



Propuesta de volúmenes ambientales para el sistema Laguna de Mar Chiquita

Autor: Ángela Botella Cereceda
Directores: Ing. Mariana Pagot
Dr. Andrés Rodríguez
M. Leticia López



Quiero expresar mi agradecimiento:

A mi directora Mariana Pagot, por su paciencia y dedicación.

A los compañeros del Laboratorio de Hidráulica; Claudia Oroná, Horacio Herrero, Marcelo García, Raquel Bazán, Cecilia Pozzi, Gonzalo Moya, Mariano Corral, Leticia Tarrab, Ronald del Águila, Hector Muratore, Gerado Hillman, Magalí Carro Perez,, Nanci Larrosa, Rocío Luz Fernandez, Miguel Hidalgo, Cristian Montanari.

A Andrés Rodríguez, director del Departamento de Hidráulica.

Al Biólogo Bucher por su colaboración.

A Pablo y Matias Michelluti por su permanente disposición y ayuda.

A mis padres María Angeles y Antonio, por su apoyo, amor y confianza.

A mi abuela María Dolores.

Y a todas las personas que confiaron en mi.

Índice general

PROPUESTA DE VOLUMENES AMBIENTALES PARA EL SISTEMA LAGUNA MAR CHIQUITA.....	1
CAPÍTULO I.....	5
Introducción y problemática.....	5
1. Introducción.....	5
2. Problemática.....	7
3. Objetivos.....	8
CAPÍTULO II.....	9
Metodología de trabajo.....	9
1. Metodología utilizada.....	9
CAPÍTULO III.....	11
Generalidades del sistema.....	11
1. Características generales.....	11
2. Clima.....	12
Factores climáticos propios de la Laguna de Mar Chiquita.....	12
3. Usos de suelo.....	13
4. Cobertura vegetal.....	13
CAPÍTULO IV.....	16
Antecedentes.....	16
1. Revisión de antecedentes.....	16
2. Evaluación hidrológica del Sistema Laguna Mar Chiquita.....	22
CAPÍTULO V.....	25
Nuevo indicador ambiental: “Playas de sal” en la Laguna Mar Chiquita.....	25
1. Indicador físico-químico: Playas de sal.....	25
a. Análisis de la imagen del día 29 de Julio de 2006.....	26
b. Análisis de la imagen del día 20 de Agosto de 2006.....	31
c. Imagen de Julio y Agosto de 2008.....	36
d. Imagen del día 12 de Agosto de 2009.....	37
e. Imágenes de los días 28, 29 y 30 de agosto de 2009.....	39
2. Conceptos físicos relacionados con las tormentas de sal.....	44
Efecto del viento en la Laguna.....	46
Descripción del fenómeno de erosión en las playas de sal.....	47
Conceptos generales de iniciación de movimiento.....	48
Aplicaciones del Diagrama de Shields.....	51
5. Recopilación de imágenes satelitales LANDSAT.....	62
3. Medición de las playas de sal con apoyo satelital.....	70
Procesamiento de las imágenes satelitales.....	70
CAPÍTULO VI.....	81
Actualización de datos hidrometeorológicos y análisis de la tendencia.....	81
1. Introducción.....	81
2. Revisión de antecedentes en la estimación de tendencias.....	81
3. Conceptos teóricos: Regresión con datos funcionales.....	83
4. Variables analizadas.....	84
Serie de niveles en la Laguna Mar Chiquita. Periodo: 1967-2009.....	85
5. Test de tendencia aplicado a las series analizadas.....	90
Análisis de tendencia en la serie de caudales del Río Dulce medidos a la salida del embalse Río Hondo.....	90
Discusión de los resultados.....	97

Análisis estadístico de la serie de niveles de la Laguna Mar Chiquita (1967-2009)	98
Discusión de los resultados.....	105
Análisis estadístico de las series de precipitación.....	105
Análisis estadístico de las precipitaciones en Miramar.....	106
Discusión de los resultados.....	109
Análisis estadístico de la serie precipitaciones La Rinconada.....	110
6. Análisis conjunto de los ciclos.....	114
CAPÍTULO VII.....	116
Propuesta de volúmenes ambientales para la Laguna Mar Chiquita	116
1. Metodología empleada para el cálculo de volúmenes por ciclos.....	116
Descripción del cálculo de volúmenes por extremos de los distintos ciclos.	121
Descripción cálculo de volúmenes mensuales.....	126
2. Volumen ambiental para la Laguna Mar Chiquita.....	129
CAPÍTULO VIII.....	135
Antecedentes de caudales ecológicos para el río Dulce.....	135
1. Revisión de antecedentes de estudios relacionados con caudales ecológicos ..	135
Elementos esenciales de caudales ambientales.....	135
Ejemplos de intervenciones de gestión de caudales.....	136
2. Metodologías utilizadas a nivel mundial	137
Criterios para la determinación de los caudales ambientales en el río Ebro	139
Metodología MESA	140
3. Metodologías utilizadas a nivel nacional.....	142
Contexto y desarrollo de la LBAyS.	142
ANÁLISIS DEL RÉGIMEN DE CAUDALES EN EL BRAZO AÑA CUÁ (BAC).	143
CAPÍTULO IX	145
Conclusiones y recomendaciones	145
1. Conclusiones	145
2. Recomendaciones.....	146
3. Bibliografía	147

CAPÍTULO I

Introducción y problemática

1. Introducción

El sistema Bañados del Río Dulce - Laguna Mar Chiquita (Figura 1), área de estudio para el presente Trabajo Final, constituye, para Argentina, uno de los humedales con definida importancia, principalmente debido a su diversidad biológica y su dinámica hidrológica singular. Este sistema conforma la mayor cuenca endorreica con una superficie aproximada de 72.000 km² y presenta como cuerpo receptor un lago salado con un área máxima de 6.500 km² (en julio de 2003) y concentración salina variable entre los 25 g/L a 250 g/L.

La Laguna Mar Chiquita es un reservorio mundial debido a que alberga más de 245 especies de aves, incluyendo aves migratorias intercontinentales, entre las que se destacan poblaciones de flamencos rosados (una de las únicas que existen en el mundo, también visitan las Salinas Grandes) (Figura 2 y Figura 3). Al menos 30 especies de aves acuáticas nidifican en el área y 24 especies son migrantes del Hemisferio Norte (Agencia Córdoba Ambiente, 2002).

Desde los últimos seis años la Laguna ha presentado un marcado descenso de su nivel y se han observados fenómenos atípicos que generaron tormentas de sal y polvo desde la costa Norte de la Laguna Mar Chiquita, alcanzando en algunos casos a afectar más de 150 km de longitud. Estos hechos motivaron su estudio, cuyos resultados se presentan en este Informe.

El presente informe corresponde al Trabajo Final de la Carrera de Ingeniería Técnica Forestal de la Escuela Politécnica Superior de Gandia de la Universidad Politécnica de Valencia, realizado en el Laboratorio de Hidráulica (LH) de la Universidad Nacional de Córdoba (UNC), por medio del régimen de pasantía de intercambio entre estas universidades.



Figura 1: Ubicación general del sistema en estudio.



Figura 2: Vuelo aéreo con registro de colonias de flamencos rosados. Año: 2009. (Fuente: Sr. M. Michelutti)



Figura 3: Vuelo aéreo con registro de 30.000 flamencos rosados. Año: 2009. (Fuente: Sr. M. Michelutti)

2. Problemática

Uno de los temas más críticos que se plantea en la actualidad relacionada con el manejo del sistema Bañados del río Dulce – Laguna Mar Chiquita, es la posibilidad de que el aporte del Río Dulce a la Laguna pueda reducirse, en función de una tasa creciente de extracción en sus cursos medio y superior para consumo humano, agrícola e industrial.

Debido a que el Río Dulce es el principal tributario al sistema, una posible extracción afectaría al sistema de la Reserva de Mar Chiquita, principalmente en dos formas. En primer término, se podría provocar un descenso del nivel de la Laguna, dando lugar a un incremento de la concentración salina en el cuerpo de la misma y a la formación de playas principalmente en su costa norte, favoreciendo así la posibilidad de generación de tormentas de polvo y sal ante fuertes vientos; y en segundo lugar disminuyendo los pulsos de inundación anual, esenciales para la dinámica de los Bañados del Río Dulce.

En el marco legal, la cuenca está regida por un único acuerdo de regulación del manejo hídrico del Río Dulce en vigencia desde el año 1967, el cual fue firmado entre las provincias de Tucumán, Santiago del Estero y Córdoba. Este acuerdo faculta a las provincias de Tucumán y Santiago del Estero a retener volúmenes de agua significativos. Esto implica que si estas provincias derivaran el máximo caudal acordado, Tucumán tendría derecho a retener hasta un 32% del volumen, y Santiago del Estero debería dejar escurrir, hacia aguas abajo, un 22% de lo recibido (descontando pérdidas naturales). Aunque el acuerdo no es claro y deja lugar a distintas interpretaciones, en principio podría estimarse que el Río Dulce al entrar en la provincia de Córdoba aportaría menos de un 15% del volumen original derivado desde Tucumán.

En la actualidad se está observando una marcada bajante de los niveles de la Laguna, principalmente desde el año 2003, lo cual ha sido advertido por la comunidad científica y planteado en periódicos locales de alto alcance para la población cordobesa. Uno de estos artículos difundido el día martes 7 de julio de 2009, resaltaba dicha bajante y advertía sobre acueductos que restan agua al sistema, reclamando que la Provincia actúe (por Fernando Colautti de La Voz del Interior).

Este artículo se refiere a la sospecha de algunos científicos ante el planteo de que podría ocurrir en Mar Chiquita, los mismos procesos que ocurrieron en el Mar de Aral (en Asia) durante el periodo de desecamiento del mismo. Estas sospechas fueron fundamentadas en base a una imagen satelital –tomada desde un satélite de la Nasa y publicada por el diario de referencia el día 27 de mayo de 2008. En dicha imagen se observan *“nubes de sal que parten de las costas de la laguna Mar Chiquita y llegan hasta el centro de la provincia. A veces, atraviesan más de 200 kilómetros y llegan hasta Villa María o Bell Ville”*.

En cuanto a las consecuencias de estas plumas salinas, no se conocen en forma detallada cuál sería su impacto en la salud de las poblaciones ya que la misma dependerá de la granulometría de los granos suspendidos y transportados, podrían tener consecuencias negativas sobre cultivos y suelos, sobre todo en el área cercana a Mar Chiquita. (Bucher, E., 2009 – Entrevista personal)

Este fenómeno, único en América, comenzó en el año 2006 y uno de los últimos registros, corresponden a el día jueves 12 de Agosto de 2009, con ráfagas de viento que alcanzaron en la Capital de Córdoba velocidades de hasta 90 km/hr y en Miramar, única localidad costera de la Laguna de 85 km/hr a las 9 hr y dirección Norte.

Este evento ocasionó que se produjera una fuerte tormenta de sal y polvo con origen en la costa Norte de Mar Chiquita, superada en magnitud el día 29 de Agosto de 2009, también evidenciada con imágenes satelitales,. Este fenómeno, afectó, también a las localidades cercanas y llegó, aproximadamente, hasta Villa María y Marcos Juárez.

3. Objetivos

En función de la problemática presentada, se planteó como principal objetivo:

“Analizar los ciclos hidrometeorológicos ocurridos en el sistema Mar Chiquita y la propuesta de un ciclo ambiental asumiendo como indicador las “playas de sal” que proveen una fuente potencial a partir de la cual se generan las llamadas “tormentas de sal”.

Para esto se evaluarán diferentes aspectos que ayuden a responder los siguientes interrogantes:

- 1) El descenso de los niveles desde el año 2003 es debido a un ciclo natural de bajante de la Laguna Mar Chiquita?**
- 2) Cuáles son los requerimientos de volúmenes (en cantidad y distribución temporal) para evitar excesivas concentraciones de sales en los playones de la zona norte de la laguna?**

En el marco de la definición de los caudales ecológicos para el río Dulce, se abordó en el presente Trabajo Final, una actualización de las metodologías disponibles complementando estudios precedentes en esta línea de investigación.

CAPÍTULO II

Metodología de trabajo

1. Metodología utilizada

La metodología utilizada en el presente trabajo está conformada por distintas etapas correspondientes a cada capítulo abordado.

Sobre la base de los objetivos planteados se desarrollaron los siguientes temas de estudio:

1 - Planteo de la problemática.

Se identificó como principal problema, el descenso de la Laguna Mar Chiquita lo que generó la formación de tormentas de sal debido a la disponibilidad de sales depositadas en playas de gran extensión presentes principalmente al Norte de la Laguna y a intensos vientos.

2 - Definición de los objetivos del estudio.

Se plantearon objetivos de trabajo en función de los antecedentes consultados, las nuevas evidencias adquiridas a través de la evaluación de imágenes satelitales y el procesamiento de datos hidrometeorológicos de variables disponibles en el sistema de la Laguna.

Entre estos objetivos se planeó definir ciclos ambientales en función de los niveles de la Laguna.

3 - Análisis de antecedentes.

Los antecedentes consultados, en cuanto a estudios del sistema y los hechos observados colocan al sistema ante la necesidad de una actualización y puesta en marcha de un Plan de Manejo integrado, que considere los efectos antes nuevos proyectos de extracción de agua previstos para la provincia de Santiago del Estero y Córdoba.

En este sentido, se cuenta con antecedentes que podrían replicarse en la Laguna Mar Chiquita, tal cómo ocurrió en el Mar de Aral (Asia) y en el Mar Muerto.

4 - Recopilación y procesamiento de información.

La definición de un modelo de ciclo ambiental para la Laguna, involucró la recopilación de imágenes satelitales, variables climáticas, hidrológicas, topocartográficas (de playas).

Los registros de todas las variables analizadas fueron actualizados con la instrumentación en la región. Esto permitió actualizar la base de datos disponible en el Laboratorio de Hidráulica y la red provincial de medición en el Noreste de Córdoba, ya que los datos digitalizados principalmente de niveles fueron cedidos a la Subsecretaría de Recursos Hídricos en el transcurso del presente trabajo.

5 – Procesamiento digital de imágenes satelitales.

La cuantificación de áreas de playas salinas se basó en la interpretación y clasificación de imágenes satelitales a través de programas específicos.

6 – Procesamiento de datos topocartográficos del área de playas (Norte de la Laguna).

El tratamiento de las imágenes satelitales disponibles, permitió identificar aquellas imágenes secuenciales con áreas de playas, cuantificando la extensión y el ancho de las playas generadas.

Se utilizó el programa ENVI 4.3 y se complementó el proceso con georeferenciación y medición de áreas multitemporales con AUTOCAD 2004.

7 – Análisis estadísticos de variables hidrometeorológicas

El análisis de la tendencia de las variables hidrometeorológicas en el sistema de la Laguna, permitió evaluar ciclos medidos en cada variable y caracterizarlos estadísticamente.

8 – Estimación de CICLOS AMBIENTALES para definir volúmenes ambientales en la Laguna Mar Chiquita.

Se llegó a una primera aproximación en la definición de *volúmenes ambientales* para la Laguna, tomando como parámetro ambiental “las playas de sales” que favorecen la generación de las tormentas de sal registradas en los últimos años, a partir de variaciones de niveles medidos en la Laguna.

Se desarrolló y aplicó una nueva metodología para definir un ciclo ambiental, en función de los niveles medidos en la Laguna y los caudales erogados por Río Hondo.

9 - Conclusiones.

Se presentan las conclusiones encontradas sobre cada tema abordado a lo largo de este trabajo respondiendo a los objetivos propuestos.

CAPÍTULO III

Generalidades del sistema

1. Características generales

El sistema Bañados del río Dulce – Laguna Mar Chiquita comprende la cuenca interior más extensa de Argentina con un lago de origen tectónico de edad postpliocénica. Incluye dos grandes subsistemas: el valle de inundación del Río Dulce (Río Petri) con sus humedales asociados y la Laguna de Mar Chiquita (Mar de Ansenusa). Estos bañados se extienden entre el límite Norte provincial y el Mar de Ansenusa: desde los 29° 45' y los 30° 35' de Lat. Sur y entre los 63° 25' y los 62° 30' de Long. Oeste.

El Río Dulce (o Petri), presenta una descarga anual promedio de, aproximadamente, 100 m³/s, lo cual representa el mayor aporte entre los ríos de la provincia de Córdoba. Su cuenca total tiene algo más de 54.000 Km² de superficie. El Dique Río Hondo regula el río Dulce y divide la cuenca en dos regiones. La región superior, comprende la porción de la cuenca de aporte en las provincias de Tucumán, Salta y Catamarca. Con una precipitación promedio anual de 800 mm puede considerarse como de clima húmedo. La región inferior presenta características distintas a la superior. Es un sistema fluvial de llanura ramificado con cauces inestables, algunos efímeros y con numerosos bañados. La pluviometría de esta región inferior es diferente a la superior en cuanto a que se registra una media anual de aproximadamente 600 mm y climáticamente se define como semiárido.

La depresión fluvio lacustre del Mar de Ansenusa, comprende lo que es la laguna propiamente dicha y los Bañados del Río Dulce constituyendo una amplia concavidad limitada por fallamientos profundos de orientación Norte-Sur, recibe además de los aportes hídricos del Río Dulce por el Norte, los ríos Suquia y Xanaes por el Sudoeste. Las cuencas de aporte de estos ríos tienen una superficie de 7500 km² y 12700 km² respectivamente, ambas en su totalidad comprendidas en la provincia de Córdoba. El Río Primero (Río Suquia) presenta un módulo de 9,7 m³/s, mientras que el Río Segundo (Río Xanaes) tiene un módulo de 12,2 m³/s.

En cuanto a la geomorfología del sistema; los derrames principales del río Dulce, cubrieron totalmente la depresión de sedimentos fluviales finos. Localmente, el relieve permite diferenciar un área o franja de transición, bajos inundables y planos salino-alcalinos, que tienen importancia desde el punto de vista del manejo y uso sustentable de los humedales.

El río Dulce nace como río Tala en el límite de la Provincia de Tucumán con la de Salta, y al unirse con El Candelaria recibe el nombre de Salí, transformándose en el colector central de la Provincia de Tucumán. El río Salí cuando penetra en territorio santiagueño, pasa a llamarse Dulce. Posteriormente se divide en dos brazos, el occidental, llamado Nambi, corre hacia el Sur y al pasar por las Salinas de Ambargasta sus aguas se cargan de sales por lo que se le conoce luego como río Saladillo. Forma una flexión hacia el Este y se une al brazo oriental o Dulce, aguas abajo de Los Telares.

La dinámica del valle de inundación del Río Dulce es equivalente a un inmenso delta, condicionado y modelado fundamentalmente por la magnitud y la frecuencia de las inundaciones periódicas anuales generadas por el aporte del Río Dulce.

La frecuencia, intensidad y duración de dichas inundaciones determina la deposición y remoción de sedimentos y mantiene la heterogeneidad de la vegetación y la fauna asociada, por lo que la preservación del régimen de inundación es un requisito básico para su conservación.

2. Clima

La cuenca de captación de Mar Chiquita cubre un área afectada por 3 tipos principales de clima: Estepa, Templado cálido con inviernos secos y Templado con suficiente lluvia en todos los meses. (Clasificación de Köppen – Geiger, 1990).

En la zona de la Laguna, las condiciones climáticas son similares a las del Bosque Chaqueño Oriental, incluidas su variabilidad e impredecibilidad climática. En general, los veranos son húmedos y calurosos, mientras que los inviernos son secos y fríos.

Los vientos húmedos provienen del anticiclón del Atlántico Sur y las precipitaciones decrecen de Este a Oeste. Predominan en verano los vientos provenientes del Este, Este-Noreste, y Este-Sudeste, mientras que en invierno, del Sur y Sudoeste. Los vientos boreales son húmedos y cálidos y los meridionales secos y fríos. Son frecuentes los cambios de dirección que hacen que en un mismo día puedan sucederse variaciones bruscas de temperatura, de hasta 20 °C.

La temperatura promedio es de 18 °C - 19 °C, la temperatura promedio en el mes más caluroso es de 25 °C y los promedios mensuales son superiores a 25 °C en más de cinco meses (Noviembre-Marzo).

Las precipitaciones entre (600 mm y 900 mm por año) se concentran en la primavera y el verano con un pico en el mes de Marzo. La evaporación anual promedio 1500 mm, prevaleciendo el déficit de hídrico.

Factores climáticos propios de la Laguna de Mar Chiquita

Mar Chiquita es un lago polimítico y la ocurrencia de cualquier tipo de estratificación es prevenida en gran manera por la acción del viento y la poca profundidad del lago y su gran relación superficie- volumen.

Uno de los factores que previenen la estratificación es la frecuencia de las tormentas durante el verano; estas causan una surgencia y una subsecuente mezcla de toda la columna de agua.

Los vientos que normalmente ocurren en el lago causan olas de una altura de 0,1 m en la costa y 0,4 m en el centro del lago. Se registró en diciembre de 1992 un promedio de

velocidad de los vientos mayor de 46 km/h para un período de 15 minutos. Von Grumbkow (1890) experimentó una tormenta más violenta aún, con olas de 1,50 a 1,75 m de altura.

Los desplazamientos horizontales en gran escala de masa de agua en respuesta al viento se expresan por grandes cambios en el nivel del agua. Von Grumbkow (1890) estimó el rango de variación entre +0,24 y -0,36 m de altura.

Bajo estas condiciones, las variaciones en la temperatura se transmiten fácilmente a través de la columna de agua, la transmisión es rápida, y la evaporación aumenta. Kanter (1935) sugiere que las posibles formaciones de tormentas son debidas al microclima creado por la presencia de la Laguna.

3. Usos de suelo

La Laguna Mar Chiquita (aproximadamente 6000 km²) es de propiedad fiscal (Gobierno de Córdoba). Las tierras comprendidas dentro del área de Bañados son en su mayoría de propiedad privada.

El uso predominante en la zona Norte y Oeste es de ganadería extensiva de bovinos, ovinos y caprinos.

Hacia el límite Oeste donde las características del suelo son menos limitantes se encuentran incursiones del bosque chaqueño oriental que permiten la explotación forestal para la extracción de leña y producción de carbón. Hacia los límites Sur y Este la explotación es mixta: agrícola (soja, trigo, maíz, girasol, etc), ganadera (bovinos) y de tambo (con alfalfa y avena, con uso de raza bovina Holando Argentina). También hay áreas urbanizadas, establecimientos agroindustriales, industrias lácteas.

En la zona circundante (contigua a la Laguna) se efectúa un uso más intensivo de los suelos con las mismas actividades descriptas para la zona Sur y Este, incorporándose a las mismas, el Oeste. Ésta zona constituye la mayor cuenca lechera del país, incluso, con cultivos bajo riego, para forrajes y granos.

4. Cobertura vegetal

La *Planicie Oriental*, ocupada en su mayor parte por la Laguna Mar Chiquita estuvo ocupada hasta mediados del siglo XIX, por bosques de quebracho blanco y quebracho colorado santiagueño. Como consecuencia de la tala vinculada al tendido ferroviario del país en la etapa agroexportadora y más recientemente, con la expansión de la frontera agropecuaria, estos bosques han sido prácticamente erradicados del Norte de la provincia. En la actualidad, los bosques van siendo cada vez más ocupados por matorrales de reemplazo o "fachinales" dominados por la jarilla, con altos porcentajes de suelo descubierto, bosques secundarios y vegetación cultural.

Los verdaderos problemas para los bosques de la provincia comenzaron al principio del siglo XX. Antes de la gran expansión de la agricultura, los bosques ocupaban alrededor de 110.000 km² (Figura 4). Esto equivale a 11 millones de hectáreas. Desde el siglo

pasado hasta la actualidad la provincia perdió 9.300.000 hectáreas aproximadamente. Ya en 1960 los bosques nativos sólo se restringían a la zona Norte y Noroeste de la provincia; entre 1960 y 1999 se perdieron más de 1.200.000 hectáreas, de bosques tanto de sierras como de llanuras. Durante los años siguientes y fundamentalmente en las dos últimas décadas, los intereses económicos arrasaron también con gran parte de lo que quedaba.



a) Desembocadura de los ríos Primero y Segundo



b) Costa Este de Mar Chiquita

Figura 4: Imagen de la zona de Mar Chiquita con cultivos marcados por límites definidos.

La principal causa del desmonte es, como ya se dijo, la extensión de la frontera agropecuaria, vinculada al sector de los agronegocios. Ante el aumento del precio de la tierra en las zonas tradicionales, los productores buscaron zonas marginales para incorporarlas a la agricultura y a la ganadería extensiva. En el norte de Córdoba, encontraron tierras que valían hasta 10 veces menos que en la zona pampeana. Asimismo, la aparición y adopción rápida de la siembra directa, y la implantación desde 1996/1997 de soja transgénica, resistente a mayores temperaturas y al glifosato, son otros factores que favorecieron la expansión agrícola. A esto se sumaron las condiciones macroeconómicas. A nivel internacional, el aumento del consumo por el crecimiento de la economía china elevó el precio de la oleaginosa y con la devaluación del 2002, el negocio favoreció más aún a los productores, ya que los ingresos por exportación se triplicaron a la vez que cayeron los costos internos.

Sin embargo, no se pueden dejar de considerar factores naturales, ya que la expansión agrícola también fue posible porque coincidió con un ciclo húmedo para la región. En efecto, el promedio de precipitaciones pasó de 650 mm anuales en la década del 50 a casi 800 mm en la década del 90. Según Zak, "todo indica que ese ciclo húmedo en algún momento va a acabarse y las lluvias van a volver a valores históricos. Cuando eso ocurra, lo más probable es que los campos tengan que abandonarse por ser inadecuados para la producción y como fueron desmontados, se transformarían en desiertos" porque la remoción de la cubierta vegetal, expone al suelo a la acción de los agentes erosivos, especialmente en áreas montañosas, en las cuales la pendiente acelera el efecto del viento y del agua.

Paralelo a los desmontes y al deterioro de los ecosistemas en general, se profundiza la pobreza de la población campesina y se agravan las condiciones de subsistencia de las economías domésticas locales que ven afectadas sus actividades tradicionales relacionadas con la explotación del monte y la ganadería de carácter sumamente extensivo. En este escenario, se agudizan los problemas de concentración de la tierra y ausencia de un régimen jurídico y de garantías legales para quienes la ocuparon por más de veinte años.

Se observan matorrales halófilos bajos, arbustos suculentos presentes en sectores con suelos salitrosos, que no permanecen inundados por largo tiempo y matorrales sub-halófilos con especies suculentas y xerófilas. Además, se observan espartillares en sitios salinos, sujetos a inundaciones más o menos breves y de escasa profundidad; matorrales bajos presentes en sitios que permanecen inundados durante la mayor parte del año y fragmentos de bosques bajos naturales de la planicie oriental, en sitios algo elevados de la cuenca, donde las inundaciones carecen de influencia. Se trata de un matorral de hasta 3 m altura, con emergentes de chañar y cardón y más esporádicamente de árboles presentes en los bosques de la planicie como quebracho blanco, mistol, garabato y brea. En algunos sitios se observa también un matorral sub-halófilo alto, que se ubica entre el bosque chaqueño oriental y las comunidades típicamente halófilas de la depresión.

CAPÍTULO IV

Antecedentes

1. Revisión de antecedentes

La Laguna Mar Chiquita se caracteriza por presentar niveles de agua altamente variables, según se muestra en el desarrollo del presente Trabajo Final. Esto trae asociado cambios relacionados con la concentración salina en este cuerpo lagunar, influyendo notablemente sobre la biota del sistema.

Desde los últimos treinta años, específicamente desde enero de 1977, la Laguna Mar Chiquita incrementó notablemente su nivel de agua hasta el año 1982, cuando alcanzó 71,34 m s.n.m. generando un incremento de cota de 8 m. El área de la Laguna se duplicó quedando anegadas 37 Ha, inundando así el 90% de la infraestructura turística y el 60% de la localidad de Miramar.

Estos cambios se asociaron a fenómenos naturales debido a la ocurrencia de años secos, medios y húmedos, considerando la relación entre los volúmenes, niveles y salinidad de la Laguna con respecto las características limnológicas y los procesos ecológicos asociados.

En una primera aproximación a la definición de volúmenes ecológicos para la Laguna Mar Chiquita en el trabajo realizado durante el año 2007 por la Universidad Nacional de Córdoba (UNC), desde el Laboratorio de Hidráulica (LH) y el Instituto Superior de Recursos Hídricos (ISRH), se consideraron los escenarios de salinidad 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).

En base al planteo matemático del modelo adoptado "LAMBDA 3" en conjunto con los procesos ecológicos asociados a la variación histórica de nivel en la Laguna Mar Chiquita se definieron tres zonas características que permitieron establecer los volúmenes de referencia asociados a años secos, medios y húmedos asumiendo como indicador ecológico la especie del pejerrey. Estos fueron:

- I. Zona Óptima (el pejerrey se expende): se estableció considerando el límite de salinidad igual a 48 g/L, que corresponde a un volumen en la Laguna de 12,88 km³ asociado a un nivel de 68,88 m s.n.m. Así se define el sector óptimo a la derecha de la línea vertical (L1).
- II. Zona de riesgo (sobrevive el pejerrey): se ubica entre los dos umbrales de salinidad definidos (por encima de los 48 g/L y por debajo de los 60 g/L) representándose en el gráfico entre las líneas verticales L1 y L2. En este sector el pejerrey ya no se reproduce.
- III. Zona Desfavorable (el pejerrey desaparece): Para valores de salinidad mayores a 60 g/L, se considera como zona desfavorable para el desarrollo biótico de la especie indicadora en este subsistema. Esta zona se encuentra a la izquierda de la línea vertical L2 y el umbral se indica para el volumen de 8 km³.

En la actualidad, se presentan nuevos hechos que generan **fenómenos ambientales a considerar**. Estos son las “**tormentas de sales**” cuya ocurrencia se incrementó desde el año 2006 hasta la fecha con la evidencia de las imágenes satelitales presentadas. En la Figura 5 se observa una secuencia de imágenes satelitales que evidencian el descenso de niveles de la Laguna y las “nubes de polvo y sal” que se registraron.



Figura 5: Secuencia de imágenes satelitales multitemporal de Mar Chiquita.

En la secuencia de imágenes precedentes, la primera a la izquierda de la Figura 5 corresponde al año 2000 y se observa que la Laguna presenta un área cubierta por agua que incluye la costa Norte de la misma. Las imágenes siguientes (en el centro y a la derecha de la Figura 5) corresponden a los años 2006 y 2009 y se observa cómo en la costa Norte de la Laguna se forma una playa salina que se incrementa en los últimos tres años, debido al continuo descenso del nivel de la Laguna.

A continuación se presentan dos casos similares de lagos que sufrieron un descenso notable en sus niveles.

Caso del Mar de Aral: ejemplo de desecación de lagos.

(Fuente: <http://www.wikipedia.com/>)

Con sus 67.000 km² de superficie, el Mar de Aral fue, hasta la segunda mitad del siglo XX, el cuarto lago más grande del mundo. Está ubicado en el Asia central, entre las actuales repúblicas de Kazajstán y Uzbekistán.

El Mar es alimentado por los ríos Syr Daria y Amu Daria. La cuenca del Aral supera los 450.000 km², abarcando los fértiles valles de Fergana y Jorezm (enclaves estratégicos en la época de la Ruta de la Seda que comunicaba China y la India con el Mediterráneo oriental), las estepas kazajas y los desiertos del Kizil Kum y Kara Korum.

La situación cambió radicalmente a partir de la década de 1950, con la transformación de las repúblicas del Asia central en grandes productoras de algodón.

Con este objetivo se realizaron obras de irrigación a partir del Syr Daria y del Amu Daria, sin demasiadas preocupaciones sobre el impacto ambiental que podrían causar y, si bien los objetivos económicos inmediatos se lograron (Uzbekistán llegó a ser el cuarto productor mundial de algodón), sus efectos sobre el ecosistema fueron devastadores en el mediano plazo.

Las disputas locales, la ineficiencia y la corrupción llevaron a un uso irracional del agua, al punto que a principios de la década de 1980 los ríos no vertieron más este recurso en el Mar de Aral y, como resultado, éste comenzó a retraerse dejando como superficie cientos de kilómetros cuadrados de tierra con gruesas capas de sal.

Debido al aumento de la concentración salina del mar y de los cursos inferiores de los ríos y a la utilización de pesticidas y otros agentes químicos, la pesca se fue volviendo más escasa, la ganadería y la agricultura se tornaron impracticables en grandes extensiones y se dificultó notablemente el acceso al agua potable para los casi cinco millones de habitantes de la zona ribereña y de los deltas.

Como consecuencia de estos impactos aparecieron enfermedades vinculadas al déficit sanitario, como la tuberculosis, la anemia y enfermedades del aparato digestivo, con lo que el nivel de vida de las poblaciones decayó sensiblemente.

En la actualidad, el Mar de Aral tiene menos de la mitad de su superficie original y perdió dos terceras partes de su volumen. El análisis multitemporal se puede visualizar en tres secuencias de imágenes satelitales presentadas en la Figura 6.

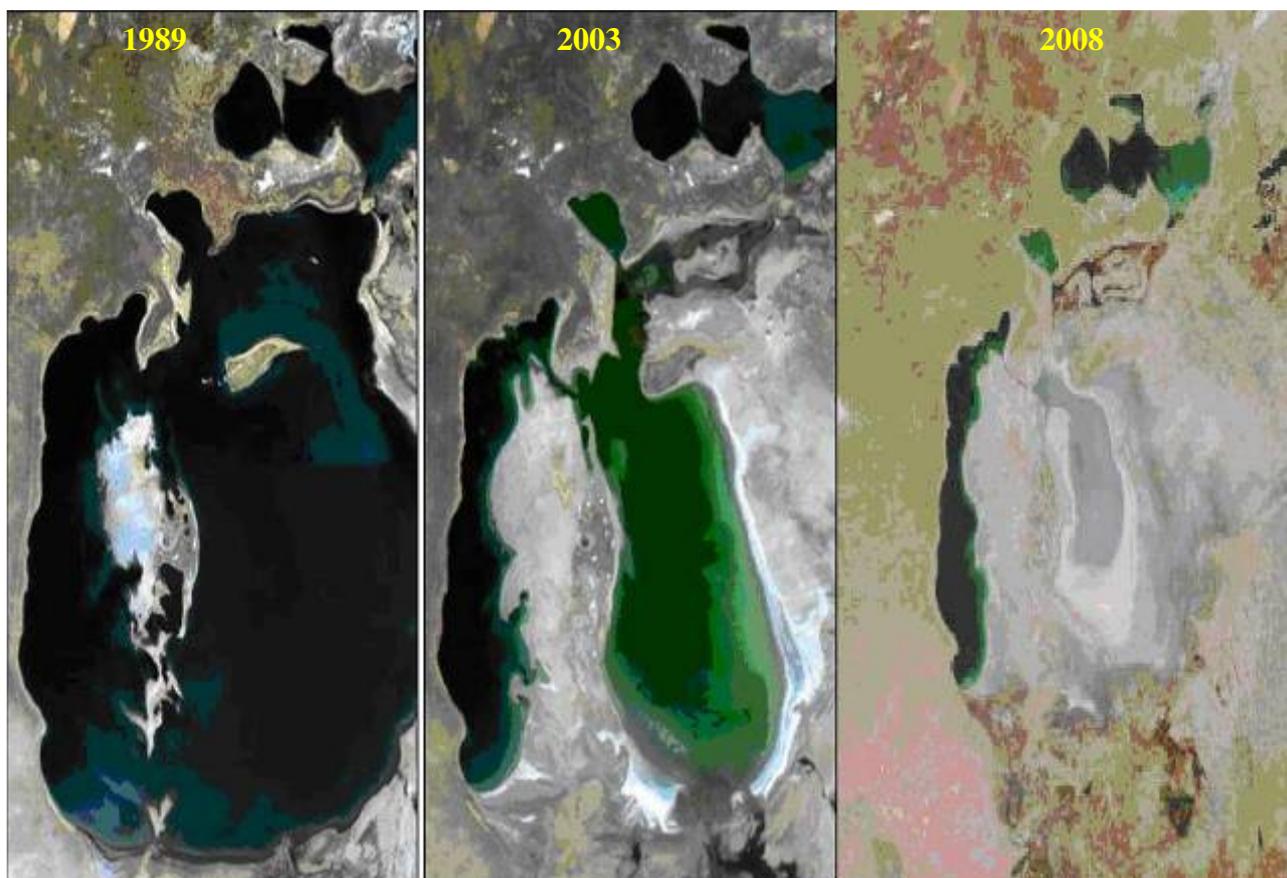


Figura 6: Secuencia de imágenes satelitales multitemporal del Mar de Aral.

La desertificación de la zona es una consecuencia inmediata de este proceso, ya que alrededor de 200.000 toneladas de sal y arena son dispersadas por los vientos en un área de 300 kilómetros de radio.

Según proyecciones del Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente, sin una intervención que revierta la tendencia, el Mar dejaría de existir hacia el año 2020, pero el Fondo Internacional para la Salvación del Mar de Aral desarrolló en 1997 un plan maestro que permitiría recuperar parte sustancial del mismo en la segunda década de este siglo.

El objetivo de las obras de canalización e irrigación realizadas en los años `50 fue introducir a la población del Turkestán en un período de crecimiento económico -que se preveía ilimitado-, pero la historia trágica del Mar de Aral expresa, de forma muy elocuente, los cuidados que el hombre debe tener a la hora de gestionar un recurso, que supone renovable, en ecosistemas particularmente delicados.

A unos 300 kilómetros del Mar de Aral, los científicos visitaron una estación meteorológica en la que han colocado una trampa para el polvo. Las partículas de polvo atrapadas son pesadas, medidas y analizadas. Los científicos estiman que las tormentas pueden transportar hasta 400 kilos de polvo por hectárea cada mes en sitios como éste.

Algunas declaraciones realizadas por estos científicos relatan lo siguiente: *“Hemos determinado el tamaño de los granos de polvo y también su composición mineral con ayuda de técnicas como la radiofluorescencia. Con estos datos podemos establecer las regiones de procedencia. Antes teníamos una hipótesis y es que si ese polvo procede en parte del fondo del Mar de Aral, las cantidades de sal deben ser relativamente elevadas. Y hemos conseguido demostrarlo: efectivamente la sal del Mar de Aral ha llegado hasta aquí”*.

En Almaty, la antigua capital de Kazajistán, se encuentra el Centro Nacional de Investigación Espacial, donde se siguen de cerca las tormentas de polvo a través de satélites. Las tormentas de polvo son un elemento clave en el cambio climático. La propagación del polvo sobre los océanos podría enfriar su superficie impidiendo, por ejemplo, la formación de huracanes. Y en Asia Central las imágenes de los satélites muestran que las tormentas de polvo agudizan la desertificación de ciertas zonas.

Lev Spivak, responsable del Instituto de Investigación Espacial Nacional de Kazajistán indicó que: *“Desde el año 2000, la superficie de la propagación de polvo de la región de Aral está creciendo como ocurre también con la intensidad y la frecuencia de las tormentas. Antes, las tormentas de polvo ocurrían sobre todo en el noroeste. Ahora se dirigen sin embargo hacia el sur, lo que significa que cada año aumentan las zonas contaminadas por la sal del lecho marino del Mar de Aral”*.

Por su parte *Oleg Semedov* señaló que: *“Estos experimentos nos han permitido entender cómo y cuánta arena transportan las tormentas a diferentes velocidades. Ahora sabemos que las partículas de arena avanzan como una avalancha, las pequeñas partículas empujan a las más grandes que a su vez empujan a otras todavía más grandes...También sabemos que el nivel máximo de concentración de arena se encuentra a una altura de fracciones de milímetro sobre el suelo. Cuanto más nos*

acercamos al corazón de la tormenta, menor es la densidad de polvo. Las ecuaciones matemáticas nos ayudan a calcular la masa total de arena que transportan las tormentas a diferentes niveles y velocidades del viento”.

Volvemos al desierto donde los científicos también estudian diferentes emplazamientos geológicos. Están convencidos de que alrededor del Mar de Aral, la desertificación provocada por el hombre aumenta las tormentas de polvo que están secando regiones cada vez más lejanas.

Leah Orlovsky, coordinador del proyecto “CALTER” comentó: “Ahora sabemos la cantidad real de polvo que cae por metro cuadrado, lo medimos en toneladas por año y por hectárea. Sabemos también la composición química de ese polvo y de dónde procede. Eso nos permite proponer algunas medidas de prevención. Creemos que la mejor manera de evitar la degradación alrededor del Mar de Aral es cultivar plantas autóctonas. No en el antiguo lecho marino sino en pequeñas islas. Esas plantas fijarían la superficie y habría menos polvo viajando en las tormentas”.

Los científicos también esperan que su trabajo pueda ayudar a establecer una red de alerta para prevenir tormentas y también otros fenómenos que amenacen el medio ambiente en Asia Central.

Debido a los trasvases de agua desde los ríos que en él confluyen, su superficie se ha reducido de manera drástica desde los años 60 del siglo XX, cuando se empezó a desviar agua de los ríos Amu Daria y Syr Darya para regar cultivos en Uzbekistán y Kazajistán. Además, como resultado de pruebas armamentísticas, proyectos industriales y vertidos de residuos de fertilizantes en el mismo siglo, el mar tiene un alto índice de contaminación.

Caso del Mar Muerto: otro ejemplo de desecación de lagos.

(Fuente: <http://es.wikipedia.org>)

El Mar Muerto o también conocido como Mar Salado, se encuentra en el corazón de Medio Oriente, compartido entre Israel y Jordania.

La causa por la cual en el Mar Muerto apenas pueden vivir unos pocos microorganismos en las desembocaduras de los ríos es evidente: sus aguas son demasiado saladas, diez veces más que las del Mediterráneo **y mucho más que las de cualquier formación natural del mundo**. Las razones principales se encuentran en los afluentes, que transportan pequeñas cantidades de sal en su agua; en la carencia de desagüe y en las inmensas cantidades de agua que se evaporan. Con sus 417 m bajo el nivel del mar, el Mar Muerto es el área terrestre natural más bajo del mundo y constituye por tanto una barrera para los minerales, mientras que la mayor parte del agua se evapora naturalmente.

En el Mar Muerto apenas caen entre 25 y 30 milímetros de lluvia. Pero sin duda el mayor problema para el Mar Muerto es la extracción de agua de su mayor afluente, el Jordán. A través de canalizaciones y tuberías, el agua es conducida hacia embalses o directamente a los consumidores. Los agricultores la destinan al regadío de los campos,

a los pastos y a las plantaciones de árboles frutales. Se consume sobre todo en las ciudades, en hoteles y fábricas en forma de agua potable de uso general. Únicamente un 10% de las aguas del Jordán fluye actualmente hacia el Mar Muerto. La mayor parte, un 70%, es utilizada por Israel. Además, también intervienen Siria, Jordania y Palestina.



Figura 7: Imagen del Mar Muerto (tomada de <http://www.abcpedia.com>)

El excesivo consumo de los escasos recursos de agua ha provocado efectos dramáticos. En los últimos 30 años el nivel del lago ha descendido 25 metros y su longitud en 20 kilómetros. El fondo del lago, ahora al descubierto, contiene muchas sales y sustancias contaminantes que se han depositado en el lago a causa de múltiples actividades humanas. Como ocurre en otros lagos en proceso de desecación, como el lago Aral o el lago Mono, en el Mar Muerto se producen cada vez con mayor frecuencia tormentas de polvo con un elevado contenido salino, que ahuyentan a los turistas, vuelven los campos incultivables y convierten los pantanos de agua dulce en lugares inhabitables para cada vez más especies. La mayoría de estas circunstancias repercute inmediatamente de forma negativa sobre los habitantes de la región, quienes ya tienen bastantes problemas sólo con el clima.

Esto podría ser un antecedente para Mar Chiquita si no se realiza una adecuada gestión de sus caudales afluentes.



Figura 8: Imagen satelital del Mar Muerto (tomada de <http://es.wikipedia.org>)

2. Evaluación hidrológica del Sistema Laguna Mar Chiquita

Como se mencionó, el área en estudio corresponde al receptor final del sistema endorreico más grande de Argentina con reconocimientos a nivel provincial, nacional e internacional. La cuenca de aporte, abarca las provincias de Catamarca, Salta, Tucumán, Santiago del Estero y Córdoba. El principal tributario a la Laguna es el río Petri o Dulce, supera en un 80% el aporte de sus otros tributarios, principalmente los ríos Suquia y Xanaes. Para el análisis y la simulación de los ciclos ambientales en este sistema, es necesario evaluar los volúmenes mínimos, asociados a distintos escenarios observados en la Laguna.

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, sino la presencia de ciclos o fluctuaciones. Los registros históricos e hidrológicos, apuntan a que tales fluctuaciones son fenómenos naturales que han ocurrido periódicamente desde la formación de la Laguna (en el período Postpliocénico).

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 esta. 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 batimétricas (profundidad promedio de 10 m, régimen de vientos, circulación interna del agua,

sedimentación, dinámica hídrica y evapotranspiración), los procesos funcionales a micro - escala incrementan los efectos de los mecanismos a macro-escala, **responsables de los ciclos** observados.

Definición de escenarios para la Laguna y los Bañados.

La dinámica hídrica y de calidad del sistema está caracterizada por la gran variabilidad temporal en los aportes hídricos que recibe, no como siempre se ha pensado; asociados a la variación de las lluvias registradas en su cuenca (según se determinó en el Capítulo de “Análisis de las series de datos” en el presente trabajo), sino que estará estrechamente relacionado con el caudal aportado por el Río Dulce, generando variaciones de corto y largo plazo, tanto en el régimen de inundación en los Bañados como en el nivel de Laguna Mar Chiquita.

Según presentó Rodríguez, et al. 2002, en su trabajo denominado “Análisis y simulación de riesgos ecológicos en un gran sistema hidrológico endorreico” para la Revista de Desastres Naturales de Puerto Rico; la serie histórica actualizada de niveles en la Laguna presenta entonces escenarios donde la misma tendrá volúmenes pequeños, medios y grandes, aún sin la influencia antrópica de la extracción de agua de sus tributarios.

Durante los años húmedos la Laguna Mar Chiquita se encuentra bajo condiciones mesosalinas es decir con una salinidad que oscila desde los 48 g/l hasta 24 g/l, esto ocurrió a finales de la década de 1970, con un crecimiento de niveles marcado, favoreciendo la expansión del “pejerrey” (*Odontesthes bonariensis*) en la Laguna, facilitada por la natural adaptación de este pez a los niveles de salinidad mencionados. Al alcanzar estos niveles desaparecen casi totalmente las amplias playas barrosas de la Laguna, las que en algunos casos conforman un hábitat importante para muchas especies de aves playeras.

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

Durante los años medios la cota de la Laguna oscila entre 66,40 m y 69 m, el agua tiene una salinidad que varía entre los 48 g/l y 100 g/l respectivamente, nivel denominado megasalino. Al sobrepasar los 48 g/l se producen cambios ecológicos importantes. Uno de estos es la desaparición de peces como el “pejerrey”, el cual declina rápidamente con salinidad por encima de los 48 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.

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.

Mientras que en los años secos a muy secos las 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. 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.

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).

Durante estos ciclos muy secos el Río Dulce puede llegar con caudales muy bajos o hasta secarse antes de alcanzar la Laguna, con escasa capacidad de producir inundaciones en los Bañados. 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 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. Se presenta una reducción de la biodiversidad, y desaparecen las grandes concentraciones de aves que caracterizan la región.

CAPÍTULO V

Nuevo indicador ambiental: “Playas de sal” en la Laguna Mar Chiquita

Para el análisis de la definición de volúmenes ambientales, tradicionalmente, se contempló la especie del pejerrey como indicador biológico, a través de su relación con la concentración salina en la Laguna, asociada al parámetro límite de 60 g/L para la supervivencia del pejerrey.

El pejerrey (*Odonthestes bonariensis*) es un pez muy tolerable a incrementos paulatinos de salinidad. Proviene de ambientes de agua dulce e ingresó por los ríos que alimentan la Laguna y se estableció en la misma. Debido a que la Laguna, salvo algunas poblaciones costeras de *Jenysia* y *Gambusia*, prácticamente no contiene otros peces, el pejerrey se expandió por todo su área de la Laguna. Esta especie presenta importancia deportiva y económica para la región.

En el presente Trabajo Final se propone un **nuevo indicador físico químico: las playas de sal**, definiendo su extensión y permanencia en función de la variación de niveles asociados. La permanencia de estas playas de sal y la bajante en los niveles observados principalmente desde el año 2003, favorecieron, junto con fuerte vientos en la región, formaciones de tormentas salinas observadas con apoyo satelital. Las nubes asociadas se dispersan en forma de plumas alargadas que pueden en muchos casos alcanzar 120 km y en ocasiones hasta 200 Km.

1. Indicador físico-químico: Playas de sal.

Se realizó la identificación de los periodos en los que se producen las llamadas **“tormentas de sal” generadas a partir de la disposición de partículas disponibles en las playas principalmente del Norte de la Laguna Mar Chiquita.**

Esta identificación se realizó mediante imágenes satelitales, donde se aprecia que los vientos fuertes del Norte y del Sur generan plumas de sedimentos eólicos arrastrados desde las playas salinas.

En la base de datos propia y actualizada para el Laboratorio de Hidráulica, se registró un descenso de más de 3 m en el nivel de la Laguna desde Junio de 2003. En este mes se registró en la Laguna un nivel de 71,76 m s.n.m. y a Julio de 2009 se llegó a medir: 68,70 m s.n.m.

Como se mencionó en los antecedentes este fenómeno de las tormentas de sal es conocido ya en el Mar de Aral en Asia, donde en las últimas dos décadas se ha producido la desecación de buena parte de este inmenso lago por extracción irracional de agua en los ríos afluentes. Cuando la emisión de polvo salino es muy grande, se afectan los cultivos y también puede llegar a causar molestias respiratorias, así como aumenta la corrosión de los metales expuestos.

La intensidad del fenómeno es un indicador muy evidente de los riesgos asociados a que el nivel de Mar Chiquita siga bajando más allá de lo que acontecería por causas naturales. Esta situación puede agravarse en el caso de que la extracción de agua de los ríos afluentes, y en particular del río Dulce, siga creciendo sin tener en cuenta las necesidades ecológicas de Mar Chiquita.

En ese sentido, se incluye en el presente Trabajo el problema que genera la permanencia de las playas salinas considerando el fenómeno asociado (las tormentas de sal) como un **indicador testigo** para evaluar los volúmenes ambientales en la Laguna.

Este fenómeno ya fue señalado en el libro “Bañados del río Dulce y Laguna Mar Chiquita” publicado por la Academia de Ciencias en 2007, y desde entonces se ha registrado con frecuencia creciente en los años 2008 y 2009.

a. Análisis de la imagen del día 29 de Julio de 2006.

En la Figura 9 se presenta la imagen satelital disponible para el día 29 de Julio de 2006. En la misma se observa las playas de sal al Norte de la Laguna en tonos blancos y una nube de polvo y sal desde el Noreste de la playa hacia el Sur

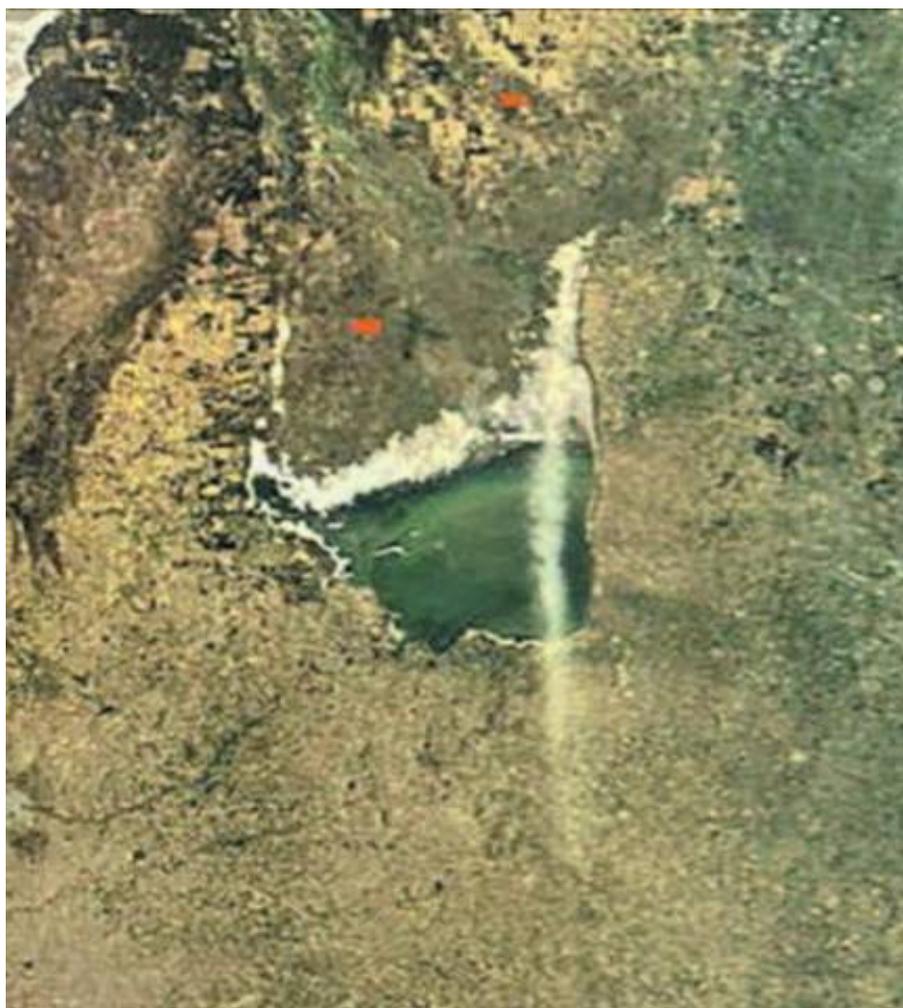


Figura 9: Tormentas de sal desde el Norte de la Laguna. Fecha: 29 Julio 2006.

En las siguientes tablas se muestran los datos de viento, de la estación del “El Cajon” y “La Casita” para la fecha correspondiente a la imagen anterior. Se consideran estas estaciones ubicadas en la cuenca del río Suquia ante la ausencia de datos de viento más cercanos a la Laguna.

Las velocidades se obtuvieron a partir del promedio entre dos mediciones registradas una vez que el anemómetro ha recorrido unos 5 km (distancia predeterminada). En este caso, no queda registrado que ocurrió entre estas dos mediciones. De esta manera se obtuvieron valores de velocidad promedio.

En cuanto a la dirección del viento que se registra en grados según el cuadrante, se tomó como referencia los siguientes datos que se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1: Referencias asumidas para la dirección del viento.

Dirección	Cuadrante (Grados)
Norte	0-360
Sur	180
Este	90
Oeste	270

Según la convención asumida, los datos registrados de viento (dirección y velocidad) son los siguientes para la fecha 29 de Julio de 2006. (Ver Tabla 2)

Tabla 2: Datos de dirección y velocidad del viento registrados en “El Cajón”.

Día	Hora	Velocidad (kmp)	Dirección (grados)
29/07/2006	23:51:36	2.4	40
29/07/2006	21:46:14	6.9	40
29/07/2006	21:02:53	8.0	30
29/07/2006	20:25:26	3.3	30
29/07/2006	18:54:37	3.6	80
29/07/2006	17:31:04	5.1	70
29/07/2006	16:32:19	9.4	50
29/07/2006	16:00:29	10.9	30
29/07/2006	15:32:57	14.3	60
29/07/2006	15:11:57	13.7	30
29/07/2006	14:50:06	16.3	30
29/07/2006	14:31:42	13.1	30
29/07/2006	14:08:43	12.6	60
29/07/2006	13:44:52	11.7	60
29/07/2006	13:19:08	13.1	60
29/07/2006	12:56:10	11.5	30
29/07/2006	12:30:00	10.2	50
29/07/2006	12:00:30	5.0	30
29/07/2006	11:00:43	3.7	160
29/07/2006	9:38:47	2.0	10
29/07/2006	7:04:57	2.9	240
29/07/2006	5:22:58	6.3	250
29/07/2006	4:35:19	7.2	210
29/07/2006	3:53:52	5.5	220
29/07/2006	2:58:56	1.5	220

En la Figura 10 se presenta las velocidades detalladas en la Tabla 2. En la misma se observa una velocidad máxima de 16,3 kmp a las 14:50 hr.

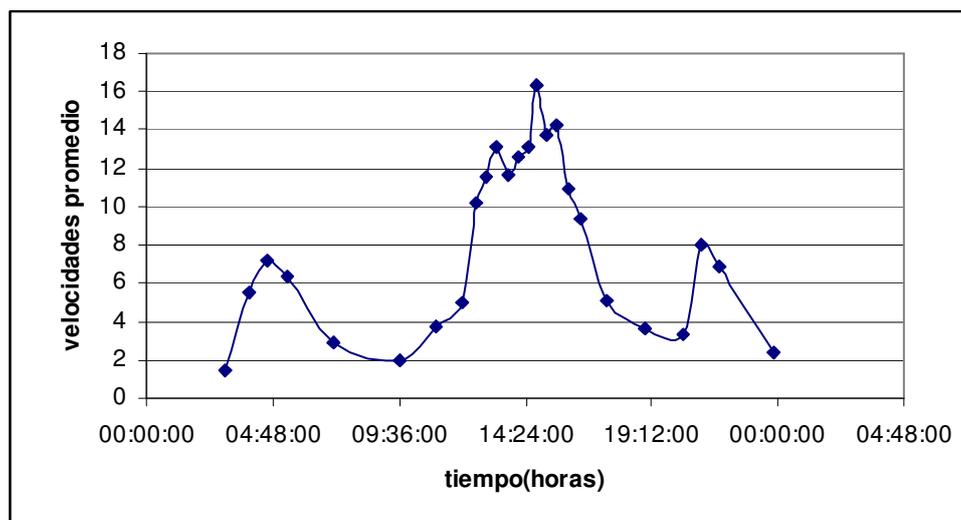


Figura 10: Velocidad del viento en “El Cajón”. Fecha: 29/07/09

En la Figura 11, se realizó un cambio de unidades con relación a las velocidades medidas, en Km/h. En este caso, la velocidad máxima medida a las 14:50 horas para este día es de 53 Km/h con una dirección de 30 grados, es decir que proviene del Noreste, coincidiendo con la pluma salina que se muestra en la imagen satelital.

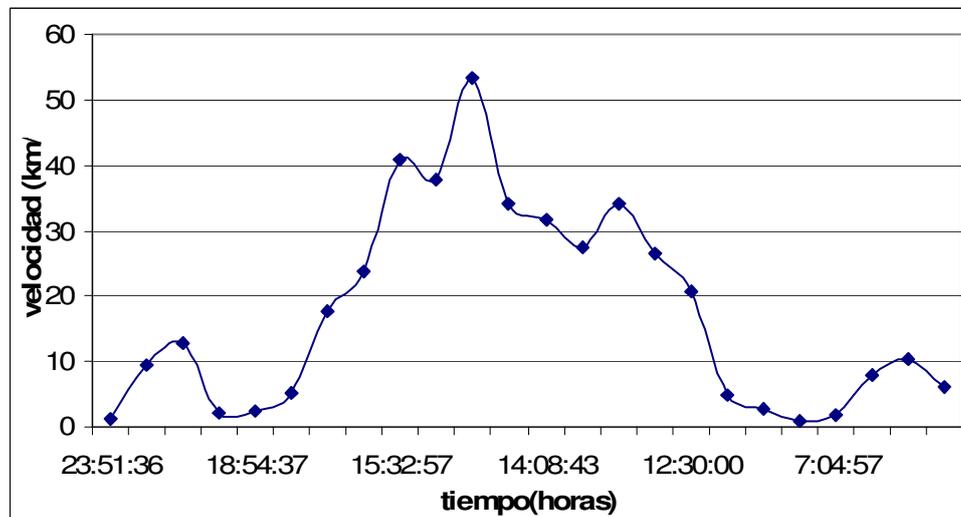


Figura 11: Velocidad del viento en km/hr en “El Cajón”. Fecha: 29/07/09

En la siguiente figura se muestra que las direcciones predominantes se encuentran dentro del rango de 50 grados.

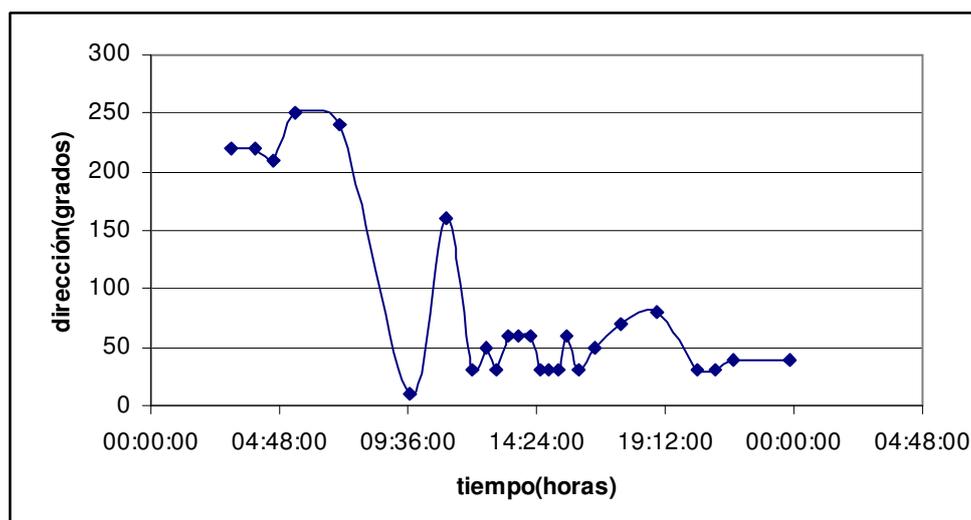


Figura 12: Dirección del viento en “El Cajón”. Fecha: 29/07/09

Luego se analizaron los datos de viento registrados en la estación “La Casita”, presentados en la Tabla 3 y Figura 13. La velocidad máxima medida resulta de 12,2 kmp a las 05:06 horas del día 29-07-2006. Convirtiendo unidades a Km/hr, la velocidad máxima corresponde a 30 Km/h.

Tabla 3: Datos de dirección y velocidad del viento registrados en “La Casita”.

Día	Hora	Velocidad (kmp)	Dirección (grados)
29/07/2006	23:05:46	2.2	100
29/07/2006	20:48:36	2.3	110
29/07/2006	18:38:15	2.7	110
29/07/2006	16:45:50	4.1	130
29/07/2006	15:32:15	6.1	80
29/07/2006	14:43:04	5.4	80
29/07/2006	13:47:14	6.4	80
29/07/2006	13:00:02	6.6	10
29/07/2006	12:14:48	6.0	80
29/07/2006	11:24:26	5.0	80
29/07/2006	10:24:18	1.9	40
29/07/2006	7:43:40	3.2	260
29/07/2006	6:09:55	4.7	70
29/07/2006	5:06:25	12.2	270
29/07/2006	4:41:48	3.9	290
29/07/2006	2:07:09	8.5	300
29/07/2006	1:32:00	1.8	280

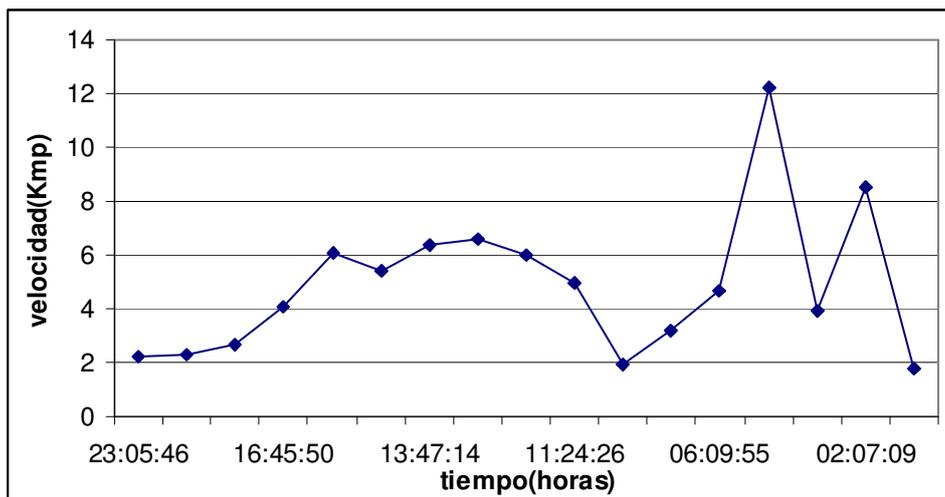


Figura 13: Velocidad del viento en “la casita”.

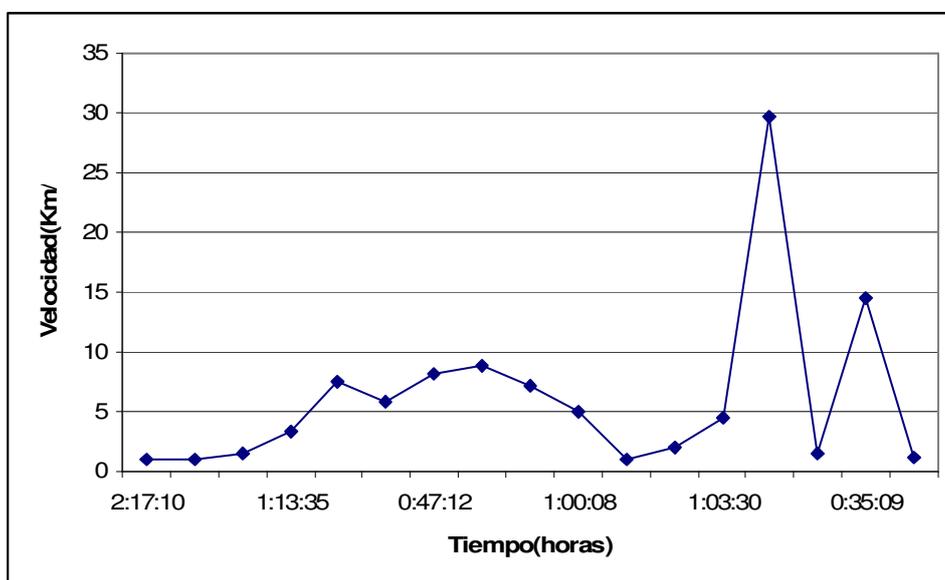


Figura 14: Registros del viento en “La Casita”.

En la siguiente figura se muestra que la dirección del viento predominante se encuentra dentro del rango que comprende desde 0 hasta 150 grados, mientras que la máxima velocidad se registró entre los 70 y 270 grados.

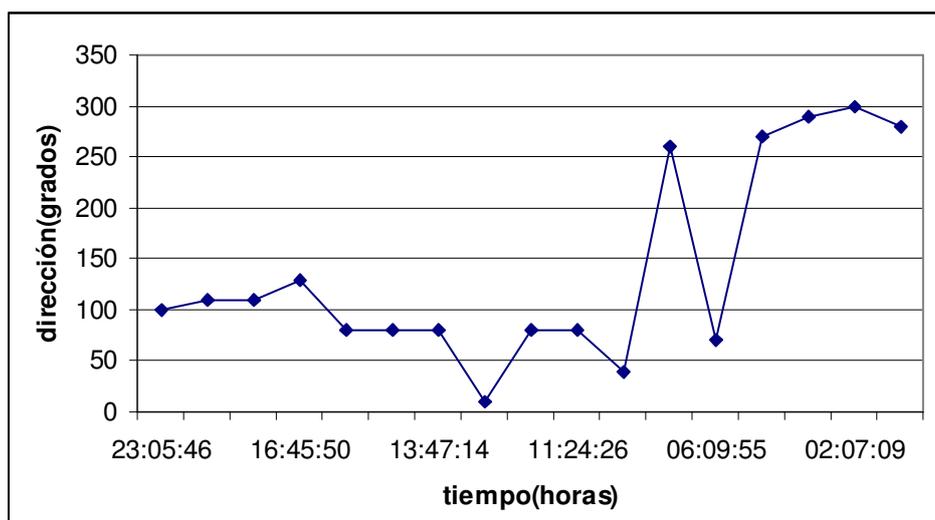


Figura 15: Dirección del viento en “La Casita”.

b. Análisis de la imagen del día 20 de Agosto de 2006.

En la Figura 16 se presenta la imagen satelital disponible para el día 20 de Agosto de 2006. En la misma se observa las playas de sal al Norte y Noroeste de la Laguna en tonos blancos y una nube de polvo y sal desde el Noreste y el Noroeste de las playas hacia el Norte.

Se debe destacar que en esta ocasión y como se puede apreciar por comparación con la imagen satelital del día 29 de julio previo, la playa del Norte de la Laguna presenta menor ancho aunque se verificaron que los niveles medidos no se incrementaron durante el intervalo entre las imágenes analizadas. Esto se explica debido al viento Sur que desplaza el volumen de agua de la Laguna hacia la costa Norte de la misma.



Figura 16: Tormentas de polvo y sal desde el Norte de la Laguna. Fecha: 20 Agosto 2006. Viento Sur.

En las siguientes tablas se muestran los datos de viento, de la estación de “La Casita” y “El Cajón” para la fecha correspondiente a la imagen superior. Se consideran estas estaciones ubicadas en la cuenca del río Suquia ante la ausencia de datos de viento más cercanas a la Laguna.

Según la convención asumida, los datos registrados de viento (dirección y velocidad) son los siguientes para la fecha 20 de Agosto de 2006. (Ver Tabla 4)

Tabla 4: Datos de dirección y velocidad del viento registrados en “La Casita”.

Día	Hora	Velocidad (kmp)	Dirección (grados)
20/08/2006	23:26:10	5.9	320
20/08/2006	22:35:39	2.5	300
20/08/2006	20:33:39	1.7	100
20/08/2006	17:39:16	4.5	100
20/08/2006	16:32:15	5.5	100
20/08/2006	15:38:03	5.8	120
20/08/2006	14:46:03	6.2	80

Día	Hora	Velocidad (kmp)	Dirección (grados)
20/08/2006	13:57:49	5.3	130
20/08/2006	13:01:03	5.2	120
20/08/2006	12:03:06	4.8	170
20/08/2006	11:00:30	4.2	140
20/08/2006	9:49:10	2.6	40
20/08/2006	7:54:49	4.4	320
20/08/2006	6:46:42	4.8	340
20/08/2006	5:44:00	2.8	340
20/08/2006	3:54:55	2.2	340
20/08/2006	1:36:03	2.5	140

En la Figura 17 se muestran las velocidades medidas en la estación “La Casita” para el día 20 de Agosto de 2006, registrando un valor máximo de 6,2 kmp a las 14:45 horas.

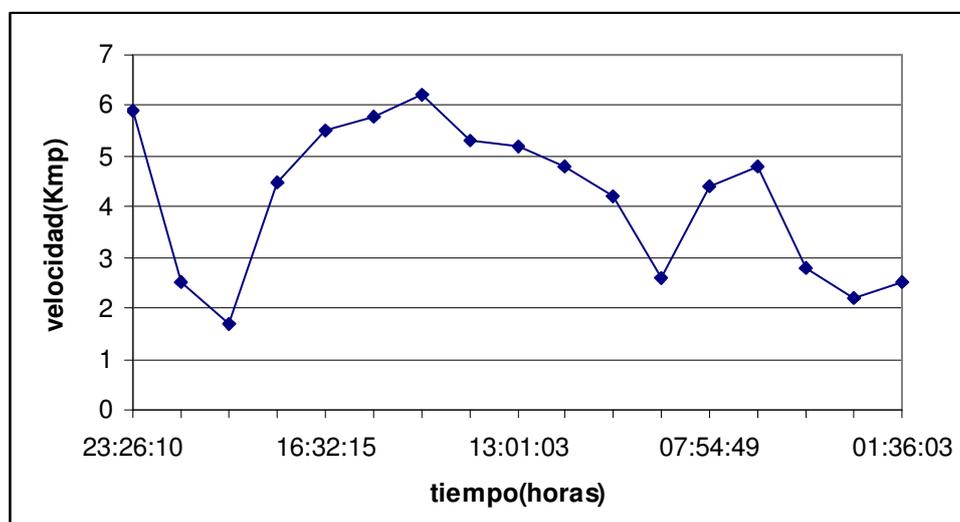


Figura 17: Velocidades para la estación de “La Casita”. Fecha: 20 Agosto de 2006.

En la Figura 18 se muestran las direcciones predominantes para este día, las cuales comprenden un rango de 0 hasta 200 grados. Con dirección para la velocidad máxima entre 120 y 80 grados.

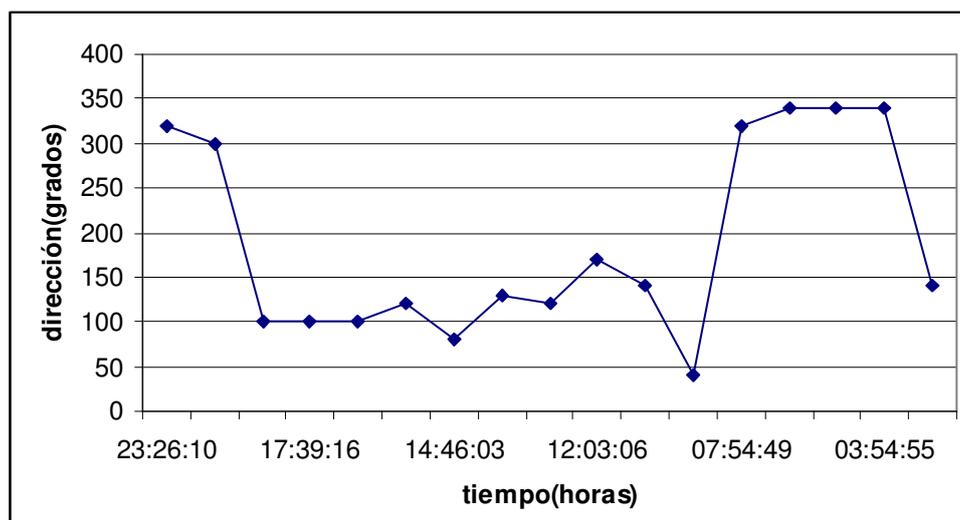


Figura 18: Dirección de las velocidades para la estación de "La Casita". Fecha: 20 de Agosto de 2006.

De las figuras anteriores se deduce que para el viento registrado en la imagen del día 20 de Agosto, corresponde una velocidad de 4,8 Kmp a las 12 hr, con dirección cercana a los 170 grados.

También se analizaron los datos de viento registrados en la estación "El Cajón", presentados en la Tabla 5 y Figura 19. La velocidad máxima medida resultó de 15,8 kmp a las 15:20 horas del día 20-08-2006.

Tabla 5: Datos de dirección y velocidad del viento registrados en "El Cajón".

Día	Hora	Velocidad (kmp)	Dirección (grados)
20/08/2006	23:11:20	9.8	250
20/08/2006	22:40:52	5.3	240
20/08/2006	21:44:43	1.4	240
20/08/2006	18:17:02	8.3	30
20/08/2006	17:40:49	11.3	40
20/08/2006	17:14:18	11.8	50
20/08/2006	16:48:52	11.8	50
20/08/2006	16:23:22	12.4	50
20/08/2006	15:59:12	15.4	70
20/08/2006	15:20:13	15.8	30
20/08/2006	15:01:13	13.4	30
20/08/2006	14:38:45	14.7	50
20/08/2006	14:18:19	12.5	40
20/08/2006	13:54:14	12.7	70
20/08/2006	13:30:32	12.2	30
20/08/2006	13:05:52	13.0	50
20/08/2006	12:42:47	10.9	40
20/08/2006	12:15:20	11.5	20
20/08/2006	11:49:13	8.1	210
20/08/2006	11:12:06	6.3	350
20/08/2006	10:24:30	2.0	30
20/08/2006	7:52:30	1.4	190

Día	Hora	Velocidad (kmp)	Dirección (grados)
20/08/2006	4:14:58	2.1	210
20/08/2006	1:48:53	3.5	240
20/08/2006	0:23:02	2.2	210

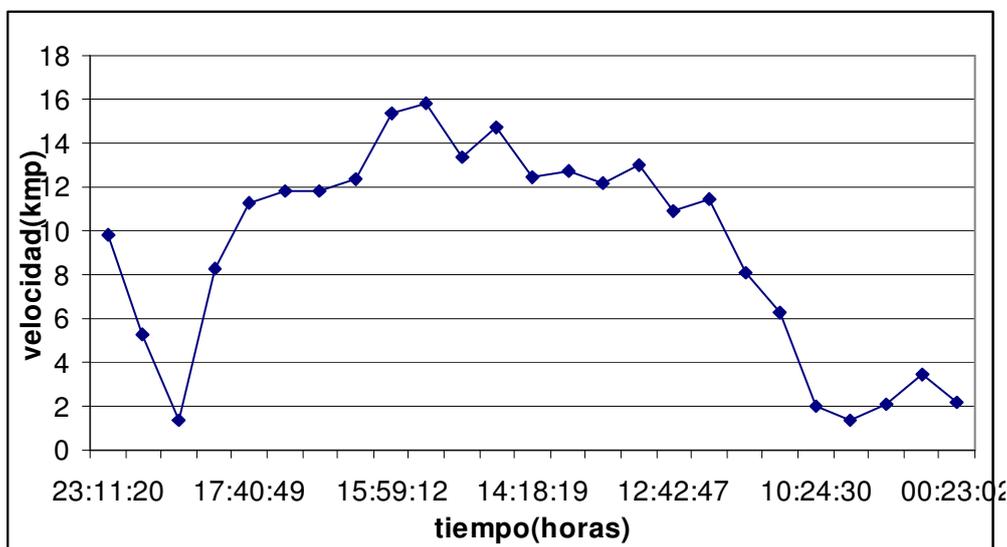


Figura 19: Velocidades registradas en “El Cajón”. Fecha: 20 de Agosto de 2006.

En la Figura 20 se muestra claramente que para el día 20-08-2006, la dirección del viento predominante se encuentra dentro del rango que va desde 0-100, o sea de Norte a Sudeste, con un cambio significativo hacia el Oste.

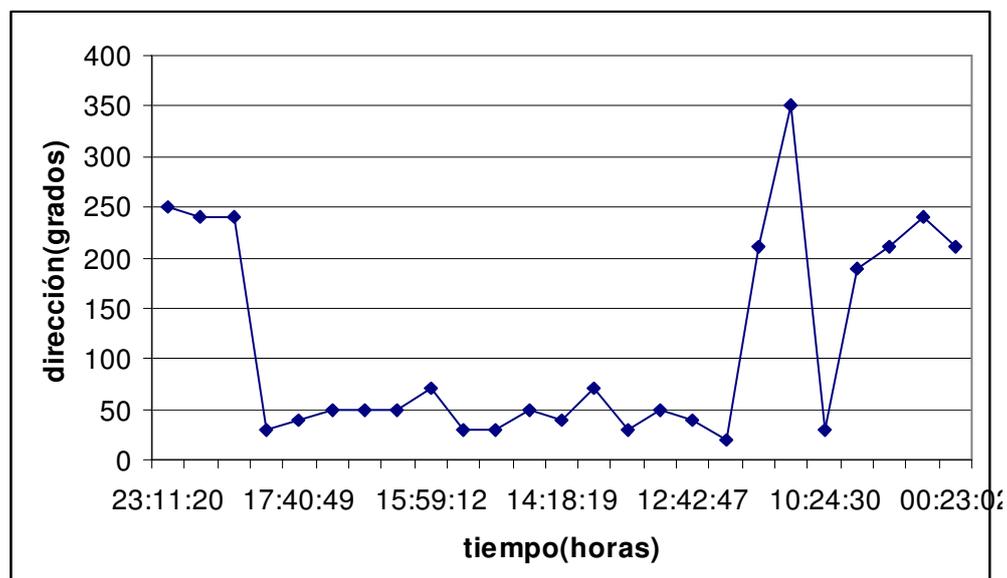


Figura 20: Dirección de velocidades en “El Cajón”. Fecha: 20 de Agosto de 2006.

c. Imagen de Julio y Agosto de 2008.

En las Figura 21 y Figura 22 se presentan dos imágenes correspondientes a Julio y Agosto de 2008. En ambas imágenes se observan las plumas con orientación hacia el Sur.

En la imagen de Julio de 2008 se observan las ciudades de San Francisco y Villa María, las cuales se encuentran influenciadas por el alcance de la “pluma” de sal.



Figura 21: Imagen satelital de la Laguna Mar Chiquita. Tormenta de sal durante Julio de 2008 con viento Norte.



Figura 22: Imagen satelital de la Laguna Mar Chiquita. Tormenta de sal durante Agosto de 2008 con viento Noroeste.

d. Imagen del día 12 de Agosto de 2009.

En la Figura 23 se presenta una reciente imagen satelital correspondiente al día 12 de agosto de 2009, donde se observa el alcance de las nubes de sal hasta la Ruta 9 Sur, alcanzando las ciudades de Villa María y Laboulaye.

Según registros de mediciones de viento, del 12 de Agosto, se registraron ráfagas cercanas a los 85 km/hr en Miramar, sobre la costa Sur de la Laguna.



Figura 23: Imagen satelital de la Laguna Mar Chiquita. Tormenta de sal durante el 12 de Agosto de 2009 con viento Norte de 85 km/hr.

En esta oportunidad fue posible observar sobre autos, árboles o viviendas, como se muestra en la Figura 24, restos de las partículas de sal dejados por la tormenta registrada.



Figura 24: Restos de polvo salino sobre automóvil.

e. Imágenes de los días 28, 29 y 30 de agosto de 2009.

En la página de Internet de CONAE se presenta una serie de imágenes que muestran la evolución de una nube de sal generada desde la costa Norte de la Laguna Mar Chiquita. Las imágenes obtenidas son producto de los satélites TERRA, mediante el sensor Modis, y AQUA y fueron recibidas y procesadas en la Estación Terrena del Centro Espacial Teófilo Tabanera de la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE) en la provincia de Córdoba.

En la Figura 25 se presenta una imagen satelital del día 28 de Agosto de 2009 de las 11:13 hr, adquirida por el satélite TERRA a través del sensor MODIS. En esta imagen es posible observar una nube de sal y polvo desde la costa Norte y hacia el Sur que cubre parte de la Laguna Mar Chiquita. (Gentileza de Prensa CONAE: www.conae.gov.ar)

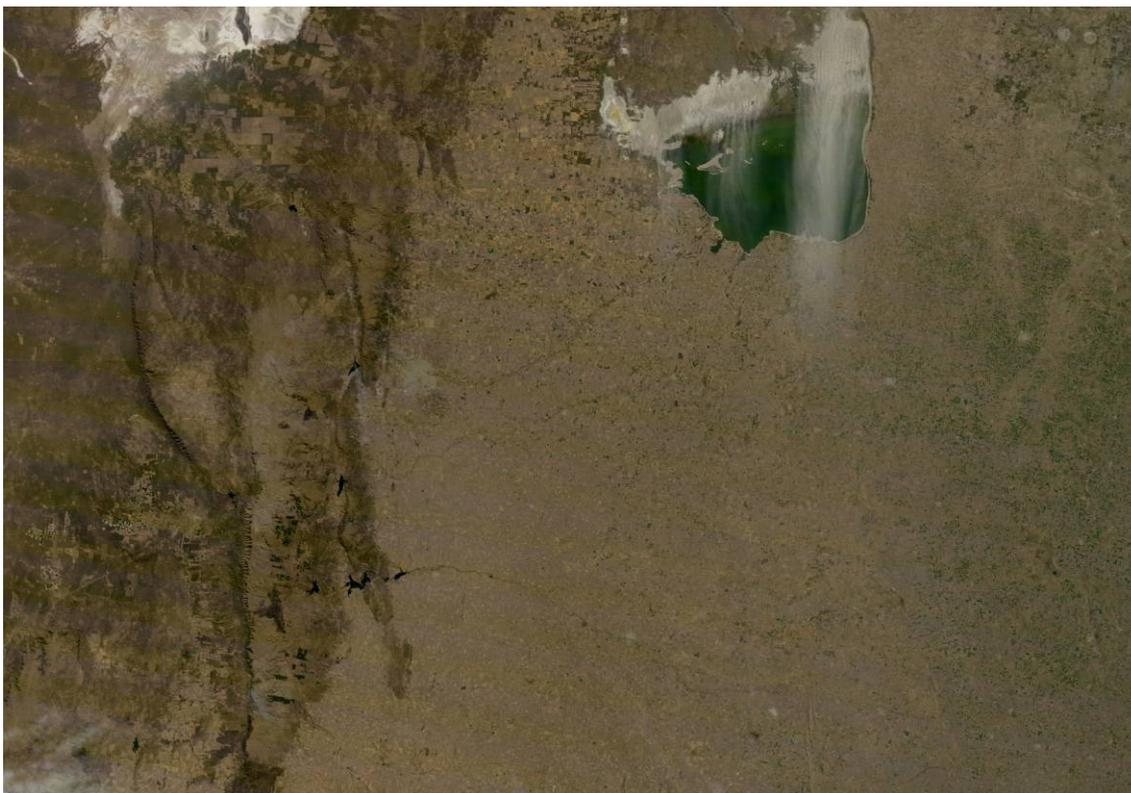


Figura 25: Imagen satelital del día 28 de Agosto, 11:13 hr. Fuente: Prensa CONAE.

En la Figura 26 se presenta una nueva imagen satelital, también, del día 28 de Agosto de 2009 pero de las 15:34 hr, adquirida por el satélite AQUA a través del sensor MODIS. En esta imagen se observar un incremento en la nubosidad respecto a la imagen de la Figura 25, correspondiente a casi cuatro horas posteriores. La nube de sal y polvo se genera desde la costa Norte y hacia el Sur que cubre prácticamente la totalidad del cuerpo de la Laguna Mar Chiquita y alcanza la cuenca hídrica del río Tercero. (Gentileza de Prensa CONAE: www.conae.gov.ar)

Se observan también, algunos focos de incendio en el Valle de Calamuchita y a la altura de Falda del Carmen, próximo a la Estación Terrena de CONAE.



Figura 26: Imagen satelital del día 28 de Agosto, 15:34 hr. Fuente: Prensa CONAE.

En la Figura 27 se presenta una nueva imagen satelital, esta vez del día 29 de Agosto de 2009 de las 11:56 hr, adquirida por el satélite TERRA a través del sensor MODIS. En esta imagen se observan un incremento en la nubosidad respecto a la imagen de la Figura 26, correspondiente al día anterior. La nube de sal y polvo generada desde la costa Norte y hacia el Sur cubre la totalidad del cuerpo de la Laguna Mar Chiquita y alcanza, esta vez, la cuenca hídrica del río Segundo. (Gentileza de Prensa CONAE: www.conae.gov.ar)

Se observan que continúan los focos de incendio a la altura de Falda del Carmen, próximo a la Estación Terrena de CONAE.

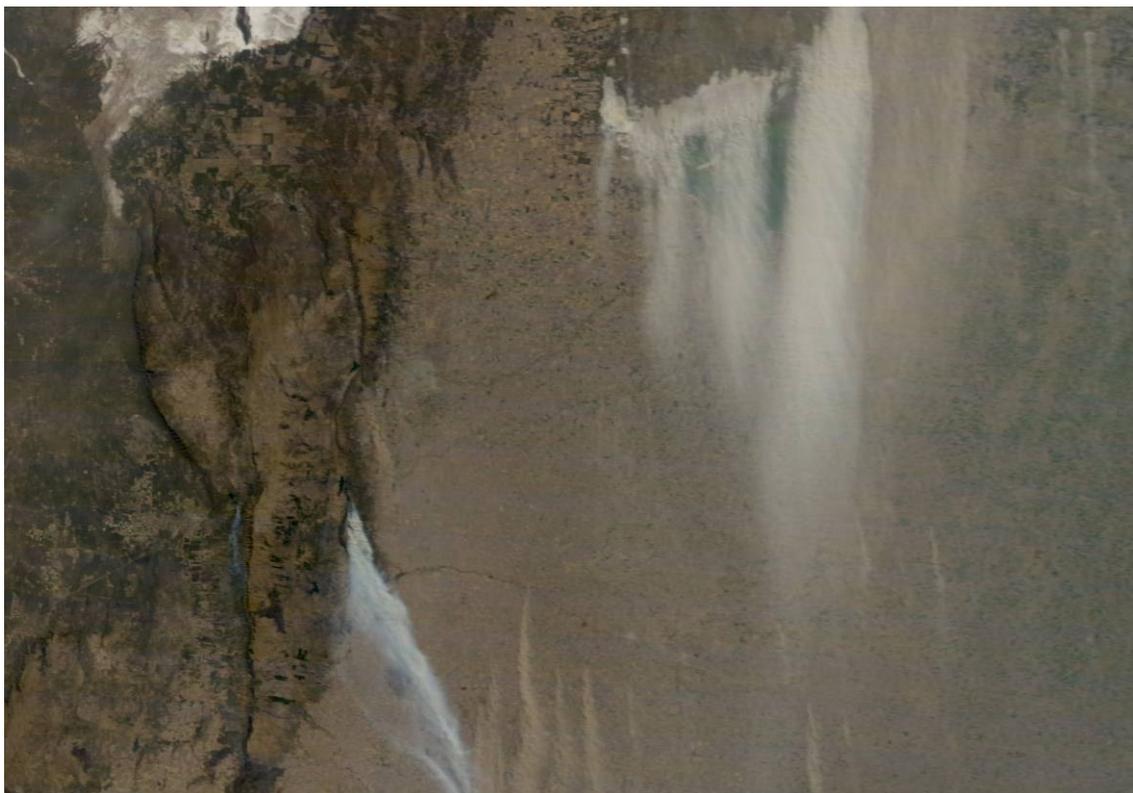


Figura 27: Imagen satelital del día 29 de Agosto, 11:56 hr. Fuente: Prensa CONAE.

En la Figura 28 se presenta una imagen satelital del día 29 de Agosto de 2009 correspondiente a 3 horas posteriores de la imagen precedente, de las 14:39 hr, adquirida por el satélite AQUA a través del sensor MODIS. La nube de sal y polvo, en esta imagen cubre la totalidad del cuerpo de la Laguna Mar Chiquita y alcanza nuevamente la cuenca hídrica del río Tercero. (Gentileza de Prensa CONAE: www.conae.gov.ar)

Se observan, también nuevos focos de incendio en el Valle de Punilla y que continúan con mayor vigor, los focos de incendio a la altura de Falda del Carmen.

El día 30 de Agosto a las 11:01 hr se registró la imagen de la Figura 29, en la cual la nube de polvo y sal se observa notablemente reducida. (Gentileza de Prensa CONAE: www.conae.gov.ar)



Figura 28: Imagen satelital del día 29 de Agosto, 14:39 hr. Fuente: Prensa CONAE.

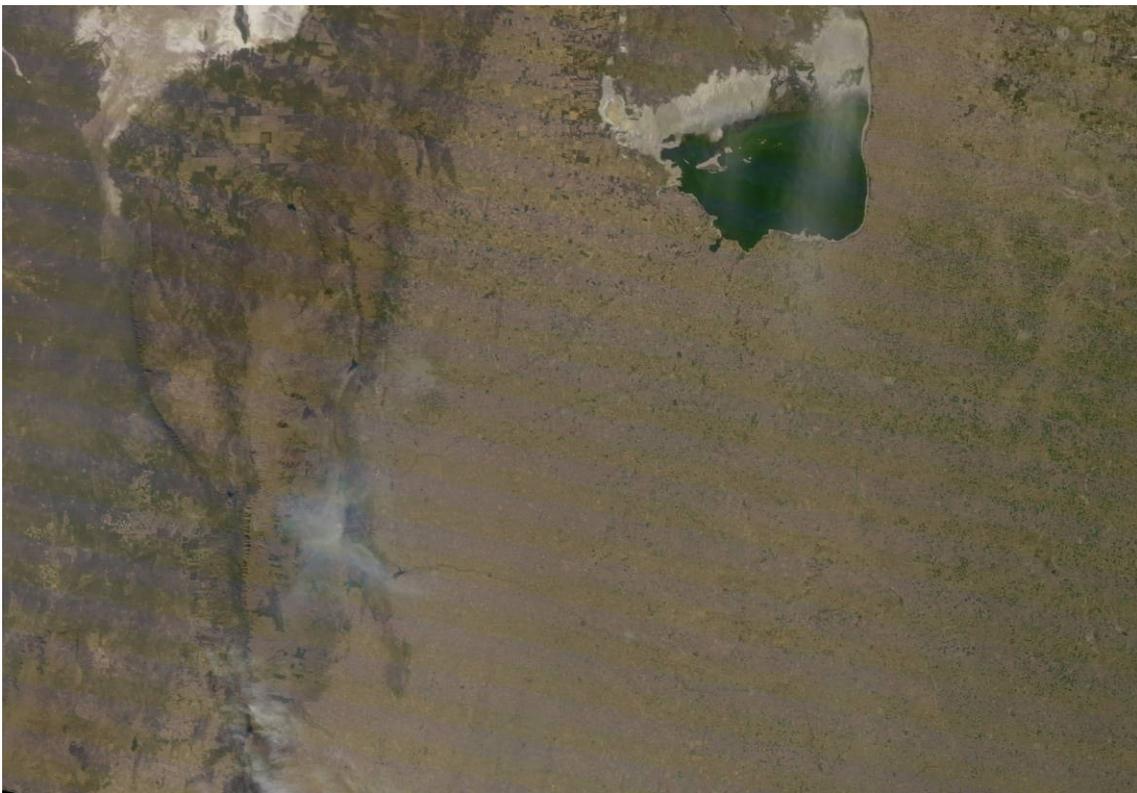


Figura 29: Imagen satelital del día 30 de Agosto, 11:01 hr. Fuente: Prensa CONAE.

2. Conceptos físicos relacionados con las tormentas de sal.

Se considera la siguiente hipótesis con relación a la formación de las tormentas admitiendo que hay material disponible en las playas de sal de la Laguna Mar Chiquita, factible de ser suspendido.

En este sentido, se parte de la siguiente hipótesis:

“Se asume que una vez disgregadas las aglomeraciones entre suelo y sal a partir de la erosión eólica, se dispone de partículas factibles de iniciar el movimiento”.

Se entiende por erosión a la pérdida progresiva, desgaste o destrucción lenta del suelo y posterior transporte de las partículas, producido por algún agente físico, como el viento (en nuestro caso), el escurrimiento pluvial, las mareas, las olas, etc.

En particular se conoce como erosión eólica el proceso de disgregación, remoción y transporte de las partículas del suelo por la acción del viento. El fenómeno de la erosión eólica se favorece con:

- 1) Vientos fuertes y vientos frecuentes.
- 2) Superficies llanas expuestas al viento.
- 3) Suelo seco, suelto, de textura fina y poca materia orgánica, con una inexistente o degradada estructura del suelo.
- 4) Condiciones de aridez. Altas temperaturas y escasas precipitaciones.
- 5) Poca cubierta vegetal. Así un pastoreo abusivo, la quema de residuos agrícolas y el laboreo irracional pueden ser factores causantes de la erosión eólica.

Uno de los modelos más aplicados para estimar la erosión eólica es la Ecuación de Erosión Eólica (siglas en inglés WEQ). Según este modelo la tasa de erosión eólica dependerá de cinco factores (Woodruff y Siddoway, 1965):

$$E' = f(I', K', V, L', C') \quad (1)$$

- La erosionabilidad eólica del suelo (I'): representa el potencial de pérdida de suelo y depende de la granulometría de éste. Se expresa en Mg/acre por año y se determina clasificando el suelo dentro de un grupo de erosionabilidad (8 posibles) según las propiedades de la superficie del suelo, y a partir del porcentaje de agregados del suelo seco mayores de 0,8 mm. Las propiedades más importantes del suelo, en relación a la erosión eólica, son:

- a) textura del suelo,
- b) contenido en materia orgánica,
- c) contenido en carbonato cálcico,
- d) estado de humedad del suelo
- e) estabilidad estructural.

El índice (I') toma un valor mínimo de 0 (suelos con alto contenido en elementos gruesos en la superficie o húmedos) y un valor máximo de 310 (suelos arenosos, y con porcentaje de agregados del suelo seco mayores de 0,8 mm del 1 %).

- Rugosidad del suelo (K'): cualquier irregularidad de la superficie del suelo (macrorrelieve o microrrelieve) representa un obstáculo para la circulación del aire.

- Longitud del terreno, L': hace referencia a la longitud efectiva recorrida por el viento.

- Factor de vegetación, V: se obtiene considerando tres subfactores: el porcentaje de residuos superficiales del suelo, la clase de cobertura vegetal (densidad, superficie y altura); y, la orientación, uniformidad, distribución y ancho de la vegetación.

- El factor climático, C': el factor climático según el modelo planteado por Woodruff y Siddoway se cuantifica según la expresión:

$$C' = 386 \times (V)^3 \times [PE \text{ index}]^{-2} \quad (2)$$

Siendo: V: velocidad media del viento corregida a una altura de 9,1 m; PE index: índice precipitación- evaporación de Thornthwaite; $PE \text{ index} = \frac{J \text{ I a XII } 3,1606?}{(P/(1,8 \cdot T + 22))^{1,111}}$; P: precipitación media mensual en milímetros (Para P M 13 mm); T: temperatura media mensual en °C (Para T M -1,7° C)

La erosión eólica de los suelos se valorará bajo diferentes puntos de vista coincidentes en sus objetivos, pero diversos y complementarios en sus procedimientos y formas. La valoración experimental cuantifica los procesos erosivos mediante el análisis y medición de determinadas características físicas y químicas del suelo. Centrándonos en las primeras, el análisis de la textura de las formaciones superficiales y la interconexión entre sus componentes nos dará unas características que permitirán valorar la erosionabilidad del suelo.

Para obtener unos índices estimativos de erosionabilidad se han estudiado fundamentalmente las arcillas y los limos, que junto con el contenido en gravas nos darán las valoraciones investigadas. Aunque las gravas proporcionan resultados orientativos difícilmente extrapolables.

A continuación se presentan algunos efectos de la erosión eólica sobre el ambiente, sobre un **caso testigo**.

Efecto "dust bowl" (cuenca de polvo)

La sequía llamada *Dust Bowl* fue un desastre natural en los años 30, que afectó a buena parte de los Estados Unidos. Se produjo en tres eventos: 1934, 1936 y 1939-40, pero algunas de las regiones de las Planicies Altas (*High Plains*) experimentaron condiciones de sequía por casi ocho años. El efecto "dust bowl" (cuenca de polvo) fue provocado por condiciones persistentes de sequía, favorecidas por años de prácticas de manejo del suelo que dejaron al mismo susceptible a las fuerzas del viento. El suelo, despojado de humedad, era levantado por el viento en grandes nubes de polvo y arena tan espesas que escondían el sol por varios días a la vez. Estos días eran referidos como "ventiscas negras" ó "viento negro".

Una vez transcurrida la sequía *Dust Bowl*, se pudo observar claramente que muchos factores contribuyeron al severo impacto de esta sequía. Era necesario desarrollar una mejor comprensión de las interacciones entre los elementos naturales (clima, plantas y suelo) y las actividades humanas (prácticas agrícolas, economía y condiciones sociales) de las Grandes Planicies. Las lecciones fueron aprendidas, y debido a esta sequía los agricultores adoptaron nuevos métodos para ayudar a controlar la erosión del suelo en los ecosistemas de tierras secas. Las sequías subsiguientes en esta región han tenido un impacto menor debido a estas prácticas de cultivo.

Generalmente se asocia la erosión eólica, en su aspecto externo, con las tempestades de polvo.

Los efectos superficiales de la acción de los vientos conllevan a acciones superficiales importantes para los cultivos; (fase plántula, más afectada) no sólo por la arena transportada, sino por que el arrastre de la tierra dejando al descubierto el sistema radicular o semillas sin germinar.

En cuanto a los efectos edáficos del viento pueden llegar a alterar, destruir o transformar las texturas de los suelos. El viento transporta limo, arcilla y materia orgánica dejando in situ las fracciones de mayor tamaño ;de esta manera quedan los elementos de menor tamaño que son mas susceptibles a la erosión, a la vez que se han eliminado los materiales básicos(desde el punto de vista de la productividad y retención de aguas)

Un tercer grupo que se suma a los efectos antes comentados es el transporte de materiales salinos, hacia zonas de cultivos, contribuyendo a la salinización de suelos.

Influencia de la textura y estructura de suelos; la estructura puede verse alterada con bastante facilidad cuando alguno de los factores que la definen sufren modificaciones, incidiendo directamente o indirectamente, en las respuestas de los suelos ante los agentes externos; siendo muy significativa dicha respuesta en el caso de la susceptibilidad ante los fenómenos erosivos. Una vez considerada y definida la textura de los suelos por el contenido en arcillas, limos, arenas y el análisis porcentual de estos componentes y la interconexión entre los mismos nos dará unas características específicas del suelo. Cada tipo de suelo posee una serie de propiedades y a su vez una respuesta ante agentes externos, en este caso el viento.

Efecto del viento en la Laguna

La influencia que puede lograr el viento en las aguas de la Laguna Mar Chiquita, depende de la dirección y de la intensidad, pero más que ser el mismo viento el que produce el movimiento, es una combinación de factores resultantes de la presencia de este viento en un lago la que produce el movimiento de las aguas. Entre estos factores está la forma de la orilla y las proporciones de aguas bajas contra profundas, lo que depende del relieve del lecho del lago, e incluso la presencia de estructura y vegetación bajo el agua.

La acción del viento se percibe con mayor significancia en la superficie del lago, pero existe un efecto de corrientes bajo la superficie como consecuencia de la presencia de viento. En el Hemisferio Sur, las corrientes generadas por el viento bajo un sistema de

baja presión tienden a producir un movimiento de las aguas en el sentido de las manecillas de un reloj. Bajo un sistema de alta presión, sucede en el sentido contrario. Para el Hemisferio Norte, el movimiento es exactamente inverso al del Hemisferio Sur.

Así el factor a tomar en cuenta es el viento y su influencia en la Laguna.

Particularmente en lagos con fuerte influencia de viento, se presentan orillas con un marcado oleaje. De esta manera se produce un efecto de acumulación de aguas en la orilla, las cuales escurren de vuelta hacia el lago arrastrando todo el material depositado en las costas y viceversa. Otro factor que debemos tomar en cuenta es que la presencia de viento puede producir algún error a la hora de interpretar imágenes satelitales con el fin de medir áreas y asociarlas posteriormente a niveles. Ya que en el análisis del un nivel inferior a los estimados o, en la imagen satelital las playas norte de la laguna pueden aparecer cubiertas por agua y esto es debido a que se produce un desplazamiento del cuerpo de agua siendo siempre el mismo volumen. En la Figura 30 se presenta un esquema del comportamiento de la Laguna en presencia de viento.

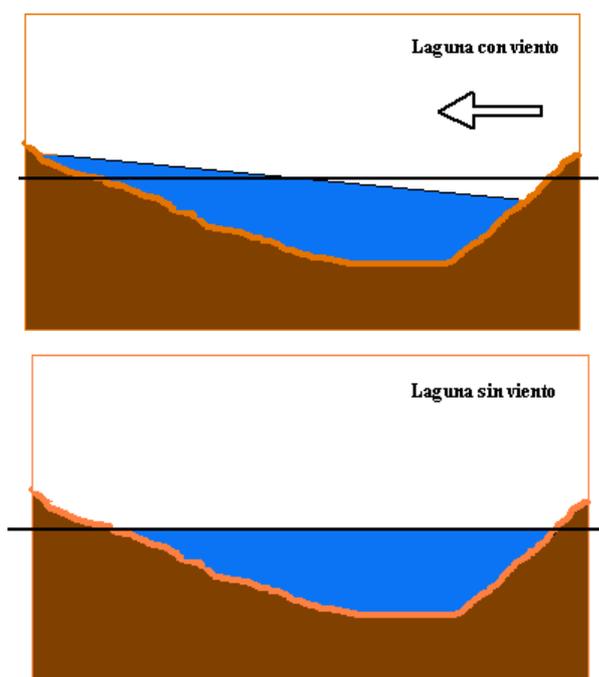


Figura 30: Esquema comportamiento de la Laguna debido al viento.

(Fuente: [http://www.mappinginteractivo.com/plantilla.asp?id_articulo=1544&titulo=&autor=&contenido=&tipo=\(Revista internacional de ciencias de la tierra\)](http://www.mappinginteractivo.com/plantilla.asp?id_articulo=1544&titulo=&autor=&contenido=&tipo=(Revista%20internacional%20de%20ciencias%20de%20la%20tierra)))

Descripción del fenómeno de erosión en las playas de sal

El proceso que conduce a la erosión eólica reconoce tres etapas: saltación, rodamiento y suspensión. La primera requiere que el viento circule con cierta velocidad sobre la superficie del suelo. La diferencia de presión que esto genera, entre la cara superior e inferior de las partículas, determina que la partícula "salte". Esta etapa afecta principalmente las arenas finas y limos. La partícula se eleva, es transportada una cierta distancia por el viento y luego cae.

Las partículas que caen a tierra impactan sobre otras más grandes (arenas), y las mueven unos centímetros "rodando" sobre el suelo. El proceso es multiplicativo y pone en movimiento una mayor cantidad de partículas de diferentes tamaños que colisionan entre sí. Algunas inician la saltación; otras más pequeñas (arcillas), son tomadas por la turbulencia del aire y puestas en "suspensión". Estas últimas pueden recorrer largas distancias a partir del punto de origen.

Las **playas originadas a partir del descenso de nivel de la Laguna Mar Chiquita** y la consecuente deposición de grandes cantidades de sal en el suelo de naturaleza limosa, cuando se dan vientos no necesariamente de gran intensidad se producen la erosión de la superficie, dando lugar a partículas de diverso tamaño que son transportadas por el viento.

En el caso de las playas de sal, lo que podría llegar a ser una limitación en cuanto al arrastre y transporte de material sedimentario, se convierte en una forma de transporte selectivo de las partículas más finas, es decir que a partir de los aglomerados de mayor tamaño formados por arcillas y sales, y gracias a la acción del viento, se produce una disgregación de estos aglomerados, dejando disponibles partículas de menor tamaño que pueden ser desplazadas por los vientos de mayor intensidad. Para poder realizar una estimación sobre el comportamiento de las playas de sal, frente a la erosión eólica nos ayudaremos con explicaciones basadas en la teoría de Shields, expuestas en el siguiente apartado.

Conceptos generales de iniciación de movimiento

El movimiento de las partículas se produce por acción del viento y puede ser, en función de su tamaño, rodando ($>0,5$ mm), por saltación ($0,05-0,5$ mm), o en suspensión ($< 0,1$ mm).

A lo largo de su curso, los ríos y canales sin revestimiento pueden ser erosionados por el paso de las aguas, porque los materiales que los constituyen no siempre son capaces de resistir la fuerza de arrastre, la cual se genera por el movimiento o escurrimiento de las aguas, ya que dicha fuerza crece conforme aumenta la velocidad de la corriente.

La situación que define las condiciones para que un flujo de agua inicie el movimiento, arrastre o transporte de las partículas sedimentarias que formen el material de un cauce, se denomina movimiento incipiente, movimiento crítico, condición crítica de arrastre, inicio de arrastre o transporte incipiente. Sin embargo, la condición de movimiento incipiente es diferente de la de transporte incipiente, pues la primera describe una situación instantánea en que una o varias partículas comienzan a moverse, pero ello no significa que una vez que se han movido continúen haciéndolo, como ocurre en las situaciones de arrastre o transporte incipientes (Manuel García Flores, José Antonio Maza Álvarez, 1997)

El estudio de todo proceso erosivo parte del análisis de la posibilidad de que exista iniciación de movimiento de las partículas. La iniciación del movimiento de una partícula depende de la relación que existe entre la fuerza de arrastre que ejerce el

viento (Fuerza que tiende a producir el movimiento) y la fuerza que procura mantener la partícula en reposo (Weber, 2000).

Respecto de la resistencia de la partícula a ser movida, la misma se relaciona con su peso. Luego, la fuerza de estabilización depende del peso específico de la partícula ($\gamma_s - \gamma$) y del diámetro característico del volumen de la misma (D).

La acción del viento, se caracteriza por una tensión de corte sobre la superficie τ_b .

A partir de un análisis dimensional, la relación entre ambas fuerzas da lugar al parámetro adimensional conocido como tensión de corte adimensional (τ^*), que se expresa por la ecuación (1):

$$\tau^* = \frac{\tau_b}{(\gamma_s - \gamma)D} \quad (3)$$

Cuando las fuerzas que actúan sobre las partículas son de tal magnitud que cualquier incremento, por pequeño que sea, produce movimientos, se dice que las condiciones son *críticas*. Esta condición se conoce como umbral del inicio del movimiento, y es el punto crítico que separa la situación estable de otra con movimiento (Martínez Marín, 2001). La tensión característica que separa estas dos situaciones extremas se denomina *tensión crítica de corte* (τ_c^*), y es particular para cada tipo de sedimento.

En general, las características de una partícula de sedimento frente a la condición crítica de movimiento puede expresarse a partir del número de Reynolds granular (R_*), que refleja adimensionalmente la relación entre las fuerzas de inercia y viscosas en el entorno de un grano. En parámetro R_* depende de la velocidad de corte en el fondo u_* , y se define como:

$$R_* = \frac{u_* D}{\nu} \quad (4)$$

Diagrama de Shields

La relación entre los parámetros adimensionales τ_c^* y R_* fue presentada primeramente por Shields que, a partir de un análisis dimensional y posterior trabajo experimental, combinó en un gráfico los parámetros: tensión crítica, peso específico de la partícula de sedimento γ_s y del fluido γ , el diámetro característico del grano (D), la velocidad crítica de corte y la viscosidad cinemática del fluido.

El *diagrama de Shields* (Figura 31) se aplica en casos para los cuales el flujo presenta la condición de ser permanente, uniforme y turbulento. Por debajo de la curva existe reposo, mientras que los puntos por encima de la curva corresponden al movimiento desarrollado.

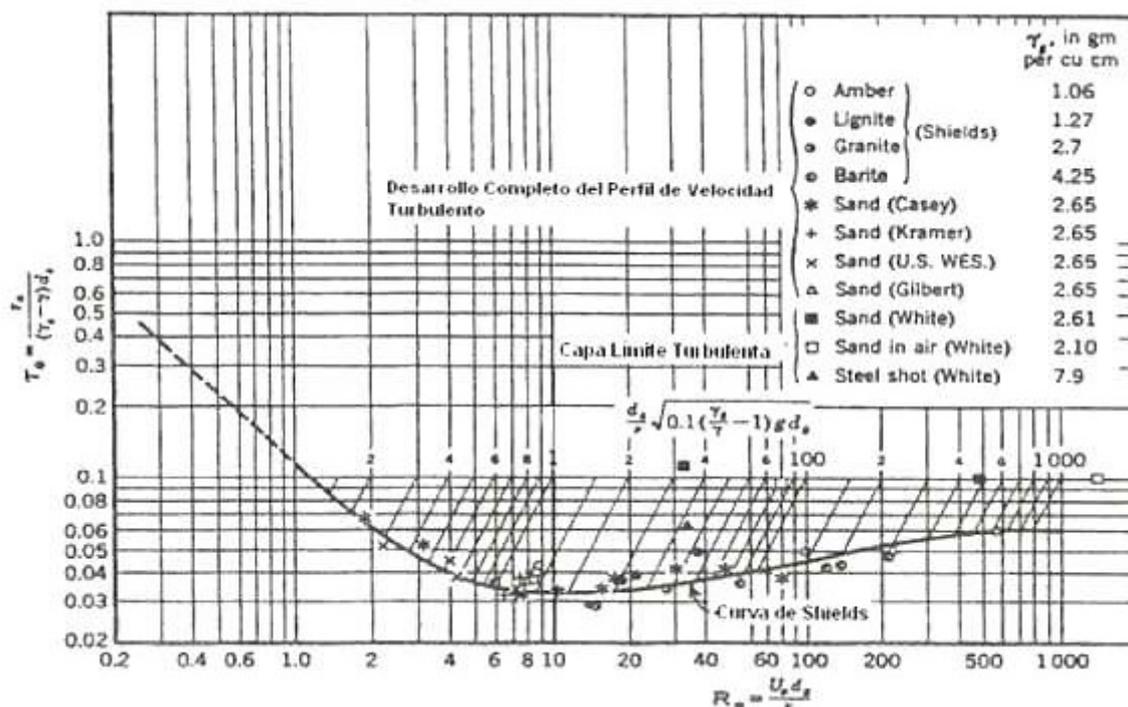


Figura 31: Diagrama de Shields convencional (Fuente: García M. H., 2007 elaborada por Vanoni, 1974).

No todos los autores coinciden con los resultados dados por la curva de Shields para iniciación de movimiento (García, 2000). Por ejemplo, algunos autores consideran a $\tau_c^* = 0,047$ como el valor de la tensión crítica de corte para valores de R_* mayores a 500 en lugar de $\tau_c^* = 0,06$ como lo expone Shields. Por otra parte, Taylor y Vanoni (ver García M. H., 2007) reportaron que pequeñas pero finitas cantidades de sedimentos son transportadas por los valores de tensión crítica dada por Shields.

Esto da lugar a reflexionar respecto a que el valor de τ_c^* que debe ser usada en el diseño depende de cada caso en particular (García, 1999). Si la situación es tal que aquellas partículas de sedimento pueden ser reemplazadas por otras moviéndose hacia aguas arriba, el movimiento puede ser tolerado y los valores dados por Shields pueden ser usados. Por otro lado, si los granos no pueden ser reemplazados, como en las márgenes de una rivera, los valores dados por Shields son muy grandes y deben ser reducidos.

El diagrama de Shields no es muy útil en su forma convencional (Figura 1), ya que para hallar τ_c^* debe conocerse la velocidad de corte u_* (García, 1999). La relación puede ser proyectada en forma explícita graficando τ_c^* en función del parámetro R_{ep} , que García (2000) propone como forma alternativa de calcular el número de Reynolds de la partícula. Para ello, debe prestarse atención a la siguiente relación interna:

$$\frac{u_* D}{\nu} = \frac{u_*}{\sqrt{RgD}} \cdot \frac{\sqrt{RgDD}}{\nu} = (\tau^*)^{1/2} \cdot R_{ep} \quad (5)$$

Donde R es la gravedad específica sumergida del sedimento, definida por la ecuación (6):

$$R = \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \quad (6)$$

Con ρ = densidad específica del fluido y ρ_s = densidad específica del sedimento.
Luego, R_{ep} puede escribirse como:

$$R_{ep} = \frac{\sqrt{RgDD}}{v} \quad (7)$$

Un ajuste aproximado a la curva de Shields, expuesto en la ecuación 5, fue dado por Brownlie (García, 1999), tal de simplificar el uso de este diagrama popular y que el valor de τ_c^* puede ser computado cuando las propiedades del agua y del sedimento son conocidas:

$$\tau_c^* = 0,22 * R_{ep}^{-0,6} + 0,06 * e^{(-17,77 * R_{ep}^{-0,6})} \quad (8)$$

Con esta relación (5) la Figura 31 se convierte en la Figura 32:

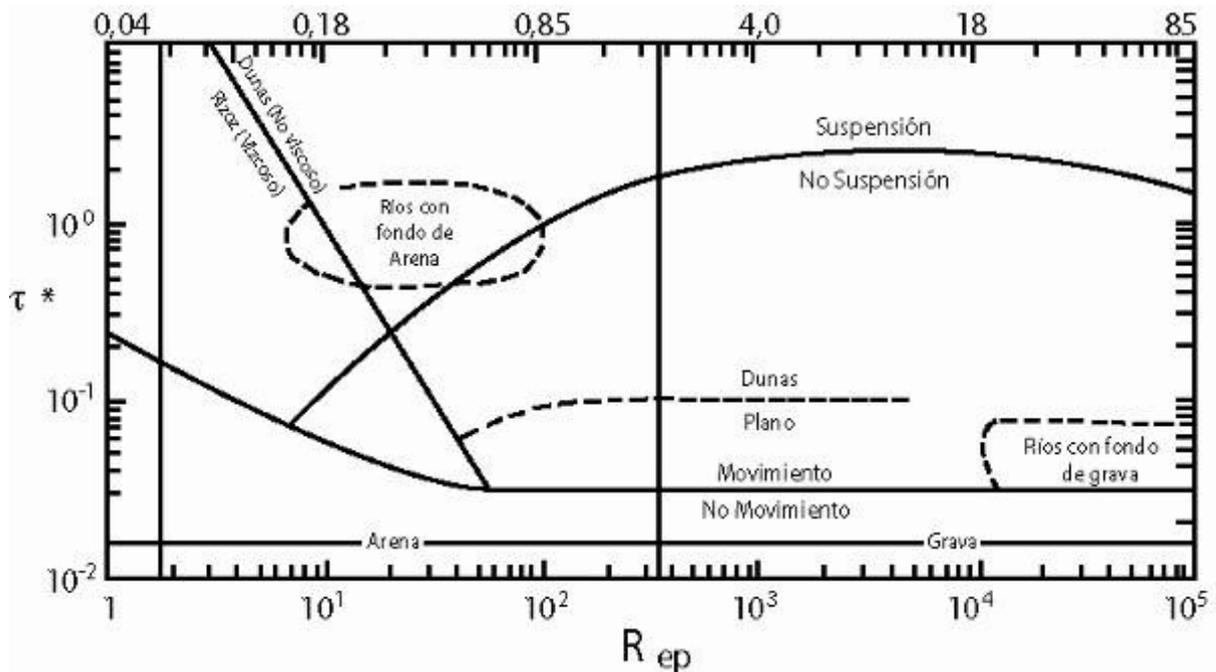


Figura 32: Diagrama de Shields modificado según Brownlie (Fuente: García, 1999).

Aplicaciones del Diagrama de Shields

(Fuente: “Comportamiento Hidráulico de un nuevo sistema de protección contra erosión de suelos” Gratton, Agostina (2008). Tesis de grado de la carrera de Ingeniería Civil. FCEfYN – UNC)

Además de permitir separar la situación estable de la de movimiento incipiente de las partículas de fondo, el diagrama de Shields también permite conocer que tipo de fenómeno de transporte puede ser esperado para diferentes condiciones de flujo y diferentes características de partículas de sedimento. Hay tres curvas en el diagrama que hace posible saber, para diferentes valores de τ^* y R_{ep} , si el sedimento de fondo va a sufrir iniciación de movimiento y, de ser así, si el modo de transporte que prevalece es la suspensión o bien el arrastre por el fondo.

Además, el diagrama puede ser usado para predecir que tipo de formas de fondo de superficie puede ser esperada. Por ejemplo, los rizos, que presentan una forma similar a los dientes de una sierra de pequeña dimensión, se desarrollan en presencia de la subcapa viscosa y cuando los granos son finos. Las dunas, en cambio, que se manifiestan en la superficie por medio de ondulaciones mayores, tienen lugar cuando la subcapa es interrumpida por sedimento de partículas mayores (García, 2000).

Análisis del comportamiento de las playas de sal, según diagrama de Shield

El arrastre de materiales “no cohesivos”, según consideraremos las partículas presentes en las playas de sal que ya han sido disgregadas por acción del viento, de material uniforme ha sido objeto de estudio desde hace varios siglos. La contribución más importante se alcanzó a partir del trabajo de Shields, quien fue el primero en considerar las fuerzas que actúan sobre una partícula y en aplicar principios de similitud. (Vide J. P. M., 2002)

En el presente Trabajo Final, se analizó el diagrama de Shields para la determinación de aquellos tamaños de partículas que pueden alcanzar el inicio de movimiento y la posterior suspensión, generando así las nubes salinas registradas en las imágenes satelitales.

En este apartado se muestra el análisis de inicio de movimiento realizado para distintos diámetros de partículas, factibles de encontrarse en las playas de Mar Chiquita. Para ello se ha aplicado la siguiente metodología.

1. Cálculo del valor del Re_p

1.1 Se selecciona un diámetro nominal para el sedimento (partícula de sal).

1.2 Se calcula el valor de R (con la ecuación 4),

Se asumieron los siguientes valores:

$$\rho_{sal} = 2200 \text{ kg/m}^3 \Rightarrow \gamma_{sal} = 21582 \text{ N/m}^3$$

$$\rho_{aire} = 1.2 \text{ kg/m}^3 \Rightarrow \gamma_{aire} = 11772 \text{ N/m}^3$$

$$\nu_{aire} = 0.00002 \text{ m}^2/\text{seg} \text{ (a } 20^\circ\text{C)}$$

1.3 Se calcula el valor de Re_p (con la ecuación 6)

2. Cálculo del valor de τ^* (con la ecuación 3)

2.1 Se adopta un valor de u^*

2.2 Se calcula el valor de τ_0

2.3 Se calcula el valor de τ^*

2.4 Se estima el valor de τ_c^* que produce la suspensión del sedimento (con la ecuación 7)

2.5 Se compara el valor de τ^* y τ_c^* . Si $\tau^* > \tau_c^*$ habrá suspensión del sedimento, en caso contrario, podría existir movimiento de arrastre pero no habrá suspensión.

2.6 Se asume una ley logarítmica para la variación de la velocidad del viento para diferentes alturas, y está relacionada a la velocidad de corte que produce la suspensión del sedimento mediante la siguiente expresión:

$$v = u^* \left[\frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{y}{k_s} \right) + B \right] \quad (9)$$

Se utilizan los siguientes valores:

$$\kappa = 0.41$$

k_s = coeficiente de rugosidad (diámetro del sedimento)

y = altura donde se mide la velocidad del viento = 2.5 m

B = constante igual a 8.5

Mediante esta metodología programada en EXCEL, es posible estimar para distintos diámetros de sedimento, la velocidad del viento que produce el inicio del movimiento y la suspensión.

A continuación se presentan los valores del esfuerzo de corte y las variables utilizadas calculadas para un diámetro asumido igual a 1 μm . (Ver Tabla 6)

Tabla 6: Estimación del esfuerzo de corte (τ) para un diámetro de 1 μm .

γ_s	21582	N/m ³
γ	11,772	N/m ³
ρ	1,2	Kg/m ³
$\gamma - \gamma_s$	21570,23	N/m ³
R	1832,33	
v	0,00002	m ² /seg
μ	0,000024	kg/m.seg
D	0,000001	m
Rep	0,01	
τ^*c	4,43	
τc	0,0956	

Para la determinación de la velocidad asociada al esfuerzo cortante (τ) o velocidad de fricción, para un diámetro de 0,000001 m se ha realizado el siguiente ejercicio, que se muestra en la Tabla 7, donde se observa que para un valor superior a τ^* de 2,23 comienza el movimiento, con una velocidad mínima de 32 Km/h (según Tabla 8) para que éste se inicie, con la particularidad de que cuando comience el movimiento inmediatamente seguirá la condición de suspensión de la partícula.

Tabla 7: Definición del inicio de movimiento a partir del esfuerzo de corte (τ) para un diámetro de 1 μm .

Velocidad crítica (u^*) (m/s)	Esfuerzo de Corte (τ)	Esfuerzo de Corte crítico (τ^*)	Condición movimiento
0	0,000	0,00000	NO MOVIMIENTO
0,1	0,012	0,55632	NO MOVIMIENTO

Velocidad crítica (u*)	Esfuerzo de Corte (τ)	Esfuerzo de Corte crítico (τ^*)	Condición movimiento
0,2	0,048	2,22529	NO MOVIMIENTO
0,3	0,108	5,00690	MOVIMIENTO
0,4	0,192	8,90116	MOVIMIENTO
0,5	0,300	13,90806	MOVIMIENTO
0,6	0,432	20,02760	MOVIMIENTO
0,7	0,588	27,25980	MOVIMIENTO
0,8	0,768	35,60463	MOVIMIENTO
0,9	0,972	45,06211	MOVIMIENTO
1	1,200	55,63224	MOVIMIENTO
1,1	1,452	67,31500	MOVIMIENTO
1,2	1,728	80,11042	MOVIMIENTO
1,3	2,028	94,01848	MOVIMIENTO
1,4	2,352	109,03918	MOVIMIENTO
1,5	2,700	125,17253	MOVIMIENTO
1,6	3,072	142,41852	MOVIMIENTO
1,7	3,468	160,77716	MOVIMIENTO
1,8	3,888	180,24844	MOVIMIENTO
1,9	4,332	200,83237	MOVIMIENTO
2	4,800	222,52894	MOVIMIENTO
2,1	5,292	245,33816	MOVIMIENTO
2,2	5,808	269,26002	MOVIMIENTO
2,3	6,348	294,29452	MOVIMIENTO
2,4	6,912	320,44168	MOVIMIENTO
2,5	7,500	347,70147	MOVIMIENTO
2,6	8,112	376,07391	MOVIMIENTO
2,7	8,748	405,55900	MOVIMIENTO
2,8	9,408	436,15672	MOVIMIENTO
2,9	10,092	467,86710	MOVIMIENTO
3	10,800	500,69012	MOVIMIENTO

Tabla 8: Conversión de unidades de velocidad para un diámetro de 1 μm .

U (m/s) Diámetro= 0,000001 m	U (Km/h)
0,00	0,0
0,02	3,6
0,05	7,2
0,07	10,8
0,09	14,4
0,11	18,0
0,14	21,6
0,16	25,2
0,18	28,8
0,20	32,4
0,23	36,0
0,25	39,6
0,27	43,2
0,29	46,8
0,32	50,4

U (m/s) Diámetro= 0,00001 m	U (Km/h)
0,34	54,0
0,36	57,6
0,38	61,2
0,41	64,8
0,43	68,4
0,45	72,0
0,47	75,6
0,50	79,2
0,52	82,8
0,54	86,4
0,56	90,0
0,59	93,6
0,61	97,2
0,63	100,8

Se realizó un nuevo ejercicio con la misma metodología anterior, esta vez utilizando un diámetro de 0,0001 m para las partículas de sal y limo o sólo sal. Los resultados se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9: Estimación del esfuerzo de corte (τ) para un diámetro de 10 μm .

γ_s	21582	N/m ³
γ	11,772	N/m ³
ρ	1,2	Kg/m ³
$\gamma - \gamma_s$	21570,228	N/m ³
R	1832,333333	
v	0,00002	m ² /seg
μ	0,000024	kg/m.seg
D	0,0001	m
Rep	6,70	
τ^*c	0,07	
τc	0,151528592	

En la Tabla 10 se muestra que para un τ^* **0,08901** ya se produce movimiento para un diámetro de 0,0001m.

Tabla 10: Definición del inicio de movimiento a partir del esfuerzo de corte (τ) para un diámetro de 10 μm .

Velocidad crítica (u^*)	Esfuerzo de Corte (τ)	Esfuerzo de Corte crítico (τ^*)	Condición movimiento
0	0,000	0,00000	NO MOVIMIENTO
0,1	0,012	0,00556	NO MOVIMIENTO
0,2	0,048	0,02225	NO MOVIMIENTO
0,3	0,108	0,05007	NO MOVIMIENTO
0,4	0,192	0,08901	MOVIMIENTO
0,5	0,300	0,13908	MOVIMIENTO

Velocidad crítica (u^*)	Esfuerzo de Corte (τ)	Esfuerzo de Corte crítico (τ^*)	Condición movimiento
0,6	0,432	0,20028	MOVIMIENTO
0,7	0,588	0,27260	MOVIMIENTO
0,8	0,768	0,35605	MOVIMIENTO
0,9	0,972	0,45062	MOVIMIENTO
1	1,200	0,55632	MOVIMIENTO
1,1	1,452	0,67315	MOVIMIENTO
1,2	1,728	0,80110	MOVIMIENTO
1,3	2,028	0,94018	MOVIMIENTO
1,4	2,352	1,09039	MOVIMIENTO
1,5	2,700	1,25173	MOVIMIENTO
1,6	3,072	1,42419	MOVIMIENTO
1,7	3,468	1,60777	MOVIMIENTO
1,8	3,888	1,80248	MOVIMIENTO
1,9	4,332	2,00832	MOVIMIENTO
2	4,800	2,22529	MOVIMIENTO
2,1	5,292	2,45338	MOVIMIENTO
2,2	5,808	2,69260	MOVIMIENTO
2,3	6,348	2,94295	MOVIMIENTO
2,4	6,912	3,20442	MOVIMIENTO
2,5	7,500	3,47701	MOVIMIENTO
2,6	8,112	3,76074	MOVIMIENTO
2,7	8,748	4,05559	MOVIMIENTO
2,8	9,408	4,36157	MOVIMIENTO
2,9	10,092	4,67867	MOVIMIENTO
3	10,800	5,00690	MOVIMIENTO

En la Tabla 11 se muestra que a 50 Km/hr se producirá el movimiento de la partícula.

Tabla 11: Conversión de unidades de velocidad para un diámetro de 10 μ m.

U (m/s) Diámetro= 0,00001 m	U (Km/h)
0,00	0,0
0,03	3,6
0,06	7,2
0,09	10,8
0,12	14,4
0,15	18,0
0,18	21,6
0,21	25,2
0,24	28,8
0,27	32,4
0,30	36,0
0,33	39,6
0,36	43,2
0,39	46,8
0,42	50,4

U (m/s) Diámetro= 0,00001 m	U (Km/h)
0,45	54,0
0,48	57,6
0,51	61,2
0,54	64,8
0,57	68,4
0,60	72,0
0,63	75,6
0,66	79,2
0,69	82,8
0,72	86,4
0,75	90,0
0,78	93,6
0,81	97,2
0,84	100,8

Ahora se realiza y presenta un tercer ejercicio con la misma metodología anterior considerando esta vez un diámetro de partícula de 1 mm. A continuación se presentan los valores del esfuerzo de corte y las variables utilizadas calculadas para este diámetro. (Ver Tabla 12)

Tabla 12: Estimación del esfuerzo de corte (τ) para un diámetro de 1 mm.

γ_s	21582	N/m ³
γ	11,772	N/m ³
ρ	1,2	Kg/m ³
$\gamma - \gamma_s$	21570,228	N/m ³
R	1832,33	
v	0,00002	m ² /seg
μ	0,000024	kg/m.seg
D	0,001	m
Rep	211,99	
τ^*c	0,02	
τc	0,45487	

Para la determinación de la velocidad asociada al esfuerzo cortante (τ) o velocidad de fricción, para un diámetro de 0,001 m se ha realizado el siguiente ejercicio, que se muestra en la Tabla 13 donde se observa que para un τ^* de 0,02 comienza el movimiento, con una velocidad mínima de 72,0 Km/h (según Tabla 14) para que éste se inicie.

Tabla 13: Definición del inicio de movimiento a partir del esfuerzo de corte (τ) para un diámetro de 1 mm.

Velocidad crítica (u^*)	Esfuerzo de Corte (τ)	Esfuerzo de Corte crítico (τ^*)	Condición movimiento
0	0,000	0,00000	NO MOVIMIENTO
0,1	0,012	0,00056	NO MOVIMIENTO
0,2	0,048	0,00223	NO MOVIMIENTO

Velocidad crítica (u^*)	Esfuerzo de Corte (τ)	Esfuerzo de Corte crítico (τ^*)	Condición movimiento
0,3	0,108	0,00501	NO MOVIMIENTO
0,4	0,192	0,00890	NO MOVIMIENTO
0,5	0,300	0,01391	NO MOVIMIENTO
0,6	0,432	0,02003	NO MOVIMIENTO
0,7	0,588	0,02726	MOVIMIENTO
0,8	0,768	0,03560	MOVIMIENTO
0,9	0,972	0,04506	MOVIMIENTO
1	1,200	0,05563	MOVIMIENTO
1,1	1,452	0,06732	MOVIMIENTO
1,2	1,728	0,08011	MOVIMIENTO
1,3	2,028	0,09402	MOVIMIENTO
1,4	2,352	0,10904	MOVIMIENTO
1,5	2,700	0,12517	MOVIMIENTO
1,6	3,072	0,14242	MOVIMIENTO
1,7	3,468	0,16078	MOVIMIENTO
1,8	3,888	0,18025	MOVIMIENTO
1,9	4,332	0,20083	MOVIMIENTO
2	4,800	0,22253	MOVIMIENTO
2,1	5,292	0,24534	MOVIMIENTO
2,2	5,808	0,26926	MOVIMIENTO
2,3	6,348	0,29429	MOVIMIENTO
2,4	6,912	0,32044	MOVIMIENTO
2,5	7,500	0,34770	MOVIMIENTO
2,6	8,112	0,37607	MOVIMIENTO
2,7	8,748	0,40556	MOVIMIENTO
2,8	9,408	0,43616	MOVIMIENTO
2,9	10,092	0,46787	MOVIMIENTO
3	10,800	0,50069	MOVIMIENTO

Tabla 14: Conversión de unidades de velocidad para un diámetro de 1 mm.

U (m/s) Diámetro= 1 mm	U (Km/h)
0,00	0,0
0,04	3,6
0,07	7,2
0,11	10,8
0,15	14,4
0,18	18,0
0,22	21,6
0,25	25,2
0,29	28,8
0,33	32,4
0,36	36,0
0,40	39,6
0,44	43,2
0,47	46,8
0,51	50,4
0,54	54,0

U (m/s) Diámetro= 1 mm	U (Km/h)
0,58	57,6
0,62	61,2
0,65	64,8
0,69	68,4
0,73	72,0
0,76	75,6
0,80	79,2
0,83	82,8
0,87	86,4
0,91	90,0
0,94	93,6
0,98	97,2
1,02	100,8

En función de los diferentes diámetros evaluados, es posible establecer el rango de inicio de movimiento a partir del esfuerzo de corte calculado y el número de Reynolds.

En la Figura 33 se presentan sobre el diagrama de Shields, las velocidades estimadas que definen el inicio de movimiento según el diámetro analizado.

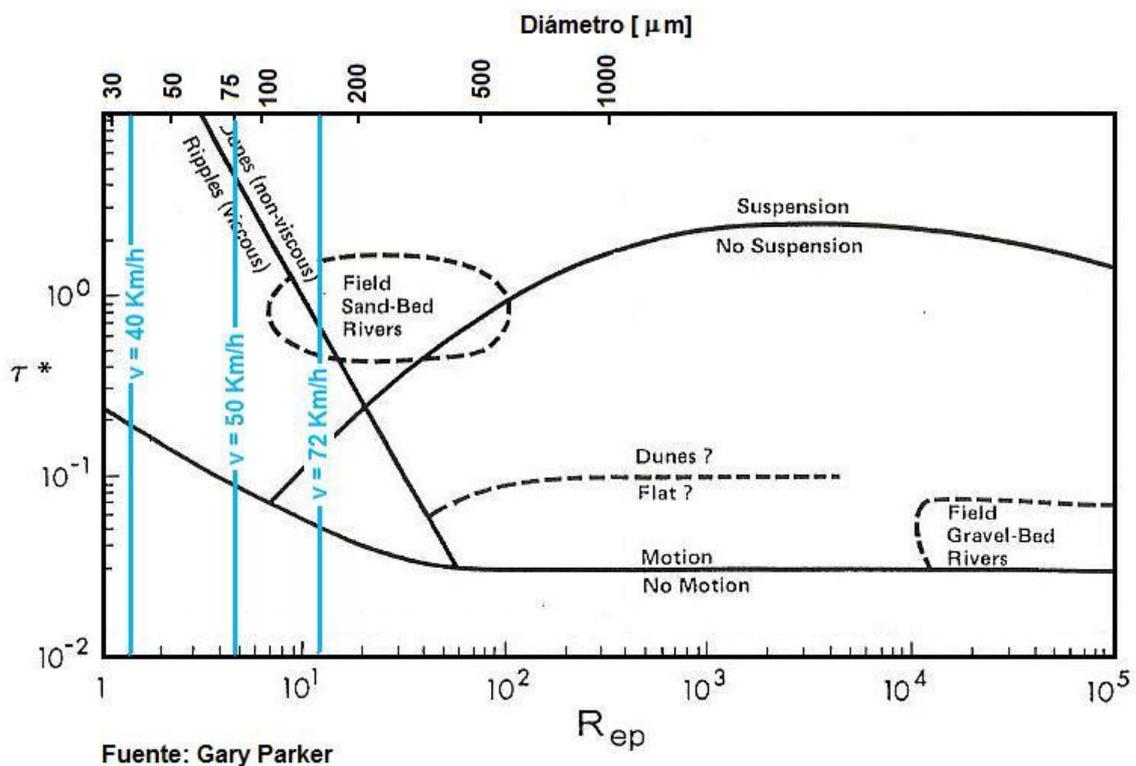


Figura 33: Campo de inicio de movimiento según los diferentes diámetros evaluados.

Según muestras tomadas del tanque evaporímetro instalado en la Reserva de Miramar, se tomaron muestras presentadas en las fotografías siguientes, donde se observan las características del sedimento.



Foto 1. Muestra de sedimentos en Miramar.

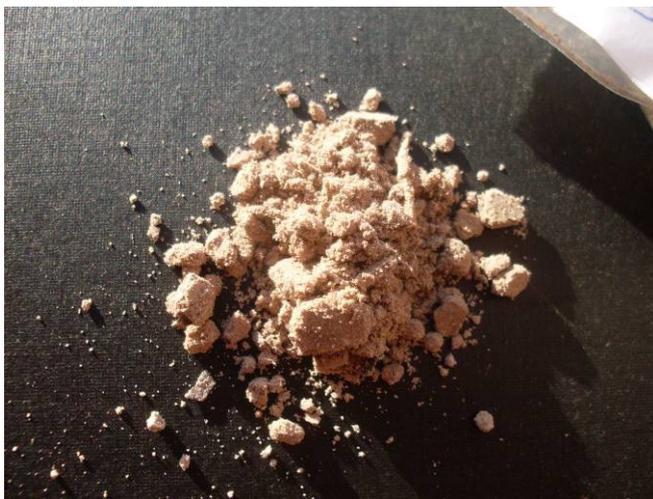


Foto 2. Muestra de polvo en superficie de vegetación (Quebracho Blanco), tomada el 26-08-2009.



Foto 3. Muestra del sedimento extraída del Tanque evaporimétrico. Tomada el 26-08-2009, a las 10:00 horas.



Foto 4. Muestra de sedimentos salinos extraídos en playa cercana a Miramar tomada el 26-08-2009 a las 10:00 horas.

Sumado a estas características del sedimento, se cuenta con información de viento asociada a la evaluación previa de la imagen satelitales del mes de julio de 2006. En esta oportunidad se registró una velocidad de viento de 53 km/h, lo que verifica numéricamente que se está en condiciones de generar el arrastre y suspensión de las partículas de sal.

Lo mismo ocurre con la imagen del 12 de Agosto de 2009, asociada a una velocidad de viento 85 km/h.

5. Recopilación de imágenes satelitales LANDSAT

En este apartado se presenta un análisis de la situación de los cuerpos de agua y de la dinámica hídrica de las playas asociadas a la presencia o no de los Bañados del Río Dulce, basado en la interpretación visual de imágenes producto de los satélites LANDSAT 5 TM y 7 +ETM y las relaciones con los caudales erogados por el dique Río Hondo. A partir de estas imágenes se cuantificó la extensión de las playas salinas, principalmente del Norte de la Laguna.

Los sensores situados en plataformas espaciales permitieron desarrollar la técnica de teledetección, la cual es utilizada, también, en estudios orientados al medio ambiente en las distintas áreas como son la oceanografía, recursos pesqueros, estudios costeros, contaminación, hidrogeología, geología, estimación de cosechas, control de plagas, producción agrícola, usos del suelo, planificación urbana, etc.

Con lanzamiento del satélite LANDSAT 1, el día 7 de marzo de 1972 se abrió una nueva percepción del planeta con una resolución tanto temporal como espectral desconocida hasta entonces. Este satélite, dotado de sensores empleados en teledetección, fue diseñado con el fin de obtener datos de los recursos terrestres. En base a este objetivo se diseñaron las resoluciones para adaptarse a este fin.

La serie de satélites Landsat, Landsat 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 desde el año 1972 dan una de las mejores series históricas de la evolución del planeta. Este sensor es el más empleado en aplicaciones agrícolas, forestales, usos del suelo, hidrología, recursos costeros y monitorización medioambiental. Sobre todo esta ligado a estudios territoriales en los que el parámetro fundamental es el medio ambiente.

El sensor Landsat ETM + dispone de lectura en ocho canales, o bandas, situadas en distintas zonas del espectro electromagnético mientras que el sensor Landsat 5 TM dispone de 7 Bandas detalladas en la Tabla 15.

Tabla 15: Resolución espectral del los satélites Landsat.

TM y ETM+ Bandas Espectrales								
Ancho de banda (µm): Ancho Mínima – Ancho Máxima								
Sensor	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4	Banda 5	Banda 6	Banda 7	Banda 8
TM	0.45- 0.52	0.52 – 0.60	0.63 - 0.69	0.76-0.90	1.55 - 1.75	10.4 - 12.5	2.08 - 2.35	No existe
ETM+	0.45 - 0.52	0.53 – 0.61	0.63 - 0.69	0.78 - 0.90	1.55 - 1.75	10.4 - 12.5	2.09 - 2.35	0.52 -0.90
Región	Visible azul	Visible verde	Visible rojo	Infrarrojo Próximo	Infrarrojo Lejano	Térmico Lejano	Térmico próximo	Visible

La resolución espacial cuantifica el tamaño de píxel, mínima unidad de medida del territorio, que es capaz de definir la lectura de las bandas del sensor. Para el satélite Landsat, la resolución espacial se detalla en la Tabla 16 por bandas.

Tabla 16: Resolución espacial del los satélites Landsat.

Banda	Rango Espectral (μ)	Zona del Espectro	Resolución espacial (m)
1	0.45 - 0.515 μ	Visible – azul	30
2	0.525 – 0.605 μ	Visible – verde	30
3	0.63 – 0.690 μ	Visible – rojo	30
4	0.75 – 0.90 μ	Infrarrojo Próximo	30
5	5 1.55 – 1.75 μ	Infrarrojo Lejano	30
6	10.40 – 12.5 μ	Térmico Lejano	60
7	2.09 – 2.35 μ	Térmico Próximo	30
8 Pancromático	0,52-0,90 μ	Prácticamente todo el visible	15

La resolución temporal mide el tiempo que pasa desde la obtención de la imagen de un punto de la tierra, hasta la siguiente imagen. Los satélites Landsat están sincronizados para que mantenga una resolución temporal de 16 días, presentando una diferencia de 8 días entre los Landsat 5 y Landsat 7.

Análisis de las imágenes satelitales

El análisis visual de imágenes se realiza empleando la combinación de tres bandas del sensor, coincidiendo con la capacidad de los monitores de visualización empleados en Informática con tres canales correspondiendo cada uno a los colores Rojo (Red: R), Verde (Green: G) y Azul (Blue: B).

Empleando estos tres canales (RGB) se tiene la posibilidad de enviar en cada uno de ellos una de las bandas del sensor, combinándose en nuestra pantalla y dando distintos colores y tonos que se emplean para analizar visualmente la imagen, combinando las bandas, de manera que se da un primer acercamiento al contenido de la misma.

Esta combinación de colores se emplea para discriminar Geología de la imagen, Usos del suelo de la imagen, Morfología Urbana, etc.

Para discriminar ciertas cubiertas hay que recurrir a otros análisis analizando imágenes consecutivas, o de otros años, análisis multitemporal y de contexto, en función del conocimiento previo que se tiene de la zona cubierta por la imagen.

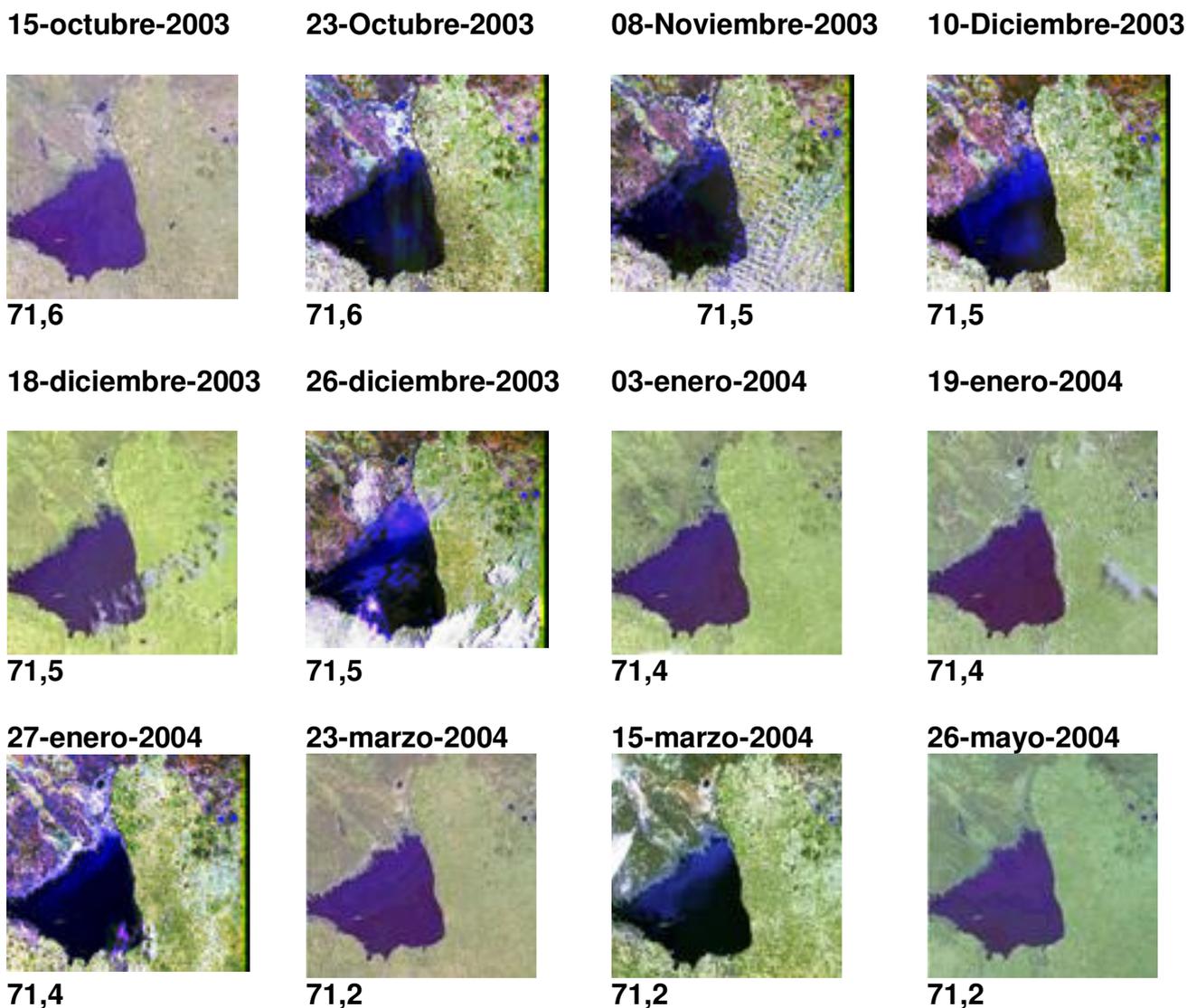
La zona de la Laguna Mar Chiquita corresponde a la ruta de los satélites Landsat identificada con Path/Row: 228/81.

En la página de Internet de la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE), ubicada en Falda del Carmen a pocos kilómetros de la ciudad de Córdoba, podemos encontrar una serie de imágenes satelitales de la Laguna actualizada para cada revisita de los satélites. Estas imágenes se encuentran en las siguientes direcciones:

<http://catalogos.conae.gov.ar/landsat7/searchp.asp?vpt=228/81&pocas=0>
<http://catalogos.conae.gov.ar/landsat5/searchp.asp?vpt=228/81&pocas=1>

Las mismas se presentan con una combinación de bandas 7-5-1 correspondientes a los canales R-G-B y con una resolución espacial de 360 m, resultando así las llamadas imágenes *Quick Look*.

En la Figura 34 se presenta la secuencia de imágenes disponibles en el catálogo de CONAE antes mencionado, cubriendo el periodo 2003-2009 y asociando a cada imagen el correspondiente nivel mensual registrado en la Laguna.



02-mayo-2004



71,2

11-junio-2004



05-julio-2004



71,1

13-julio-2004



71,1

14-agosto-2004



71,1

22-agosto-2004



71,1

30-agosto-2004



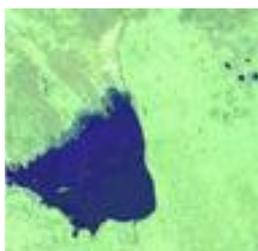
71,1

15-septiembre-2004



70,9

23-septiembre-2004



70,9

01-octubre-2004



70,9

17-octubre-2004



70,9

25-octubre-2004



70,9

02-noviembre-2004



Sin dato

18-noviembre-2004



Sin dato

04-diciembre-2004



70,7

12-diciembre-2004



70,7

28-diciembre-2004



70,7

21-enero-2005



Sin dato

14-febrero-2005

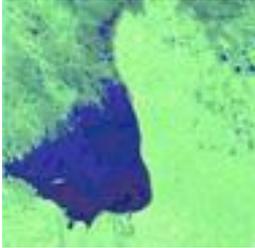


70,7

10-Marzo-2005



03-abril-2005



70,7

09-agosto-2005



70,6

18-septiembre-2005



Sin dato

08-enero-2006



Sin dato

25-febrero-2006



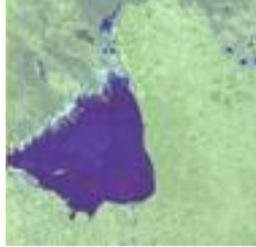
70,5

27-abril-2005



70,7

17-Agosto-2005



70,6

26-septiembre-2005



Sin dato

24-enero-2006



Sin dato

05-marzo-2006



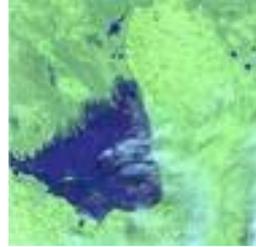
70,2

21-mayo-2005



70,7

25-agosto-2005



70,6

12-octubre-2005



Sin dato

09-febrero-2006



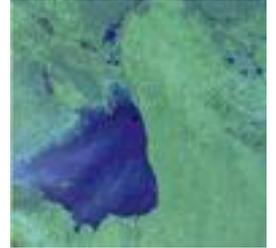
70,5

13-marzo-2006



70,2

08-julio-2005



70,6

02-septiembre-2005



Sin dato

20-octubre-2005



Sin dato

17-febrero-2006



70,5

29-marzo-2006



70,2

16-Mayo-2006



69,9

24-mayo-2006



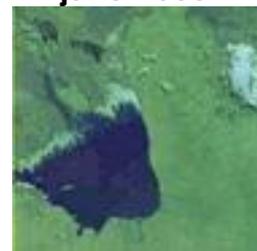
69,9

03-julio-2006



69,6

11-julio-2006



69,6

19-julio-2006



69,6

04-Agosto-2006



69,4

28-agosto-2006



69,4

05-septiembre-2006



Sin dato

21-septiembre-2006



Sin dato

29-septiembre-2006



Sin dato

07-octubre-2006



Sin dato

15-octubre-2006



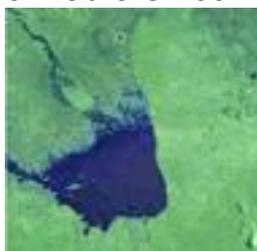
Sin dato

26-diciembre-2006



Sin dato

04-febrero-2007



Sin dato

20-febrero-2007



Sin dato

09-abril-2007



70,0

14-julio-2007



70,0

30-jul-2007



70,0

15-agosto-2007



69,9

31-agosto-2007



69,9

26-octubre-2007



Sin dato
19-abril-2008



Sin dato
09-agosto-2008



Sin dato
08-enero-2009



68,8
13-marzo-2009



68,6

13-diciembre-2007



Sin dato
05-mayo-2008



Sin dato
20-octubre-2008



69,1
24-enero-2009



68,8
29-marzo-2009



68,6

02-marzo-2008



Sin dato
06-junio-2008



Sin dato
21-noviembre-2008



69,1
09-febrero-2009



68,5
14-abril-2009



Sin dato

03-abril-2008



Sin dato
24-julio-2008



Sin dato
07-diciembre-2008



69,0
25-febrero-2009



68,5
30-abril-2009



69,1

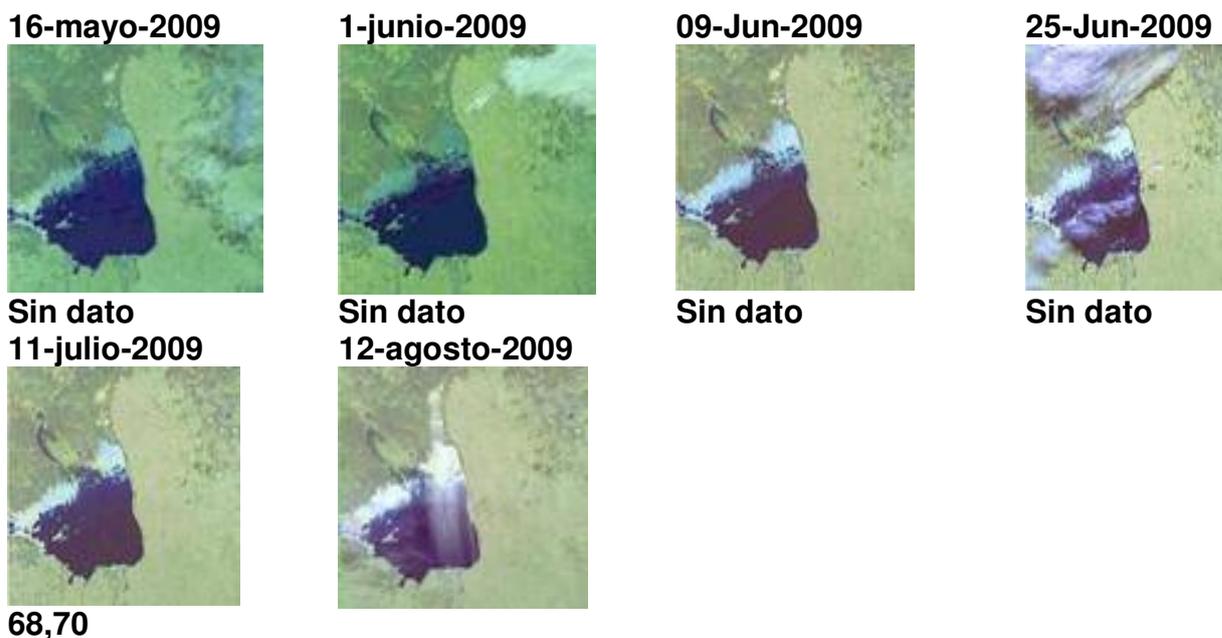


Figura 34: Imágenes satelitales de la Laguna Mar Chiquita y niveles asociados. (Fuente: www.conae.gov.ar)

La secuencia de imágenes presentada comprende el periodo 2003-2009. Se observa que el primer año de análisis, o sea el año 2003, los bañados se presentan en una etapa de recesión, conociendo que durante este año se han formado y la Laguna se presenta con niveles altos. Es conveniente destacar que en julio de este año se registró el máximo nivel histórico (71,76 m.s.n.m).

Durante el año 2004, las imágenes disponibles indican la ausencia casi total de los Bañados. Durante este ciclo, los niveles de la Laguna descienden constantemente comenzando a destacarse las playas de sal en poca extensión.

Por otro lado, durante el año 2005, se observan escasas áreas en la zona de Bañados con presencia de agua en superficie, principalmente hacia el Noreste de la Laguna.

Durante el año 2006, se registra a través de las imágenes satelitales, un desarrollo mínimo del Bañado a través de las áreas cercanas al cauce del río Dulce. Se destacan las playas del Norte de la Laguna con mayor reflectancia que en los años anteriores, indicando mayor concentración de sal en esta zona.

En el año 2007, se observó una formación de Bañados medios llegando a su mayor expresión durante el mes de abril. Ante esta situación la Laguna recupera unos centímetros su nivel promediando los 70 m s.n.m. hasta agosto del mismo año cuando comienza a descender nuevamente.

Durante el 2008, se registra en las imágenes una formación mínima del Bañado mayor que el año 2006 pero menor que la del año 2007. El descenso de la Laguna continúa hasta alcanzar los 69 m s.n.m. en diciembre de dicho año.

En el transcurso del presente año, los Bañados prácticamente no se formaron, incluso se observan las lagunas independientes de Mar Chiquita, en el sector Noreste de la misma,

con mayor sequía que en los años anteriores. El nivel de la Laguna alcanza los 68, 7 m s.n.m. y el cuerpo de agua se destaca notablemente reducido. Las playas del Norte resaltan por su reflectancia blanquesina.

3. Medición de las playas de sal con apoyo satelital

En cuanto a la identificación de las playas de sal con apoyo satelital, la metodología utilizada en esta etapa del trabajo, se basó en la reflectancia de los cristales salinos y su respuesta en los datos capturados por el sensor LANDSAT.

En cuanto a éste proceso, se puede considerar la estructura de los cristales de sal. En este sentido los mismos presentan lados planos cuya respuesta es similar a la respuesta de una pared plana altamente reflejante como por ejemplo un espejo.

Procesamiento de las imágenes satelitales.

Para el análisis de las imágenes satelitales y la determinación de áreas cubiertas de sal se utilizó el programa ENVI 4.3.

El programa ENVI “Entorno para Visualización de Imágenes - *Environment for Visualizing Images*”, es un sistema de procesamiento de imágenes diseñado para proporcionar análisis multiespectral de los datos obtenidos por teledetección desde aviones y satélites.

ENVI utiliza un formato de datos raster generalizado, consistente en un "fichero binario plano" y un fichero ASCII (texto) de cabecera asociado. Este formato de ficheros permite a ENVI usar casi cualquier fichero de imagen.

Los datos raster generalizados se almacenan como una serie binaria de bytes en formatos Band Sequential (BSQ), Band Interleaved by Pixel (BIP), o Band Interleaved by Line (BIL). BSQ es el formato más simple, con cada línea de datos seguida inmediatamente por la siguiente línea de la misma banda espectral. Es el formato óptimo para el acceso espacial (X,Y) a cualquier parte de una simple banda espectral. El formato BIP proporciona óptimas prestaciones para el procesamiento espectral. BIL es un formato con prestaciones intermedias entre el procesamiento espacial y espectral. Es el formato de fichero recomendado para la mayor parte de las tareas de procesamiento de ENVI.

Permite generar nuevas imágenes a partir de procesamientos como clasificación, transformación, filtros, modificaciones espectrales, mapeos, vectorización, entre otras funciones.

Algunas de las funciones utilizadas con el programa ENVI 4.3 se detallan a continuación:

Importación de datos

Al importar datos con ENVI, aparecen en pantalla ventanas que nos permitirán manipular y analizar una misma imagen. Estas pantallas son un grupo de tres ventanas que visualizan la imagen, permitiendo moverse dentro de la misma y ampliar diferentes zonas. Este grupo de ventanas se denomina colectivamente como el Grupo de Visualización, que consiste en:

- *La Ventana Principal:* Donde toda o parte de su imagen se visualiza a la máxima resolución. (Figura 35)



Figura 35: Ventana principal de ENVI. Imagen Septiembre de 2006.

1. *La Ventana de Scroll:* Si la imagen completa no cabe en la Ventana Principal, aparece la Ventana de Scroll, donde se visualiza una copia reducida de la imagen completa, permitiéndole seleccionar el área a visualizar en la Ventana Principal.
- *La Ventana de Zoom:* Visualiza una versión aumentada del área seleccionada en la Ventana Principal. (Figura 36)

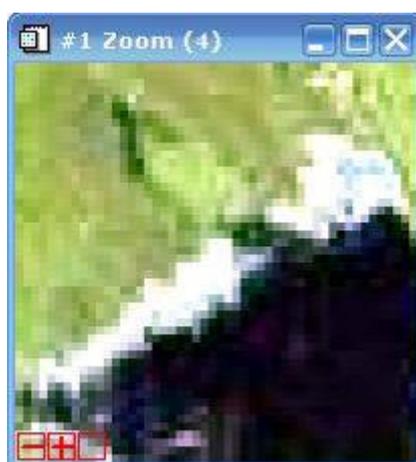


Figura 36: Ventana zoom de ENVI. Imagen Septiembre de 2006.

ENVI 4.3 proporciona acceso, tanto a ficheros de imágenes, como a bandas espectrales individuales sobre esos ficheros. La Lista de Bandas Disponibles (*Available Bands List*) es un cuadro de diálogo especial, que contiene un listado de todas las bandas disponibles de todos los ficheros abiertos. Se utiliza esta lista para cargar imágenes tanto en color como en escala de grises. (Figura 37)

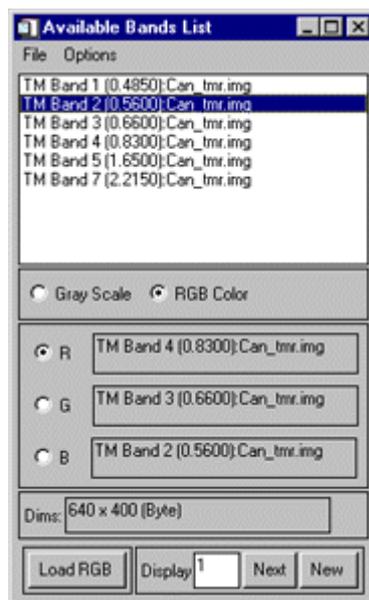


Figura 37: Listado de imágenes disponible en ENVI.

ENVI permite identificar sobre cada píxel, la localización seleccionando el comando "Localización/Valor del Cursor" (*Cursor Location/Value*) del menú principal (*Basic Tools*), para que aparezca una ventana en la que se muestra los valores de la posición del cursor, de esta manera podemos saber cuál es el valor del píxel en las áreas de sal y esto ayudara a realizar la clasificación.



Figura 38: Consulta de localización en el píxel. Imagen Septiembre de 2006.

Clasificación de la imagen

La clasificación como proceso de análisis de las imágenes satelitales o digitales representa uno de los métodos de obtención de la información sobre el terreno y se utiliza para interpretar, descubrir, conocer el contenido de las imágenes digitales.

La clasificación digital se dirige a obtener una nueva imagen, en la cual cada uno de los píxeles originales venga definido por un nivel digital o un color, que es el identificador de la clase en donde se haya incluido. Estas clases pueden describir distintos tipos de cubiertas, por ejemplo, una clasificación de especies vegetales, o un intento de señalar niveles de afectación en un incendio forestal o de humedad en una inundación o como es, en nuestro caso, en estudio cubiertas de sal.

Sea uno u otro el propósito, la clasificación digital se emplea en la fotointerpretación. En esta técnica, en primer lugar, se identifica cada cubierta, de acuerdo a una serie de criterios: tono, textura, forma, disposición, etc. Posteriormente, se delimita en forma automática sobre el resto de la imagen las zonas que se corresponden con este patrón previamente definido. Por último, se verifica la interpretación realizada.

La clasificación digital puede ser supervisada o no supervisada. La clasificación “no supervisada” es una técnica de agrupamiento. Con esta técnica una imagen es segmentada en clases desconocidas. Este enfoque se dirige a definir las clases espectrales naturales que están presentes en la imagen. Implica un conocimiento mínimo del área de estudio, por lo que, la intervención humana se centra más en la interpretación de los resultados que en la preparación de los datos para su obtención.

En la Figura 39 se presenta la imagen clasificada en forma “no supervisada” de Septiembre de 2006. Donde la Laguna se presenta en un color rojo y la zona de playa en bordo.

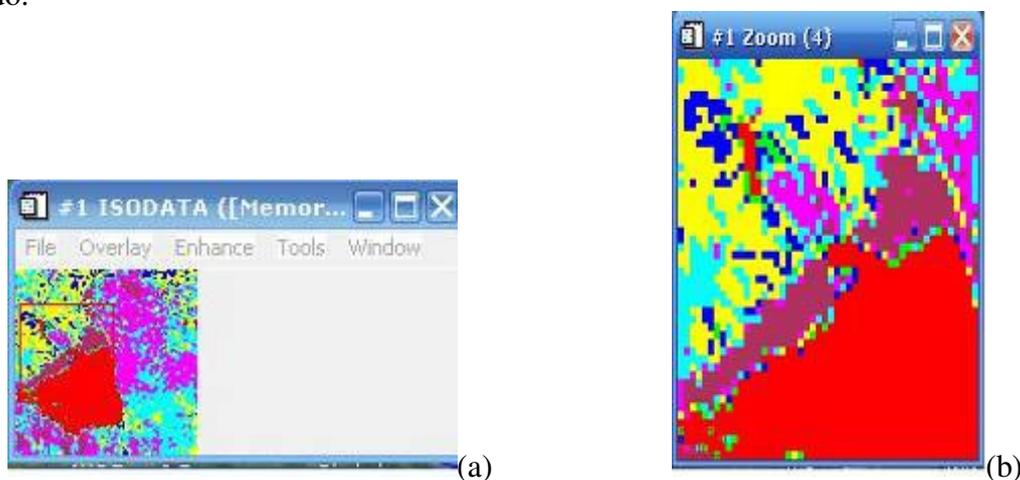


Figura 39: Imagen clasificada. (a) Imagen completa del Septiembre de 2006. (b) Detalle la zona marcada en (a).

La clasificación supervisada es el procedimiento empleado comúnmente en el análisis cuantitativo de los datos de teledetección.

Los filtros juegan un papel importante para la obtención de información, así como, mejorar sus contrastes y hacer descifrados visuales con mayor facilidad, lo que permite obtener informaciones del objeto con mayor precisión y seguridad.

En el proceso de captación, los sensores tienden a degradar la calidad de las imágenes digitales introduciendo ruidos, deformación geométrica y/o efectos de emborronamiento, empañamiento y oscurecimiento debido a diferentes causas.

El filtrado digital puede verse también como el proceso que permite descomponer la información de partida en sus partes constituyentes. Por ejemplo, filtrar direccionalmente una imagen para obtener una nueva donde se resalta la información relativa a esa dirección. En este caso no se está eliminando ningún ruido, sino buscando información contenida en la imagen.

Vectorización de grupos clasificados

Una vez clasificada la imagen, se realiza la vectorización de la clase que me interesa resaltar, como se muestra en la siguiente imagen de la Laguna, en las que se delimitan las áreas de playas de sal. Todo el proceso explicado anteriormente se realizará para una serie de imágenes satelitales significativas, en las que se pueden apreciar claramente los depósitos de sal en el Norte con mayor y menor extensión. (Figura 40)



Figura 40: Vectorización de la zona de playa previamente clasificada.

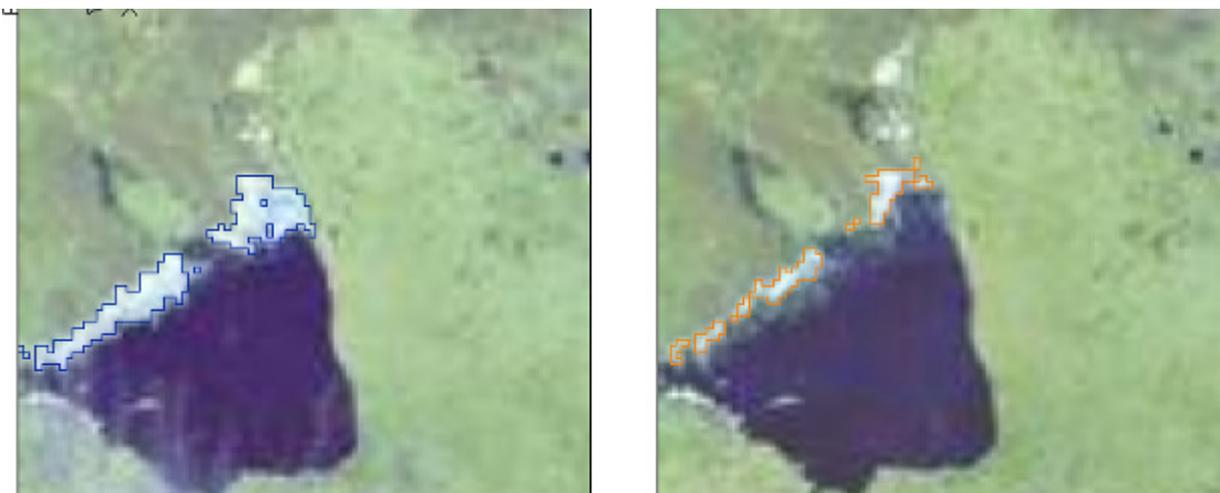


Figura 41: Vectorización de la zona de playa previamente clasificada. Izq. Imagen 05 Septiembre de 2006 y Der. Imagen 21 Septiembre de 2006.

Digitalización y exportación de las áreas identificadas

Este procesamiento se realizó con el programa Autocad, extrayendo previamente los contornos identificados con ENVI, da varias opciones para salvar y exportar las imágenes generadas, para imprimir o exportar a otros paquetes de software.

Georreferenciación de imágenes

Para la georreferenciación de la imagen lo haremos a partir de los datos que se muestra para cada una de las imágenes satelitales obtenidos de el catálogo de CONAE, dentro del entorno de Autocad, insertamos la imagen raster, importamos la imagen y en la ventana de diálogo de imagen insertamos las coordenadas de la misma, resultando la imagen escalada a tamaño real.



Figura 42: Imagen escalada del día 05 Septiembre de 2006.

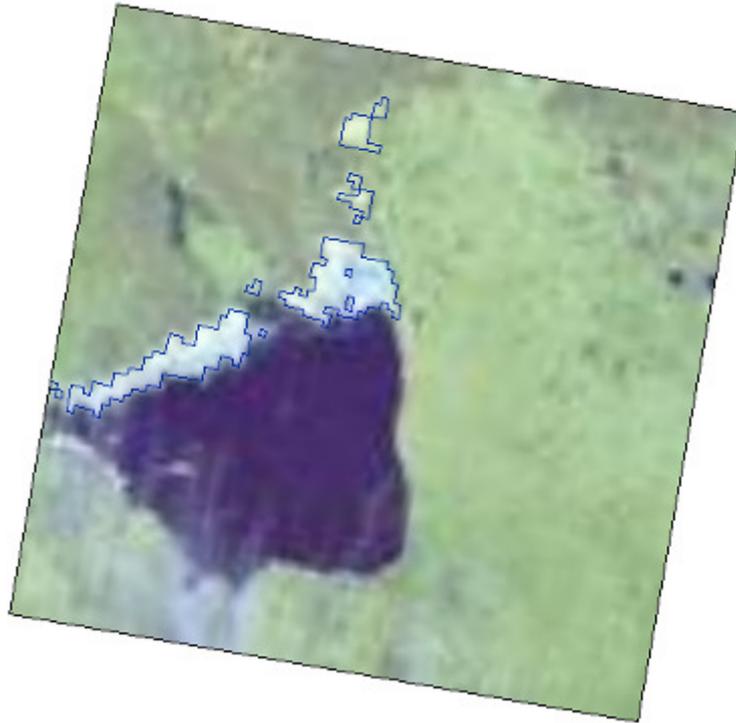


Figura 43: Imagen escalada del día 21 Septiembre de 2006.

En la Figura 44 se realiza una comparación de áreas de playas superponiendo ambas digitalizaciones sobre la imagen satelital del día 05 de Septiembre de 2006. En la figura se aprecia claramente la diferencia de áreas de una fecha a otra, resultando el área del 21 de Septiembre prácticamente del doble de extensión que la correspondiente al día 05 de Septiembre. **Esto ejemplifica el proceso de deposición de sal según el comportamiento de la Laguna y se da lugar a la formación de las playas como depósitos salinos.**



Figura 44: Superposición de las playas de sal digitalizadas sobre imagen escalada del día 5 Septiembre de 2006.

El procesamiento de imágenes satelitales realizado en anteriormente, ayudó a realizar la medición de las áreas de interés, llegando a alcanzar una extensión máxima de 17 km de longitud sobre la imagen del día 21, medición realizada con la utilización del programa AUTOCAD. (Ver Figura 45)

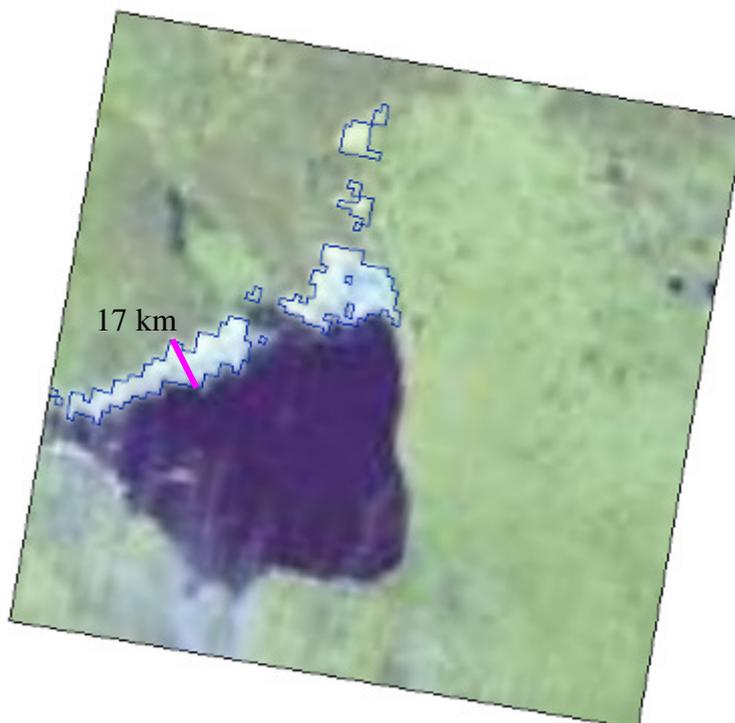


Figura 45: Medición del ancho de la playa de sal para el día 21 Septiembre de 2006.

Análisis de las imágenes del 12 de Agosto de 2009

Con la ocurrencia de un nuevo evento de tormentas de sal, se ha realizado un procesamiento de la imagen satelital correspondiente a la fecha del 12 de Agosto utilizando el programa nombrado anteriormente ENVI 4.3.

Una vez clasificada la imagen, importados y digitalizados los vectores, resaltamos de nuevo la clase que vamos a analizar, donde visualizamos un polinomio que delimita el área de interés, en este caso las playas de sal al Norte de la Laguna.

La imagen procesada y generada con ENVI 4.3 (Figura 46), se exporta al programa AUTOCAD donde se realizó una superposición con las imágenes obtenidas anteriormente correspondientes a Septiembre de 2006. El polígono delimitado en color rojo de la Figura 47, corresponde a la fecha del 12 agosto del 2009, en la que se aprecia el aumento en extensión de la superficie de la playa Norte.



Figura 46: Medición del ancho de la playa de sal para el día 12 Agosto de 2009.

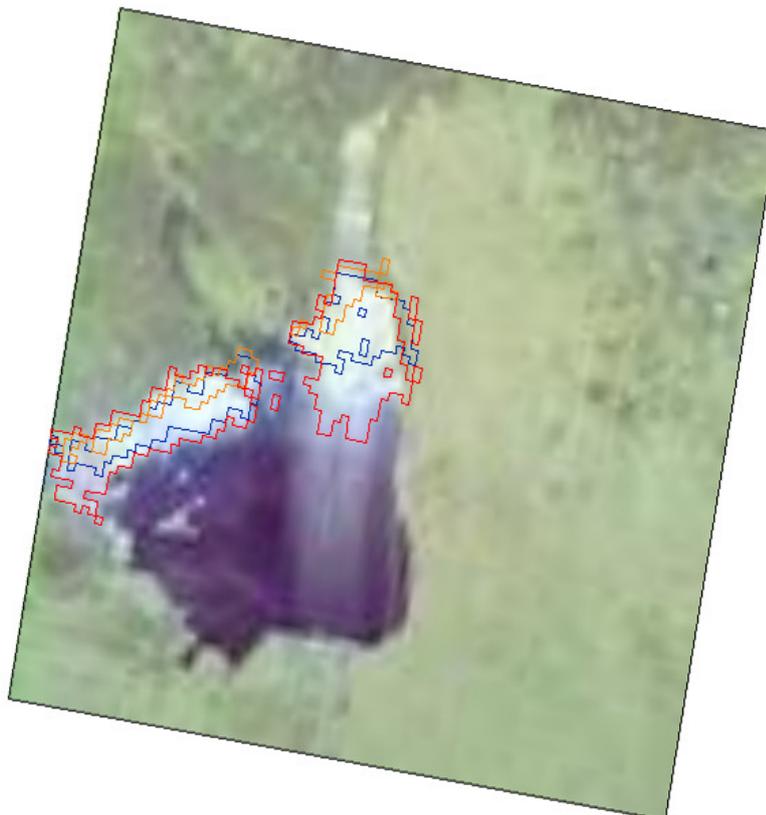


Figura 47: Medición del ancho de la playa de sal para el día 12 Agosto del 2006

En la Figura 48 , se aprecia la delimitación de las áreas correspondientes a las playas salinas que se han formado debido a la marcada bajante de la Laguna y con la utilización del programa AUTOCAD se ha realizado la medición del área delimitada,

que alcanza unos 20 Km. Es decir, que se ha ampliado unos 3 Km aproximadamente en comparación a la imagen de Septiembre 2006.

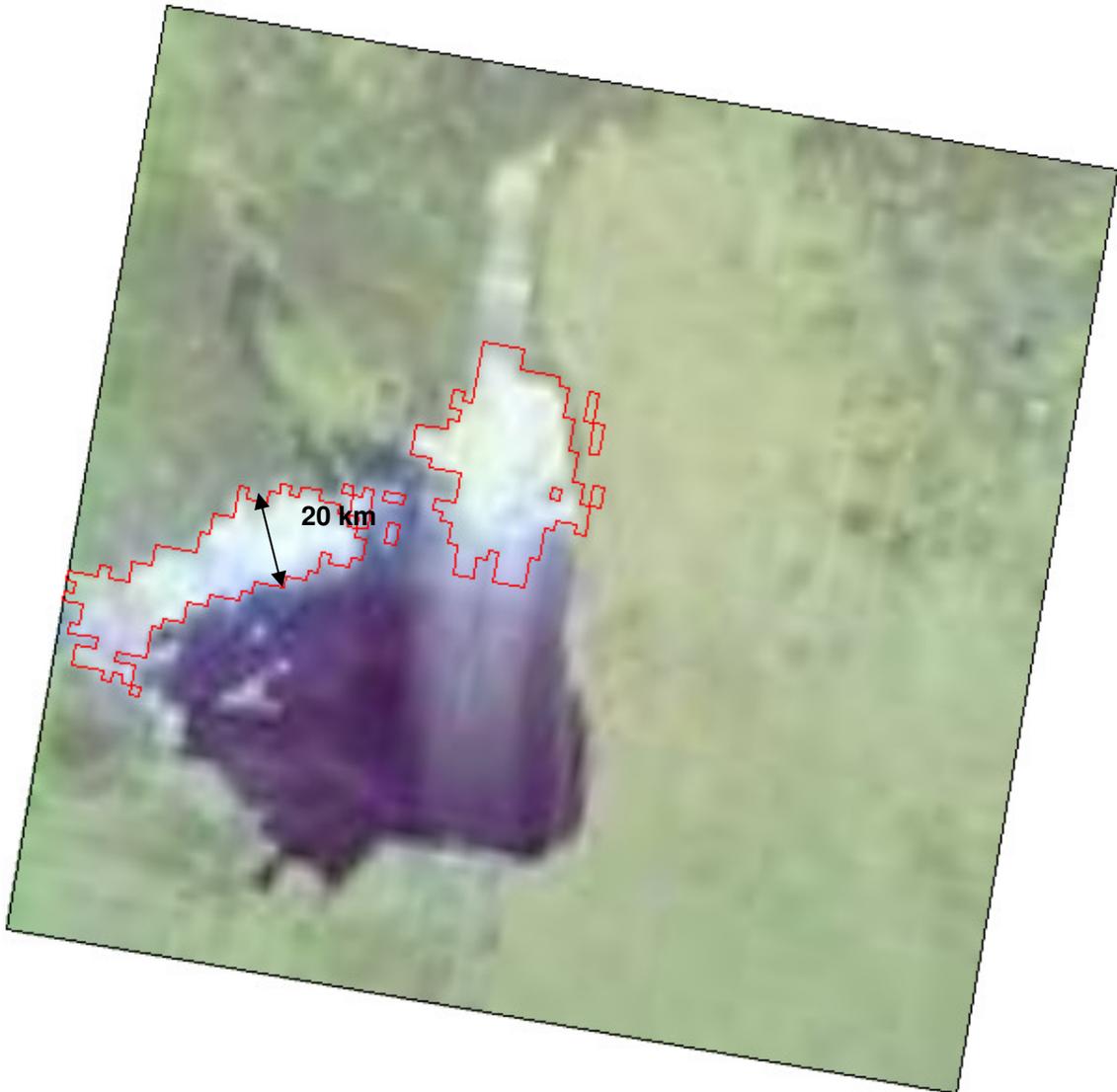


Figura 49: Imagen correspondiente al 12 Agosto 2009 en la que se muestra la medición del ancho de la playa de sal.

CAPÍTULO VI

Actualización de datos hidrometeorológicos y análisis de la tendencia.

1. Introducción

En este Capítulo se aborda el estudio de la evolución de las principales variables hidrometeorológicas dominantes en el sistema de la Laguna Mar Chiquita.

Mucho se habla del calentamiento climático observado en los últimos decenios, relacionado a las variaciones de ciertos componentes del ciclo hidrológico y de los sistemas hidrológicos: cambios en las intensidades y valores extremos de precipitación, aumento del vapor de agua atmosférico; aumento de la evaporación y variaciones de humedad del suelo y de la escorrentía. Todos los componentes del ciclo hidrológico presentan una variabilidad natural notable, en escalas de tiempo interanuales a decenales, que enmascara frecuentemente la tendencia a largo plazo. Subsisten todavía incertidumbres importantes con respecto a la tendencia de las variables hidrológicas, debido a las grandes diferencias regionales y a limitaciones en la cobertura espacial y temporal de las redes de monitoreo (Huntington ,2006).

Con el objetivo de evaluar las variaciones en las series hidrometeorológicas del sistema en estudio, se analizaron parámetros estadísticos en las variables de caudales en el río Dulce, niveles en la Laguna Mar Chiquita y precipitaciones medidas en Miramar y en La Rinconada, estaciones ubicadas el Sur y al Norte, respectivamente, del cuerpo lagunar.

En este sentido, se evaluaron las series, con respecto al conjunto de datos disponibles y a periodo particulares comunes entre las series.

2. Revisión de antecedentes en la estimación de tendencias

Los principales antecedentes presentados a nivel nacional e internacional donde se aborda la determinación de tendencias de variables, principalmente, meteorológicas se presentan a continuación.

- Gonzalez, J. M., Návar Cháidez, J.J., Gonzalez Ontiveros, V. (2008). Análisis de tendencias de precipitación (1920-2004) en México. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM, ISSN 0188-4611, Núm. 65, 2008, pp. 38-55

En este trabajo, los autores analizan la tendencia estacional de la precipitación registrada en México, sobre un total de 789 estaciones climatológicas distribuidas sobre la mayor parte del territorio Mexicano. El periodo de análisis comprende desde 1920 a 2004. Mediante análisis de componentes principales se generaron regiones con

regímenes homogéneos de precipitación estacional. Los resultados revelan la existencia de cambios significativos en las tendencias de precipitación, especialmente durante el verano. Geográficamente, la lluvia incrementa en las regiones áridas y semiáridas en un 1.8% en promedio, de la precipitación total anual (PPTA) y sólo 0.9% en las regiones húmedas; mientras que la disminución promedia 1.2% de la PPTA, tanto en regiones secas como húmedas, dándose a escalas regionales. El mayor número de estaciones climatológicas con tendencias anuales estadísticamente significativas de incremento de lluvia se ubican en las regiones áridas y semiáridas del país. El verano registra incrementos y decrementos de aproximadamente 30 mm por década, mientras que el invierno registra solamente 8 mm por década.

- De la Casa A., Di Prinzio, C.L., Nasello, O.B. (2007). Tendencias pluviométricas de la Ciudad de Córdoba. Período 1873-2005. Anales AFA. Vol. 18. ISBN 1850 1158. Pp. 300-305.

En el citado trabajo se realizó un estudio de la evolución temporal de la precipitación anual registrada en la Ciudad de Córdoba desde 1873 hasta 2005. Los datos analizados muestran un cambio significativo en la tendencia a partir de la mitad del siglo pasado. Se observa que el promedio anual de lluvias ha aumentado más de 100 mm en los últimos 50 años. Se analizan los cambios en la tendencia de la serie a partir de diversos métodos que permitieron establecer los años cuando se producen los puntos de quiebre más notables. Los resultados obtenidos se comparan con las tendencias de temperatura globales observándose que la precipitación anual de la ciudad de Córdoba esta altamente correlacionada con tendencia mundial de esta variable. En general, las actuales temperaturas medias del planeta son las más altas registradas en los últimos tiempos (por ejemplo, agosto 2005 pasado fue el mas caliente de los 127 años previos. Con respecto a los datos de lluvia de la Ciudad de Córdoba, la tendencia observada y su relación con la temperatura media del Hemisferio Sur, nos indicarían que la tendencia positiva en los registros de temperatura en el hemisferio sur podría haber comenzado alrededor 1950.

- Mossman, V., Castro, A., Sánchez, J. L. (). Análisis de la tendencia de las precipitaciones en los meses de febrero, marzo y abril en el territorio peninsular de España.

En este trabajo se realizó un análisis regional de la precipitación en España que mostró cambios, estadísticamente significativos, en los meses de febrero, marzo y abril. Se analizaron 333 series pluviométricas de datos mensuales. Para el primer periodo analizado, que comprende desde 1961 hasta 1998, los resultados mostraron una tendencia estadísticamente significativa que reveló una disminución en la proporción de la precipitación en amplias zonas del país durante los meses analizados.

- Guenniil Lelys, Degryze Edgard, Alvarad Katiuska. (2008). Análisis de la tendencia y la estacionalidad de la precipitación mensual en Venezuela. Revista Colombiana de Estadística. Junio, Vol. 31, Nro. 1, pp. 41 a 65.

En este artículo se analizaron los datos de 113 estaciones de precipitación mensual disponibles para años recientes en Venezuela. Se hizo un análisis de homogeneidad para determinar si existen estaciones con cambios importantes en la media de la serie que no forman parte de la variabilidad climática interanual. Se ajustaron modelos lineales con componente de tendencia, estacionalidad y errores autorregresivos utilizando el método de mínimos cuadrados generalizados. Los valores de tendencia estimados y la significancia del componente de tendencia fueron representados espacialmente. Se

encontró que la zona norte costera y la mayor parte de la región andina presentan una tendencia negativa en la precipitación. Por el contrario, la zona sureste del estado Bolívar presentó una tendencia positiva. Sin embargo, el componente de tendencia no fue significativo para la mayoría de las estaciones. Además, el patrón estacional está mejor representado por un modelo con dos armónicos, dadas las características estacionales de las estaciones analizadas.

- Pérez, María Emilia (2004). La Variabilidad de las Precipitaciones en el Nordeste Argentino durante el período 1951/1990. Comunicaciones Científicas y tecnológicas de la Universidad Nacional del Nordeste. Instituto de Geografía - Facultad de Humanidades. Resumen: H-007.

Se analizaron 11 estaciones recopilando datos de observación meteorológica existentes en las Estadísticas Climatológicas, del Servicio Meteorológico Nacional, cubriendo las décadas: 1951/60, 1961/70, 1971/80 y 1981/90 y en la serie World Weather Records, editada por el Department of Commerce, la NOAA y el NCDC, Washington, U.S.A., período 1951 a 1990). El análisis de los registros anuales y decenales de las precipitaciones permitió afirmar que no se observan diferencias o variaciones sustanciales en los montos mensuales y anuales de precipitación con respecto de períodos anteriores al considerado, por lo que estas observaciones presentaron un carácter “temporario” de los elementos del clima, y que los aumentos registrados respondieron a variaciones cíclicas que en las próximas décadas podrían mostrar nuevos reajustes y cambios de signos entre distintas áreas del país. Es decir, no se trata de tendencias permanentes (lo mismo ocurre con los desplazamientos que sufren las isohietas en el espacio) sino de ciclos naturales con fases temporalmente positivas y otras negativas, avances y retrocesos, cuyo origen pareciera estar asociado a factores dinámicos, ligados a la circulación atmosférica.

- Sacchi, O.; Dalla M.; Costanzo, M.; Coronelm A. (2002). Caracterización de las precipitaciones en la localidad de Zavalla. Cátedra Climatología Agrícola. Facultad de Ciencias Agrarias. UNR. Nro. 2.

En este trabajo se realizó un análisis estadístico de las precipitaciones registradas en la estación Agrometeorológica de Zavalla. Se analizaron las precipitaciones totales anuales, en ciclos de enero a diciembre y de julio a junio. Luego se analizaron, también, las precipitaciones mensuales y agrupadas por estación. Se encontraron diferencias entre las características estadísticas analizadas: tendencias, clasificación de Prohaska, según se considere el ciclo calendario o el agronómico. Se concluye que para fines agrícolas es conveniente planificar actividades en función del resultado del análisis del ciclo agronómico, y utilizar los valores de mediana en lugar de promedio, especialmente en verano.

3. Conceptos teóricos: Regresión con datos funcionales

(Fuente: El análisis estadístico de grandes masas de datos: Algunas tendencias recientes. Por Antonio Cuevas del Departamento de Matemáticas de la Universidad Autónoma de Madrid)

El modelo básico es, por analogía con el modelo tradicional de regresión lineal simple:

$$Y = T \cdot x + e \quad (10)$$

Donde: Y es la respuesta, y x es la variable de regresión que, en este caso, es una función $x: [a; b]$, e es el error aleatorio y T es un operador lineal que actúa sobre el input x .

La respuesta Y puede ser escalar o funcional y el input x puede ser fijado de antemano por el experimentador (modelo de diseño fijo) o corresponder a una observación aleatoria (modelo de diseño aleatorio).

Si nos situamos en el caso más general en el que $Y = Y(t)$ es también una función, podemos suponer (bajo condiciones bastante generales) que el operador T tiene la forma típica de una transformación lineal entre espacios de funciones, es decir, que viene definido por una expresión del tipo:

$$(Tx)(t) = \int_a^b x(s)\beta(s,t)ds \quad (11)$$

Donde: $\beta(s; t)$ es una función núcleo que, en cierto modo, hace aquí el mismo papel que el coeficiente de regresión β_1 en el clásico modelo de regresión lineal simple.

El estudio de estos operadores es un problema matemático de gran tradición y enorme importancia, tanto teórica como aplicada.

Por ejemplo, en transmisión de señales, la función $Y(t)$ podría ser la señal de salida obtenida como respuesta a la señal de entrada $x(t)$ en un sistema de comunicaciones que distorsiona o codifica la entrada según un operador T (conocido) y un ruido aleatorio (y desconocido) $e(t)$. El problema (llamado *signal recovery*) sería entonces recuperar la señal original.

Sin embargo, el planteamiento del problema bajo el punto de vista estadístico de la regresión funcional es claramente distinto: aquí el objetivo sería estimar el operador T (lo que equivale a estimar el núcleo $\beta(s; t)$) a partir de la observación de una muestra que vendrá dada por n pares de observaciones "input-output" $(x_i; Y_i)$, $i = 1, \dots, n$.

Una vez que se haya obtenido un estimador T_0 , puede utilizarse para dar una predicción $Y_0 = T_0 * x_0$ de la respuesta correspondiente a un input x_0 no incluido en la muestra.

4. Variables analizadas

La metodología utilizada se basa en un estudio estadístico con análisis de regresión sobre sub-periodos calculando el signo y la magnitud de la pendiente asociada a una función de tendencia lineal en cada serie de las variables de interés.

Para la realización de este estudio se ha llevado a cabo una recopilación de los datos de las series históricas disponibles de variables hidrometeorológicas como precipitaciones, caudales y niveles y la actualización de las mismas.

La serie de niveles corresponde a valores medidos en la costa Sur de la Laguna Mar Chiquita durante el periodo 1967-2009.

Los caudales analizados son los valores erogados por el dique Río Hondo y disponibles en forma diaria durante el periodo 1968-2006.

Los datos de precipitación pertenecen a las estaciones de La Rinconada y Miramar, emplazadas al Norte y Sur de la Laguna Mar Chiquita, respectivamente.

En Miramar los datos disponibles de precipitación datan del año 1964 hasta 2009. Estos datos se basan en valores medidos en pluviómetros actualizados con datos de la estación meteorológica instalada por la UNC y la ex DIPAS, en el año 2001 y datos cedidos por Pablo Michelutti, Guardaparque de la Reserva de la Laguna Mar Chiquita, destacamento ubicado en la playa sur de Miramar.

En La Rinconada se disponen de datos diarios durante el periodo 1991-2008. En el año 2005 se instaló otra estación meteorológica similar a la de Miramar, también con capacidad de registro y almacenamiento de datos cada 15 minutos.

Serie de niveles en la Laguna Mar Chiquita. Periodo: 1967-2009

Partiendo del análisis de datos presentados en Hillman (1999 y 2003), se actualizaron esta serie disponible hasta Abril de 2009, con datos diarios. La serie mensual resultante se presenta en la Tabla 17.

Tabla 17: Serie definitiva de niveles medios mensuales en Mar Chiquita (Fuente: Hillman, 2003 y actualización propia)

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1967											64,01	64,07
1968	63,73	63,41	63,23	63,24	63,22	63,42	63,45	63,45	63,95	63,62	63,34	62,95
1969	62,80	62,78	62,74	62,75	62,65	62,71	62,53	62,54	62,57	62,60	62,62	62,65
1970	62,68	62,71	62,73	62,76	62,79	62,82	62,84	62,87	62,90	62,80	62,90	62,90
1971	62,90	62,80	62,80	62,80	62,80	62,83	62,83	62,80	62,84	62,77	62,70	62,63
1972	62,56	62,46	62,44	62,44	62,42	62,42	62,41	62,40	62,38	62,47	62,43	62,46
1973	62,53	62,60	63,20	63,45	63,85	64,10	64,25	64,40	64,50	64,60	64,70	64,80
1974	64,90	65,00	65,10	65,20	65,30	65,40	65,50	65,60	65,70	65,80	65,90	66,00
1975	66,10	66,20	66,30	66,40	66,50	66,60	66,25	66,40	66,45	66,43	66,40	66,22
1976	66,14	66,14	66,12	66,06	66,06	66,05	66,07	66,94	66,88	66,83	66,77	66,72
1977	66,66	66,61	66,55	66,50	66,44	66,68	66,88	66,95	67,02	67,20	67,38	67,56
1978	67,74	67,92	68,10	68,28	68,46	68,64	68,82	69,00	69,18	69,19	69,24	69,27
1979	69,19	69,26	69,33	69,33	69,39	69,39	69,54	69,57	69,55	69,51	69,56	69,57
1980	69,77	69,62	69,66	69,72	69,74	69,77	69,75	69,83	69,74	69,66	69,61	69,68
1981	69,74	69,90	70,12	70,24	70,45	70,63	70,69	70,73	70,65	70,57	70,57	70,51
1982	70,52	70,57	70,56	70,60	70,58	70,51	70,52	70,50	70,45	70,47	70,34	70,44
1983	70,35	70,42	70,52	70,69	70,78	70,80	70,78	70,72	70,80	70,71	70,73	70,55
1984	70,54	70,54	70,72	70,80	70,94	70,98	71,03	71,07	71,12	71,15	71,14	71,04
1985	71,12	70,99	71,05	70,97	71,07	71,11	71,17	71,20	71,19	71,20	71,36	71,23
1986	71,19	71,13	71,11	71,12	71,12	71,02	71,10	71,25	71,21	71,19	71,12	71,13
1987	71,13	71,09	71,05	71,23	71,26	71,34	71,30	71,28	71,18	71,15	71,06	70,95

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1988	71,03	70,93	70,92	70,94	70,80	70,80	70,73	70,77	70,71	70,64	70,43	70,27
1989	70,11	70,04	70,04	70,02	70,03	70,07	69,99	69,94	69,88	69,71	69,59	69,52
1990	69,39	69,55	69,62	69,68	69,72	69,72	69,71	69,65	69,49	69,35	69,38	69,37
1991	69,39	69,31	69,30	69,28	69,26	69,42	69,45	69,50	69,50	69,41	69,39	69,50
1992	69,72	69,69	69,66	69,89	69,92	70,00	70,00	70,03	70,08	70,10	70,07	70,24
1993	70,60	70,66	70,66	70,83	70,87	70,84	70,75	70,71	70,65	70,69	70,68	70,69
1994	70,70	70,72	70,73	70,80	70,83	70,83	70,78	70,73	70,74	70,60	70,49	70,42
1995	70,32	70,52	70,32	70,08	70,08	69,99	69,94	69,81	69,36	68,96	69,19	69,08
1996	69,05	69,04	69,09	69,14	69,14	69,18		69,18	69,06	68,88	68,83	68,78
1997	68,80	68,66	68,70	68,66	68,56	68,52	68,60	68,54	68,48	68,40		
1998							69,35					
1999							69,55					
2000							70,02					
2001		70,39	70,54	70,65	71,24	71,14	71,12	71,10	71,13	71,20	71,21	71,23
2002	71,08	70,97	71,03	71,13	71,24	71,23	71,27	71,27	71,25	71,18	71,15	71,22
2003	71,33	71,34	71,43	71,53	71,76	71,76	71,72	71,72	71,64	71,58	71,50	71,46
2004	71,42	71,32	71,21	71,19	71,16	71,11	71,12	71,07	70,93	70,89	70,77	70,73
2005	70,68	70,66	70,65	70,69	70,68	70,61	70,60	70,57			70,39	70,29
2006	69,99	70,51	70,24	70,50	69,88	69,65	69,88	69,38			69,27	
2007			69,40	70,02	70,28	70,32	70,04	69,91	69,72	69,69	69,59	69,44
2008	69,2	69,34	69,5	69,3	69,41	69,28	69,02	69,24	69,16	69,125	69,11	69,01
2009	68,8	68,49	68,55	69,1								

Datos complementarios se disponen del limnómetro que se instaló en proximidad a la costa Sur de la Laguna Mar Chiquita frente a Miramar. El período de datos registrado por este instrumental comprendió desde el 8 de octubre de 2004 hasta agosto de 2005.

Desde septiembre de 2005 hasta la actualidad, se actualizó la serie de niveles con datos tomados por el Guardaparque de la Reserva, el Sr. Pablo Michelutti, a partir de mediciones directas sobre escalas.

En resumen, los datos disponibles se presentan en la Figura 50 cubriendo el periodo 1967-2009. Cabe aclarar que, durante el periodo noviembre de 1997 hasta enero de 2001, se presenta un intervalo con datos mensuales sólo en el mes de julio, cedidos por el Dr. Enrique Bucher del Centro de Biología Aplicada de la UNC.

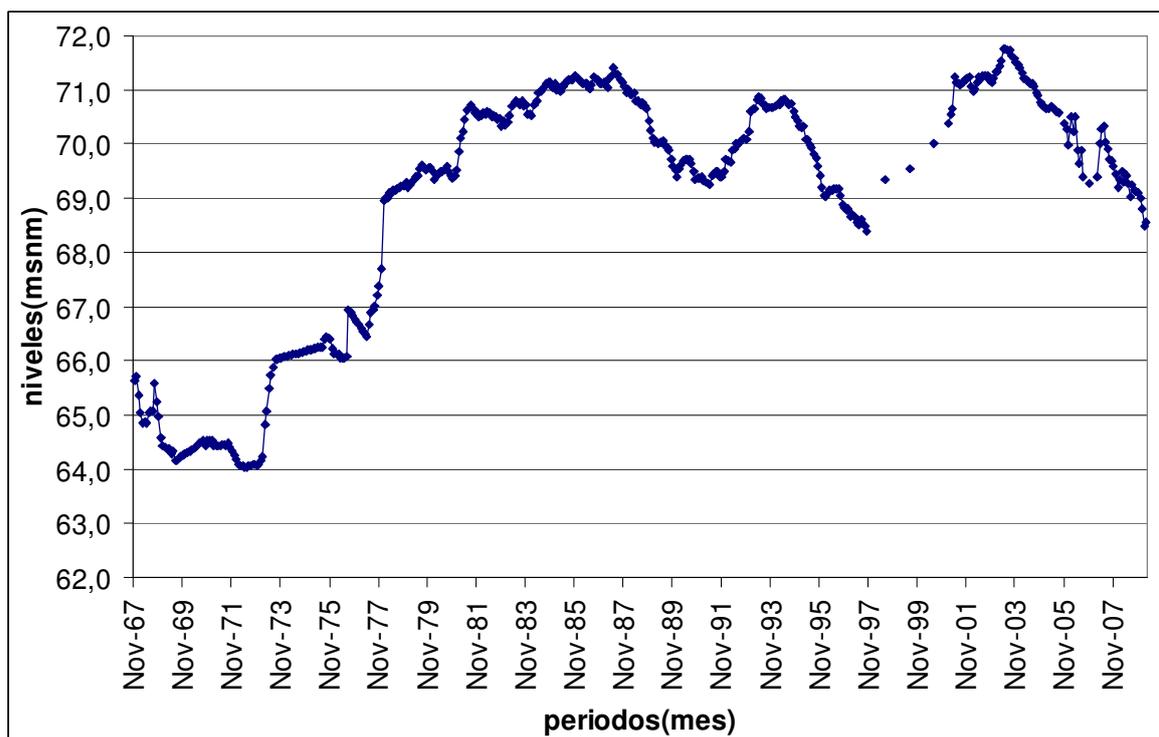


Figura 50: Niveles medios diarios (m s.n.m.) medidos en la costa Sur de la Laguna Mar Chiquita. Periodo: 1967-2009.

Caudales en el río Dulce medidos en el embalse de “Río Hondo”

(Fuente: Laboratorio de Hidráulica – UNC, 2007. Informe final para la Subsecretaría de Recursos Hídricos)

La serie de caudales analizada comprende valores mensuales de caudales erogados en Río Hondo, durante el periodo 1968-2006 y se presentan en la Tabla 18 y Figura 51.

Existen diversas fuentes de datos observados y procesados de los caudales erogados en Río Hondo de los que se puede suponer que los datos disponibles en la UNC (y presentados en Hillman, 1999 y UNC, 1998) anteriores a 1959 se han obtenido de correlaciones entre las estaciones del El Sauce y La Escuela, ya que corresponde a un periodo previo a la construcción de la presa.

Se dispone de datos diarios de caudales erogados en el Dique Río Hondo suministrados por la Unidad Ejecutora del Servicio de Riego del Río Dulce otorgado a la Universidad de Santiago del Estero (UNSE) cubriendo el periodo 1968-2006.

A partir de estos valores se calcularon los caudales medios mensuales, resultante de la suma de los caudales egresados por turbinado, vertedero, válvula y descargador de fondo.

Cabe mencionar que se solicitó a la citada Unidad Ejecutora del Servicio de Riego de Santiago del Estero, a través de una nota de pedido, los datos de caudales erogados por Río Hondo desde el año 2007 hasta lo que va del 2009. Sin embargo no se ha obtenido respuesta en este tema.

Tabla 18: Caudales medios mensuales erogados por Río Hondo (m3/s). Periodo: 1968-2006

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Módulo
1968	42.32	245.52	71.84	58.44	60.41	69.23	57.55	71.26	61.00	62.39	95.30	169.68	88.74
1969	41.94	60.75	167.88	93.78	82.29	74.97	72.64	81.29	92.53	72.26	71.67	53.23	80.43
1970	20.81	15.00	49.35	136.43	85.59	68.43	75.29	90.10	74.33	57.39	53.97	60.00	65.56
1971	23.06	14.02	138.59	158.98	122.89	61.89	76.30	84.84	71.17	57.32	52.50	62.29	76.99
1972	63.55	8.45	31.42	40.07	45.81	6.63	49.13	61.16	35.63	22.00	22.97	5.19	32.67
1973	5.90	3.00	170.09	159.23	144.60	73.04	42.67	65.40	86.23	79.71	60.80	51.13	78.48
1974	152.15	265.43	456.60	228.72	109.30	68.59	52.05	73.35	62.37	56.38	65.31	77.67	138.99
1975	68.09	51.38	226.88	273.12	69.43	70.44	77.25	96.48	97.94	96.75	131.08	217.10	122.99
1976	182.91	282.38	369.87	159.57	99.01	93.25	76.23	58.83	93.44	102.17	98.07	61.14	139.74
1977	134.11	301.50	472.50	396.53	198.82	106.46	76.57	87.09	115.37	124.77	131.23	188.38	194.44
1978	531.96	436.98	237.19	343.10	109.27	129.25	82.31	96.86	131.59	99.01	66.63	58.96	193.59
1979	239.66	561.96	439.21	429.27	157.14	82.33	127.73	126.46	128.82	101.85	101.42	160.98	221.40
1980	192.22	93.31	249.10	170.39	139.05	103.81	104.49	124.56	130.13	95.49	83.71	81.28	130.63
1981	221.14	1054.83	356.14	357.83	354.36	84.50	72.28	74.69	87.12	105.19	95.44	80.08	245.30
1982	93.00	91.49	323.12	202.86	69.49	104.74	111.56	109.03	99.71	96.79	95.55	160.75	129.84
1983	306.64	617.26	354.06	62.05	121.08	104.92	70.66	117.01	138.90	132.33	98.23	88.39	184.29
1984	290.29	250.13	761.05	516.01	213.98	100.88	88.64	104.11	109.30	161.18	107.96	82.08	232.14
1985	219.63	448.23	441.19	157.25	124.15	117.90	118.41	118.10	118.52	117.81	283.42	294.00	213.22
1986	469.14	120.62	231.90	112.01	115.14	91.09	119.97	115.50	117.70	124.02	100.37	182.06	158.29
1987	438.05	326.36	68.96	63.36	39.61	48.51	61.40	62.04	59.93	76.39	39.85	51.58	111.33
1988	208.35	464.70	241.49	218.82	127.58	98.31	88.02	93.30	74.80	67.82	110.41	79.68	156.11
1989	50.85	32.64	13.72	12.19	29.34	7.68	51.03	13.52	35.70	55.08	14.87	15.83	27.70
1990	27.67	9.77	112.61	241.11	81.03	78.94	78.25	67.08	72.55	78.59	82.06	80.47	84.18
1991	360.30	186.38	215.74	225.94	86.50	78.04	77.74	99.73	119.86	90.87	102.65	94.47	144.85
1992	245.70	431.85	133.58	253.94	195.16	54.80	67.00	85.92	109.89	132.84	93.73	301.43	175.49
1993	525.99	446.82	143.60	79.01	86.02	84.25	85.90	94.62	94.53	74.51	74.75	138.79	160.73
1994	74.16	169.31	124.04	53.95	52.47	46.16	80.39	56.05	88.13	77.52	70.59	76.86	80.80
1995	114.04	104.04	244.99	92.47	78.98	78.63	74.72	71.92	84.04	79.34	75.13	59.93	96.52
1996	29.20	42.88	35.47	35.82	20.19	30.49	64.39	71.63	72.48	65.95	71.29	71.57	50.95
1997	346.98	497.48	302.28	78.87	51.93	73.89	72.64	68.17	86.12	79.41	86.69	78.29	151.89

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Módulo
1998	175.69	374.56	201.65	216.34	217.52	53.71	85.14	101.41	98.08	111.89	132.57	137.10	158.80
1999	92.56	161.57	550.77	342.50	150.43	82.17	122.57	115.49	115.70	118.09	114.43	93.63	171.66
2000	216.67	645.81	894.37	334.91	219.93	75.52	75.75	76.43	78.08	77.66	143.48	328.94	263.96
2001	284.63	387.70	506.95	500.51	186.19	194.01	94.98	77.48	97.86	89.17	132.25	243.12	232.90
2002	174.78	205.99	299.07	210.53	100.04	93.15	78.73	98.92	86.77	92.16	78.85	314.30	152.77
2003	365.51	100.77	77.44	83.59	65.39	44.75	77.50	82.87	98.41	112.69	29.33	13.65	95.99
2004	32.06	45.55	52.88	69.15	95.27	82.40	82.36	81.90	103.05	105.17	85.18	75.41	75.87
2005	86.63	80.16	58.11	68.27	80.98	76.79	72.45	99.02	89.44	85.91	86.76	81.69	80.52
2006	298.86												

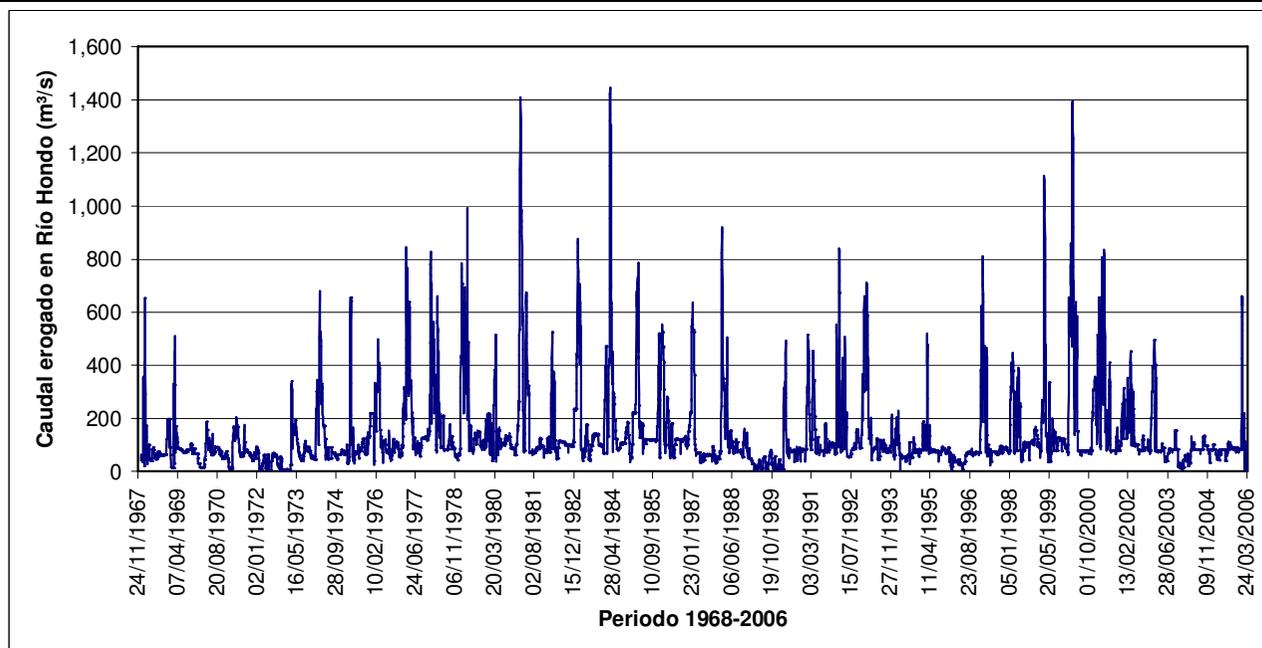


Figura 51: Caudal medio mensual erogado en Río Hondo. Periodo: 1968-2006

5. Test de tendencia aplicado a las series analizadas

Análisis de tendencia en la serie de caudales del Río Dulce medidos a la salida del embalse Río Hondo

El análisis estadístico de la serie de caudales se realizó sobre valores mensuales cubriendo el periodo 1968-2006. La serie analizada se presenta en la Figura 52, donde se agregó la línea de tendencia del periodo analizado que presenta una pendiente positiva.

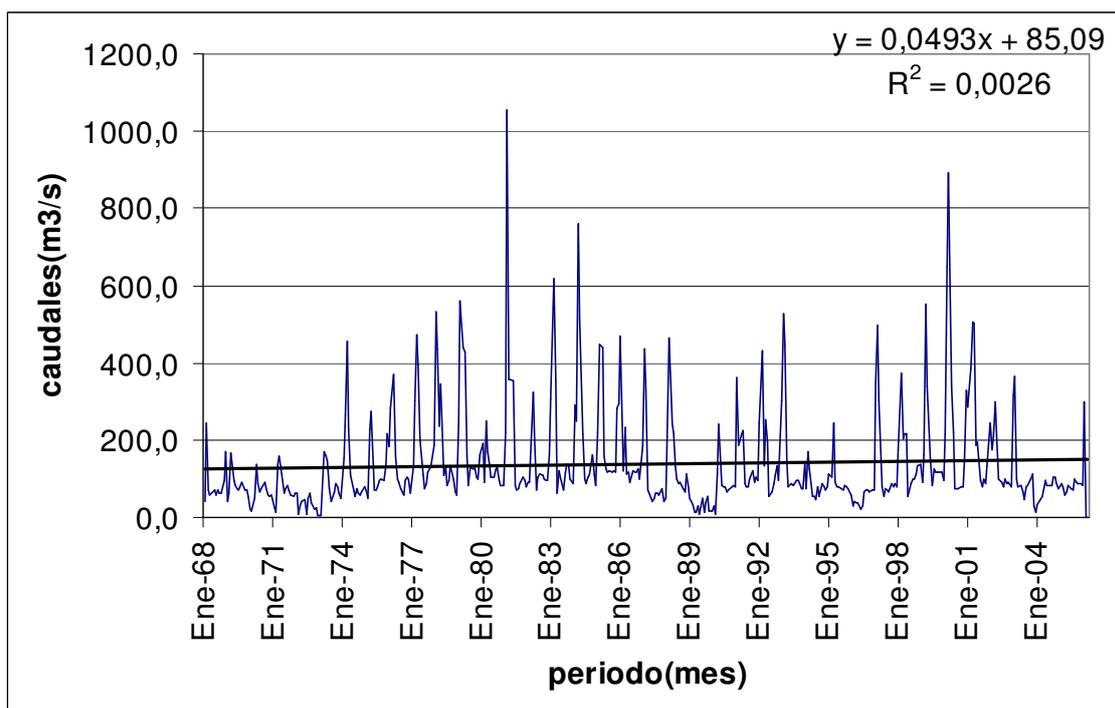


Figura 52: Caudales mensuales Río Hondo y tendencia general.

En el gráfico anterior se observa que no existe un aumento generalizado significativo reforzado por la determinación de una función lineal con pendiente muy poco pronunciada.

Los datos disponibles, permiten inferir ciclos característicos en base a la evaluación de periodos menores.

Estos periodos se identificaron a partir de una división de la serie total, los cuales se presentan en la Figura 53.

Esta división destacó dos ciclos característicos dominantes que comprenden cada uno 16 años. El primero de estos ciclos (Ciclo 1) comprendió desde el año 1973 hasta 1988, y el segundo (Ciclo 2) desde el año 1989 hasta 2004.

Estos ciclos, a su vez se dividen nuevamente en dos ciclos más pequeños que comprende cada uno 8 años:

- Ciclo 1a: 1973-1980, (8 años)
- Ciclo 1b: 1981-1988, (8 años)
- Ciclo 2a: 1989-1996, y (8 años)
- Ciclo 2b: 1997-2004. (8 años)

Estas características indicaron que la serie de caudales que se analizó presenta un comportamiento cíclico periódico, es decir que estas oscilaciones corresponden a intervalos cíclicos.

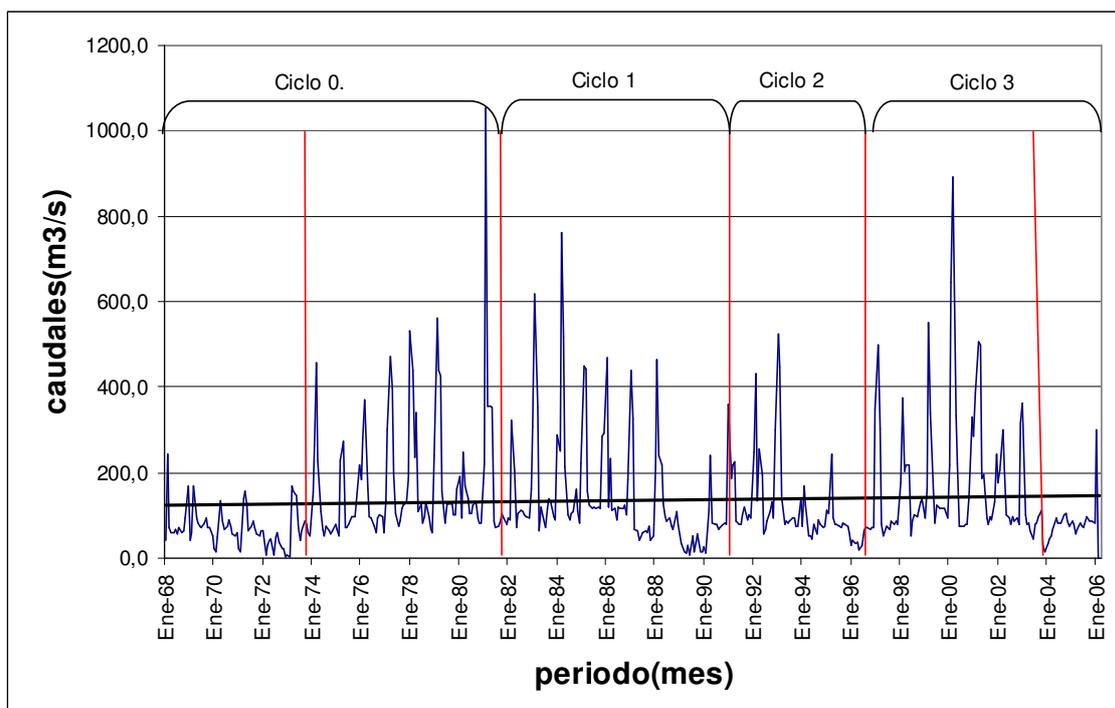


Figura 53: Identificación de ciclos en la serie de caudales. Periodo: 1968-2006.

Previamente al comienzo del Ciclo 0, se presenta un conjunto de años que comprende desde 1968-1973 (Figura 54) donde se observa una disminución de los caudales máximos anuales, resultando para este ciclo una tendencia con signo negativo en la función lineal. De esta forma, este periodo se puede asociar al final de un ciclo previo con datos inconclusos.

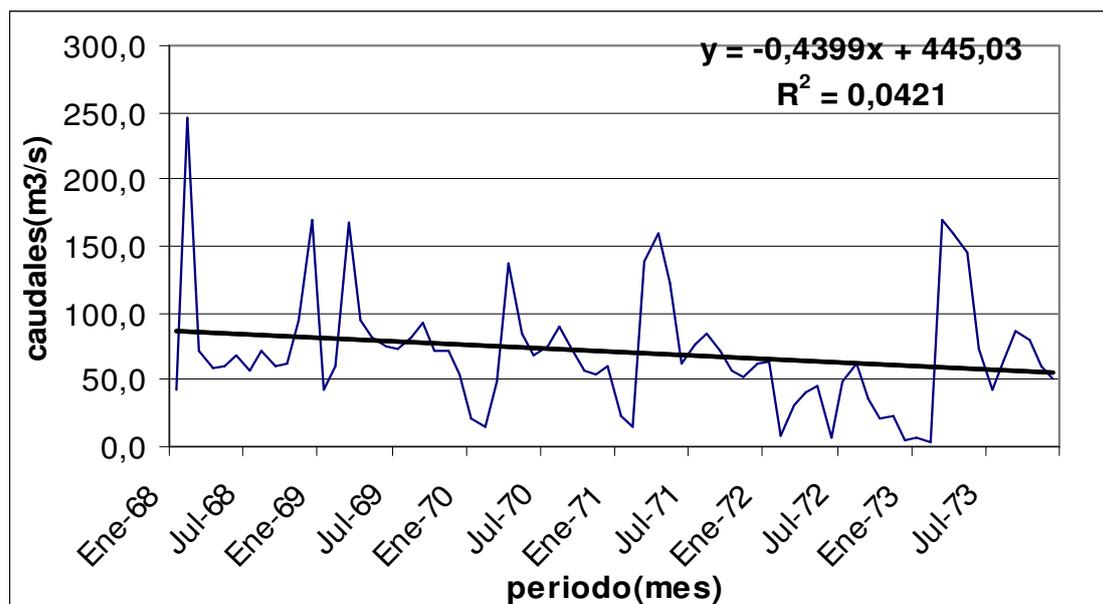


Figura 54: Caudales mensuales en Río Hondo. Período analizado: 1968-1973.

Ahora bien, analizando los ciclos identificados previamente, se observa que la segunda parte del Ciclo 0, comienza con un periodo asociado a una función de tendencia positiva. En presencia del Ciclo 0.b (comprendiendo los años 1974 a 1981), presentada en la Figura 55, una línea recta que resulta con pendiente positiva.

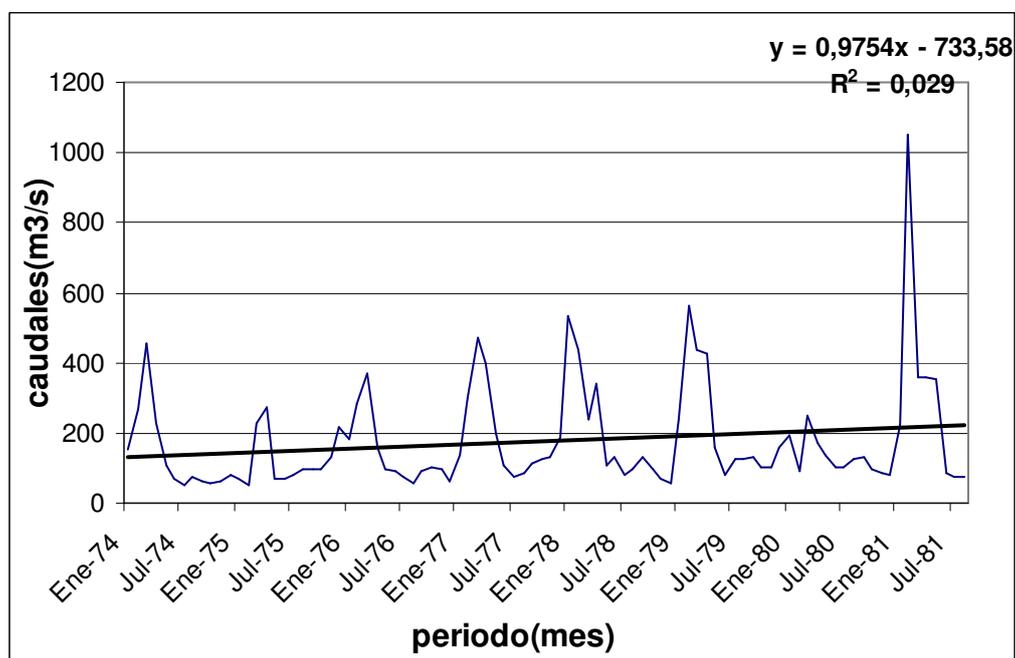


Figura 55: Caudal mensual en Río Hondo. Período analizado: 1974-1981.

Analizando los datos numéricos asociados a los hidrogramas anuales, se destacan valores máximos de caudal (picos de cada hidrograma anual) presente entre los meses de Enero a Marzo, y valores mínimos (valles del hidrograma anual) entre los meses de Septiembre a Diciembre.

Con relación a este Ciclo 0b, se observa hasta el año 1978 que los caudales máximos de cada ciclo anual se presentan mayores que los ciclos precedentes generando una tendencia positiva como se muestra en la Figura 56.

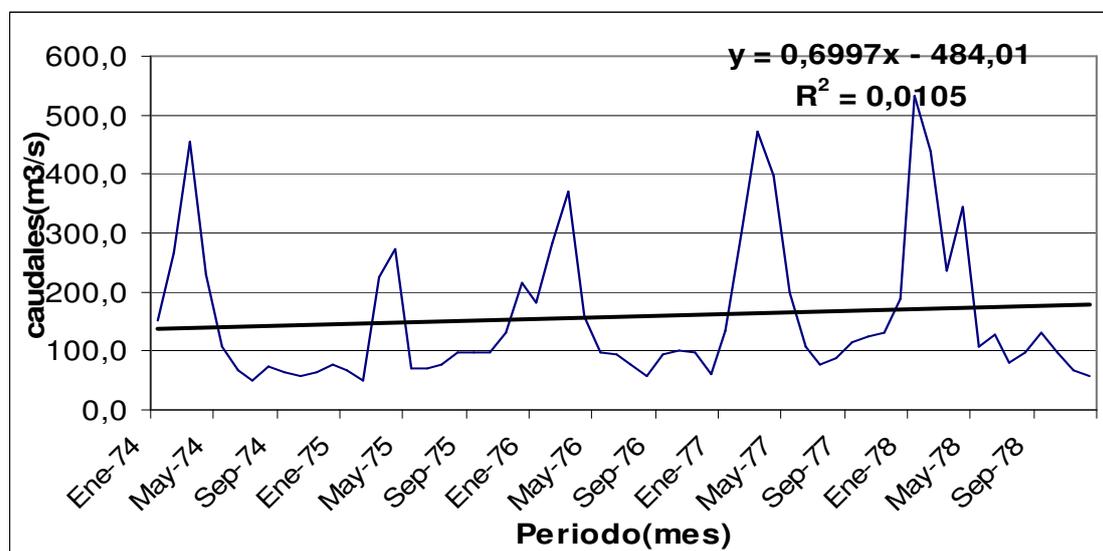


Figura 56: Caudal mensual en Río Hondo. Periodo analizado: 1973-1978.

Hacia finales del periodo analizado (año 1981) se observó la ausencia del caudal máximo en el respectivo hidrograma anual (Figura 57).

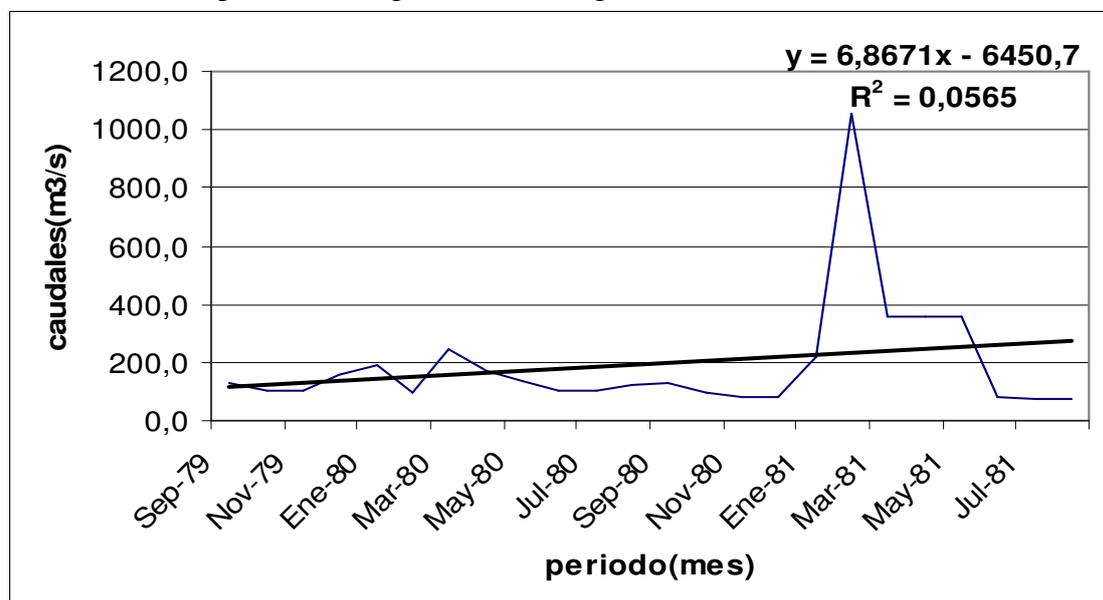


Figura 57: Caudal mensual en Río Hondo. Periodo analizado: 1979-1980.

En el siguiente periodo 1981-1991 se presenta el Ciclo 1, (Ver Figura 58)

Este ciclo se inicia (en el año 1981) con un incremento considerable del valor del caudal entre los meses de Febrero y Marzo. En este caso se registró un caudal en el orden de

los 1000 m³/s, incrementándose así en un 250 % el promedio de los caudales máximos registrados en los ciclos anteriores.

Al finalizar el ciclo, en el año 1991, se presentan el comienzo del pico característico anual, (Figura 58).

Luego del caudal máximo observado para los ciclos anuales siguientes asumen valores medios entre 300 y 600 m³/s.

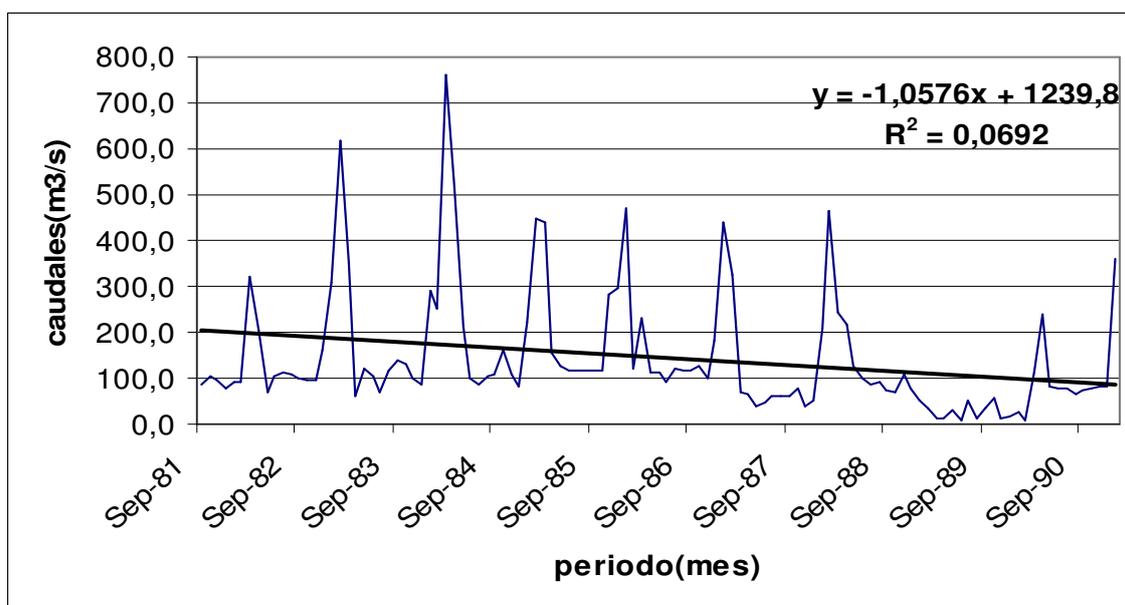


Figura 58: Caudal mensual en Río Hondo. Periodo analizado: 1981-1991.

Durante el año 1991, se inicia el segundo ciclo general que comprende en su primer periodo hasta el año 1997, el cual se presenta en la Figura 59.

Durante este periodo, se registró un comportamiento de caudales máximos entre los meses de Enero a Marzo coincidiendo con lo que se destacó en la primer mitad del Ciclo 0 (Ciclo 0.a). La principal diferencia entre los dos ciclos es que en el último se presenta una tendencia negativa.

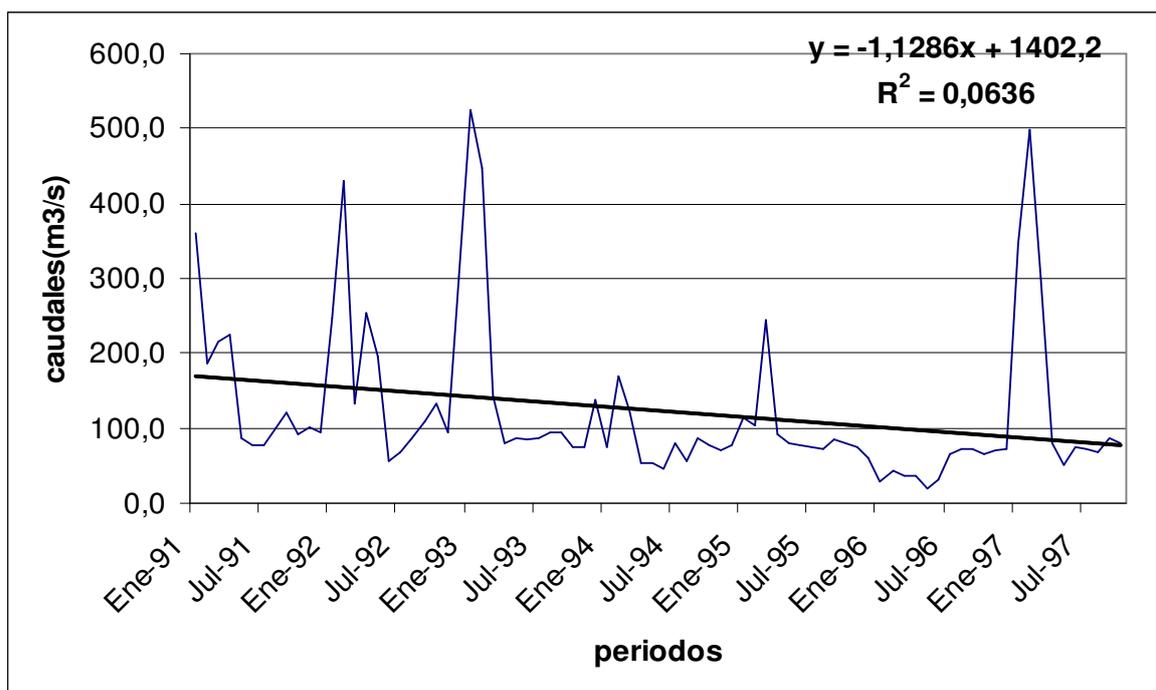


Figura 59: Caudal mensual en Río Hondo. Periodo analizado: 1991-1997.

Dentro de este ciclo, durante el denominado Ciclo 2, se observó que entre los años 1991 y 1993, se produce un aumento de los caudales mínimos, seguido por un periodo de sequía hacia finales del ciclo durante el año 1997, definido por la ausencia característica de los caudales máximos, repitiendo el periodo de sequía que se encontró en los dos ciclos anteriores.

El Ciclo 3, comprende los años 1997 hasta 2006, presenta una tendencia, también una función lineal negativa, según se observa en la Figura 60.

Durante este ciclo se observó un pico de caudal extraordinario, del orden de los 900 m³/s. De esta forma, se presentó un incremento de los ciclos anuales medios de 225 % pero con una disminución del 10 % con respecto a caudal extraordinario registrado en el Ciclo 1b. Cabe destacar que este pico se presentó con un retardo temporal de cuatro años con respecto al ocurrido en el respectivo ciclo anterior (Ciclo 2), en el cual este valor se presentó al inicio del ciclo.

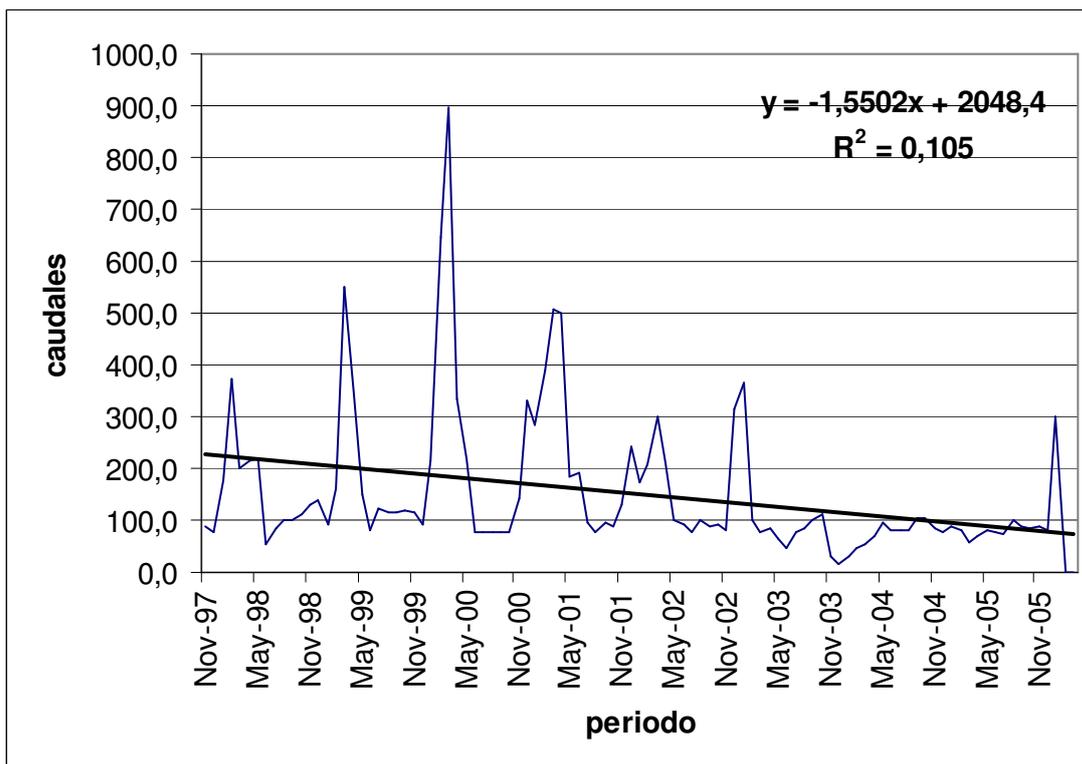


Figura 60: Caudal mensual en Río Hondo. Periodo analizado: 1997-2006

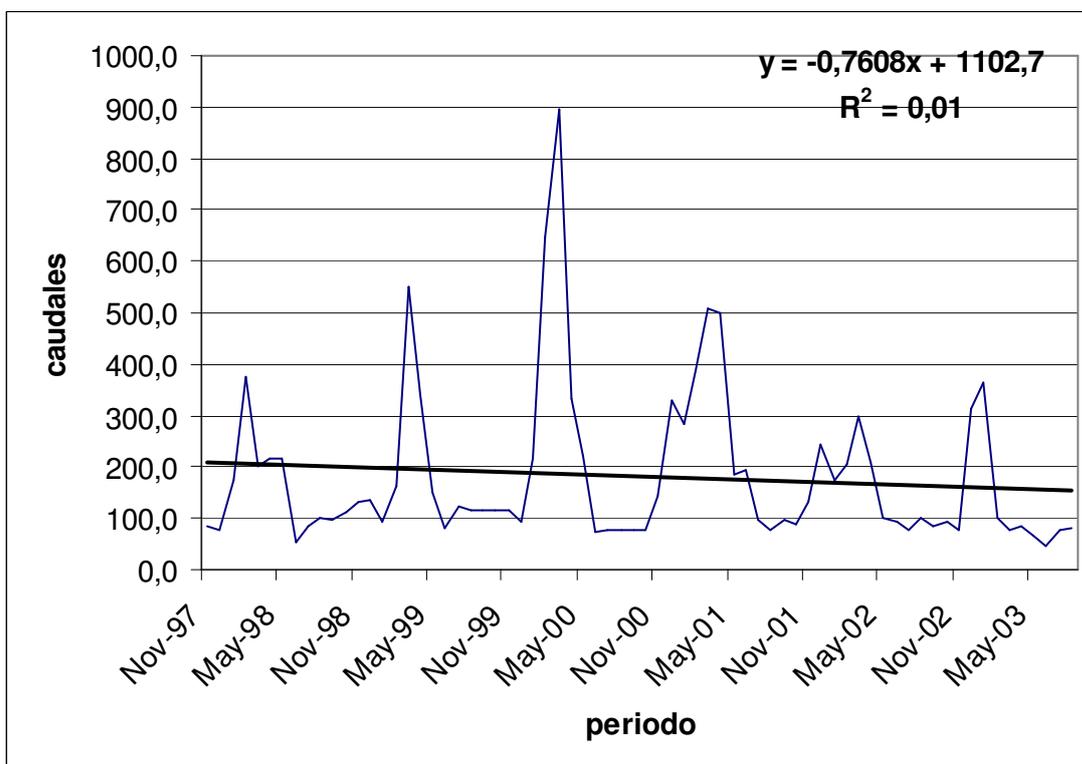


Figura 61: Caudal mensual en Río Hondo. Periodo analizado: 1997-2003.

Al igual que en el ciclo anterior los tres primeros años presentan valores mínimos crecientes, los cuales se mantienen hasta 2001. Luego, se presenta un periodo donde los

caudales máximos disminuyen, se manifiesta una ausencia del caudal máximo anual hacia el año 2003, finalizando el ciclo con un periodo de sequía como en los casos anteriores.

Los datos disponibles entre los años 2003 y 2006 (Figura 62), podría corresponderse al inicio de un nuevo ciclo, al cual se denomina Ciclo 3 con una duración posible de 16 años como en los casos anteriores, y la ocurrencia de dos picos extraordinarios cercanos a los 950 m³/s.

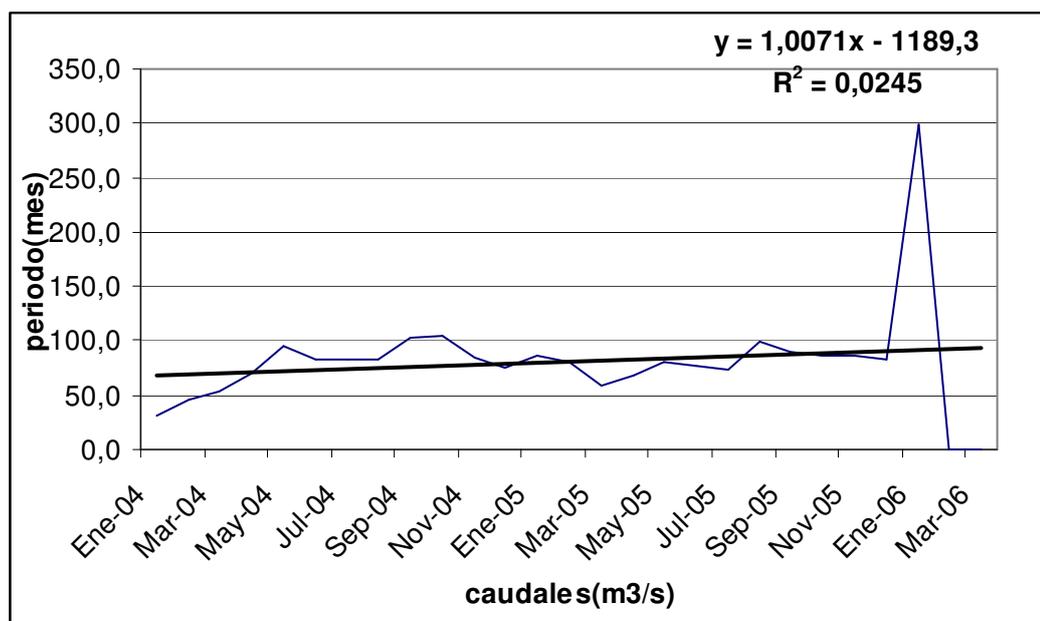


Figura 62: Caudal mensual en Río Hondo. Periodo analizado: 2003-2006.

Discusión de los resultados

Los resultados obtenidos para el análisis de tendencias con las observaciones mensuales de caudales del Río Hondo, se presentan en la Tabla 19. En la misma se detallan las pendientes de las series analizadas por periodo, aplicando el modelo de regresión lineal en función del tiempo y el correspondiente coeficiente de regresión. Se presenta, también, el signo de la pendiente del periodo analizado, indicando la tendencia del conjunto de datos si es positiva o negativa según se presente un incremento o disminución de la pendiente de la serie de caudales a lo largo del periodo.

El análisis de los datos precedentes, resumidos en la Tabla 19, indica que la serie de caudales presenta un primer periodo con tendencia positiva, donde los caudales van en aumento y un segundo periodo opuesto. Es decir con tendencia negativa y donde los caudales van disminuyendo. La finalización de cada periodo coincide en un periodo con función de tendencia lineal negativa.

Tabla 19: Resumen de las tendencias analizadas para la serie de caudales de Río Hondo.

Ciclo	Periodo	Estadísticos		Signo (tendencia de las series)
		Pendiente (B)	Coef. Regresión (R ²)	
Ciclo 0	Ene68- Dic73	-0,4399	0,0421	Negativa
Ciclo 1	Ener74- Agos81	0,9754	0,029	Positiva
Ciclo 1a	Ener74- Dic78	0,6997	0,0105	Positiva
Ciclo 1b	Ene79- Agos81	6,8671	0,0565	Positiva
Ciclo 2	Sep81- Ener91	-1,0576	0,0692	Negativa
Ciclo 3	Feb91- Oct97	-0,9522	0,0465	Negativa
	Jul97- Ene06	-0,15502	0,105	Negativa

Análisis estadístico de la serie de niveles de la Laguna Mar Chiquita (1967-2009)

El análisis se realizó sobre valores mensuales de niveles medidos en la costa Sur de la Laguna Mar Chiquita, en Miramar. Se analizó el periodo 1967-2009, cuyos datos disponibles se presentan en la Figura 63 con intervalo mensual.

En la Figura 63 se presenta la serie evaluada, donde es factible observar un marcado crecimiento de la Laguna desde el año 1973 hasta 1983, cuando se registra un valor de nivel de 71,40 m s.n.m. Posteriormente, se miden sucesivos picos de crecida hasta el año 2003 donde presenta el máximo valor registrado de nivel. La cota durante este año resultó de 71,60 m s.n.m medida en el mes de Junio.

En la serie de datos originales, se completó el periodo de valores faltantes 1997-2001 con datos cedidos por el Dr. Bucher, disponibles en forma mensual sólo para el mes de Julio. Indicando además, en entrevista personal, que los datos restantes son poco confiables por lo que aconsejó trabajar con los valores mencionados solamente. Esto se manifiesta en la siguiente figura con puntos aislados.

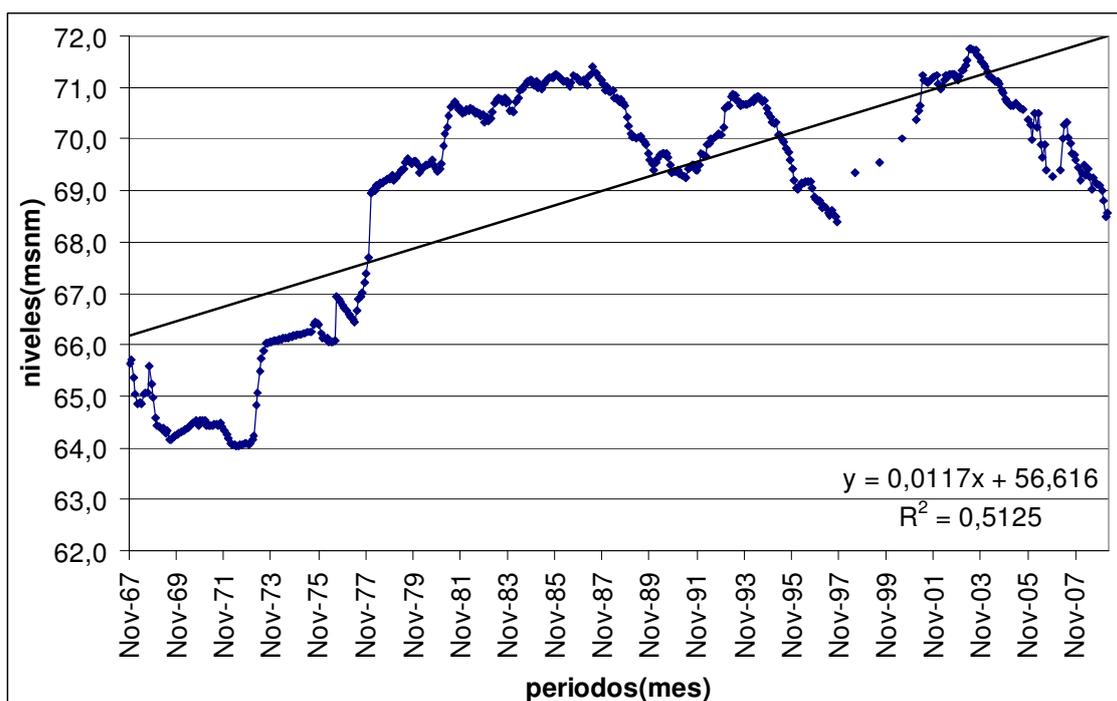


Figura 63: Series mensual de Niveles en la Laguna Mar Chiquita y tendencia general. Periodo analizado: 1967-2009.

En un análisis general de la serie, es factible observar una tendencia marcada positiva de la función lineal entre los valores disponibles.

Dividiendo la serie en periodos menores, se observan diferentes ciclos característicos que se analizan a continuación.

En el gráfico anterior podemos observar una tendencia positiva de los niveles en los primeros 20 años de análisis (1967-1987). La Laguna durante este periodo aumentó su valor de cota unos 7,5 m aproximadamente.

Para describir el comportamiento de la Laguna en años siguientes se realiza un análisis de ciclos considerando los mismos periodos definidos para la serie de caudales erogados en Río Hondo.

Se identificaron en principio, 3 ciclos dominantes, los cuales se presentan en la Figura 64. El primero de estos ciclos (Ciclo 1) comprendió desde el año 1981 hasta 1990, el segundo (Ciclo 2) desde el año 1990 hasta 1997, y el tercer ciclo desde 1997 hasta la actualidad.

Estos ciclos, nuevamente se dividen, cada uno, en dos ciclos más pequeños que comprendieron entre 4 y 6 años:

- Ciclo 1a: 1981-1985,
- Ciclo 1b: 1986-1990,
- Ciclo 2a: 1991-1994,
- Ciclo 2b: 1994-1997,
- Ciclo 3a: 1997-2003, y
- Ciclo 3b: 2004-2009.

La identificación de los ciclos indica que la serie de niveles, también, presenta un comportamiento cíclico periódico, es decir que estas oscilaciones corresponden a intervalos de tiempo semejantes o parecidos entre estos.

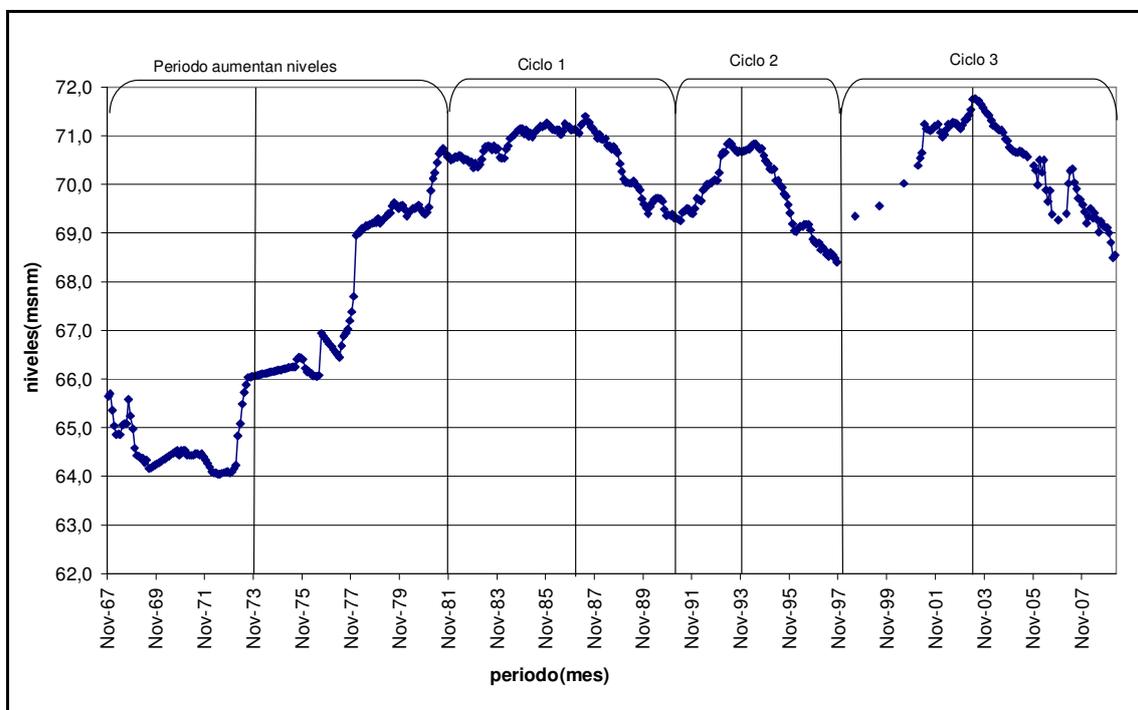


Figura 64: Identificación de ciclos en la serie de niveles mensuales de la Laguna Mar Chiquita. Periodo: 1967-2009.

Cabe mencionar que durante el periodo 1967-1973, presentado en la Figura 65, la pendiente de la función lineal de tendencia se mantiene prácticamente nula, la serie permanece constante, para compatibilizar con el análisis de caudales se presentan los ciclos identificados a partir del mencionado año.

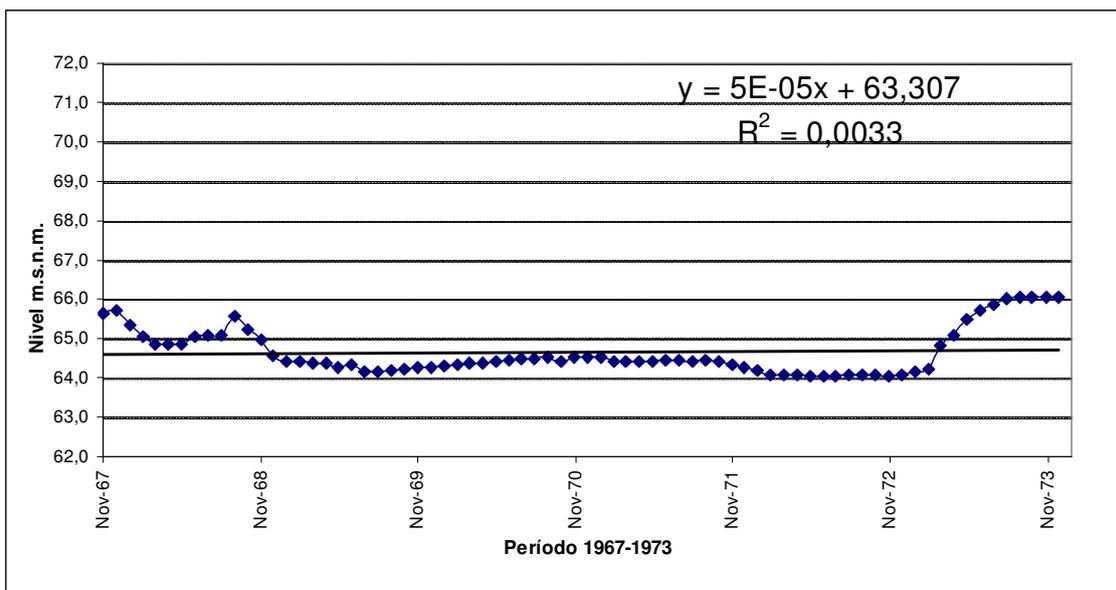


Figura 65: Serie de Niveles mensuales y línea de tendencia. Periodo: 1967-1973.

Durante el Ciclo 0, que comprende desde el año 1973 hasta el año 1981, se observó un aumento considerable en los valores de niveles, respondiendo este evento a los valores de caudales registrados en Río Hondo para el mismo periodo (Figura 66).

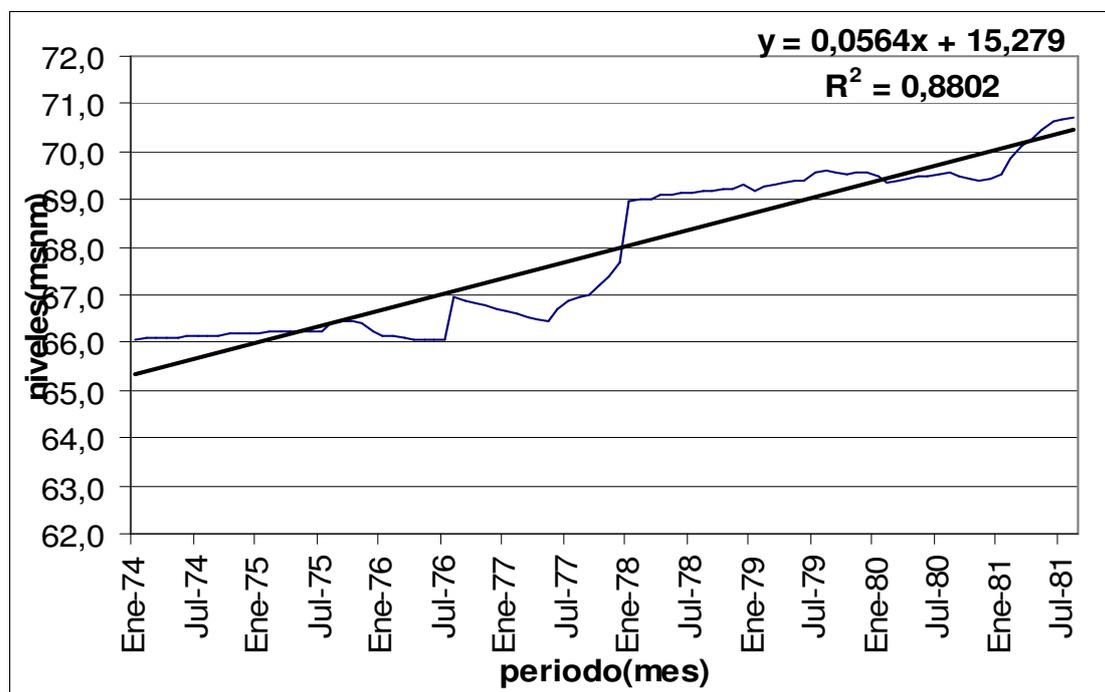


Figura 66: Serie de niveles mensuales y línea de tendencia. Periodo: 1973-1981.

Durante el periodo 1981-1987 (Figura 67), se inicia el Ciclo 1, con una función lineal positiva en el Ciclo 1a, correspondiendo a un ascenso de los niveles en la Laguna. Hacia 1991 comienza el Ciclo 1b, correspondiente a la segunda parte del Ciclo 1 asociado a un descenso en los niveles de la Laguna, indicando una fase de sequía desde el año 1989.

Durante este ciclo disminuye, de manera considerable, el nivel registrado en 2,10 m. (Figura 68)

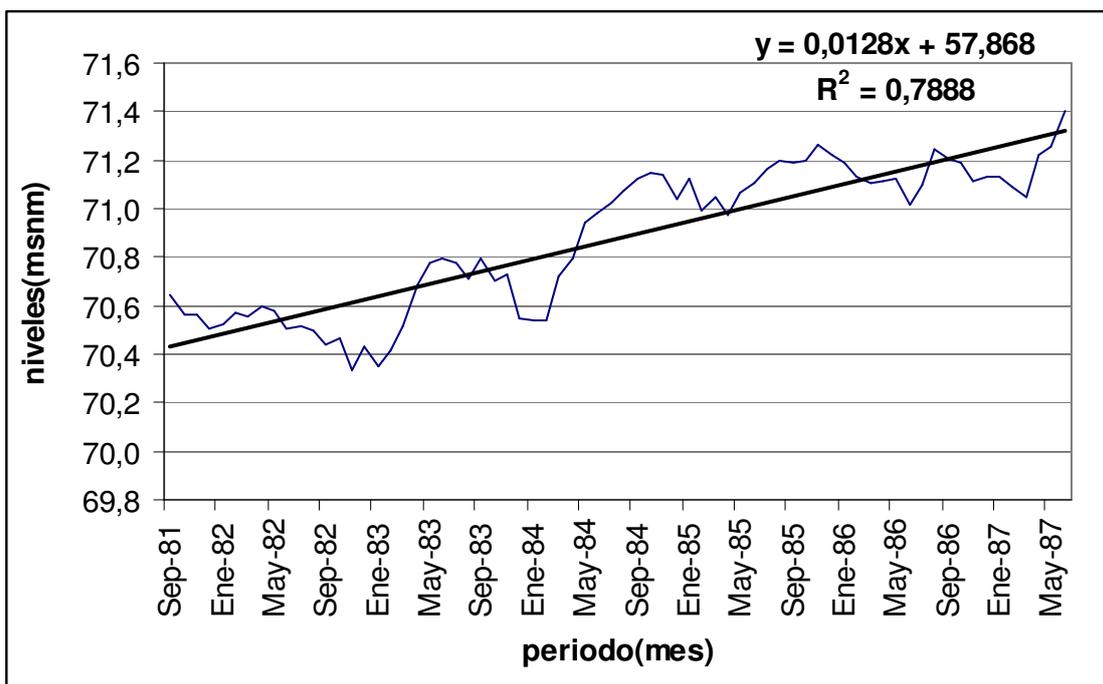


Figura 67: Serie de Niveles mensuales y línea de tendencia. Periodo: 1981-1989.

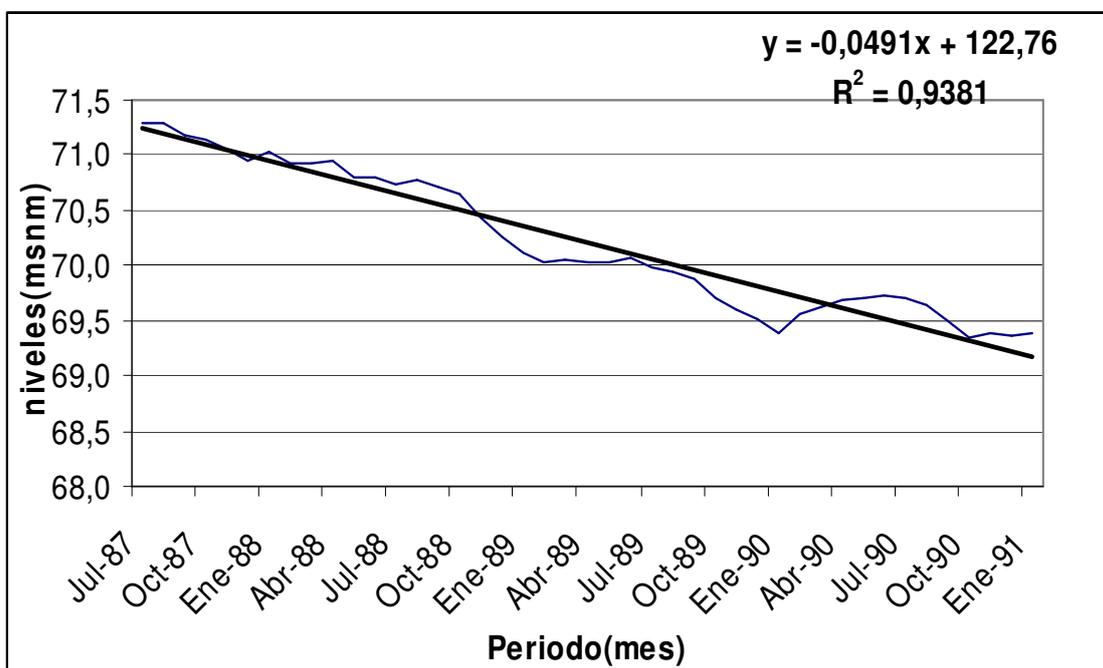


Figura 68: Serie de Niveles mensuales y línea de tendencia. Periodo: 1989-1991.

El Ciclo 2 de niveles comprende desde el año 1991 a 2003. Durante los años 1991-1997, Ciclo 2a, se muestra un ascenso progresivo de los niveles hasta el año 1993 (Figura 69) coincidiendo con los valores de máximo caudales erogados por Río Hondo

y con un posterior decrecimiento hacia finales del ciclo analizado coincidiendo con una nueva fase de sequía. (Figura 70)

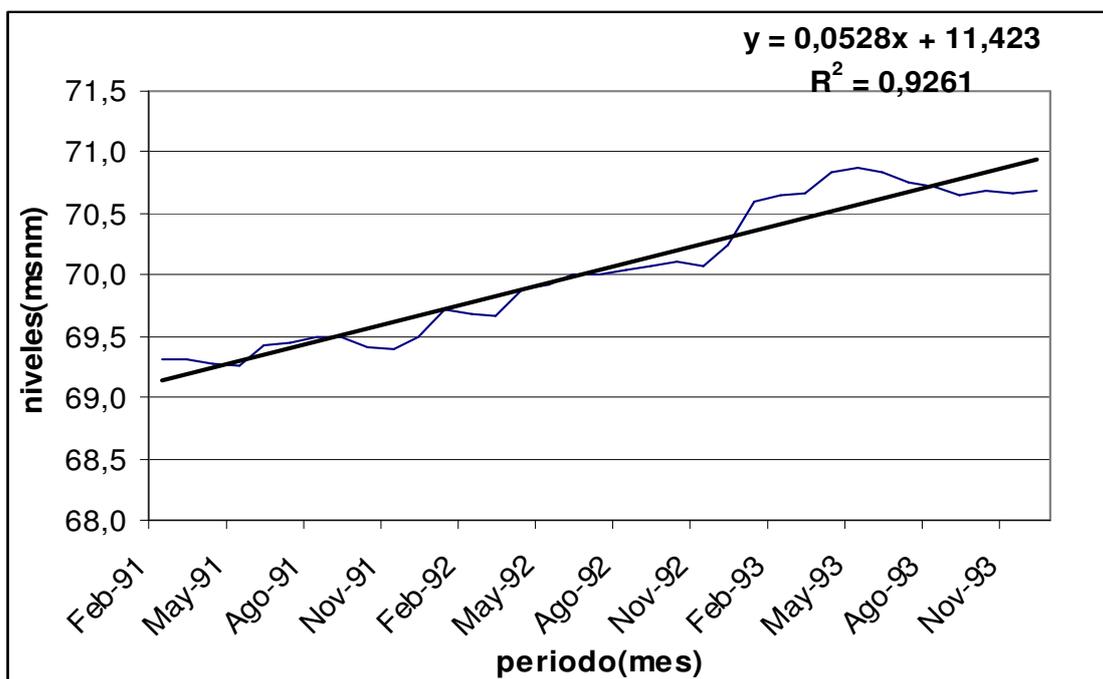


Figura 69: Serie de Niveles mensuales y línea de tendencia. Periodo: 1991-1993.

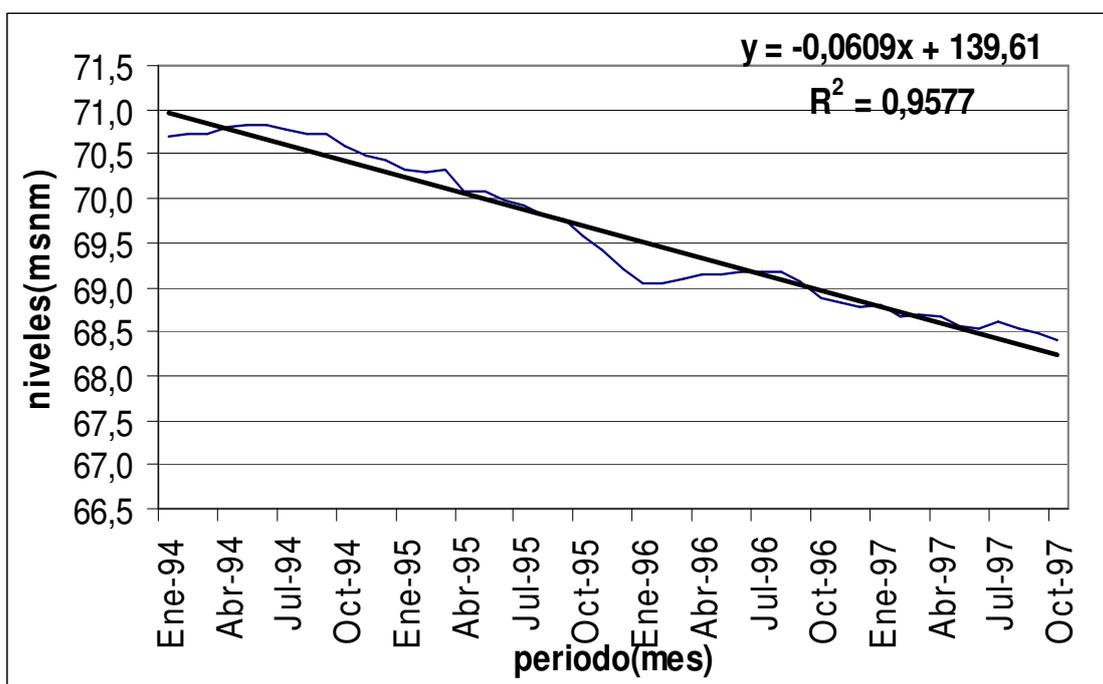


Figura 70: Serie de Niveles mensuales y línea de tendencia. Periodo: 1994-1997.

Para el análisis del siguiente ciclo, Ciclo 2b, en el primer periodo 1998-2003 (Figura 71) se procesarán datos mensuales del mes de julio solamente, como se mencionó anteriormente. Como podemos observar se produce un aumento de la tendencia hasta el año 2003, donde obtenemos valores máximos de nivel que superan los 71 m s.n.m., no

coincidiendo en este caso con los valores de caudales (según el periodo de sequía previamente identificado).

En la segunda parte del ciclo (Ciclo 2b) que comprende desde el año 2003 se produce un descenso de la Laguna el cual continúa hasta la actualidad (mediados de 2009). Ver mayor detalle en la Figura 72.

Se destaca que en el comportamiento cíclico de la Laguna, cuando se produce el retroceso del nivel, la duración observada, en el ciclo anterior, fue de 4 años. En este último ciclo este intervalo se ha incrementado, extendiendo la duración del periodo de descenso hasta los últimos datos actualizados, alcanzando ya 6 años.

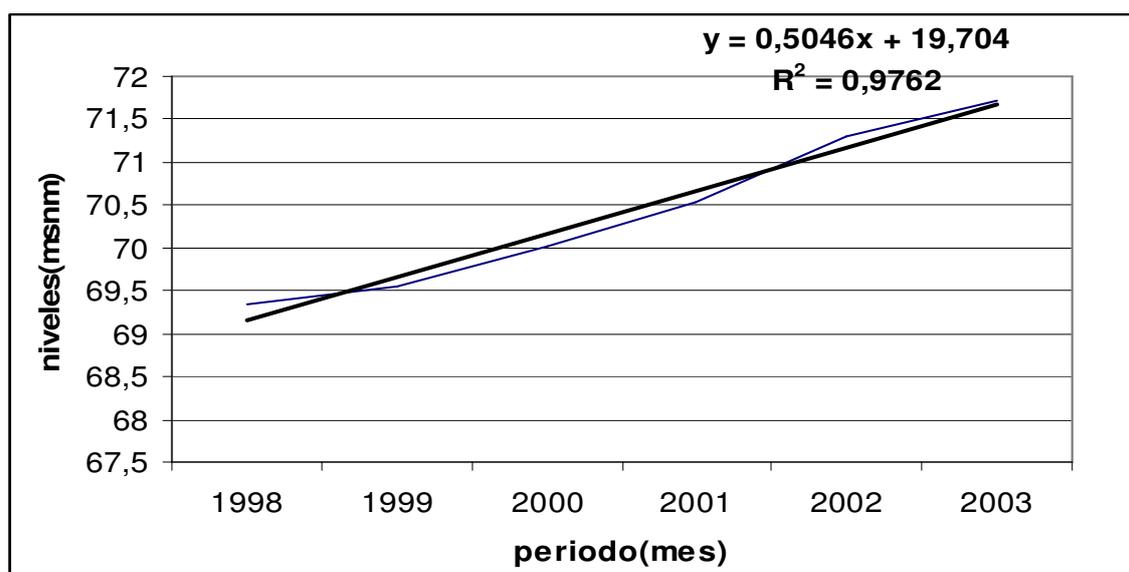


Figura 71: Serie de Niveles mensuales y línea de tendencia. Periodo: 1998-2003.

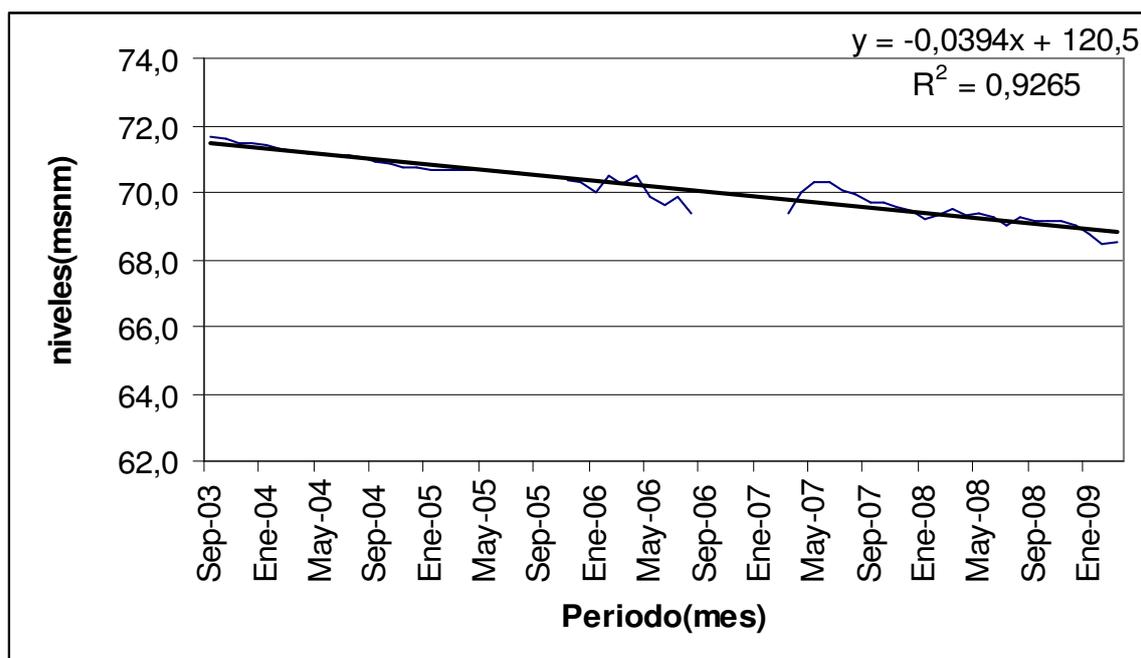


Figura 72: Serie de Niveles mensuales y línea de tendencia. Periodo: 2003-2009.

Discusión de los resultados

Los resultados obtenidos para el análisis de tendencias con las series mensuales de niveles de la Laguna Mar Chiquita, se presentan en la Tabla 20. En la misma se detallan las pendientes de las series analizadas por periodo, aplicando el modelo de regresión lineal en función del tiempo y el coeficiente de regresión correspondiente. Se presenta, también, el signo de la pendiente del periodo, indicando ésta si es positiva o negativa según se presente un incremento o disminución del caudal a lo largo del periodo.

Tabla 20: Resumen de las tendencias analizadas para la serie de niveles de la Laguna.

Niveles	Periodo	Análisis estadístico		Signo (tendencia de la serie)
		Pendiente	Coef. Regresión	
Ciclo 0	Nov67- Dic73	0,00005	0,0033	Positiva
Ciclo 0	Ene74- Ago81	0,0564	0,8802	Positiva
Ciclo 1a	Sep81- Jun87	0,0121	0,0459	Positiva
Ciclo 1b	Jul87- Ene91	-0,0491	0,9381	Negativa
Ciclo 2a	Feb91- Dic93	0,0528	0,9261	Positiva
Ciclo 2b	Ene94- Oct97	-0,0609	0,9577	Negativa
Ciclo 3a	Jul98- Jul03	0,5046	0,9762	Positiva
Ciclo 3b	Ago03- Mar09	-0,0394	0,9262	Negativa

El análisis de tendencias sobre la serie de niveles de la Laguna Mar Chiquita, nos permite prever que puede ocurrir durante los próximos años. Se prevé que la Laguna comience un ascenso de los niveles, lo cual está asociado a erogaciones de caudales en río Hondo por encima de los que viene ocurriendo hasta la fecha.

Análisis estadístico de las series de precipitación

Las tendencias de la precipitación han sido analizadas en base a datos de Miramar y La Rinconada.

Durante el siglo XX aumentaron, en términos generales, las precipitaciones sobre la tierra firme en la franja 30°N-85°N, aunque en los últimos 30-40 años ha habido disminuciones notables en la franja 10°S-30°N.

A escala hemisférica, no hay una tendencia clara con respecto a las masas terrestres extratropicales del Hemisferio Sur. Hasta el momento, la atribución de las variaciones de la precipitación mundial es cierta, puesto que la precipitación está fuertemente influida por las pautas de variabilidad natural a gran escala.

La tendencia lineal del promedio mundial obtenido de la RMCH entre 1901 y 2005 es estadísticamente insignificante. Ninguna de las estimaciones de tendencia respecto al

periodo 1951-2005 es apreciable, existiendo muchas discrepancias entre los conjuntos de datos, lo que demuestra la dificultad de monitorizar una magnitud como la precipitación que presenta una gran variabilidad tanto en el espacio como en el tiempo. Los cambios mundiales no son lineales a lo largo del tiempo, y exhiben una variabilidad decenal importante, con un periodo respectivamente húmedo entre 1950 y 1970, seguido de una disminución de las precipitaciones. En los promedios predominan las precipitaciones tropicales y subtropicales.

Estudios teóricos y modelización del clima sugieren que, en un clima cada vez más cálido por el aumento de gases invernadero, se esperaría un incremento de las precipitaciones extremas respecto de su valor medio. Por ello, la influencia antropogénica es más fácilmente detectable en las precipitaciones extremas que en los valores medios. Ello se debe a que las precipitaciones extremas están controladas por la disponibilidad de vapor de agua, mientras que el valor medio de precipitación está controlado por la capacidad de la atmósfera para radiar hacia el espacio energía de onda larga (liberada en forma de calor latente, mediante condensación) y esta capacidad está limitada por el aumento de gases invernadero. En conjunto, los estudios observacionales y de modelización conducen a la conclusión general de que es probable que haya aumentado la frecuencia de episodios de precipitación intensa (o la proporción de la cantidad total de lluvia de episodios intensos) en la mayor parte de las áreas terrestres durante el siglo XX, y que es más probable que improbable que esa tendencia refleje una contribución antropogénica. No es posible evaluar, por el momento, la magnitud de esa contribución antropogénica

Análisis estadístico de las precipitaciones en Miramar.

El análisis se realizó sobre valores mensuales de precipitaciones disponibles durante el periodo 1964-2009. La serie analizada se presenta en la Figura 73.

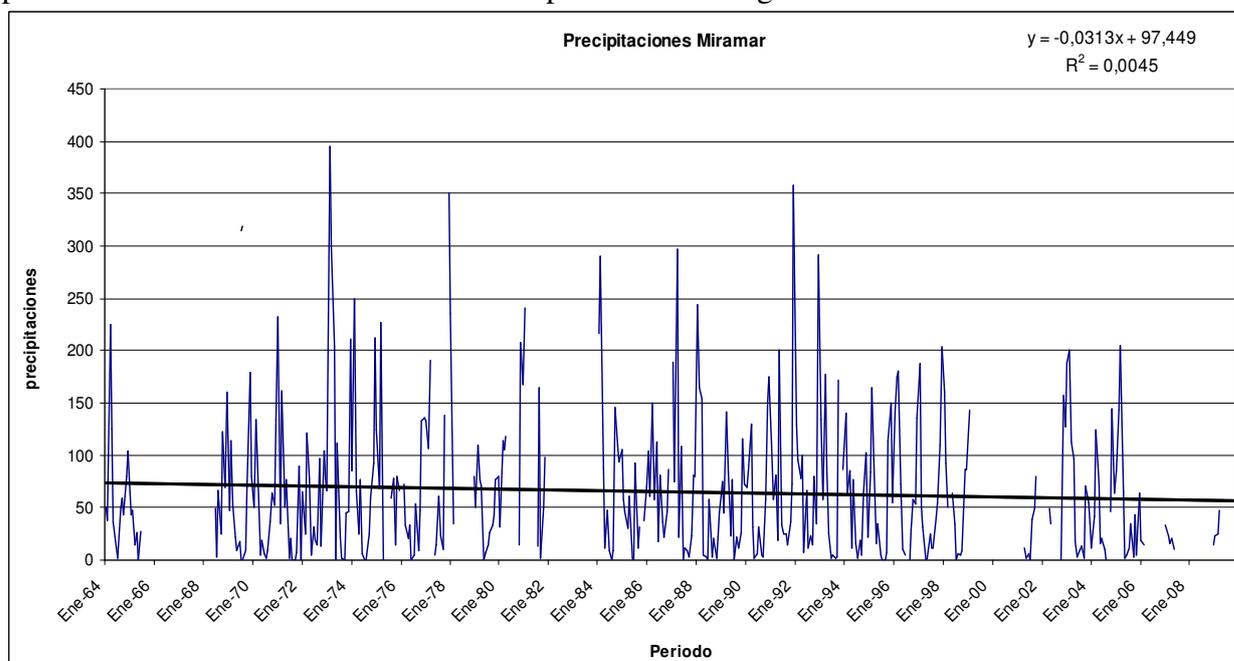


Figura 73: Serie mensual de precipitaciones en Miramar. Periodo: 1964-2009.

Para el análisis de la serie de precipitación se realizó una división de los datos en base a los ciclos observados en la serie de niveles de la Laguna Mar Chiquita con el objetivo de realizar una comparación con el comportamiento entre ambas series. (Ver Figura74)

Se ha identificado el ciclo de ascenso de los niveles que es el primer periodo que se presenta abarcando incluso 4 años más de datos ya que la serie de precipitaciones comienza en el 1964 mientras que el resto de series analizadas comenzaran unos años posteriores

En el último periodo la falta de datos impide realizar un análisis más preciso de la serie, pero sí brindará una idea general de la tendencia de la misma.

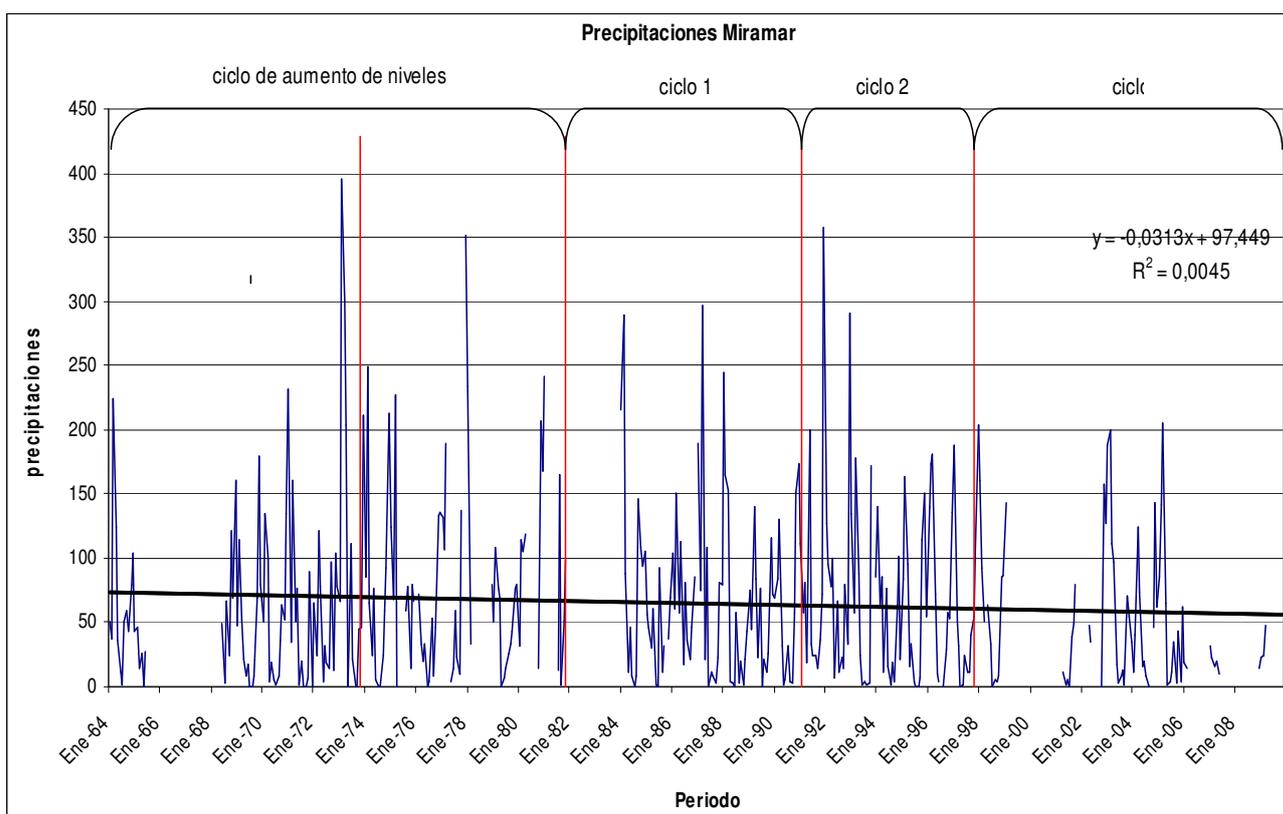


Figura 74: Identificación de ciclos en la serie de precipitaciones en Miramar.

Previo al Ciclo 1, se presenta un primer conjunto de años que comprende desde 1964-1981 (Figura 75) donde se presenta un aumento de las precipitaciones con signo positivo en la línea de tendencia. De esta forma, este conjunto de datos indica el inicio de los ciclos dominantes previamente identificados también en la serie de niveles.

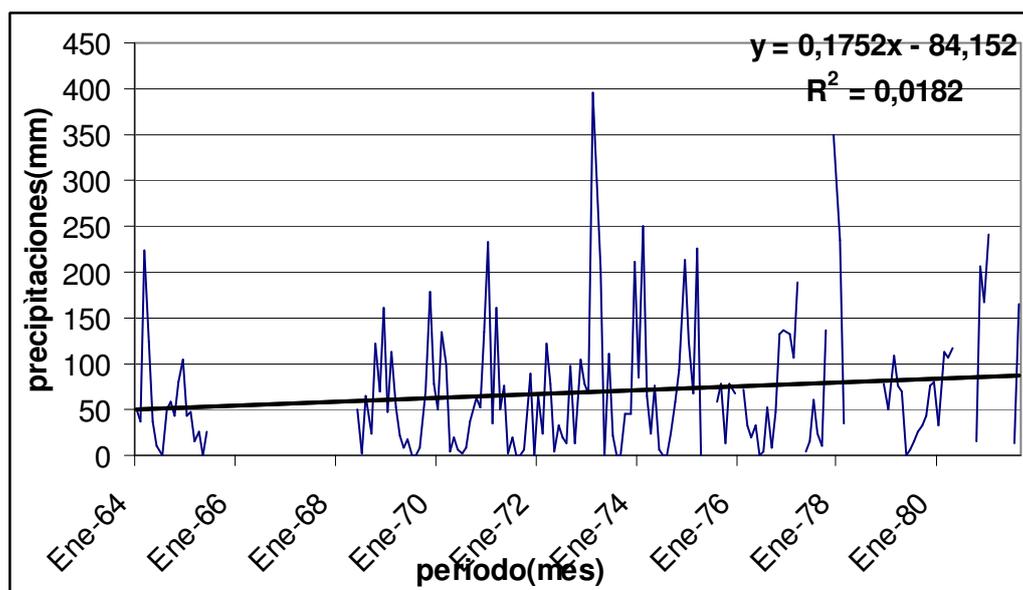


Figura 75: Serie de precipitaciones mensuales y línea de tendencia. Periodo: 1964-1981.

El periodo de Septiembre 1981-Enero 1991 (Figura 76), corresponden al primer ciclo donde se observa que el comportamiento de la laguna no parece estar relacionado con la cantidad de precipitación medida en Miramar. En el caso de los niveles se observó una rama creciente y otra decreciente dentro del ciclo, mientras que para las precipitaciones no se da este comportamiento.

Sin embargo es posible destacar, como se verá en el análisis de la precipitación en la Rinconada, que se observan periodos anuales con valores máximos para los meses de Enero y Febrero, produciéndose un desplazamiento de en meses para algunos años.

En este periodo se muestra una tendencia negativa y poco significativa.

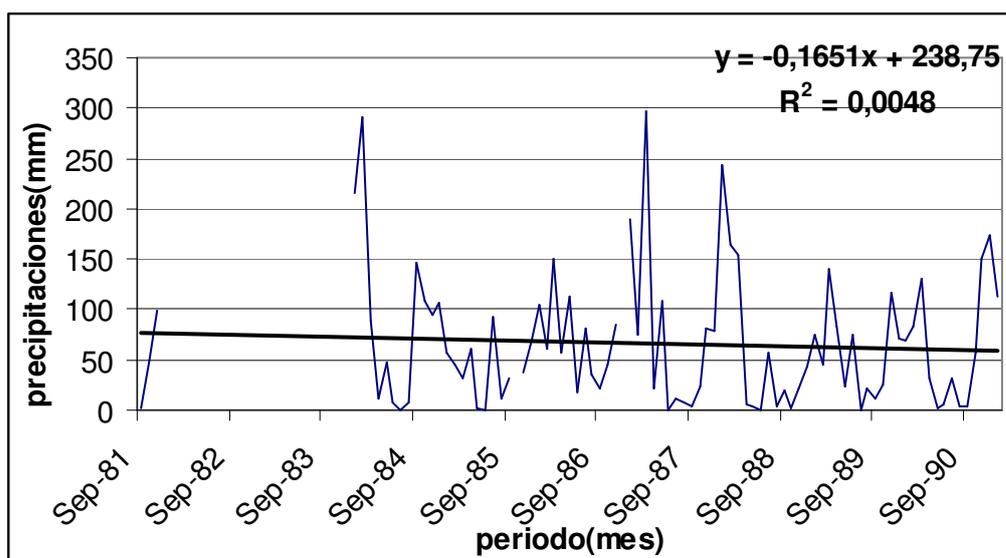


Figura 76: Serie de precipitaciones mensuales y línea de tendencia. Periodo: 1981-1991.

Para el segundo ciclo (Figura 77), se mantiene la tendencia negativa y las precipitaciones van disminuyendo, no superan los 250 mm en los últimos años.

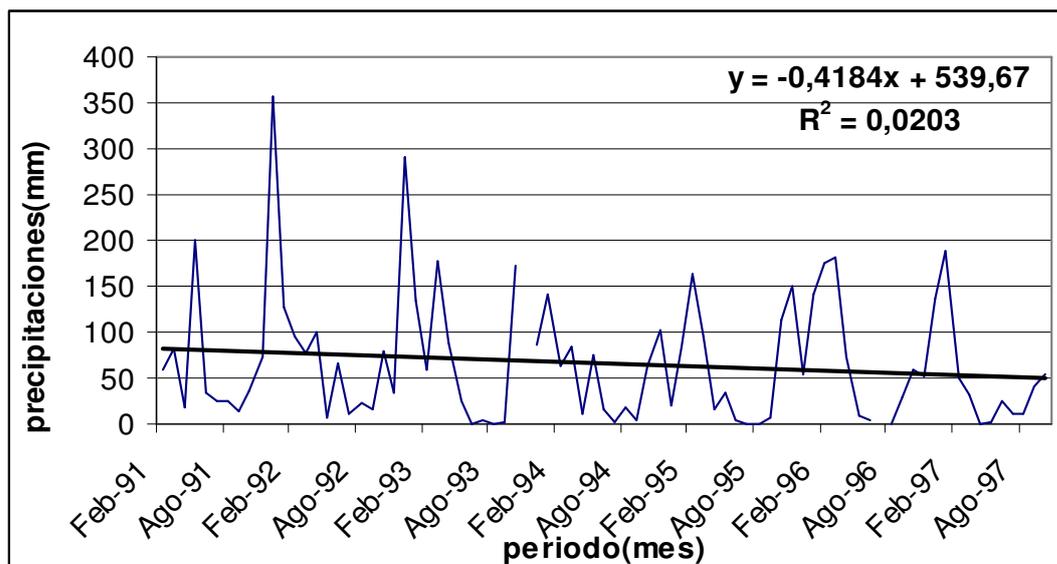


Figura 77: Serie de precipitaciones mensuales y línea de tendencia. Periodo: 1991-1997.

En el tercer y último periodo, que abarca desde Noviembre del 2002 hasta la actualidad (Figura 78), se disponen de muy pocos datos para completar el análisis de esta serie. Se mantienen la tendencia negativa, viéndose esta acentuada quizás, por la carencia de datos.

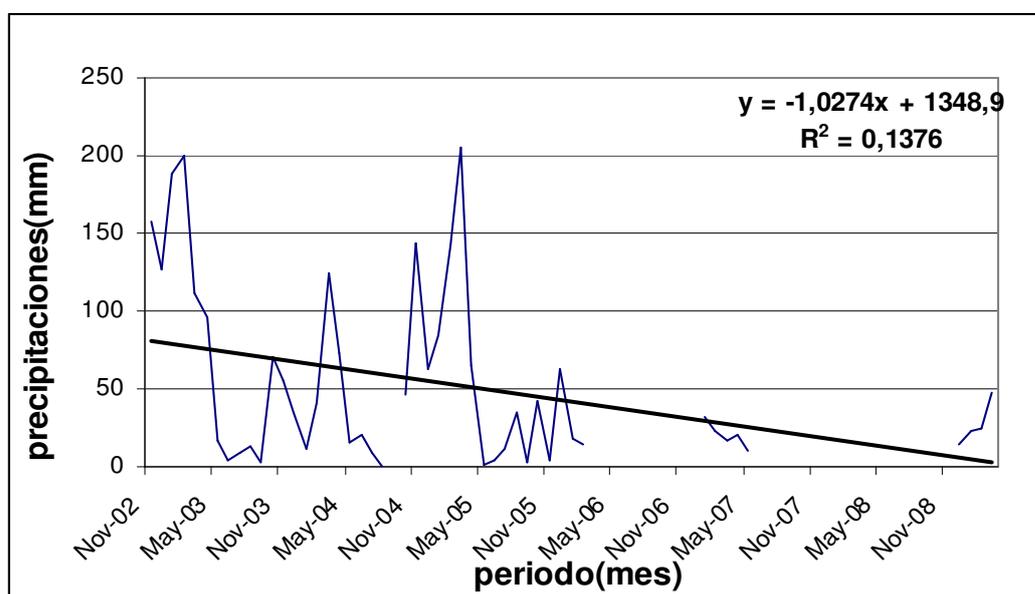


Figura 78: Serie de precipitaciones mensuales y línea de tendencia. Periodo: 1997-2009.

Discusión de los resultados

Los resultados obtenidos para el análisis de tendencias con las series mensuales de precipitación en Miramar, se presentan en la Tabla 21. En la misma se detallan las

pendientes de las series analizadas por periodo, aplicando el modelo de regresión lineal en función del tiempo y el coeficiente de regresión correspondiente. Se presenta, también, el signo de la pendiente del periodo, indicando ésta si es positiva o negativa según se presente un incremento o disminución del caudal a lo largo del periodo.

Tabla 21: Resumen de las tendencias analizadas para la serie de precipitación en Miramar.

Precipitación	Periodo	Análisis estadístico		Signo (tendencia de las series)
		Pendiente	Regresión	
Ciclo 0	ener64- agos81	0,1752	0,0182	Positiva
Ciclo 1	sep81- ener91	-0,1651	0,0048	Negativa
Ciclo 2	feb91- oct97	-0,4184	0,0203	Negativa
Ciclo 3	nov97- mar09	-1,0274	0,1376	Negativa

Análisis estadístico de la serie precipitaciones La Rinconada

La serie de datos de precipitaciones en La Rinconada comprende desde el año 1991 hasta 2008. A lo largo de este periodo se observó una disminución de la línea de tendencia, indicada en la Figura 79.

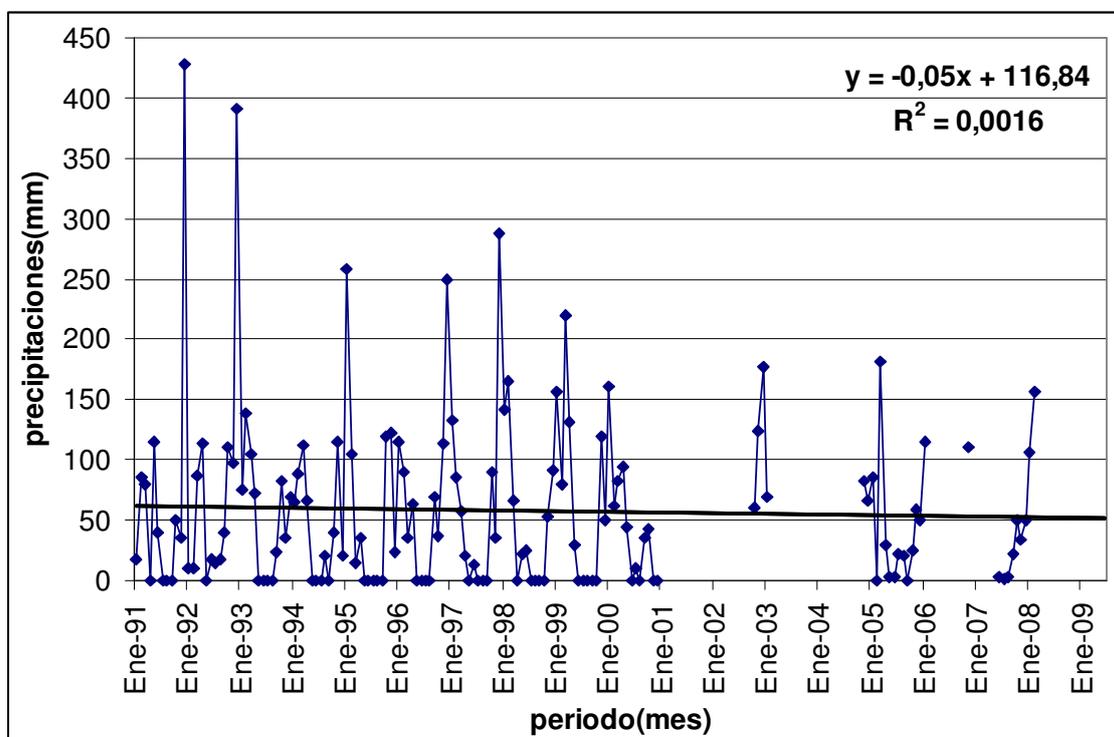


Figura 79: Serie de precipitación mensual y línea de tendencia. Periodo: 1991-2008.

Una vez identificados los ciclos que se destacan en la serie de datos, se sustrae a ésta su componente periódica, caracterizada por dos picos extraordinarios seguidos de un periodo de sequía, encontrándose una tendencia lineal poco significativa con el signo que se indica para cada ciclo. En el último ciclo, como bien se aprecia en la Figura 80, la falta de datos no permite contar con una continuidad en la serie de los últimos años.

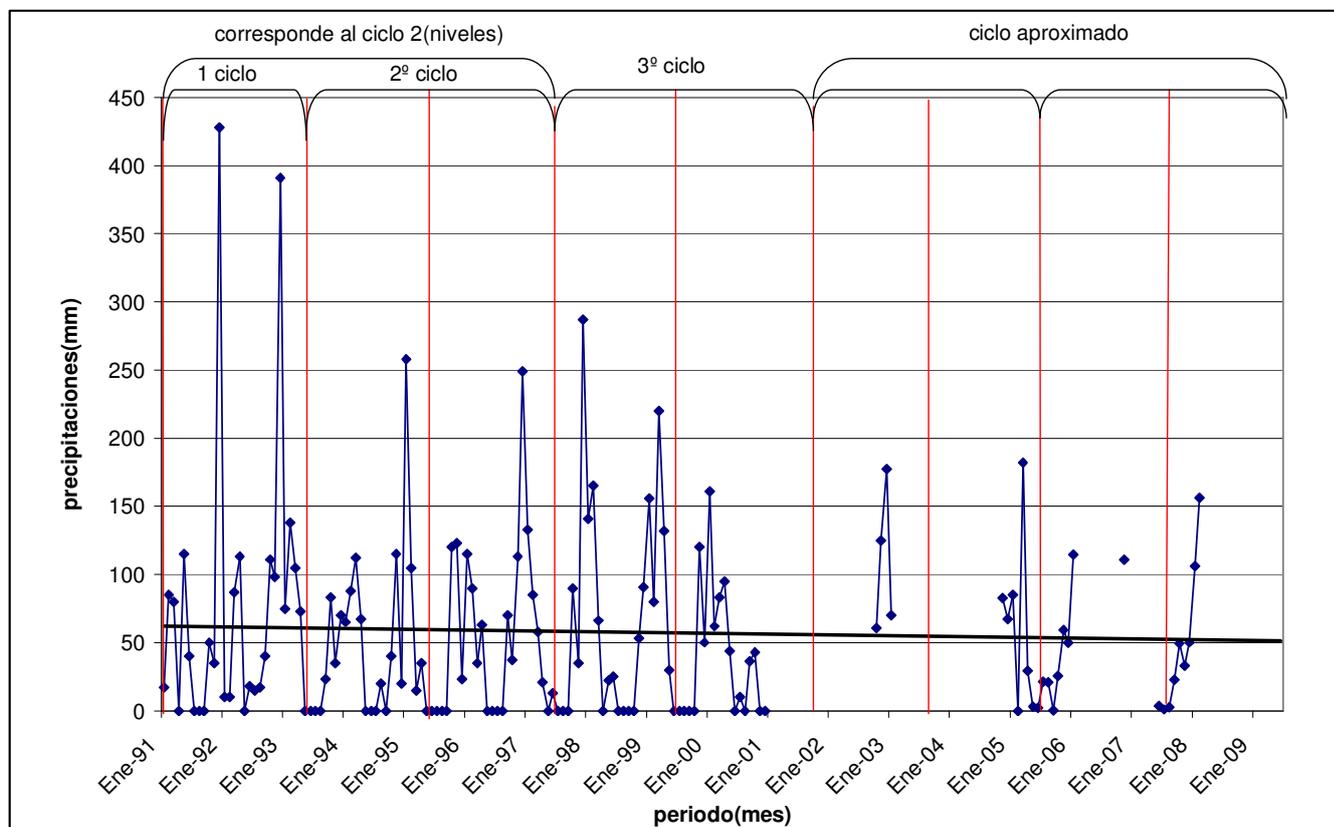


Figura 80: Identificación de ciclos en la serie de precipitación mensual de La Rinconada.

Los gráficos nos permiten buscar periodicidades, en el que predomina claramente el ciclo anual, con precipitaciones mayores a los 350 mm, en el mes de diciembre para el periodo del 1991-1993, presentando una tendencia positiva. En la Figura 83, que correspondería al segundo ciclo se observa una disminución de las precipitaciones, dando valores máximos en el mes de diciembre, pero manteniendo una tendencia positiva y en el último ciclo se produce una disminución considerable de las precipitaciones, desplazándose los valores máximos a los meses entre febrero y marzo, con una consecuente disminución en la tendencia.

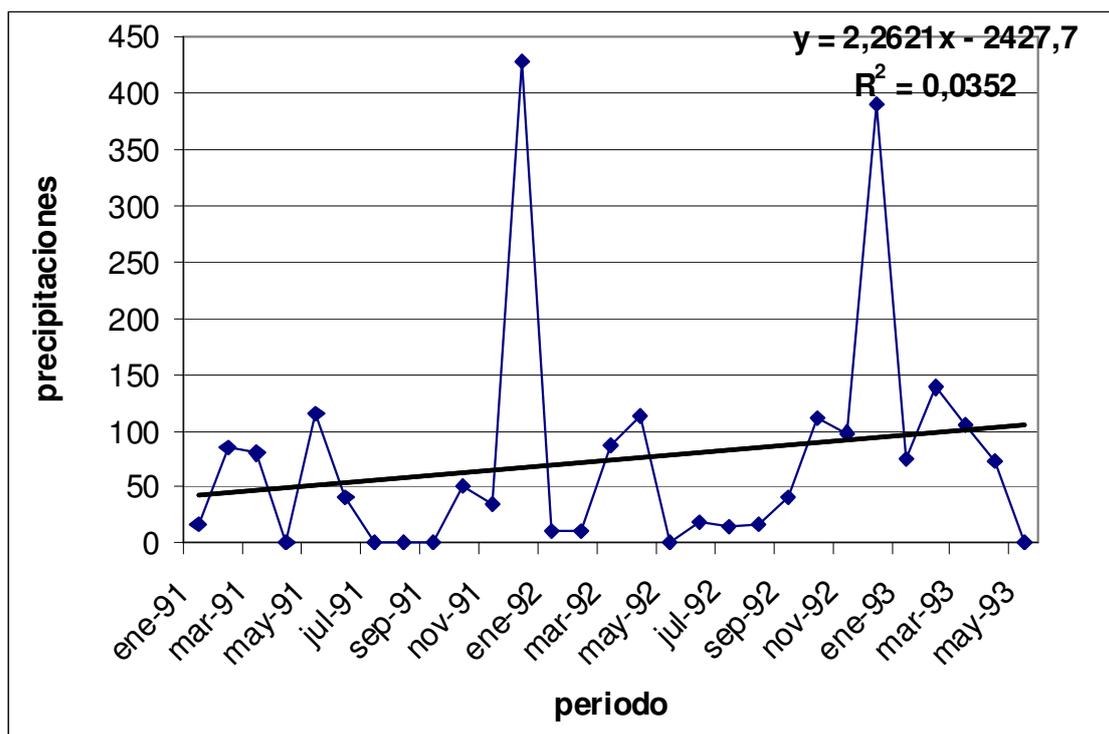


Figura 81: Serie de precipitación mensual y línea de tendencia. Periodo: 1991-1993.

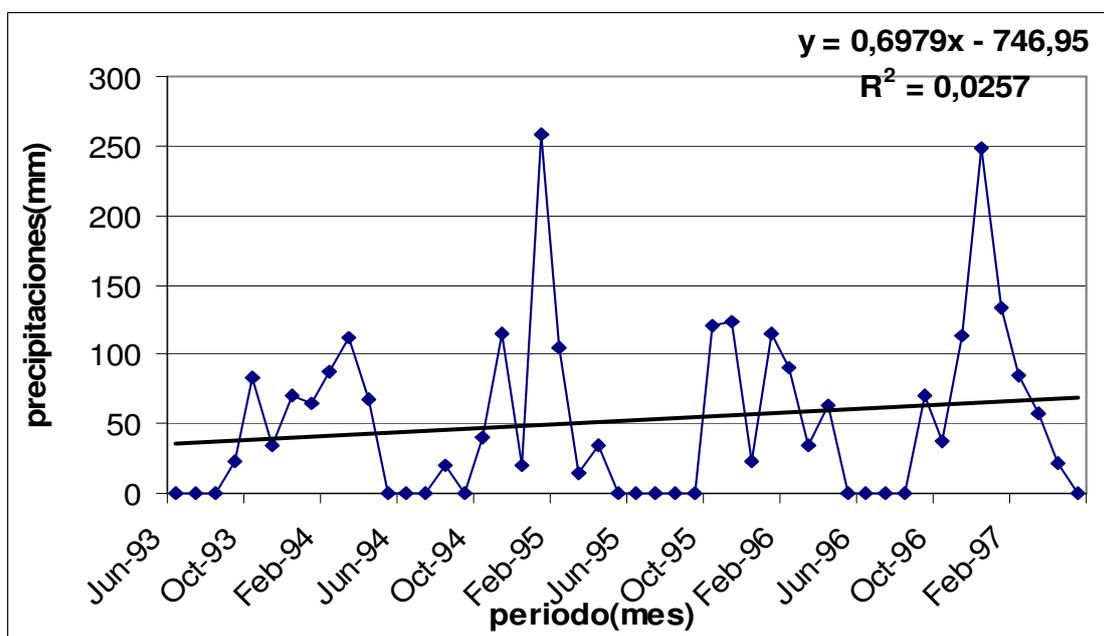


Figura 82: Serie de precipitación mensual y línea de tendencia. Periodo: 1993-1997

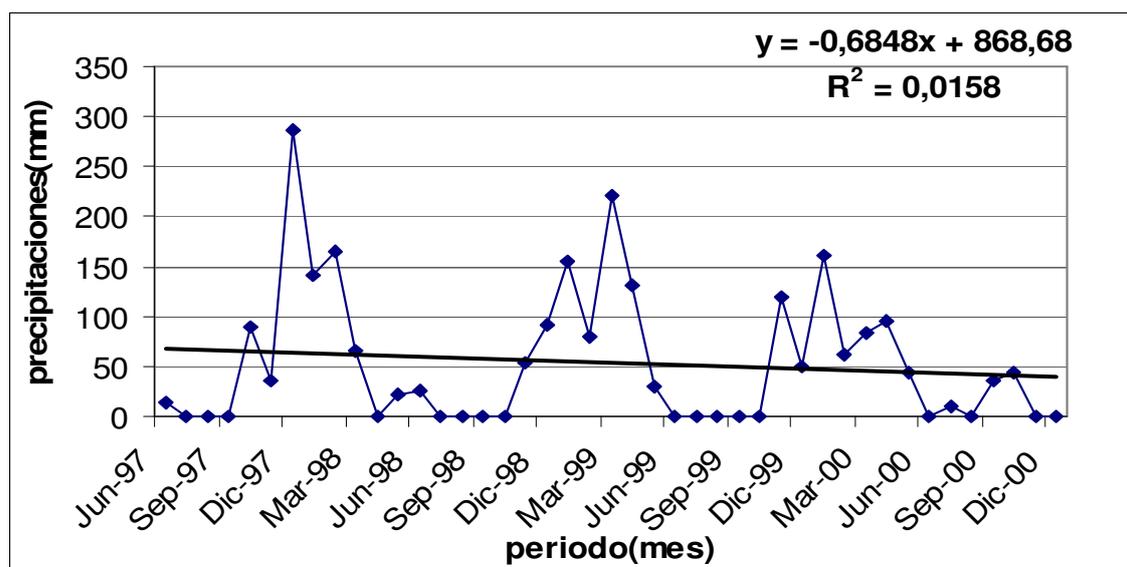


Figura 83: Serie de precipitación mensual y línea de tendencia. Periodo: 1997-2001.

Para el último ciclo de la serie haremos un análisis estimado de la tendencia, ya que no disponemos de los datos suficientes para cubrir la serie.

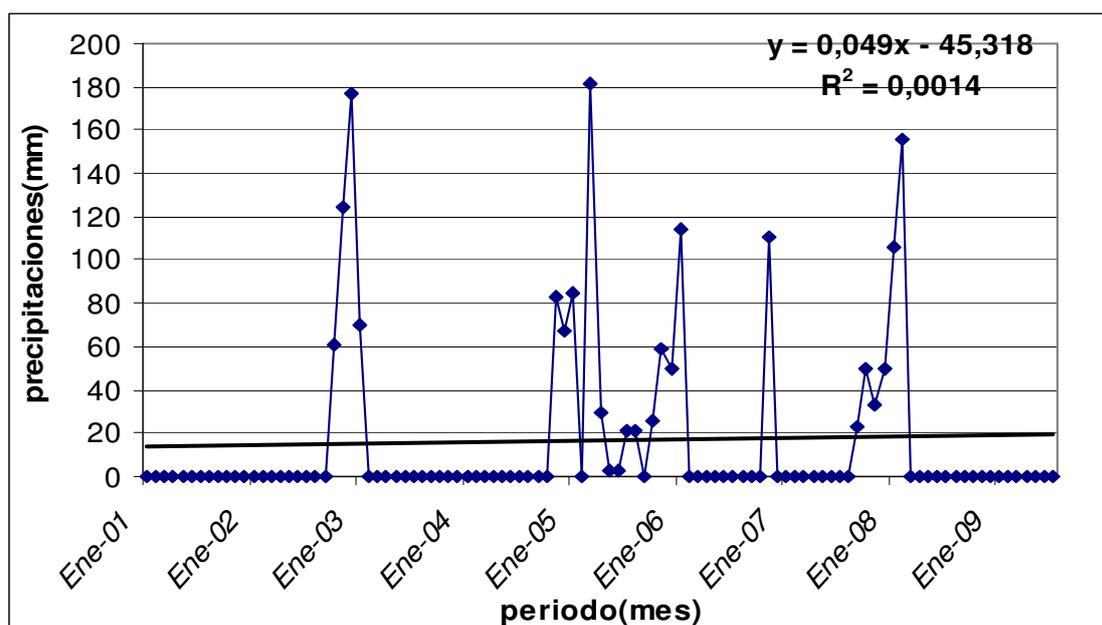


Figura 84: Serie de precipitación mensual y línea de tendencia. Periodo: 2001-2008

Discusión de los resultados

Los resultados obtenidos para el análisis de tendencias con las series mensuales de precipitación en La Rinconada, se presentan en la Tabla 22. En la misma se detallan las pendientes de las series analizadas por periodo, aplicando el modelo de regresión lineal en función del tiempo y el coeficiente de regresión correspondiente. Se presenta, también, el signo de la pendiente del periodo, indicando ésta si es positiva o negativa según se presente un incremento o disminución del caudal a lo largo del periodo.

Tabla 22: Resumen de las tendencias analizadas para la serie de precipitación en La Rinconada.

Precipitación	Periodo	Análisis estadístico		Signo (tendencia de las series)
		Pendiente	Regresión	
Ciclo 2a	Ene91-May93	2,2621	0,0352	Positiva
Ciclo 2b	Jun93-May97	0,6979	0,0259	Positiva
Ciclo 3a	Jun97-Oct00	-0,6848	0,0158	Negativa
Ciclo 3b	Nov00-Feb08	0,049	0,0014	Positiva

6. Análisis conjunto de los ciclos

Ahora bien, es posible evaluar en forma combinada las variables analizadas, en función de los ciclos definidos.

En la Tabla 23 se presentan los periodos analizados y los resultados correspondientes a cada variable en cuanto a los signos de las líneas de tendencia y la magnitud de la pendiente determinada.

Tabla 23: Resumen de las variables analizadas.

Ciclo	Periodo	Análisis de la pendiente de la línea de tendencia			
		Niveles	Caudal	Precipitación Miramar	Precipitación La Rinconada
Ciclo 0	Nov67-Dic73	0,00005	-1.050	0.1752	Sin datos
Ciclo 1a	Ene74-Ago81	0,0564	0.6011		
		Sep81-Jun87	0,0121	-1.5403	-0.1651
Ciclo 1b	Jul87-Ene91	-0,0491	-0.577		
Ciclo 2a	Feb91-Dic93	0,0528	-0.577	-0.4184	2.2621
Ciclo 2b	Ene94-Oct97	-0,0609	-0.577		0.6979
Ciclo 3a	Jul98-Jul03	0,5046	-0.1835	-1.0274	-0.6848
Ciclo 3b	Ago03-Mar09	-0,0394	Sin datos		0.049

En la Tabla 23 es posible asociar periodos de bajante de la Laguna a periodos de bajante en los caudales erogados por el Río Hondo. De esta forma, la ausencia de un régimen de caudales, que permita la formación de Bañados, durante la segunda mitad de cada

periodo dominante en la Laguna, indicará una disminución progresiva de los niveles de la Laguna a lo largo de la segunda mitad de cada ciclo.

En cambio, durante los periodos de subida del nivel de la Laguna, es fundamental que los caudales erogados por Río Hondo, presenten una magnitud tal que favorezca la presencia de Bañados, asegurando de esta forma el incremento de la Laguna en coincidencia con esta formación. Sin necesidad que el ciclo correspondiente de caudales presente tendencia positiva.

De esta forma es posible predecir un incremento de la Laguna, observando la ocurrencia de Bañados.

En resumen, el sistema Bañados del Río Dulce- Mar Chiquita se caracteriza por una gran variabilidad temporal en los aportes hídricos que recibe asociados al módulo del caudal de sus afluentes y en menor medida a variaciones en la intensidad de las lluvias registradas en la cuenca. Esto genera variaciones tanto en el corto plazo entre años consecutivos como de largo plazo con aguas altas y bajas, lo que a su vez se traduce en grandes oscilaciones tanto en el régimen de inundación del Río Dulce como en el nivel de la Laguna de Mar Chiquita. En los últimos treinta años se han registrado períodos muy secos donde casi no había aportes hasta la década de 1970 donde se inician años muy húmedos que determinaron un aumento excepcional del nivel de la Laguna.

Debemos aceptar entonces como un fenómeno natural la existencia de años secos, húmedos y muy húmedos, aunque en los secos se agrava la mayor extracción de agua para riego. Esto se da en este último periodo con la previa expansión de las actividades agrícolas.

CAPÍTULO VII

Propuesta de volúmenes ambientales para la Laguna Mar Chiquita

1. Metodología empleada para el cálculo de volúmenes por ciclos.

La metodología utilizada en este capítulo se basa en los periodos identificados en base a los niveles medidos en la Laguna con intervalo mensual.

En primer lugar, se identificaron los tres ciclos característicos analizados en el Capítulo denominado “Análisis de tendencias”. Estos ciclos presentan forma sinusoidal con un valor máximo asociado al nivel extremo que alcanzó la Laguna en dicho ciclo. Cada ciclo se analiza en función de su rama ascendente y descendente.

En segundo lugar, se evaluó cada rama de los ciclos en forma detallada, relacionando los valores de niveles con los caudales erogados por Río Hondo. El objetivo de este proceso es cuantificar el volumen aportado por Río Hondo para cada ciclo analizado. El procesamiento se realiza en base a la identificación de los hidrogramas anuales medidos en Río Hondo y estimando el volumen de aporte de cada uno de estos en base a la simplificación a Hidrogramas triangulares. La sumatoria del área comprendida dentro de cada hidrograma será el volumen final por ciclo.

El volumen en la Laguna se estima a partir de los niveles medidos en función de una expresión polinómica de 6to orden estimada en Hillman (1999).

Se plantearon dos formas de cálculo para estimar el correspondiente volumen en la Laguna. La primera de estas formas consiste en evaluar los volúmenes correspondientes a los extremos del intervalo que comprende la rama analizada. Mientras que la segunda forma, se realizó calculando la diferencia entre los volúmenes mensuales y sumando luego cada resultado parcial. Luego se realiza la comparación de los volúmenes estimando entre ambas metodologías.

Para vincular el indicador ambiental seleccionado con los aspectos hidrológicos, se realizó un cálculo de los distintos volúmenes de la Laguna asociado a sus ciclos de ascenso y descensos, relacionado cada ciclo con los valores de niveles y caudales registrados.

Para el procedimiento de cálculo de volumen se utilizaron las siguientes metodologías:

- Cálculo de volúmenes por extremos de los ciclos, teniendo en cuenta el volumen inicial y final, en función de los niveles.
- Cálculo basado en registros mensuales.

En la Figura 85 se presentan las series históricas de caudales erogados en Río Hondo y niveles medidos en Mar Chiquita. Se observa que los niveles se encuentran

directamente relacionados con el aumento en los picos de los caudales (como se observa en la Figura 85).

Continuando el análisis presentado en el capítulo previo del presente trabajo, se destaca que la división de la serie se realiza en cuatro ciclos. El primero conformado por un ascenso generalizado del nivel en la Laguna y los tres siguientes mostrando el comportamiento cíclico de la Laguna, con ramas ascendente y descendente.

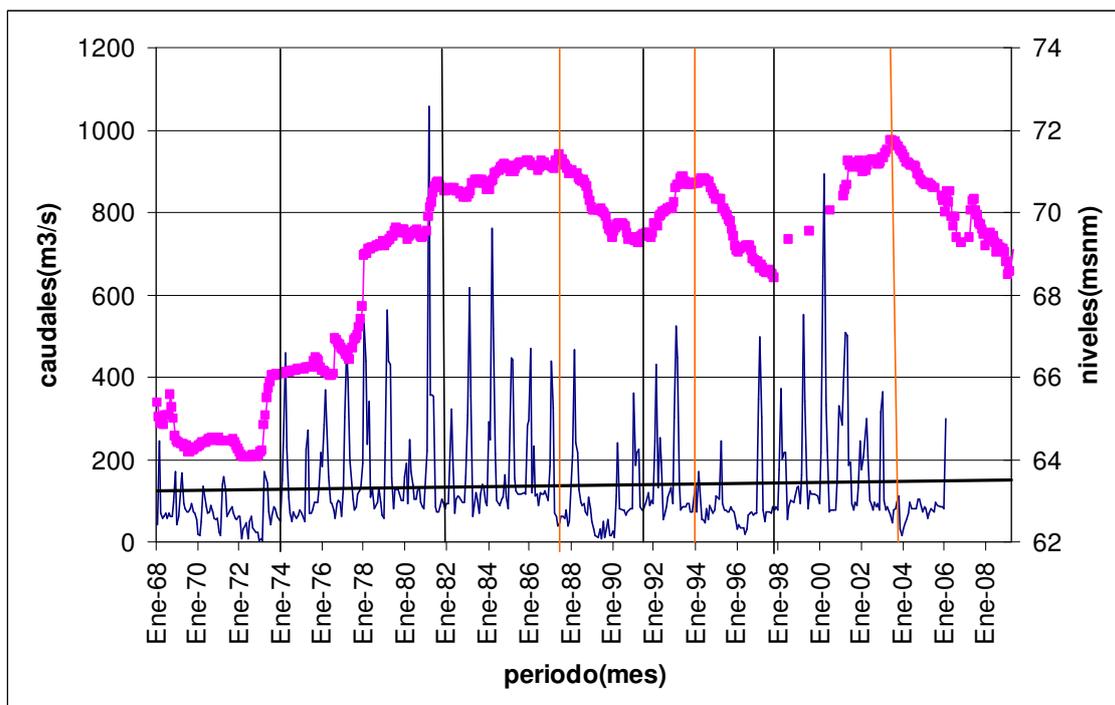


Figura 85: Representación de las aportaciones mensuales para la Laguna en relación con los niveles para el periodo 1968-2009.

La expresión teórica utilizada para calcular el volumen de la Laguna en función de los niveles medidos se planteó originalmente en Hillman *et al.*, 2000.

En el mencionado trabajo se presentó una expresión que vincula valores de volúmenes de la Laguna (V) con niveles (H); a través de una función polinómica de sexto grado.

$$V = 0.0002637754339077 \times H^6 - 0.1057596696730520 \times H^5 + 17.65959405869430 \times H^4 - 1571.888901065650 \times H^3 + 78661.96687460170 \times H^2 - 2098382.48647610 \times H + 23311555.01775670$$

(12)

A partir de la (12), se realizó el análisis para las ramas descendentes (es decir, los periodos de bajantes) en la Laguna, verificando en las figuras siguientes que cada rama presenta intervalos de tiempo variable. A continuación se presenta el análisis realizado para cada rama y ciclo analizado.

En la Figura 86 se muestra el ajuste polinómico para la rama descendente de la Laguna correspondiente al primer ciclo (Ciclo 1). Se observa un volumen inicial superior a los 250000 m³ y una cota asociada a 71 m s.n.m., lo cual va decreciendo hasta alcanzar un

volumen mínimo de 150000 m³ correspondiente a una cota mínima de 69,4 m s.n.m. El intervalo correspondiente a esta rama de descenso cubre cuatro años aproximadamente.

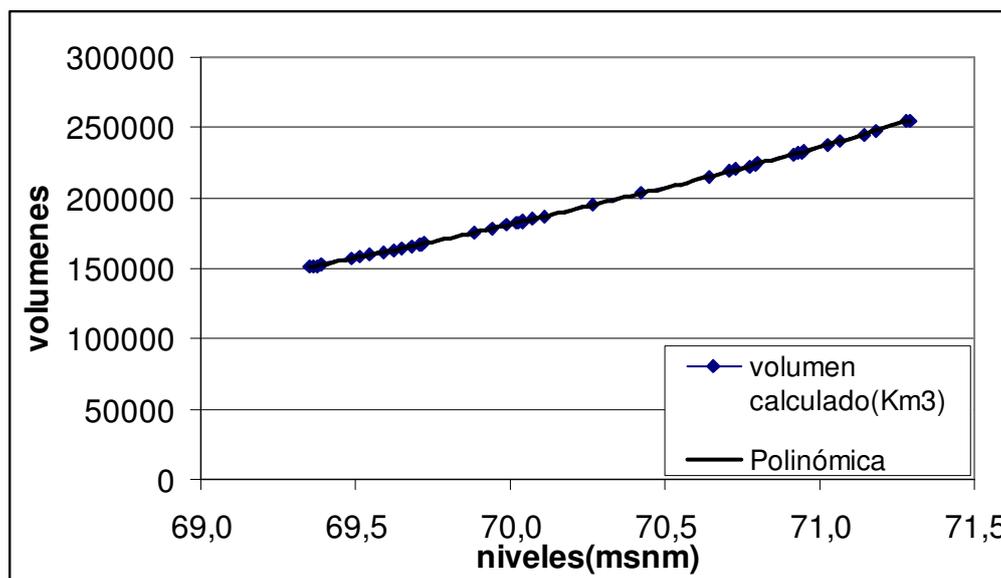


Figura 86: Volúmenes estimados en función de los niveles medios para el periodo Julio 1987-Enero 1991.

Para la segunda rama de descenso, presentada en la Figura 87, los valores iniciales superan los 20 km³ de volumen en la Laguna con una cota que alcanza los 70,5 m s.n.m. hasta llegar a un volumen de mínimo de 11 km³ asociado a un nivel de 68,5 m s.n.m. El intervalo correspondiente a esta rama de descenso cubre aproximadamente 4 años (3,8 años para ser más precisos).

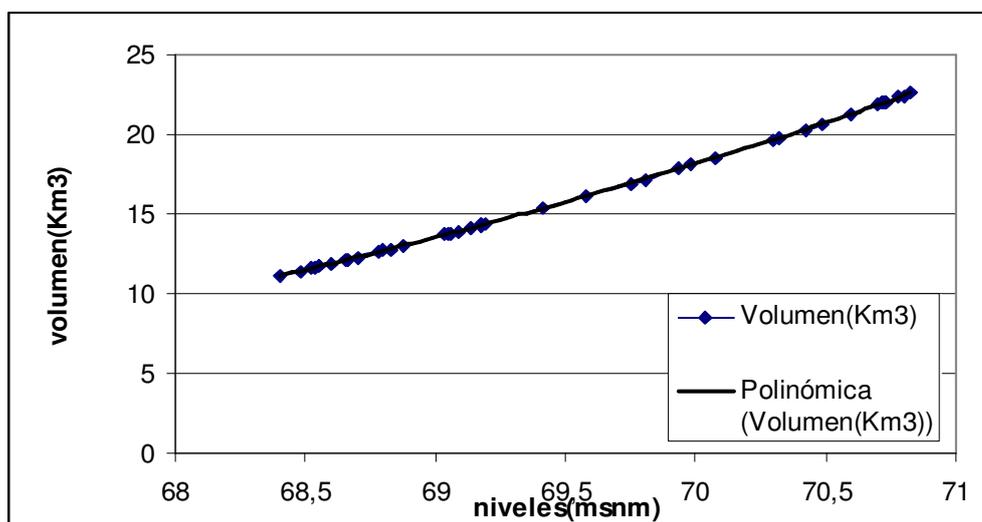


Figura 87: Volúmenes estimados en función de los niveles medios para el periodo Enero 94-October 97.

En la Figura 88, se presenta la tercera rama descendente donde se muestra que el comportamiento de la Laguna manifiesta un descenso constante en los niveles, partiendo de valores iniciales superiores a 250000 m³. Este se caracteriza por ser el

volumen mayor presentado en toda la serie histórica analizada. La cota asociada correspondiente es 71,5 m s.n.m. y un volumen mínimo de unos 110000 m³ con una cota asociada de 68,5 m s.n.m. **El intervalo correspondiente a esta rama de descenso cubre seis años y con tendencia a continuar debido a los valores registrados entre mayo y julio.**

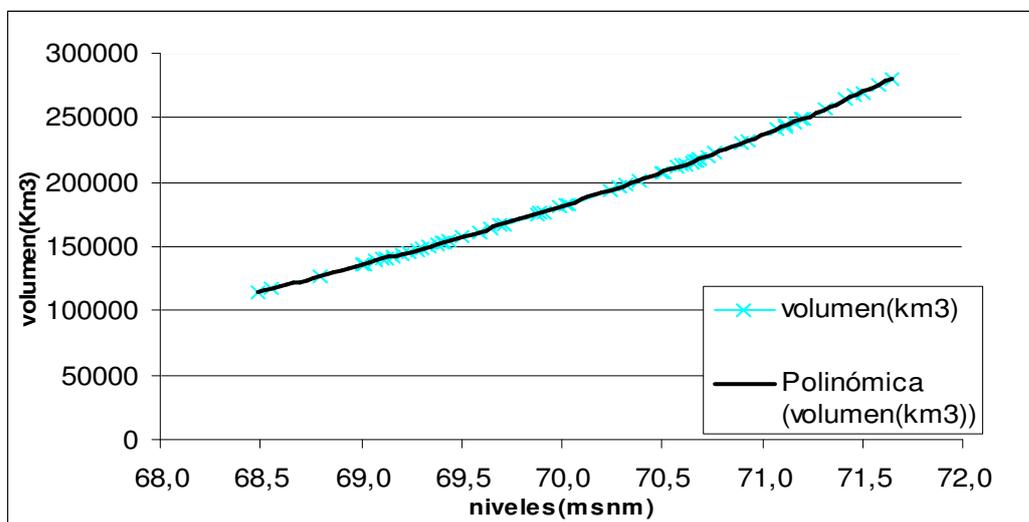


Figura 88: Volúmenes estimados en función de los niveles medios para el periodo Septiembre 03- Abril 09.

Como se observa en las graficas de ajuste polinómico de la función volumen de la Laguna, se registró un comportamiento semejante en los tres periodos analizados (ramas descendentes de cada ciclo) con un intervalo medio de 4 años para las ramas descendentes del primer y segundo ciclo. Durante el último ciclo se extiende la duración de la rama descendente a 6 años hasta el presente.

Durante la rama descendente del tercer ciclo, observamos, también, que el descenso actual de la Laguna es **natural**. Esto lo podemos justificar evaluando la formación de los Bañados a través de las imágenes satelitales durante el intervalo comprendido.

En la Figura 89 se muestra la formación de bañados para el año 2007 dentro de la tercer rama descendente de la Laguna. A modo de comparación se incorporan también dicha formación de Bañados para el año 2000, cuando se produce un pico extraordinario de caudales en el Río Dulce que los niveles de la Laguna a su máxima extensión.

Con esta tabla pretendemos mostrar la influencia que tiene la formación de bañados en la formación de las playas de sal al Norte de la Laguna.

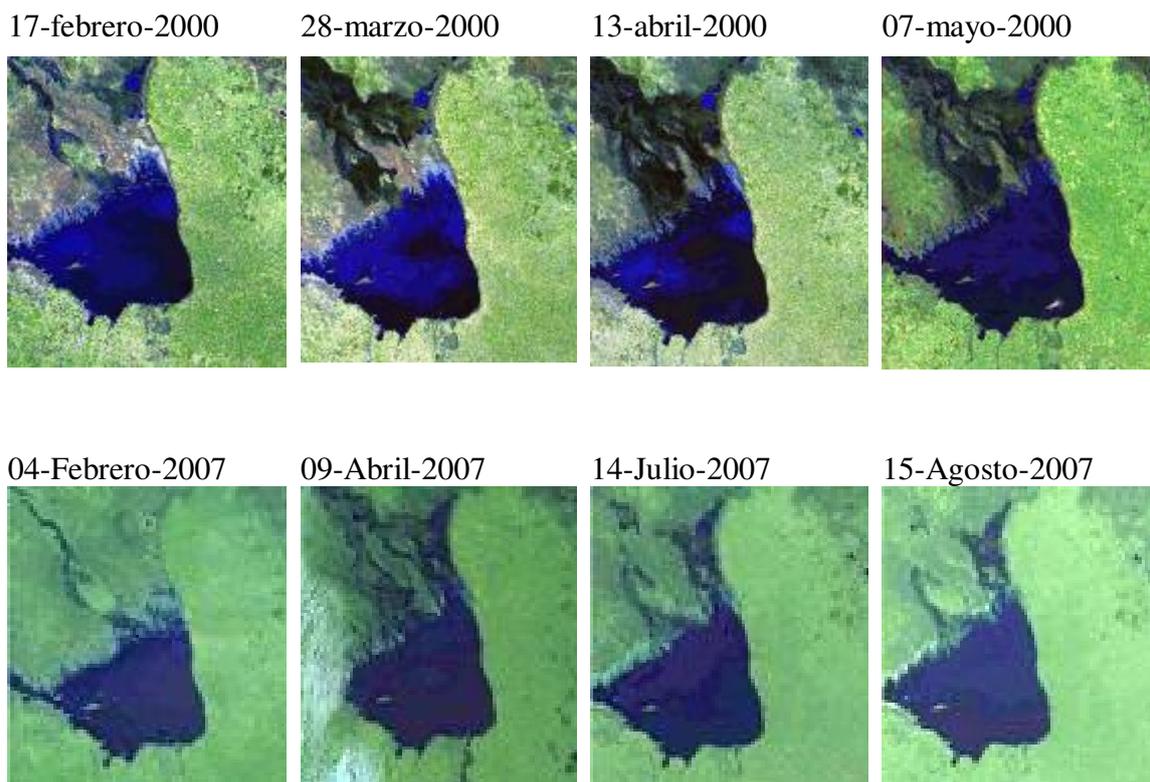


Figura 89: Imágenes satelitales de la zona de Bañados y Laguna para los años 2000 y 2007.

El análisis del sistema Bañados del río Dulce indica que el factor determinante de la extensión alcanzada por el área inundada es el aporte del río Dulce que llega a la altura de Los Telares y desborda formando los bañados. A partir de este concepto, se define la relación entre los volúmenes erogados por Río Hondo y las inundaciones. Para volúmenes bajos, de hasta aproximadamente 100 Hm^3 , a incrementos pequeños de caudal corresponden grandes aumentos del área inundada en los bañados. Con volúmenes superiores, de hasta 1.300 Hm^3 , las áreas inundadas aumentan en forma directamente proporcional a los caudales. Finalmente, para volúmenes por encima de 1.300 hm^3 , las áreas inundadas se incrementan en menor proporción, ya que las aguas alcanzan los límites del valle de inundación del río Dulce. (Pagot, 2003)

En la serie de imágenes de la Figura 34, se puede apreciar durante los años 2003-2006, el comportamiento de las áreas medidas en los Bañados completando series ya analizadas con similar procedimiento y presentadas en Pagot (2003).

Durante este periodo, se distinguieron tres grupos temporales definidos entre los años 2003-2006 y 2007 asociando a la variación de áreas de Bañados. El primer grupo se presentaron la formación de los bañados, en el segundo periodo de sequía y en el último el pulso de inundación es menor que en años precedentes.

En cuanto a las áreas de agua en la Laguna, se observa que desde enero de 2001 hasta junio de 2003, los valores fueron ascendiendo presentando luego un cambio de comportamiento definido a través de un constante descenso hasta Abril del 2009, fecha hasta la que se tiene disponibles las mediciones. En la se presentan los niveles de la Laguna Mar Chiquita medidos frente a la costa de Miramar.

Realizando un análisis similar para la rama ascendente de cada ciclo, incluyendo el periodo de datos iniciales, obtenemos los resultados presentados en la Tabla 24.

Tabla 24: Resumen de periodos comprendidos por cada ciclo de la Laguna.

Ciclos	Ramas de cada ciclo	Periodo	Análisis por ciclos			
			Años	Inicio	Final	Intervalo (Días)
Ciclo 0	Rama Ascendente1	Nov67-dic73	6	01/11/1967	30/12/1973	2251
	Rama Ascendente2	Ene74-Ago 81	7	01/01/1974	30/08/1981	2798
Ciclo 1	Rama Ascendente	Sep81-Jun87	6	01/09/1981	30/06/1987	2128
	Rama Descendente	Jul-87-Ene91	4	01/07/1987	30/01/1991	1309
Ciclo 2	Rama Ascendente	Feb91-Dic93	2	01/02/1991	30/12/1993	1063
	Rama Descendente	Ene94-Oct97	3,8	01/01/1994	30/10/1997	1398
Ciclo 3	Rama Ascendente	Jul98-Jul03	5	01/07/1998	30/07/2003	1855
	Rama Descendente	Ago03-mar09	6	01/08/2003	30/03/2009	2068

Del análisis de la tabla precedente podemos concluir que el intervalo de tiempo que comprende la rama ascendente corresponde a un promedio de 6 años, con excepción de la respectiva rama para el Ciclo 2, la cual presenta una duración de escasamente 2 años.

Descripción del cálculo de volúmenes por extremos de los distintos ciclos.

En este apartado se analizan los volúmenes aportados por Río Hondo para cada ciclo. El procesamiento se realiza en base a la identificación de los hidrogramas anuales medidos en Río Hondo y se estima el volumen de aporte de cada uno de estos en base a la simplificación de los mismos a Hidrogramas triangulares. La sumatoria del área comprendida dentro de cada hidrograma será el volumen final por ciclo.

En la siguiente figura se muestran los caudales superiores a 90 m³/s para toda la serie histórica. Será con los datos proporcionados por la Figura 90 con el que se realice el análisis de los volúmenes aportados por el Río Hondo a la Laguna.

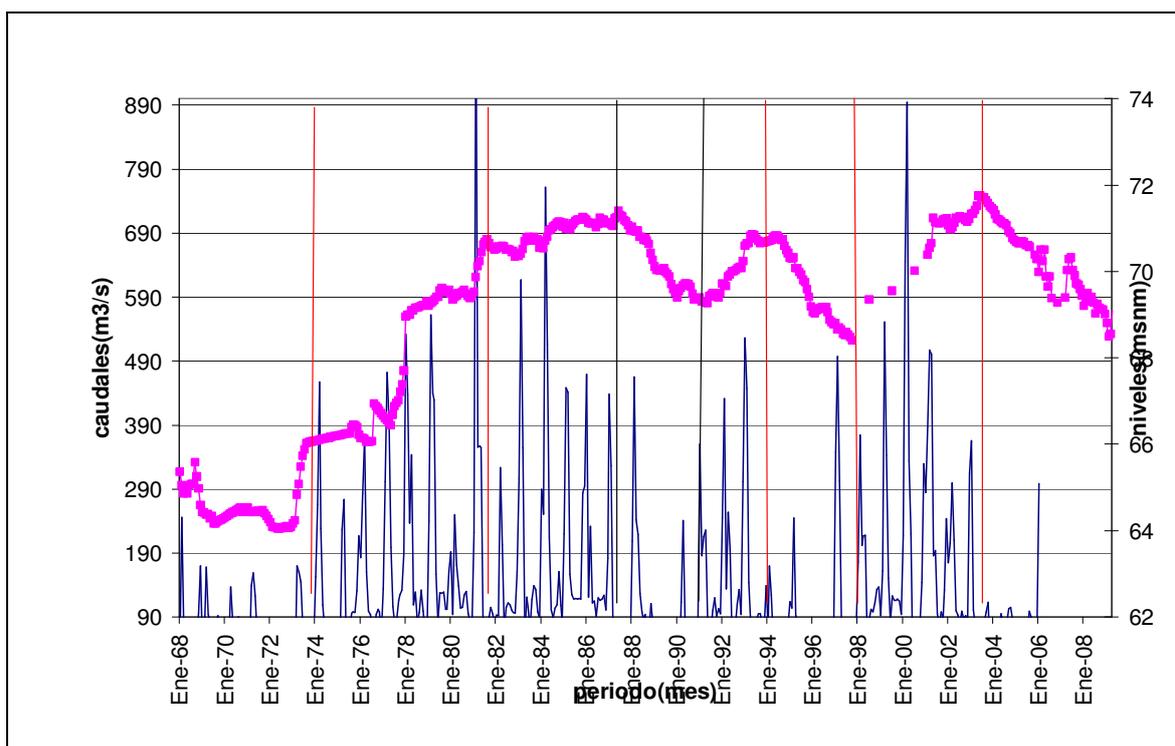


Figura 90: Serie de niveles y caudal desbordado por el río Dulce en Río Hondo.

Para convertir las ordenadas del hidrograma en valores simplificados, se aplica el concepto de Hidrograma Unitario Adimensional a través del método del Servicio de Conservación de Suelo (SCS). Para esto debe conocerse el período de elevación (T_p) y el caudal pico o de punta (q_p), como se muestra en la Figura 91.

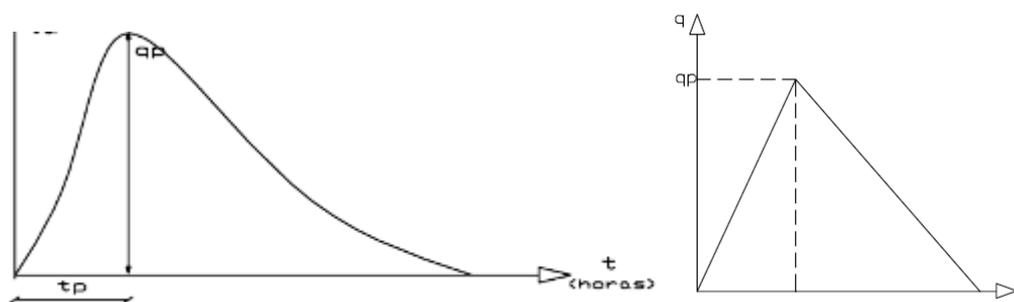


Figura 91: Esquema de Cálculo Hidrograma Unitario Adimensional. Fuente: Chow et al., 1994.

A partir de los datos disponibles se calculan los distintos volúmenes para cada ciclo de la Laguna, definiendo el caudal de desborde del Río Dulce como aquel a partir del cual los Bañados comienzan a formarse, observado esto con apoyo satelital. Resultó así un valor establecido en función de la capacidad de conducción del cauce del río, sobrepasada a partir de los 90 m³/s aproximadamente.

En la serie de volúmenes de desborde acumulados se aprecia las características cíclicas de la Laguna, con un pico extraordinario por ciclo, mostrando la necesidad de que se produzcan eventos de crecidas extremas donde el caudal se desborda regulando el crecimiento de los Bañados y el aumento de la curva de niveles.

Para el cálculo de volúmenes que eroga Río Hondo, se realiza la observación de cada hidrograma y el caudal pico, en la rama ascendente y descendente de cada ciclo, en función del tiempo transcurrido (en meses).

El cálculo de volumen erogado en Río Hondo, a partir de la serie de caudales, se realizó con la expresión:

$$V = ((t-T) \cdot (Q_{\max} - 90)) / 2 \quad (13)$$

Donde:

T=tiempo inicial

t=tiempo final

Q_{max} = caudal máximo erogado por Río Hondo.

90 m³/s corresponde al caudal de desborde

Con este criterio se analizaron los ciclos identificados cuyos resultados se presentan en las siguientes tablas.

Tabla 25: Análisis de volúmenes en Río Hondo para el Ciclo 0.

Ciclo 0							
Río Hondo (RH)							
Hidrograma	Tiempo inicial (mes)	Tiempo final (mes)	Tp (días)	Niveles (ms.n.m.)	Caudal pico (Qp)	Volumen Río Dulce (m ³)	Volumen Río Dulce (Hm ³)
1	Ene-74	Jun-74	180	66,8	456,59	2850603840	2851
2	Mar-75	May-75	90		273	711958507	712
3	Sep-75	Jun-76	303		369,87	3663386352	3663
4	Nov-76	Jul-77	271		472,49	4477886928	4478
5	Sep-77	Ago-78	363		531,95	6930483120	6930
6	Ago-78	Nov-78	121		131.591	687382027200	687382
7	Ene-79	Jun-79	180		561	3662496000	3662
8	Jun-79	Nov-79	182		128,81	305139744	305
9	Nov-79	Feb-80	119		192,22	525492576	525
10	Feb-80	Jul-80	180		249	1237193482	1237
11	Jul-80	Oct-80	121		130,13	209767536	210
12	Ene-81	Jun-81	151	70,7	1054,8291	6293773185	6294

En la Tabla 25 se presentan los volúmenes medidos en Río Hondo, especificando el valor del máximo caudal (superior a 90 m³/s) y el intervalo entre cada una de las ramas ascendente y descendente del Ciclo 0.

El volumen final de Río Hondo se presenta en la Tabla 26 junto con el cálculo de volumen para la Laguna, asociado a los niveles medios para cada inicio y final del ciclo

0. Por diferencia entre estos valores se obtiene la cantidad de caudal que ingresa a la Laguna (ΔV), considerando en este proceso las pérdidas que se producen, ya sea por evaporación, infiltración (no tomadas en cuenta en el presente estudio) y retención en los Bañados, así como los posibles aportes desde el sistema subterráneo.

En este primer ciclo el cálculo comienza en Enero del 1974 donde empieza a aumentar los niveles de la Laguna dando lugar a una única rama ascendente hasta junio de 1981. Observamos que el volumen erogado en Río Hondo es significativamente mayor que el volumen que entra en la Laguna, aproximadamente en un 55%.

Volumen RH (m ³)	Mar Chiquita (MC)		
	Volumen Inicial (m ³)	Volumen Final (m ³)	Δ Volumen (m ³)
718250208470	60085,25401	220240,1888	160154,9348

Tabla 26: Análisis de volúmenes en Río Hondo y en la Laguna para el Ciclo 0.

En la

Tabla 27 se realizó un procedimiento similar de cálculo tanto para la rama ascendente como para la descendente completando el Ciclo 1. Como es lógico, se producen menos número de eventos de caudales máximos y como consecuencia los valores obtenidos son mucho menores que en la rama ascendente.

En la Tabla 28, se muestra como en el caso de la rama ascendente el volumen que entra en la Laguna da un valor positivo, mientras que en el caso de la rama descendente este valor resulta negativo. Esto significa que la cantidad de agua que llega a la Laguna es mucho menor de la que aportaba por Río Dulce, lo que implica una disminución del volumen de la Laguna al finalizar este ciclo.

Tabla 27: Análisis de volúmenes en Río Hondo para el Ciclo 1.

Ciclo 1							
Río Hondo (RH) – Rama Ascendente							
Hidrograma	Tiempo inicial (mes)	Tiempo final (mes)	Tp (días)	Niveles (ms.n.m.)	Caudal pico (Qp)	Volumen Río Dulce (m ³)	Volumen Río Dulce (Hm ³)
2	Oct-81	Nov-81	31	70,7	105,1922	20345394,24	20
3	Feb-82	May-82	89		323,1219	896307081,1	896
4	Jun-82	Abr-83	304		617,261	6924413261	6924
5	Abr-83	Jul-83	91		121,07	122142384	122
6	Jul-83	Dic-83	153		132,3252	279752641,9	280
7	Dic-83	Jul-84	213		761,0496	6174729999	6175
8	Jul-84	Dic-84	153		161,17	470405232	470
9	Dic-84	Jul-85	212		441,191	3216347654	3216
10	Jul-85	Oct-85	92		118,518	113341939,2	113
11	Oct-85	Feb-86	123		469,144	2014619558	2015
12	Feb-86	Jun-86	120		231,89	735557760	736
13	Jun-86	Nov-86	153		124,021	224865201,6	225
14	Nov-86	Mar-87	120	71,13	438,046	1804270464	1804
Rama descendente							
15	Ene-88	Ago-88	213	70,8	464,7	3447839520	3448

16	Nov-88	Dic-88	30		110,4083	26449156,8	26
17	Mar-90	May-90	61		241,1142	398216139,8	398
18	Ene-91	Feb-91	31	68,4	360,3036	361990581,1	362

Tabla 28: Análisis de volúmenes en Río Hondo y en la Laguna para el Ciclo 1.

Mar Chiquita (MC)			
Rama ascendente			
Volumen RH (m ³)	Volumen Inicial (m ³)	Volumen Final (m ³)	ΔVolumen (m ³)
22997098571	215684,669	241942,0975	26257,42853
Rama descendente			
Volumen RH (m ³)	Volumen Inicial (m ³)	Volumen Final (m ³)	ΔVolumen (m ³)
4234495398	262590,6032	151622,1231	-110968,4801

A partir de la Tabla 28, se observa sobre el análisis realizado en la rama ascendente que el 91 % del volumen erogado en Río Hondo no ingresa a la Laguna durante este periodo.

El correspondiente análisis del Ciclo 2, indica que, las ramas tanto ascendente como descendente, presentan menor duración con sólo dos años de recuperación de los niveles máximos en la Laguna y tan sólo tres años constituyen lo que sería el periodo de descenso de la misma. Con un menor número de hidrogramas apreciamos que el volumen aportado por Río Hondo es mucho menor que en los ciclos anteriores.

Tabla 29: Análisis de volúmenes en Río Hondo para el Ciclo 2.

Ciclo 2							
Río Hondo (RH) – Rama Ascendente							
Hidrograma	Tiempo inicial (mes)	Tiempo final (mes)	Tp (días)	Niveles (ms.n.m.)	Caudal pico (Qp)	Volumen Río Dulce (m ³)	Volumen Río Dulce (Hm ³)
1	Ago-91	Oct-91	61	69,5	119,86023	78687678,1	79
2	Oct-91	Jun-92	244		431,8526	3603399886	3603
3	Sep-92	Nov-92	61		132,83	112865616	113
4	Nov-92	Abr-93	151	70,8	525,9902581	2844051652	2844
Rama descendente							
	Ene-94	Abr-94	90	70,8	169,3072	308346393,6	308
	Ene-95	Abr-95	90		244,9881	602593732,8	603
	Ene-97	Abr-97	90	68,4	461,47	1444275360	1444

Tabla 30: Análisis de volúmenes en Río Hondo y en la Laguna para el Ciclo 2.

Mar Chiquita (MC)			
Rama ascendente			
Volumen RH (m ³)	Volumen Inicial (m ³)	Volumen Final (m ³)	ΔVolumen (m ³)
6639004832	157527,118	226061,1913	68534,07323
Rama descendente			
2355215486	226061,1913	111219,3239	-114841,8674

A partir de la Tabla 30, se observa sobre el análisis realizado en la rama ascendente que el 98 % del volumen erogado en Río Hondo no ingresa a la Laguna durante este periodo, lo que indica el escaso aporte desde el Río Dulce al sistema de la Laguna.

El análisis tercer ciclo se presenta en la Tabla 29. Este ciclo se caracteriza porque en su correspondiente rama descendente identificaremos los periodos donde ocurrieron las tormentas de sal.

En la Tabla 31 el procedimiento de cálculo para la rama ascendente del Ciclo 3, genera similar cantidad de volumen erogado por Río Hondo (21000 Hm³) respecto del Ciclo 1 anterior. Sin embargo esto se produce en menor cantidad de eventos anuales registrados, el Ciclo 1 presente 14 eventos y este Ciclo 3 sólo 8.

En la Tabla 32, se muestra como en el caso de la rama ascendente el volumen que entra en la Laguna da un valor positivo.

Tabla 31: Análisis de volúmenes en Río Hondo para el Ciclo 3.

Ciclo 3							
Río Hondo (RH) – Rama Ascendente							
Hidrograma	Tiempo inicial (mes)	Tiempo final (mes)	Tp (días)	Niveles (ms.n.m.)	Caudal pico (Qp)	Volumen Río Dulce (m ³)	Volumen Río Dulce (Hm ³)
1	Ene-98	Jun-98	151	68	374,5575	1856225484	1856
2	Ago-98	Ene-99	153		137,0975	311295636	311
3	Ene-99	Jun-99	151		550,7735	3005717695	3006
4	Jun-99	Dic-99	183		115,4850645	201474725,9	201
5	Dic-99	Jun-00	183		894,3739677	6359058839	6359
6	Nov-00	Jul-01	242		500,51033	4291639194	4292
7	Sep-01	Jun-02	273		299,069	2465676158	2466
8	Oct-02	Mar-03	151	72	365,5129	1797225749	1797

Tabla 32: Análisis de volúmenes en Río Hondo y en la Laguna para el Ciclo 3.

Mar Chiquita (MC)			
Rama ascendente			
Volumen RH (m ³)	Volumen Inicial (m ³)	Volumen Final (m ³)	Δ Volumen (m ³)
20288313482	111219,3239	1797225749	1797114530

Descripción cálculo de volúmenes mensuales

En el siguiente análisis se calcularon los volúmenes del Río Hondo de manera mensual, es decir, para cada caudal superior a los 90 m³/s se obtuvo un valor con la expresión polinómica de sexto grado comentada anteriormente que vincula volúmenes con niveles en la Laguna. Con los resultados obtenidos establecemos cual será la diferencia entre el volumen final menos el inicial, es decir ΔV , para la rama ascendente, partiendo de un volumen inicial igual a 0 m³ y realizando este mismo cálculo para el resto de la serie de datos.

En las siguientes tablas se determinaron las diferencias de volúmenes estimados para Río Hondo con respecto al Hidrograma próximo anterior. Para el Ciclo 0, resulta de la Tabla 33 un volumen diferencial total de 0,45 Hm³. Este mismo parámetro para el Ciclo 1 es igual a 0,48 Hm³ (ver Tabla 34) y de 0,42 Hm³ para el Ciclo 2 según la Tabla 35.

Esto nos indica que los volúmenes acumulados son similares en los tres Ciclos analizados con una variación máxima del 14 %.

Tabla 33: Análisis de volúmenes en Río Hondo para el Ciclo 0.

Ciclo 0							
Río Hondo (RH)							
Hidrograma	Tiempo inicial (mes)	Tiempo final (mes)	Tp (días)	Niveles (ms.n.m.)	Caudal pico (Qp)	Volumen Río Dulce (m ³)	Δ volumen (m ³)
1	ene-74	jun-74	180	66,8	456,59	60085,25401	60085,25401
2	mar-75	may-75	90	66,22	273	46628,91328	5028,748512
3	sep-75	jun-76	303	66,45	369,87	51657,6618	7751,437426
4	nov-76	jul-77	271	66,77	472,49	59409,09922	6473,958194
5	sep-77	ago-78	363	67,02	531,95	65883,05742	77316,87665
6	ago-78	nov-78	121	69,18	131,591	143199,9341	875,0000596
7	ene-79	jun-79	180	69,2	561	144074,9341	9351,677299
8	jun-79	nov-79	182	69,41	128,81	153426,6114	6865,594387
9	nov-79	feb-80	119	69,56	192,22	160292,2058	-9568,21084
10	feb-80	jul-80	180	69,35	249	150723,995	8182,500601
11	jul-80	oct-80	121	69,53	130,13	158906,4956	61333,69327
12	ene-81	jun-81	151	70,7	1054,8291	220240,1888	220240,1888
					Total	1414528,351	453936,7184

Tabla 34: Análisis de volúmenes en Río Hondo para el Ciclo 1.

Ciclo 1							
Río Hondo (RH)							
Hidrograma	Tiempo inicial (mes)	Tiempo final (mes)	Tp (días)	Niveles (ms.n.m.)	Caudal pico (Qp)	Volumen Río Dulce (m ³)	Δ volumen (m ³)
2	oct-81	nov-81	31	70,565	105,1922	210936,1699	210936,1699
3	feb-82	may-82	89	70,57	323,1219	211212,9882	-3575,113118
4	jun-82	abr-83	304	70,505	617,261	207637,8751	10313,73143
5	abr-83	jul-83	91	70,69	121,07	217951,6065	5180,859864
6	jul-83	dic-83	153	70,78	132,3252	223132,4664	-13024,91874
7	dic-83	jul-84	213	70,55	761,0496	210107,5476	27754,49097
8	jul-84	dic-84	153	71,025	161,17	237862,0386	934,6565604
9	dic-84	jul-85	212	71,04	441,191	238796,6952	7953,305542
10	jul-85	oct-85	92	71,165	118,518	246750,0007	2282,316387
11	oct-85	feb-86	123	71,2	469,144	249032,3171	-4379,328191
12	feb-86	jun-86	120	71,1325	231,89	244652,9889	-7101,601064
13	jun-86	nov-86	153	71,02	124,021	237551,3878	6140,812933
14	nov-86	mar-87	120	71,12	438,046	243692,2008	243692,2008
					Total	2979316,283	487107,5833

Tabla 35: Análisis de volúmenes en Río Hondo para el Ciclo 2.

Ciclo 2							
Río Hondo (RH)							
Hidrograma	Tiempo inicial (mes)	Tiempo final (mes)	Tp (días)	Niveles (ms.n.m.)	Caudal pico (Qp)	Volumen Río Dulce (m ³)	Δ volumen (m ³)
1	ago-91	oct-91	61	69,3	119,86023	146274,2987	146274,2987
2	oct-91	jun-92	244	69,405	431,8526	153200,4488	31927,49381
3	sep-92	nov-92	61	70,075	132,83	185127,9426	31687,53237
4	nov-92	abr-93	151	70,7	525,9902581	216815,4749	216815,4749
					Total	701418,165	426704,7998

Por la falta de datos en niveles desde el 1998-2000, se ha podido realizar el mismo análisis que en los anteriores casos para el tercer ciclo. Por lo tanto tendremos que tener en cuenta la falta de un punto de control en la verificación de las metodologías presentadas.

2. Volumen ambiental para la Laguna Mar Chiquita

Con relación al marco legal, en el año 1990, el sistema Bañados del río Dulce y Laguna Mar Chiquita fueron declarados “Sitio Hemisférico” por la “Red Hemisférica de Aves Playeras”. En 1994 por Decreto 3.215, se reconoció a la Laguna Mar Chiquita y su área de influencia como “Reserva Natural Provincial”. En el año 2001 se incorporó el sistema, en el listado de “Sitios Ramsar” creados por la Convención de Ramsar sobre Humedales de nueve países del mundo (con Ley Nacional de adhesión N° 23.919/91), constituyendo el sitio número 11 de Argentina. La Convención sobre los Humedales de Ramsar constituye actualmente el único tratado medioambiental que se ocupa de ecosistemas específicos de humedales y es el primero en vincular la conservación de los recursos naturales con su uso sostenible. Finalmente este sistema integra la “Red Internacional de Lagos Vivos”, lugar que comparte en Sudamérica solamente con el Pantanal brasileño.

En el año 1967, se firmó el Convenio de Partición de las Aguas del Río Dulce, entre las provincias de Tucumán, Santiago del Estero y Córdoba. El mismo fijó las bases para la distribución de las aguas del Río interprovincial Salí-Dulce, en base a estudios hidrogeológicos y teniendo en cuenta las necesidades de las provincias para bebida y alimentación y la conservación del “equilibrio hídrico y climático de la región”.

Se fijó sobre un derrame medio anual de 3600 Hm³ que la provincia de Tucumán utilizara el 32%, y dejara escurrir el resto hacia aguas abajo. Sobre este pasante, Santiago del Estero deberá dejar escurrir por el Dique Los Quiroga el 22% (de los aforando en El Sauce y descontando pérdidas por evaporación o infiltración). Sobre estos porcentajes se firmó el siguiente convenio transcrito:

CONVENIO DE PARTICIPACIÓN DE LAS AGUAS DEL RÍO DULCE TUCUMAN - SANTIAGO DEL ESTERO – CORDOBA

“Entre las provincias de Tucumán, Santiago del Estero y de Córdoba, representadas en este acto por sus excelencias los señores Gobernadores General Auditor (RE) Fernando Aliaga GARCIA, General Auditor (RE) Carlos Alberto URIONDO y Doctor Don Miguel FERRER DEHEZA, respectivamente, quienes firman al pie en prueba de conformidad y cuyas firmas son refrenadas por S.S. los ministros de Obras Públicas de la Provincia de Santiago del Estero, Ingeniero Don Ricardo LALOR y de Gobierno, Culto y Justicia de la Provincia de Córdoba, Doctor Don Adolfo Oscar RUIZ y con el objeto de fijar las bases para la distribución de las aguas del Río interprovincial Salí-Dulce, entre las provincias contratantes; y Considerando:

Que la Nación, por intermedio de su organismo Técnico, Agua y Energía Eléctrica, ha realizado los estudios hidrogeológicos que permiten estimar el derrame medio anual del mencionado río.

Que teniendo en cuenta las necesidades actuales y futuras de las provincias de Tucumán, de Santiago del Estero y de Córdoba, como así también a los fines de satisfacer las necesidades de bebida y alimentación de las depresiones naturales del terreno para conservar el equilibrio hídrico y climático de la región inferior del citado río, las partes signatarias, CONVIENEN:

ARTICULO PRIMERO: *Las bases técnicas para la distribución de las aguas del Río Sali-Dulce, serán los estudios hidrogeológicos realizados por Agua y Energía Eléctrica de la Nación que estima un derrame medio anual de (3600 Hm³) tres mil seiscientos hectómetros cúbicos, con recursos hídricos normales del mencionado río.*

ARTICULO SEGUNDO: La Provincia de Tucumán utilizará hasta el (32%) treinta y dos por ciento del derrame total anual de la Cuenca del Río Dulce-Salí y dejara escurrir el resto aguas abajo; a partir del Dique Los Quiroga, el (22%) veintidós por ciento del derrame total anual recibido aforando en “El Sauce” con la sola deducción de las pérdidas naturales de evaporación o infiltración, producidas hasta la estación de aforo referida.

ARTICULO TERCERO: Toda Obra que se ejecutare por cualquiera de las provincias contratantes para nuevos aprovechamientos de los recursos hídricos a objeto de ampliar, mejorar o racionalizar los existentes, no podrá modificar los porcentuales de disponibilidad establecidos en el artículo anterior.

ARTÍCULO CUARTO: Una comisión permanente integrada por un representante de cada una de las provincias interesadas: de Tucumán, de Santiago del Estero y de Córdoba, y otro a propuesta de Agua y Energía de la Nación, tendrá a su cargo:

- a) Vigilar el estricto cumplimiento del presente convenio;
- b) Realizar un estudio definitivo tendiente a asegurar el aprovechamiento integral de los recursos hídricos.

ARTICULO QUINTO: Las partes se someten a la jurisdicción ordinaria y exclusiva de la Exma. Cámara (Corte) Suprema de Justicia de la Nación. (Artículo 101 de la Constitución Nacional).

ARTICULO SEXTO: El Presente convenio entrará en vigencia cuando haya sido ratificado por sendas leyes de las provincias, a cuyo fin el Gobernador de una, cursara aviso de la ratificación a los Gobernadores de las otras, contándose la vigencia desde la fecha de la promulgación de la última ley aprobatoria. Asimismo, se solicitará la ratificación formal por ley de la Nación.

ARTICULO SÉPTIMO: En prueba de conformidad, los Gobernadores de las Provincias de Tucumán, de Santiago del Estero y de Córdoba, firman el presente en cinco ejemplares (un original y cuatro carbónicos), cada uno de los cuales será y constituirá un original, tres de ellos se entregarán a las provincias signatarias y un cuarto a Agua y Energía de la Nación. El quinto ejemplar una vez entrado en vigencia el convenio, será remitido en forma conjunta por los Gobiernos al Superior Gobierno de la Nación, a los fines establecidos en el artículo 107 de la Constitución Nacional y para su ratificación.

CELEBRADO EN LA CIUDAD DE SANTIAGO DEL ESTERO, A LOS TRES DIAS DEL MES DE JULIO DEL AÑO MIL NOVECIENTOS SESENTA Y SIETE”.

Con relación a este Convenio cabe destacar determinados apartados. En el caso del artículo cuarto, en el que se plantea la participación de una comisión permanente con integrantes de cada una de las provincias participantes, hasta el momento no se ha realizado ningún estudio definitivo que se especifique el aprovechamiento integral de los recursos en la cuenca del Río Dulce, por lo tanto los porcentajes de derrame total anual en la cuenca del Río Dulce siguen siendo los establecidos en el convenio Río Dulce firmado en el 1967.

Una de las propuestas que se plantean en este estudio es evaluar si dichos porcentajes vienen siendo respetados con la ayuda de los datos obtenidos en cuanto a volumen de agua transportado por Río Hondo y ingresante a la Laguna; y la supervisión de los porcentajes de distribución del Río Dulce a las distintas provincias apoyado en estudios de evaluación sobre los cambios producidos en el ecosistema lagunar, durante este último periodo.

Para concluir con algunos de los aspectos comentados anteriormente identificamos cuál es la situación actual para la Laguna con la ayuda del análisis de los ciclos estudiados en la serie histórica, estando ésta en un periodo de bajante de mayor extensión que en los anteriores, alcanzando niveles cercanos a los 68 m s.n.m. A pesar de que, fases de bajantes se dieron en ciclos previos, cabe mencionar que las condiciones actuales son bien distintas a las de años anteriores, registrando valores extremos tanto en el nivel máximo como en el mínimo. Esta amplitud está dando lugar a determinados fenómenos, como las analizadas “tormentas de sal”.

Se tendrá en cuenta que consecuencias tiene en las áreas circundantes a la Laguna, como por ejemplo la salinización de suelos y campos de cultivo. La salinización del suelo puede llegar a producir la pérdida de la fertilidad, la disminución de la infiltración y la toxicidad de algunas sales para los cultivos. Por su parte, la cantidad de concentración salina presente en la Laguna como se está viendo incrementada por la acusada bajante de los niveles, alterando la reproducción de algunas especies como el pejerrey.

Con los resultados anteriores se pretende establecer cuál es la relación entre la cantidad de agua necesaria aportada por el río Dulce para que se sostengan las características fundamentales del ecosistema y se mantenga un determinado volumen en la Laguna que regule el periodo de tiempo de inundación de la misma e inunde periódicamente las playas salinas del Norte.

Con esto se busca permitir que el volumen de agua de la Lagunas fluctúe entre ciertos valores (evitando extremos críticos) para que se asemeje a lo que sucede en ambientes naturales no influenciados por la acción antropica.

En la observación del último ciclo de la Laguna se aprecia que la rama descendente se ha extendido en duración más de lo registrado en los ciclos previos, por lo que una de las cuestiones que se plantea en el presente estudio es establecer un ciclo ambiental en función de las variables analizadas; caudales de Río Hondo y niveles de la Laguna asociado al mínimo ciclo medido.

Se busca apoyar, establecer y evaluar la generación de metodologías de intervención para alcanzar un manejo integral de la cuenca. Bajo un enfoque “ambiental” se plantea la exigencia de un caudal pico o máximo, para cada ciclo, superior a los 900 m³/s con un claro ascenso y mantenimiento de los niveles en el cuerpo lagunar y unos valores mínimos entre 300 y 400 m³/s.

Este planteamiento vendría definido como ciclo ambiental en el que en base a las series estudiadas se muestra que el segundo ciclo de la Laguna, definido como Ciclo 2, se podría asumir como ciclo mínimo a partir del cual definir el **ciclo ambiental del sistema**.

A partir de la evaluación de dicho ciclo, se destaca que el mismo está constituido de una rama ascendente de unos dos años de duración (Δt ascendente) y otra descendente, de unos tres años de duración, (Δt descendente), asociado a una diferencia de volumen (Δ Volumen) determinada en la Laguna, que dentro del comportamiento cíclico de la misma mantienen unos niveles aceptables sin que se produzca, como lo ocurrido

recientemente, la falta de inundación de la zona Norte del cuerpo de la Laguna y la deposición de sal durante un periodo muy extenso de tiempo con el consecuente aumento de las concentraciones salinas en esta zona.

En la Figura 92 se identifica el ciclo mínimo asociado a los niveles de la Laguna. A partir de este análisis se deduce que el volumen máximo obtenido resulta de 70541 m³ para un “ Δt ascendente” de 609 días, y para un Δt de la rama descendente de unos tres años donde se alcanzan, de nuevo niveles mínimos en la Laguna cerrando el ciclo evaluado.

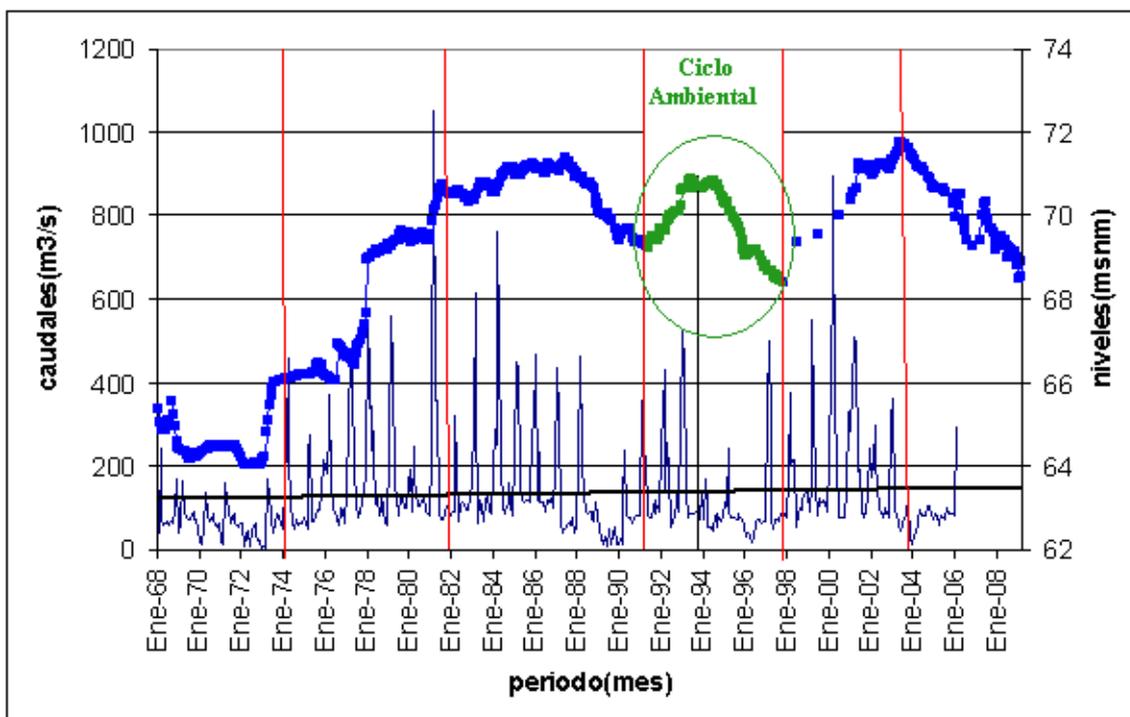


Figura 92: Identificación del ciclo mínimo con relación a los niveles de la Laguna.

La razón de por que se ha seleccionado el segundo ciclo de la serie estudiada, para definir el ciclo ambiental es porque corresponde al ciclo de menor duración. Para este ciclo no se producen grandes deposiciones de sal en las zonas que quedarían al descubierto. Con relación a los caudales erogados por Río Hondo, el manejo posterior a la duración del ciclo, debe contemplar caudales que superen al menos los 300-400 m³/s para la recuperación de los niveles y de este modo comenzar un nuevo ciclo.

Se asumieron los valores obtenidos en la Tabla 35, donde corresponde para el segundo ciclo un volumen total erogado por Río Hondo de 701418,165 m³ obtenidos en base a la suma de 4 hidrogramas medidos en la serie y para el intervalo de duración de la rama ascendente del ciclo. Este volumen representa el 10% del volumen calculado para la Laguna, igual a 70541 m³, durante el mismo intervalo. De esta forma estamos dentro de los porcentajes establecidos en el Convenio de partición de Aguas antes citado.

Así el ciclo ambiental teórico se define en la Figura 93. El mismo se compone de dos ramas. La rama ascendente presenta un ΔV de 70541 m³, alcanzados en aproximadamente 600 días de duración. La rama descendente presenta un

decrecimiento del ΔV definido para un intervalo de tiempo de 3 años. Se retorna, de esta forma, a la condición inicial de nivel de la Laguna, aproximadamente.

La distribución de valores de la Figura 93 corresponde a valores adimensionales de tiempo y volumen con el criterio del Hidrograma Unitario Adimensional.

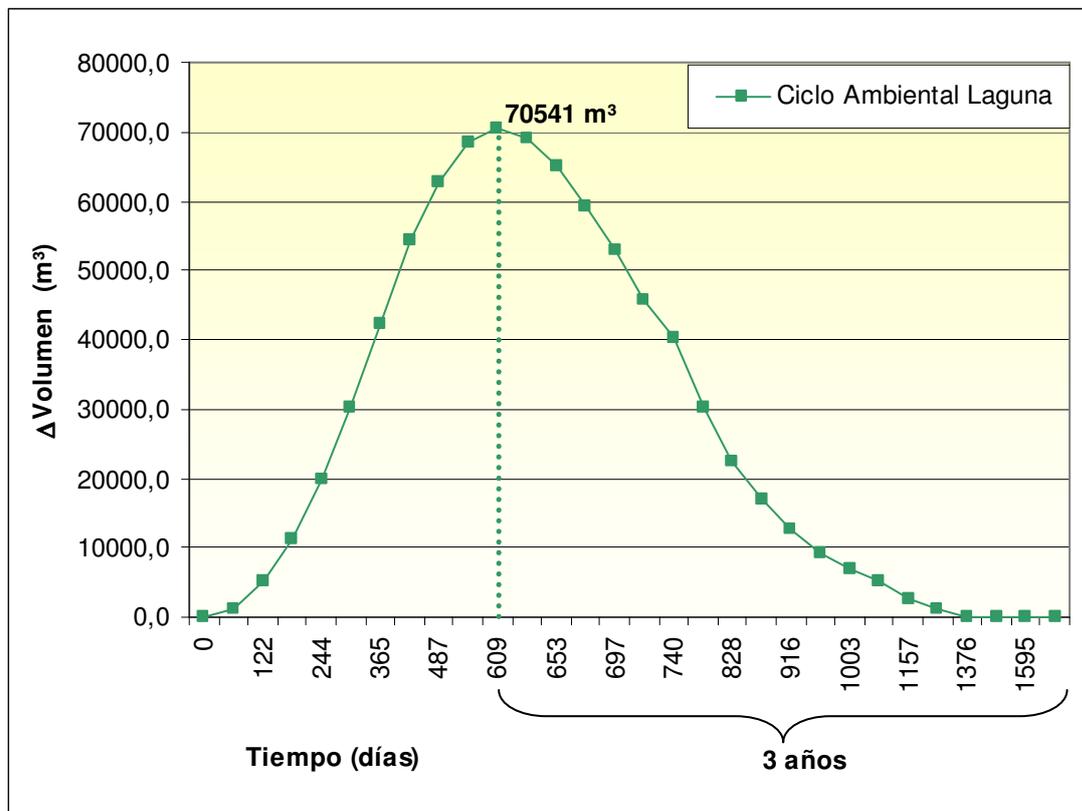


Figura 93: Esquema del ciclo ambiental propuesto para la Laguna Mar Chiquita.

La determinación del ciclo ambiental para la Laguna Mar Chiquita, se basó en establecer cuál es el volumen aportado por Río Hondo que permite definir el diferencial de volumen medido para la rama ascendente durante el ciclo mínimo observado en el sistema. Se definió también, el periodo de duración de la rama descendente que permitirá evitar grandes concentraciones salinas en la playa Norte de la Laguna.

En este estudio se asume como indicador ambiental el parámetro físico – químico establecido en función de las playas salinas.

En la elaboración de las propuestas de este estudio se promueve la implantación de estaciones de medición de vientos en el Norte y Sur de la Laguna, proporcionando datos de interés para la continuación del estudio de estos eventos.

Se propone la implantación de al menos dos estaciones de medición de partículas de polvo y sal, en los departamentos de San Francisco y Villa María. Con estos instrumentos se efectuarían medidas en continuo, del polvo en suspensión, con gran exactitud y dependiendo del dispositivo, se podrían determinar picos de concentración instantáneos que correspondan a un evento real.

El procedimiento de medida de estos aparatos consiste en la determinación de la frecuencia propia de vibración de un dispositivo de vidrio de forma tubular anclado en uno de sus extremos. En el extremo libre se sitúa un pequeño filtro que retiene las partículas existentes en la muestra de aire aspirada de modo continuo por el interior del elemento vibrante; cuanto mayor sea la cantidad de materia recogida en el filtro, mayor será la masa del elemento vibrante y aumenta progresivamente la frecuencia propia de vibración, de manera que la medida de esa frecuencia es una medida directa de la masa total depositada en el filtro.

De este modo podríamos conocer cuál es la granulometría de las partículas suspendidas, cuál es el alcance de estas plumas de sal para saber con certeza el origen de el material suspendido.

Se recomienda supervisar y realizar un seguimiento con apoyo satelital de las formaciones de playas de sal en la Laguna.

CAPÍTULO VIII

Antecedentes de caudales ecológicos para el río Dulce

1. Revisión de antecedentes de estudios relacionados con caudales ecológicos

Las últimas observaciones apuntan a una comunidad mundial preocupada por el desabastecimiento de agua que se puede generar en las cuencas hidrográficas a causa del crecimiento de la población. A los requerimientos de agua para los procesos industriales, y a la generación de energía eléctrica, al enfrentar la problemática del agua que se vislumbra a futuro; todo eso ha llevado a emprender una carrera administrativa para la inversión de capitales en obras hidráulicas, lo que causa una modificación en los ecosistemas fluviales modificando los ciclos de vida en un río donde se requiere un control técnico y ambiental, es decir, un plan de manejo que integre leyes y ambiente a través de procesos de gestión.

El manejo del agua es bastante complejo, debido a su incidencia en el desarrollo social, económico, ambiental y hasta político.

Las obras hidráulicas son tan abundantes en los ecosistemas fluviales que, en la actualidad, son pocos los ríos cuyos caudales no están regulados artificialmente. Por ello, la Gestión del Agua y de los recursos biológicos con ella relacionados debe enfrentarse con frecuencia a la problemática que estas obras originan y en concreto cuantificar los caudales circulantes mínimos capaces de mantener los ecosistemas de los tramos de río regulados.

La creciente preocupación social por el medio ambiente, ha impuesto en la planificación hidráulica la consideración de que en los cauce regulados circulen, al menos, unos “caudales ecológicos” o “caudales mínimos medioambientales”. El concepto de estos “caudales ecológicos” comprende enfoques científicos que normalmente ocupan a profesionales diferentes, con áreas de trabajo disjuntas.

El término caudal es elemento básico de hidrúlicos e ingenieros gestores del recurso agua, mientras que el adjetivo ecológico nos refiere al mundo de la biología y de la gestión de la naturaleza. Por ello, la fijación de caudales ecológicos es una tarea con una clara vocación multidisciplinar.

Elementos esenciales de caudales ambientales

Se entiende como “caudal ambiental” al régimen hídrico que se da en un río, humedal o zona costera para mantener ecosistemas u sus beneficios donde se dan utilidades del agua que compiten entre sí y donde los caudales se regulan. Los caudales ambientales contribuyen de manera decisiva a la salud de los ríos al desarrollo económico y a aliviar la pobreza. Garantizan la disponibilidad constante de los muchos beneficios que aportan a la sociedad los ríos y los sistemas de aguas subterráneas sanas.

Resulta cada vez más claro que, a mediano y largo plazo, no satisfacer las necesidades de caudales ambientales conlleva consecuencias desastrosas para muchos usuarios de los ríos.

Abordar las necesidades hídricas de ecosistemas acuáticos implica a menudo disminuir el empleo del agua por parte de uno o más sectores. Se trata de elecciones difíciles, pero que tendrán que adoptarse para asegurarse la salud a largo plazo de la cuenca y de las actividades que abarca.

Esto significa examinar la cuenca desde sus fuentes hasta los entornos costeros y de estuarios e incluyendo a sus humedales y llanuras inundables. También significa tomar en cuenta los valores ambientales, económicos, sociales y culturales en relación con el sistema total. Para llegar a determinar un caudal ambiental, debe ponderarse una variada gama de resultados, desde la protección ambiental hasta las necesidades del desarrollo industrial y de las personas.

Para establecer caudales ambientales se requiere una gestión activa de la infraestructura como presas, o bien una gestión restrictiva, por ejemplo por medio de la disminución de extracciones para irrigación. Cuando se utiliza la gestión activa del caudal, se puede generar un régimen completo de caudal, incluyendo caudales bajos e inundaciones.

Se refiere a la gestión integral del recurso hídrico cuando se llevan a cabo una serie de acciones estratégicas, que a través de las funciones de planificación, ejecución y control, propongan un aprovechamiento de éste, garantizando su sostenibilidad, sin detrimento del desarrollo socioeconómico.

Mediante la planificación para los diferentes contextos, económica sectorial, urbana, regional y ambiental entre otras, se deben generar procesos organizados de forma científica y técnica, que luego serán ejecutados para lograr los objetivos y metas propuestas, entre las cuales debe considerarse la lógica y la armonía en el funcionamiento entre los diversos componentes de estos procesos y el cumplimiento de reglas y estándares mínimos.

La función de control se garantiza a través de mecanismos de monitoreo, seguimiento, evaluación y la implementación de medidas correctivas, coherentes con la gestión integral.

Ejemplos de intervenciones de gestión de caudales

En la **cuenca Murria-Darling** en Australia, se mejora la inundación que se produce una vez cada cinco años en el bosque Barmah-Millewa por medio de descargas desde una zona de acumulación en la cuenca. Como consecuencia de esas mejores descargas, el *Gran Airón* se reprodujo por primera vez desde 1979, nueve especies de ranas también se reprodujeron, al igual que peces originarios.

El **acueducto Mowamba** en el Plan Hidroeléctrico de los montes Snowy en Australia ha sido clausurado después de cien años, con lo que se duplicaron los caudales en el río desde un 3 a un 6% de los caudales naturales, lo cual significó el comienzo de un compromiso de larga duración para elevar los caudales en el río Snow hasta un 28% de caudales ambientales naturales.

En **Sudáfrica**, se pueden disminuir los derechos de los irrigadores con el fin de proporcionar agua a la “reserva” que se conserva y gestiona en nombre del público para sustentar las necesidades humanas ecológicas. En las **montañas de Lesoto**, la presa Mohale tiene está diseñada para descargar caudales de cantidad y calidad variables, para proporcionar, inundaciones río abajo.

2. Metodologías utilizadas a nivel mundial

En el siguiente apartado explicaremos brevemente algunos de los diferentes métodos más utilizados en el mundo, para la determinación de caudales ecológicos.

- **MÉTODOS BASADOS EN EL ANÁLISIS DE REGISTROS HISTÓRICOS**

También conocidos con el nombre de métodos hidrológicos, los cuales nos permiten obtener de forma rápida los valores de caudal si se cuenta con buenos registros limnimétricos del tramo de estudio.

Estos métodos no requieren de trabajos específicos de campo y en su utilización se asume que los caudales medios permiten el mantenimiento adecuado de las comunidades acuáticas.

En la Tabla 36 se muestran cuáles son las variables utilizadas para cada uno de los métodos hidrológicos.

Tabla 36: Variables utilizadas en los métodos hidrológicos.

Análisis de registros históricos	Variables
Método de Tennant o de Montana	Períodos estacionales del año (húmedo o Seco) y el caudal medio anual
Método de caudal base o de Nueva Inglaterra	Períodos estacionales del año, el caudal mínimo anual y el rendimiento de la cuenca
Método de Northern Great Plains Resource Program (NGPRP)	Períodos estacionales del año y los caudales medios diarios.
Método de Hope	Caudales medios diarios y el ciclo biológico de las especies
Método 7Q10	Caudales medios mínimos diarios.
Método de Arkansas	Períodos estacionales del año, el ciclo biológico de las especies y los caudales medios mensuales.
Método de Texas	Características hidrológicas y biológicas, la diversidad específica y los caudales medios mensuales.
Método de Caudal Base	Especies piscícolas, los macroinvertebrados y los caudales medios mensuales.

- **MÉTODOS BASADOS EN CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS Y DE CAUDAL**

Se conocen también con el nombre de métodos basados en secciones transversales, los cuales relacionan el caudal y las características físicas de los cursos de agua, como son el perímetro mojado, la velocidad y la profundidad del flujo, sin tener en cuenta las preferencias específicas del hábitat de las especies a lo largo del ciclo de vida; para ello se considera una o más secciones transversales en el tramo de estudio del río.

Tabla 37: Variables utilizadas en los métodos basados en características hidráulicas y de caudal.

Características hidráulicas y de caudal	Variables
Método de Colorado de la región 2 de U.S.F.W.S.	Perímetro mojado, la velocidad media y la profundidad.
Método de Idaho.	Tipo de sustrato, la velocidad media, profundidad y el perímetro mojado.
Método de la región 4 U.S.F.W.S	Caudales mínimos, el tipo de sustrato y las características de las márgenes.
Método del perímetro mojado	Tipo de sustrato, la velocidad media, la profundidad y el perímetro mojado.

- **MÉTODOS BASADOS EN LA RELACIÓN HÁBITAT Y CAUDAL**

Se conocen también con el nombre de métodos ecohidráulicos, los cuales se analizan en secciones transversales del río, subdivididas en pequeñas celdas en las que se relacionan el hábitat y la velocidad del flujo con el objeto de evaluar los efectos que producen cambios incrementales de caudal en la estructura del cauce, la calidad del agua, la temperatura y la disponibilidad de hábitat físico utilizable a través de una combinación de datos hidráulicos, hidrológicos y biológicos (Díez, 2005); se citan los métodos más avanzados para la determinación del caudal ecológico.

Tabla 38: Variables utilizadas en los métodos ecohidráulicos.

Relación hábitat y caudal	Variables
Método de "WRI Cover"	Cobertura vegetal, los caudales medio anuales, la longitud y el área de la sección.
Método de Washington	Velocidad, la profundidad de flujo, el caudal y el ciclo biológico de las especies.
Método de California o Método de Waters	Velocidad, la profundidad de flujo, el área de la subsección y el sustrato.
Método de Oregón	Velocidad, la profundidad de flujo, el caudal, el ciclo biológico de las especies y valor del hábitat.

Metodología IFIM - PHABSIM	Profundidad y velocidad del flujo, sustrato, cobertura y el ciclo de vida (alevinos, juvenil y adulto) o sus actividades específicas (reproducción, desove, alimentación o reposo), que se reflejan en las curvas de preferencia.
Método de Texas	Características hidrológicas y biológicas, la diversidad específica y los caudales medios mensuales.
Método de Caudal Base	Especies piscícolas, los macroinvertebrados y los caudales medios mensuales.

Criterios para la determinación de los caudales ambientales en el río Ebro

(Fuente: Sánchez, 2007. Análisis de aplicabilidad de criterios y métodos de cálculo para la determinación de caudales ambientales en la cuenca del Ebro. IRTA. Informe inédito)

Los criterios para la determinación de los caudales ambientales que se recomiendan para su consideración y tratamiento surgieron de la elaboración del Plan Hidrológico de la Demarcación del Ebro. **Estos consideran métodos hidrológicos.**

Los caudales ecológicos para una masa de agua determinada serán diferentes según los objetivos ambientales de la misma. **En el caso de las zonas protegidas los caudales ambientales deben ser definidos a partir de sus objetivos y normas de protección específicas, mientras que en las masas de agua fuertemente modificadas se deben definir a partir de las disponibilidades resultantes del balance entre recursos y demandas, una vez consideradas todas las medidas de atenuación viables.**

Para las masas de agua consideradas naturales se puede admitir (con ciertas reservas) la validez de criterios numéricos generales para la determinación de sus caudales ambientales. Con la intención de avanzar en esta línea pero sin olvidar la necesaria prudencia, a continuación se presentan algunos criterios numéricos establecidos genéricamente para alcanzar el **Buen Estado** de los ríos de la Demarcación del Ebro en el sentido la legislación europea vigente (DMA).

Los criterios numéricos han sido obtenidos en el estudio “Análisis de aplicabilidad de criterios y métodos de cálculo para la determinación de caudales ambientales en la cuenca del Ebro” Sánchez, 2007.

Estos contemplan condiciones hidrológicas húmedas, medias y secas con relación a episodios de mínimos, régimen mensual y limitaciones de caudales máximos en base a percentiles, regímenes de crecidas por caudales interanuales y duplicidad de módulo.

Metodología MESA

A continuación se presentan algunas reflexiones acerca de los criterios utilizados para definir los caudales remanentes en ríos, y procura demostrar la insuficiencia del criterio tradicional de caudal ecológico como un valor único, válido para todos los años y para todas las estaciones del año.

La cantidad de agua necesaria para la sustentabilidad de un río es variable en el tiempo y los criterios de definición de caudal remanente en ríos deben contemplar no sólo las situaciones de caudales mínimos durante los períodos de sequía, sino que también el resto de períodos que caracterizan el régimen hidrológico.

La calidad ambiental de un río y de los ecosistemas asociados, depende fuertemente del régimen hidrológico, incluyendo la magnitud de caudales mínimos y caudales máximos, y del tiempo de duración de los períodos de sequía, frecuencia y tiempo de ocurrencia de las lluvias y sequías (Poff *et al.*, 1997; Bunn y Arthington, 2002; Postel y Richter, 2003; Naiman *et al.*, 2002).

En el siguiente trabajo se presenta una metodología adaptativa, propuesta por Richter *et al.* en el año 2003, para definición de caudales que deben mantenerse para compatibilizar la sustentabilidad ambiental y los usos del agua.

Esta metodología es más amplia que un criterio de caudal ambiental, y puede evolucionar a través de una discusión en un forum regional como un comité de cuenca.

En Brasil, cuestiones relativas al impacto ambiental de las centrales hidroeléctricas están siendo discutidas, de forma mas intensa, a partir de la formulación de la Resolución 01/86 del Consejo Nacional de Medio Ambiente (CONAMA), obligando a la elaboración de un Estudio de Impacto Ambiental (EIA) o *Relatório de Impacto Ambiental* (RIMA), durante a década del '80.

La gran limitación de metodologías basadas en el concepto de caudal ecológico, caudal remanente o residual es que estas metodologías están enfocadas sobre un caudal mínimo, donde apenas existe la preocupación en definir otros aspectos del régimen hidrológico que son fundamentales para la manutención de los ecosistemas.

A partir del análisis de dos Hidrogramas; el primero del río Sao Francisco en Juazeiro y Morpará, resaltamos que el caudal ecológico no debe estimarse como un valor único, sino como un conjunto de valores, que deben ser establecidos, respetando la ocurrencia temporal, de tolerancia y necesidades de las especies.

El actual criterio utilizado en Brasil, el mantenimiento de caudales iguales o superiores a determinados limites (caudales ecológicos), durante la época de estiaje, no garantiza la manutención de calidad del ecosistema.

El método propuesto por Richter *et al.* (2003), se denominó Manejo Ecológicamente Sustentable de Agua (traduzido a partir de Ecologically Sustainable Water Management – ESWM). La propuesta de Manejo Ecológicamente Sustentable de Água (MESA) busca una gestión de los recursos hídricos de una manera que se atiendan las necesidades de los usos humanos y al mismo tiempo que se mantengan y recupere la integridad de los ecosistemas.

La metodología MESA está organizada en seis pasos:

1. Estimar necesidades de caudal para la conservación de los ecosistemas naturales asociados al río;
2. Estimar las necesidades de caudal actuales y futuras para el consumo humano;

3. Resolver los conflictos entre usos humanos y necesidades de los ecosistemas;
4. Buscar soluciones para los conflictos de forma integrada;
5. Realizar experimentos prácticos de manejo del agua;
6. Establecer un programa de manejo adaptativo, basado en monitoreo hidrológico y ambiental, con el objetivo de reducir las incertidumbres y resolución de posibles conflictos.

Un aspecto muy importante que debe ser destacado en la siguiente metodología es que implica una gran acción integrada, sobretodo con la participación de diversos actores relacionados al escenario de manejo del recurso hídrico. Otro aspecto fundamental es que la metodología es adaptativa, a medida que se profundizan los conocimientos de las relaciones entre el régimen hidrológico y el ecosistema.

Las necesidades de caudal en un ecosistema pueden ser especificadas en rangos de valores en que el Hidrogramas debe ser mantenido, como valores individuales que deben ser alcanzados, superados o evitados.

Para la estimación de las necesidades de caudal de un ecosistema se requiere la contribución de un grupo interdisciplinar de científicos con relativa familiaridad con los procesos ecológicos e hidrológicos de la región. También es importante contar con el conocimiento de las personas residentes de la zona tienen sobre el propio ambiente.

El régimen natural del río (anterior a las grandes modificaciones) tiene que servir como un marco, para guiar el proceso, una vez que las especies existentes en el ecosistema estén adaptadas a las nuevas condiciones de régimen. Debido a la dificultad en predecir el comportamiento en el ambiente con seguridad, el Hidrograma ecológico establecido debe ser, lo mas parecido posible al Hidrogramas natural.

Es muy importante que sean realizadas las hipótesis explícitas sobre la relación entre el caudal en ríos y la biota durante este primer paso de la metodología.

La etapa de estimación de las necesidades de caudal en un determinado ecosistema puede ser facilitada con participación de los diferentes actores, inclusive las instituciones responsables del manejo de agua para consumo humano. Profesionales relacionados con manejo de agua, como los representantes de asociaciones de regantes, de defensa civil y otros representantes de empresas de generación de energía eléctrica y de abastecimiento, pueden colaborar en la realización y prescripción de caudal o hidrograma ecológico. Teniendo en cuenta cómo las decisiones de manejo de agua afectan a los ecosistemas, ampliando su sensibilidad y colaborando con la búsqueda de posibles soluciones.

La metodología (MESA) tiene aplicaciones en cuencas en los Estados Unidos, donde existe una realidad bastante diferente de la brasileña en diversos aspectos: disponibilidad de datos, conocimiento de relaciones entre régimen hidrológico y ecología de especies locales (especialmente peces) y la preocupación de la sociedad en cuanto a problemática ambiental

3. Metodologías utilizadas a nivel nacional

(Fuente: Proyecto de gestión Integrada y Plan Maestro de la Cuenca del Río Pilcomayo, 2007. “Estudio de Línea Base Ambiental y socioeconómica (LBAyS) de la cuenca del Río Pilcomayo”)

Contexto y desarrollo de la LBAyS.

La cuenca del río Pilcomayo con una superficie de 288.360 Km² y una población total de 1,5 millones de habitantes, se extiende cubriendo parte del territorio de Argentina, Bolivia y Paraguay. En esta cuenca se conjugan elementos naturales y antropicos que condicionan el complejo y peculiar funcionamiento del sistema, dando origen a un conjunto de problemáticas que se potencian en un marco transnacional, tal como la gran dinámica fluvial (producto de la importante producción de sedimentos de la cuenca), el consecuente retroceso del río, la aleatoriedad en la distribución del recurso hídrico entre los países de la cuenca baja y el impacto causado en los ecosistemas terrestres y acuáticos producto de la contaminación del agua por pasivos ambientales y por la degradación del suelo por la inadecuada y/o excesiva explotación de los mismos.

En el informe se presenta los resultados de todos los trabajos llevados a cabo durante la ejecución del Estudio de la Línea de Base Ambiental y Socioeconómica desarrollado en el contexto institucional y con los siguientes objetivos generales y enfoque metodológico.

El desarrollo del estudio presenta los siguientes objetivos; desde la conceptualización, descripción y análisis de los procesos inherentes a cada una de las temáticas (recursos hídricos, ictiología, ecosistemas terrestres, socio-economía, etc..) hasta la integración ordenada de los resultados y análisis temáticos con el fin de llegar a un modelo conceptual de funcionamiento de la cuenca que plasme especialmente la expresión actual de la interacción entre el medio natural, antrópico e institucional de la región, esto sería muy difícil sin un modelo de análisis común que sistematice el proceso de conceptualización y fusione los resultados

Se plantea la siguiente metodología realizando el análisis de valores extremos (caudales máximo y mínimos) de la cuenca del río Pilcomayo.

En cuanto al análisis de Caudales Máximos se utilizó la distribución de Gumbel, que establece que los caudales anuales son eventos independientes que tienen como función distribución de probabilidad:

$$F(X)=\exp[-\exp(-(x-u)/\alpha)] ;$$

Donde:

$$\alpha = S / \sqrt{6} \pi$$

$u = \text{Moda de la distribución} = \mu - 0,5772 \alpha$; siendo μ el valor medio de la serie y s el desvío estándar.

En cuanto al análisis de Caudales Mínimos, se utilizó la distribución de Wibull, que establece que los mínimos caudales anuales son eventos independientes que corresponden a la siguiente ley:

$$P(Q_{\text{mín}} < Q_0) = 1/R = M/(n+1)$$

Donde:

$P(Q_{\text{mín}} < Q_0)$, es la probabilidad de que el caudal tome un valor igual o menor que el valor de referencia.

M: es el número de orden en la serie de caudales mínimos ordenados de menor a mayor.

n: es el número total de valores disponible para el ajuste estadístico.

En el caso de las estaciones de la cuenca alta analizadas tienen un comportamiento similar por lo tanto responden razonablemente a un ajuste estadístico del tipo:

$$Q = A R^b$$

Donde: Q es el caudal por metros cúbicos por segundo, R la recurrencia en años y a y b son constantes de ajuste.

Se destaca que en el análisis de los caudales plantea se plantean el uso de las expresiones antes mencionadas, sin considerar parámetros ecológicos. Sólo se realiza un análisis hidrológico de la cuenca.

ANÁLISIS DEL RÉGIMEN DE CAUDALES EN EL BRAZO AÑA CUÁ (BAC).

(Fuente: Informe Avance N° 2 "Análisis del régimen de caudales en el brazo Aña Cuá" Definición del régimen de caudales)

En el siguiente estudio se pretende proporcionar evidencias de base científico - técnica para justificar un criterio de manejo de los caudales del BAC atendiendo al siguiente propósito: *“Lograr el mayor aprovechamiento posible (menor lucro cesante) de la capacidad instalada de la Central Hidroeléctrica Yacyretá por derivación de caudales del BAC hacia el BP (brazo principal) compatible con el sostenimiento de condiciones aceptables de integridad ambiental en el sistema”.*

Se tomó como referencia la definición de integridad ecológica que incluye un rango crítico de variabilidad en biodiversidad, procesos y estructuras ecológicas, contexto histórico y regional y prácticas culturales sustentables. Se determinaron cuales son las condiciones aceptables de integridad ambiental, donde se proponen una nueva modalidad de erogación de los caudales en el BAC que acompañe la variabilidad natural del régimen hidrológico, desde el punto de vista de la estacionalidad, variabilidad natural de los pulsos de inundación, ampliándose este concepto con el propósito de relacionar atributos hidrológicos de la variabilidad natural de los pulsos, como frecuencia, amplitud, estacionalidad y recurrencia con indicadores ecológicos.

Un criterio básico, asumido fue crear hidrogramas que contengan datos clave en la variabilidad estacional e interanual. El caudal mínimo garantizado estacional (CMGE), se definió como aquel que “mantiene la variabilidad seleccionada pero igualando el valor mínimo absoluto a su correspondiente de la serie histórica” y determinando el máximo y otros parámetros, a través de la reproducción de la serie histórica de aproximadamente 100 años de datos.

La conveniencia de esta modalidad de erogación es favorable desde el punto de vista energético en comparación con la erogación del caudal medio constante. Esta ventaja es

cuantitativa (mayor energía anual generada) y cualitativa (se pone a disposición la mayor generación en un período de demanda pico).

Para implementar la operación recomendada se sugiere que a partir de un caudal (el medio de la estación en cuestión o el mes en cuestión $\%Q_{promedio_AA} = 0$), se intercepte dicho valor con la curva de CMGE sugeridas para el período de erogación. A partir de este estado se define una cesión de energía en el Brazo Principal (BP), la cual se mantiene si es posible tanto para caudales mayores como menores. Con los caudales menores, siempre encontrará un límite para mantener esta cesión de energía con lo cual luego seguirá por la curva mínima e incrementará la energía cedida, mientras que para caudales mayores incrementará la erogación por el BAC, manteniendo la misma cesión de energía del BP, esto le permite ir cambiando de curva seleccionada de caudales a erogar.

No obstante lo explicado, queda profundizar en la última etapa, para determinar si es suficiente analizar los escenarios de erogación con la evaluación presentada en dos períodos del año (invierno - verano) o convendría tener el año dividido en más períodos.

Para esto también se está evaluando la operación en tiempo real, la cual deberá predecir los caudales próximos futuros y definir las características hidrológicas del momento. Para esto último sería de interés que el departamento de hidrología de la central participe en las formas operativas de concreción de esta metodología, se dispone de la serie de caudales de erogación para el período 1971 – 2006. Esta metodología se basó en las curvas de porcentaje de cesión de energía versus porcentaje de caudales ingresantes mensuales, sobre la base de tomar la decisión de los caudales mínimos garantizados a erogar, del mes anterior,

La metodología descrita constituye un marco de manejo que se considera el más racional en el contexto de las opciones posibles. Se definió a partir del conocimiento de la hidrología, en el entendimiento de que es el elemento potencialmente más crítico en los estudios de los “regímenes de caudales ambientales” tanto que ha sido considerado la “variable maestra”, dado que tanto la componente biológica, como los procesos físicos y la calidad del agua se relacionan directamente con esta metodología (Poff et al., 1997).

En el citado trabajo se espera avanzar en las relaciones causales entre los parámetros hidrológicos y los que describen los procesos ecológicos, a fin de acotar las variables de interés a monitorear en la etapa de operación. El monitoreo se propone como una actividad fundamental para evaluar y ajustar las consignas operativas con un criterio adaptativo.

CAPÍTULO IX

Conclusiones y recomendaciones

1. Conclusiones

En el presente trabajo final se aborda el estudio del sistema de la Laguna Mar Chiquita desde el punto de vista hidrometeorológico, con la utilización de técnicas de Teledetección, transporte de sedimentos y métodos estadísticos.

Para evaluar los volúmenes ambientales en la Laguna, se propuso un nuevo indicador ambiental físico químico definido por la extensión y permanencia de las playas de sal, principalmente situadas en la costa Norte de la Laguna, debido al marcado descenso de los niveles medidos desde el año 2003 hasta la fecha. Esta condición asociada a los fuertes vientos, predominantemente con dirección Norte y Sur, generaron la formación de Tormentas salinas registradas en las imágenes satelitales disponibles desde el año 2006. Estos fenómenos se evidenciaron en la imágenes correspondientes a las siguientes fechas: 29 Julio y 20 Agosto 2006, Julio y Agosto del 2008 y 12, 28 y 29 de Agosto del 2009.

Las nubes de sal y polvo asociadas a los fuertes vientos forman plumas alargadas que alcanzan un promedio de 150 Km.

Se abordaron los conceptos físicos relacionados con las tormentas de sal asumiendo como hipótesis; que una vez disgregadas las aglomeraciones entre suelo y sal, a partir de la erosión eólica, se dispone de partículas factibles de iniciar el movimiento. En este tema se desarrollaron los conceptos del Diagrama de Shields, identificando para diferentes diámetros las velocidades críticas a partir de las cuales se identifica la condición del inicio de moviendo y suspensión de las partículas.

En este sentido para diámetros de 10 μm y 1mm, las velocidades críticas identificadas corresponden a valores entre 35 y 70 Km/h.

La actualización de la base de datos incorpora una secuencia de imágenes satelitales Landsat en el periodo 2003-2009, datos mensuales de niveles en la Laguna hasta la fecha, datos de precipitación en las localidades de Miramar y La Rinconada.

A partir de la recopilación y procesamiento de las imágenes satelitales se identificaron las playas de sal basado en la reflectancia de los cristales salinos, utilizando el programa ENVI 4.3. Los contornos sectorizados se georeferenciaron y escalaron en el programa Autocad donde se determinó la mayor extensión alcanzada correspondiente a 20 Km aproximadamente de ancho, para el día 12 de Agosto 2009.

Con los datos hidrometeorológicos actualizados se realizó la identificación de periodos cíclicos y el posterior análisis de tendencia para cada uno de los ciclos de cada serie.

El análisis conjunto de las variables analizadas indica que existieron a lo largo del registro de datos analizados, años secos, húmedos y muy húmedos aun sin la extracción significativa de agua en el sistema.

En el análisis de la serie de datos de niveles mensuales se determinó que esta etapa de descenso de la Laguna corresponde a una extensión natural de la rama descendente del último ciclo identificado. Este periodo de sequía se agravó por la mayor extracción de agua para riego, tanto como para canales declarados ,como clandestinos.

Se evaluó cada rama ascendente de los ciclos analizados en forma detalla, relacionando los volúmenes asociados a los valores de niveles con los respectivos volúmenes erogados por Río Hondo.

El ciclo ambiental teórico se definió en la Figura 93, con una distribución acampanada asimétrica. Se conforma por una rama ascendente que presenta una diferencia de Volumen de 70541 m³, alcanzados en aproximadamente 600 días de duración, la rama descendente presenta un decrecimiento de tiempo de 3 años. Se retorna, de esta forma, a la condición inicial de nivel de la Laguna, aproximadamente. Al volumen alcanzado para la Laguna corresponde un volumen erogado por Río Hondo 90 % mayor que el volumen definido anteriormente.

Se abordó en forma complementaria una revisión de antecedentes de metodologías para definir caudales ecológicos a nivel nacional e internacional, desarrolladas principalmente durante los últimos tres años. Se incluyeron estudios relacionados con la línea de base ambiental definida para la cuenca del Río Pilcomayo y evaluación de caudales ecológicos sobre el Brazo de Aña Cua.

2. Recomendaciones

A fin de consolidar la conservación de la Laguna, se considera recomendable realizar las actividades siguientes:

Contemplar la posibilidad de uso de los sistemas de información geográfica como herramientas de planificación, a fin de optimizar el uso de los recursos naturales y financieros.

A raíz de la problemática observada surge la necesidad de establecer entre las provincias de Santiago del Estero y Tucumán, una política de manejo de la cuenca del río Dulce.

En la definición de los ciclos ambientales del presente trabajo se asumido como indicador testigo las playas de sal, fuente potencial para las tormentas de sal y polvo, para realizar futuros estudios en esta línea de investigación se propone la implantación de estaciones de medición de vientos y de partículas de polvo y sal en el area de alcance de las plumas.

Se propone la implantación de al menos dos estaciones de medición de partículas de polvo y sal, en los departamentos de San Francisco y Villa María. Con estos instrumentos se efectuarían medidas en continuo, del polvo en suspensión, con gran exactitud y dependiendo del dispositivo, se podrían determinar picos de concentración instantáneos que correspondan a un evento real.

Se recomienda supervisar y realizar un seguimiento con apoyo satelital de las formaciones de playas de sal en la Laguna.

Se propone también realizar un relevamiento detallado de los canales de riego tanto para canales declarados y clandestinos, actualizando el registro con aquellos que se identifiquen con la expansión de la frontera agrícola

3. Bibliografía

- Bucher y Herrera (1981). "Comunidades de aves acuáticas de la Laguna Mar Chiquita, Córdoba, Argentina". ECOSUR, Argentina. Vol. 8. Pp. 91-120.

- Bucher, E. (1992). "Population and conservation status of flamingos in Mar Chiquita, Córdoba, Argentina". Humedales para las Américas. Buenos Aires. Argentina.

- Bucher, E. (2007). "Bañados del río Dulce y Laguna Mar Chiquita". Ed. Academia Nacional de Ciencias. ISBN:13:978-987-98313-6-6). Pp: 342.

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

- Chow, Ven Te; D. R. Maidment y L. W. Mays (1994) Hidrología aplicada. McGraw-Hill Interamericana S.A. Santafé de Bogotá, Colombia.

- García Flores, M. y Maza Álvarez, J. A. (1997). "Inicio de Movimiento y Acorazamiento". Capítulo 8 del Manual de Ingeniería de Ríos. ISSN:0185-2345.

-García, M. H., Admiraal, D. M., and J. F. Rodriguez. 1999. "Laboratory Experiments on Navigation-Induced Bed Shear Stresses and Sediment Resuspension." International Journal of Sediment Research, 14:2: 303-317.

-García, M. H.. 2000. "Discussion on 'The legend of A. F. Shields' by John M. Buffington." ASCE Journal of Hydraulic Engineering, 126 (September): 718-720.

- García, M. H. (2007). Sedimentation engineering: Processes, Measurements, Modeling and Practice. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No.110. ISBN: 13:978-07844-0814-8. Ed. American Society of Civil Engineers. Pp.1132.

- Gratton, A. (2008). "Comportamiento Hidráulico de un nuevo sistema de protección contra erosión de suelos". Tesis de grado de la carrera de Ingeniería Civil. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (FCEFyN), Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.

- Hillman, G. (1999). "Análisis y Simulación Hidrológica del Sistema Laguna de Mar Chiquita" Tesis de Grado de Ingeniería Civil. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (FCEFyN), Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.

- Hillman G. (2003) “Análisis y Simulación hidrológica del Sistema Mar Chiquita”. Tesis de Maestría en Ciencias de la Ingeniería. Universidad Nacional de Córdoba. Argentina.
- Pagot, M. (1999). “Análisis y Simulación Hidrológica del Sistema de Bañados del Río Dulce”. Tesis de Grado de Ingeniería Civil. Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.
- Pagot, M. (2003). “Análisis y Simulación Hidrológica del Sistema de Bañados del Río Dulce”. Tesis de Maestría en Ciencias de la Ingeniería-Mención Recursos Hídricos- Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Universidad Nacional de Córdoba (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 Inverisiones (CFI), Córdoba. Argentina.
- Universidad Nacional de Córdoba – Laboratorio de Hidráulica (2001). “Pronóstico Hidrológico de Inundaciones en la Región de Mar Chiquita. Informe IV. Análisis y Propuesta de Caudales e Hidrogramas Ecológicos para los Bañados del Río Dulce”, por Rodríguez, A.; Pagot, M.; Hillman, G.; Caamaño Nelli, G. Laboratorio de Hidráulica. FCEfyN. Pp. 154. (<http://www.efn.uncor.edu/labhidraul.html>)
- Universidad Nacional de Córdoba – Instituto Superior de Rec. Hídricos – Laboratorio de Hidráulica / Universidad Nacional de Santiago del Estero (2007). “Estudio Hidroambiental del sistema Bañados del río Dulce, Laguna Mar Chiquita y tramo inferior del Río Dulce”. Informe Final para la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación.
- Vanoni, V.A. (1974). “Factors determining bed form of alluvial streams”. Journal of Hidroulics Engineering. ASCE, 100(HY3). Pp. 363-378.
- Vide J.P.M. (2002). “Ingeniería de ríos”. ISBN:84-8301-563-3. Ed. Universidad Politécnica de Catalunya. Pp. 58.
- Woodruff y Siddoway (1965). “A Wind Erosion Equation”. Soil Science Society of America. Segoe Rd., Madison, WI 53711 USA. J 29. Pp. 602-608
- Williams, P. H. (1993). “Measuring more of biodiversity for choosing conservation areas, using taxonomic relatedness”. Manus. Col. ISBC: KEI. Ed. Moon. T.Y. Korean Entomological Institute, Seul. Pp. 194-227.
- Universidad Nacional de Córdoba - UNC (2001): “Pronóstico Hidrológico de Inundaciones en la Región de Mar Chiquita. Informe IV. Análisis y Propuesta de Caudales e Hidrogramas Ecológicos para los Bañados del Río Dulce”, por Rodríguez, A.; Pagot, M.; Hillman, G.; Caamaño Nelli, G. Laboratorio de Hidráulica. FCEfyN. Pp: 154. (<http://www.efn.uncor.edu/labhidraul.html>)