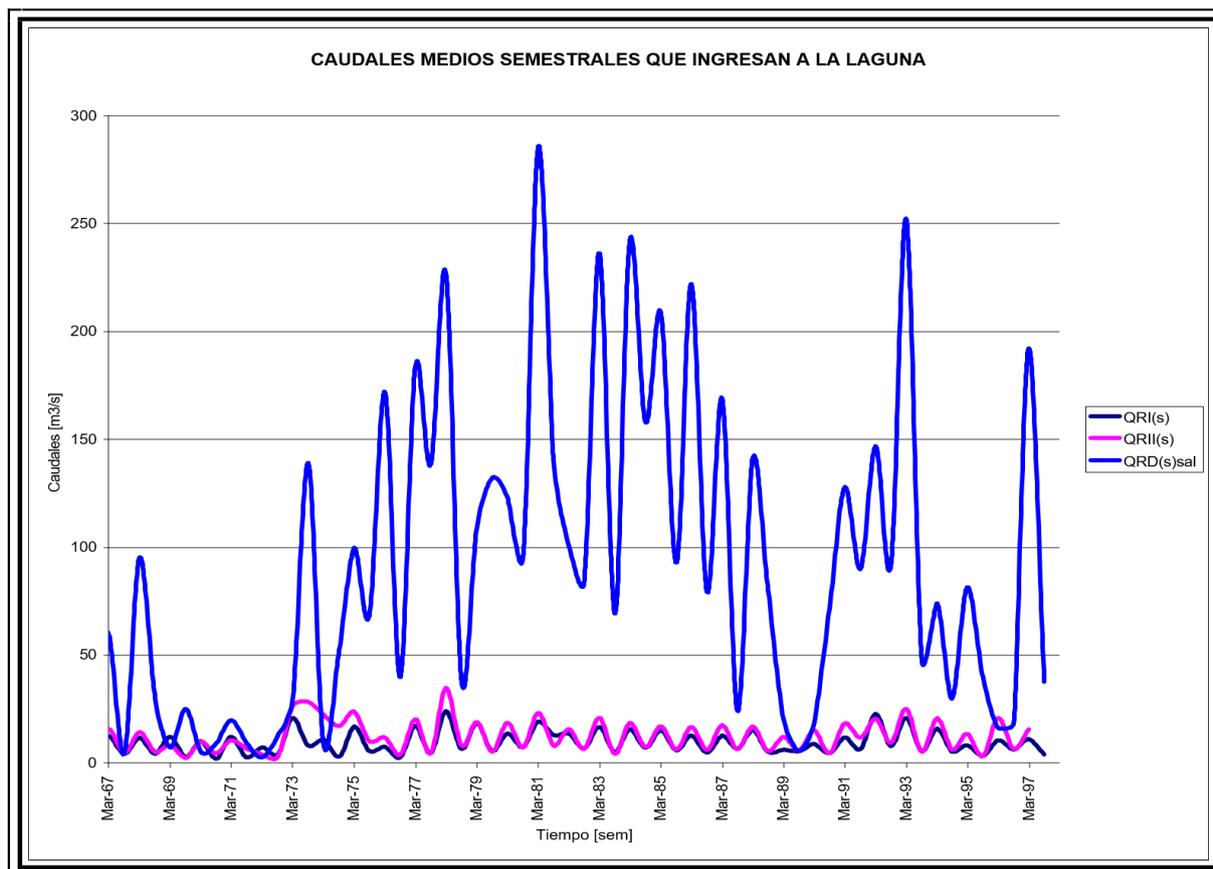
El caudal mensual aportado a la Laguna Mar Chiquita por el Río Xanaes (denominado Plujunta en las proximidades de la laguna) se determinó con la metodología siguiente:

- A partir de series de niveles diarios, correspondiente al periodo octubre 1968 – octubre 1974, en la sección de aforo perteneciente a la D.P.H (hoy D.A.S.), ubicada sobre el campo Plujunta, aproximadamente a 15 km de la laguna, y caudales medidos en forma esporádica; se procedió a determinar la relación altura-caudal de la sección, interpolando y extrapolando la misma con la fórmula de Manning asumiendo régimen permanente y uniforme.  
Para ello se determinó inicialmente, la curva altura-área para la sección de aforo con los datos relevados del perfil transversal, se evaluó el coeficiente de Manning por calibración a partir de las mediciones de caudales disponibles y se determinó la pendiente de fondo a partir del perfil longitudinal medio del río en el tramo de la sección.

En una primera etapa la serie obtenida resultó discontinua, por lo que se procedió a completarla y expandirla usando un método de regresión lineal múltiple con las variables convenientemente adimensionalizadas. La adimensionalización se realizó utilizando el caudal medio aportado por el Río Xanaes (período 1936-1997) en la cuenca media (confluencia de los ríos Los Molinos y Anizacate) y datos de precipitaciones medias mensuales en la cuenca baja.

Cabe aclarar que para realizar la correlación múltiple antes mencionada fue necesario calcular también los caudales medios mensuales correspondiente al Río Los Molinos y Anizacate (afluentes del Xanaes) en el período 1936-1997.

La serie de caudales medios semestrales en el río Xanaes que intervino en el balance hídrico modelado cubre el período 1967-1997, aunque la serie generada se extiende desde 1936 hasta 1997. Los caudales medios semestrales aportados por el río Xanaes utilizados en el balance hídrico de la laguna se adjuntan junto a los caudales de los demás tributarios en la Figura 11.



**Figura 11: Caudales medios semestrales utilizados en el Balance Hídrico de Mar Chiquita (“*Lambda 1*”)**

## ESCENARIOS DE SIMULACIÓN

Con el modelo ajustado como se mencionó previamente, para cada semestre entre 1967 y 1997 se realizaron simulaciones suponiendo extracciones de caudal constante en cada simulación. Las simulaciones incluyeron caudales de extracción de 4, 5, 8, 10, 16, 20, 40 y 60 m<sup>3</sup>/s.

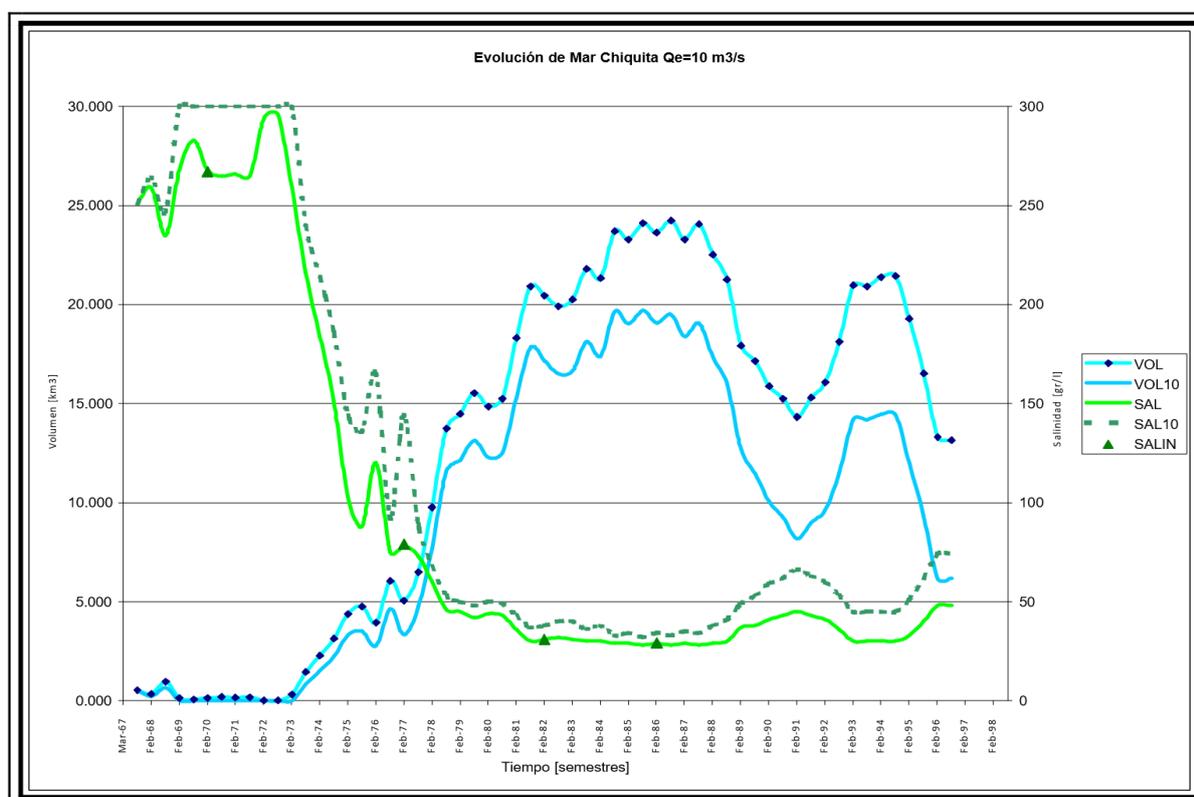
Las condiciones iniciales y las variables de entrada (*inputs*) para todos los casos simulados, correspondieron a series de datos hidrológicos confiables, medidas o generadas con predictores calibrados previamente con datos medidos, generando la diversa información que se ha presentado precedentemente.

Los escenarios planteados para la simulación hidrológica, fueron elegidos en función de hipotéticas extracciones de caudales, asociadas a diversos proyectos previstos o factibles de materializarse en la cuenca del Río Dulce (fundamentalmente el “*Canal Federal*”). De esta manera se puede distinguir que: **Q= 4 m<sup>3</sup>/s**, representa el caudal evacuado por una bomba, respetando el diseño en el proyecto del “Sistema Federal” licitado (originalmente “Canal Federal”).

- 1- **Q= 8 m<sup>3</sup>/s**, representa el caudal evacuado por una batería de dos bombas. Situación planteada en el diseño de la casa de toma, ubicada sobre el Río Dulce.

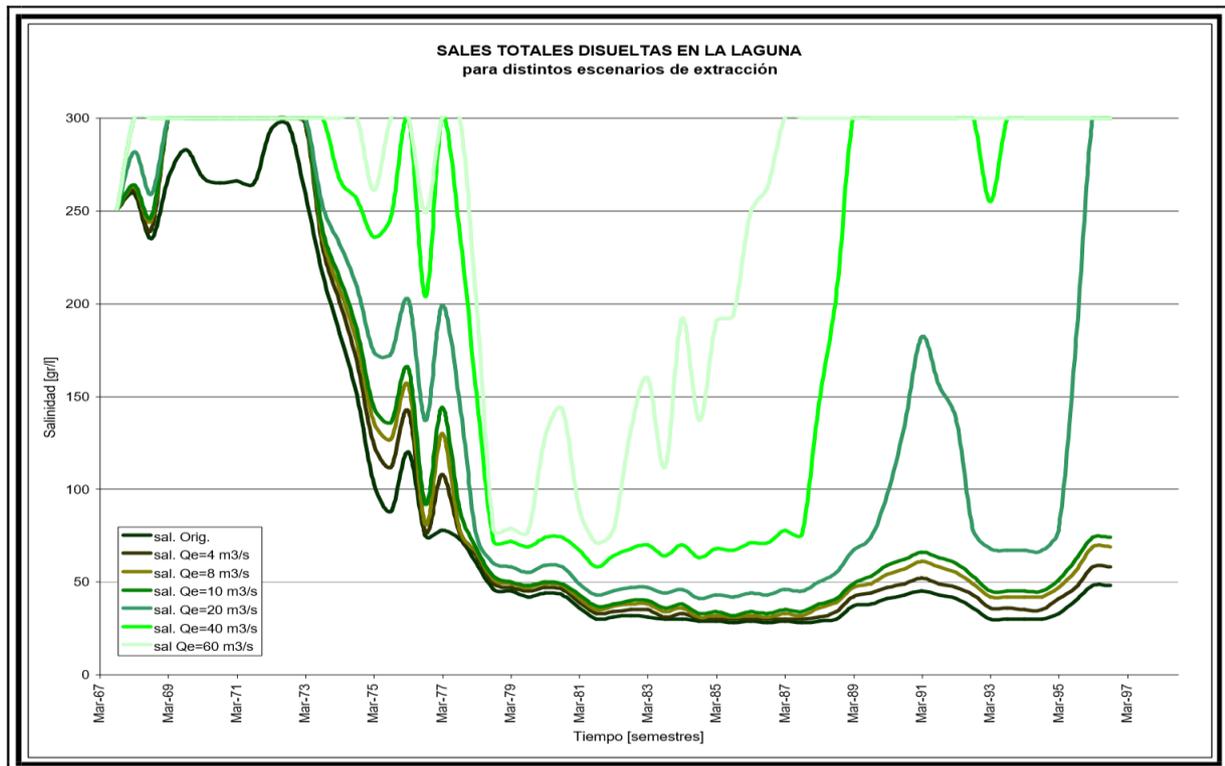
- 2- **Q= 10 m<sup>3</sup>/s**, representa el caudal inicial y único, oficialmente definido en el contrato CFIUNC referido al proyecto original del Canal Federal.
- 3- **Q=16 m<sup>3</sup>/s**, representa el caudal evacuado por una batería de cuatro bombas. Esta previsión se hizo, ante el análisis del proyecto de la obra de toma, que, si bien especificaba la utilización de dos bombas, se dejaron previstas las instalaciones para duplicar la capacidad de evacuación (instalaciones para dos bombas más).
- 4- **Q= 60 m<sup>3</sup>/s**, es el caudal que indica una situación límite que se produciría en la cuenca si la política de manejo continúa con el criterio actual y cada provincia retira aproximadamente el “cupo” definido en el convenio interno inicial de 1967. Este caudal de extracción resulta de una de las interpretaciones posibles del Convenio interprovincial que limita el uso del agua del río Dulce por las provincias de Tucumán, Santiago del Estero y Córdoba, firmado en 1967.
- 5- **Q= 20 m<sup>3</sup>/s**, representa el caudal extraído en una situación intermedia.
- 6- **Q= 40 m<sup>3</sup>/s**, representa el caudal extraído en otra situación intermedia.

Los resultados del modelo incluyen los volúmenes medidos de la laguna y los resultantes de la extracción  $V(t)$ , a partir de los cuales, se han obtenido las nuevas series de niveles  $H(t)$ , áreas  $A(t)$  y salinidades  $S(t)$  correspondientes a los volúmenes simulados. A modo de ejemplo, en la Figura 12 se presentan los resultados obtenidos para la simulación del Caudal de extracción de 10 m<sup>3</sup>/s donde se pueden visualizar las variaciones sufridas por la salinidad y los volúmenes resultantes.

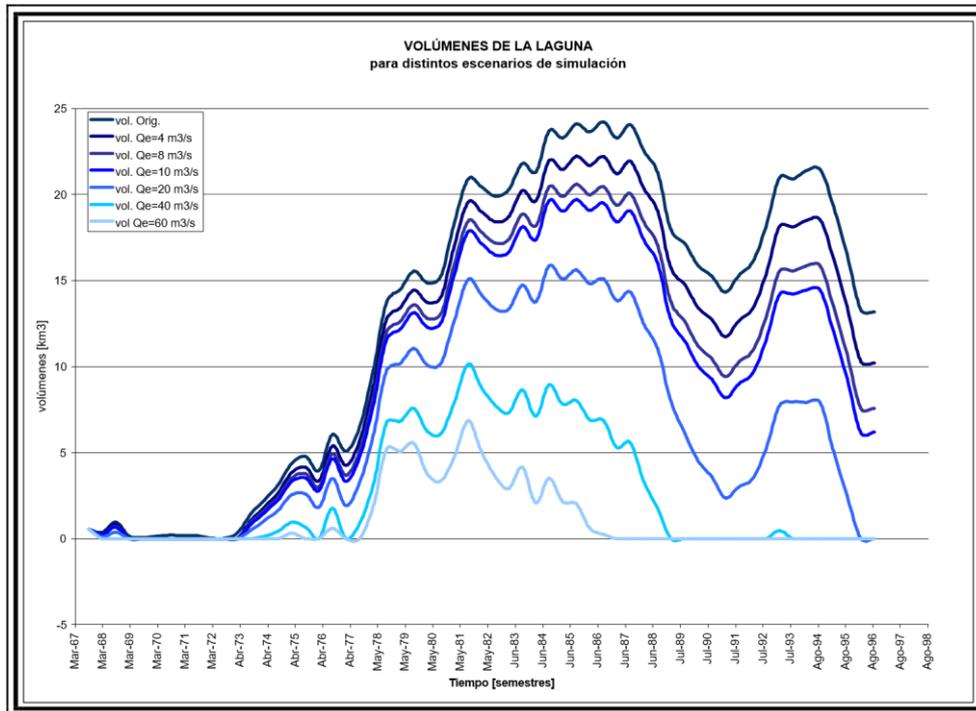


**Figura 12: Resultados del balance hídrico de Mar Chiquita (“Lambda 1”) (extracción en RD = 10 m<sup>3</sup>/s)**

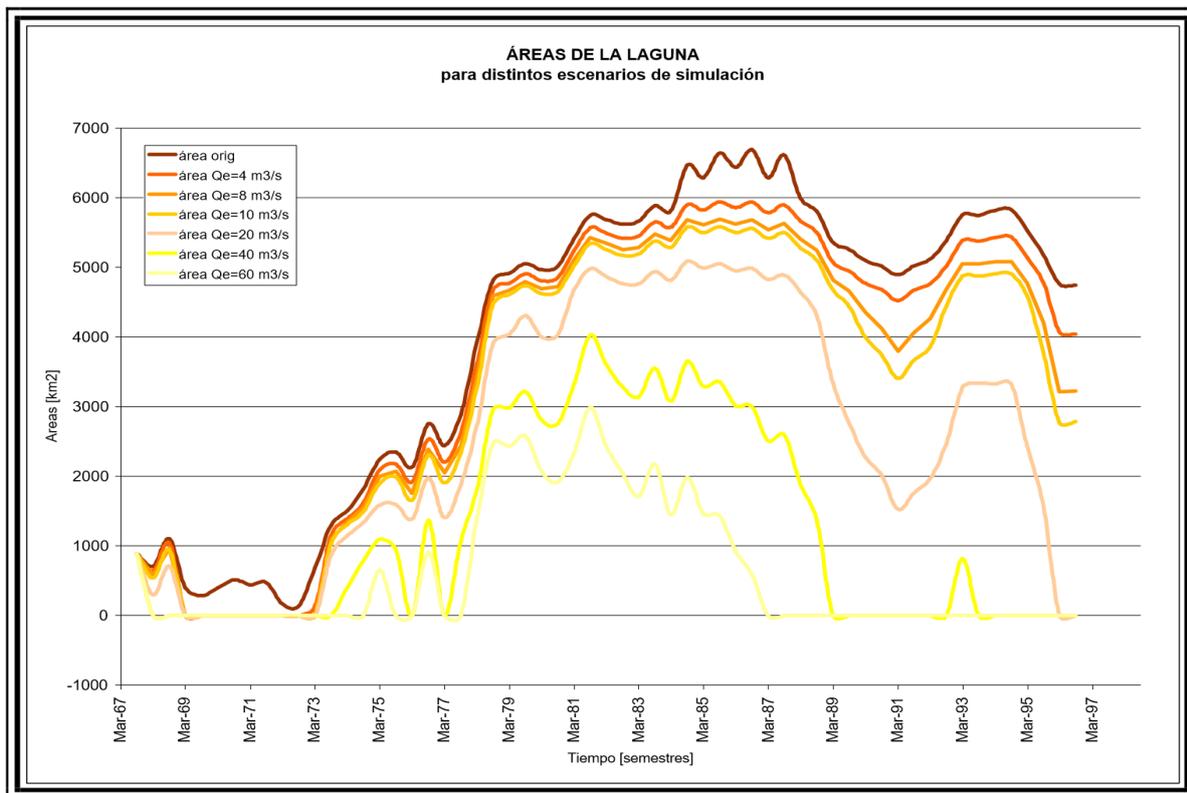
A continuación, se grafican las variaciones de salinidad, áreas y volúmenes para todos los escenarios planteados en el balance modelado, a fin de poder visualizar en una misma imagen aquellos valores datos y aquellos resultantes de las simulaciones realizadas para las extracciones supuestas (Figuras 13, 14 y 15).



**Figura 13: Resultados del balance hídrico de Mar Chiquita (“Lambda 1”) Variación de salinidad ante distintos escenarios**



**Figura 14: Resultados del balance hídrico de Mar Chiquita (“Lambda 1”). Variación de volumen ante distintos escenarios**



**Figura 15: Resultados del balance hídrico de Mar Chiquita (“Lambda 1”) Variación de volumen ante distintos escenarios**

## CONCLUSIONES

### Análisis de los resultados obtenidos

- El nivel de la laguna disminuirá bajo todos los escenarios en una magnitud dependiente del nivel de extracción, efecto que será mayor en períodos hidrológicos pobres.
- Se evidencia que aún con caudales de extracciones pequeños (menores a 5 m<sup>3</sup>/s) el sistema hidrológico es potencialmente frágil en períodos magros o secos prolongados como los ocurridos entre 1967 y 1973. Esto se manifiesta en la reducción de volúmenes de la laguna y el consiguiente aumento de salinidad. Sin embargo, para estas extracciones pequeñas, el sistema laguna-bañados demuestra capacidad de incrementar sus dimensiones rápidamente si las condiciones hidrológicas cambian, al aumentar las precipitaciones y aportes superficiales, como ocurrió a partir de 1976 cuando la laguna superó los niveles medios (66 msnm).
- Para extracciones de caudales medios mayores (e.g. 8 a 10 m<sup>3</sup>/s) el intervalo crítico de la laguna aumenta, demorándose la recuperación del sistema (en el sentido de acercarse a la curva de extracción nula) a valores de salinidad menores a 50 gr/l (considerado un primer umbral de salinidad que limita la reproducción del *Pejerrey* (*Odontesthes bonariensis*)) en casi un año.
- Se puede observar también que, con estos caudales de extracción, a principios de los 90 y durante más de 3 años, los niveles de salinidad superarían los 50 gr/l, resultando que al final de la simulación, los niveles de salinidad superarían claramente este primer umbral de salinidad.
- Para extracciones de 20 m<sup>3</sup>/s la recuperación de la laguna se demoraría 3 años más, hasta 1981. Asimismo, a partir de 1988 los valores de salinidad aumentarían severamente superando el segundo umbral de salinidad de 100 gr/l. Al final del período el nivel de salinidad se mantendría por encima de este valor crítico sin llegar nunca a recuperarse a valores menores o iguales a 50 gr/l.
- Para extracciones mayores (e.g. 40 o 60 m<sup>3</sup>/s) los efectos serían extremadamente severos. La laguna se secaría en más de la mitad del período simulado de 30 años, y la salinidad, se mantendría siempre por encima del primer umbral y en aproximadamente el 80% del tiempo por encima de un segundo umbral de salinidad correspondiente a 100 gr/l (adoptado como límite para la supervivencia de peces).
- Ante posibles extracciones asociadas a cualquier obra proyectada, se pueden prever distintos tipos de comportamientos en el funcionamiento hidráulico laguna-bañado (permanencia del agua en el bañado), que puede ser analizado según dos escenarios factibles:
- Nivel de laguna alto: en los ciclos húmedos (con salinidad menor a 50 gr/l), se darían niveles similares a los actuales con el mantenimiento de un área de

bañados de gran superficie (5000 km<sup>2</sup>, aprox.). Al subir el nivel de base del sistema, el gradiente disponible para el drenaje es menor, con la consecuente mayor permanencia del agua en el bañado. En el caso que los caudales entrantes a la región sean pequeños y no produzcan desbordes, los mismos no tendrán suficiente pendiente para su drenaje y se acumularán en el bañado, es decir se generarán volúmenes de agua retenidos.

- Nivel de laguna bajo: al ser el nivel de base del sistema bajo, el agua existente en los bañados dispone de un mayor gradiente para su descarga, permitiendo un drenaje más rápido y menor tiempo de permanencia del agua en el bañado.
- La extracción de agua en la cuenca del Río Dulce, conduce como se mencionó en el primer apartado, a una disminución en el aporte al sistema del valle de inundación del Río Dulce y la Laguna Mar Chiquita, pudiéndose observar, ante este impacto, un aumento de la frecuencia de años secos en desmedro de los años medios y húmedos. Es de esperar también que los efectos de estos impactos sean mucho más marcados en ciclos secos que en ciclos húmedos.
- Al disminuir los aportes, no solo se observarán decrecimientos en la Laguna Mar Chiquita si no también, una disminución en la frecuencia e intensidad de los episodios de inundación en el valle del Río Dulce. Estimándose que el impacto pueda llegar a ser importante y permanente.  
Como consecuencia de este último fenómeno se puede prever una reducción del área ocupada por los pastizales de inundación y otra vegetación asociada a pulsos de inundación (bañados, pastizales, etc.) en forma proporcional a la disminución de la magnitud y frecuencia de las inundaciones. Las consecuencias directas sobre la fauna y la flora, se manifestarán como una disminución de la biodiversidad, viéndose afectada también la capacidad de carga ganadera en los pastizales inundables de la costa del Río Dulce.
- Las posibles disminuciones en el caudal del Río Dulce, no tendrán ningún efecto en lo que hace a riesgos por inundaciones en la región, ya que éstos están asociados a eventos extremos (crecidas) y no son de importancia desde los problemas de inundación en Miramar de la década pasada, cuando se urbanizaron áreas debajo de cotas seguras, situación que ha sido resuelta al fijar la Di.P.A.S. (Cba.) una cota de seguridad (línea de rivera) mayor al nivel conocido de la laguna.
- Existe la posibilidad de que la disminución del volumen aportado al sistema genere efectos climáticos locales por disminución de la evapotranspiración y aumento del albedo. Esta posibilidad requeriría de estudios más profundos para su mejor evaluación.
- Se puede concluir, que, ante los escenarios planteados como posibles hipótesis de extracción, basados en las distintas obras proyectadas o por proyectar, el impacto generado sobre la Laguna Mar Chiquita y el valle inferior del Río Dulce, es de magnitud importante (proporcional a los niveles de extracción), tanto en términos ambientales como económicos asociados a la producción de los recursos naturales de la región afectada.

Asimismo, se afecta al importante humedal protegido por la legislación argentina y por los compromisos internacionales asumidos por el país (e.g. designado recientemente como el Sitio RAMSAR Nro 11 de Argentina).

### **Conclusiones asociadas al funcionamiento hídrico del sistema de Mar Chiquita**

El resultado del análisis realizado del funcionamiento hídrico del sistema de Mar Chiquita permitió abordar los siguientes aspectos:

- Los resultados obtenidos demuestran que el sistema hidrológico de Mar Chiquita, a pesar de su alta complejidad, puede ser simulado numéricamente (con modelos mejorados en versiones sucesivas) de manera de entregar resultados cuantitativos que permitan la toma de decisiones basada en elementos racionales y sólidos.
- La simulación efectuada puede y debe ser mejorada con la disponibilidad de nuevos datos, por lo cual se recomienda invertir esfuerzos en forma conjunta en la medición de los numerosos fenómenos hidrológicos involucrados. En particular, se consideran como secciones o puntos de control de importancia, las localidades de Los Telares, Paso de la Cina y La Rinconada.
- La cantidad elevada de incertidumbres y grados de libertad con los cuales se ha debido trabajar, demuestra que la tarea de simulación no es trivial. Esto permite afirmar que se necesitan más datos hidrológicos del sistema y que, con los datos que se ha contado, los mejores resultados posibles son los que se obtuvieron en este estudio.
- Del análisis de correlación entre los volúmenes pasantes en Los Quiroga y las variaciones en los volúmenes de la laguna (corregidos por la evaporación efectiva en la misma) realizados en el estudio UNC (1998) y Pagot (1999), se ha determinado que:
  - Queda expuesta la influencia de los Bañados (a partir de 1982), en el balance hídrico del sistema de Mar Chiquita, materializándose en forma de un nuevo elemento físico.
  - 
  - En el período 1969-1981, el comportamiento de la laguna ha sido determinado fundamentalmente por los aportes del Río Dulce. Es clara también la influencia de los volúmenes aportados por el Río Dulce a la zona de bañados, quedando interrelacionados los mismos, a su vez, con el nivel acusado en la laguna.
- Una estimación y cuantificación de las pérdidas de caudal que sufre el río Dulce desde Río Hondo, a medida que se aproxima a Mar Chiquita.
- Una cuantificación de los aportes del río Dulce, lluvias, evaporación y aportes restantes globales, en la Laguna Mar Chiquita durante tres décadas (1967-97) incluyendo períodos de características secas, intermedias e hidrológicamente ricas.

- Un análisis de las variaciones históricas de aporte de agua al sistema. Concluyendo que el estado actual de Mar Chiquita, se encuadra en un período muy húmedo que comenzó a manifestarse a mediados de la década de 1970 y que ha llevado los niveles de agua a cotas no registradas precedentemente con la disminución asociada de niveles de salinidad por debajo de los 50 gr/l, siendo esta una circunstancia no registrada en el pasado conocido.
- Un inventario completo de la información disponible, y una estimación de información que sería prioritaria para mejorar el conocimiento de este complejo Sistema Hidrológico de Mar Chiquita.

## AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo no hubiese sido posible sin la valiosa participación de numerosas instituciones (e.g. PERD, CFI, CDRSD, DPH, CIRSA y ETCECH entre las principales), y la de muchos colegas que aparecen como coautores en las Referencias, pero deseo destacar entre ellos a Mariana Pagot y Gerardo Hillman dada su relevante y original contribución al estudio de Mar Chiquita.

## REFERENCIAS

- Adler, Franklin. (1998) "*Proyecto Canal Federal: Un análisis desde la óptica universitaria*". CET, 38-45. Universidad Nacional de Tucumán, Argentina.
- Bucher, E.H. (1992) "*Population and conservation status of flamingoes in Mar Chiquita, Córdoba, Argentina*". *Coloquial Waterbirds* 15(2): 179-184.
- CADNE (1979) "*Laguna Mar Chiquita, Recopilación y Evaluación de los Conocimientos Existentes sobre los Factores Físicos y Biológicos*", Córdoba.
- CADNE (1982) "*Laguna Mar Chiquita (Mar de Ansenusa). Recopilación y Evaluación de los Conocimientos Existentes Sobre Factores Físicos y Biológicos del Área (2ª Aproximación)*". Banco de la Provincia de Córdoba, Córdoba, Argentina, 38 pp.
- Caamaño Nelli, G. (1999) Hidrología Avanzada: "*Hidrología Conceptual, Evapotranspiración*", pp. 2-7, UNC, Córdoba, Argentina.
- CIHRSA (1979) "*Estudio Batimétrico de la Laguna Mar Chiquita*", Centro de Investigaciones Hídricas de la Región Semiárida, INCYTH CONICET, Va. Carlos Paz.
- CIHRSA (1982) "*Modelo de Simulación de Caudales en la Cuenca Baja del Río Dulce*" Centro de Investigaciones Hídricas de la Región Semiárida, INCYTH CONICET, Va. Carlos Paz, Córdoba, Argentina.
- CIHRSA (1983) "*Informe Final. Acta Complementaria*". Convenio CIHRSA-PERD, 31 pp., Centro de Investigaciones Hídricas de la Región Semiárida, INCYTH CONICET, Va. Carlos Paz.
- Rodriguez A., Rocca R. y Pulselli U. (1990) "*Estudio del régimen Hidrológico del río Dulce y Laguna Mar Chiquita*", 73 pp, Informe Final a la DG XII de Bruselas, ELTECH SpA, Milan, Italia, republicado por el Centro de Investigaciones Hídricas de la Región Semiárida, INCYTH CONICET.
- Cortés, J., Ferreyra, C., Gastaminza, E., Trejo, W. y Vélez, E. (1983) "*Estudio Regional del Área de Bañados del Río Dulce*". Coloquio Internacional Grandes Llanuras. Santiago del Estero, Argentina, CONAPHI.

- CCRSD (1982) "*Plan de estudios integrados de la cuenca Río Salí-Dulce*", Santiago del Estero, Argentina.
- Consejo Federal de Inversiones. Comisión del Río Dulce (1965) "*Proyecto del Río Dulce. Informe Preliminar para el banco Interamericano de desarrollo*". Tomo I.
- CFI (1977) "*Estudio Integral del Recurso Hídrico de los Ríos Salí-Dulce*", Buenos Aires, Argentina.
- CFI (1991) "*Aprovechamiento Integral de los Recursos Hídricos de la Cuenca del Río Salí – Dulce*", Buenos Aires, Argentina.
- Ferreyra, C. y Velez, E. (1983) "*Evaluación del Comportamiento de los Escurrimientos en la Cuenca Inferior del Río Dulce con Apoyo Satelitario*", Congreso Nacional del Agua, 372-351. Córdoba, Argentina.
- Hillman, G.; Rodriguez, A.; Pagot, M.; Menajovsky, S.; Bernasconi, I. y Caamaño, G. (2000) "*Funciones geométricas y de salinidad de la Laguna de Mar Chiquita, Córdoba, R. Argentina*", XIX Congr. Latinoamericano de Hidráulica, AIH, Tomo 2, 477-486, Córdoba, Arg., ISBN 950-33-0269-2.
- Martínez, D. E. 1987. "*Geomorfología del Área de Bañados del Río Dulce en la Provincia de Córdoba, Argentina*", II Simposio Latinoamericano sobre Sensores Remotos, Bogotá, Colombia.
- Martínez, D. E. (1989) "*Aplicación del análisis de Imágenes LANDSAT al estudio de la dinámica superficial de las Aguas de la Laguna Mar Chiquita en la Provincia de Córdoba*", V Simposio de Tecnología Aeroespacial, Ascochinga, Córdoba.
- Michelutti, P. (1994 a 1996) Informes de la reserva Mar Chiquita y Bañados del Río Dulce, Miramar, Córdoba, Arg. Inéditos.
- Pagot, M. (1999) "*Simulación Hidrológica de Los Bañados del Río Dulce*", UNC, Córdoba, Argentina.
- Pagot, M., Caamaño, G.; Rodriguez, A.; Hillman, G., Bernasconi, I. y Menajovsky, S. (2000) "*Flujo hidrometeorológico en el sistema Bañados del río Dulce-laguna de Mar Chiquita, R. Argentina*", XIX Congr. Latinoamericano de Hidráulica, AIH, 467-466, Tomo 2, ISBN 950-33-0269-2, Cba, Arg.
- Programa para el estudio integral del Río Dulce (1982) Informe final, Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación Buenos Aires, Argentina.
- Reati, G.J., Florin, M., Fernandez, G.J. y Montes, C. (1997) "*The Laguna Mar Chiquita (Córdoba, Argentina): a little know, secularly fluctuating, saline lake*". International Journal of Lake Research 5: 187-219.
- Rodriguez, A., Reyna, S., Menajovsky, S., Chini, I., Caamaño Nelli, G., Bernasconi, I., Díaz, A., Moya, G., Hillman, G., Pagot, M., Orona, C., y Orso, M. (1999): "*Estudio Hidrológico del Sistema de Mar Chiquita, Córdoba, República Argentina*", XIV Congreso Chileno de Hidráulica, Santiago, Chile.
- Rodríguez, A., Hillman, G., Pagot, M., Menajovsky, S., Caamaño Nelli, G., Chini, I., Bernasconi, I. (2000). "*Simulación hidrológica del sistema de Mar Chiquita, Córdoba, República Argentina*". Congreso Nacional de Agua, Córdoba, Argentina.
- Rodriguez, A., Caamaño, G., Hillman, G., Pagot, M., Bernasconi, I., Weber, J. and Menajovsky, S. (2001) "*Hydrologic Study of Mar Chiquita System, R. Argentina*", XXIX Congreso Mundial de la IAHR, Beijing, China, Vol. 2: Theme B, ISBN 010-62771137. Pg. 259-264

- UNC (1998). “*Valoración del Impacto Ambiental en la Región de Mar Chiquita y la Cuenca Afectada por el Canal Federal*”, Informe Final al CFI, 650 pp., Cba., Argentina.
- Williams, W.D. (1993) “*The conservation of salts lakes: important aquatic habitats of semi-arid regions*”. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 3(2): 71.