

ELEVACIÓN MÁXIMA DEL AGUA EN LA LAGUNA MAR CHIQUITA, CÓRDOBA, ARGENTINA

• Mariana Pagot* • Gerardo Hillman • Cecilia Pozzi-Piacenza •
• Paolo Gyssels • Antoine Patalano • Andrés Rodríguez •
Universidad Nacional de Córdoba, Argentina

*Autor de correspondencia

Resumen

Pagot, M., Hillman, G., Pozzi-Piacenza, C., Gyssels, P., Patalano, A., & Rodríguez, A. (julio-agosto, 2014). Elevación máxima del agua en la laguna Mar Chiquita, Córdoba, Argentina. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5(4), 119-133.

La laguna Mar Chiquita es el mayor cuerpo de agua endorreico de la República Argentina y está ubicada al noreste de la provincia de Córdoba. El nivel de agua máximo es objeto de este trabajo y se definió con base en el efecto combinado del máximo nivel de agua histórico medido sobre la costa sur y de la máxima sobre-elevación por tormenta estimado para recurrencias de 25, 50 y 100 años. El análisis de las series de niveles de agua permitió definir el valor máximo histórico del nivel medido en la laguna. Este valor se registró en el año 2003 con una cota de 71.9 m sobre nivel del mar (snm). La máxima sobre-elevación por tormenta se definió por la acción conjunta del viento y del oleaje generado por el mismo. Para estas estimaciones se utilizaron programas específicos y formulaciones empíricas. Para propagar el oleaje sobre el perfil de playa, se reconstruyó la batimetría de la laguna, basada en técnicas de teledetección. A tal efecto se utilizaron datos de elevación del terreno, tomando relevamientos espaciales con radar y mapas temáticos derivados de imágenes satelitales ópticas, productos LandSat, basados en el proceso de extracción digital de los contornos de agua. Los resultados indicaron que la cota máxima de inundación de la laguna Mar Chiquita para la costa sur del sistema podría llegar a los 73.5 msnm para una recurrencia de 100 años. Este análisis es importante realizarlo en sistemas que presentan grandes fluctuaciones del nivel de agua, como el aquí presentado.

Palabras clave: laguna Mar Chiquita, cota máxima de inundación, teledetección, niveles de agua, viento, oleaje.

Introducción

La laguna Mar Chiquita (figura 1) se encuentra en la mayor cuenca endorreica de Argentina. Constituye un importante hábitat que alberga gran variedad de aves acuáticas y otras especies,

Abstract

Pagot, M., Hillman, G., Pozzi-Piacenza, C., Gyssels, P., Patalano, A., & Rodríguez, A. (July-August, 2014). Maximum Water Level in Mar Chiquita, Lagoon, Cordoba, Argentina. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 5(4), 119-133.

Mar Chiquita lagoon is the largest endorheic body of water in Argentina. It is located in the northeast portion of the province of Cordoba. The maximum water level is the topic of this work, which is defined using the combined effect of the historical maximum water level measured on the coast and the maximum storm elevation (considering both wind and waves) estimated for recurrences of 25, 50 and 100 years. The analysis of the series of water levels made it possible to determine the historical maximum level measured in the lagoon. This value was recorded in 2003 as a height of 71.9 meters above sea level (masl). The maximum storm level is defined by both the action of the wind and waves generated by the storm. Specific software and empirical formulas were used to obtain these estimates. To propagate the waves on the beach profile, the bathymetry of the lagoon was rebuilt using remote sensing techniques. To this end, terrain elevation data were used from space surveys derived from radar and from thematic maps based on Landsat images with the digital extraction of water contours. The results indicate that the maximum flood that could occur in Laguna Mar Chiquita, on the southern coast of the system, is 73.5 masl with a recurrence of 100 years. It is important to conduct this analysis for systems with large fluctuations in water levels, such as the one presented here.

Keywords: Mar Chiquita lagoon, maximum flood stage, remote sensing, water levels, wind, waves.

cumpliendo una función de soporte de estas poblaciones en periodos críticos de sus ciclos biológicos (especialmente las migraciones hemisféricas). Es un lago salado que durante principios de este siglo alcanzó una superficie máxima cercana a los 6 500 km². Se caracteriza

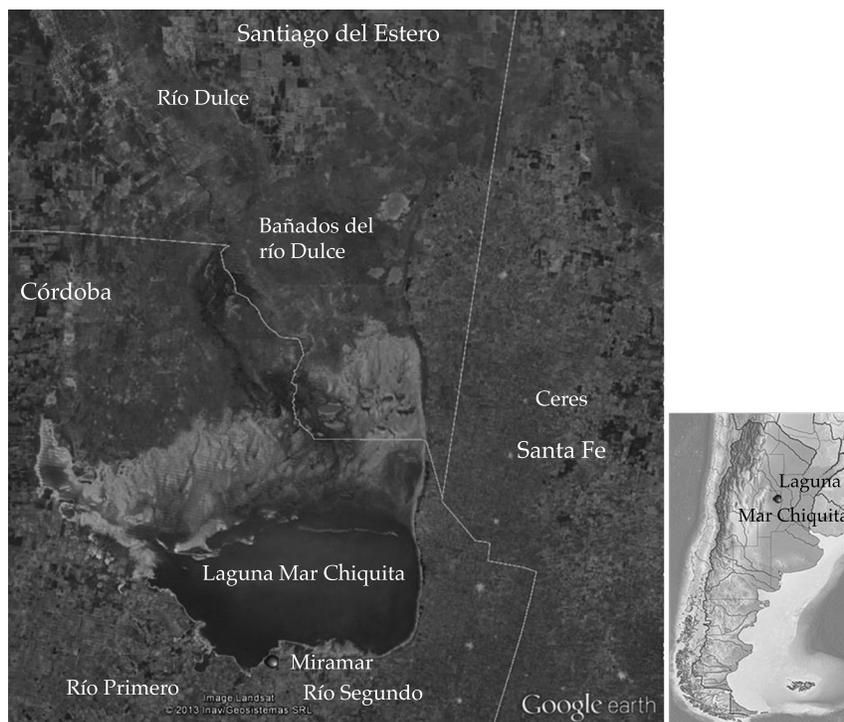


Figura 1. Sistema laguna Mar Chiquita (imagen base del 10 de abril de 2013. Google Earth).

por su escasa profundidad (10 m máximo) y los extensos bañados que se forman hacia el norte, por donde el río Dulce (Petri) desemboca luego de frecuentes divagaciones, cambios de curso y pérdida del cauce principal, en su paso por una planicie de muy baja pendiente (0.03% promedio). Desde el sur desembocan los ríos Suquia (primero) y Xanaes (segundo).

Estos antecedentes determinaron que en 1994 fuera reconocida el área como Reserva Natural Provincial de Mar Chiquita. A comienzos de la década de 1990, los bañados del río Dulce y la laguna Mar Chiquita fueron declarados "Sitio Hemisférico" por la "Red Hemisférica de Aves Playeras". En 2002 se incorporaron los bañados del río Dulce y la laguna Mar Chiquita al listado de "Sitios Ramsar", creados por la Convención de Ramsar sobre Humedales de nueve países del mundo (con Ley Nacional de adhesión núm. 23.919/91). Finalmente, este sistema integra la Red Internacional de Lagos Vivos (UNC-UNSE, 2007).

Se han realizado numerosos estudios hidrológicos e hidrodinámicos en forma ininterrumpida desde el año 1998, principalmente por los investigadores del Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba (2011). Los principales resultados pueden consultarse en Hillman (1999 y 2003); Hillman *et al.*, 2003; Pagot (1999 y 2003); Pagot, Hillman, Rodríguez, Caamaño-Nelli y Plencovich (2003); Rodríguez *et al.* (2000a, 2000b); Rodríguez, Hillman, Pagot y Caamaño-Nelli (2002); Plencovich *et al.* (2005); Plencovich (2011); Pozzi *et al.* (2005); Pozzi (2006), y Cereceda-Botella (2009), entre otros.

El objetivo de este trabajo fue definir la elevación o cota máxima de inundación para la costa sur de la laguna Mar Chiquita, asociada con recurrencias de 25, 50 y 100 años.

Durante los últimos 10 años, la laguna ha presentado un continuo descenso de su nivel de agua, perdiendo el 40% de su altura. Sin

embargo, se considera importante definir los máximos límites a los que puede llegar el agua, principalmente en zonas cercanas al único asentamiento urbano costero, como es la localidad de Miramar, con motivo de prevenir inundaciones frente a un nuevo ascenso del nivel de agua.

Materiales y métodos

La cota máxima de inundación (CMI) se definió en la ecuación (1), según el esquema propuesto en la figura 2, como la suma del máximo nivel histórico registrado (MNH) y el máximo nivel de tormenta (MNT) estimado para cada tiempo de recurrencia (T_R) propuesto.

Para definir el máximo nivel histórico se analizaron los datos diarios y mensuales de niveles de agua medidos y/o estimados en la laguna Mar Chiquita.

La laguna ha manifestado importantes variaciones en su nivel de agua, consecuencia directa de los ciclos hidrológicos naturales, amplificados por el manejo y la gestión del recurso en la cuenca alta del río Dulce (principal tributario a la laguna) (Pagot, 1999; Hillman, 1999; Plencovich, 2011). Estas variaciones de nivel han sido documentadas, desde el año 2001, en forma diaria y continua a través de mediciones directas realizadas sobre escalas limnimétricas ubicadas sobre la costa sur de la Laguna Mar Chiquita, frente a la localidad de Miramar (ver figura 3). Estos datos fueron cedidos por la Agencia Córdoba Ambiente a

través de la Reserva Provincial de Miramar y la Secretaría de Recursos Hídricos y Coordinación de la Provincia de Córdoba (Agencia Córdoba Ambiente S.E., 2004).

El cálculo del máximo nivel de tormenta se ha realizado, en primer lugar, utilizando formulaciones empíricas aplicadas en puntos significativos, elegidos sobre la costa sur de la laguna, denominados “puntos objetivos”. Los resultados alcanzados 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 el periodo de ola que se puede generar en la laguna.

En la figura 10 se muestran los puntos seleccionados (S1 a S5) para el cálculo de la cota máxima de inundación (CMI), tomando como línea de costa la cota establecida por el MNH.

El máximo nivel de tormenta (MNT en la ecuación (2)) es el resultado de la suma de la sobre-elevación por arrastre del viento en la superficie (WSU por sus siglas en inglés, “Wind Set-Up”), y de la sobre-elevación debida al oleaje irregular incidente en la costa (RU por sus siglas en inglés, “Run-Up”, que 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 de la ola), ambos calculados para los periodos de retorno (T_R) asumidos (25, 50 y 100 años):

$$MNT_{TR} = WSU_{TR} + RU_{TR} \quad (2)$$

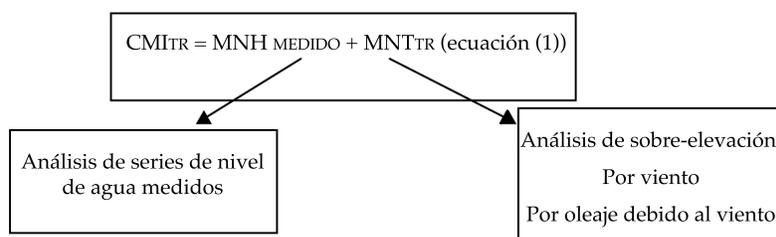


Figura 2. Esquema metodológico de trabajo.

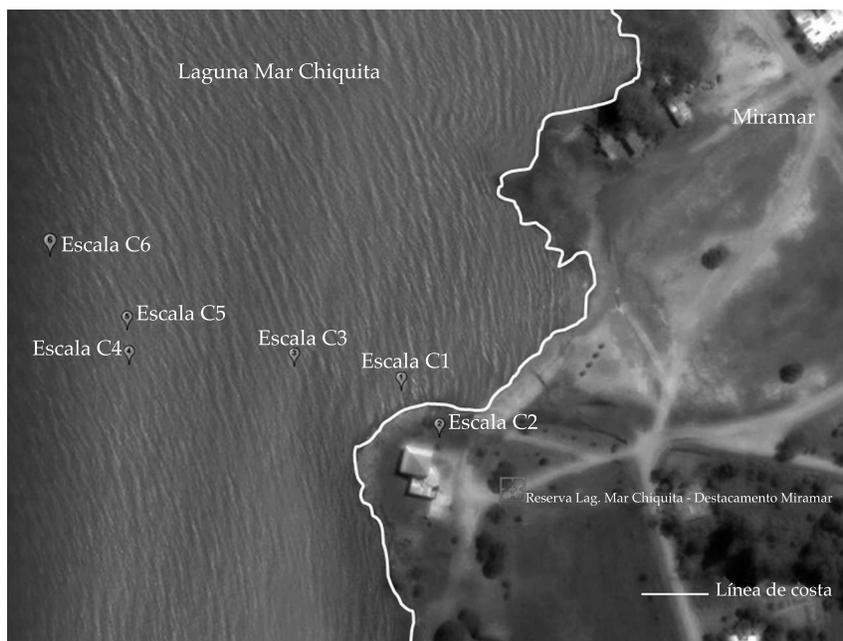


Figura 3. Ubicación de las escalas limnimétricas en la costa sur de la laguna, Miramar.

La sobre-elevación por viento (WSU) 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 de esta variable depende de la intensidad del viento (velocidad del viento generado por la tormenta) y de la batimetría local. Para su estimación se ha considerado la intensidad del viento para cada una de las recurrencias analizadas. La batimetría local, en correspondencia de cada punto objetivo, ha sido determinada trazando secciones perpendiculares a la costa.

La ecuación unidimensional (1D) utilizada en este trabajo es la ecuación (3) (Kamphuis, 2000):

$$\frac{dS}{dx} = \frac{\zeta(U \cos \phi)}{gD} \quad (3)$$

En donde, y según el esquema de la figura 4, S es la sobre-elevación o “Wind Set-Up” dado por el viento (m); x , la distancia sobre la cual la sobre-elevación es calculada (m); ζ , una

constante = $3.2 \cdot 10^{-6}$; U , la velocidad del viento (m/s); ϕ , el ángulo entre la dirección del viento y la dirección x ; d , la profundidad antes de la sobre-elevación (m); D , la profundidad ($d + S$) para cada Δx (m).

Esta ecuación asume condiciones estacionarias, considerando que el viento conserva siempre la misma dirección. Con esta 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 la 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 (figura 4).

Para estimar la sobre-elevación por oleaje se utilizaron formulaciones empíricas que tienen en cuenta la altura de ola en aguas profundas, la longitud de ola del oleaje incidente y la pendiente de la playa.

Por lo tanto, previo al cálculo de esta variable, ha sido necesario estimar las características del oleaje (generación y propagación) en aguas

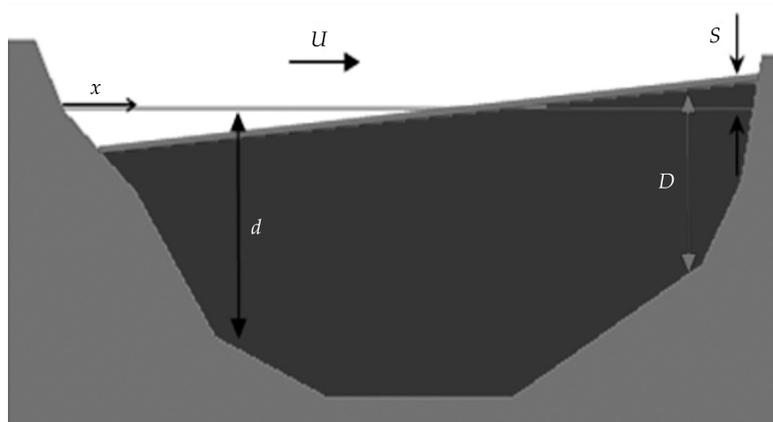


Figura 4. Esquema de sobre-elevación en un lago por efecto de un viento constante.

profundas (cuando la altura de ola es mucho menor que la profundidad). Debido a la escasa profundidad que presenta la laguna Mar Chiquita, se ha optado por utilizar el oleaje generado por viento, según las formulaciones que tienen en cuenta la profundidad media, en correspondencia con cada punto objetivo.

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

En el programa ACES (1992), el modelo empírico utilizado hace referencia a los trabajos de Mase e Iwagaki (1984), y Mase (1989). La sobre-elevación máxima está dada por la ecuación (4):

$$R_p = H_{so} a_p I_r^{b_p} \quad (4)$$

En donde $_p$ es el cuantil o valor estadístico deseado (máx. 2%, promedio); R_p es la sobre-elevación del cuantil $_p$ (m); H_{so} la altura de ola significativa en aguas profundas (m); a , b , constantes que dependen del valor cuantil deseado en el cálculo; I_r , el número de Irribarren (ecuación (5)):

$$I_r = \frac{\tan \beta}{\left(\frac{H_{so}}{L_o}\right)^{0.5}} \quad (5)$$

En donde β es la pendiente media de la zona alejada (*foreshore*) de la playa (en

correspondencia de la línea de unión agua/tierra) y L_o (m) es la longitud de onda en aguas profundas.

En el programa TIC (2003) se utiliza la formulación de Holman (1986), que surgió de una amplia serie de campañas realizadas en la playa de Duck en Carolina del Norte. El autor encontró una aceptable correlación entre sobre-elevación por oleaje normalizada con la altura de ola significativa incidente y el número de Irribarren. En particular, la expresión utilizada es la presentada en la ecuación (6):

$$\frac{R_{u2\%}}{H_s} = 0.822 \cdot I_r + 0.2 \quad (6)$$

Donde $R_{u2\%}$ es la sobre-elevación por oleaje superada el 2% del tiempo.

Resultados alcanzados

Máximo nivel histórico (MNH)

Para determinar el MNH, se digitalizaron los datos diarios de niveles de agua, cubriendo hasta el año 2011 (figura 5). Se destaca que cada dato medido fue analizado en forma particular, asignando la lectura a la escala limnimétrica correspondiente y filtrando datos dudosos que aparecían en la planilla origen empleada. Estos filtros se utilizaron para eliminar los errores

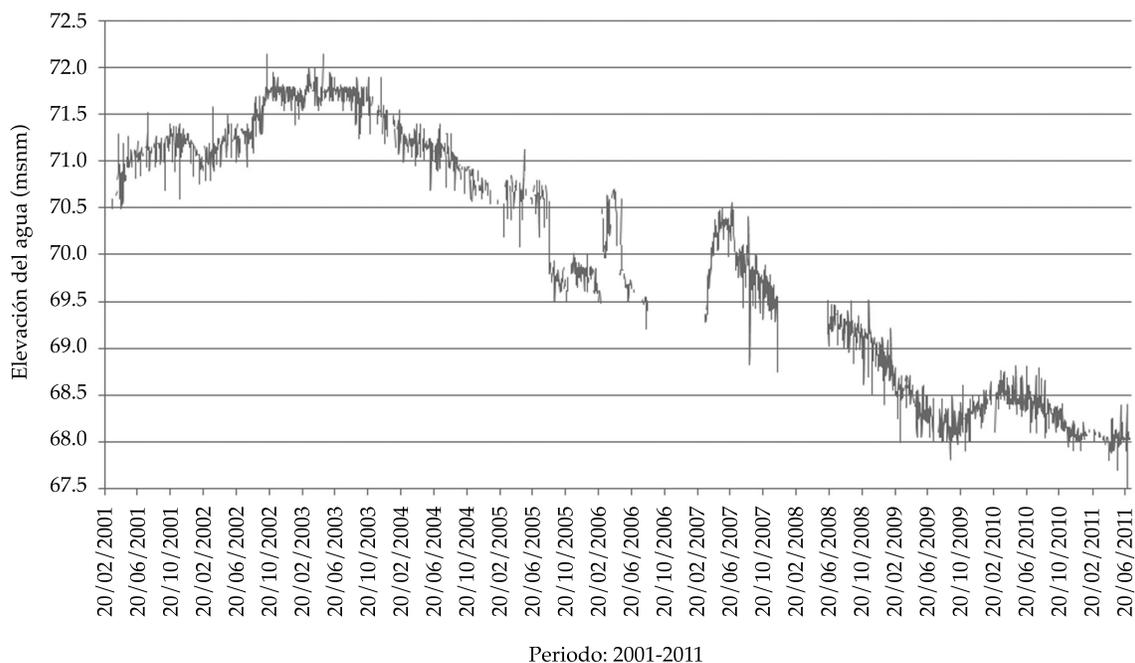


Figura 5. Niveles diarios medidos en la laguna Mar Chiquita (LH-UNC, 2011).

que surgieron tanto con el proceso de medición como con el de digitalización de estos datos.

Se completó la serie de niveles medios mensuales, cubriendo un periodo de 44 años entre 1967 y 2011 (figura 6).

En Troin, Vallet-Coulomb, Sylvestre y Piovano (2010) se presenta con una curva (figura 7) que inicia en el año 1890 y se asocia con un nivel ligeramente inferior a los 68 msnm. En la misma se observa un ciclo de descenso continuo hasta 1915, continuado por ciclos de oscilaciones entre cotas 64 y 67 m en los 52 años restantes del periodo sin registros medidos. Se destacan algunos pulsos de incremento de cortas duraciones sobre los 67 msnm durante el año 1915 y durante los periodos 1931-1935 y 1959-1961. A partir de 1972, la laguna comienza a aumentar su nivel, permaneciendo hasta la actualidad por encima de los valores de referencia durante el periodo de datos históricos sin mediciones.

El conjunto de datos medios mensuales analizados varía entre cotas 64.05 m y 71.76 msnm. Se destaca que durante el año 1973, la

laguna incrementó 2 m su nivel, pasando de cota 64.23 a 66.05 msnm entre febrero y octubre del mismo año. A principios de 1981 se produce un nuevo incremento de nivel, llegando a superar los 70.24 msnm. Durante junio de 1987, la laguna alcanzó 71.40 msnm; es decir, en 20 años de registro se observó un incremento de nivel de 7.5 m, aproximadamente.

Se analizaron, en particular, los datos de nivel de agua medidos durante 2003, año identificado con el mayor registro de niveles observados en la serie de datos diarios y mensuales disponibles.

Durante ese año se registraron valores máximos diarios iguales a 72.15 msnm. El análisis de tales datos respecto a los días próximos anteriores y posteriores indicaron variaciones de nivel de agua entre 0.15 y 0.35 m, respectivamente.

Una explicación para 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 (1890)

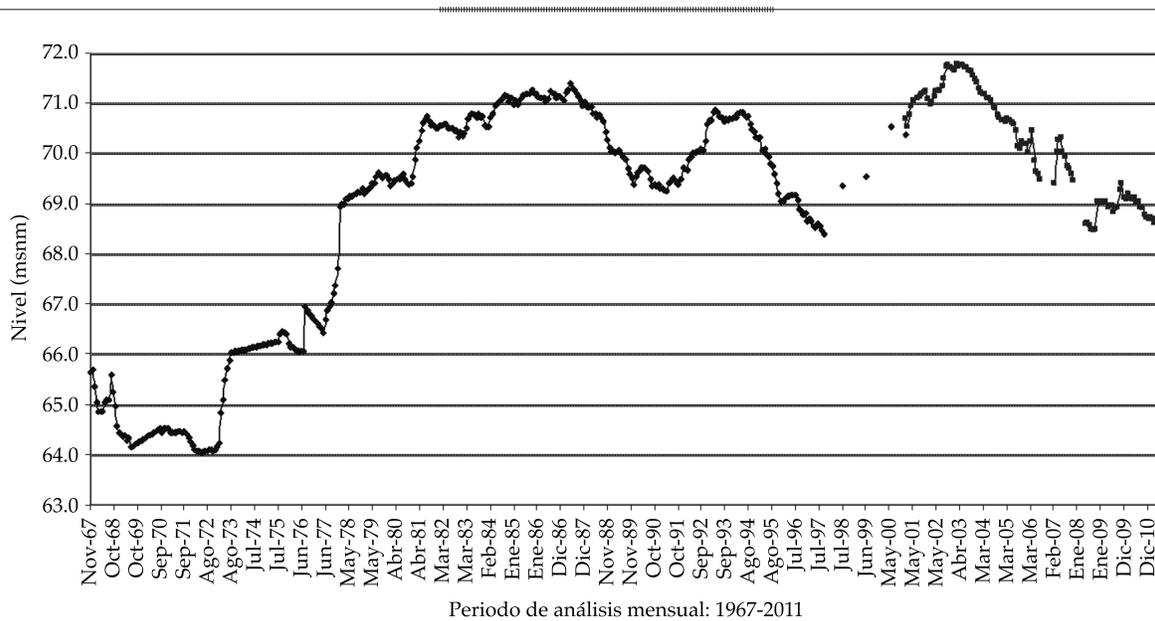


Figura 6. Niveles medios mensuales medidos en la laguna Mar Chiquita (LH-UNC, 2011).

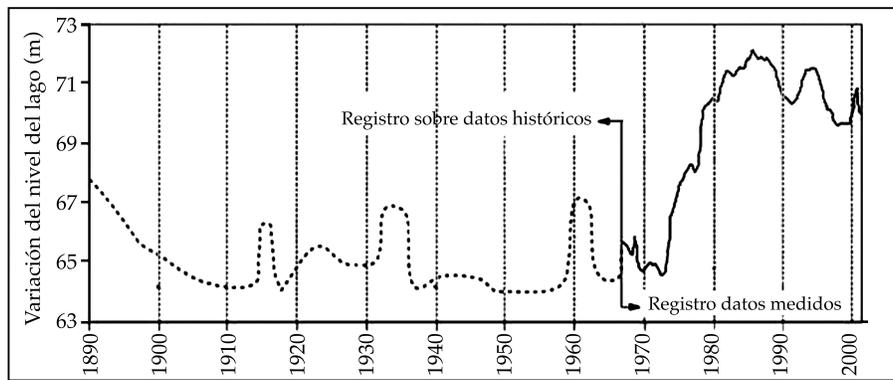


Figura 7. Variación de niveles de la laguna Mar Chiquita entre 1890 y 2000. Troin *et al.*, 2010.

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 con escenarios de 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 sobre-elevaciones registradas sean producto del efecto del viento, se construyó la rosa de vientos del mes de mayo de 2003 (figura 8). Los valores utilizados fueron corregidos por altura, con base en los registros de la estación meteorológica instalada en la Reserva de la laguna Mar Chiquita en Miramar, a 10 m desde la superficie de la laguna.

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 que los máximos valores registrados de nivel (72.15 msnm) estuvieron puntualmente influenciados por el clima de vientos reinante en los días previos a la medición.

Esta situación permite advertir y suponer como máximo valor registrado para la definición del máximo nivel histórico (MNH) en la costa de Miramar igual a 71.9 msnm, 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 con cada recurrencia analizada. Así

se evitará duplicar este efecto en el análisis desarrollado en el presente trabajo.

Análisis del viento por régimen extremal

El análisis del régimen extremal brinda una distribución teórica de la probabilidad de ocurrencia de los vientos con base en datos de numerosos años. En este trabajo se realizó el análisis de los extremos utilizando el conjunto total de datos disponibles de la serie procedente del aeropuerto de Ceres (CRR), ubicado al noreste de la laguna Mar Chiquita.

En este trabajo se han comparado dos de los modelos más utilizados en el análisis de regímenes extremales de viento: Gumbel, ecuación (7), y Weibull, ecuación (8).

$$F(x) = \exp \left[-\exp \left(-\frac{x-\lambda}{\delta} \right) \right] \quad -\infty < x < \infty \quad (7)$$

$$F(x) = 1 - \exp \left[\left(-\frac{x-\lambda}{\delta} \right)^\beta \right] \quad -\infty < x < \infty \quad (8)$$

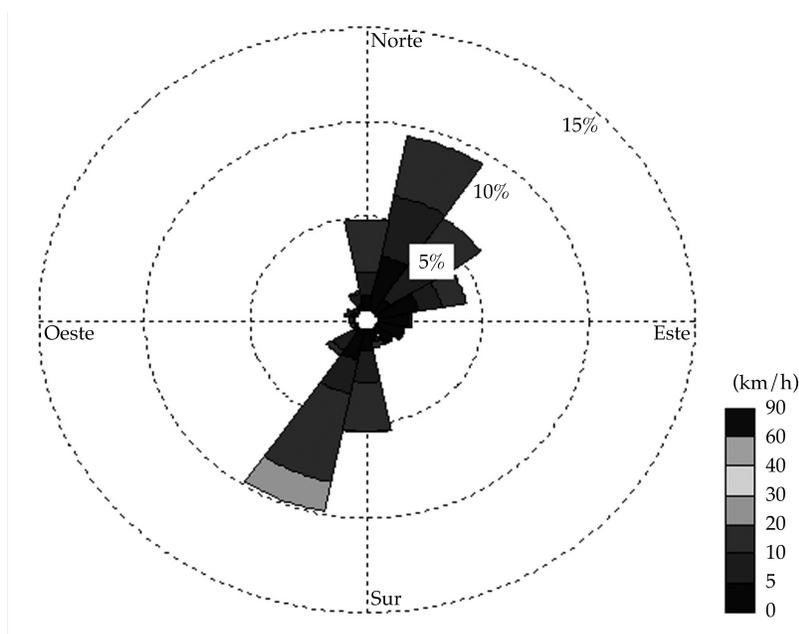


Figura 8. Rosa de viento del mes de mayo de 2003 en Miramar, costa sur de Mar Chiquita.

En donde λ es el parámetro de localización; δ , el parámetro de escala; β , el parámetro de forma.

Los valores del coeficiente de correlación (R^2) encontrados resultaron igual a 0.9741 para la distribución de Gumbel e igual a 0.9757 para Weibull. Las series analizadas se filtraron y se eliminaron los valores superiores a 70 km/h de una duración inferior a una hora debido a que estas velocidades no tienen una duración suficiente para originar un oleaje significativo para el estudio aquí presentado. El límite de corte se verificó hasta obtener el mejor coeficiente de correlación factible.

A partir de estos datos se calcula el número de eventos por año (Γ) sobre el cual se basa el análisis. La probabilidad de excedencia de un evento para un asignado periodo de retorno (T_R) resulta con la ecuación (9):

$$Q = \frac{1}{\Gamma T_R} \quad (9)$$

con lo cual:

$$F = 1 - \frac{1}{\Gamma T_R} \quad (10)$$

Por lo tanto, para las dos distribuciones consideradas se obtuvo que el viento asociado con un determinado periodo de retorno es dado por las siguientes formulaciones (Kamphuis, 2000):

$$\text{Gumbel: } W_{T_R} = \lambda - \delta \ln \left(\ln \frac{1}{F} \right) \quad (11)$$

$$\text{Weibull: } W_{T_R} = \lambda + \delta \ln \left(\ln \frac{1}{Q} \right)^{1/\beta} \quad (12)$$

Los valores extremales de viento para periodos de retorno de 25, 50 y 100 años se muestran en el cuadro 1.

Los resultados expuestos anteriormente surgieron de los valores de velocidades procedentes del análisis de la serie Ceres (CRR). Se ha optado de forma conservadora por considerar los valores de viento de mayor magnitud asociados con cada periodo de retorno.

Los valores de diseño seleccionados a partir del cuadro 1 corresponden a los obtenidos con la distribución de Gumbel. 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 en cuanto al levantamiento del nivel de agua en la laguna sobre las costas sur, suroeste y oeste.

Información topobatimétrica de la laguna Mar Chiquita

Para realizar la propagación del oleaje sobre la pendiente de la playa en cada sección de costa analizada se utilizaron técnicas de teledetección, que permitieron elaborar una cartografía precisa de la topobatimetría de la laguna Mar Chiquita ante la ausencia de este dato medido.

Este procesamiento se basó en datos de elevación disponibles a partir de la misión Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) (USGS, 2004), mapas temáticos derivados de imágenes satelitales LandSat y mediciones de nivel de agua en la laguna.

Los mapas temáticos se construyeron, para este estudio, a partir de la identificación de los

Cuadro 1. Velocidades del viento asociadas con diferentes periodos de retorno en la estación CRR para las distribuciones de Gumbel y Weibull.

Estación	Distribución	Velocidad (km/h)		
		25 años	50 años	100 años
CRR	Gumbel	102	110	116
	Weibull	102	108	114

contorno de agua durante el periodo de análisis, lo cual fue posible replicar temporalmente por el marcado descenso de agua registrado desde 2003 hasta 2011.

Esta metodología se basó en el proceso de extracción digital de los contornos de agua, asociando las áreas identificadas a las correspondientes mediciones diarias del nivel de agua.

Así, cada área digitalizada representa un polígono cerrado con datos espaciales X-Y (referenciados en el sistema oficial de Argentina, Gauss Kruger Posgar94 y Datum: WGS84), mientras que el correspondiente valor de elevación (Z), asociado con este polígono, se asigna a través de la medición diaria de nivel de agua durante la fecha de adquisición de cada imagen satelital analizada.

El procesamiento básico de la información topográfica se realizó con el programa ENVI 4.3 (ESRI, 2004). 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, según se presenta en la figura 9.

En la figura 10 se presentan los datos correspondiente a las curvas de nivel que se utilizaron para generar el modelo digital topobatimétrico 3D para la laguna.

Los límites de la malla se asocian con el área de interés definido. Resulta así una malla de 250 columnas por 226 filas. El modelo topobatimétrico resultante se presenta en la figura 10.

Generación de oleaje por viento

El proceso de generación del oleaje es complejo 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. En general, la altura de ola y su periodo están muy relacionadas con la velocidad del viento

(Kamphuis, 2000). De esta forma es posible estimar las condiciones de oleaje y realizar una reconstrucción del clima marítimo con base en registros de viento. Esta reconstrucción se denomina "wave hindcasting".

En este trabajo se emplearon modelos denominados "paramétricos" para determinar altura y periodo del oleaje a partir del viento. Estos métodos utilizan parámetros como 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 del agua (en la zona de generación del oleaje); intensidad y dirección del viento (con respecto al fetch y a la ubicación del punto objetivo definido).

Las formulaciones aquí utilizadas son las más ampliamente usadas en la práctica ingenieril (SPM, 1984; ACES, 1992). Se consideró como hipótesis que la tormenta dura el tiempo necesario para generar el máximo oleaje posible por un fetch dado.

Como test de verificación se han realizado simulaciones de generación de los oleajes con el modelo SWAN (2000). Como condiciones de contorno fueron impuestos sobre toda la superficie de la laguna los vientos (correspondientes a cada dirección considerada) constantes y uniformes. En la figura 11 se presenta el resultado con vientos de 100 años de periodo de retorno, tomando la dirección de procedencia norte. Las flechas indican el sentido de propagación del oleaje generado. Se deduce una buena concordancia entre los resultados del modelo SWAN (2000) y los resultados obtenidos por las formulaciones empíricas.

El valor de sobre-elevación por oleaje debido al viento resultó equivalente al valor que supera el 2% del tiempo ($Ru2\%$), siguiendo las recomendaciones de Obras Marítimas Españolas (ROM 02.90, 1990) en cálculos de prediseño.

La cota máxima de inundación (CMI) se definió como la suma del máximo nivel histórico registrado (MNHR) y del máximo nivel de tormenta (MNT), donde este último parámetro se determinó como la suma del

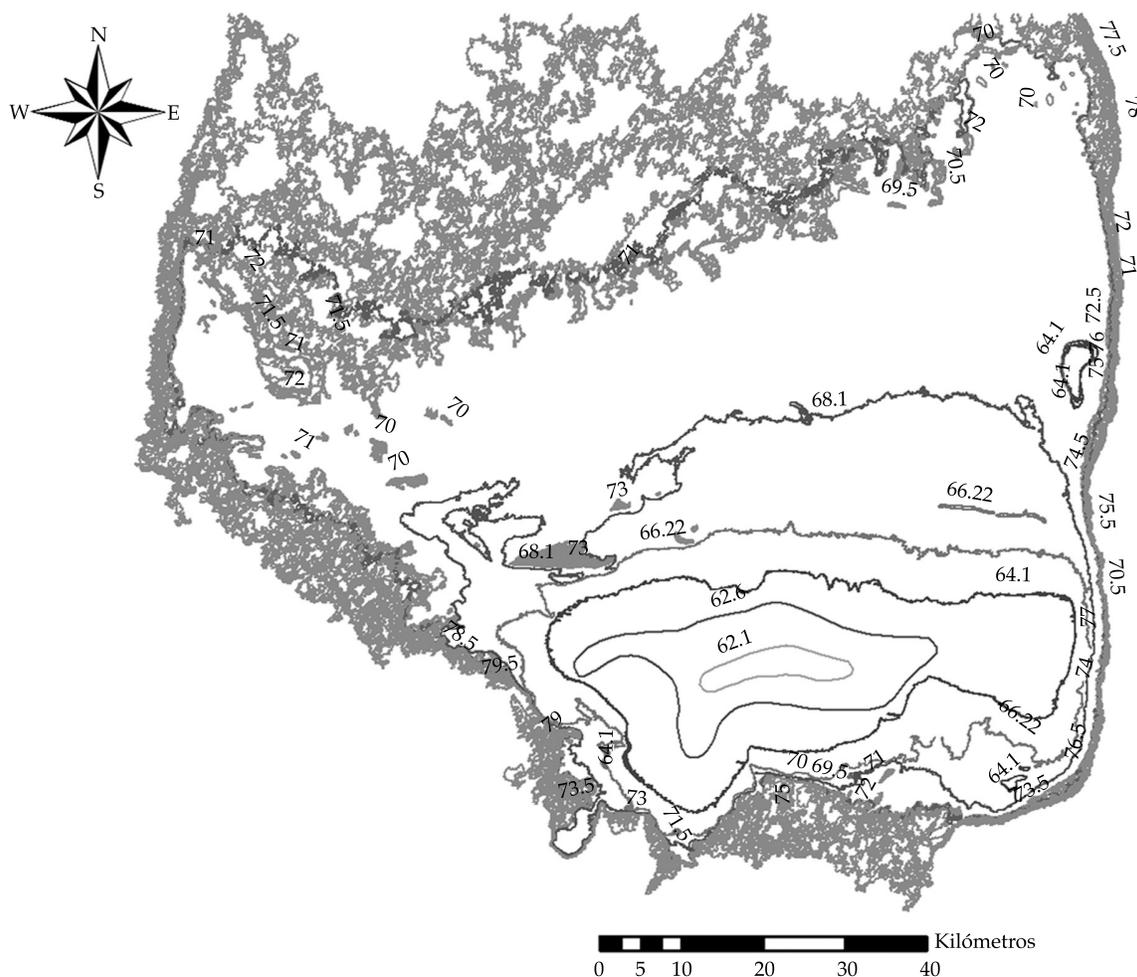


Figura 9. Curvas de nivel generadas a partir de datos satelitales.

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 los periodos de retorno asumidos. Los resultados obtenidos se resumen en el cuadro 2.

Conclusiones

En este trabajo se definió la elevación máxima de inundación para la costa sur de la laguna Mar Chiquita, asociada con recurrencias de 25, 50 y 100 años. Se analizaron los niveles medidos

de agua, en conjunto con la caracterización y definición de la sobre-elevación por la acción conjunta del viento y el oleaje asociado.

Las variables de sobre-elevación por viento y oleaje se estimaron sobre datos topobatimétricos definidos con base en el uso de técnicas de teledetección, procedimiento al que se recurrió debido a la insuficiencia de mediciones directas de la morfología de este gran cuerpo de agua. El procedimiento empleado constituyó una alternativa para la asociación de cada curva de nivel digitalizada a partir del contorno de agua identificado y el nivel del agua medido para la fecha en que se adquiere cada imagen de satélite empleada.

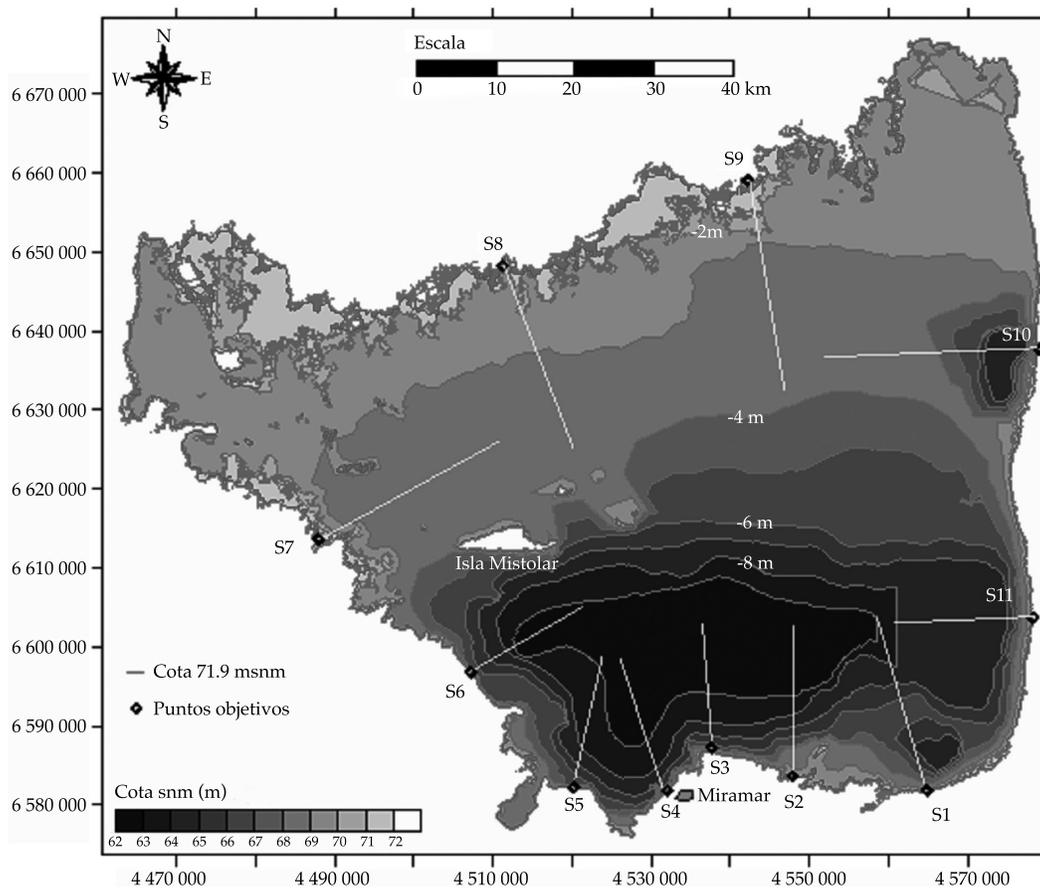


Figura 10. Modelo digital topobatemétrico generado para la laguna Mar Chiquita. Puntos objetivos y secciones de cálculo.

Cuadro 2. Cota máxima de inundación en correspondencia de cada punto objetivo.

Secciones (figura 10)	Máxima cota de inundación (msnm)		
	Tr (años)		
	100	50	25
S1	73.03	72.96	72.86
S2	73.07	73.00	72.91
S3	73.51	73.44	73.30
S4	73.48	73.41	73.27
S5	73.04	72.99	72.89

Los resultados alcanzados arrojaron que las máximas cotas de inundación definidas para 100 años de recurrencia corresponden a los puntos objetivos S3 y S4, con valor máximo de 73.51 msnm.

En este trabajo se combinan criterios técnicos de uso tradicional en ingeniería de costas, lo que permite replicabilidad de la metodología en otros cuerpos de agua, principalmente en aquellos que presenten morfologías complejas y extensas, tal como el que se presenta aquí.

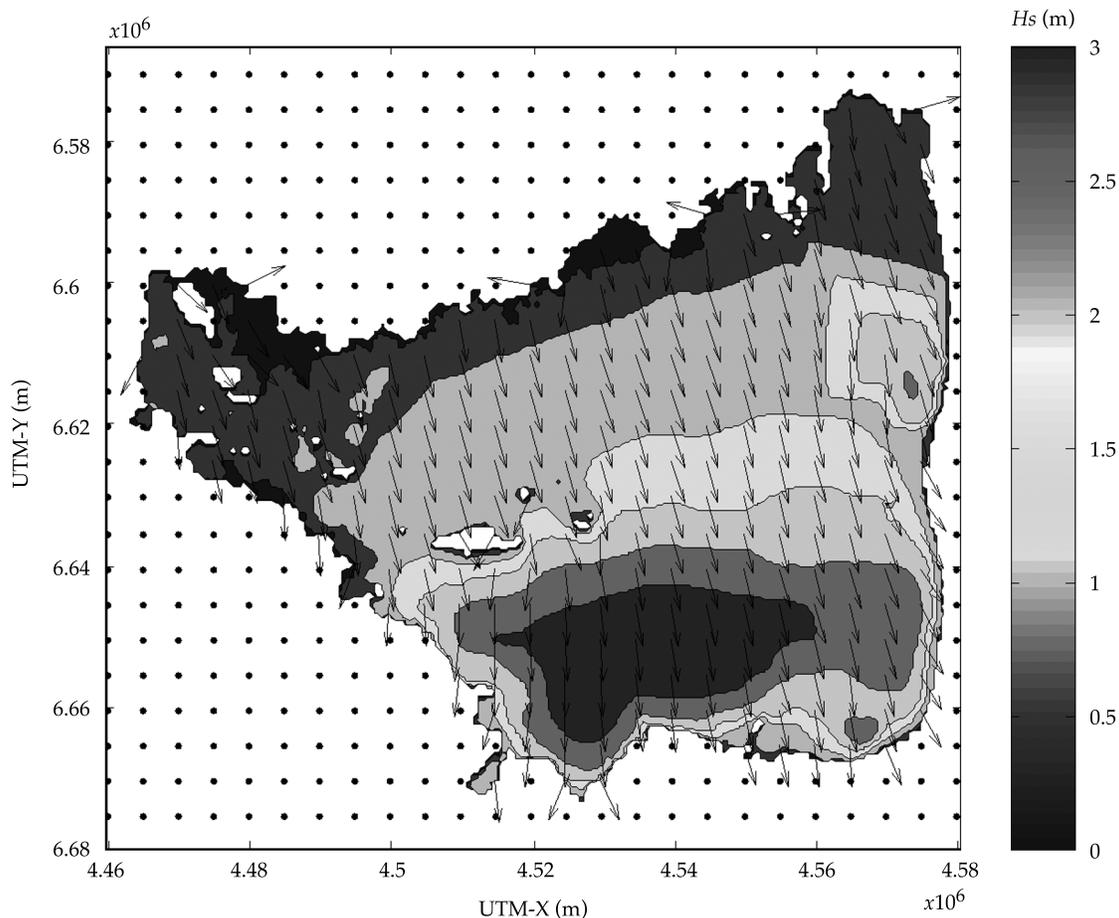


Figura 11. Generación del oleaje con el modelo SWAN por viento norte de 100 años de retorno.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Ministerio de Ciencia y Tecnología de la provincia de Córdoba que dio marco al presente trabajo. A la Agencia Córdoba Ambiente (en particular a la Reserva Provincial de Miramar), a la Subsecretaría de Recursos Hídricos y Coordinación de la Provincia de Córdoba, y al guardaparque, Pablo Michelutti, de la Reserva de Miramar, por la información suministrada.

Recibido: 07/06/13
Aceptado: 16/11/13

Referencias

- ACES (1992). *Automated Coastal Engineering System, v 1.07*. Vicksburg, USA: US Army Corps of Engineers, Coastal and Hydraulics Laboratory-Engineer.
- Research and Development Center. Waterways Experiment Station
- Agencia Córdoba Ambiente S.E. (2004). *Suelos de la Provincia de Córdoba* (300 pp.). Córdoba, Argentina: Gobierno de la Provincia de Córdoba.
- Cereceda-Botella, A. (2009). *Propuesta de volúmenes ambientales para el sistema Laguna Mar Chiquita*. Trabajo final de grado. Córdoba, Argentina: Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba.
- Environmental System Research (ESRI) (2004). *Manual de Usuario del Programa ENVI 4.3* (pp. 750). Boulder, USA: ITT Industries, Inc.
- Hillman, G. (1999). *Simulación Hidrológica del Sistema de Mar Chiquita* (pp. 490). Trabajo final de Grado. Córdoba, Argentina: Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba.
- Hillman, G. (2003). *Análisis y Simulación Hidrológica del Sistema de Mar Chiquita*. Tesis de Maestría en Ciencias de la Ingeniería, Mención Recursos Hídricos. Córdoba, Argentina: Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba.

- Hillman, G., Rodriguez, A., Pagot, M., Caamaño-Nelli, G., Pozzi, C., & Plencovich, G. (2003). Análisis de volúmenes ecológicos para la laguna de Mar Chiquita. *Cuadernos del CURIHAM* (Universidad Nacional de Rosario, Argentina), 8(2), 185-195.
- 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* (pp. 437). Lyon: World Scientific Press.
- Laboratorio de Hidráulica-Universidad Nacional de Córdoba (2011). *Estimación de la cota máxima de inundación para la laguna mar chiquita. Informe Final Ministerio de Ciencia y Tecnología de la Provincia de Córdoba* (94 pp.). Córdoba, Argentina: Laboratorio de Hidráulica-Universidad Nacional de Córdoba.
- Mase, H. (1989). Random Wave Run-up Height on Gentle Slope. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 115(5), 649-661.
- Mase, H., & Iwagaki, Y. (1984). Run-up of Random Waves on Gentle Slopes. *Proceedings of the 19th International Conference on Coastal Engineering* (pp. 593-609), American Society Civil Engineers, Houston.
- Pagot, M. (1999). *Análisis y simulación hidrológica del Sistema Bañados del río Dulce*. Trabajo Final de Grado. Córdoba, Argentina: Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba.
- Pagot, M. (2003). *Análisis y simulación hidrológica del Sistema Bañados del río Dulce*. Tesis de Maestría en Ciencias de la Ingeniería, Mención Recursos Hídricos. Córdoba, Argentina: Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba.
- Pagot, M., Hillman, G., Rodriguez, A., Caamaño-Nelli, G., & Plencovich, G. (2003) Determinación de hidrogramas ecológicos para la cuenca inferior del río Dulce con apoyo satelital. *Cuadernos del CURIHAM* (Universidad Nacional de Rosario, Argentina), 8(2), 146-154.
- Plencovich, G., Hillman, G., Pagot, M., Pozzi, C., Rodriguez, A., Caamaño-Nelli, G., & Bertoni, J.C. (mayo, 2005). *Actualización del modelado del sistema Laguna Mar Chiquita – Bañados del río Dulce, Córdoba, Argentina*. XX Congreso Nacional del Agua 2005 y III Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur, Mendoza, 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. Córdoba, Argentina: Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.
- Pozzi, C., Plencovich, G., Hillman, G., Rodriguez, A., Caamaño-Nelli, G., Michelutti, P., Salio, P., & Pagot, M. (mayo, 2005). *Monitoreo hidroambiental de la laguna Mar Chiquita, Córdoba. Aplicación al diseño de las defensas costeras de Miramar*. XX Congreso Nacional del Agua 2005 y III Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur, Mendoza, Argentina.
- Pozzi, C. (2006). *Simulación hidrodinámica y monitoreo del sistema Mar Chiquita (Mar de Ansenuzza), Córdoba, Argentina*. Tesis de Maestría en Ciencias de la Ingeniería, Mención Recursos Hídricos. Córdoba, Argentina: Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba.
- Rodriguez, A., Hillman, G., Pagot, M., Menajovsky, S., Barbiero, S., Caamaño-Nelli, G., Chini, I., & Bernasconi, I. (2000a). *Simulación Hidrológica del Sistema de Mar Chiquita, Córdoba, República Argentina*. XVIII Congreso Nacional del Agua, CPCA, Santiago del Estero, Argentina.
- Rodriguez, A., Pagot, M., Hillman, G., Caamaño-Nelli, G., Bernasconi, I., Menajovsky, S., Barbiero, S., & Chini, I. (2000b). *Simulación Hidrológica del Sistema Bañados del Río Dulce, Córdoba, República Argentina*. XVIII Congreso Nacional del Agua, CPCA, Santiago del Estero, Argentina.
- Rodriguez, A., Hillman, G., Pagot, M., & 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*, 2(1), 15.
- ROM 02.90 (1990). *Recomendaciones de obras marítimas. Acciones para proyectos de obra portuaria o marítima*. Madrid: Dirección General de Puerto y Costas, Ministerios de Obras Públicas y Urbanismos.
- SPM (1984). *Shore Protection Manual*. Fort Belvoir, USA: Coastal Engineering Research Center.
- SWAN (2000). *Simulating Wave Near Shore Model*. Delft, The Netherlands: Delft University of Technology.
- TIC (2003). *Software tutor de ingeniería de costas. Sistema de modelado costero*. Cantabria: Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria.
- Troin, M., Vallet-Coulomb, C., Sylvestre, F., & Piovano, E. (2010). Hydrological Modelling of a Closed Lake (Laguna Mar Chiquita, Argentina). *Journal of Hydrology*, 393, 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 Consejo Federal de Inversiones*. Córdoba, Argentina: Universidad Nacional de Córdoba.
- Universidad Nacional de Córdoba-Universidad Nacional de Santiago del Estero (UNC-UNSE) (2007). *Estudio hidrológico-ambiental del sistema Mar Chiquita-Bañados y tramo inferior del río Dulce. Informe Final a la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación* (312 pp.). Córdoba, Argentina: Universidad Nacional de Córdoba-Universidad Nacional de Santiago del Estero.
- U.S. Geological Survey (USGS) (February, 2004). *Shuttle Radar Topography Mission. U.S. Geological Survey, Global Land Cover Facility*. College Park, USA: University of Maryland.
- Von Grumbkow, J. B. (1890). Exploración de Mar Chiquita. *Boletín del Instituto Geográfico Argentino*, 2(1), 113-115.

Dirección institucional de los autores

M.I. Mariana Pagot
M.I. Gerardo Hillman
M.I. Cecilia Pozzi Piacenza
M.I. Paolo Gyssels
M.I. Antoine Patalano
Dr. Andrés Rodríguez

Laboratorio de Hidráulica
Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
Universidad Nacional de Córdoba
Av. Filloy s/n
Córdoba, Argentina
Teléfono: +35 (1) 4334 446
mpagot@efn.uncor.edu