

**XXIV CONGRESO NACIONAL DEL AGUA
SAN JUAN, ARGENTINA, 14 al 18 Octubre 2013**

**DEFINICIÓN DE LA COTA MÁXIMA DE INUNDACIÓN
PARA LA LAGUNA MAR CHIQUITA, PROVINCIA DE
CÓRDOBA.**

Mariana Pagot, Gerardo Hillman, Cecilia Pozzi, Paolo Gyssels, Antoine Patalano, Andrés Rodríguez.

**Laboratorio de Hidráulica – Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de
la Universidad Nacional de Córdoba**

A. Filloy s/n. 0351-4334446. mpagot@efn.uncor.edu

Resumen

La Cota Máxima de Inundación de la Laguna Mar Chiquita (ubicada al Noreste de la provincia de Córdoba, Argentina) se definió en base al efecto combinado del máximo nivel histórico registrado y del máximo nivel de tormenta estimado para una recurrencia de 100 años.

Para definir el valor del máximo nivel histórico registrado en la Laguna Mar Chiquita, se trabajó con un registro actualizado de las importantes variaciones de nivel de este cuerpo de agua, consecuencia directa de los ciclos hidrológicos naturales, amplificadas por el manejo y gestión del recurso en la cuenca alta del Río Dulce (principal tributario a la Laguna). Estas variaciones del nivel han sido documentadas en forma diaria y continua durante la última década a través de mediciones directas realizadas sobre escalas limnimétricas ubicadas estratégicamente dentro de la Laguna (mediciones cedidas por la Reserva Provincial de Miramar y Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Provincia de Córdoba). El análisis de estos datos permitió identificar fluctuaciones de más de 4 m desde el máximo valor histórico registrado en el año 2003.

En este trabajo se utilizó la implementación de herramientas de teledetección, conjugadas con la adecuación y aprovechamiento de las citadas mediciones de nivel de agua, para la elaboración de una cartografía efectiva de la topobatimetría de la Laguna Mar Chiquita. A tal efecto se utilizaron datos de elevación del terreno tomando como fuentes los relevamientos de la misión SRTM y mapas temáticos derivados de imágenes LANDSAT (con resolución espacial de 30 m) basados en el proceso de extracción digital de los contornos de agua.

El máximo nivel de tormenta se definió por la acción conjunta del viento (*wind set up*) y de su oleaje asociado (*wave set up*).

Palabras claves: Cota Máxima de Inundación, teledetección, niveles, viento, oleaje.

INTRODUCCIÓN

La Laguna Mar Chiquita (Figura 1) ha manifestado importantes variaciones de nivel del agua, consecuencia directa de los ciclos hidrológicos naturales, amplificados por el manejo y gestión del recurso en la cuenca alta del Río Dulce (principal tributario a la Laguna). Estas variaciones del nivel han sido documentadas en forma diaria y continua durante la última década a través de mediciones directas realizadas sobre escalas limnimétricas ubicadas estratégicamente dentro de la Laguna (mediciones cedidas por la Reserva Provincial de Miramar y Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Provincia de Córdoba). El análisis de estos datos permitió identificar fluctuaciones de más de 4 m desde el máximo valor histórico registrado en el año 2003.

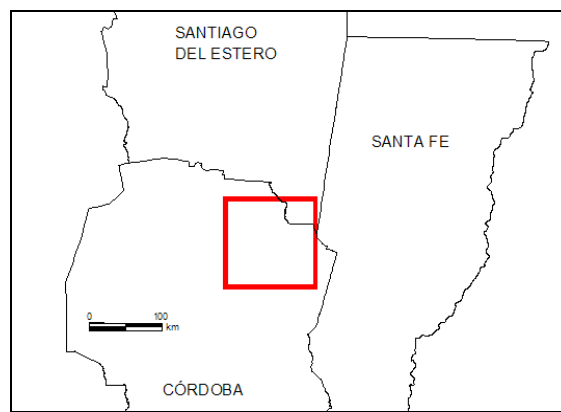


Figura 1. Delimitación del área en estudio de la Laguna Mar Chiquita.

Al ser un sistema endorreico, la respuesta hidrológica del mismo está sujeta a los efectos climáticos de varios ciclos hidrológicos, vale decir, el sistema conserva una memoria y el nivel de agua resulta de la combinación de la respuesta de la cuenca en períodos anteriores y el manejo de la misma.

Este trabajo se basó en la implementación de herramientas de teledetección conjugadas con la adecuación y aprovechamiento de mediciones de nivel de agua disponibles para la elaboración de una cartografía efectiva de la topobatimetría de la Laguna Mar Chiquita. A tal efecto se utilizaron datos de elevación de la misión SRTM NASA, (2004), mapas temáticos derivados de imágenes satelitales LANDSAT y mediciones de nivel de agua en la Laguna.

A tal efecto se utilizaron datos de elevación del terreno tomando como fuentes los relevamientos de la misión SRTM y mapas temáticos derivados de imágenes LANDSAT (con resolución espacial de 30 m) basados en el proceso de extracción digital de los contornos de agua.

El análisis de los niveles medios de agua observados, conjuntamente con la caracterización y definición de la acción del viento (*wind set up*) y su oleaje asociado (*wave set up*), permitió combinar estos efectos y definir la Cota Máxima de Inundación para toda la costa de la Laguna Mar Chiquita.

RECONSTRUCCIÓN TOPOBATIMÉTRICA DE LA LAGUNA

Este trabajo se basó en la implementación de herramientas de teledetección conjugadas con la adecuación y aprovechamiento de mediciones de nivel de agua disponibles para la elaboración de una cartografía efectiva de la topobatimetría de la Laguna Mar Chiquita. A tal efecto se utilizaron datos de elevación de la misión SRTM NASA, (2004), mapas temáticos derivados de imágenes satelitales LANDSAT y mediciones de nivel de agua en la Laguna.

Este análisis se realizó cubriendo un periodo de 10 años (durante 2001 a 2011).

La identificación de zonas que han quedado descubiertas por el agua durante estos últimos años asociados a grandes sequía en este cuerpo lagunar.

Para esto resultó muy útil el proceso de extracción digital de los contornos de agua, asociando las áreas afectadas a mediciones concretas del nivel realizadas sobre cinco escalas limnimétricas ubicadas estratégicamente dentro de la Laguna.

El uso de la teledetección se ha demostrado altamente eficaz en la identificación de grandes contornos de agua en zonas de llanuras bien definidas, donde los modelos digitales de elevación SRTM demuestran sus limitaciones. Las imágenes LANDSAT (con resolución espacial de 30 m) constituyen una alternativa viable para la detección de las zonas afectadas.

Este trabajo presenta una aplicación del uso conjunto de las imágenes LANDSAT con el modelo digital de elevaciones SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) (NASA, 2004) y mediciones de campo en un cuerpo de agua que presenta gran extensión y marcada variabilidad de nivel.

El procesamiento básico de la información topográfica se realizó con el programa ENVI 4.3 (ESRI, 2004). Se identificaron nuevos contornos del cuerpo lacustre y asociarlos a los niveles medidos. Luego por interpolación de datos de la altitud del terreno y de la profundidad de la Laguna se implementaron métodos convencionales geoestadísticos (Ponderación de la Distancia Inversa y Kriging) para la generación y representación de una nueva malla regular de profundidades de la Laguna Mar Chiquita.

Estos datos topobatimétricos se organizaron en una base digital con coordenadas X-Y y profundidad asociada al nivel medio del mar, y se referenció al sistema oficial de la Argentina, Gauss Kruger Posgar94 y Datum: WGS84. Se tomó como base, la información batimétrica de: UNC (1998), Hillman (2003) y Pozzi (2006) y del Centro de la Región Semi árida (CIRSA) del año 1979, presentado en Hillman (1999).

ANÁLISIS DE LAS SERIES DE NIVELES MEDIDOS

Los datos de niveles procesados fueron medidos sobre la costa sur de la Laguna Mar Chiquita, frente a la localidad costera de Miramar. La serie disponible de niveles diarios cubre un periodo de 10 años, desde el año 2001 hasta 2011.

En este trabajo se actualizaron las series de datos de niveles, tomando como base aquellas presentadas en Hillman (2003), Pozzi (2006) y Cereceda (2009).

Estos datos varían entre 68,34 m s.n.m. y 72,14 m s.n.m. habiéndose registrado el máximo valor en el año 2003, año a partir del cual se manifiesta un descenso continuo, encontrándose en la actualidad en cota cercana a 68,50 m s.n.m.

La serie de niveles medios mensuales cubre un periodo de 44 años entre 1967 y 2011 (Figura 2). En el intervalo 1967-2001, los valores de datos mensuales fueron cedidos por la actual Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Provincia de Córdoba.

Desde septiembre de 2001 hasta agosto de 2011, se actualizó la serie de niveles con datos tomados por los Guardaparques de la Reserva de la Laguna Mar Chiquita (de Secretaría Córdoba Ambiente) en Miramar, principalmente por el Sr. Pablo Michelutti, a partir de mediciones directas sobre las escalas antes relevadas.

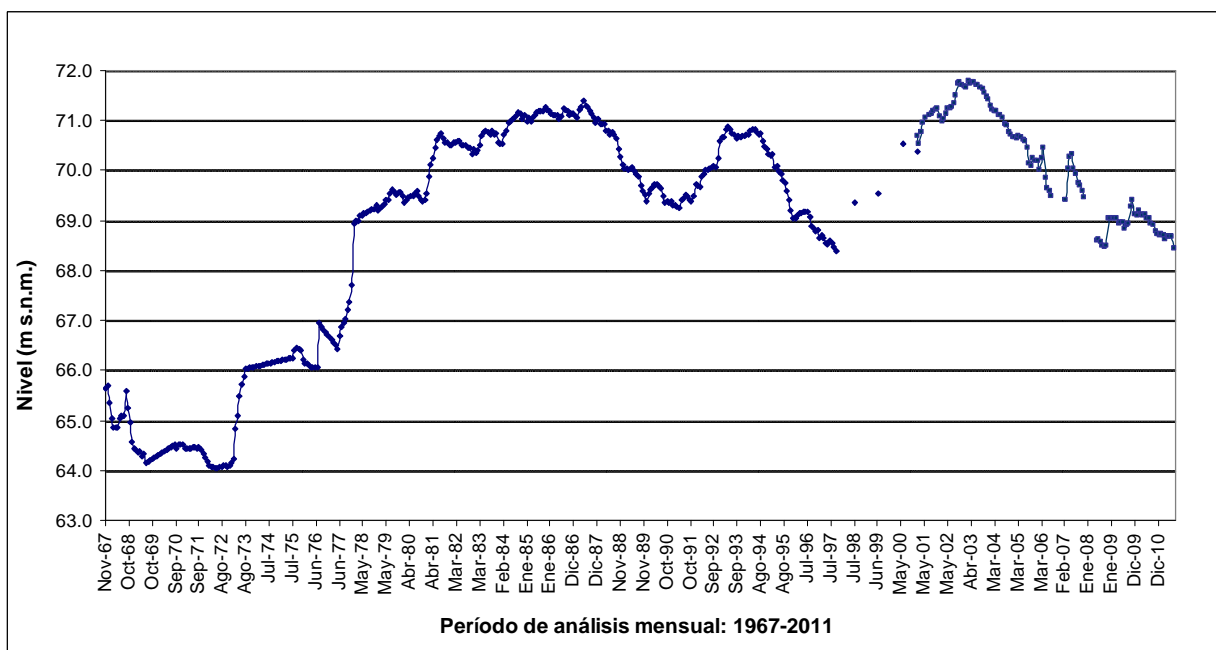


Figura 2: Niveles medios mensuales (m s.n.m.) medidos en la costa Sur de la Laguna Mar Chiquita. Periodo: 1967-2011.

El conjunto de datos medios mensuales varía entre cotas 64,05 m y 71,76 m s.n.m. Se destaca que durante el año 1973 la Laguna incrementó 2 m su nivel, pasando de cota 64,23 m a 66,05 m s.n.m. entre febrero y octubre del mismo año. A partir de este año se produce un notable incremento de nivel llegando a superar los 70,24 m s.n.m. a principios de 1981. Durante junio de 1987, la Laguna alcanzó 71,40 m s.n.m. es decir que en 20 años de registró se observó un incremento de nivel de 7,5 m aproximadamente.

ANÁLISIS DE NIVELES ASOCIADOS A IMÁGENES SATELITALES

Se destaca a partir de los datos disponibles, que la Laguna Mar Chiquita presenta periodos con niveles de agua altamente variables durante los años analizados entre 1967-2011.

En la Figura 3 se asociaron a diversos niveles característicos del periodo en estudio algunas imágenes satelitales que muestran el cambio espacial que se produce en el cuerpo lagunar debido a estas variaciones de niveles.

Las ocho imágenes satelitales, son productos LANDSAT, y fueron adquiridas en los años 1972, 1976, 1980, 1981, 1987, 1997, 2003 y 2011. Durante estos años el nivel de la Laguna varió aproximadamente 7,5 m entre los valores extremos. Su área pasó de 1085 km² en el año 1972 a 6686 km² en el año 2003, contando en agosto de 2011 con 3003 km².


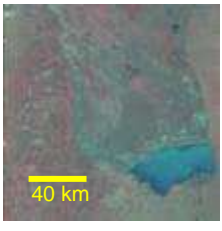




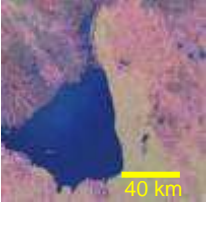
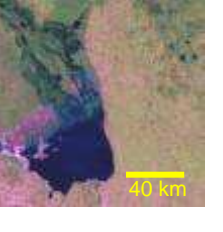
			
Sep-72; 64,22 m	Nov-76; 66,77 m	Jul-80; 69,53 m	Ago-81; 70,73 m
			
Jun-87; 71,40 m	Oct-97; 68,40 m	Jun-03; 71,76 m	Mayo-11; 68,68 m

Figura 3. Secuencia de imágenes satelitales asociadas a niveles medios mensuales s.n.m. en el periodo: 1967-2011.

En la imagen LANDSAT del 01 de septiembre de 1972 se observa una Laguna con nivel igual a 64,22 m (referido al nivel del mar). En esta imagen se puede observar espacialmente el cuerpo de agua con su área más baja registrada satelitalmente.

Durante junio de 2003, el nivel de la Laguna alcanza su máximo valor histórico de 71,96 m s.n.m. en el mes de Marzo, para el intervalo medio mensual.

E. Generación y validación de la base de datos topobatimétrica

Generada toda la información topobatimétrica digitalizada (datos del SRTM, contornos a partir de imágenes satelitales y curvas batimétricas del CIRSA) se debe homogeneizar para obtener una base de datos única y común.

En este caso la base de datos final es un fichero ASCII con las coordenadas X, Y, Z (donde Z es la variable de profundidad y elevación).

Las coordenadas X, Y están en el sistema de referencia oficial para Argentina, que es Gauss Kruger Posgar94 con Datum WGS84. La cota se ha referido al nivel medio del mar.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presentan los datos correspondiente a las curvas de nivel que se utilizarán para generar del modelo digital topobatimétrico para la Laguna Mar Chiquita.

Una vez organizada esta base de datos, se comprobó la coherencia de la misma dado que los datos provienen de fuentes diferentes. Para esto se han buscado y eliminado cruces de líneas de igual profundidad.

F. Generación del modelo digital topobatimétrico

Con la base de datos generada y validada se generó el modelo digital topobatimétrico definitivo para la zona de la Laguna Mar Chiquita, presentado en la Figura 4.

Se ha realizado una interpolación utilizando el utilizó el método geoestadístico Krigging resultando una malla variable entre 60 m por 60 m y 485 m por 485 m. Este paso de malla superior se asocia al que ofrece la base de datos del CIRSA, y el paso de malla menor se ha centrado en el intento de aprovechar al máximo los datos de mejor precisión, es decir, los contornos de agua extraídos de las imágenes satelitales que poseen mayor resolución espacial.

Los límites de la malla se asocian al área de interés definido. Resulta así una malla de 250 columnas por 226 filas.

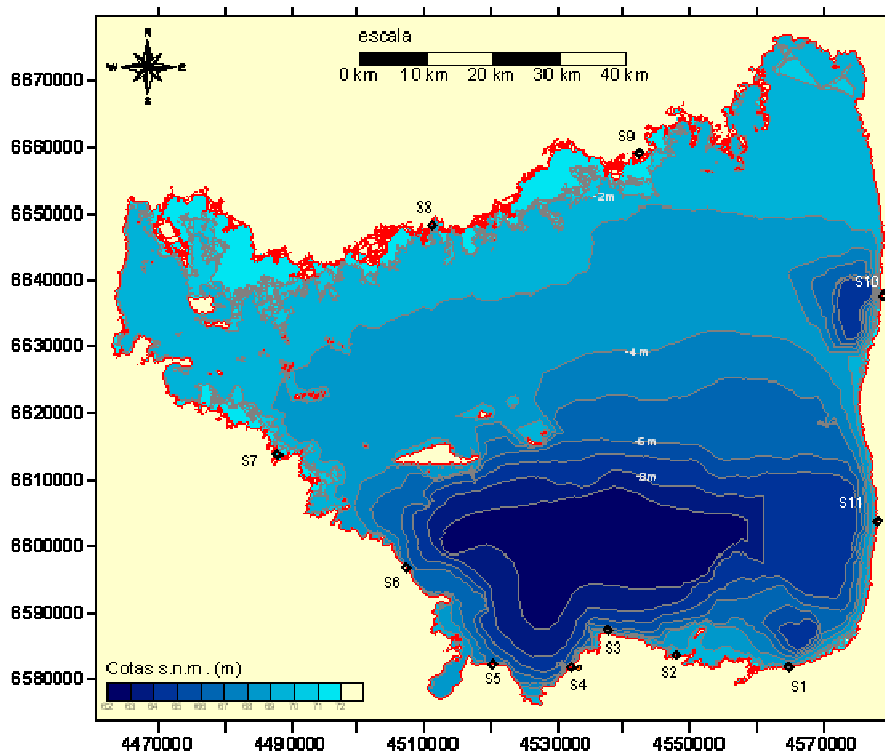


Figura 4. Modelo digital topobatimétrico de la Laguna Mar Chiquita generado.

1.1 Valores de diseño

Los resultados expuestos en el apartado anterior, muestran una diferencia sustancial entre los valores de velocidades procedentes del análisis de la serie del aeropuerto Córdoba (CBA) y del aeropuerto Ceres (CRR). En principio, la serie CBA tiene una duración que duplica a la serie CRR y por lo tanto los resultados de CBAS deberían ser más cercanos a la realidad. De todas formas, no disponiendo de una serie de datos fiable en la zona de Mar Chiquita se ha optado conservativamente por considerar los valores de viento de mayor magnitud, asociados a cada período de retorno.

Los valores de diseño seleccionados a partir de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se muestran en la Tabla 1. En el cálculo de la cota de inundación de diseño estos valores se han aplicado a las direcciones con más frecuencia de ocurrencia, Norte (N), Noreste (NE) y Sur (S) que representan también las direcciones más desfavorables para lo que es el levantamiento del nivel de la Laguna en las costas Sur, Suroeste y Oeste. Además, estas magnitudes han sido aplicadas a los vientos procedentes de la dirección más desfavorable para la costa Este, que resulta ser de la dirección Oeste (O).

Tabla 1. Valores de la velocidad de diseño adoptados para diferentes períodos de retorno en la Laguna Mar Chiquita.

Velocidad de viento (km/hr)

Distribución	$T_R = 25$ años	$T_R = 50$ años	$T_R = 100$ años
Gumbel	102	110	116
Aplicados a las direcciones de procedencia: (0°) N – (45°) NE – (90°) E – (180°) S – (270°) O			

2 DEFINICIÓN DE LA COTA MÁXIMA DE INUNDACION

La Cota Máxima de Inundación se definió, en este trabajo, como la suma del máximo nivel histórico registrado y el máximo nivel de tormenta estimado para una recurrencia asociada.

2.1 MÁXIMO NIVEL HISTORICO REGISTRADO

Se analizaron particularmente, a partir de la serie de niveles diarios, los datos asociados al año 2003 periodo con mayor registro de niveles observados.

Durante este año se registraron tres valores máximos aislados igual a 72,15 m s.n.m., entre los meses de Marzo, Abril y Mayo. En forma complementaria, se evaluó en detalle, la razón por la que estos valores de nivel de agua superan entre 15 y 35 cm a sus valores diarios próximos anteriores y posteriores.

Una explicación a tal fenómeno hace referencia a que los desplazamientos horizontales en gran escala de masa de agua en respuesta al viento se expresan por cambios en el nivel del agua. Von Grumbkow (1980) estimó el rango de variación entre +0,24 y -0,36 m de altura.

Como antecedente particular, se destaca que en Pozzi (2006) se realizó la modelación bidimensional de este cuerpo de agua y para escenarios con viento Norte de 7 km/h se obtuvo como resultado una sobre-elevación del nivel de agua en la costa Sur del orden de 2 cm, mientras que para vientos de 18 km/h la sobre-elevación resultante fue de 18 cm.

Ante la evidencia de que estas sobreelevaciones registradas sean producto del efecto del viento, se construyó la rosa de vientos del mes de mayo de 2003. Los valores utilizados fueron registrados por la estación meteorológica instalada en la Reserva de la Laguna Mar Chiquita en Miramar.

El resultado obtenido permite caracterizar que el 10% de los vientos proviene del sector Nor-noreste con un valor máximo menor a los 20 km/h, y que otro 10% del total proviene del sector Sur-sureste desde donde se registraron mayores vientos durante el mes, de hasta 26 km/h. Se destaca que durante los días 7 y 8 de mayo se registraron datos cada 15 minutos con velocidad de viento promedio de 20 km/h.

Finalmente, se concluye y asume que el valor registrado de nivel (72,15 m s.n.m.) estuvo puntualmente influenciado por el clima de vientos reinante en los días previos a la observación.

Esta situación, permite advertir, y adoptar como máximo valor registrado para la definición de la cota de máxima inundación en la costa de Miramar, un valor igual a **71,9 m s.n.m.** correspondiente al promedio de los niveles medidos durante el primer semestre del año 2003. La adopción de este valor se justifica, debido a que la metodología asumida consiste en aplicar a un nivel de base, el efecto del viento asociado a recurrencias de 25, 50 y 100 años. De esta forma no se estará duplicando este efecto en el análisis desarrollado en el presente trabajo.

2.2 MÁXIMO NIVEL DE TORMENTA

El cálculo del Máximo Nivel de Tormenta se ha realizado utilizando formulaciones empíricas aplicadas en determinados puntos significativos, que se han denominado “puntos objetivos”, elegidos en el contorno de la Laguna. Los resultados dependen tanto de parámetros físicos, geomorfológicos e hidrodinámicos, como de la intensidad, duración y dirección del viento, la batimetría local, la geometría de la costa, la altura y período de ola que se puede generar en la Laguna.

En la Figura 4 se muestran los puntos seleccionados para el cálculo de la Cota Máxima de Inundación (CMI), tomando como línea de costa la cota establecida por el Máximo Nivel Histórico Registrado (MNHR = 71,9 m s.n.m.).

Como se mencionó en la Metodología, el Máximo Nivel de Tormenta (MNT) es el resultado de la suma de la sobre-elevación por arrastre del viento en la superficie, “Wind Set-Up”, y el “Run-Up” debido al oleaje irregular incidente en la costa, ambos calculados por diferentes períodos de retorno T_r :

$$MNT (T_r) = WSU (T_r) + RU (T_r) \quad (\text{Ecuación 1})$$

El “Wind Set-Up” se ha calculado utilizando las ecuaciones de conservación de la cantidad de movimiento y de continuidad promediadas en la columna de agua (Kamphuis, 2000) en una aproximación unidimensional. El valor aproximado del Wind Set-Up depende de la intensidad del viento y de la batimetría local. Para estimar este parámetro se ha considerado la intensidad del viento para 100 años de recurrencia. La batimetría local en correspondencia de cada punto objetivo ha sido determinada trazando secciones perpendiculares a la costa en correspondencia de dichos puntos objetivos.

La ecuación unidimensional (1D) utilizada en este trabajo es la siguiente (Kamphuis, 2000):

$$\frac{dS}{dx} = \frac{\zeta(U \cos \phi)}{gD} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde (**Error! No se encuentra el origen de la referencia.**):

S: sobre-elevación o “Wind Set-Up” dado por el viento [m];

x: distancia sobre la cual la sobre-elevación es calculada [m];

- ζ : Constante = $3.2 \cdot 10^{-6}$;
 U: velocidad del viento [m/s];
 ϕ : Ángulo entre la dirección del viento y la dirección x;
 d: profundidad antes de la sobre-elevación [m];
 D: es la nueva profundidad ($d+S$) calculada en cada discretización Δx [m].

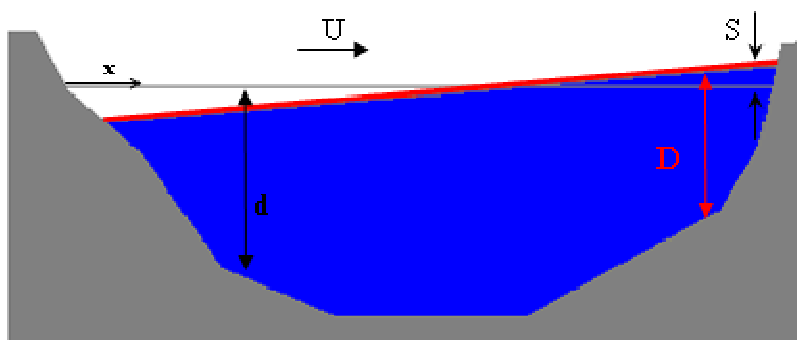


Figura 5. Esquema del wind set-up en un lago por efecto de un viento constante U.

La ecuación utilizada asume condiciones estacionarias ($\frac{\partial}{\partial t} = 0$) considerando que el viento sopla siempre en la misma dirección. Con estas hipótesis se calculó la máxima sobre-elevación posible, que representa un valor conservativo en un estudio de factibilidad.

En un cuerpo de agua cerrado, como en el caso de Laguna Mar Chiquita, cuando el esfuerzo del viento genera una sobre-elevación en un lado de la Laguna se produce una reducción de los niveles en el lado opuesto (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

El “Run-up” es el ascenso máximo vertical local que se produce sobre el talud de playa debido a los efectos del oleaje irregular durante el proceso de rotura. En este trabajo se ha optado por utilizar formulaciones empíricas que tienen en cuenta la altura de ola en aguas profundas, la longitud de onda del oleaje incidente y la pendiente de la playa.

Por lo tanto, previo al cálculo del “Run-Up”, ha sido necesario estimar las características del oleaje en aguas profundas. El oleaje se genera y propaga en lo que se denominan “aguas profundas” cuando la altura de ola es mucho menor que la profundidad. Esta condición no se verifica en la Laguna Mar Chiquita debido a los oleajes utilizados en el cálculo, por lo tanto en las formulaciones del “Run-Up” se ha optado por utilizar el oleaje generado por viento según las formulaciones que tienen en cuenta la profundidad media de la Laguna en correspondencia de cada punto de cálculo. De otra forma, habría que considerar oleaje poco real que conducirían a una sobrestimación del “Run-Up” en la Laguna.

En este trabajo se utilizaron las formulaciones para oleaje irregular presentadas en el software ACES (1992) y en el software TIC (2003).

2.2.1 Generación oleaje por viento

El proceso de generación del oleaje es complejo y es debido principalmente a la acción del esfuerzo cortante del viento sobre la superficie de agua y a la variación de presiones que se generan al formarse las primeras ondulaciones. Más en general, la altura de ola y su período están muy relacionadas a la velocidad del viento (Kamphuis, 2000). De esta forma es posible estimar las condiciones de oleaje y realizar una reconstrucción del clima marítimo basándose en registros de viento. Esta reconstrucción se denomina “wave hindcasting”.

En este trabajo, no disponiendo de datos de oleaje, se emplearon modelos denominados “paramétricos” para determinar Altura y Período del oleaje en base al viento. Estos métodos dependen de los parámetros principales siguientes:

- Fetch: distancia sobre la cual el viento sopla sobre el agua para generar el oleaje;
- Duración de la tormenta: duración del evento climatológico que genera el oleaje;
- Profundidad: profundidad del agua en la zona de generación del oleaje;
- Intensidad del viento: velocidad del viento generado por la tormenta;
- Dirección del viento: dirección del viento con respecto al fetch en examen y a la ubicación del punto de previsión.

El fetch del viento está limitado por los contornos de tierra a barlovento del punto de previsión, por la extensión de los sistemas atmosféricos y por la dirección del viento. La energía del oleaje depende de la velocidad del viento dado por la tormenta en examen y no puede crecer indefinidamente por un viento dado aunque el fetch y la duración de la tormenta sean infinitos. Para un viento de intensidad dada, la energía del oleaje crece hasta que sea compensada por las pérdidas de energía por fricción y rotura.

El fetch y la duración de la tormenta son entonces los factores limitantes para que se pueda desarrollar el oleaje de máxima energía por una intensidad de viento dada (en este caso se habla de un oleaje totalmente desarrollado). Por lo tanto, se dice que el oleaje es limitado por el fetch si el viento en examen tiene una duración suficientemente larga para poder generar un oleaje más grande, y se habla de oleaje limitado por el tiempo si el máximo crecimiento del oleaje es dado por la duración de la tormenta y el fetch sería suficientemente grande para poder generar un oleaje más grande con el viento dado.

Las formulaciones propuestas en este trabajo son las más ampliamente utilizadas en la práctica ingenieril (SPM, 1984; ACES, 1992). Las hipótesis a tener en cuenta en el uso de estas formulaciones son:

- o la energía procedentes de otros trenes de ondas existentes en la zona de generación no son consideradas;
- o las formulaciones son válidas para fetch relativamente reducidos ($F < 120$ km aproximadamente);

- los vientos son considerados de intensidad y dirección aproximadamente constantes;
- los valores del viento a introducir son a la elevación de 10 m;
- el valor del coeficiente de fricción es constante ($CD = 0.001$)

Las formulaciones de crecimiento disponibles en el ACES (1992) se dividen en cuatro categorías: formulaciones para “aguas profundas” y “aguas poco profundas” o “profundidades reducidas”, para fetches no limitados y para geometrías de fetches más complejos, de geometría limitada (“fetches restringidos”).

En este trabajo se han comparados dos metodologías que se consideraron las más adecuadas para el caso en examen. De los valores de altura de ola obtenidos se han tomados los valores más elevados de altura de ola.

En las formulaciones elegidas, ambas válidas para profundidades reducidas, se considera que la tormenta dura el tiempo necesario a generar el máximo oleaje posible por un fetch dado.

Como test de verificación, se han realizado simulaciones de generación de los oleajes con 100 años de período de retorno, con el modelo SWAN (*Delft University of Technology*). En ausencia de datos de oleaje, el modelo no pudo ser calibrado y se utilizaron las formulaciones y parámetros más pertinentes existentes en la bibliografía. Como condiciones de contorno, fueron impuestos, sobre toda la superficie de la Laguna, los vientos (correspondientes a cada dirección considerada) constantes y uniformes. El mallado numérico tiene dimensiones de 500 m tanto en la dirección X como en la dirección Y. La escala espacial del mallado numérico fue seleccionada únicamente con el objetivo de efectuar un test de verificación de los resultados de las formulaciones empíricas. En las figuras que se muestran a continuación se presentan los resultados de los test con vientos de 100 años de período de retorno, tomando como ejemplo la dirección de procedencia Norte. Las flechas indican el sentido de propagación del oleaje generado.

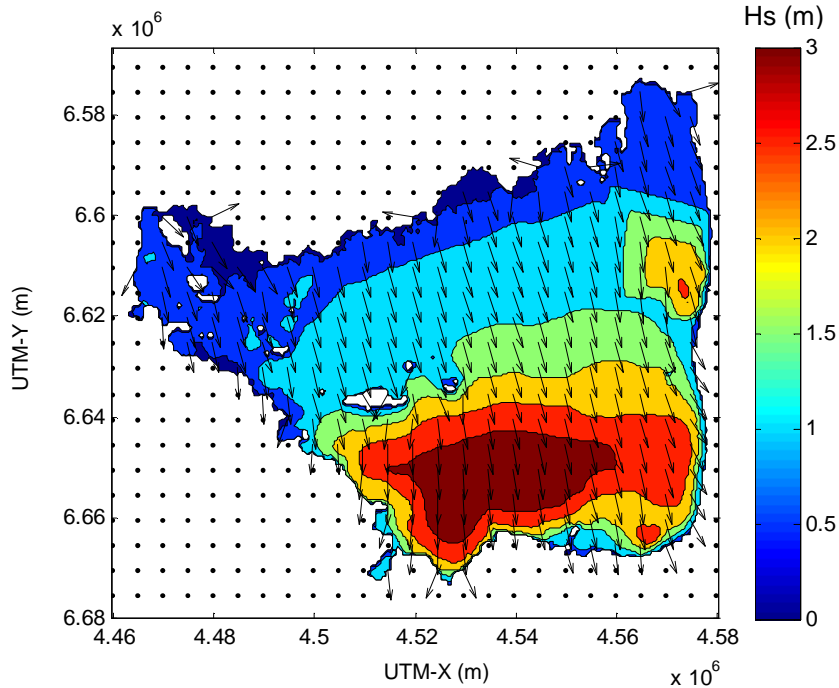


Figura 6. Resultados de generación del oleaje con el modelo SWAN por un viento Norte de 100 años de período de retorno.

Se deduce una buena concordancia entre los resultados del modelo SWAN y los resultados obtenidos por las formulaciones empíricas.

3 RESUMEN Y CONCLUSIONES

El objetivo principal de este estudio ha sido determinar la Cota Máxima de Inundación de la Laguna Mar Chiquita. La Cota Máxima de Inundación (CMI) se definió como la suma del Máximo Nivel Histórico Registrado (MNHR) y del Máximo Nivel de Tormenta (MNT):

$$CMI = MNHR + MNT$$

Donde el Máximo Nivel de Tormenta se determinó como la suma del levantamiento por arrastre del viento sobre la superficie de la Laguna (WSU, "Wind Set-Up") y del levantamiento por todos los efectos del oleaje irregular que rompe propagándose hacia la costa (RU, "Run-Up"). En particular, estos últimos efectos fueron evaluados por diferentes períodos de retorno ($Tr=25, 50$ y 100 años).

El MNHR ha sido determinado a partir de los datos disponibles de registros históricos y del análisis de imágenes satelitales. Este estudio ha determinado que este nivel es igual a 71,9 m s.n.m.

Asumiendo que en la Laguna se establezca el nivel MNHR, se han calculado el WSU y el RU. Para ello, se han considerado los vientos para un períodos de retorno (Tr) de 100 años actuantes sobre la superficie de la Laguna y generando el levantamiento por arrastre de la masa de agua y oleaje.

En particular, el oleaje generado por el viento, propagándose hacia la costa y rompiendo, determina una serie de efectos que combinados entre ellos definen el RU. Estos efectos son la oscilación propia del oleaje, una oscilación del nivel medio debida a la rotura y una oscilación debida a una onda de largo periodo que se libera en el proceso de rotura por ser el oleaje de tipo irregular. La separación de estos efectos es imposible debido a la alta no-linealidad de los procesos, con lo cual se han adoptado formulaciones experimentales para la evaluación del RU que tienen en cuenta el conjunto de todos estos efectos (formulaciones del Run-Up para oleaje irregular en playas).

Para determinar los valores del WSU y del RU se han analizado los datos disponibles de los registros de viento en la región. Inicialmente se tomaron los datos de la estación meteorológica “Davis” del LH-UNC instalada en el destacamento de la Reserva Provincial de Mar Chiquita ubicada en la localidad de Miramar. Estos datos fueron sometidos a verificación con otros datos procedentes de estaciones cercanas en los aeropuertos de Pajas Blancas en Córdoba y de Ceres en la Provincia de Santa Fe, y con datos de modelos de predicción de modelos WRF calculados en Mar Chiquita. Se optó por utilizar los datos de los aeropuertos de Córdoba y de Ceres debido a que los datos de la estación meteorológicas en Miramar presentaban mucha incertidumbre.

El régimen medio de los vientos en la Laguna muestra que los vientos dominantes proceden de los sectores Norte (N), Noreste (NE) y Sur (S), con un valor promedio comprendido entre 10-20 km/h. De las mismas direcciones proceden también los vientos de mayor intensidad, con valores mayores a 40 km/h. En promedio, el porcentaje de calmas es de aproximadamente el 4% en el registro de la estación de Córdoba y del 21% en el registro de la estación de Santa Fe.

Se efectuó el análisis del régimen extremal para determinar las magnitudes de los vientos asociados al período de retorno asumido, obteniendo un valor máximo de 116 km/h.

Los efectos de estos vientos sobre el levantamiento del nivel de la Laguna se manifiestan a través del WSU y del RU. Estos efectos han sido evaluados asumiendo la condición más desfavorable, con las direcciones que producen el mayor levantamiento del nivel de la Laguna a lo largo de la costa. En la Tabla 2 se muestran los tramos de costas analizados en función de la dirección de procedencia de los vientos por diferentes períodos de retorno.

Tabla 2. Tramos de costas analizados en función de la dirección del viento simulado.

DIR Viento	Tramo de costa analizado
N	Sur
NE	Este y Sur
E	Oeste
S	Norte
O	Este

Los cálculos del WSU se han efectuado mediante formulaciones empíricas sobre algunas secciones significativas elegidas a lo largo de la costa () considerando como la situación más desfavorable que el viento actuara en la dirección perpendicular a la costa. Los valores obtenidos se resumen en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Los cálculos del RU se han realizado mediante formulaciones empíricas previa generación del oleaje utilizando diferentes metodologías que aparecen en el software ACES (1992). En cada caso se ha utilizado el valor más desfavorable. El valor del RU de diseño adoptado ha sido el equivalente al valor que supera el 2% del tiempo ($R_{u2\%}$), siguiendo las recomendaciones de Obras Marítimas españolas (ROM 01.91) en cálculos de prediseño, habiendo impuesto un viento (y una altura de ola correspondiente) para un período de retorno $Tr = 100$ años.

Se graficó la secuencia de cotas de inundación determinadas para una recurrencia de 100 años, sobre la imagen satelital que se presenta en la Figura 64.

Detalle de los valores calculados para recurrencias de 25 y 50 años se presentan en el Informe Final **LH, 2011.**

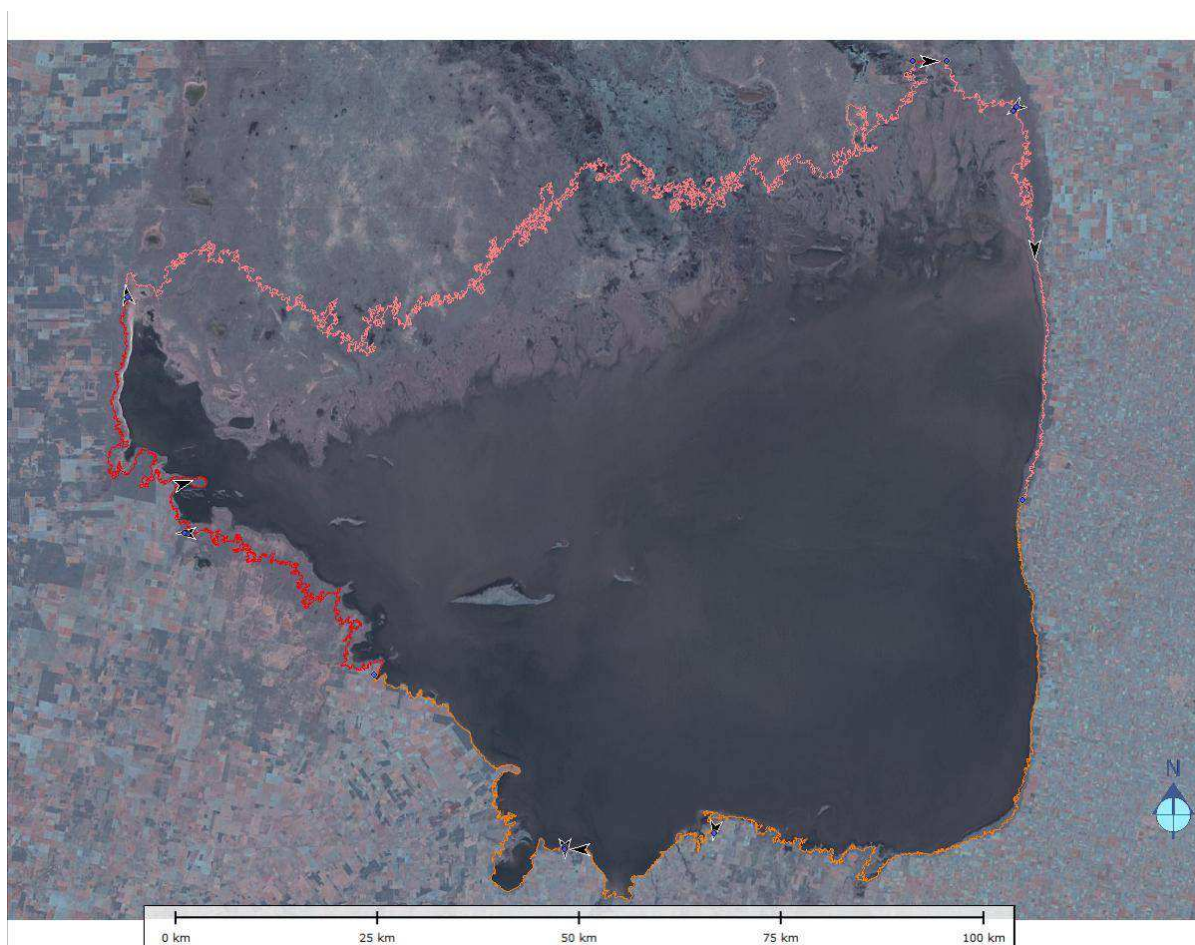


Figura 7. Ejemplo de cota máxima de inundación en la Laguna de Mar Chiquita por un período de retorno de 100 años.

4 BIBLIOGRAFIA

ACES, (1992). Automated Coastal Engineering System, v 1.07. US Army Corps of Engineers.

Agencia Córdoba Ambiente S.E. (2004). Suelos de la Provincia de Córdoba. Ed. Gobierno de la Provincia de Córdoba. Argentina. 300 pp.

Bucher, E. (ed.), (2006) Bañados del río Dulce y Laguna Mar Chiquita, Córdoba, Argentina. Pp. 342. Academia Nacional de Ciencias, Córdoba.

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

Custodio E. y Llamas M. (1996). Hidrología subterránea. Tomo I. Ediciones Omega, Barcelona, España.

DNV, (2007). Recommended practice Dnv-rp-c205 - Environmental conditions and environmental loads. Det Norske Veritas.

Donelan, M.A., (1980). Similarity theory applied to the forecasting of wave heights, periods and directions. – Proc. Canadian Coastal Conf., Abril. 22, Burlington, Ontario: 47-61.

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

Hillman, G., (1999) Simulación Hidrológica del Sistema de Mar Chiquita. Trabajo final de Grado. Pp. 490. F.C.E.F. y N., UNC. Córdoba, Argentina.

Hillman, G., (2003) Análisis y Simulación Hidrológica del Sistema de Mar Chiquita. Tesis de Maestría. F.C.E.F. y N., UNC. Córdoba, Argentina.

Holman, R.A., (1986). Extreme value statistics for wave run-up on a natural beach. Coastal Engineering, 9, 527-544.

Kamphuis, J. W., (2000). Introduction to coastal engineering and management. World Scientific. Pp. 437.

Mase, H. (1989). Random Wave Runup Height on Gentle Slope. Journal of Waterway,

Port, Coastal, and Ocean Engineering, Vol 115, No. 5, pp 649-661.

Mase, H. e Iwagaki, Y. (1984). Runup of Random Waves on Gentle Slopes Proceedings of the 19th International Conference on Coastal Engineering, Houston, TX, American Society Civil Engineers, pp. 593-609.

Pagot, M., (1999). Análisis y Simulación Hidrológica del Sistema Bañados del Río Dulce. Trabajo Final de Grado. F.C.E.F. y N., UNC. Córdoba, Argentina.

Pagot, M., (2003). Análisis y Simulación Hidrológica del Sistema Bañados del Río Dulce. Tesis de Maestría. F.C.E.F. y N., UNC. Córdoba, Argentina.

Plencovich G. (2011). Simulación hidrológica de los humedales de Mar Chiquita con apoyo satelital. Tesis de Maestría en Ciencias de la Ingeniería, Mención

Recursos Hídricos. Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Córdoba, Argentina.

Pozzi, C. (2006) Simulación hidrodinámica y monitoreo del sistema Mar Chiquita (Mar de Anzenusa), Córdoba, Argentina. Tesis de Maestría. F.C.E.F. y N., UNC. Córdoba, Argentina.

Rodríguez, A., Hillman, G., Pagot, M. y Caamaño Nelli, G. (2002): Análisis y simulación de riesgos ecológicos en un sistema hidrológico endorreico. Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil, Puerto Rico. Vol. 2 (1), 15 pp.

ROM 02.90, (1990). Recomendaciones de Obras Marítimas. Acciones para Proyectos de Obra Portuaria o Marítima. Dirección general de Puerto y Costas. Ministerios de Obras Públicas y Urbanismos, España. Abril.

Smith, J.M., (1991). Wind-wave generation on restricted fetches. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Misc. Paper CERC-91-2, 25pp.

SPM, (1984). Shore Protection Manual. Coastal Engineering Research Center, Fort Belvoir, Virginia.

SWAN (2000). Simulating Wave Nearshore model. Delft university of Technology, the Netherlands.

TIC (2003). Software Tutor de Ingeniería de Costas. Sistema de Modelado Costero. Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria (España).

Troin, M.; Vallet-Coulomb, C.; Sylvestre, F. y Piovano, E. (2010). Hydrological modelling of a closed lake (Laguna Mar Chiquita, Argentina). Journal of Hydrology 393. Pp. 233–244.

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 CFI, Cba. Argentina.

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.

Von Grumbkow, J.B., (1890). Exploracion de Mar Chiquita. Boletin del Instituto Geografico Argentino. Pp: 113-115.