

**XXV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
SANTAGO, CHILE, AGOSTO 2014**

**ESTUDIO COMPARATIVO DE LA DINÁMICA DE SWASH ALTAMENTE
ENERGÉTICO EN UNA PLAYA DISIPATIVA (MATAQUITO, CHILE) Y
REFLECTIVA (GRAND POPO, BENIN)**

***Raimundo Ibaceta^{1,2}, Rafael Almar², J-P Lefebvre², Patricio Catalán^{1,6},
Rodrigo Cienfuegos^{3,6}, Chris Blenkinsopp⁵, Mauricio Villagrán^{3,4}.***

*1 Departamento de Obras Civiles
Universidad Técnica Federico Santa María
Valparaíso, Chile
raimundo.ibaceta@alumnos.usm.cl
patricio.catalan@usm.cl*

*2 UMR LEGOS
(IRD-CNRS-CNES-U. Toulouse)
Toulouse, Francia
jean-pierre.lefebvre@ird.fr
rafael.almar@ird.fr*

*3 Pontificia Universidad Católica de Chile
Santiago, Chile.
racienfu@ing.puc.cl
mvillagrán@uc.cl*

*4 Departamento de Ingeniería Civil
UCSC
Concepción, Chile
mvillagrán@ucsc.cl*

*5 University of Bath
Department of Architecture
and Civil Engineering
Bath, UK.
c.blenkinsopp@bath.ac.uk*

*6 Centro Nacional de Investigación
para la Gestión Integrada de
Desastres Naturales (CIGIDEN).*

RESUMEN: Una nueva técnica de percepción remota y de bajo costo basada en el registro de imágenes de video es usada en una playa reflectiva (Grand Popo, Benin) y otra disipativa (Mataquito, Chile) para medir la hidrodinámica y morfodinámica en la zona de swash. Esta técnica permite medir el impacto de ola tras ola sobre la morfología de la playa a alta frecuencia temporal ($T \sim$ evento de swash). Resultados preliminares muestran grandes diferencias en la hidrodinámica del swash para las distintas playas. Por otro lado, se estudia la posibilidad de relacionar la energía reflejada en aguas profundas con la morfología local de la playa, encontrando una parametrización adecuada que sugiere un gran rol jugado por la morfología del swash en la reflexión de energía.

ABSTRACT: A new low cost remote sensing method based on video image processing is tested on a reflective beach (Grand Popo, Benin) and a dissipative beach (Mataquito, Chile) in order to measure the hydro-morphodynamics variations in the swash zone. This new technique enables the measurement of the swash to swash event impact over the beach morphology at high frequencies. Preliminary results show high differences between swash hydrodynamics of both beaches. On the other hand, a high link between the local swash morphology and the offshore reflected energy is found by developing a parametric model, suggesting the high role of the swash on energy reflection.

PALABRAS CLAVES: Swash, Mataquito, Grand Popo.

INTRODUCCIÓN

Entender los procesos responsables de la evolución de la costa a diferentes escalas de tiempo es crucial para sustentar el desarrollo socioeconómico de las comunidades que la habitan. A bajas escalas temporales ($T \sim$ segundos, minutos), el impacto individual de eventos de swash juega un rol fundamental en los cambios de la morfología de la playa. Sin embargo, aunque existe algún conocimiento acerca de la conexión entre las características del swash y la evolución de la playa en escalas de tiempo de horas a días, el impacto de eventos de swash individuales todavía no es conocido (Brocchini y Baldock, 2008). En particular, la descripción de la transferencia de energía entre ondas cortas y largas, y la reflexión producida en esta zona siguen siendo aún desafío para la investigación científica. Esto último es crucial para entender como el swash afecta el comportamiento de ondas largas, los patrones de ondas estacionarias y la interacción con la morfología (Masselink y Puleo, 2006). Por ejemplo, resultados usando datos de laboratorio y modelos numéricos (Almar et al., 2012) han mostrado que la pendiente del swash controla la frecuencia de las ondas reflejadas, adquiriendo así el swash un rol de filtro de la baja frecuencia, siendo menor la frecuencia de las ondas salientes mientras menor es la pendiente superior de la playa.

Por otro lado, existen dos modelos principales para describir la hidrodinámica del swash. El primero indica que en el swash predominan las oscilaciones a bajas frecuencias y el segundo propone que la hidrodinámica del swash es dominada por bores que colapsan en la línea de playa, propagándose en dirección hacia la costa. El primer enfoque ha sido identificado claramente en playas disipativas de baja pendiente mientras el segundo aparece más realista en playas con mayor pendiente (Baldock y Holmes, 1999)

En este trabajo se realiza un estudio comparativo del swash entre dos playas totalmente diferentes. Se estudia una playa intermedia-disipativa en la desembocadura del río Mataquito, Chile ($34^{\circ}52'N$, $72^{\circ}09'W$) y una playa altamente reflectiva, Grand Popo ($6.2^{\circ}N$, $1.7^{\circ}E$), en Benin (Golfo de Guinea, África Occidental). Las variaciones de la hidrodinámica y morfodinámica de ambas playas son medidas usando una nueva técnica de percepción remota y de bajo costo, basada en procesamiento de imágenes de video. En primer lugar se presentan los sitios de estudios y las mediciones realizadas en cada experimento, luego se presenta el método de percepción remota aquí propuesto y una comparación de este con otro método de medición ya conocido. Luego se estudia la hidrodinámica del swash, incluyendo los eventos de swash individuales y su impacto en la morfología y finalmente se presenta un modelo que busca relacionar la pendiente local del swash con la energía reflejada, realizando todo lo anterior para ambas playas en estudio.

SITIOS DE ESTUDIO, INSTRUMENTOS Y MEDICIONES

Por primera vez en Chile y en Benin (figura 1a), fueron realizadas campañas de terreno para entender el forzaje hidrodinámico y la relación de este con los procesos que controlan la evolución morfológica de la costa, motivados por evidencias empíricas de la rápida reformación de Mataquito (Villagrán et al., 2011) después del tsunami ocurrido el 27 de febrero del 2010 y de la evidente erosión (Almar et al., 2014a) observada en la playa de Cotonou (Benin), la cual está localizada a 80 kilómetros de Grand Popo.

Por un lado, Mataquito es una playa intermedia-disipativa y relativamente uniforme en dirección longitudinal, expuesta a swells que vienen desde el sud oeste del océano pacífico y que además es constantemente alimentada por descargas de sedimentos provenientes desde Los Andes. Por otro lado Grand Popo es una playa reflectiva expuesta a swells provenientes desde altas latitudes del Atlántico sur.

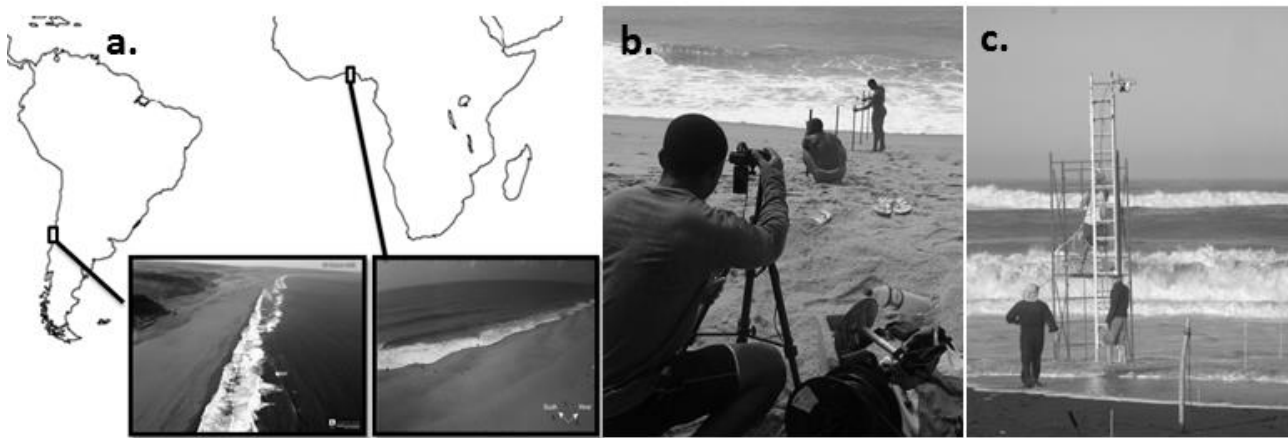


Figura 1.- a) Ubicación geográfica de los sitios de estudio. b) Transecto cross-shore y cámara HD (Grand Popo). c) Lidar (Mataquito)

Grand Popo presenta una terraza uniforme en dirección alongshore a baja marea, seguida por una parte altamente reflectiva y un patrón cusp-horn relativamente uniforme ($L \sim 35$ metros) en la parte alta de la playa. En ambos sitios se midió la energía en aguas profundas con un *acoustic Doppler current profiler* (ADCP) y también se realizaron diariamente mediciones GPS de la morfología de la playa a baja marea. Más información sobre las campañas de terreno de Mataquito y Grand Popo se pueden encontrar en Almar et al. (2014a) y Cienfuegos et al. (2014), respectivamente. A continuación se presenta una tabla resumen de las características hidrodinámicas y morfodinámicas de ambas playas durante los experimentos realizados.

Tabla 1.- Duración de los experimentos y características hidro-morfodinámicas de ambas playas

	Fecha Experimento	Hs	Tp (s)	RTR	Pendiente Promedio	D_{50} [mm]	Ω
GRAND POPO	19-28 Febrero 2013	2,4	12	1	0,16	0,6	3,5
MATAQUITO	28 Nov - 14 Dic. 2012	1,36	9,4	0,6	0,05	0,2	1,4

El swash de ambas playas fue medido con una nueva técnica de alta frecuencia basada en el registro de video de barras circulares (palitos) dispuestos verticalmente a lo largo de dos transectos cross-shore en Grand Popo (uno en el beach cusp y otro en el beach horn) y solo un transecto en Mataquito. Cada transecto tenía hasta 6 palitos separados cada aproximadamente 3 metros (figura 1b) los cuales fueron registrados durante horas del día por una cámara de video SONY CX-240 full HD (1920x1080 pixeles, 25 Hz). Además, el swash de Mataquito fue instrumentado con un LIDAR (Blenkinsopp et al., 2010) montado a 9 metros (figura 1c) sobre la playa para poder comparar con el método de percepción remota aquí propuesto.

PROCESAMIENTO DE DATOS

La discriminación de señales se basa en la variación de intensidad óptica entre los palitos, el agua y el nivel del fondo. El método consiste en extraer los pixeles a lo largo de líneas rectas que cubren longitudinalmente cada palito durante cada cuadro, para formar así diagramas espacio-tiempo de la señal óptica. La ubicación de los palitos es automáticamente detectada por la diferencia de intensidad de pixel entre los palitos y el conjunto fondo-agua (puntos blancos en la figura 2a). Una vez identificada la posición de los palitos, es posible trazar automáticamente una línea recta orientada a lo largo de cada palito, la cual es registrada en cada cuadro, generando el diagrama espacio-temporal para cada palito (figura 2b). La detección del fondo y el agua se realiza convirtiendo los timestacks a matrices binarias (figura 2d) mediante la comparación de intensidades de pixeles a una intensidad umbral que represente el agua, fondo o palito (figura 2c). Los bordes de las matrices binarias son detectados y las pequeñas diferencias entre el fondo detectado y el fondo real son corregidas manualmente cuando es necesario (figura 2e). La

transformación entre unidades de píxeles a unidades métricas es hecha considerando una referencia de espesor conocido (cinta adhesiva), cercana al borde superior de cada palito, obteniendo una resolución (m/píxel) que varía típicamente desde 0.001 a 0.006 m/píxel en dirección offshore. Finalmente la referencia absoluta de las series de tiempo detectadas se hace relativa al borde superior de cada palito, los cuales son medidos previamente con un GPS.

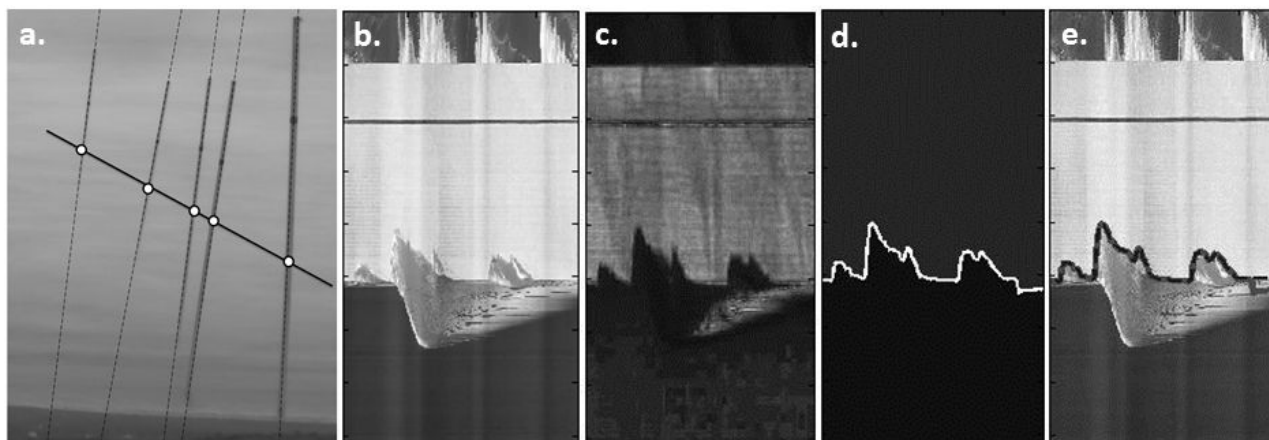


Figura 2.- a) Vista general (cuadro) del video y líneas punteadas que definen cada palito. b) Timestack original de 36 segundos. c) Intensidad de píxeles. c) Matriz binaria y límites detectados. d) Detección final

COMPARACIÓN CON LIDAR

En la figura 3 se presenta una comparación de la superficie libre y morfodinámica presente para una serie de tiempo de 90 minutos (figura 3a) para un palito ubicado en el swash de Mataquito. La serie de tiempo obtenida con el método aquí propuesto se compara con las mediciones obtenidas con el LIDAR dispuesto en terreno.

Para las series de tiempo comparadas se obtiene una diferencia RMS de 3 centímetros y un coeficiente de determinación $R^2 = 0.82$. Es posible observar comparando ambas señales sobre el timestack correspondiente (figura 3c), que el método aquí propuesto detecta mejor las variaciones en la forma de cada evento de swash y que la variación del nivel de fondo es detectada sin el ruido de alta frecuencia medido por el LIDAR (figura 3b). Una validación del método aquí propuesto usando sensores de presión puede ser encontrada en Almar et al. (2014b).

IMPACTO DE EVENTOS INDIVIDUALES DE SWASH

La figura 4a muestra la propagación en dirección cross-shore del swash para ocho eventos de swash en Grand Popo y la figura 4b muestra siete eventos de swash detectados sobre un palito de Mataquito. Para este trabajo se usó la definición de evento de swash según Blenkinsopp et al. (2011), siendo este definido por la elevación detectada entre dos intervalos de elevación constante antes y después del evento, los cuales representan el nivel del fondo seco. Para ambas playas es posible estudiar la forma de los eventos de swash detectando automáticamente cada evento en cierta serie de tiempo. Para esto se usaron las elevaciones de un palito posicionado inmediatamente después de la intersección surf-swash. Para cada ola pasando a través de cada palito, se detectaron automáticamente los tiempos y elevaciones de los puntos de inicio del evento, $A(t_a, z_a)$, y del fin de evento, $C(t_c, z_c)$, representados por cuadrados y círculos respectivamente en la figura 4b.

Para cada playa se trabajó con dos series de tiempo que contenían 274 eventos de swash cada una. En la figuras 4c y 4d se presentan histogramas de los cambios del nivel del fondo ($dz = z_c - z_a$) para los 274 eventos de swash individuales de cada playa.

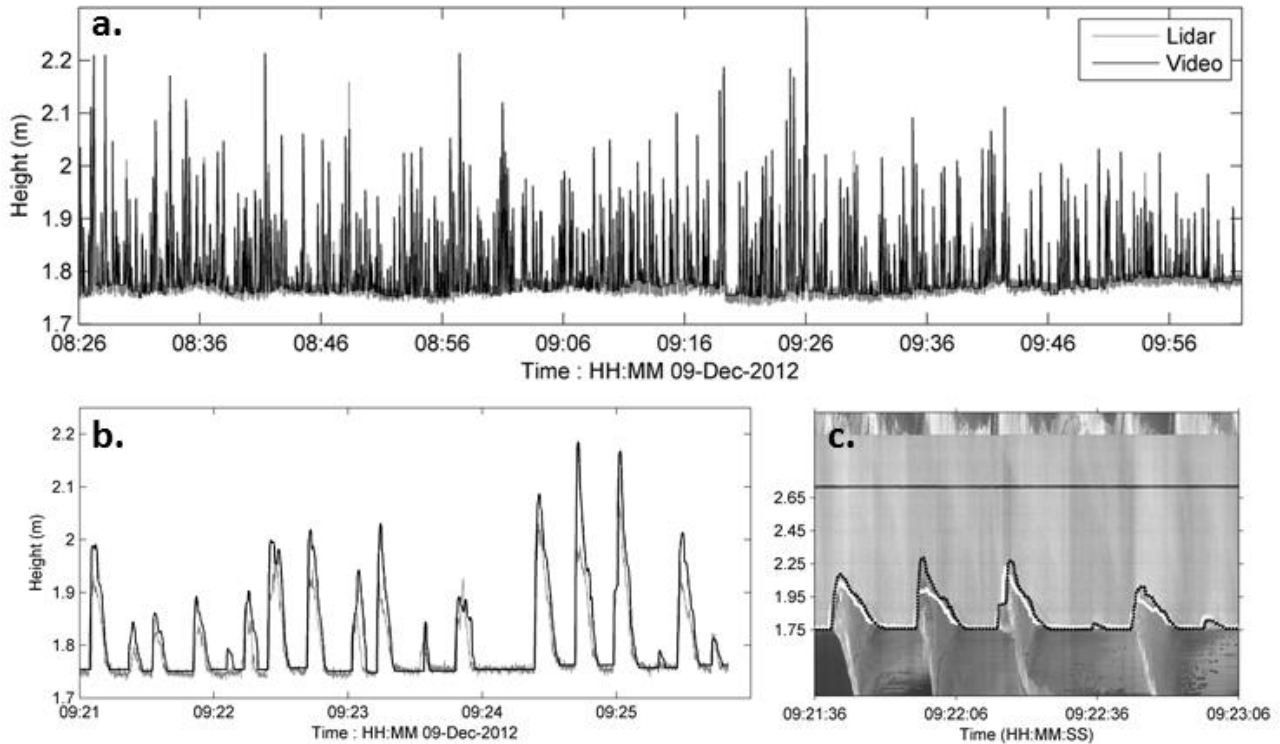


Figura 3.- a) Video (negro) y LIDAR (gris). b) Ventana de 5 minutos. c) LIDAR (blanco) y video (negro punteado) sobre el timestack correspondiente.

Se puede observar que no hay diferencias notorias en la distribución de los tipos de eventos (erosión, acreción o no cambio), obteniendo formas relativamente simétricas respecto al no cambio del nivel del fondo en ambos sitios de estudio. Grand Popo manifiesta una ligera tendencia a la acreción, y es posible observar que la magnitud del cambio individual es mayor que en Mataquito.

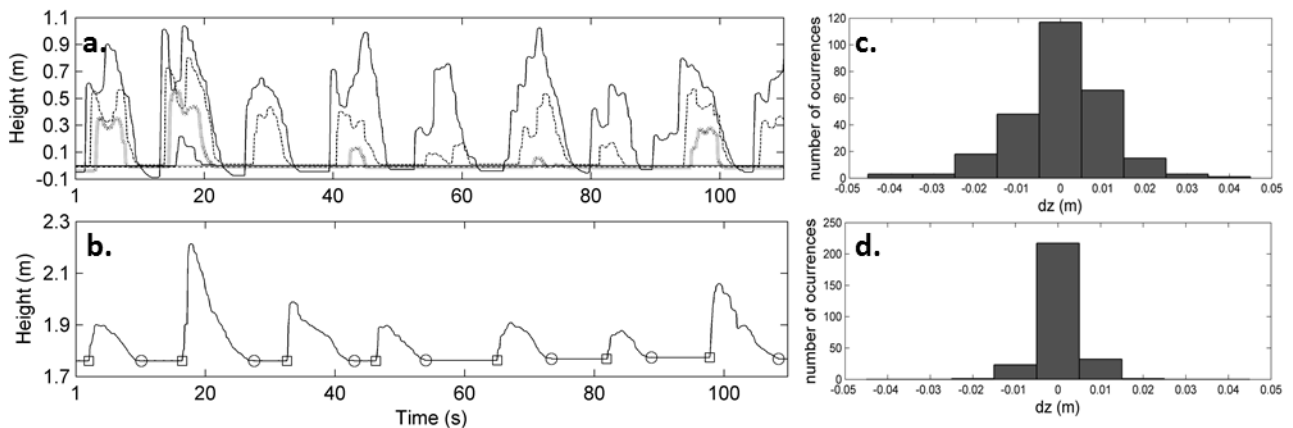


Figura 4.- a) Propagación cross-shore del swash en Grand Popo. b) Eventos de swash en Mataquito. Distribución del cambio en el nivel del fondo a alta frecuencia en c) Grand Popo, d) Mataquito.

Por otro lado, para las mismas series de tiempo, se promediaron los eventos adimensionalizados en el tiempo y en elevación, con el fin de obtener una forma promedio representativa de los eventos individuales. La forma promedio de los eventos de swash se muestra en la figura 5a. Es posible observar cierta diferencia notoria entre ambos sitios, destacando dos peaks en la forma promediada de Grand Popo. El primer peak corresponde al bore de cierta ola sobre el palito correspondiente apenas se encuentra con este. El segundo peak es producto de la gran cantidad de interacciones que pueden ocurrir entre el uprush de un evento de swash y el uprush o backwash de un evento precedente (Brocchini y Baldock, 2008). La gran interacción producida en Grand Popo concuerda con el modelo balístico de la dinámica de swash propuesto por Shen y Meyer (1963), en el cual

expresan la duración de un evento de swash sin interacción (runup + backwash) en función de la morfología (pendiente), la aceleración de gravedad y la altura del bore incidente. Para pendientes mayores (Grand Popo) se obtienen eventos de swash de menor duración, facilitando la interacción entre eventos de swash consecutivos. Por otro lado, Mataquito presenta una forma promedio con un solo peak, sugiriendo la mayor cantidad de eventos de swash libres (Brocchini y Baldock, 2008) con poca o nula interacción entre eventos consecutivos.

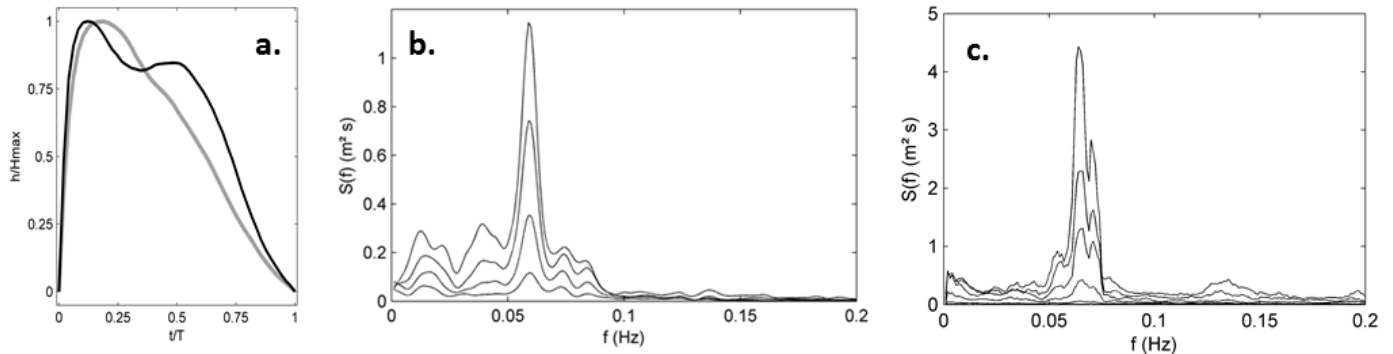


Figura 5.- a) Forma promedio de eventos de swash en negro (Grand Popo) y gris (Mataquito). Espectro de la hidrodinámica del swash en la extensión cross-shore para b) Mataquito, c) Grand Popo

Por otro lado, con el fin de estudiar la variación en la extensión cross-shore del swash, se realizaron dos espectros de la hidrodinámica para series de tiempo de ambas playas. En el espectro de Grand Popo (figura 5c) se pueden observar peaks en la banda swell, concordando con el movimiento en el swash usualmente observado en playas de alta pendiente. Los dos peaks encontrados sugieren corresponder a eventos de swash libres e interacciones entre eventos de swash, siendo este último de mayor periodo. Por otro lado, en Mataquito se observa una gran disipación de la banda swell, sugiriendo la posible transferencia de energía hacia la baja frecuencia. A diferencia de Grand Popo, es posible identificar peaks en la baja frecuencia, sugeridos por la naturaleza disipativa de esta playa.

ROL DEL SWASH EN LA REFLEXIÓN DE ENERGÍA

La figura 6 muestra series de tiempo de la energía reflejada sobre la energía incidente (E_{out}/E_{inc}) medida con ADCP durante todo el experimento para ambas playas. Se destaca la gran reflexión en Grand Popo, alcanzando hasta el 20% de reflexión de la energía incidente. En Mataquito, este valor ascendió a un máximo de 4%. La información entregada por estos gráficos con la presencia de máximos locales en tiempos cercanos a las spring tides (series no mostradas acá) y las características morfológicas propias de cada playa, motivaron la posibilidad de modelar la energía reflejada en función de parámetros hidrodinámicos y morfodinámicos locales.

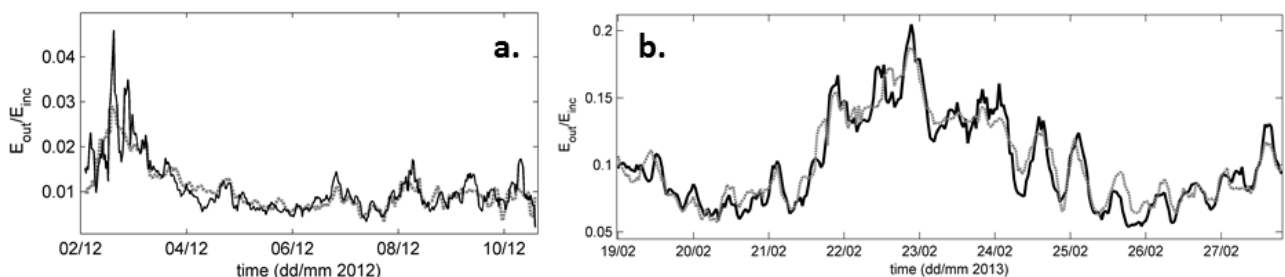


Figura 6.- E_{out}/E_{inc} en negro (ADCP) y gris según modelo propuesto para a) Mataquito, b) Grand Popo

Teniendo en cuenta el rol jugado por la marea en el swash (Brocchini y Baldock, 2008), la cual desplaza en dirección onshore la extensión del swash al crecer (flood) y en dirección offshore al disminuir (ebb tide), se realizó una reconstrucción lineal del parámetro E_{out}/E_{inc} en función del

número de Iribarren (Iribarren y Nogales, 1949, ecuación 1), usando la pendiente local del swash β y el nivel mareal para cada instante. El número de Iribarren se calculó en base a la energía offshore medida por los ADCP y la pendiente local del swash a partir de las mediciones GPS del perfil de cada playa.

$$\xi = \frac{\tan \beta}{\sqrt{H_o/L_o}} \quad [1]$$

Las series de tiempo en gris de la figura 6 muestran la reconstrucción realizada según el modelo propuesto (ecuación 2). En ambas playas se encuentra una reconstrucción bastante aceptable salvo en los primeros días de Mataquito, ya que no se disponía de mediciones de la pendiente del swash, las cuales se asumieron iguales a las obtenidas en el primer día de medición (04 Diciembre).

$$E_{out}/E_{inc} = f(\xi, Tide) \quad [2]$$

CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Se realizó un estudio comparativo de la dinámica de swash de dos playas totalmente opuestas morfológicamente. El estudio hecho mostró diferencias en la forma de los eventos de swash, mayoritariamente explicada por las condiciones morfológicas locales de cada una. Por otro lado, se encontró una parametrización que permite caracterizar la energía reflejada en función de la morfología, sugiriendo el gran rol que juega el swash en la reflexión de energía.

El método de medición propuesto resultó medir satisfactoriamente las variaciones a alta frecuencia de la hidrodinámica y morfodinámica, sin embargo una validación más extensa del método debe ser hecha, la cual debería considerar varios tipos de playas y la comparación con otros métodos existentes, como por ejemplo el uso de *bed level transducers* para medir el nivel del fondo a alta frecuencia temporal (Masselink et al., 2009).

Por otro lado, estudios futuros incluyen el tratamiento de datos medidos en una nueva campaña de terreno realizada en Grand Popo durante el mes de marzo del 2014, la cual incluyó dos transectos cross-shore de hasta 18 palitos separados cada 1 metro. Esta configuración permitirá estudiar la variación de la morfología a una escala temporal de alta frecuencia con una extensión espacial mayor, con la cual se espera entender realmente el impacto de la hidrodinámica sobre la morfología a alta frecuencia (enfoque ola a ola). En Chile, el método aquí propuesto fue aplicado recientemente en Abril del 2014 en la playa Reñaca (intermedia-reflectiva). En esta playa se buscará encontrar un link entre la formación-destrucción de patrones beach cusp y los cambios en la morfología producidos por el swash.

AGRADECIMIENTOS

El trabajo de Mataquito fue financiado por la Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnología a través del proyecto Fondecyt N°1120878. La campaña de terreno de Grand Popo fue financiado por los programas INSU LEFE y EC2CO, además del Instituto para investigación y el desarrollo (IRD Francia) y la UNESCO.

REFERENCIAS

- Almar R., Hounkonnou N., Anthony E.,Castelle B., Senechal N., Laibi R.,Mensah-Senoo T.,Degbe G., Quenum M., Dorel M.,Chuchla R., Lefebvre J.P., du Penhoat Y., Laryea W.S.,Zodehogan G.,Sohou Z., Addo K., Ibaceta R., Kestenare E.** (2014a). “The Grand Popo beach 2013 experiment, Benin, West Africa: from short timescale processes to their integrated impact over long-term coastal evolution”. *Proceedings of the International Coastal Symposium 2014*, Durban, South Africa.
- Almar R., Lefebvre J-P., Bonneton N., Bonneton P.,Uu D.V.,Viet N.T., Binh L.T., Duc N.V.** (2014b). “Swash hydro-morphodynamics at a low-tide terrace beach during post-typhoon recovery period, Nha Trang Bay, Vietnam”. *Proceedings of the 19th IAHR-APD Congress 2014*, Hanoi, Vietnam.
- Almar, R., Cienfuegos, R., Gonzalez, E., Catalan, P.A., Michallet, H., Bonneton, P., Castelle, B., Suarez, L.,** (2012). “Barred-beach morphological control on infragravity motion”. *Proceedings of the International Conference on Coastal Engineering 2012*, Santander, Spain.
- Baldock T. and Holmes P.** (1999). “Simulation and prediction of swash oscillations on a steep beach”. *Coastal engineering*, 36, 219-242.
- Blenkinsopp C., Mole M., Turner I., Peirson W.,** (2010). “Measurements of time-varying free-surface profile across the swash zone obtained using an industrial LIDAR”. *Coastal Engineering* 57 (2010). 1059-1065.
- Blenkinsopp C., Turner I., Masselink G., Rusell P.** (2011). “Swash zone sediment fluxes: field observations”. *Coastal engineering*, Vol. 58 (1), pp. 28-44.
- Brocchini M. and Baldock T.** (2008). “Recent advances in modeling swash zone dynamics: Influences of surf-swash interaction on nearshore hydrodynamics and morphodynamics”. *Reviews of Geophysics*, Vol. 46, No. 3, RG3003.
- Cienfuegos R., Villagrán M., Aguilera J.C., Catalán P., Castelle B.,Almar R.,** (2014). “Video Monitoring and Field Measurements of a Rapidly Evolving Coastal System: the River Mouth and Sand Spit of the Mataquito River in Chile”. *Proceedings of the International Coastal Symposium 2014*, Durban, South Africa.
- Iribarren, C., Nogales, C.,** (1949). “Protection des Ports”. *XVIIth International Navigation Congress, Section II, Communication*,pp. 31 – 80.
- Masselink, G. and Puleo, J.A.** (2006). “Swash-zone morphodynamics”. *Continental Shelf Research*, Vol. 26, pp.661-680
- Masselink, G., Russell, P., Turner, I., Blekinsopp, C.,** (2009). “Net sediment transport and morphological change in the swash zone of a high-energy sandy beach from swash event to tidal cycle time scales”. *Marine Geology* 267, 18–35.
- Shen, M.C., Meyer, R.E.,** (1963). “Climb of a bore on a beach 3: run-up”. *Journal of Fluid Mechanics* 16, 113–125.
- Villagran M., Cienfuegos R., Almar R., Gironás J., Catalán P., Camaño C. and Dominguez J.C.** (2011). “Natural post tsunami recovery of Mataquito river mouth after 2010 Chilean tsunami”. *Proceedings of the AGU Fall Meeting Conference*, San Francisco, USA.