

ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DE RIESGOS ECOLÓGICOS EN UN GRAN SISTEMA HIDROLÓGICO ENDORREICO

Andrés Rodríguez^{1,2}, Gerardo Hillman¹, Mariana Pagot¹,
Gabriel Caamaño Nelli^{1,2}, Inés Bernasconi³

RESUMEN: El ecosistema cerrado en estudio es único en América Latina, constituido por la laguna salada más grande de esta región, Mar Chiquita y los bañados del Río Dulce, con extensión cercana a los 10.000 Km². Este complejo sistema es pobremente conocido desde el punto de vista hidrológico y su alta biodiversidad justifica que se lo haya declarado sitio protegido internacionalmente por la convención RAMSAR. Este sistema está bajo riesgo ante la acción antrópica como el catastrófico antecedente de la desecación del Mar Aral. Para estudiar la disminución de la laguna ante posibles extracciones de agua del tributario principal, se desarrolló un modelo numérico de balance hídrico. Previamente se obtuvo, analizó y depuró gran cantidad de información hidrometeorológica, que fue usada para simular el comportamiento durante un período de treinta años, de 1967 a 1997. El modelo se empleó en intervalos de seis meses y un año, considerando por separado la laguna de los bañados e incluyendo la variación de las pérdidas (evaporación y evapotranspiración), en función de la salinidad, y de los aportes pluviales con el nivel de la laguna. El análisis de los resultados ha mostrado la importancia del régimen del río Dulce como principal tributario; y el alto impacto negativo sobre la laguna de las extracciones de caudal aguas arriba debido al incremento de la salinidad, pérdida de biodiversidad y severa reducción de sus dimensiones. Finalmente, considerando la natural reducción del río Dulce a través de los bañados, se estimaron los caudales que ingresan a la laguna para distintos niveles de agua.

INTRODUCCIÓN

El área en estudio, con cierre en la laguna de Mar Chiquita, es el sistema endorreico más importante de Argentina. Se distribuye en cinco provincias: Catamarca, Salta, Tucumán, Córdoba y Santiago del Estero, 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 (ver Figura 1). El principal tributario de la laguna es el Río Dulce, con una cuenca de alrededor de 60.000 km². Para el análisis y la simulación de riesgos ecológicos en este sistema, es necesario evaluar los volúmenes mínimos ecológicos, asociados a distintos escenarios factibles en la laguna, adoptando como parámetro determinante la salinidad.

La información existente sobre los niveles de agua y los cambios ambientales asociados en Mar Chiquita muestran que en el último siglo no hubo una tendencia general a largo plazo. Las abundantes evidencias de la geología de la laguna, y los registros históricos e hidrológicos, apoyan la hipótesis que tales fluctuaciones son fenómenos naturales que han sucedido recurrentemente desde la formación de la laguna (en el período Post-pliocénico).

Los mecanismos responsables de las fluctuaciones operan típicamente en macro-escala, en especial debido a la gran extensión del área involucrada y a los efectos de tres tipos de clima diferentes que se alternan en ella. Hay además cierta relación entre los eventos de mayor escala y procesos globales como El Niño, que actúan complementariamente.

Finalmente, debido a la ubicación de la laguna y a sus características intrínsecas (poca profundidad, régimen de vientos, circulación interna del agua, sedimentación, dinámica de evapotranspiración), los procesos funcionales a micro-escala incrementan los efectos de los mecanismos a macro-escala, responsables de las fluctuaciones importantes.

¹ Laboratorio de Hidráulica, FCEFYN, Universidad Nacional de Cordova, Av.V.Sarsfield 1601, Ciudad Universitaria, 5000, Córdoba, Argentina.

² CONICET (Centro de la Región Semiárida, INA), Medrano 273, Villa Carlos Paz, Argentina.

³ Dirección Provincial de Agua y Saneamiento, DIPAS, Humberto Primo 607, Córdoba, Argentina.

Las alteraciones hidrológicas de menor escala del sistema pueden tener efectos de incrementos exponenciales en el funcionamiento del ecosistema de la laguna. En ese sentido, se puede comparar a Mar Chiquita con el Mar de Aral (Williams y Aladín, 1991).

La relación entre área de cuenca y superficie de la laguna para Mar Chiquita, en períodos de nivel de agua bajo ($S_c / S_l = 19,17$), es muy similar al que tenía el Mar de Aral antes de su catastrófica alteración por reducción de caudal en sus tributarios ($S_c / S_l = 20,59$).

El caso del Mar de Aral es un ejemplo de manejo antrópico erróneo de las aguas (Williams y Aladín, 1991). La experiencia del “Síndrome Aral” es una posibilidad realista si se incrementan las derivaciones y extracciones de caudales del Río Dulce reduciendo los aportes al sistema de Mar Chiquita. Además, el ecosistema de Mar Chiquita es más frágil, debido a la escasa profundidad y a su mayor variabilidad con respecto al Mar de Aral, siempre bajo condiciones normales.

Se debe tener en cuenta de qué manera el ecosistema de la laguna puede mantener su funcionalidad eficientemente, despreciando las fluctuaciones normales del medio ambiente (estacionales o interanuales). La situación "normal" no es necesariamente aquella anterior a 1976, cuando se produjo un drástico incremento en el nivel del agua. Las fluctuaciones determinan diferentes caminos de sucesos ecológicos, cada uno caracterizado por la disponibilidad de fuentes.



Figura 1.

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

Generalidades

El sistema integrado por la cuenca inferior del río Dulce, desde Los Telares (28°59' de latitud sur) y la Laguna de Mar Chiquita o Mar de Ansenusa, en la cual desagua, es el mayor sistema hidro-ecológico cerrado en América del Sur. Se sitúa al sur de la provincia de Santiago del Estero y al noreste de la provincia de Córdoba (ver Figuras 1 y 2).

El río Dulce fluye más de 300 km por una planicie de baja pendiente (0,025%), con frecuentes divagaciones y cambios de curso, en una red de canales difusa en su tramo inferior. Superada su escasa capacidad de conducción en las crecidas estivales, los terrenos anegados llegan a cubrir hasta 10.000 km², como en los años 1980, 1981,

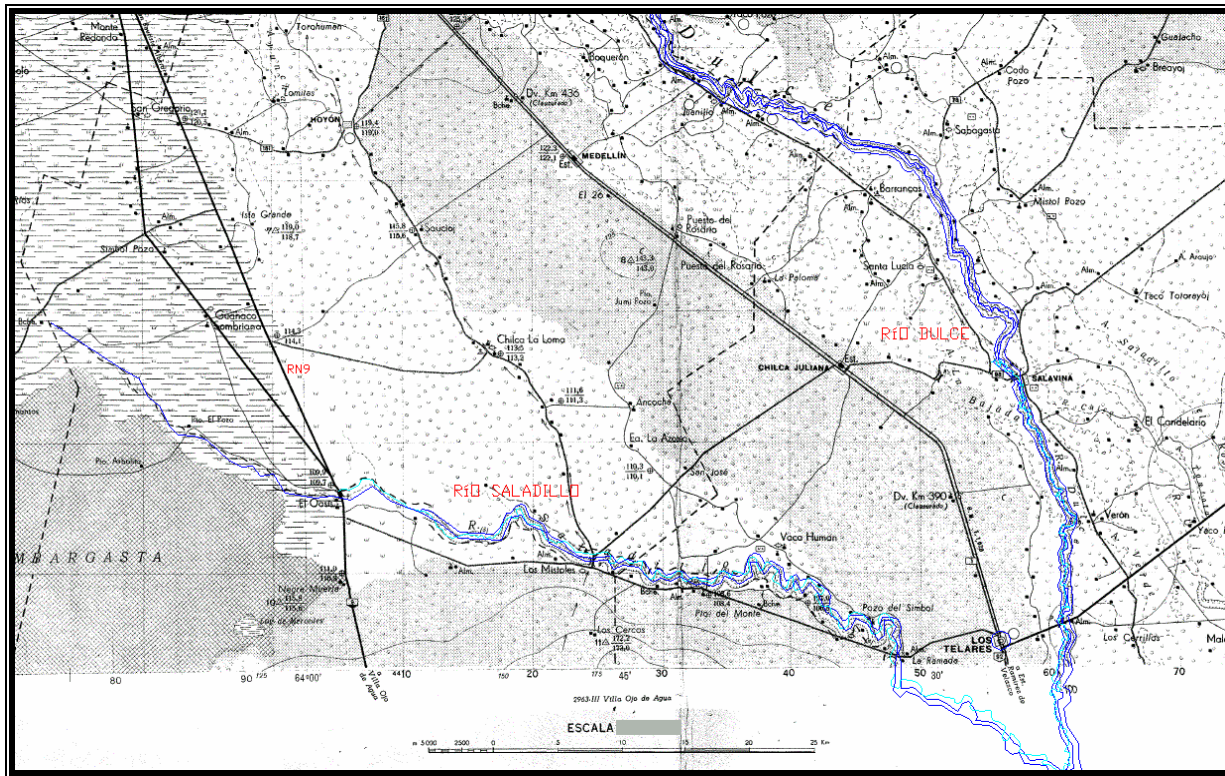


Figura 3.

Ocasionalmente, durante crecidas, el río Dulce deriva aguas por margen derecha al brazo “Nambi” llegando hasta las Salinas de Ambargasta. Dichas aguas retornan al Dulce a través del río Saladillo con grandes cantidades de sales disueltas.

También se ha sugerido que la salinidad de la laguna fue causada por la concentración gradual de un gran lago post-pleistocénico que se formó durante los períodos más húmedos (Stappenbeck, 1926).

La salinidad de la laguna puede sufrir grandes variaciones interanuales asociadas a las condiciones hidrometeorológicas que se den a lo largo del área de aporte, y está inversamente relacionada con los volúmenes de agua. A lo largo de este siglo, la salinidad ha variado entre 28,7 y 270,7 g/l, lo cual es un rango aun más grande que los registrados en la mayoría de lagos salados del mundo (Williams, 1993b).

Análisis de los procesos ecológicos fundamentales

El gran sistema de humedales que conforman la porción terminal del río Dulce incluye dos grandes subsistemas: el valle de inundación del Río Dulce con sus bañados asociados y la Laguna de Mar Chiquita. Estos componentes, si bien están íntimamente asociados en su dinámica, poseen características hidrológicas y ecológicas bien diferenciadas por lo que se justifica su análisis por separado, particularmente cuando se evalúan los posibles impactos de la derivación de aguas de la cuenca (Williams, 1993a).

El valle de inundación del río Dulce es equivalente a un inmenso delta con un declive muy pequeño, con una gama muy grande de tenor salino en sus aguas. Su dinámica está condicionada y modelada fundamentalmente por la magnitud y la frecuencia de las inundaciones periódicas generadas por el aporte del Río Dulce.

La frecuencia, intensidad y duración de dichas inundaciones determina la consideración de la red de drenaje, la deposición y remoción de sedimentos, la formación de albardones y finalmente la estructura y composición florística de la vegetación. Los distintos tipos de vegetación presentes en el área están asociados y adaptados a distintos regímenes de frecuencia y duración de las inundaciones, incluyendo por ejemplo los pastizales costeros del río Dulce (Williams, 1993b)

El pulso de inundación constituye el factor dinámico esencial para mantener la heterogeneidad de la vegetación, así como su fauna asociada (Bucher y Herrera 1981, Bucher 1992). Esta característica es típica de todos los humedales del mundo, y existe un creciente reconocimiento de que la preservación del régimen de inundación es un requisito básico para su conservación.

En tal sentido, cabe mencionar por ejemplo, el parque nacional de los Everglades en Florida, Estados Unidos, donde en la actualidad se tiende a restaurar este régimen alterado por las obras de ingeniería para irrigación realizados durante la primera mitad de este siglo (UNC, 1998).

La Laguna de Mar Chiquita es el colector final del sistema, siendo su principal aporte el que proviene del Río Dulce, y en mucho menor medida de los ríos Suquía (Primero) y Xanaes (Segundo). El factor clave que controla su dinámica está dado por el nivel de concentración de sales de sus aguas, el cual está directamente asociado al nivel y por consiguiente el volumen de las aguas de la laguna.

La concentración de sales en la laguna ha tenido variaciones históricas importantes, habiendo oscilado entre valores de más de 250 g/l de niveles bajos hasta alrededor de 40 g/l en años muy húmedos como en la década de 1980.

Variaciones históricas en aportes de agua al sistema

El sistema Río Dulce - Mar Chiquita se caracteriza por una gran variabilidad temporal en los aportes hídricos que recibe, asociados a la variación de las lluvias registradas en su cuenca, y particularmente las que ocurren en la cuenca alta del río Salí-Dulce (Sierras del Aconquija, Tucumán, Figura 1), donde las precipitaciones son mayores (superan los 1200 mm anuales). Esto genera variaciones de corto y largo plazo, tanto en el régimen de inundación en los bañados como en el nivel de laguna de Mar Chiquita.

Se presentan entonces escenarios donde la laguna tendrá volúmenes pequeños, medios y grandes, aún sin la influencia antrópica de la extracción de agua de sus tributarios para usos consuntivos.

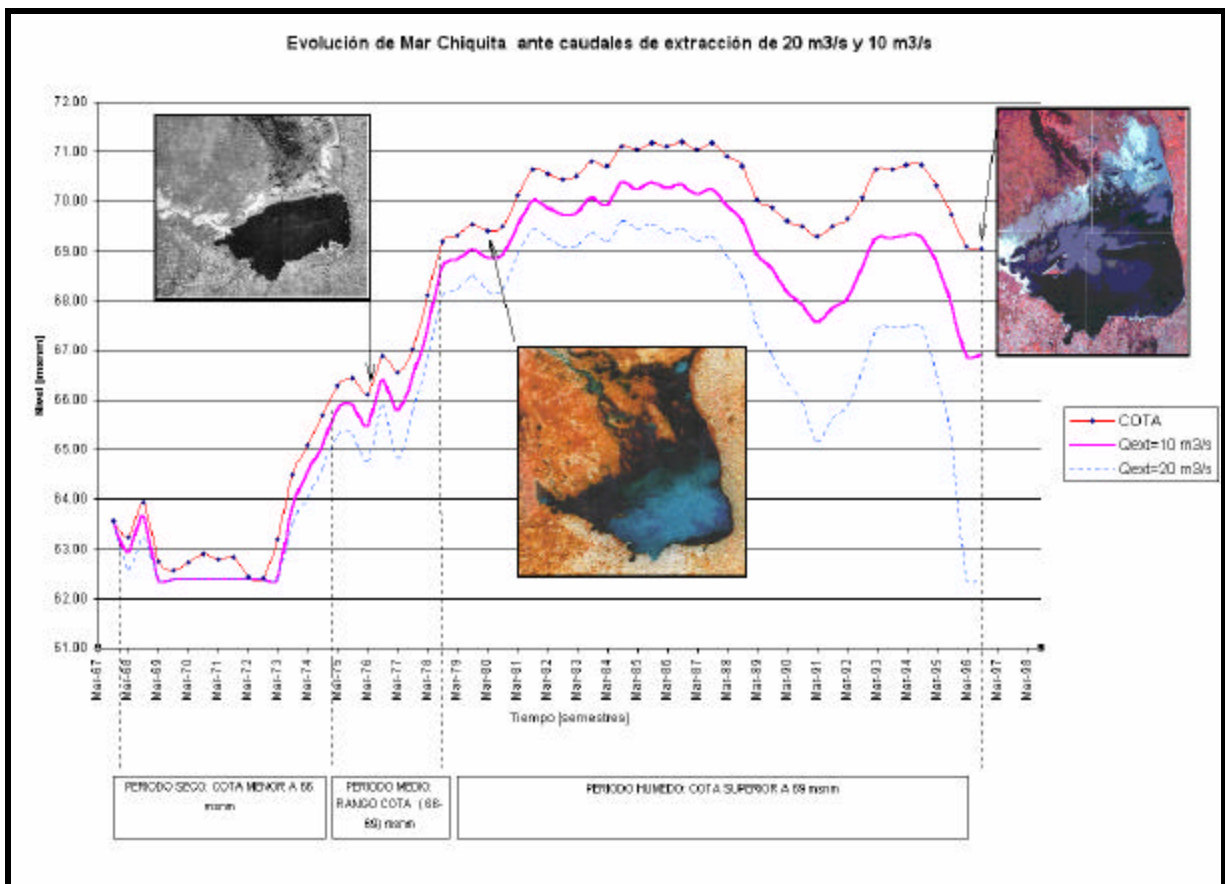


Figura 4.

Dada la estrecha asociación entre niveles de la laguna y su salinidad, las características limnológicas y por ende los procesos ecológicos varían radicalmente de acuerdo con el nivel del agua en la laguna. Dentro de la gama de valores posibles existen verdaderos puntos de discontinuidad en lo que hace al funcionamiento del sistema, tal como se describe más adelante. A los fines de este análisis, se dividieron los niveles de salinidad (en gramos de sales totales disueltas) de la laguna en “mesosalino” (hasta 48 g/l), “megasalino” (entre 48 g/l y 60 g/l) e “hipersalino” (por encima de los 60 g/l).

Años húmedos

Laguna Mar Chiquita: Esta situación se ha registrado recientemente en el plazo que comienza hacia fines de la década de 1970, la que determinó un crecimiento muy marcado de la laguna, con el consecuente decrecimiento de la salinidad. El nivel crítico a considerar es correspondiente a la cota 69 m, por encima de la cual la salinidad es menor a 48 g/l habiendo alcanzado valores de hasta 24 g/l. A este rango se lo denominó nivel limnológico “mesosalino”.

En esta situación el sistema se comporta de forma similar al de una laguna pampeana salobre o poco salina, cuya fauna y flora no difieren marcadamente al de un sistema de agua dulce. Con estos valores existe una oxigenación adecuada y un ciclo eficiente del carbono, por lo que la cantidad de materia orgánica depositada en el lecho es reducida (Reati *et al.* 1997).

La aparición de condiciones mesosalinas hicieron posible la expansión del “pejerrey” (*Odontesthes bonariensis*) en la laguna, facilitada por la natural adaptación de este pez a estos niveles de salinidad. Al alcanzar estos niveles desaparecen casi totalmente las amplias playas barrosas de la laguna, las que ofrecen un hábitat importante para muchas especies de aves playeras (Bucher y Herrera, 1981).

El Valle del Río Dulce: Los bañados alcanzan una gran extensión, y una gran parte de los mismos interactúa con la Laguna de Mar Chiquita dependiendo de su nivel de base. La variabilidad de ambientes y la biodiversidad son altos si el área está parcialmente inundada y disminuye para inundaciones extremas.

Años medios

Laguna de Mar Chiquita: Cuando la cota de la laguna oscila entre las cotas 66,40 m y 69 m, el agua tiene una salinidad que oscila entre los 48 g/l y 100 g/l, nivel que se ha denominado megalalino. Al sobrepasar los 48 g/l se producen cambios ecológicos importantes. Uno de ellos es la desaparición de peces como el “pejerrey”, el cual declina rápidamente con salinidad por encima de los 48 g/l y desaparece hacia los 60 g/l. Es posible que su rol de especie planctófaga sea reemplazado a salinidades altas por el flamenco. Al bajar el nivel del agua quedan expuestas amplias playas barrosas, las cuales favorecen a las aves playeras (hábitat de alimentación) y a los flamencos (hábitat de nidificación, sobre todo en islas).

El Valle del Río Dulce: El valle del Río Dulce se inunda en forma variable al final de la época estival, determinando los distintos tipos de vegetación presentes en la región. Es posible que en esta situación intermedia se produzca la máxima diversidad de ambientes asociados a distintos niveles de inundación, con su fauna asociada, particularmente en lo que hace a colonias de aves acuáticas.

Años secos a muy secos

Laguna de Mar Chiquita: Con cotas por debajo de aproximadamente 64,40 m la salinidad supera los 100 g/l alcanzándose una situación que hemos denominado hipersalina. Con estos niveles comienza a producirse la cristalización de sales, dependiendo de la concentración y temperatura. Las algas cianofíceas y el crustáceo *Artemia salina* se vuelven dominantes. También disminuyen marcadamente aquellas especies de aves piscívoras (como “biguá” y “martín pescador”), los cuales se restringen a la desembocadura de los ríos afluentes, particularmente el Dulce y el Xanaes (Segundo).

Bajo estas condiciones extremas los ciclos de nutrientes y flujos de energía toman caminos alternos bastante diferentes de los que se encuentran en situaciones medias. La disponibilidad de oxígeno se vuelve limitante, y comienzan a tomar importancia las bacterias fotótrofas anoxigénicas capaces de fotosintetizar en condiciones de anoxia, usando hidrógeno molecular, compuestos de azufre reducido, o compuestos orgánicos simples como donantes de electrones. Como resultado de estas nuevas condiciones se produce una importante acumulación de materia orgánica en el fondo, y la liberación de gases de azufre que dan un olor muy característico a la laguna.

A partir de este fango se generan cadenas tróficas importantes originadas en las especies capaces de alimentarse del mismo, particularmente en las costas barrosas. Son muy importantes las larvas de las “moscas de la sal” (familia *Ephydriidae*) las cuales son muy apetecidas por las aves playeras y particularmente el “chorlo” (*Phalaropus tricolor*), generalmente muy abundantes en épocas de aguas bajas. Asimismo, las poblaciones de flamencos podrían mantenerse altas en tanto se mantuviera la afluencia de agua dulce y nutrientes en amplios sectores de la laguna.

De continuar el descenso de nivel, puede llegarse finalmente a condiciones de desecamiento total o casi total, con condiciones ambientales equivalentes a la de una salina, situación muy parecida a las que se puede apreciar en las Salinas Grandes y Salinas de Ambargasta situadas a relativamente corta distancia de la Mar Chiquita (UNC, 1998).

El valle del Río Dulce: En ciclos muy secos el Río Dulce puede llegar con caudales muy bajos o hasta secarse antes de alcanzar la Mar Chiquita, con escasa capacidad de producir inundaciones en los bañados. Lo mismo puede ocurrir con los Ríos Xanaes y Suquía como sucedió, por ejemplo, a fines de la década del 60 y comienzos de 1970 (Rodríguez, 1990).

En años de muy baja disponibilidad de agua disminuye radicalmente el área cubierta por los humedales del valle del Río Dulce, ya que el escurrimiento queda confinado al cauce o canales principales del río. De mantenerse varios años esta situación, puede llegar a producirse un cambio drástico en la vegetación, la que puede ser reemplazada por vegetación arbustiva y herbácea de ambientes chaqueños y/o ambientes salinos, dependiendo de la topografía y los suelos. Se produce, además, una muy marcada disminución de la abundancia y riqueza de la fauna silvestre, asociada a una menor heterogeneidad ambiental y a una caída de la productividad primaria. Hay una reducción de la biodiversidad, y desaparecen las grandes concentraciones de aves que caracterizan la región. Ante la pérdida de pasturas, aptas para la ganadería nómada, una fuente económica de importancia para la región también se ve afectada drásticamente (UNC, 1998).

HIPÓTESIS ADOPTADAS

A los efectos de modelar el sistema y estimar los volúmenes mínimos compatibles con los distintos escenarios ecológicos planteados, es necesario calcular las funciones que permiten modelar la geometría de la laguna, y realizar las distintas estimaciones para el total de variables que participan en el complejo funcionamiento lagunar.

El modelo conceptual del Sistema de Mar Chiquita considerado en este trabajo incluye los siguientes componentes hidrológicos:

Cuerpo principal de la Laguna de Mar Chiquita

Tributarios principales:

Río Dulce

Río Suquía (también conocido como Río Primero)

Río Xanaes (también conocido como Río Segundo)

Aportes superficiales por Precipitación (considerando el aporte diferencial en función de la cota de la laguna).

Pérdidas superficiales por Evaporación y Evapo-transpiración (considerando la influencia de la salinidad).

Se destaca que la interacción con el agua subterránea no se incluyó en este análisis.

El modelo matemático de balance hídrico que resuelve la ecuación de conservación de masa líquida aplicada al sistema hidrológico de Mar Chiquita simplificado, puede escribirse de la siguiente forma,

$$DV = S \sum Q_i DT + A_L (P - E) DT \quad (1)$$

donde:

DV variación de volumen de la laguna,

Q_i caudales aportados por los tributarios al sistema,

P precipitación media areal sobre la laguna,

E evaporación,

A_L área de la laguna,

DT paso de tiempo.

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

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

- Estimadores de evaporación para la Laguna: Se analizaron tres formulaciones a) Lungeon, b) Meyer, c) Priestley Taylor, de acuerdo a la revisión previa (Pagot 2000, Chow *et al.* 1994, Mijares 1995) se adoptó la tercera de ellas, adicionándosele la corrección por presencia de sales, como se describirá más adelante.
- Estimación de la precipitación efectiva en el cuerpo lagunar, adoptando coeficientes de ponderación de la distribución espacial en función del tamaño de la laguna.

- Reducción del caudal del Río Suquía desde estaciones hidrométricas cercanas a la laguna (La Para) hasta la misma (ver Figura 2) .
- Reducción del caudal del Río Xanaes desde estaciones hidrométricas cercanas a la laguna (Campo Plujunta) hasta la misma (ver Figura 2).

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 medidas y las correspondientes funciones geométricas Area (nivel) y Volumen (nivel).

VARIABLES INTERVINIENTES EN LA SIMULACIÓN HIDROLÓGICA DE MAR CHIQUITA

En esta sección se describen los diversos procesos y análisis que se realizaron con los niveles y geomorfología de la laguna, el cálculo de la serie media mensual de niveles y las funciones que permiten modelar la geometría lagunar.

Niveles de la Laguna de Mar Chiquita

Los niveles fueron medidos en Miramar por la Dirección de Agua y Saneamiento de la 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).

Las funciones geométricas de la laguna fueron mejoradas y extendidas, partiendo de las campañas batimétricas realizadas previamente (e.g. Rodriguez,1990) y completadas con 12 imágenes satelitales adicionales.

Funciones geométricas de la laguna

Construcción de las Curvas h-A, A-h y h-V, V-h

Para el cálculo de las funciones que vinculan las distintas variables se ajustaron funciones polinómicas de diverso grado (generalmente de sexto grado). Para obtener dichas funciones, se utilizaron los datos provistos por la batimetría y las demás imágenes satelitales, cubriéndose de esa manera todos los rangos de niveles esperados en la laguna (de 62,03 a 71,4 msnm).

Las funciones resultantes fueron:

$$A(h) = a_{A6} h^6 - a_{A5} h^5 + a_{A4} h^4 - a_{A3} h^3 + a_{A2} h^2 - a_{A1} h + a_{A0} \quad (2)$$

$$R^2 = 0,997$$

donde: $a_{A6} = 0,000421589496042$, $a_{A5} = 0,167077481115471$, $a_{A4} = 27,5731557650158$,
 $a_{A3} = 2425,5207164642$, $a_{A2} = 119949,116811569$, $a_{A1} = 3161832,1333684$ y $a_{A0} = 34707257,6161$.

$$h(A) = b_{A6} A^6 - b_{A5} A^5 + b_{A4} A^4 - b_{A3} A^3 + b_{A2} A^2 - b_{A1} A + b_{A0} \quad (3)$$

$$R^2 = 0,996$$

donde: $b_{A6} = 0,0032692439123139$, $b_{A5} = 0,0753534275645507$, $b_{A4} = 0,6562892739020750$,
 $b_{A3} = 2,66266448027454$, $b_{A2} = 4,82769302348606$, $b_{A1} = 1,16380144807044$ y $b_{A0} = 62,1609918009017$.

$$V(h) = a_{V6} h^6 - a_{V5} h^5 + a_{V4} h^4 - a_{V3} h^3 + a_{V2} h^2 - a_{V1} h + a_{V0} \quad (4)$$

$$R^2 = 0,9999$$

donde: $a_{V6} = 0,0002637754339077$, $a_{V5} = 0,1057596696730520$, $a_{V4} = 17,65959405869430$,
 $a_{V3} = 1571,888901065650$, $a_{V2} = 78661,96687460170$, $a_{V1} = 2098382,48647610$ y $a_{V0} = 23311555,0177567$.

$$h(V) = b_{V6} V^6 - b_{V5} V^5 + b_{V4} V^4 - b_{V3} V^3 + b_{V2} V^2 - b_{V1} V + b_{V0} \quad (5)$$

$$R^2 = 0,9989$$

Con: $b_{V6} = -0,000000637735588$, $b_{V5} = 0,000056113372223$, $b_{V4} = -0,001929114837310$,
 $b_{V3} = 0,032871684297788$, $b_{V2} = -0,296612664154964$, $b_{V1} = 1,682205086908650$ y $b_{V0} = 62,2605479511585$.

Aportes por Precipitaciones

Los aportes correspondientes a las precipitaciones se obtuvieron a partir de series pluviométricas, generadas en ocho subseries, correspondientes a distintos puntos del contorno de la laguna (e.g. N, S, E, O, SE, SO, NE y NO).

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,

$$P = f_N(h) P_N + f_S(h) P_S + f_E(h) P_E + f_O(h) P_O + f_{SE}(h) P_{SE} + f_{SO}(h) P_{SO} + f_{NE}(h) P_{NE} + f_{NO}(h) P_{NO} \quad (6)$$

con $\sum \alpha_i = 1$, donde los coeficientes se han obtenido por medio de polígonos de Thiessen.

Para calcular las precipitaciones efectivas en el espejo de agua de la laguna, se realizaron los siguientes procesos:

- Cálculo de la precipitación media anual histórica, para cada sector.
- Cálculo de los coeficientes de distribución de precipitaciones f .
- Cálculo de la lámina efectiva sobre el espejo de agua de la laguna.

El cálculo de los coeficientes de distribución de precipitaciones f será variable en función del área de la misma, asociado a distintos escenarios climatológicos.

Estos coeficientes de peso se obtuvieron en función de la distribución geométrica de las distintas estaciones, estando cada punto representativo del sector, ubicado en el baricentro que forma la figura inscrita por la posición de las estaciones asignadas al punto.

Los escenarios climáticos analizados fueron: pobre, medio y rico. Los mismos se materializaron mediante tres imágenes satelitales, sobre las cuales se calcularon los coeficientes de peso (polígonos de Thiessen). Las imágenes satelitales analizadas fueron:

- Septiembre de 1973
- Julio de 1987
- Enero de 1997

El conjunto de datos relevados de las imágenes antes mencionadas, se resumen en la Tabla 1.

Para calcular la lámina efectiva precipitada sobre el espejo de agua de la laguna, se utilizó el siguiente procedimiento:

- con el nivel, obtener los coeficientes de distribución para cada sector asignado;
- aplicar el coeficiente de distribución a la lluvia media anual histórica correspondiente;
- realizar la sumatoria de las láminas precipitadas en todas las zonas (ecuación. 5).

El procedimiento descrito permite estimar la precipitación efectiva sobre el espejo de agua para cada escenario que se desee simular.

Tabla 1: Coeficientes de distribución de precipitaciones.

Año	H [m]	Area [km2]	Estación	a
1973	64.56	1264	NO	0
			N	0
			NE	0.075
			E	0.3
			SE	0.03
			S	0.67
			SO	0
			O	0
1987	71.4	7239	NO	0.087
			N	0.114125
			NE	0.14125
			E	0.285
			SE	0.027
			S	0.24
			SO	0.1
			O	0.0775
1997	68.8	4398	NO	0.053
			N	0.0895
			NE	0.126
			E	0.314
			SE	0.04
			S	0.36
			SO	0.074
			O	0.0375

Pérdidas por Evaporación en la Laguna Mar Chiquita

Generalidades

Los datos necesarios para estimar la variable de evaporación en la Laguna de Mar Chiquita provienen de las estaciones meteorológicas ubicadas en Miramar y en La Rinconada, cubriendo cada una de ellas distintos períodos. En Miramar se contó con mediciones discontinuas en el periodo 1964-1996, mientras que en La Rinconada, la misma situación se presenta en el periodo 1980-1987.

En ambas estaciones y a los fines de generar una serie de evaporación representativa del área de la Laguna, se relevaron datos de evaporación, humedad relativa y temperaturas mensuales medias: de bulbo seco, de bulbo húmedo, máxima y mínima. Además, se pudo disponer de datos de mediciones de velocidad del viento en Miramar.

Para calcular la serie de evaporación en Miramar (periodo 1967-97), se adoptó entre las formulaciones de a) Lungeon, b) Meyer y c) Priestley-Taylor, (Pagot, 2000), pudiendo concluir que esta última ecuación (c), refleja mejor las medias mensuales de evaporación medidas en tanque clase A (afectadas por un factor 0,7 para compensar diferencias de volumen, superficie, ubicación, etc. del espejo de agua). (Figura 5)

La serie estimada de evaporación en la Laguna de Mar Chiquita, se generó en función de la respectiva serie de evaporación en Miramar (1964-1997) y en La Rinconada (1980-1987), arrojando como resultado una serie mensual en el periodo 1964-1997 con valor medio anual igual a 1448,5 mm (valor es que se adoptó en el cálculo del balance).

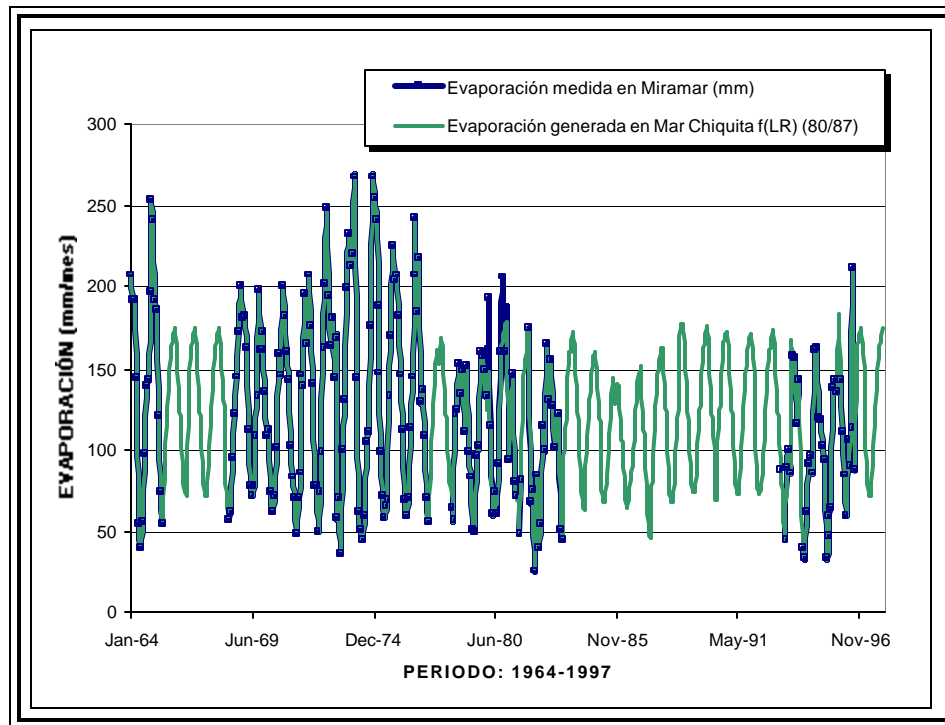


Figura 5: Evaporación medida en Miramar y generada en la Laguna de Mar Chiquita (1964-1997).

Corrección de los valores de evaporación considerando el efecto de la salinidad.

Los antecedentes identificados (Chow, 1994) demostraron que los valores de evaporación decrecen con el incremento de la densidad específica. Se estima en un 1%, el descenso de la evaporación al aumentar la variación de la densidad específica en un 1%. Se considera que el valor de densidad específica para agua dulce es igual a 1,0 pudiendo llegar hasta valores cercanos a 1,3 correspondientes a un límite máximo de saturación.

A los efectos de determinar la ley de variación entre densidad específica y concentración de sales, se correlacionaron los valores asociados a estas variables resultando la siguiente expresión

$$d = 0,0007C + 1 \quad (7)$$

donde: d : densidad específica y C : concentración de sales (g/l).

Los valores de concentración se calcularon considerando la relación entre los valores de masa total de sales disueltas y los volúmenes de la laguna (Figuras. 7 y 8). Algunos de los valores calculados fueron reemplazados por mediciones directas, las cuales fueron relevadas en los años: 1925, 1953, 1970, 1977, 1982, 1986, 1989, 1992 y 1998 (Tabla 2).

Se ha adoptando como hipótesis que la concentración de sales para el caso de Mar Chiquita puede ser representada aceptablemente por la salinidad (UNC, 1998).

La relación entre la salinidad en la laguna y su volumen se calculó mediante una función polinómica de quinto orden, de la forma:

$$S(V) = e_{s5} V^5 + e_{s4} V^4 + e_{s3} V^3 + e_{s2} V^2 + e_{s1} V + e_{s0} \quad (8)$$

$$R^2 = 0,9999$$

donde:

S : Salinidad (g/l), V : volumen de la laguna (km³), $e_{s5} = -0,000279176779$, $e_{s4} = 0,022936789242$, $e_{s3} = -0,72038826477$, $e_{s2} = 10,763349497793$, $e_{s1} = -78,212439657597$ y $e_{s0} = 277,363983579691$.

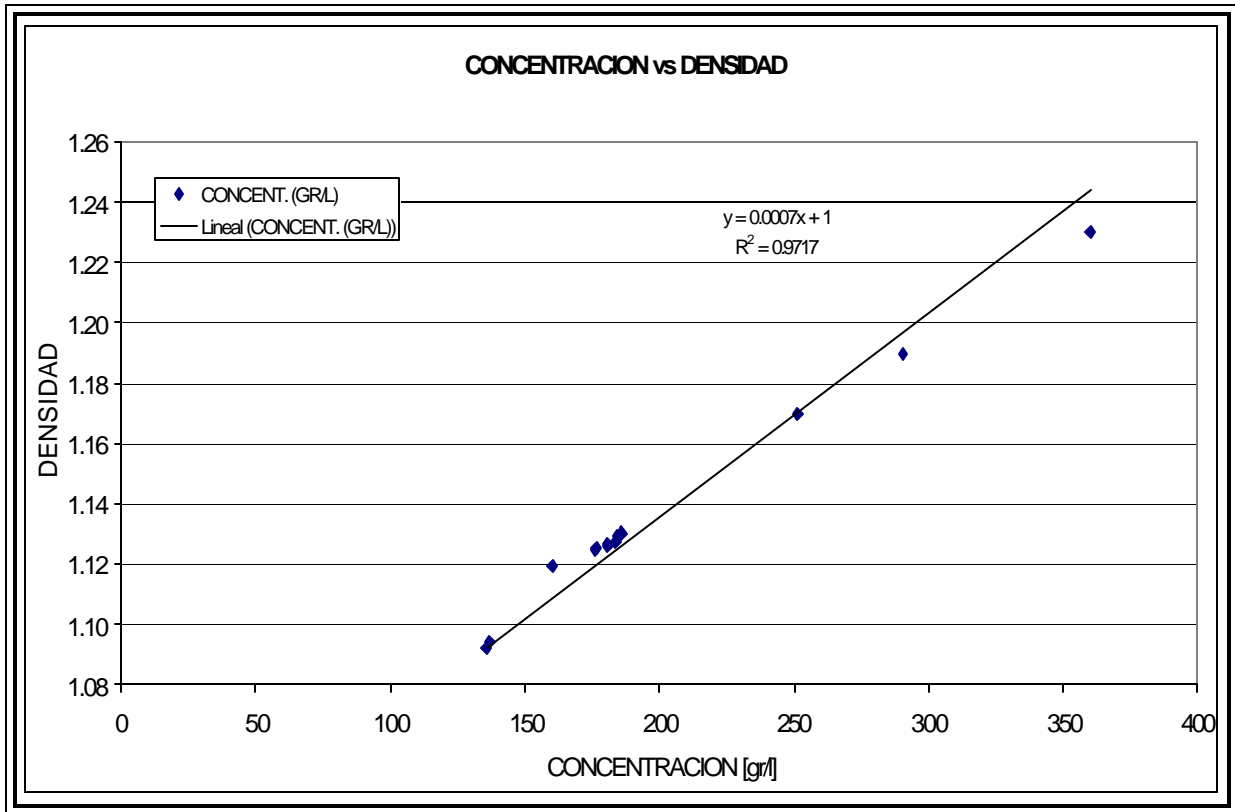


Figura 6: Correlación Densidad vs Concentración de sales totales de agua salada.

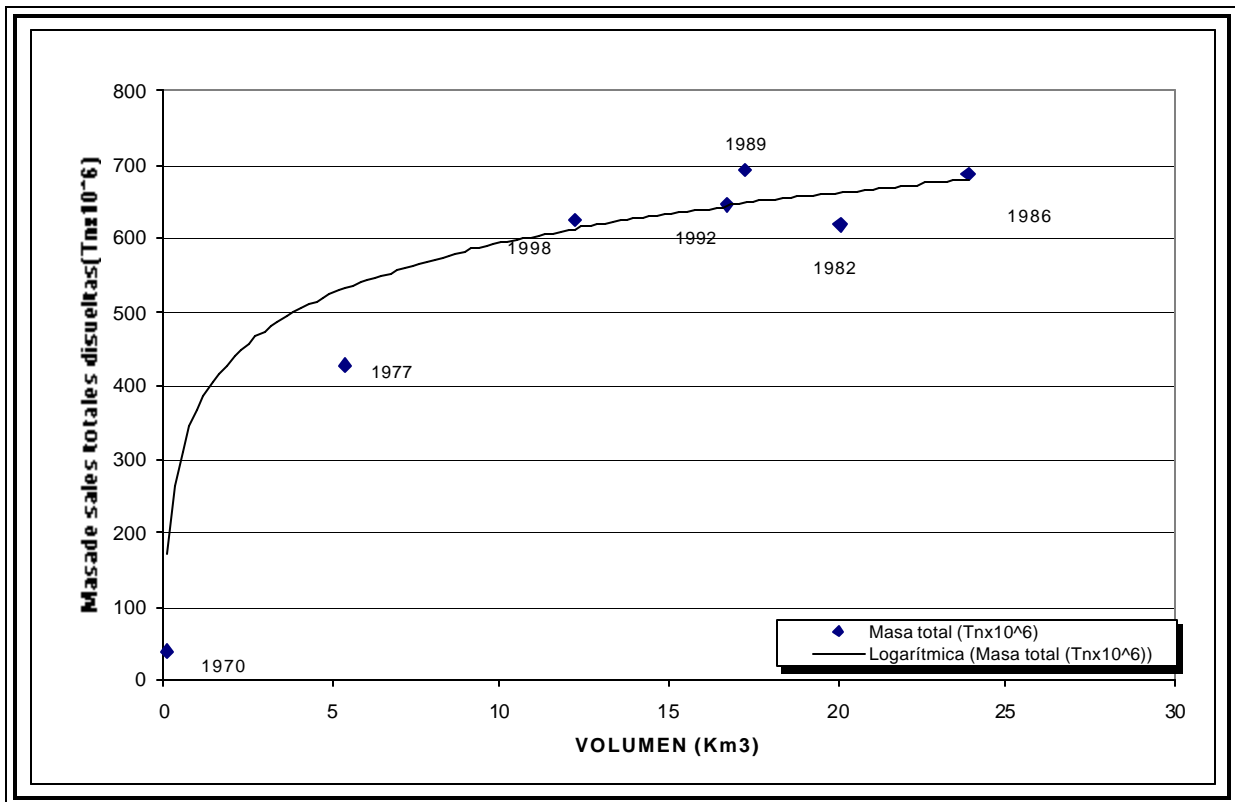


Figura 7: Curva de masa de sales disueltas respecto del volumen de la Laguna de Mar Chiquita.

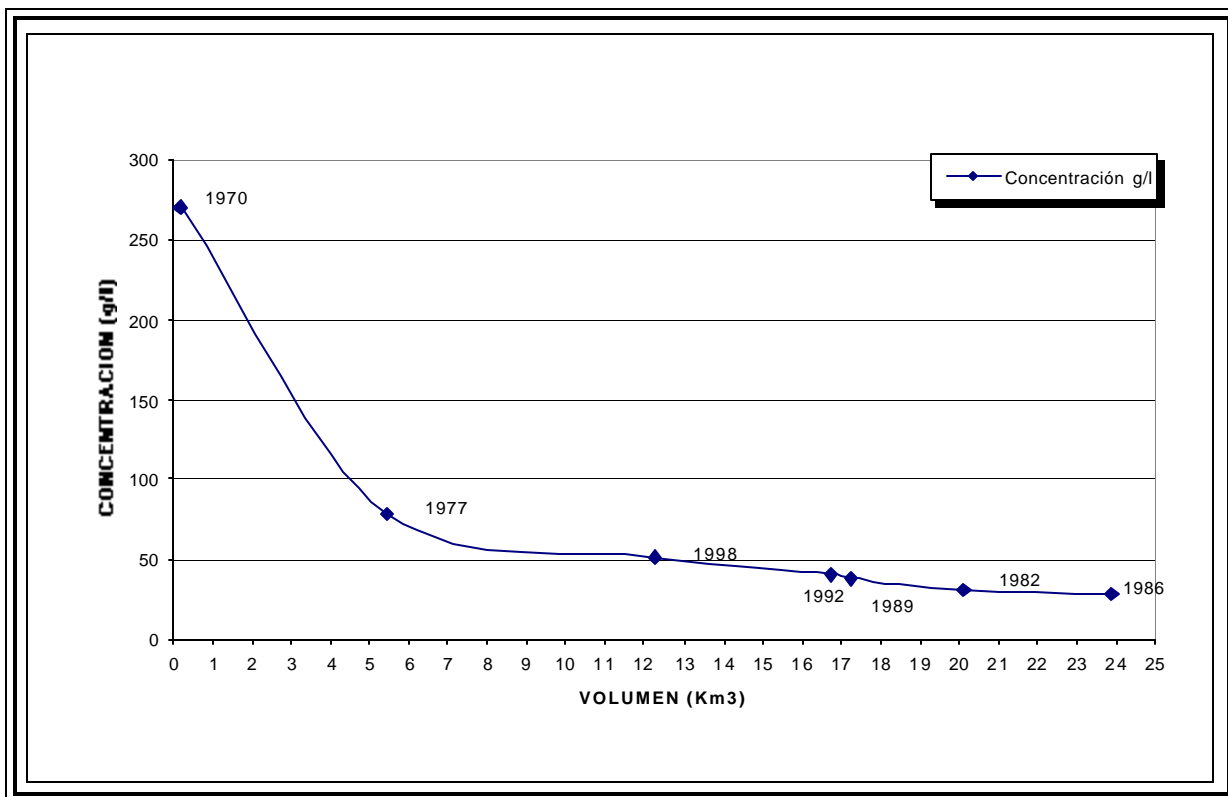


Figura 8: Variación de Concentración respecto del volumen de la Laguna de Mar Chiquita.

Tabla 2: Datos de salinidad medida y masa de sales totales respecto del volumen de la Laguna de Mar Chiquita.

Masa total (Tnx10 ⁶)	Salinidad g/l	Volumen Km3	Año
38,79	270,69	0,14	1970
427,93	78,69	5,44	1977
618,40	30,77	20,10	1982
686,31	28,73	23,89	1986
692,56	40,22	17,22	1989
644,91	38,46	16,77	1992
625,26	51	12,26	1998

Finalmente se aplicó a los valores de evaporación antes calculados, un factor de corrección ($f_{cp} = 1 - \delta$) considerando la influencia de la salinidad en el agua de la laguna, variable entre 0,7 y 1,0.

$$EVP_c = EVP_L \cdot f_{cr} \quad (9)$$

donde:

EVP_c: evaporación corregida considerando el efecto de la salinidad (mm)

EVP_L: evaporación en la Laguna de Mar Chiquita (mm)

f_{cr}: factor de corrección considerando el efecto de la salinidad.

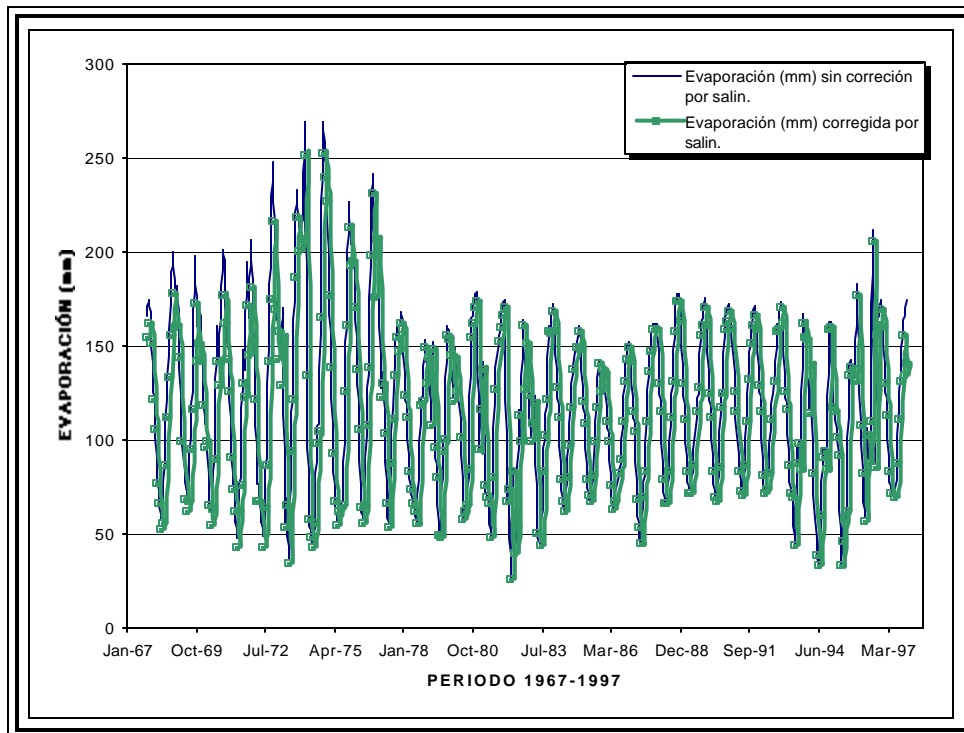


Figura 9: Evaporación mensual en la Laguna de Mar Chiquita considerando el efecto de salinidad.

Caudales

Los datos de caudal del Río Dulce no fueron utilizados en este balance, puesto que constituyeron la incógnita a modelar. Los caudales medios mensuales del río Suquía (Primero) han sido determinados en la sección de aforo “Río Primero”, aproximadamente a 75 km de la laguna, utilizando, además, niveles diarios y aforos disponibles, llegando, así, a completar dicha serie mediante correlaciones múltiples con caudales medidos aguas arriba y precipitaciones en la cuenca intermedia.

El caudal mensual aportado a la Laguna de Mar Chiquita por el Río Xanaes se obtuvo a partir de series de niveles diarios en la sección de aforo de “Campo Plujunta”, aproximadamente a 15 km de la laguna y por correlación múltiple con caudales medidos en secciones aguas arriba y precipitaciones en la cuenca intermedia, cubriendo el período 1926-1997.

El aporte conjunto de ambos ríos del sur (Suquía y Xanaes) arrojó un valor medio igual a 19,2 m³/año en el periodo 1926-1997.

CASOS SIMULADOS

Se ha aplicado el modelo para simular dos tipos de casos. El primero destinado a predecir la variación en la evolución de los niveles de la laguna ante extracciones de caudal en el tributario principal (río Dulce). El segundo caso corresponde al cálculo de los aportes mínimos del tributario principal necesarios para mantener la laguna en niveles altos, medios o bajos compatibles con los tipos de ambientes ecológicos de la laguna.

Ambos casos están orientados a conocer cuales serían las políticas de manejo de aguas más adecuadas y que no provoquen impactos ambientales negativos (umbrales de salinidad mencionados).

Caso a

La simulación se realizó con paso semestral en el periodo de 1967-1997, asumiendo dos tipos de extracciones de caudal en el río Dulce para riego constante de 10 y 20 m³/s. La metodología de modelado contempló dos etapas.

En la primera se obtuvieron los caudales ingresantes a la laguna a través del río Dulce, despejándolos de la ecuación (1), siendo todos los otros términos conocidos (variables de nivel, precipitación, evaporación y aportes de los ríos Suquía y Xanaes). Naturalmente, si se alimenta al modelo con estos caudales del río Dulce se produce la curva de evolución de niveles medida y señalada en la Figura 4 como “nivel medido”. Es decir, se ajusta y reproduce la serie de niveles con el comportamiento medido en los últimos 30 años.

En la segunda etapa, se alimenta al modelo con la serie de aportes del Dulce reducida por efectos de las extracciones (curvas $Q_{ext}=10 \text{ m}^3/\text{s}$ y $Q_{ext}=20 \text{ m}^3/\text{s}$) en la Figura 4.

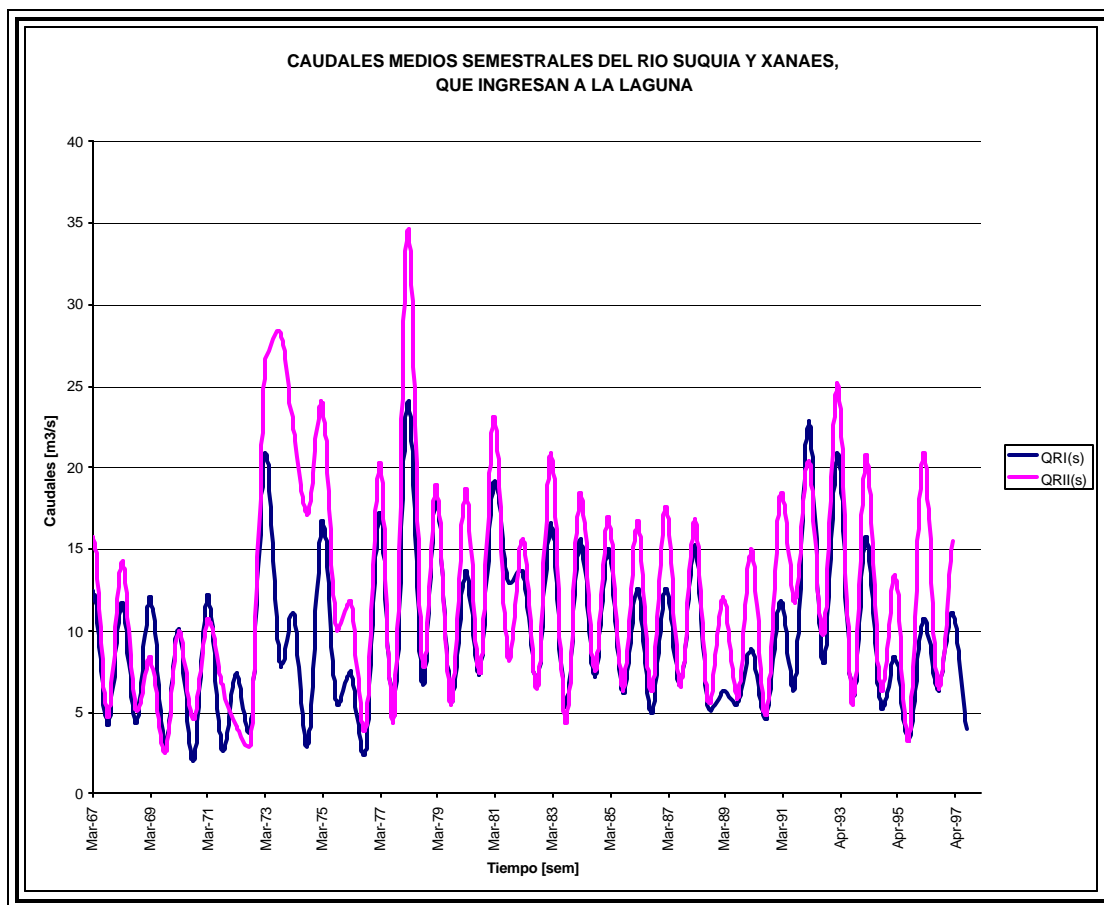


Figura 10: Caudales medios semestrales utilizados en el Balance Hídrico de Mar Chiquita.

Caso b

Se ha calculado mediante el modelo numérico el aporte necesario para mantener la laguna en tres niveles típicos denominados “altos”, “medios” y “bajos”. Estos niveles se corresponden con volúmenes y salinidades que se han adoptado como representativos de las características ecológicas diferenciables, utilizando como parámetro determinante la concentración de salinidad en el cuerpo de la laguna.

El nivel alto corresponde a niveles mayores a 69,0 msnm, y salinidades menores a 48 g/l aproximadamente, siendo este límite el aceptable para la normal reproducción del “pejerrey”.

El nivel medio está asociado a niveles de salinidad comprendidos entre 48 g/l y 60 g/l, considerando estos valores aceptables para la subsistencia del pejerrey en la laguna sin contar con un ambiente adecuado para su reproducción. Este rango de salinidad se corresponde con volúmenes en la laguna limitados entre las cotas 69,0 msnm y 67,5 msnm, aproximadamente.

Por último, se considera como nivel bajo a aquel que está relacionado con salinidades mayores a 60 g/l los cuales se manifiestan para cotas inferiores a 67,5 msnm, escenario en el cual el desarrollo normal y subsistencia de las distintas especies que conforman la fauna típica se torna inviable.

A los efectos de modelar el comportamiento lagunar ante distintos escenarios propuestos, se consideraron las siguientes hipótesis de cálculo:

- Se tomaron incrementos de 0.5 m en el nivel de agua de la laguna. De esta forma se cubrieron todos los escenarios planteados anteriormente.
- Puesto que la concentración de salinidad en la laguna depende del volumen de la misma, se utilizaron las diversas expresiones que permiten evaluar el volumen y el área en función de los niveles. Esto permitió

calcular los volúmenes a partir de los niveles y estimar, a través de la ecuación (8) $Salin=f(V)$, la salinidad para dicho nivel.

- El paso de cálculo en esta simulación es anual, por lo que los resultados obtenidos deberán ser interpretados como las condiciones a satisfacer en un plazo medio de 1 año.
- La evaporación fue calculada como media anual considerando su reducción por efecto de la salinidad a través de la variación de densidad y el área de la laguna (ecuaciones 7,8 y 9). De la misma forma, las precipitaciones se analizaron considerando la variación de área de la laguna en cada uno de los octantes propuestos para tal fin.
- La variable de caudal utilizada en el balance de la laguna consistió en la suma de los aportes medios anuales realizados por los ríos Suquía (Primero) y Xanaes (Segundo).
- Los aportes de los tributarios del sur fueron supuestos constantes e iguales a la suma de los módulos (19,2 m³/s); dada su baja influencia en los resultados finales.

RESULTADOS

Los resultados se presentan en tres tablas y dos gráficos, donde se resumen los distintos procedimientos de cálculo realizados.

En la Tabla 3 y en la Figura 11, se presentan los caudales medios anuales que ingresan por el Río Dulce en Paso de la Cina, necesarios para mantener la laguna en un determinado nivel, independientemente de cual fuera la condición inicial de la misma. Este valor se expresa en la última columna, Q [m³/s].

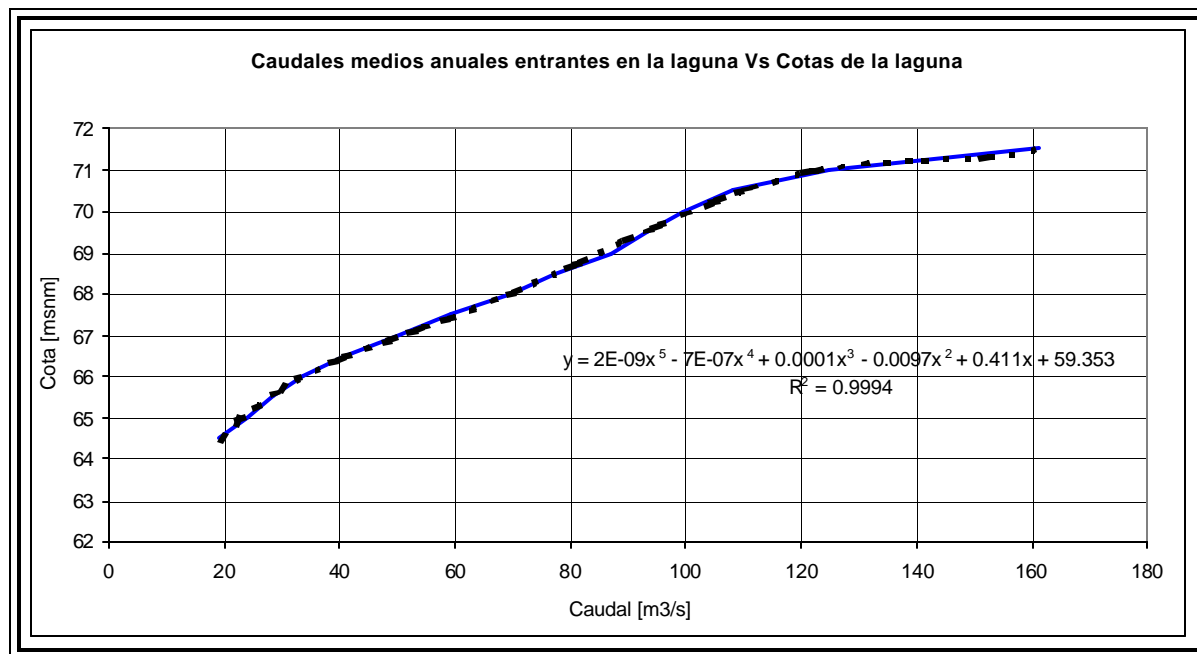


Figura 11: Caudales medios anuales entrantes en la Laguna de Mar Chiquita necesarios para mantener la laguna en una cota estable.

Para resumir el proceso de cálculo realizado, se pueden distinguir las siguientes etapas:

- Cálculo del área y volumen de la laguna en función del nivel de agua propuesto. (A)-(V)
- Estimación de la concentración de salinidad (s) en función del volumen de la laguna calculado en el paso 1. Tabla 4.
- Cálculo de la evaporación real por m² de superficie de agua (EVAP), como media de la serie 1967-1997.
- Estimación de la evaporación corregida, debido a las variaciones de densidad sufridas por la laguna, como consecuencia de las diferentes concentraciones salinas para distintos niveles. (EVAPcorr)
- Cálculo de la precipitación efectiva en el área de la laguna. Se utilizan para tal fin los coeficientes de peso de la Tabla 5. (Ppfect).
- Cálculo de la evaporación efectiva, resultante de la diferencia entre la evaporación corregida y la precipitación efectiva. (EVApfect).

- Suma de los caudales medios anuales de los ríos Suquía (Primero) y Xanaes (Segundo) para la serie 1967-1997. (QRI+QRII).
- Cálculo del caudal medio anual entrante en Paso de la Cina, necesario para mantener la laguna en la cota propuesta (H). Esta última variable proviene de la ecuación de balance, considerando la variación de volumen nula (se mantiene el tamaño de la laguna constante), por lo que el caudal necesario para cerrar la ecuación resulta de restar a las pérdidas por evaporación (EVAPefect) los caudales aportados por los ríos Suquía (Primero) y Xanaes (Segundo).

Tabla 3: Caudales medios anuales del río Dulce entrantes en Paso de la Cina calculados en función del balance hídrico.

CAUDAL MÍNIMO ENTRANTE EN PASO DE LA CINA (todos los valores se calcularon en el período 1967-1997)										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	H	A	V	S	EVAP Media	EVAP Corr.	Prec. Mediaa nual	EVAP Efec.	Q RI+RI I Media anual	Q
	[msnm]	x1000 [km ²]	[km ³]	[g/l]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[m ³ /s]	[m ³ /s]
	71.5	7.7739439	26.973326	16.600116	1448.50	1432	777	654.75	19.2	142.23
	71.0	6.1289434	23.631324	28.598089	1448.50	1420	777	642.59	19.2	105.71
	70.5	5.3297656	20.736494	30.893924	1448.50	1417	777	640.26	19.2	89.04
	70.0	4.936878	18.138019	35.519936	1448.50	1412	777	635.57	19.2	80.33
	69.5	4.675671	15.752712	41.79229	1448.50	1406	777	629.21	19.2	74.12
Laguna Grande	69.0	4.3966241	13.544688	47.259781	1448.50	1401	777	623.66	19.2	67.78
	68.5	4.0402131	11.508	50.756062	1448.50	1397	792	604.98	19.2	58.34
	68.0	3.6065629	9.6522403	53.097738	1448.50	1395	792	602.61	19.2	49.75
Laguna Media	67.5	3.1298403	7.9911118	56.5083	1448.50	1391	792	599.15	19.2	40.29
	67.0	2.6573927	6.5339693	63.370203	1448.50	1384	792	592.19	19.2	30.73
	66.5	2.2336273	5.2803237	75.10453	1448.50	1372	792	580.30	19.2	21.93
	66.0	1.8886341	4.2173152	91.799948	1448.50	1355	792	563.37	19.2	14.57
	65.5	1.6315524	3.3201556	112.64427	1448.50	1334	792	542.23	19.2	8.88
	65.0	1.448678	2.5555358	136.70703	1448.50	1310	792	517.83	19.2	4.62
Laguna Pequeña	64.5	1.3063169	1.8880022	163.50186	1448.50	1283	818	464.28	19.2	0.06

Los caudales en Paso de la Cina fueron obtenidos asumiendo el mantenimiento de la laguna en forma estable, para lo que resultó necesario estimar niveles iniciales fijando también niveles deseados. De esta manera se ha obtenido una gama de alternativas asociadas a diversas condiciones iniciales (Tabla 6).

En dicha tabla, se encuentran en abscisas y ordenadas, las cotas de la laguna, de forma tal que entrando por abscisas con el nivel actual de laguna, se puede conocer el caudal medio anual, entrante en Paso de la Cina, necesario para pasar a un escenario más favorable (niveles en ordenadas). Para ilustrar, se puede observar que los caudales que conforman la diagonal de la Tabla 6 son aquellos que mantienen la laguna en el nivel existente, y coinciden con los calculados en la Tabla 3.

Se han demarcado con color verde (claro) y rojo (oscuro) respectivamente, el primer y el segundo umbral que delimitan las condiciones ecológicas tolerables y más desfavorables, diferenciándose tres zonas :

Por encima del primer umbral (salinidad inferior a 48 g/l). Se considera esta zona como la ecológicamente óptima.

Entre el primer umbral y el segundo (salinidad superior a 48 g/l e inferior a 60 g/l).

Por debajo del primer umbral (salinidad superior a 60 g/l). Se considera esta zona como desfavorable para el normal desarrollo biótico del sistema.

Tabla 4: Evaporación en la Laguna de Mar Chiquita corregida por salinidad (columna 6 Tabla 3).

PERIODO	H	Volumen estimado	Salinidad Estimada	Densidad	Factor Correcc.	EVAP. Media anual	EVAP. Corr.
	[msnm]	[Km ³]	[g/l]		fcr	[mm]	[mm]
	71.50	26.9733	16.60	1.01	0.99	1448.50	1431.67
	71.00	23.6313	28.60	1.02	0.98	1448.50	1419.50
	70.50	20.7365	30.89	1.02	0.98	1448.50	1417.18
	70.00	18.1380	35.52	1.02	0.98	1448.50	1412.48
	69.50	15.7527	41.79	1.03	0.97	1448.50	1406.12
Grande	69.00	13.5447	47.26	1.03	0.97	1448.50	1400.58
	68.50	11.5080	50.76	1.04	0.96	1448.50	1397.04
	68.00	9.6522	53.10	1.04	0.96	1448.50	1394.66
Mediana	67.50	7.9911	56.51	1.04	0.96	1448.50	1391.20
	67.00	6.5340	63.37	1.04	0.96	1448.50	1384.25
	66.50	5.2803	75.10	1.05	0.95	1448.50	1372.35
	66.00	4.2173	91.80	1.06	0.94	1448.50	1355.42
	65.50	3.3202	112.64	1.08	0.92	1448.50	1334.28
	65.00	2.5555	136.71	1.10	0.90	1448.50	1309.89
Chica	64.50	1.8880	163.50	1.11	0.89	1448.50	1282.72

Tabla 5: Precipitación media anual [mm] para distintos niveles en la Laguna de Mar Chiquita (serie 1967-1997) y coeficientes de peso según componente areal.

PRECIPITACIONES MEDIAS ANUALES (71.4 – 68.8 – 64.56)							
PN	PNE	PE	PSE	PS	PSO	PO	PNO
691	866	878	803	794	700	678	619
0.114125	0.14125	0.213125	0.027	0.24	0.1	0.0775	0.087
0.089	0.126	0.22	0.04	0.36	0.0745	0.0375	0.053
0	0.075	0.225	0.03	0.67	0	0	0

Tabla 6: Caudales [m3/s] necesarios para pasar de un nivel de la laguna a otro [cotas en msnm].

	64.5	65.0	65.5	66.0	66.5	67.0	67.5	68.0	68.5	69.0	69.5	70.0	70.5	71.0	71.5
71.5	876.1	864.6	848.2	829.5	807.8	782.0	750.6	712.4	666.7	616.9	556.6	490.5	421.3	354.7	142.2
71.0	754.8	742.6	725.8	706.8	684.9	658.9	627.4	589.1	543.3	493.3	432.9	366.6	297.4	105.7	
70.5	655.9	643.4	626.4	607.3	585.2	559.1	527.6	489.3	443.5	393.3	332.8	266.6	89.0		
70.0	569.8	557.1	540.1	520.9	498.8	472.6	441.0	402.7	356.9	306.6	246.1	80.3			
69.5	491.6	478.8	461.7	442.4	420.3	394.1	362.4	324.1	278.2	227.9	74.1				
69.0	418.9	406.0	388.8	369.5	347.3	321.0	289.4	251.0	205.1	67.8					
68.5	350.4	337.4	320.1	300.7	278.4	252.0	220.3	181.8	58.3						
68.0	287.8	274.6	257.2	237.7	215.3	188.9	157.1	49.7							
67.5	231.0	217.5	200.1	180.5	158.0	131.6	40.3								
67.0	180.6	166.9	149.4	129.7	107.1	30.7									
66.5	136.9	123.1	105.4	85.7	21.9										
66.0	100.0	85.9	68.2	14.6											
65.5	68.9	54.7	8.9												
65.0	42.7	4.6													
64.5	0.1														

Como forma práctica de estimar el caudal necesario para lograr la recuperación de la laguna hasta el nivel que se considere deseable (en el término de un año), se confeccionó un ábaco (Figura 12) de doble entrada, del cual se puede obtener información orientativa sobre el grado de concentración de salinidad para distintos niveles de laguna y despejar (en función del nivel requerido y el estado inicial de la laguna) el caudal necesario entrante.

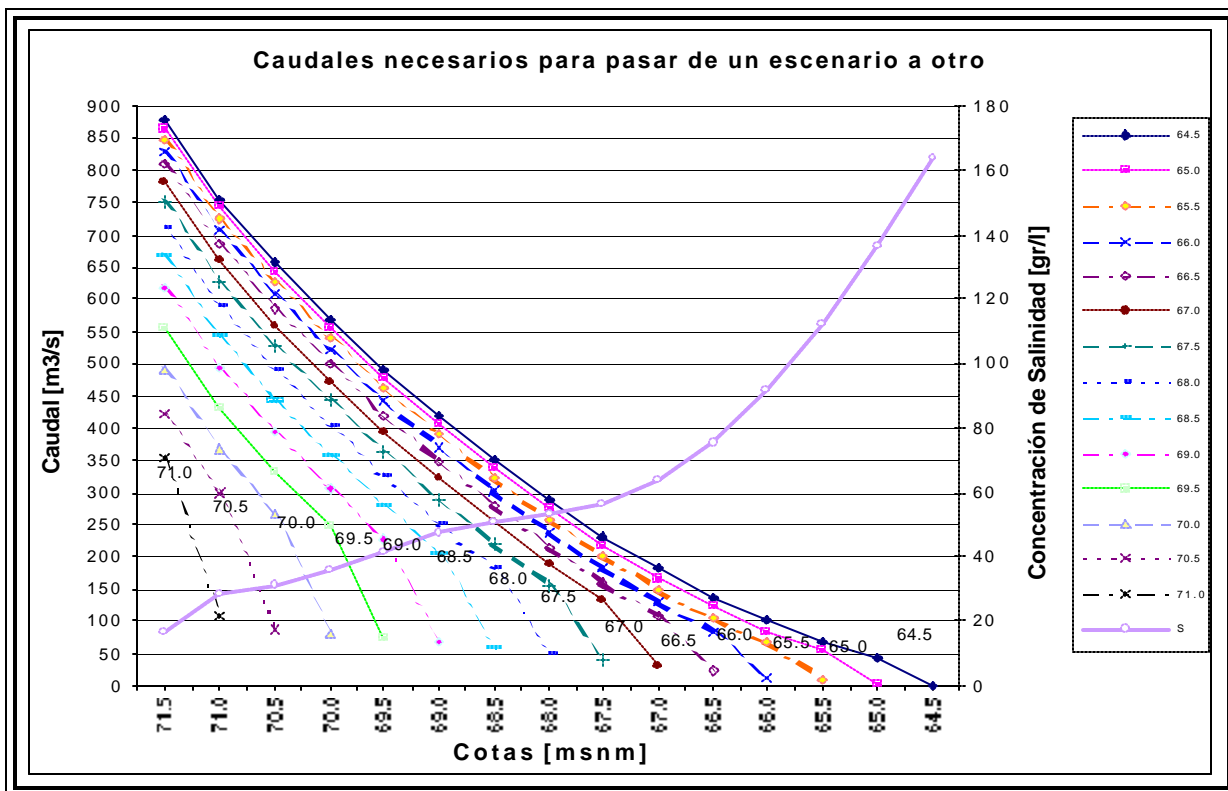


Figura 12: Gráfico de caudales [m³/s] necesarios para pasar de un escenario a otro [cotas en msnm]. (Ver especificación en figura 13).

El gráfico está compuesto de dos ejes verticales. En el eje izquierdo se representan los caudales medios anuales [m³/s] entrantes en Paso de la Cina, y en el eje derecho, Concentraciones de Salinidad [g/l]. Ambos ejes están relacionados con las cotas de agua de la laguna [msnm] (eje horizontal).

Debido a que las condiciones iniciales en la laguna pueden ser múltiples, se eligió una gama de niveles, cubriendo desde 64,5 msnm a 71,5 m snm, con intervalos de medio metro. De esta forma se pueden visualizar las distintas curvas que constituyen estados iniciales de laguna (para cada nivel hay una curva).

Es necesario ubicar la curva que mejor representa el estado actual de laguna (condición inicial). Simplemente hay que elegir aquella que tenga asignada la cota del nivel presente de la laguna. (Curva: 64,50 m snm en el ejemplo.)

A continuación, desplazarse verticalmente hasta encontrar el valor de salinidad correspondiente al nivel inicial. Punto 163,50 g/l, curva de salinidad en ejemplo.

Descender por la curva de salinidad, hasta obtener la concentración de salinidad deseada. (Punto 47,26 g/l, curva de salinidad en el ejemplo.)

Una vez localizada la salinidad deseada, desplazarse verticalmente hasta interceptar la curva de condición inicial. Buscar en el eje vertical izquierdo el caudal medio anual entrante en Paso de la Cina, necesario para obtener el tamaño de laguna compatible con la concentración de salinidad deseada.

La forma de utilizar el ábaco se ilustra mediante un ejemplo, presentado en la Figura 13.

ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Análisis de Resultados

Caso a: Se puede observar en la Figura 4 que una extracción de 10 m³/s no altera mayormente el tipo de escenario hidrológico que presentan los registros de campo, y en consecuencia el tipo de laguna (salobre, meso-salina y

mega salina) tampoco cambia radicalmente. Por ejemplo, al final de 30 años la laguna termina en cota 67 m snm en vez de los 69 m snm de 1997.

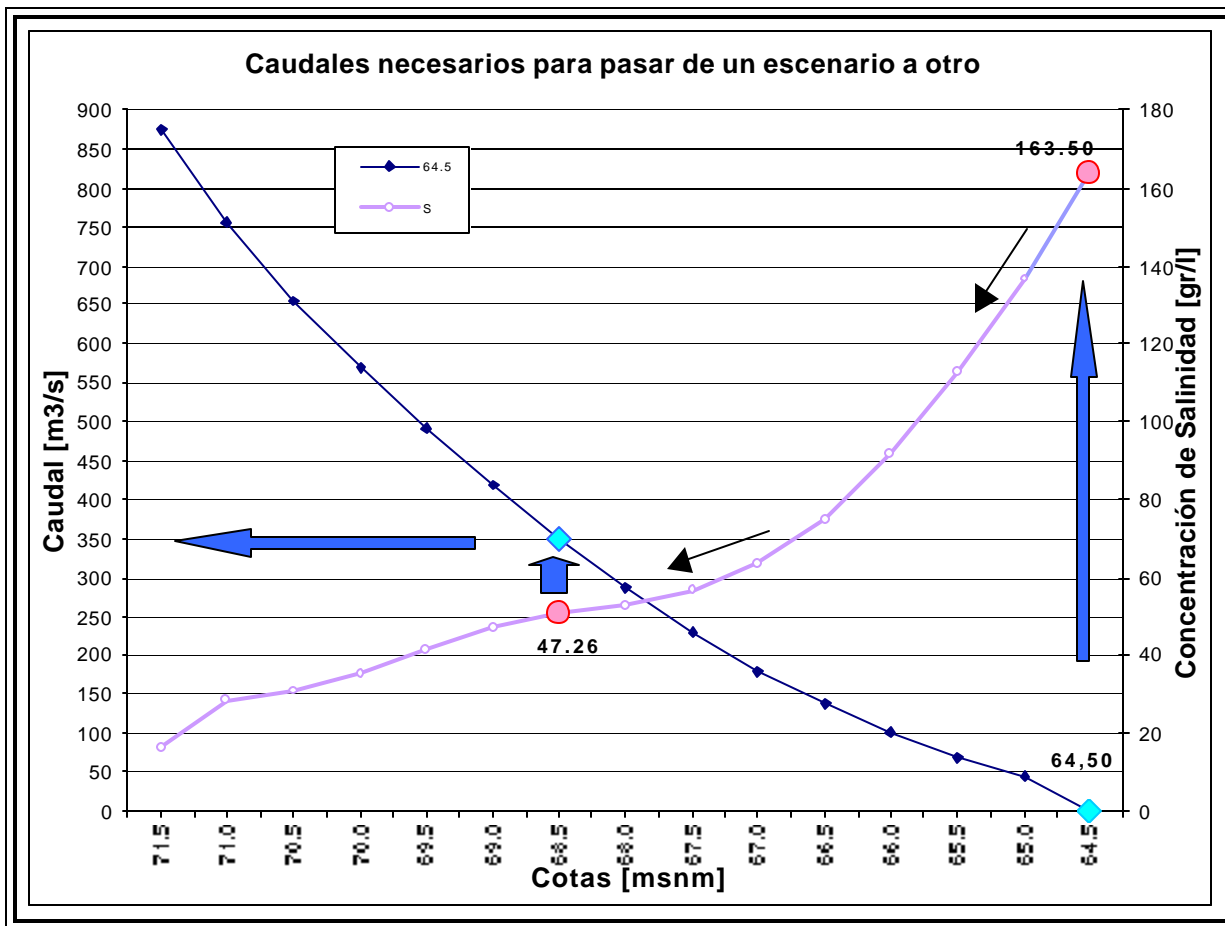


Figura 13: Gráfico explicativo.

Sin embargo, una extracción de 20 m³/s produce un cambio drástico que implica cruzar los umbrales de salinidad de 50 y 100 g/l, además de llegar a reducir los niveles de la laguna a valores críticos menores a 63 m snm.

Estos niveles de alta salinidad y 8 casos de volúmenes disponibles producirían sin duda algún impacto irreversible en el ecosistema completo.

Caso b: Si se asume una cota de partida aproximada de 70 m snm, y un caudal de ingreso del río Dulce a la altura de Paso de la Cina de 66 m³/s, similar a la media estimada para los 30 años precedentes, cabría esperar una reducción del espejo de agua, hasta alcanzar, en un plazo relativamente breve, un nivel inferior a 69 m snm, sustentable con tal caudal.

En este nivel, la laguna permanecería estable con el aporte de 66 m³/s del Río Dulce, suponiendo siempre que las descargas de los ríos Suquía (Primero) y Xanaes (Segundo) se mantuvieran en las medias históricas de los últimos 30 años.

Se arribaría entonces a un estado estable, en que la especie de referencia (pejerrey) podría sobrevivir pero difícilmente reproducirse (límite del primer umbral de 48 g/l), de modo tal que, en caso de persistir ese aporte, la población ictícola se vería perjudicada y podría considerarse posiblemente extinguida al cabo de 5 años, que es su promedio de vida.

Suponiendo, en cambio, que los aportes por el Río Dulce se redujeran a 40 m³/s (lo que significa un 60 % con respecto al escenario anterior) y se mantuvieran allí indefinidamente, se llegaría al equilibrio en el nivel crítico (de aproximadamente 67,50 m snm con 56,5 g/l de salinidad), por debajo del cual el pejerrey debería emigrar a las desembocaduras de los ríos para poder subsistir.

Volver desde allí a condiciones ecológicamente aptas (primer umbral) demandaría 290 m³/s durante un año (casi siete veces el caudal actual asumido) y, si bien los ingresos pueden distribuirse en un período más extenso,

éste no puede exceder de dos o tres años, para que la especie testigo acceda a dichas condiciones con posibilidades razonables de reproducción.

En síntesis, en tanto la cota de la laguna sea igual o mayor a 69 msnm (nivel ecológico), el módulo anual mínimo recomendado es de 68 m³/s y es admisible disminuirlo hasta 60 m³/s durante pocos años sucesivos.

Entre dicho nivel y 67,5 m snm (laguna mediana), el caudal medio anual no debería bajar de 60 m³/s, siendo aconsejable tender cuanto antes a alcanzar los 68 m³/s.

Por debajo de la última cota mencionada (nivel crítico) la situación se torna ecológicamente irreversible para la especie de referencia.

Conclusiones

Se ha cuantificado el balance hídrico del sistema de Mar Chiquita y los Bañados del Río Dulce, por ser el mayor sistema de lago salado con humedales de Argentina y América del sur. La importancia del sistema radica tanto en su valor ambiental como por su alto nivel de biodiversidad, y su simulación se orienta al mejor manejo y preservación del ecosistema.

Se han seleccionado diversos escenarios hidrológicamente posibles del estado de la laguna en términos de su volumen y calidad del agua (salinidad), y determinado las acciones necesarias para mantenerlos o modificarlos, en términos de caudales derivados al sistema laguna-bañados. Los caudales necesarios para los distintos niveles de la laguna, corresponden a su tributario principal (río Dulce), en valores medios anuales a la altura del límite interprovincial entre las provincias de Córdoba y Santiago del Estero en Paso de la Cina.

Se ha propuesto un método original para estimar cuantitativamente los “volúmenes ecológicos” de la laguna y su comportamiento. Para esto se han propuesto las tablas y gráficos de la sección precedente, en las cuales se puede partir de un estado inicial cualquiera (de nivel, volumen o salinidad) y determinar cual es el caudal necesario para conservar dicha condición ambiental. Los resultados permiten prever y planificar la evolución de la laguna. Una vez definidos los niveles óptimos de concentración salina, se puede obtener el caudal necesario para alcanzar dicho objetivo y conocer cual será la cota resultante de la laguna.

Este trabajo constituye el mayor avance obtenido a la fecha en lo relativo al conocimiento del sistema hidrológico de la laguna y sus bañados, y si bien no agota el estudio de este complejo sistema hidrológico, constituye la primera herramienta cuantitativa de manejo del sistema. El modelado del sistema también permite avanzar en el conocimiento y análisis de otras variables ambientales como el caudal ecológico y los hidrogramas necesarios para alimentar a través de desbordes a los Bañados del Río Dulce.

REFERENCIAS

- Aparicio, M. F. (1987). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*, Capítulo 4: Evaporación y Transpiración. Editorial Limusa.
- Bistoni, M., Haro, J. G. y Gutiérrez, M. (1992). “Ictiofauna del Río Dulce en la Provincia de Córdoba (Arge120)”, Universidad Nacional de Córdoba, Inédito.
- Bucher, E. y Herrera, G. (1981). “Comunidades de aves acuáticas de la Laguna de Mar Chiquita (Córdoba, Argentina)”, ECOSUR, vol. 8(15), pp. 91-120.
- Bucher, E. (1992). “Population and conservation status of flamingoes in Mar Chiquita, Córdoba, Argentina”. *Coloquial Waterbirds*, vol 15(2), pp. 179-184.
- Caamaño, N. G. (1999). “Hidrología Avanzada, Evapotranspiración”. Maestría en Ciencias de la Ingeniería, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina.
- Cabrera, A. L. y C. Willink. (1980). “Biogeografía de América Latina”. OEA. Comisión de Apoyo al Desarrollo del Noroeste 1979: Laguna Mar Chiquita. 1ª. ed., Gobierno. de la Provincia de Córdoba, Córdoba, Argentina.
- Capitanelli, R. (1979). Clima. En: J.B. Vázquez, R.A. Miatello y M.E. Roqué (Eds.) “Geografía Física de la Provincia de Córdoba”, pp. 45-138. Ed. Boldt, Buenos Aires.
- Chow, V.T., Maidment, D. y Mays, L. (1994). *Hidrología Aplicada*. Mc Graw Hill.
- Conevani, P., Blanco, D., Bucher, E., Castro, G. y Davidson, I. (1998). “Los humedales en la Argentina, clasificación, situación actual, conservación y legislación”. *Wetlands International*, N° 46, ISBN 987-97187-0-4, pp. 208. Buenos Aires, Argentina.
- Hillman, G. (1999). “Simulación Hidrológica del Sistema de Mar Chiquita”. Tesina de Ing. Civil, FCEFyN, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina. 490 pp.
- Martínez, D. (1991). “Caracterización Geoquímica de las Aguas de la Laguna de Mar Chiquita, Provincia de Córdoba”. Tesis doctoral, FCEFyN, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina.
- Martínez, D. (1995). “Changes in the ionic composition of the saline lake, Mar Chiquita, province of Córdoba, Argentina”. *Internat. Salt Lake Research*, vol. 4, pp. 25-44.

- Pagot, M. (1999). "Análisis y Simulación hidrológica del Sistema de Bañados del Río Dulce". Tesina de Ing. Civil, FCEFyN, Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba, Argentina.
- Reati, G. J., Florin, M., Fernandez, G.J. y Montes, C. (1997). "The Laguna de Mar Chiquita (Córdoba, Argentina): a little know, secularly fluctuating, saline lake". *International Journal of Lake Research*, vol 5, pp. 187-219.
- Rodriguez, A. (1990). "Estudio del régimen Hidrológico del Río Dulce y Laguna de Mar Chiquita", en "Estudio del Geoambiente de la Provincia de Córdoba, Parte II, Informe ELTECH a la DG XII, UE, Milán, Italia, Marzo.
- Rodriguez A., et al. (2001). "Hydrologic Study of Mar Chiquita System, Argentina"; XIX Congress of the International Association of Hydraulic Research. Beijing, China.
- Rodriguez A., et al. (1999). "Simulación Hidrológica del Sistema de Mar Chiquita, Córdoba, República Argentina", Cuadernos del CURIHAM, Edit. UNR Arg.entina, Vol. 5, pp. 51-63.
- Stappenbeck, (1926). "R. Geologie und Grundwasserkunde der Pampa", Stuttgart.
- Universidad Nacional de Cordova (1998). "Valoración del impacto ambiental en la región de Mar Chiquita y la cuenca afectada por el Canal Federal", Informe final al Consejo Federal de Inversiones, Córdoba, Argentina, 650 pp.
- Williams, W. y Aladin, N. (1991). "The Aral Sea: recent limnological changes and their conservation significance". *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, vol. 1(1), pp. 3-23.
- Williams, W. (1993^a). "The conservation of salts lakes: important aquatic habitats of semi-arid regions". *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* vol. 3(2), pp. 71-81.
- Williams, W. (1993^b). "The worldwide occurrence and limnological significance of falling water-levels in large, permanent saline lakes". *Verth. Int. Ver. Limnol*, vol. 25(2), pp. 980-983.