

**EL TSUNAMI DE CAMPO CERCANO DEL 27 DE FEBRERO
DE 2010 SOBRE LA LAGUNA COSTERA EL YALI (33°45'S).**

Manuel Contreras López*

*Centro de Estudios Avanzados (CEA) y Facultad de Ingeniería, Universidad de Playa Ancha,
(manuel.contreras@upla.cl)

Artículo recibido: 11-08-2013
Artículo aceptado: 05-12-2013

RESUMEN

El complejo de humedales El Yali es parte de una extensa red de lagunas costeras y humedales de Chile central que constituye un importante lugar de anidación y descanso de la avifauna residente y migratoria. El Yali se conforma de dieciocho cuerpos de agua, de los cuales tres se encuentran protegidos con el carácter de Reserva Nacional y sitio Ramsar. La zona costera de El Yali, incluyendo 200 hectáreas del área protegida, fue severamente afectada por el tsunami del 2010.

El objetivo del presente trabajo es reportar los efectos del tsunami de campo cercano del 27 de febrero de 2010 sobre la laguna costera y la desembocadura del estuario El Yali. Se estima el área de inundación por la onda de tsunami en el sector, se presentan parámetros como la profundidad de inundación, *runup*, intrusión horizontal. Se comparan diversas estimaciones de los movimientos cosísmicos verticales para el lugar. Se estima la hora de arribo de la onda de tsunami y se discute la posibilidad de que el tsunami en el sector se trate en realidad de una onda reflejada desde el Archipiélago de Juan Fernández.

Palabras clave: Sitios Ramsar, humedales costeros, área de inundación.

ABSTRACT

The wetlands complex El Yali is part of a large network of coastal lagoons and wetlands of central Chile, which constitute an important place of nesting and rest of the resident and migratory bird life. El Yali is composed of eighteen bodies of water, where three of them are protected as National Reserve and Ramsar site. El Yali coastal area, including 200 hectare of protected area, was seriously affected by a tsunami in 2010.

The objective of this work is to report in near field the effects of the tsunami of february 27th of 2010 in the coastal lagoon and El Yali estuary mouth. The tsunami wave flooding area is estimated, and parameters such as the flooding depth, *runup*, horizontal intrusion are presented. Diverse estimations of the vertical coseismic movements for the place are compared. The tsunami wave arrival time is estimated and it is discussed the possibility that the tsunami in the area is, in fact, a wave reflected from Juan Fernandez archipelago.

Key words: Ramsar site, coastal wetlands, flooding area.

INTRODUCCIÓN

En los últimos treinta años diversos autores han coincidido sobre la falta de estudios e información respecto a los humedales y lagunas costeras en Chile central (Leighton, 1985; Leighton *et al.*, 1987; Stuardo y Valdovinos, 1989; Valdovinos, 2004; Cienfuegos *et al.*, 2012), a pesar de su reconocida importancia a nivel mundial (Yáñez – Arancibia, 1986; Dyer, 1997; Babinger, 2002). Los humedales son zonas en que el agua es el principal factor que controla la vida vegetal y animal. Corresponden a sistemas altamente productivos, intermedios entre ambientes permanentemente inundados y ambientes secos. Tienen asociadas varias funciones, entre las que destacan el control de sedimentos, la descarga de aguas subterráneas y la protección de zonas costeras (Scott y Carbonell, 1986; Bó y Malvárez, 1999). Estos sitios son de especial importancia para las aves marinas, ya que les proporcionan lugares donde pueden pasar todo o parte del año para cubrir una determinada etapa de su ciclo anual, como la nidificación y crianza, muda del plumaje y descanso (López-Lanús y Blanco, 2005; Estades *et al.*, 2012).

En Chile central (30°S - 41.40°S) existe una compleja red de humedales costeros (Riveros *et al.*, 1981; Parra *et al.*, 2003; Rasek y Riveros, 2006; Andrade y Grau, 2005; Marquet *et al.*, 2012). Entre éstos destaca el sistema de humedales de El Yali, ubicado al sur de la comuna de Santo Domingo, región de Valparaíso (Vilina, 1994; Fariña *et al.*, 2012). Esta zona fue severamente afectada por el terremoto y maremoto del 27 de febrero del 2010 (Lagos, 2010; Rubio y Basic, 2011). En el sector costero, la onda del tsunami penetró en promedio más de 800 metros sobre la línea de más alta marea, inundando un área protegida de aproximadamente 200 hectáreas correspondientes a la Reserva Nacional El Yali, barriendo las dunas costeras que servían de abrigo a una laguna costera o Albufera. Esto provocó cambios en el ecosistema del humedal, arrasando con la vegetación y dejando un gran número de especies de aves muertas, además de alterar los sitios de nidificación y descanso de estas mismas. Se produjo una modificación en el paisaje, debido a que la onda de tsunami transportó mediante arrastre diversos tipos de algas, piedras, residuos sólidos de origen doméstico, artes de pesca y escombros de diversa naturaleza.

El objetivo del presente trabajo es reportar y documentar los efectos del tsunami de campo cercano del año 2010 sobre la zona costera del área protegida conocida como Reserva Nacional El Yali y en especial sobre la Albufera y la

desembocadura del estero El Yali, determinado el área inundada por la intrusión del mar, parámetros como *runup*, profundidad de inundación y estimando la hora de arribo de la onda del tsunami.

Figura 1: Localización de la Reserva Nacional El Yali (33°45'S; 71°43'W) en el sur de la región de Valparaíso. Se señalan las localidades del entorno afectadas por el tsunami del año 2010 y las desembocaduras de los ríos Rapel (33°54'S; 71°49'W) y Maipo (33°37'S; 71°38'W) cuyas cuencas delimitan el sistema de humedales El Yali.

[Fuente: Adaptación de Google Earth]



Reserva Nacional El Yali

El complejo de humedales El Yali, limita al norte con la cuenca del río Maipo y al sur con la del río Rapel (Figura 1). Con sus 11500 hectáreas de superficie, compromete dieciocho cuerpos de agua diferentes, representados por cinco esteros (El Yali, Santa Rosa, El Peuco, Tricao, Maitenlahue), dos vegas (El Convento, Vega de Talca), dos salinas (El Convento y Bucalemu), el embalse Los Molles, áreas de

médanos, siete lagunas interiores (Cabildo, Seca, La Matanza, Colejuda, Guaraivo, El Rey y Maura) y la laguna salobre o Albufera, la cual corre paralelamente a la línea de la costa y se encontraba separada del mar por medio de una duna de arena. Una extensión del 4.5% del sistema de humedales se encuentra protegido, conformando la Reserva Nacional El Yali y que incluye parte de la laguna La Matanza, la laguna Colejuda y la Albufera.

El desarrollo de este complejo de humedales obedece a la interacción de varios factores que han determinado la evolución geomorfológica de la costa de Chile central durante los últimos 18000 años. Esta evolución es posible estudiarla debido a la presencia de la formación Navidad en las inmediaciones (Fariña *et al.*, 2012; Encinas *et al.*, 2006). Adjunto a la formación Navidad, se encuentra una duna (El Convento) cuya extensión, de más de 1000 hectáreas (Paskoff y Manríquez, 2004), se cuenta entre las más importantes de la región. Estas dunas fueron intervenidas por Albert (1900) mediante plantaciones de eucaliptos y pinos para lograr su consolidación entre fines del siglo XIX y comienzos del XX.

Existe amplio consenso en que la Reserva Nacional El Yali, es un importante sitio de reproducción, alimentación y descanso de aves marinas, que sustenta la representación de 130 especies de aves, correspondientes al 28% de la avifauna de nuestro país (Vilina, 1994; Brito, 1999, 2009; Figueroa *et al.*, 2009; Vidal-Abarca *et al.*, 2011; Fariña *et al.*, 2012) y que llega a albergar unos 20000 individuos. A este lugar llegan varias especies de aves migratorias tanto a nivel altitudinal, latitudinal como inter – hemisféricos, 15 de las cuales provienen del hemisferio norte (Amazonas, Ecuador, Estados Unidos y Canadá). Por este motivo se encuentra protegido bajo la convención Ramsar (sitio N° 878) y es uno de los once humedales costeros en el hemisferio sur bajo esta convención que se encuentran en un clima mediterráneo (Rubio y Basic, 2011). Este complejo posee un alto dinamismo estacional (invierno - verano) y cíclico, esto último asociado al fenómeno El Niño - Oscilación Sur (ENSO, por las siglas en inglés).

El Terremoto y Maremoto del 27 de febrero de 2010

El gran terremoto de subducción Mw = 8.8 de Chile central que ocurrió el 27 de febrero de 2010 a las 3:34 A.M. (hora local) se originó debido al desplazamiento súbito de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana. El Yali se encuentra cerca del

límite norte del área de ruptura, que comprendió entre Valparaíso (33° S) y el sur de Isla Mocha (38.6° S), con una extensión superior a 610 km (Quezada *et al.*, 2010) alineado con la línea de costa, y un ancho promedio de 150 km (Barrientos, 2010), afectando un área estimada de 82500 km² (Pararas-Carayannis, 2010).

Figura 2: Vista desde el noroeste a la Albufera tomada en febrero de 2009 (un año antes del tsunami). Se aprecia la cobertura vegetal. En el horizonte se distingue el bosque de eucaliptos y pinos que consolidan una antigua duna de arena.

[Fuente: Colección personal]



Figura 3: Señalética de la reserva arrasada por la onda de tsunami. Se puede apreciar los restos de la vegetación que soportaron la inundación y la arena proveniente de la duna costera depositada en el suelo. En el horizonte se destaca el bosque de eucaliptos y pinos.

[Fuente: Colección personal]



Resultados preliminares estiman un desplazamiento cercano a los 10 m en el contacto interplaca (Barrientos, 2010). La ruptura se puede subdividir en dos

segmentos (Quezada *et al.*, 2010; Delouis *et al.*, 2010; Lorito *et al.*, 2011), uno de los cuales comienza desde las cercanías de Chanco (35.8°S) y prosigue en dirección SSW hasta el sur de la Isla Mocha (38.6°S); mientras el otro se inicia en las cercanías de Constitución (35.3°S) y prosigue en dirección NNE hasta el sur de Valparaíso (33°S).

Como consecuencia de los importantes movimientos verticales que generó el terremoto, un tsunami destructor impactó toda la zona centro – sur de Chile (Tirúa – Lolleo) arrasando con varias localidades ya devastadas por el sismo, y con efectos visibles entre Corral y Coquimbo, propagándose además por el océano Pacífico con efectos visibles, pero no destructores, en Islas Galápagos (Moreano *et al.*, 2012), México, Hawaii, Nueva Zelandia (NOAA, 2013). Se reportaron daños en embarcaciones y un muelle en San Diego, California, e inundaciones en el norte de Japón (Pararas-Carayannis, 2010). En el litoral de Chile, las localidades más afectadas fueron: Talcahuano, Constitución, Dichato, Lolleo, Tubul y Llico y sufrieron daños significativos Tirúa, Coliumno, Vegas de Itata, Chanco e Iloca entre otras muchas localidades costeras que experimentaron algún daño. En El Yali no hubieron testigos que den cuenta de lo ocurrido aquella madrugada, sin embargo los guardaparques de la Corporación Nacional Forestal (CONAF) pudieron constatar a los dos días los efectos destructores del tsunami sobre el área protegida (Figuras 2, 3, 4 y 5).

MATERIALES Y MÉTODOS

Entre Marzo de 2010 y Marzo de 2011, se efectuaron diez (10) campañas de terreno. En la primera de ellas, se aplicó la metodología propuesta por UNESCO (1998) para realizar un levantamiento posterior a un tsunami, de manera de poder identificar las marcas dejadas por la inundación y a partir de ellas estimar parámetros como *runup* máximo (diferencia entre la elevación de la máxima penetración del mar y la elevación de la línea de costa al momento del ataque del tsunami), nivel máximo de inundación (diferencia entre la elevación de la marca de agua local más alta y la elevación de la línea de costa a la hora del ataque del tsunami), e intrusión máxima (penetración horizontal máxima del tsunami desde la línea de costa). En la figura 6 se esquematizan los parámetros registrados para un corte vertical de la laguna costera en la Reserva Nacional El Yali. En cada una de las campañas posteriores se posicionó mediante un GPS, las marcas dejadas por el tsunami, consistente en objetos que por su tamaño, naturaleza y disposición su presencia sólo puede ser explicada por el tsunami. Estos recorridos se efectuaron cuidando no alterar la anidación de aves y

procurando realizar el mínimo impacto a la reserva, de acuerdo a las indicaciones y orientación permanente de los guardaparques de CONAF. En un área demarcada de 34 hectáreas que fueron inundadas por el tsunami, se procedió a recolectar, clasificar y pesar la totalidad de los residuos depositados. La clasificación usada fue: plásticos, plumavit, vidrios, madera y otros. La recolección se realizó en cuadrantes de 100 m x 25 m. Como esta actividad se realizó en un área protegida y deshabitada, existió una intervención mínima de terceros que pudiera alterar los resultados. Toda la data obtenida fue volcada en Google Earth pro V.6.0.2 y se llevó un registro fotográfico del lugar (Figuras 7 y 8), esta información permitió delimitar el área inundada por el mar.

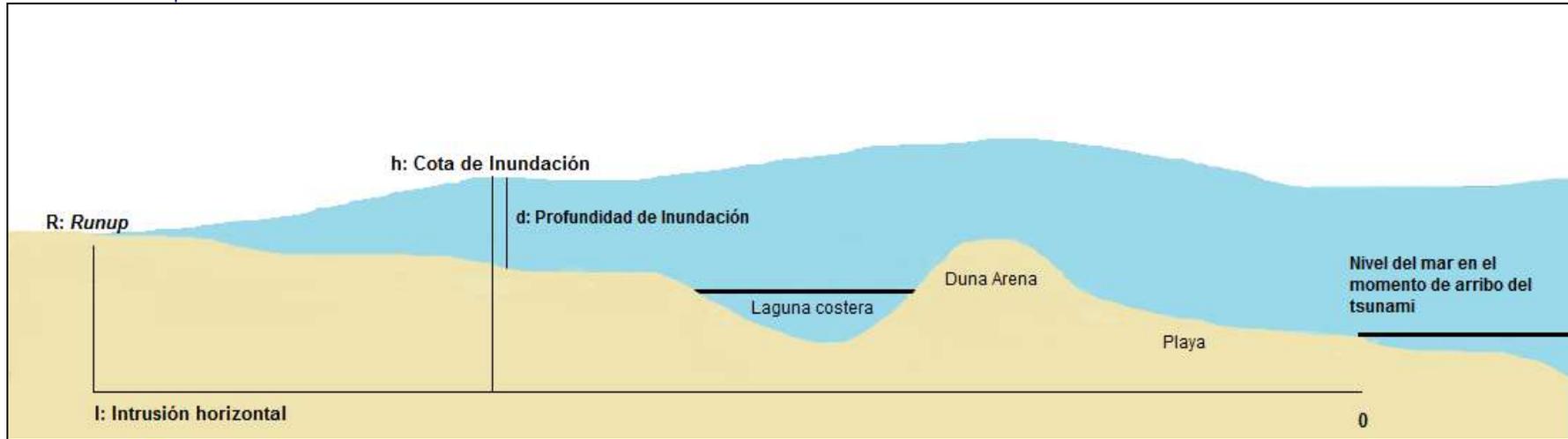
Figura 4: Vista desde el Este a la Albufera tomada en marzo de 2010, quince días después del tsunami. Se puede apreciar los restos de vegetación y la falta de la duna costera que fue completamente arrasada. [Fuente: Colección personal]



Figura 5: Vista desde el Sur hacia punta Toro en el fondo (felcha), tomada en marzo de 2010, quince días después del tsunami. Se puede apreciar la vegetación arrasada y la arena depositada por la inundación. La vegetación se quemó debido a la salinidad del agua de mar. [Fuente: Colección personal]



Figura 6: Nomenclatura utilizada para referir a los diferentes planos verticales e intrusión horizontal de inundación por tsunami, con respecto a un cierto nivel de referencia del evento. R: *runup* o máxima cota de inundación, h: cota de inundación, d: profundidad de inundación e l: máxima intrusión horizontal. Se esquematiza la posición de la duna de arena y la Albufera arrasadas por el tsunami en la zona costera del humedal El Yali. Vista en corte transversal.



[Fuente: Elaboración propia]

Figura 7: Vista panorámica desde el noreste de la Albufera en marzo de 2011, un año después del evento. Se aprecia la recuperación de la cubierta vegetal, pero la escasa recuperación de la duna costera. En primer plano se observa los restos de un árbol depositado por el tsunami.



[Fuente: Colección personal]

Figura 8: Vista panorámica del sector sur de la Albufera en marzo de 2011, un año después del evento. Esta sección era parte de la antigua laguna costera pero que debido a la falta de la duna cambió su dinámica a un cuerpo de agua que se inunda en las más altas mareas de sicigias y se seca completamente en los periodos de cuadratura. Al fondo de aprecia punta Toro (flecha).



[Fuente: Colección personal]

Figura 9: Área de inundación estimada (línea continua blanca) para la madrugada del 27 de febrero de 2010 en el arco de playa de 10 km de longitud que va desde los 33°45'56"S a los 33°43'44"S, la superficie corresponde a 840 hectáreas aproximadamente. Se señala el área protegida correspondiente a la reserva nacional (línea punteada negra).



[Fuente: Adaptación de Google Earth]

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las inmediaciones del área en estudio (San Antonio y Valparaíso), la onda del tsunami tuvo una altura entre 1.3 y 1.5 m, arribando pasadas las 4:00 A.M (30 minutos después del sismo principal). No hubieron testigos en la Reserva Nacional El Yali, pero de acuerdo a lo establecido en las localidades más cercanas (Moztazal al Sur y Llole al Norte), se puede inferir que la onda de tsunami principal arribó pasadas las 5:30 A.M.

En la localidad de Cartagena, 35 km al norte de la Reserva Nacional El Yali, la onda penetró unos 100 metros y cobró la vida de una persona. En el puerto de San Antonio arrastró embarcaciones y causó algunos daños en las instalaciones portuarias, no siendo afectada la población. Inmediatamente al sur, en la localidad de Llole, sin embargo, la onda penetró 450 metros, arrasó más de 160 viviendas ligeras (Contreras *et al.*, 2013) y cobró la vida de 5 personas para terminar inundando las lagunas costeras Ojos de Mar de Llole. La onda de tsunami remontó 2.5 km por la ribera del río Maipo después de arrasar la barra de arena. En Santo Domingo y la localidad de las Brisas de Santo Domingo, la onda de tsunami penetró en promedio 80 metros, apenas afectando el terreno de playa, siendo detenidas por las características dunas de arena de sus playas (Paskoff y Manríquez, 2004). Al sur de la de Reserva Nacional El Yali, la onda de tsunami ingresó con violencia en el estero Maitenlahue, arrasando algunas viviendas ligeras en caleta Moztazal después de ingresar 400 metros, cobrando una séptima víctima fatal. En esta localidad se registraron los *runup* más importantes de la región de Valparaíso, superando los 10 metros (Fritz *et al.*, 2011). En Figura 1 se pueden revisar los emplazamientos relativos de las localidades mencionadas con respecto a la Reserva Nacional El Yali, y en la Tabla 1 se consignan la profundidad de inundación, *runup*, intrusión horizontal y número de víctimas fatales por cada una de las localidades cercanas a la reserva.

La profundidad de inundación en las localidades cercanas a la reserva fueron bastante consistentes y en promedio corresponde a 4.41 metros, con una desviación estándar de 1.07 metros. El *runup*, en cambio, presenta una dispersión mayor con rangos entre los 0.70 y 14.70 metros, con un promedio de 4.83 metros, que se reduce a 3.28 metros si se excluyen los registros extremos de caleta Moztazal.

Tabla 1: Profundidad de inundación, *runup*, intrusión horizontal y número de víctimas fatales por localidad en la región de Valparaíso en las inmediaciones de la Reserva Nacional El Yali. SD = Sin Dato.

N°	Localidad	Latitud	Longitud	Profundidad Inundación	Runup	Intrusión horizontal	N° Víctimas
1	Cartagena	33°32'32.32"	71°36'09.65"	SD	4.00	103.0	1
2	San Antonio	33°35'25.80"	71°36'57.00"	SD	SD	0.0	0
3	Llolleo	33°36'16.92"	71°37'31.08"	SD	3.90	57.2	5
4		33°36'25.78"	71°37'33.24"	4.00	SD	77.9	
5		33°36'26.57"	71°37'32.56"	3.00	SD	179.9	
6		33°36'26.64"	71°37'18.84"	SD	2.00	455.0	
7		33°36'26.96"	71°37'34.93"	4.60	SD	122.2	
8		33°36'27.79"	71°37'21.97"	3.30	SD	455.2	
9		33°36'51.84"	71°37'36.84"	SD	2.60	27.9	
10	Santo Domingo	33°38'20.40"	71°38'05.64"	SD	4.80	93.0	0
11	Las Brisas	33°42'20.52"	71°39'32.76"	5.53	3.40	72.2	0
12	El Yali	33°44'51.72"	71°42'30.24"	5.20	3.20	320.0	0
13		33°45'05.40"	71°43'03.36"	3.13	2.10	180.0	
14		33°46'07.68"	71°44'31.20"	SD	0.70	624.0	
15	Caleta	33°50'02.76"	71°48'49.68"	SD	10.40	114.0	1
16	Moztazal	33°50'12.12"	71°48'51.48"	5.58	SD	SD	
17		33°50'13.92"	71°48'57.96"	SD	14.70	69.0	
18		33°50'13.92"	71°48'43.92"	5.35	SD	SD	
19		33°50'16.80"	71°48'41.40"	SD	6.10	434.0	

[Fuente: Fritz *et al.* (2011) y Fiscalía (2011)]

Al posicionar los restos dejados por el tsunami e identificar el área erosionada por el ingreso del mar, se pudo identificar el área de inundación mostrado en la Figura 9. En la Tabla 2 se señalan las posiciones geográficas de los principales restos y evidencias de la inundación provocada por el ingreso de las ondas de tsunami. El área de inundación identificada alcanza las 840 hectáreas, de las cuales 213 hectáreas corresponden al área protegida como Reserva Nacional y sitio Ramsar. La inundación tiene la forma de un triángulo, donde las intrusiones horizontales mayores se alcanzan en el sector de la desembocadura del estuario y los médanos con 2000 metros. Inmediatamente al sur de la Albufera el mar ingresó cerca de 1400 metros. En el sector norte de la albufera, el mar ingresó 830 metros. En la playa localizada al norte de la reserva nacional, el mar ingresó 200 metros. Los lugareños relatan que la onda de tsunami llegó hasta Las Salinas, emplazadas 5.2 km estuario arriba.

Tabla 2: Posiciones geográficas de las marcas dejadas por la inundación de las ondas de tsunami en la zona costera del humedal El Yali.

N°	Latitud	Longitud	Tipo de Marca - Observación
1	33°44'47.88"	71°42'10.46"	Marca de inundación en árboles
2	33°45'29.30"	71°43'44.10"	Vegetación arrastrada
3	33°45'38.20"	71°44'03.70"	Vegetación arrastrada
4	33°45'49.40"	71°44'26.80"	Vegetación arrastrada
5	33°45'48.50"	71°44'24.50"	Juguete depositado por la onda de tsunami
6	33°45'40.50"	71°44'05.70"	Cobertura vegetal arrancada del suelo, socavación.
7	33°45'47.80"	71°44'32.30"	Juguete depositado por la onda de tsunami
8	33°46'02.90"	71°44'47-60"	Juguete depositado por la onda de tsunami
9	33°46'02.70"	71°44'47.10"	Restos de vivienda (marco de ventana)
10	33°44'51.30"	71°42'29.10"	Diversos objetos depositados por la onda de tsunami
11	33°44'49.80"	71°42'26.10"	Diversos objetos depositados por la onda de tsunami
12	33°45'38.90"	71°44'02.70"	Diversos objetos depositados por la onda de tsunami
13	33°46'00.00"	71°44'42.00"	Restos experimento vegetación dunas PUC
14	33°46'14.50"	71°44'41.50"	Marcas de inundación en cerco
15	33°46'15.30"	71°44'43.30"	Cerco arrasado
16	33°45'56.90"	71°44'43.30"	Restos experimento vegetación dunas PUC
17	33°45'17.40"	71°43'09.90"	Restos experimento vegetación dunas PUC
18	33°44'51.60"	71°42'30.40"	Marcas de inundación
19	33°45'05.40"	71°42'39.80"	Máxima intrusión y runup
20	33°46'07.60"	71°44'03.20"	Máxima intrusión
21	33°46'20.01"	71°44'46.62"	Restos depositados por la onda de tsunami
22	33°45'57.60"	71°46'18.60"	Marcas inundación
23	33°45'58.26"	71°46'19.32"	Marcas socavación en el suelo
24	33°45'58.38"	71°46'18.54"	Vegetación quemada por el agua salina
25	33°45'58.86"	71°46'18.90"	Vegetación quemada por el agua salina
26	33°45'58.86"	71°46'18.36"	Vegetación quemada y artes de pesca depositados
27	33°45'59.04"	71°46'19.20"	Marcas inundación y restos depositados
28	33°45'59.70"	71°46'18.66"	Marcas inundación
29	33°45'59.82"	71°46'18.18"	Restos depositados
30	33°45'59.28"	71°46'18.12"	Marcas inundación
31	33°45'58.74"	71°46'17.88"	Marcas inundación y restos depositados
32	33°46'04.14"	71°46'01.62"	Marcas socavación en suelo ingreso onda de tsunami
33	33°46'05.76"	71°45'35.04"	Poste arrancado
34	33°45'58.26"	71°45'11.10"	Marcas inundación y restos depositados
35	33°45'59.58"	71°45'10.62"	Cerco arrasado
36	33°45'59.58"	71°45'10.44"	Cerco arrasado
37	33°45'59.58"	71°45'08.52"	Cerco arrasado
38	33°45'59.64"	71°45'06.96"	Cerco arrasado
39	33°45'36.64"	71°44'01.86"	Restos embarcación menor depositada por tsunami
40	33°46'01.80"	71°44'50.70"	Restos vivienda (artefactos sanitarios)
41	33°45'22.80"	71°43'22.60"	Marcas inundación y restos depositados

[Fuente: Colección personal]

En las 34 hectáreas donde se recolectó la totalidad de los residuos sólidos depositados por el tsunami, se pudieron extraer: 1305 kg de plásticos, 357 kg de plumavit, 478 kg de madera, 222 kg de vidrios y 603 kg de artículos varios (artículos compuestos como artículos electrónicos, juguetes, telas, cartones, metales entre otros). Lo que totaliza 2965 kg de restos sólidos depositados en 34 ha. Al suponer que la distribución de estos restos es uniforme, se puede estimar un total de 18.5 ton de residuos sólidos depositados en el área protegida por el tsunami y 73.2 ton en el área de inundación aledaña a la zona costera de la reserva.

El principal efecto morfológico post tsunami que se puede apreciar es la segmentación de la laguna albufera en dos cuerpos de aguas independientes y que parecen llevar régimen de conexión diferenciados. Inmediatamente después del tsunami, en marzo de 2010, la laguna Sur presentaba una conexión permanente con el estuario El Yali, el que a su vez había perdido su barra de arena. Por esta razón durante la época invernal del año 2010, esta laguna estaba en comunicación permanente con el mar. Sin embargo, la falta de caudal del estero producto de la sequía asociada a las condiciones del fenómeno La Niña, junto a la reconstrucción de la barra de arena, convirtieron a la laguna Sur en un cuerpo de agua costero con una comunicación esporádica (sólo en condiciones de marea alta, en sicigias y marejadas intensas). Cuando las marejadas no se presentan por períodos de tiempo importantes, este cuerpo de agua tiende a secarse, revelando su fragilidad (Figura 8). En la situación actual (Agosto de 2013), las dunas de frente de playa han estado regenerándose, lo que constituye una barrera adicional para comunicar este cuerpo de agua con el mar. El aumento de precipitaciones después de la prolongada sequía ha permitido aumentar su volumen. La laguna Norte, en cambio ha mantenido una comunicación semi – permanente, requiriendo sólo mareas altas en sicigias para generar la conexión. Esto ha permitido mitigar el efecto de falta de precipitaciones, manteniendo la laguna su tamaño con oscilaciones menores, disminuyendo siempre su volumen, pero sin llegar a secarse con el caso de la laguna Sur (Figura 7).

Quezada *et al.* (2010) estimó que en el sector de Cartagena (35 km al norte de la reserva), la playa se hundió unos 35 cm debido al terremoto. Vargas *et al.* (2011), estimó que para las Rocas de Santo Domingo (5 km al norte de la reserva), este hundimiento como máximo puede haber sido de 10 cm (estimó que el cambio de nivel entre la tierra y el mar era de 0 cm con un error de 10 cm). Rubio y Basic (2011) encontraron que la playa retrocedió unos 20 metros producto del terremoto, lo que se puede asociar a un hundimiento del sector de unos 10 a 15 cm.

Debido a que la onda de tsunami se propagó desde el sur, es completamente esperable el *runup* y al intrusión horizontal de 100 m alcanzados en Cartagena, pero no así lo ocurrido en Lillole y en la zona costera de la reserva, sectores que debieron ser protegidos por Punta Toro. Tampoco la hora de arribo es coherente con la propagación del tsunami (casi dos horas después de ocurrido el sismo). Esto hace suponer que la onda de tsunami que llegó a la Reserva Nacional El Yali, se trata de una onda reflejada desde el Archipiélago Juan Fernández, distante 600 km mar afuera en una proyección perpendicular al litoral de la reserva. De esta forma el tsunami habría avanzado hasta Juan Fernández pasadas las 4:00 A.M., y parte de su energía se habría proyectado a la reserva, para arribar pasadas las 5:00A.M., tal como ocurrió en Lillole. Esto, sin embargo, debe ser corroborado con una simulación numérica que escape a los objetivos del presente trabajo.

CONCLUSIONES

El tsunami de campo cercano del 27 de febrero de 2010, inundó 840 hectáreas de la zona costera del sistema de humedales El Yali, de las cuales 213 hectáreas corresponden al área protegida como Reserva Nacional y sitio Ramsar. La inundación logró penetrar cerca de 1400 metros en el sector sur de la Albufera, 830 metros en el sector norte de la misma laguna costera, 200 metros en la playa localizada al norte de la reserva nacional y 2000 metros en los médanos y el estuario El Yali. Se encontraron evidencias que la onda de tsunami remontó hasta 5.2 km estuario arriba, llegando al sector de Las Salinas, pero sin causar daños importantes.

La onda de tsunami alcanzó un *runup* de 3.20 metros en el sector y en algunos puntos la inundación llegó a los 5.20 metros. En el sector se depositaron restos de viviendas, artes de pesca y residuos sólidos domiciliarios presumiblemente provenientes de Caleta Moztazal (15 km al sur) y Lillole (25 km al norte), que alcanzaron las 73 toneladas, 18 de las cuales fueron depositadas en el área protegida.

El tsunami gatilló un proceso de segmentación de la laguna costera, probablemente debido a una combinación de un hundimiento local producto de los movimientos cosísmicos verticales, la disminución de los aportes hídricos por la sequía que afecta el lugar y la alteración de la dunas que servían de protección entre la laguna y el mar.

AGRADECIMIENTOS

La Dirección General de Investigación de la Universidad de Playa Ancha, financió parcialmente este trabajo a través del proyecto DGI – ING 03/2011. La Dirección Regional de la Corporación Nacional Forestal (CONAF) brindó antecedentes y autorización para ingreso a la reserva. Su administrador, don Iván Velásquez junto a los guardaparques Sra. Ingrid Fruht y John Ruminot, colaboraron en la recolección de datos y toma de muestras más allá de sus funciones.

En el trabajo de campo colaboraron los alumnos de Ingeniería Civil de la Universidad Santa María, Luis Burgos, Matías Alday, Ignacio Sepúlveda; de Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Francisca Sánchez; de Geografía de la Universidad de Playa Ancha, Karla Sepúlveda; de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Playa Ancha, Alejandra Rubio, Bozika Basic, Ángel Lazcano, Esteban Retamal, Luis Urbina; y de Ingeniería Oceánica de la Universidad de Valparaíso, Alejandra Rodríguez.

BIBLIOGRAFÍA

ANDRADE, B. y GRAU, S. (2005). La laguna de Cahuil, un ejemplo de estuario estacional en Chile central. *Revista de Geografía Norte Grande*, 33, pp. 59 - 72.

ALBERT, F. (1900). Las dunas, o sean las arenas volantes, voladeros, arenas muertas, invasión de arenas, playas y médanos del centro de Chile: comprendiendo el litoral desde el límite norte de la provincia de Aconcagua hasta el límite sur de la de Arauco. *Anales de la Universidad de Chile*, imprenta Cervantes, 229pp.

BABINGER, F. (2002). La creciente importancia medioambiental de los humedales a modo de recensión bibliográfica. *Observatorio Medioambiental*. Volumen N° 5, pp. 333-347.

BARRIENTOS, S. (2010). Terremoto (m=8.8) del 27 de febrero de 2010 en Chile. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 67 (3), pp. 412 – 420.

BÓ, R. y MALVÁREZ, A. (1999). Las inundaciones y la biodiversidad en humedales. Un análisis del efecto de eventos extremos sobre la fauna silvestre. En Malvárez, A.I. (Ed.). Tópicos sobre humedales subtropicales y templados de Sudamérica. Oficina regional de ciencia y tecnología de la UNESCO para América Latina y el Caribe, ORCYT, Montevideo, Uruguay, pp. 140 – 161.

BRITO, J.L. (1999). Vertebrados del humedal La Reserva Nacional El Yali y su costa, Santo Domingo, Chile central. Anales del Museo de Historia Natural de Valparaíso. N° 24, pp. 121 - 126.

BRITO, J.L. (2009). San Antonio: nuevas crónicas para su historia y geografía. Salesianos Impresores S.A., San Antonio, Chile. 412 pp.

CIENFUEGOS, R.; CAMPINO, J.R.; GIRONÁS, J.; ALMAR, R. y VILLAGRÁN, M. (2012). Desembocaduras y lagunas costeras en la zona central de Chile. En Fariña, M.J. y Camaño, A. (editores) "Humedales costeros de Chile". Ediciones UC, Santiago de Chile, pp. 21 - 65.

CONTRERAS, M.; WINCKLER, P. y URBINA, L. (2013). Área de inundación y efectos del tsunami del 27 de febrero de 2010 en la localidad de Lilloe, San Antonio – Chile (33°36.5's). Manuscrito enviado a la revista Geográfica de Valparaíso (en línea).

DELOUIS, B.; NOCQUET, J. y VALLÉE, M. (2010). Slip distribution of the February 27, 2010 Mw = 8.8 Maule Earthquake, central Chile, from static and high-rate GPS, InSAR, and broadband teleseismic data. Geophysical Research Letters, Vol. 37, L17305.

DYER, K.R. (1997). Estuaries: A Physical Introduction. John Wiley & Sons, New York, 198pp.

ENCINAS, A.; LE ROUX, J.; BUATOIS, L.; NIELSEN, S.; FINGER, K.; FORTANIER, E. y LEVENU, A. (2006). Nuevo esquema estratigráfico para los depósitos marinos miopliocenos del área de Navidad (33°00'-34°30'S), Chile central. Revista Geológica de Chile, Vol. 33(2), pp. 221-246.

ESTADES, C.F.; VUKASOVIC, M.A. y AGUIRRE, J. (2012). Aves en los humedales costeros de Chile. En Fariña, M.J. y Camaño, A. (editores) "Humedales costeros de Chile". Ediciones UC, Santiago de Chile, pp. 67 - 99.

FARIÑA, J.M.; BERTNESS, M.D.; SILLIMAN, B., ARAGONESES, N. y GAYO, E. (2012). Historia natural y patrones ecológicos del humedal costero El Yali, Chile Central. En Fariña J.M. & Camaño, A. (editores) "Humedales costeros de Chile". Ediciones UC, Santiago de Chile, pp. 215 - 250.

FIGUEROA, R.; SUAREZ, M.; ANDREU, A.; RUIZ, V. y VIDAL - ABARCA, M. (2009). Caracterización Ecológica de Humedales de la Zona Semiárida en Chile Central. Gayana (Concepc.), Vol.73(1), pp. 76 - 94.

FISCALÍA (2011). Nomina de fallecidos y desaparecidos por el tsunami. Disponible en línea: http://www.fiscaliadechile.cl/Fiscalia/sala_prensa/noticias_det.do?id=125 (fecha última visita: junio de 2013).

FRITZ, H.; PETROFF, C.; CATALÁN, P.; CIENFUEGOS, R.; WINCKLER, P.; KALLIGERIS, N.; WEISS, R.; BARRIENTOS, S.; MENESES, G.; VALDERAS-BERMEJO, C.; EBELING, C.; PAPADOPOULOS, A.; CONTRERAS, M.; ALMAR, R.; DOMINGUEZ, J. y SYNOLAKIS, C. (2011). Field Survey of the 27 February 2010 Chile Tsunami. Pure and Applied Geophysics 168 (2011), pp. 1989–2010.

LAGOS, E. (2010). Reserva Nacional El Yali: su recuperación tras el terremoto y tsunami. Chile Forestal N°350, pp. 27- 28.

LEIGHTON, G. (1985). El manejo de ecosistemas de desembocadura y de ríos y esteros. Ambiente y Desarrollo, Vol. 1(2), pp. 137 - 142.

LEIGHTON, G.; LOBO, E. y UGARTE, R. (1987). Estructuras ambientales en los sistemas de desembocadura de ríos y esteros de la zona central de Chile (V Región). Revista de Biología Marina, Valparaíso, 23(2), pp. 139 - 157.

LÓPEZ-LANÚS, B. y BLANCO, D. E. (2005). El Censo Neotropical de Aves Acuáticas 2004. Global Series N° 17. Wetlands International. Buenos Aires, Argentina.

LORITO, S.; ROMANO, F.; ATZORI, S.; TONG, X.; AVALLONE, A.; MCCLOSKEY, J.; COCCO, M.; BOSCHI, E. y PIATANESI, A. (2011). Limited overlap between the seismic gap and coseismic slip of the great 2010 Chile earthquake. Nature Geoscience, Vol 4, pp. 173 – 177.

MARQUET, P.A.; ABADES, S. y BARRIA, I. (2012). Distribución y conservación de humedales costeros: una perspectiva geográfica. En Fariña, M.J. y Camaño, A. (editores) "Humedales costeros de Chile". Ediciones UC, Santiago de Chile, pp. 1 - 19.

MOREANO, H.; ARREAGA, P. y NATH, J. (2012). El tsunami de Chile 27-02-2010 y su comportamiento en las zonas costera e insular del Ecuador. Acta Oceanográfica del Pacífico, Vol. 17(1), pp. 31 - 39.

NOAA (2013). Tsunami Event Database. National oceanic and atmospheric administration. National Geophysical data center. Disponible en (julio de 2013): <http://www.ngdc.noaa.gov/nndc/struts/form?t=101650&s=70&d=7>

PARARAS-CARAYANNIS, G. (2010). The Earthquake and Tsunami of 27 February 2010 in Chile – Evaluation of Source Mechanism and of Near and Far-field Tsunami Effects. Science of Tsunami Hazards, Vol. 29(2), pp. 96 – 126.

PARRA, O.; VALDOVINOS, C.; URRUTIA, R.; CISTERNAS, M.; HABIT, E. y MARDONES, M. (2003). Caracterización y tendencias tróficas de cinco lagos costeros de Chile Central. Limnetica 22(1- 2), pp. 51 -83.

PASKOFF, R. y MANRÍQUEZ, H. (2004). Las dunas de las costas de Chile. Instituto Geográfico Militar. Santiago, 112pp.

QUEZADA, J.; JAQUE, E.; BELMONTE, A.; FERNÁNDEZ, A.; VÁSQUEZ, D.; y MARTÍNEZ, C. (2010). Movimientos cosísmicos verticales y cambios geomorfológicos generados durante el terremoto Mw = 8,8 del 27 de febrero de 2010 en el centro – sur de Chile. Revista Geográfica del Sur Nº 2, pp. 11 – 45.

RASEK, A. y RIVEROS, G. (2006). Comunidad invernal de aves en la desembocadura del río Aconcagua (V Región, Chile). Anales del Museo de Historia Natural de Valparaíso 25, pp. 57-64.

RIVEROS, G., SEREY, I. y DROUILLY, P. (1981). Estructura y diversidad de la comunidad de aves acuáticas de la laguna El Peral, Chile central. Anales del Museo de Historia Natural de Valparaíso 14, pp. 189-196.

RUBIO, A y BASIC, B. (2011). Investigación de impactos ambientales post tsunami Chile 2010 en la laguna Albufera perteneciente al humedal El Yali (33°45'30"S). Tesis para optar al Título Profesional de Ingeniero Ambiental y al Grado Académico de Licenciado en Ciencias de la Ingeniería. Facultad de Ingeniería, Universidad de Playa Ancha, Valparaíso, 165pp.

STUARDO, J. y VALDOVINOS, C. (1989). Estuarios y Lagunas Costeras: Ecosistemas importantes del Chile Central. Ambiente y Desarrollo. Volumen V, Nº 1, pp. 107 – 115.

SCOTT, D. y CARBONELL, M. (1986). Inventario de Humedales de la región Neotropical (Eds.). IWRB Slimbridge IUCN. Cambridge, United Kingdom. 714 pp.

VALDOVINOS, C. (2004). Ecosistemas estuarinos. En Werlinger, C. (2004) Editor "Biología Marina y Oceanografía: conceptos y procesos, Tomo II", pp. 397 – 414.

VARGAS, G.; FARÍAS, M.; CARRETIER, S.; TASSARA, A.; BAIZE, S. y MELNICK, D. (2011). Coastal uplift and tsunami effects associated to the 2010 Mw8.8 Maule earthquake in Central Chile. Andean Geology, 38 (1): 219-238.

VIDAL-ABARCA, M.; SUÁREZ, M.; FIGUEROA, R.; ENRÍQUEZ, M.; GARCÍA, V.; DOMÍNGUEZ, C. y ARCE, M. (2011). Caracterización hidroquímica del complejo de humedales El Yali, Chile Central. Limnetica 30(1), pp. 43 - 58.

VILINA, Y.A. (1994). Apuntes para la conservación del humedal "El Yali". Boletín Chileno de Ornitología 1, pp. 15-20.

YÁÑEZ – ARANCIBIA, A. (1986). Ecología de la Zona Costera: análisis de siete tópicos. AGT editor, S.A: México. 189pp.