

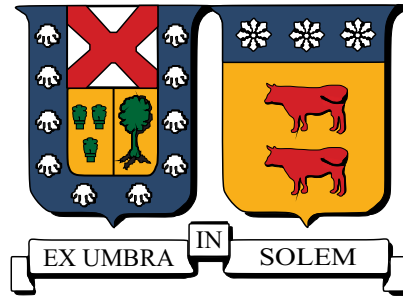
UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES

NUEVO MÉTODO DE MEDICIÓN DE ALTA
FRECUENCIA DE LA ZONA DE SWASH BASADO EN
SENSORES REMOTOS

RAIMUNDO JAVIER IBACETA VEGA

Ingeniero Civil
Magíster en Ciencias de la Ingeniería Civil

Septiembre de 2016



UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES

**NUEVO MÉTODO DE MEDICIÓN DE ALTA
FRECUENCIA DE LA ZONA DE SWASH BASADO EN
SENSORES REMOTOS**

Memoria de Título y Tesis de Grado presentada por
RAIMUNDO JAVIER IBACETA VEGA

Como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Civil

y al grado de
Magíster en Ciencias de la Ingeniería Civil

Profesor Guía
Dr. Patricio Andrés Catalán Mondaca

Septiembre de 2016

TÍTULO DE LA TESIS

**NUEVO MÉTODO DE MEDICIÓN DE ALTA FRECUENCIA DE LA
ZONA DE SWASH BASADO EN SENSORES REMOTOS**

AUTOR

RAIMUNDO JAVIER IBACETA VEGA

TRABAJO DE TESIS, presentado en cumplimiento parcial de los requisitos para el título de Ingeniero Civil y el grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería Civil de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Dr. Patricio Catalán Mondaca _____

Dr. Rodrigo Cienfuegos Carrasco _____

MSc. Álvaro Ossandón Alvarez _____

Valparaíso, Chile, Septiembre de 2016.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quisiera agradecer a mi familia. A mis padres Pilar y José, y a mi hermana Camila, quienes me han aguantado desde tiempos remotos, y en especial desde que entré a la universidad en un lejano 2008. Su apoyo incondicional, amor, cariño y preocupación han sido fundamentales.

En el ámbito académico, quisiera agradecer a las siguientes personas. A Rafael Almar, por la motivación y confianza entregada durante el desarrollo inicial de este manuscrito. Gran parte de este trabajo se basó en sus ideas, y a pesar de que actualmente nuestras conclusiones difieran, esto es en parte por lo mucho que aprendí bajo su tutela. A Patricio Winckler, por su ayuda y buena onda incondicional. Siempre mostró excelente disposición y disponibilidad desde el primer día en ICCE. Su multifuncionalidad y capacidad de desarrollar habilidades en diversas áreas son motivación para quién a veces divaga sobre el futuro profesional en lo relacionado a nuestra área de estudio. A Chris Blenkinsopp y Luis Pedro Almeida, por todo el feedback referente al método propuesto en este trabajo y en específico en lo que respecta a LIDAR. A Rodrigo Cienfuegos, Roberto Agredano, Paul Gálvez y toda la gente que fue parte directa o indirectamente de la realización de los estudios de terreno asociados al desarrollo de este trabajo.

A los Catalapas, quienes hicieron cada día de trabajo una amplia fuente de ideas, risas y conversaciones ajenas al denominador común que nos hizo coincidir. Destaco a Billy, PCC, Cyril, Pelao, Negro, Álvaro, Enano, Ale, Tío Claudio y Moris. A mis compañeros de generación (2008), con quienes durante largos 8 años compartí mucho más que largas jornadas de estudio. Destaco a Brito, Billy, Tefi, Cat, Germán, Seba, Sasha, Nacho, Mono, Vale, Harold, Joss, Javier y Camilo.

El desarrollo de esta carrera me dió la fortuna de transcurrir períodos en diversas latitudes. Agradezco a toda la gente con quien viví éstas experiencias. Destaco en este contexto a Adrià Moreno, con quien incurrí por primera vez en el mundo de la ingeniería costera. A Le Zie (Chiara y Clau), que junto con la gente de Milano (WeWe) han sido hasta el día de hoy fuente de cariño, confianza y regocijo.

Finalmente, quisiera agradecer a Patricio Catalán, por la invaluable guía durante el pregrado y magister. Agradezco las discusiones esclarecedoras, los consejos y las oportunidades para desarrollar mis habilidades a través de viajes y ayudantías. Su entusiasmo, disposición y motivación fueron fundamentales para el desarrollo de este trabajo y no dudo que seguirá siéndolo para las futuras

generaciones.

Este trabajo de tesis fue financiado gracias a la gentileza de CONICYT-PCHA/Magíster Nacional/2015 – 22150007. Por otra parte, quiero agradecer a CONICYT a través del proyecto FONDECYT 1120878. Finalmente, quiero agradecer a CONICYT a través de FONDAP 15110017 (CIGIDEN) por la retroalimentación y apoyo prestado durante el desarrollo de esta tesis.

RESUMEN

El entendimiento de la zona de *swash* es de vital importancia para la sociedad y en específico de las comunidades costeras, ya que la comprensión de los procesos responsables de la evolución de la costa a diferentes escalas de tiempo es vital para la gestión de playas y el sustentamiento de las comunidades costeras. No obstante, la zona de *swash* es la parte de la costa menos entendida. Entre las razones para este déficit se puede mencionar la complejidad de los fenómenos físicos existentes, tales como las altas velocidades en una lámina de agua de unos pocos centímetros de espesor, que inducen un gran transporte de sedimentos y turbulencia. Esto representa un gran desafío y dificultad para la instrumentación in situ, con la consiguiente falta de información para validación y análisis. En este contexto, la comunidad científica ha llegado a un consenso de que la comprensión de esta zona debe enfocarse en la alta frecuencia temporal, en un enfoque ola a ola.

Por otro lado, durante las últimas décadas las herramientas de teledetección remota han progresado significativamente, siendo una técnica muy efectiva para medir diversos procesos costeros a alta frecuencia temporal y en grandes dominios espaciales, a bajo costo.

En este trabajo se propone un nuevo método de medición de alta frecuencia temporal de la zona de *swash*, basado en la disposición física de barras morfológicas circulares ("palitos") que junto a cámaras de video, permiten la extracción de series de tiempo de la superficie libre y nivel de fondo del *swash*, apoyándose en la naturaleza sinóptica de la teledetección y en las variaciones de intensidad ópticas presentes en esta parte de la costa. Se presenta aquí la metodología utilizada, la disposición física de elementos y recomendaciones, junto a los lugares donde la técnica ha sido aplicada y el procesamiento de imágenes necesario para la extracción de datos. La validación del método se realiza contrastando los resultados con otros obtenidos desde instrumentos convencionales (LIDAR, sensores ultrasónicos y sensores de presión), apoyándose del análisis estadístico y de la comparación cualitativa entre resultados, los cuales en conjunto con las características de los instrumentos, permiten identificar las principales ventajas y limitaciones de la técnica propuesta.

Palabras Claves: *Zona de swash, procesamiento de imágenes, técnica video-palito, Mataquito, Reñaca, Nha Trang.*

ABSTRACT

The thorough comprehension of the swash zone is of critical importance because the understanding of the processes responsible for the coastal evolution at different time scales is crucial for beach management and the sustainability of the coastal areas, impacting both coastal population and nearby ecosystems. However, the swash zone is the area of the nearshore less understood. Among the reasons for this deficit, the most important is the complexity of the physical phenomena involved, such as high velocities in a shallow lens of water of a few centimeters depth, inducing high levels of sediment transport and turbulence. The latter represents a challenge and difficulty for in situ instrumentation of this zone and the consequent lack of information for validation and analysis. In this context, there has been a consensus in the scientific community that the comprehension of the swash zone must be focused at high temporal frequencies, i.e. at the wave-by-wave scale.

On the other hand, during the last decades, techniques based on stereometric and remote sensing have been widely used, being an effective low cost technique for measuring different coastal processes at various time scales and over large spatial domains.

In this work, we introduce a new method to measure the swash zone at high frequencies. The new technique consists on the deployment of morphological rods (*palitos*) and a video camera recording a cross-shore transect of vertical poles. The synoptic nature of these stereometric techniques and the variations in optical intensity present in the swash zone enable the extraction of bed level and water depth time series. First, the methodology is outlined, including the physical deployment and recommendations in conjunction with the undertaken field studies where the technique has been applied. Also, the image processing necessary for the data extraction is explained. The validation is carried out against conventional instruments (LIDAR, ultrasonic level sensors and pressure sensors). Analysis is done by means of statistical properties and qualitative analysis, which serve as a base to identify the main advantages and drawbacks of the proposed method.

Keywords: *swash zone, image processing, video-pole technique, Mataquito, Reñaca, Nha Trang.*

GLOSARIO

H_s	Altura significativa del oleaje.
T_p	Período peak del oleaje.
RTR	Rango mareal relativo, siguiendo <i>Masselink and Short</i> (1993.).
s	Pendiente media del perfil de playa.
D_{50}	Diámetro mediano de las partículas de arena.
Ω	Parámetro de Gourlay, siguiendo <i>Gourlay</i> (1968).
σ_{1s}^2	Varianza de los datos de LIDAR en una ventana móvil de 1 segundo.
σ_{umb}^2	Valor umbral de la serie de tiempo de la varianza móvil.
ρ_w	Densidad del agua.
z	Elevación del <i>swash</i> en unidades geoferenciadas.
$\sigma_{2.5s}$	Desv. estándar de los datos de sensores ultrasónicos en una ventana móvil de 2.5 segundos.
σ_{umb}	Valor umbral de la serie de tiempo de la desviación estándar móvil.
ξ	Coordenada en unidades de pixeles a lo largo de un palito.
t	Unidades de tiempo, en segundos o minutos según el caso presente.
$I(\xi, t)$	Matriz de intensidad óptica obtenida a partir de un <i>timestack</i> .
I_{thrB}	Intensidad umbral de pixeles utilizada en la detección del nivel de fondo.
c	Coefficiente que define la cantidad de desviaciones estándares sobre $\overline{I(\overline{underbed}, t)}$.
\overline{bed}	Coordenada ξ que representa el nivel medio de fondo de un <i>timestack</i> .
top	Posición ξ que representa el borde superior del palito en un <i>timestack</i> .
$liminf$	Coordenada ξ utilizada para definir el dominio de trabajo acotado en un <i>timestack</i> .
I_{thrW}	Intensidad umbral de pixeles utilizada en la detección de la superficie libre.
$\overline{underbed}$	Coordenada ξ ligeramente inferior al nivel \overline{bed} .
$\overline{overbed}$	Coordenada ξ ligeramente superior al nivel \overline{bed} .
k	Coefficiente que define la cantidad de desviaciones estándares sobre $\overline{I(\overline{overbed}, t)}$.
ny	Variable auxiliar usada para obtener los parámetros $\overline{underbed}$ y $\overline{overbed}$.
L	Espaciamiento entre patrones rítmicos <i>beach-cusp</i> adyacentes.
Δz	Cambio del nivel de fondo producido por un evento de <i>swash</i> .
q_v	Flujo volumétrico de sedimentos producido por un evento de <i>swash</i> individual.
Q	Flujo másico de sedimentos producido por un evento de <i>swash</i> individual.
ρ_s	Densidad del sedimento.

p Porosidad del sedimento.

Índice general

AGRADECIMIENTOS	I
RESUMEN	V
ABSTRACT	VII
GLOSARIO	IX
ÍNDICE DE FIGURAS	XIX
ÍNDICE DE TABLAS	XXI
INTRODUCCIÓN	1
1. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE	3
1.1. Antecedentes Previos	3
1.2. Instrumentación en la Zona de Swash	4
1.3. Uso de Video en la Zona de Swash	6
1.4. Resumen	6
2. OBJETIVOS	7
3. METODOLOGÍA DE TRABAJO	9
3.1. Técnica de medición (<i>Video-Palito</i>)	9
3.2. Experimentos	11

3.2.1.	Mataquito	11
3.2.2.	Nha Trang	13
3.2.3.	Grand Popo	14
3.2.4.	Reñaca	15
3.3.	Parámetros Estadísticos y Criterios de Comparación	17
4.	PROCESAMIENTO DE DATOS	19
4.1.	Procesamiento de Instrumentos Convencionales	19
4.1.1.	LIDAR	19
4.1.2.	Sensores de Presión	20
4.1.3.	Sensores Ultrasónicos	22
4.2.	Procesamiento de Datos del Método Propuesto	22
4.2.1.	Introducción	22
4.2.2.	Generación de Timestacks	25
4.2.3.	Detección de la Superficie Libre y Nivel del Fondo	26
4.2.3.1.	Transformación de intensidades de pixel a otra intensidad conveniente	27
4.2.3.2.	Detección de la superficie libre y del nivel de fondo	28
4.2.3.3.	Determinación de los parámetros c y k	34
4.2.3.4.	Transformación desde Pixeles a Unidades Georeferenciadas	35
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	37
5.1.	Capacidades del Método	37
5.2.	Comparación con Sensores de Presión	39
5.3.	Comparación con LIDAR	41
5.3.1.	Análisis Estadístico	41
5.3.2.	Discusión de Resultados	44
5.3.2.1.	Desempeño del video para identificar y medir la superficie libre	44
5.3.2.2.	Desempeño del video para identificar y medir los niveles de fondo	46

5.3.2.3. Variaciones longitudinales del nivel de fondo	47
5.4. Comparación con sensores ultrasónicos	49
5.4.1. Análisis respecto a la transformación pixel-unidades geoferenciadas	53
5.4.2. Importancia de la cuantificación precisa del swash en la alta frecuencia temporal	55
5.5. Fuentes de Error Adicionales	56
5.5.1. Identificación del nivel de fondo	56
5.5.2. Influencia del palito en el nivel de fondo contiguo	57
5.5.3. Movimientos del palito y/o cámara	58
5.6. Resumen	59
CONCLUSIONES	61
REFERENCIAS	68

ÍNDICE DE FIGURAS

1.	Ubicación de la zona de swash en una playa.	1
3.1.	Técnica de medición basada en palitos y el registro de video. a) Transecto <i>cross-shore</i> registrado por una cámara HD. b) Hincamiento de palitos a 1 (m) de profundidad. c) Cámara Sony HD CX-240 dispuesta en la parte alta de la playa. Fotos por cortesía de investigadores del <i>Institut de recherche pour le développement (IRD)</i>	10
3.2.	a) Vista general de la cámara al registrar el transecto de palitos. b) Medición del borde superior de cada palito para su posterior georeferenciación. Fotos por cortesía de investigadores del <i>Institut de recherche pour le développement (IRD)</i>	11
3.3.	a) LIDAR montado a 7.3 metros de la superficie. b) Palitos amarillos dispuestos en Mataquito.	12
3.4.	Set-up utilizado en Mataquito para medir la zona de swash. Las líneas horizontales representan desde arriba hacia abajo: el nivel mareal máximo del día, el nivel de aguas quietas y el nivel mareal mínimo.	13
3.5.	Set-up utilizado en Nha Trang. a) Transecto <i>cross-shore</i> de la zona de <i>swash</i> y <i>surf</i> registrado. b) Estructura metálica como sistema de sujeción de los sensores de presión. Fotos por cortesía de investigadores del <i>Institut de recherche pour le développement (IRD)</i>	14
3.6.	Set-up utilizado en Reñaca. a) Palitos en un transecto <i>cross-shore</i> registrados por una cámara SONY HDR-CX190. b) Sensor ultrasónico Massa M300-95	16
3.7.	Set-up utilizado en Reñaca para medir la zona de <i>swash</i> . Las líneas horizontales discontinuas representan desde arriba hacia abajo: el nivel mareal máximo del día, el nivel de aguas quietas y el nivel mareal mínimo.	16

4.1. Separación entre la superficie libre (línea azul discontinua) y el nivel del fondo (línea roja continua) del LIDAR siguiendo el criterio propuesto por <i>Almeida et al.</i> (2015). La serie de tiempo superior corresponde a la posición <i>landward</i> y la inferior a la posición <i>seaward</i>	20
4.2. Mediciones de altura obtenidas por los sensores de presión en la (a) parte baja del <i>swash</i> y (b) parte media del <i>swash</i>	21
4.3. Mediciones de altura de la superficie libre del agua obtenida por los sensores de presión filtradas bajo los valores (a) $z_1 = 0.159$ (m) y (b) $z_2 = 0.661$ (m), para la parte baja y media del <i>swash</i> , respectivamente.	21
4.4. Separación del nivel del fondo y la superficie libre del <i>swash</i> medida por un sensor ultrasónico. a) Datos <i>raw</i> . b) Nivel del fondo (línea roja continua) separado de la superficie libre (línea negra continua).	22
4.5. Tomas instantáneas de algunas fases del <i>swash</i> . a) <i>Bore</i> incidente del <i>inner surf zone</i> en el momento del colapso. b) Fase del <i>uprush</i> . c) Fase del <i>uprush</i> cercana al máximo <i>run-up</i> . Notar que la capa de agua en el borde del <i>uprush</i> posee alta presencia de espuma, facilitando la discriminación de señales debido al mecanismo de dispersión isotrópica. d) Fase del <i>backwash</i> en donde se pueden generar flujos supercríticos que posteriormente se encuentran con el <i>bore</i> incidente. Notar que parte del <i>backwash</i> presenta poca espuma aún existiendo un flujo. e) Resalto hidráulico (encerrado en línea roja discontinua). . .	23
4.6. Trazado de <i>stacklines</i> (línea magenta discontinua) a lo largo de cada palito. A partir de cada línea se generan los <i>timestacks</i> de cada palito.	25
4.7. <i>Timestacks</i> de 4 minutos de duración correspondientes a tres posiciones de un transecto <i>cross-shore</i> de <i>swash</i>	26
4.8. a) <i>Timestack</i> de la figura 4.7a en escala de grises y b) Intensidad de pixeles promediada a lo largo del <i>timestack</i> completo, $I(\xi, \bar{t})$. Las líneas azules discontinuas representan los límites superior (<i>top</i>) e inferior (<i>liminf</i>) y sirven como dominio de trabajo para las etapas siguientes del procesamiento de datos. La línea magenta discontinua es definida como \bar{bed} y las líneas verde y cian discontinuas son definidas como $\overline{overbed}$ y $\overline{underbed}$, respectivamente. c) Imágen del palito que muestra el sistema de referencia de las coordenadas verticales (ξ) usadas en los <i>timestacks</i>	27

4.9.	a) <i>Timestack</i> de la figura 4.7a en escala de grises. Se identifica la posición $\overline{underbed}$ (cian discontinua). b) Serie de tiempo de intensidad óptica sobre $\xi = \overline{underbed}$. La línea azul continua representa el umbral $I_{thrB} = 164.4$, para un valor de $c = 1.6$. c) <i>Timestack</i> una vez aplicada la intensidad umbral I_{thrB} . Los bloques de color negro representan instantes de tiempo en que existe la presencia de un evento de <i>swash</i> . La línea roja discontinua representa el nivel del fondo en el intervalo $t = 0$ a 19 segundos. d) Intensidad de pixeles en la coordenada ξ , promediada entre $t = 0$ y 19 segundos. La línea roja discontinua representa la posición del nivel del fondo, $\xi = 570$, encontrada según (e) el máximo gradiente (cuadro rojo) de intensidad óptica promediada en el mismo intervalo de tiempo.	30
4.10.	a) <i>Timestack</i> de la figura 4.7a en escala de grises. Sobre él se identifica la posición $\overline{overbed}$ (línea verde discontinua). b) Serie de tiempo de intensidades de pixel a lo largo de $\xi = \overline{overbed}$. La línea azul continua representa el umbral $I_{thrW} = 118.81$, calculado mediante el valor de $k = 1$	31
4.11.	a) Mapa binario producto de la aplicación de la intensidad umbral I_{thrW} . b) Mapa binario una vez aplicado el filtro morfológico del tipo erosión-dilatación. c) Detección de la superficie libre del <i>swash</i> . d) <i>Timestack</i> en conjunto con las series de tiempo detectadas: nivel de fondo (línea roja discontinua) y superficie libre (línea azul discontinua)	33
4.12.	Elección del parámetro c (círculo sólido rojo) que minimiza el error relativo entre en la cantidad de niveles de exposición de fondo existentes y detectados en las posiciones a) alta ($c = 2.4$, error=0%) b) media ($c = 2$, error=3%) y c) baja ($c = 1.6$, error=4.76%) del <i>swash</i>	34
4.13.	Referencia de dimensión conocida utilizadas en en a) Nha Trang (diámetro 3 cm). b) Mataquito (30 cm desde el borde superior del palito hasta el borde inferior de una cinta negra. c) Representación de la imagen anterior en forma de <i>timestack</i> para la obtención de la resolución a partir del número de pixeles. d) Reñaca (30 cm de color rojo). e) Número de pixeles seleccionados manualmente a partir del <i>timestack</i>	36
5.1.	Ilustración de series de tiempo del <i>swash</i> en tres posiciones de un transecto <i>cross shore</i> . a) Una hora de mediciones b) Zoom de 240 segundos de duración. Las 3 series de tiempo están referenciadas a un nivel $z = 0$ m, correspondientes al nivel de fondo inicial de cada una.	38
5.2.	Ejemplo de sincronización de señales apoyándose de la ocurrencia de arribo de frentes de ola.	38
5.3.	Series de tiempo de las mediciones hechas mediante video (línea negra continua) y sensores de presión (línea roja discontinua) en el a) <i>surf</i> b) parte baja del <i>swash</i> y c) parte media del <i>swash</i>	39

5.4. Detalle de cinco minutos de comparación entre ambos instrumentos en la zona de a) <i>surf</i> b) parte baja del <i>swash</i> y c) parte media del <i>swash</i> . Notar que las mediciones de sensor de presión en la figura (b) y (c) muestran solo parte de la superficie libre del <i>swash</i> , según se indicó en la sección 4.	40
5.5. a) Influencia de los palitos sobre el <i>bore</i> incidente en el <i>surf</i> . b) Fase del <i>uprush</i> . Se puede observar que los <i>bores</i> son influenciados por la presencia de los palitos. c) Fase del <i>backwash</i> . Se observa un flujo secundario producido por la estructura que sujeta los sensores de presión (círculo rojo discontinuo). d) Estructura de sujeción de los sensores de presión.	41
5.6. Series de tiempo de las mediciones hechas con video (línea negra continua) y LIDAR (línea roja discontinua) en las posiciones de palitos a) <i>seaward</i> b) <i>landward</i> . Ver nomenclatura utilizada en la sección 1, figura 3.4.	42
5.7. Detalle de la comparación entre video y LIDAR en las posiciones. a) <i>seaward</i> y b) <i>landward</i>	42
5.8. Gráficos de dispersión de la superficie libre según la fase-posición del <i>swash</i> . a) <i>Uprush-seaward</i> ($R^2 = 0.81$). b) <i>Backwash-seaward</i> ($R^2 = 0.89$). c) <i>Uprush landward</i> ($R^2 = 0.71$). d) <i>Backwash-landward</i> ($R^2 = 0.85$). Las líneas azul continuas representan la regresión obtenida y las líneas rojas discontinuas representan la recta de pendiente 1 : 1.	43
5.9. Gráficos de dispersión del nivel de fondo georeferenciado en las posiciones a) <i>seaward</i> ($R^2 = 0.82$) b) <i>Landward</i> ($R^2 = 0.69$). Las líneas azul continuas representan la regresión obtenida y las líneas rojas discontinuas representan la recta de pendiente 1 : 1.	44
5.10. Influencia de los palitos sobre el <i>bore</i> incidente en el (a) <i>surf</i> y <i>backwash</i> b) <i>uprush</i> . c) <i>Timestack</i> sobre el cual se grafican la superficie detectada por video (línea negra continua) y el LIDAR (línea roja discontinua). Se puede observar (flecha azul) que los flujos secundarios en el <i>uprush</i> son detectados, sobrestimando la altura de la superficie libre en esta fase. Además, las salpicaduras producidas en el <i>backwash</i> (flecha morada) no son problema pues estas son producidas por detrás del palito y filtradas por los algoritmos utilizados.	45
5.11. Ejemplo de detección en Mataquito y problema asociado a las condiciones en sitio.	46
5.12. a) 90 minutos de series de tiempo medidas por el sensor ultrasónico (línea negra discontinua) en la posición del palito 1. b) Detalle de 15 minutos de mediciones. En ambas figuras se trazan los niveles de fondo para el sensor ultrasónico (verde) y video (azul).	49
5.14. Distribución de los cambios de nivel de fondo, Δz , producidos por eventos de <i>swash</i> individuales en las posiciones de palitos a) 1 y b) 3. En verde se presentan las distribuciones a partir de sensores ultrasónicos y en azul según el video.	51

5.13. a) 60 minutos de series de tiempo medidas por el sensor ultrasónico (línea negra continua) en la posición del palito 3. b) Detalle de 15 minutos de mediciones. En ambas figuras se trazan los niveles de fondo para el sensor ultrasónico (verde) y video (azul).	51
5.15. Evolución del nivel del fondo acumulado según el número de olas (eventos) ocurrentes en la posición del palito 1 para video (azul) y sensor ultrasónico (verde).	52
5.16. Evolución del nivel del fondo acumulado según el número de olas (eventos) ocurrentes en la posición del palito 3 para video (azul) y sensor ultrasónico (verde).	52
5.17. Proceso de rectificación. a) Frame Original. b) Puntos de control del palito 1 usados para proyectar la imagen original. c) Frame recitificado sobre el cual se traza una <i>stackline</i> a lo largo del palito.	53
5.18. Series de tiempo de 30 minutos de elevación del <i>swash</i> en las posiciones del a) palito 1. b) palito 3. Las líneas negras discontinuas corresponden a las mediciones <i>raw</i> de sensores ultrasónicos. En verde y magenta se trazan los niveles de fondo según el sensor ultrasónico y el video rectificado, respectivamente.	54
5.19. Evolución del nivel del fondo acumulado según el número de olas (eventos) ocurrentes en la posición del palito a) 1 y b) 3.	55
5.20. Imágen de referencia para calcular el flujo de volumen de sedimentos. Figura tomada desde el trabajo de <i>Blenkinsopp et al.</i> (2011).	56
5.21. Detección del nivel de fondo usando dos enfoques. a) <i>timestack</i> y el nivel de fondo detectado según el máximo gradiente de la intensidad promediada (línea roja continua) y según el ajuste sigmoideal de la intensidad promediada (línea verde continua). b) Ejemplo de la detección del nivel de fondo entre $t= 0$ y 19 segundos. En negro se observa la intensidad de pixeles y en magenta el ajuste sigmoideal de esta serie. El círculo rojo representa el máximo gradiente y el asterisco verde la posición que define el punto de inflexión de la sigmoide ajustada.	57
5.22. Socavación alrededor de la base de los palitos en a) Reñaca, zona no saturada. b) Reñaca, zona saturada. c) Nha Trang, zona no saturada. d) Nha Trang, zona saturada. En cuadros negros se ve el detalle del fenómeno y en línea continua roja, el borde de la <i>piscina</i> creada alrededor del palito.	58
5.23. Parte superior de cada palito en el experimento de Reñaca, en las posiciones. a) palito 1. b) palito 2. c) palito 3. Se puede observar que los bordes superiores siguen la misma tendencia.	59

ÍNDICE DE TABLAS

3.1. Características hidro-morfodinàmicas de Mataquito	13
3.2. Características hidro-morfodinàmicas de Nha Trang	14
3.3. Características hidro-morfodinàmicas de Grand Popo	15
4.1. Resoluciones utilizadas en cada experimento/palito	36

INTRODUCCIÓN

El oleaje incidente es el forzante más importante de la hidrodinámica costera, el cual en conjunto con las corrientes generadas, son responsables del transporte de sedimentos en la zona litoral y la consecuente modificación de la morfología costera. Las olas incidentes viajan largas distancias desde mar adentro y conforme se acercan a la costa, ocurren distintos procesos relacionados con la transformación de energía; la refracción, difracción y asomeramiento. Este último es crucial en el balance de energía costero pues conforme las olas se asomeran, aumentan su altura hasta un punto crítico en que se vuelven inestables y rompen, produciéndose la disipación de energía en la zona de *surf*. Una vez que las olas rompen, estas se propagan en el *surf* hasta encontrarse con la línea de costa local, colapsando en una delgada capa de agua que lava la playa (*uprush*) hasta una extensión máxima llamada *run-up*. Posteriormente, esta capa de agua vuelve hacia el mar producto de la gravedad (*backwash*) hasta el *run-down*.

La zona de *swash* (Fig. 1) es la parte de la costa intermitentemente expuesta al agua y al nivel de fondo, es decir, la zona entre *run-up* y *run-down* (Elfrink and Baldock, 2002). El carácter intermitente del *swash* es altamente variable, desde escalas de tiempo de pocos segundos en playas de alta pendiente del tipo reflectivas a escalas de minutos en playas disipativas de baja pendiente, bajo condiciones de oleaje altamente energético. Esta definición de la zona de *swash* se dificulta al considerar otros fenómenos oscilatorios que producen variaciones de la línea de costa local, tales como las mareas (Masselink and Short, 1993.) y las ondas de infragravedad (e.g. Ciriano et al., 2005).

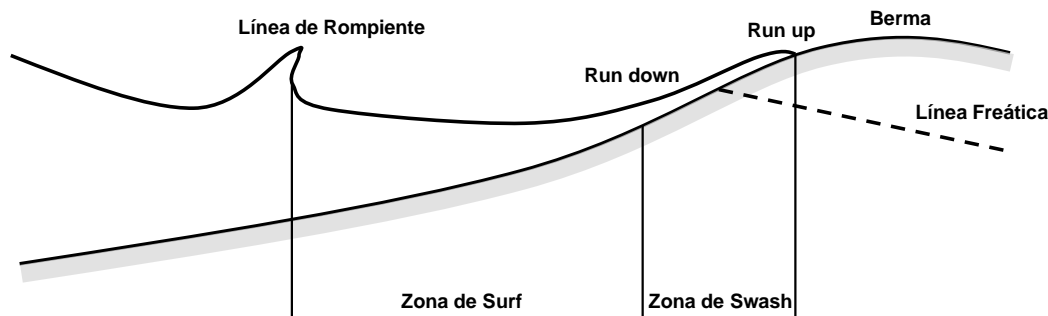


Figura 1: Ubicación de la zona de swash en una playa.

El interés por estudiar la zona de *swash* ha aumentado considerablemente en las últimas dos décadas, en gran parte por la importancia de esta en la morfología de la zona litoral y la erosión costera, ya que el entendimiento de los procesos responsables de la evolución de la costa a diferentes escalas de tiempo es vital para la gestión de playas y el sustentamiento de las comunidades costeras. De hecho, los movimientos de agua en la zona de *swash* son los principales mecanismos responsables del intercambio de sedimentos en dirección *cross-shore* (Masselink and Hughes, 1998) y gran parte del transporte de sedimentos longitudinal (*littoral drift*) ocurre en la zona de *swash* (Van Wellen et al., 2000). Sin embargo, aunque existe algún conocimiento acerca de la conexión entre las características del *swash* y la evolución de playas a escalas de tiempo de horas a días, las variaciones en la zona de *swash* a escalas de tiempo menores todavía no son conocidas (Brocchini and Baldock, 2008). En este sentido, la instrumentación necesaria para la medición de la morfología de playas y en particular de la línea de costa es de crítica importancia para los ingenieros costeros (Blenkinsopp et al., 2010).

Dentro de dicha instrumentación, el uso de sensores remotos basados en cámaras de video ha sido usado extensamente en la medición de procesos costeros (Holman and Haller, 2013), ofreciendo la oportunidad de extraer información de largos dominios espaciales y altas frecuencias temporales, a bajo costo. El presente trabajo busca proponer un nuevo método de medición de la hidro y morfodinámica de la zona *swash* en una escala temporal ola a ola. Lo anterior, mediante el uso de cámaras de video y la disposición en sitio de elementos adicionales que sirven como referencia para detectar separadamente el nivel de fondo y la superficie libre del agua en la zona de *swash*. En este trabajo se presenta el diseño y aplicación del método, la cual se ha llevado a cabo en conjunto con la disposición de instrumentos convencionales (LIDAR, sensores de presión y sensores ultrasónicos) necesarios para la validación de la técnica propuesta. A partir de esta comparación, se enuncian las capacidades y desventajas del nuevo método de medición de la zona de *swash*.

El presente trabajo de tesis se estructura de la siguiente manera. El capítulo 1 presenta una revisión del estado del arte sobre los instrumentos de medición de la zona de *swash* existentes a la fecha y ciertos antecedentes previos que avalan la necesidad de obtener estas mediciones. En el capítulo 2 se enuncian los objetivos generales y específicos del presente trabajo, basados en la revisión bibliográfica previa. El capítulo 3 presenta la metodología del trabajo propuesto, la cual incluye la descripción detallada de la técnica propuesta, los estudios de terreno en donde la técnica ha sido empleada (Mataquito, Chile - Nha Trang, Vietnam - Grand Popo, Benin - Reñaca, Chile) junto a la descripción de los instrumentos convencionales (LIDAR, sensores ultrasónicos y sensores de presión) utilizados para validar el método propuesto y los criterios de comparación utilizados para la validación. El capítulo 4 entrega las directrices del procesamiento de datos necesario para extraer la información del método propuesto, así como de los instrumentos convencionales. En el capítulo 5 se presentan los resultados de validación del método propuesto respecto a los instrumentos convencionales y finalmente se formulan las conclusiones de este trabajo obtenidas a partir del análisis y discusión de los resultados anteriores.

Capítulo 1

REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se presenta una breve revisión bibliográfica de la zona de *swash* y la instrumentación existente a la fecha. Como antecedente previo, se describe la necesidad de obtener mediciones en la alta frecuencia y algunos resultados previos que avalan dicho requerimiento. Luego se presentan los instrumentos de medición de la hidro y/o morfodinámica utilizados hasta a la fecha para medir la zona de *swash*, indicando sus características, ventajas y desventajas. Finalmente, se presenta la literatura existente referente a la medición de la zona de *swash* usando registros de video. Las subsecciones de esta revisión bibliográfica sirven como introducción a la metodología propuesta en este trabajo, tanto para la formulación del método como para el contraste entre técnicas de medición.

1.1. Antecedentes Previos

Estudios existentes de la zona de *swash* han prestado atención en la hidrodinámica y transporte de sedimentos, poniendo especial énfasis en el sistema acoplado *surf-swash* (*Elfrink and Baldock, 2002; Masselink and Puleo, 2006; Brocchini and Baldock, 2008*), en la transferencia de energía desde el *surf* al *swash* (*Hughes et al., 2014*) y en los procesos a baja escala referentes a la hidrodinámica y al transporte de sedimentos (*Chardon-Maldonado et al., 2015*). Sin embargo, la detallada comprensión de la zona de *swash* es aún incompleta, restringiendo la habilidad para predecir correctamente el transporte de sedimentos y las variaciones de la línea de costa. Más aún, grado de conocimiento disminuye al considerar escalas de tiempo pequeñas, correspondientes a eventos de *swash* individuales en un enfoque ola a ola. En este contexto, ha habido un consenso en la comunidad científica en que el entendimiento de esta parte de la playa a altas frecuencias temporales es crucial para dilucidar la respuesta morfodinámica global de la zona de *swash* (*Puleo and Butt, 2006; Puleo and Torres-Freyermuth, 2015*).

Por ejemplo, *Hughes et al.* (1997) ha demostrado que las variaciones en la morfología durante eventos de *swash* individuales pueden ser mayores que el cambio neto integrado en mayores periodos de tiempo. Estudios recientes han encontrado resultados similares; una magnitud comparable entre variaciones del nivel de fondo durante eventos individuales de *swash* y el cambio neto durante ciclos mareales completos (*Blenkinsopp et al.*, 2011). Es entonces necesario entender correctamente la evolución de la morfología a altas frecuencias temporales. Para lograr lo anterior, es necesario cuantificar correctamente las variaciones de la hidro y morfodinámicas en un enfoque ola a ola. No obstante, la instrumentación en sitio de la zona de *swash* es notoriamente difícil de llevar a cabo y mantener, pudiendo ser vulnerable incluso ante la presencia de oleaje incidente moderado (*Blenkinsopp et al.*, 2010). Además, el alto costo de los instrumentos disponibles, en conjunto con su vulnerabilidad a ser removidos juegan en contra a la necesidad de cuantificar correctamente la hidro y morfodinámica de la zona de *swash*.

1.2. Instrumentación en la Zona de Swash

Estudios anteriores han utilizado variada instrumentación para medir el *swash* en la alta frecuencia temporal. Un breve número de técnicas es nombrado en esta sección sin la pretensión de ser exhaustivo. Algunos de estos métodos entregan mediciones puntuales de la superficie libre del *swash* y/o el nivel de fondo. Por ejemplo, el uso de sensores de presión dispuestos por sobre el nivel de fondo proporcionan mediciones de la superficie libre (*Raubenheimer et al.*, 1995; *Masselink and Russell*, 2006) pero requieren un post-procesamiento de los datos brutos para obtener la elevación a partir de mediciones de presión, asumiendo típicamente una presión hidrostática (*Cox and Shin*, 2003), la cual difiere altamente de los altos niveles de turbulencia presentes en el *swash* (*Masselink and Puleo*, 2006). Similar a lo anterior, el uso de sensores de presión enterrados (*Baldock et al.*, 2006a; *Brocchini and Baldock*, 2008; *Jensen et al.*, 2009) ha sido utilizado para medir el nivel de fondo y de la superficie libre en la escala temporal ola a ola. Esta técnica funciona bien en playas de arena pero puede entregar mediciones erróneas en playas de grava debido a la posible infiltración del agua bajo la posición del sensor (*Turner et al.*, 2009).

Más alternativas que miden el *swash* puntualmente incluyen los *run-up wires* (*Holland et al.*, 1995) y técnicas acústicas como los sensores ultrasónicos (*Turner et al.*, 2008; *Masselink et al.*, 2009). Estos últimos son capaces de medir el nivel de la superficie libre y del nivel del fondo con una precisión de ± 1 (mm). Sin tomar en cuenta la presencia de la estructura o andamio necesaria para disponerlos en sitio, los sensores ultrasónicos no son intrusivos (*Masselink et al.*, 2009) y permanecen fuera del flujo si son dispuestos a suficiente altura por sobre el nivel de fondo. Sin embargo, los sensores ultrasónicos pueden entregar mediciones erróneas debido a objetivos no deseados tales como la espuma residual dejada por el *backwash* (*Baldock*, 2009).

El uso de sensores remotos como el LIDAR -*Laser Imaging Detection and Ranging*- (*Blenkinsopp et al.*, 2010; *Vousdoukas et al.*, 2014; *Almeida et al.*, 2015; *Martins et al.*, 2015) permite medir la elevación del agua y del nivel del fondo a altas resoluciones temporales y espaciales. Por un lado, el uso de LIDAR permite la medición de fenómenos de baja escala (*Blenkinsopp et al.*, 2010) propios de

la dinámica y complejidad del *swash*, gracias a la alta frecuencia temporal que el instrumento permite utilizar. Sin embargo, algunas de las desventajas del LIDAR incluyen (i) la dificultad de medir niveles de fondo estacionarios debido a problemas de estabilidad del instrumento, en donde desviaciones estándar del nivel del fondo de hasta 4.2 (*mm*) han sido reportadas en la literatura (Vousdoukas *et al.*, 2014), (ii) la dificultad al medir zonas en donde el agua se encuentra cercana al límite del *run-up*, conllevando la penetración del laser a través de la columna de agua y (iii) la necesidad de que exista una superficie libre turbulenta para que el laser incidente pueda ser reflejado. Lo anterior puede introducir mediciones erróneas cuando el objetivo es una ola *no saturada* y específicamente en la fase del *backwash*, que suele ser menos turbulenta que el *uprush*. Recientemente se han creado sensores basados en niveles de conductividad (Lanckriet *et al.*, 2013, 2014) además de los llamados sensores CCM+ (van der Zanden *et al.*, 2015), los cuales permiten obtener las variaciones del nivel de fondo incluso en periodos de sumersión, con una precisión esperada de ± 1 (*mm*).

Por otro lado, diversos autores han utilizado barras circulares (*palitos*) dispuestas verticalmente para medir las variaciones del nivel del fondo en el *swash* y en la superficie libre del *surf*. Miziguchi (1984) midió la superficie libre del *surf* fotografiando los palitos a una frecuencia temporal de 0.2 Hz, pero no estudió las variaciones morfológicas, poniendo énfasis directamente en las variaciones espectrales de la hidrodinámica a lo largo de un transecto *cross-shore*. Los experimentos *DUCK85* (Ebersole and Hughes, 1987) y *SUPERDUCK* (Ebersole and Hughes, 1988) llevados a cabo por el cuerpo de ingenieros de los Estados Unidos, consideraron la disposición de *photopoles* alineados visualmente verticales a un observador *onshore* para obtener mediciones de la superficie libre del *surf* a 5 Hz, asumiendo que cada *photopole* se mantenía alineado siempre en la posición vertical. Bayram and Larson (2000) utilizaron las mediciones de los experimentos *DUCK* para comparar con modelos de transformación de oleaje, aludiendo a la gran precisión y calidad de estas mediciones respecto a las obtenidas con sensores de presión y sondas resistivas.

Diversos autores han utilizado *barras morfológicas* para medir cambios del nivel de fondo en la costa; Weir *et al.* (2006) dispuso barras morfológicas con una resolución espacial de 2 (*m*) para medir el nivel del fondo cada 15 minutos, con una precisión de 1 (*cm*). Larson *et al.* (2004) dispuso de un arreglo espacial de barras metálicas sobre una playa modificada para medir las variaciones del perfil transversal con una resolución espacial de 0.5 (*m*). Cada barra fue registrada por una cámara de video distinta, las cuales registraron el nivel del fondo con una precisión de ± 1 (*mm*), cada 1 minuto. Configuraciones similares han sido utilizadas por diversos autores (Sallenger Jr. and Richmond, 1984; Kulkarni *et al.*, 2004; Austin and Buscombe, 2008; Austin and Masselink, 2006) con una precisión estimada de 1 (*cm*) y con períodos entre mediciones que van desde los 10 segundos hasta los 15 minutos. A pesar del extenso uso de barras dispuestas verticalmente en la playa, estas tienen la desventaja de ser vulnerables a ser desplazadas desde su posición inicial, restringiendo la posibilidad de obtener mediciones confiables del cambio en el nivel de fondo.

1.3. Uso de Video en la Zona de Swash

El uso de registros de video en la medición de procesos costeros ha sido utilizado extensamente en las últimas décadas. La señal óptica presente en el oleaje (*Holman and Stanley, 2007*) ofrece la oportunidad de extraer información de grandes dominios espaciales mediante el uso de cámaras fijas que registran la costa. La obtención de información cuantitativa a partir de estas señales de video requiere de técnicas de procesamiento de imágenes. Por ejemplo, en la zona de *surf*, donde la presencia de espuma es evidente, es posible identificar la espuma residual y la espuma activa del rompimiento, las cuales pueden ser separadas desde zonas sin la presencia de oleaje rompiente (*Catalan et al., 2011*). Técnicas similares han sido empleadas en la zona de *swash* para identificar los movimientos de *run-up* mediante la separación de la capa turbulenta y el nivel del fondo (*Aagaard and Holm, 1989; Power et al., 2011*). Estos métodos de video normalmente se basan en técnicas estereo-métricas (*Holland and Holman, 1997; Holland and Puleo, 2001*) que permiten inferir la elevación del *swash* a partir de puntos de control de posición conocida. No obstante, lo anterior ha sido utilizado en escalas de tiempo de minutos mediante el promediado de múltiples imágenes y por otro lado no ha considerado la medición puntual de la superficie libre ni de las variaciones del nivel de fondo en la alta frecuencia.

1.4. Resumen

Considerando la relevancia de la zona de *swash* en la morfología costera y la necesidad de comprender los fenómenos físicos involucrados a partir de mediciones en sitio, en este trabajo se propone una nueva simple metodología para la medición en la escala ola a ola de la hidro y morfodinámica del *swash*. El método propuesto considera el uso de barras circulares (*palitos*) dispuestos verticalmente en un transecto *cross-shore*, los cuales son registrados por una cámara de video de alta definición (HD) ubicada en la parte alta de la playa. La información es extraída desde los registros de video mediante el uso de técnicas de procesamientos de imágenes. El método propuesto es contrastado con técnicas existentes (sensores de presión, LIDAR y sensores ultrasónicos), estableciendo las capacidades y limitancias del método propuesto.

Capítulo 2

OBJETIVOS

Objetivos Generales

- Diseñar y validar una nueva técnica de medición de alta frecuencia temporal de la zona de *swash* basada en registros de video.

Objetivos Específicos

- Diseñar y llevar a cabo un experimento para probar la nueva técnica en la playa Reñaca, Chile.
- Generar algoritmos de procesamiento de imágenes que extraigan las series de tiempo de elevación de la superficie libre y nivel del fondo del *swash* a partir de los registros de video.
- Generar algoritmos de procesamientos de datos de los instrumentos convencionales utilizados en campañas anteriores (LIDAR, sensores de presión) y de la campaña en Reñaca (sensores ultrasónicos).
- Establecer las ventajas y limitaciones del método propuesto respecto a los instrumentos convencionales, desde un punto de vista cualitativo y cuantitativo.

Capítulo 3

METODOLOGÍA DE TRABAJO

El presente capítulo apunta a describir la metodología propuesta en este trabajo. En primer lugar se describe la técnica para medir la zona de *swash*, incluyendo los materiales utilizados, las variables a considerar en la disposición física en sitio y algunas recomendaciones, entre otros. En segundo lugar se describen las playas y campañas de terreno en donde se ha aplicado el método propuesto. Se describen los experimentos realizados en las playas de Mataquito (Chile), Nha Trang (Vietnam), Reñaca (Chile) y Grand Popo (Benin). Se nombran antecedentes de cada playa junto a ciertas condiciones morfológicas y de climas de oleaje presentes durante la realización de los estudios de terreno. Adicionalmente se nombran los tipos de mediciones realizadas en cada campaña, poniendo énfasis en el método propuesto en este trabajo. Finalmente, se definen los parámetros estadísticos y criterios que serán utilizados para validar el método propuesto en contraste con las mediciones de instrumentos convencionales.

3.1. Técnica de medición (*Video-Palito*)

La técnica propuesta consiste en la disposición de un transecto en dirección *cross-shore* de barras circulares de metal o madera (*palitos*) (Fig. 3.1a), hincadas verticalmente en la playa respecto a un observador *onshore* (Fig. 3.1b). La obtención de series de tiempo de la superficie libre y nivel del fondo del *swash* resulta de datos de video grabados por una cámara HD (Fig. 3.1c), dispuesta en la parte alta de la playa o berma, similar a los experimentos *DUCK85* (Ebersole and Hughes, 1987) y *SUPERDUCK* (Ebersole and Hughes, 1988), quienes propusieron una metodología similar para obtener series de tiempo de la superficie libre del *surf*.

El diámetro de las barras utilizadas varía según la disponibilidad de materiales. En las campañas de terreno realizadas se han utilizado diámetros de 3 y 3.5 (*cm*), los cuales fueron elegidos en un *trade-off* entre la capacidad de ser reconocidos en los registros de video y que tengan una esbeltez que minimice su interferencia con la dinámica del *swash*. Además, se consideró el uso de palitos de aproximadamente 3 (*m*) de largo, hincándolos a aproximadamente 1 (*m*) de profundidad bajo el nivel de fondo inicial. La cantidad de palitos instalados depende de varios factores; (i) la resolución espacial

deseada, (ii) la disponibilidad de espacio según el tipo de playa y el dominio registrado por la cámara (Fig. 3.2a) y (iii) la resolución ($m/pixel$) máxima deseada, pues esta disminuye conforme el objetivo se aleja de la cámara.

El color de las barras debe ser distinto a las siguientes tonalidades; la superficie turbulenta de la lámina de agua, la superficie libre poco turbulenta asociada al color del agua en estado *no saturado* y al color del nivel del fondo. Lo anterior, para facilitar las técnicas de procesamiento de imágenes necesarias para la obtención de series de tiempo del *swash*. Adicionalmente, se debe considerar una referencia de dimensión conocida para transformar desde unidades de pixeles a otra unidad georeferenciada (*real world coordinates*). Esto se ha llevado a cabo considerando tres enfoques; (i) el diámetro conocido de los palitos respecto a la cantidad de pixeles ocupados por esta dimensión, (ii) el número de pixeles ocupados por el largo superior del palito pintado en un color diferente y (iii) un proceso de *rectificación* mediante el uso de tableros de ajedrez dispuestos en el borde superior de cada palito. Lo anterior será explicado con mayor detalle en las secciones de procesamiento de datos y de análisis de resultados.

Posteriormente se debe medir la posición de los palitos (Fig. 3.2b) georeferenciados respecto a un *datum* conocido. Se mide también la posición del borde superior de cada palito, asumiendo que esta se mantendrá inmóvil durante los períodos de medición. Lo anterior, para georeferenciar las mediciones de nivel de fondo y superficie libre según se explicará en el capítulo siguiente.

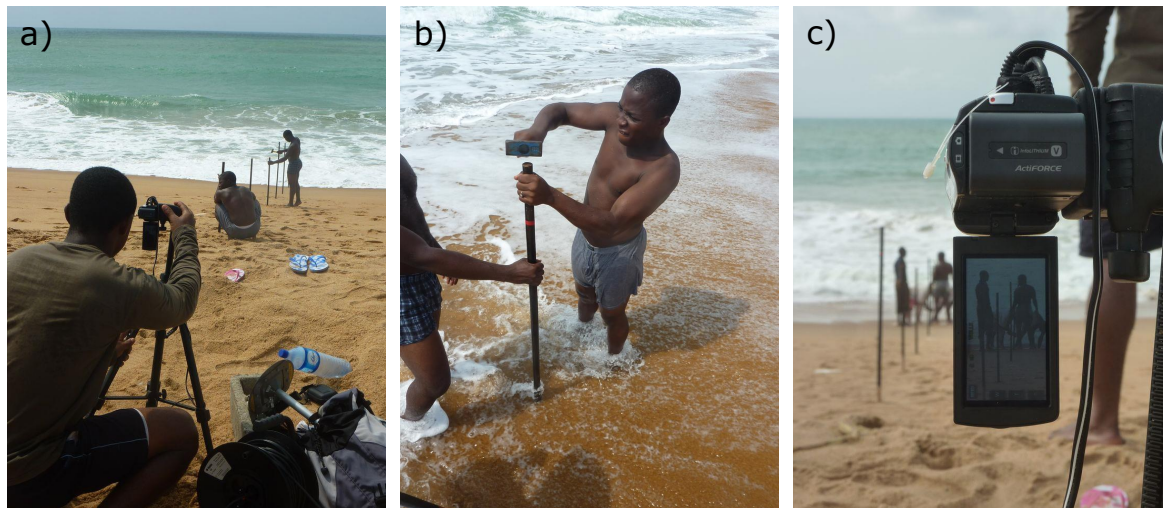


Figura 3.1: Técnica de medición basada en palitos y el registro de video. a) Transecto *cross-shore* registrado por una cámara HD. b) Hincamiento de palitos a 1 (m) de profundidad. c) Cámara Sony HD CX-240 dispuesta en la parte alta de la playa. Fotos por cortesía de investigadores del *Institut de recherche pour le développement (IRD)*.

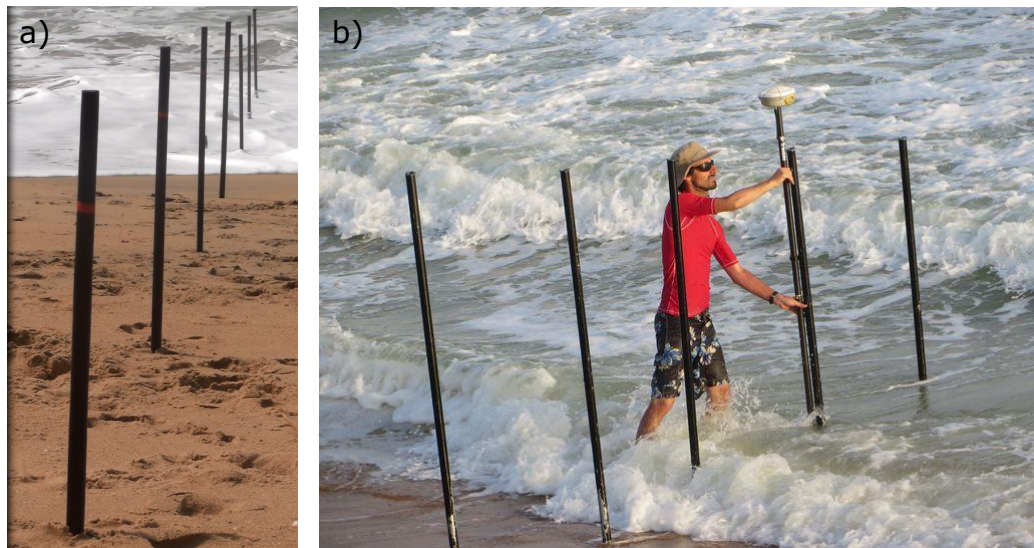


Figura 3.2: a) Vista general de la cámara al registrar el transecto de palitos. b) Medición del borde superior de cada palito para su posterior georeferenciación. Fotos por cortesía de investigadores del *Institut de recherche pour le développement (IRD)*.

3.2. Experimentos

3.2.1. Mataquito

El método propuesto en este trabajo fue utilizado en la playa adyacente a la desembocadura del río Mataquito ($34^{\circ}52'S$, $72^{\circ}09'W$), durante una campaña de terreno realizada entre el 28 de Noviembre y el 14 de Diciembre del año 2012. Este estudio se realizó en el marco del proyecto FONDECYT N1120878: *Characterization of nearshore processes and morphology variability for the highly energetic wave dominated central Chile coast*, el cual tenía como objetivo el entendimiento de los procesos costeros asociados a la zona litoral central de Chile y en específico de Mataquito. Esta playa fue erosionada completamente bajo la acción del tsunami de Maule del año 2010, pero fue rápidamente recuperada durante el año siguiente (*Villagran et al.*, 2011) bajo procesos de acreción asociados al oleaje menos intenso. Cabe destacar que esta campaña de terreno fue la primera de este tipo realizada en Chile y contó con la participación de más de 30 personas, incluyendo investigadores y estudiantes.

La playa medida es del tipo disipativa a intermedia, con un perfil promedio de pendiente 0.04 durante el experimento, el cual fue obtenido mediante mediciones diarias de la topografía de playa utilizando un GPS diferencial. El clima de oleaje y el nivel mareal fueron medidos con la ayuda de un ADCP Teledyne, dispuesto a 900 metros de la costa y a 11.6 metros de profundidad. Más información sobre la campaña de terreno puede ser encontrada en el trabajo de *Cienfuegos et al.* (2014).

Adicionalmente se dispuso de un LIDAR (SICK LMS200-30106 Laser Measurement System) montado a una elevación de 7.3 (m) por sobre la playa (Fig. 3.3a). Con este instrumento se midió un transecto *cross-shore* de la zona de *swash* y *surf* a una frecuencia temporal de 35 Hz. Por otro lado, se dispuso un arreglo *cross-shore* de 6 palitos de color amarillo (Fig. 3.3b), ubicados a una distancia horizontal de 3 metros respecto al transecto medido por el LIDAR. Los palitos fueron registrados por una cámara SONY HDR-CX190 FULL HD a una frecuencia temporal de 30 Hz. La figura 3.4 muestra la disposición en sitio utilizada para medir la zona de *swash*. Mataquito fue el primer lugar en donde se utilizó este método, principalmente con propósitos de validación. En este sentido, la disposición en sitio de los palitos no fue la óptima, produciéndose frecuentemente el movimiento y vibración de estos bajo la acción del oleaje incidente. Debido a esto y a los bajos períodos de mediciones sincronizadas, se dispone solo de 30 minutos de series de tiempo de LIDAR y video disponibles para comparar, correspondientes a dos posiciones *cross-shore* (Fig. 3.4, palito landward, $x = 918.9$ m y palito seaward, $x = 923.8$ m). Las series de tiempo fueron referenciadas respecto al borde superior de cada palito, el cual fue medido con un GPS diferencial al comienzo de cada período de medición. Por otro lado, la resolución de cada palito fue calculada usando una dimensión conocida; 30 centímetros entre el borde superior del palito y el borde inferior de una cinta adhesiva negra.

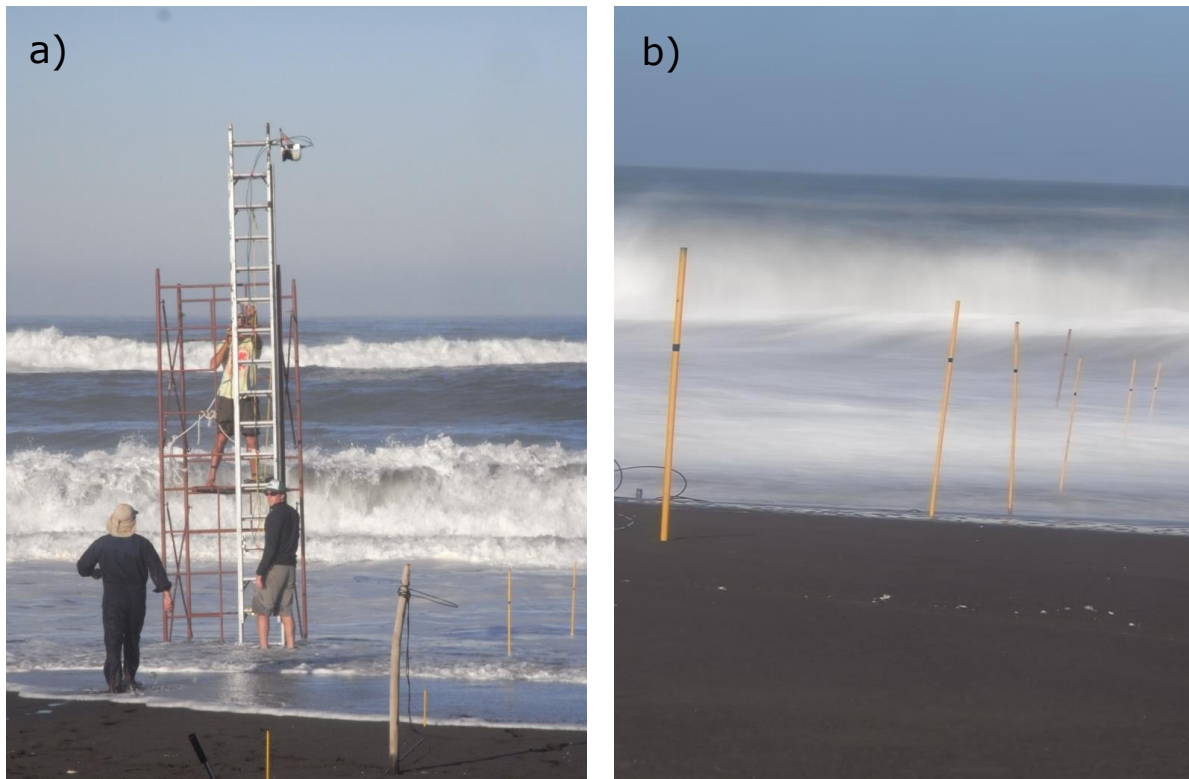


Figura 3.3: a) LIDAR montado a 7.3 metros de la superficie. b) Palitos amarillos dispuestos en Mataquito.

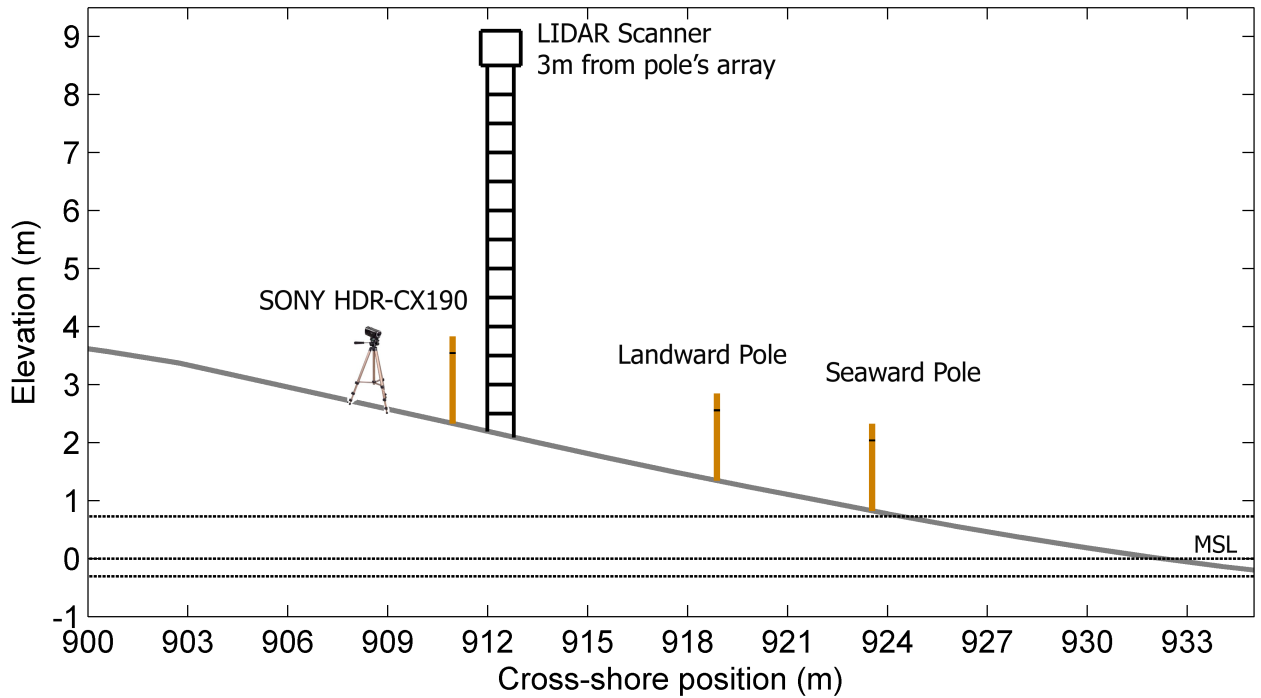


Figura 3.4: Set-up utilizado en Mataquito para medir la zona de swash. Las líneas horizontales representan desde arriba hacia abajo: el nivel mareal máximo del día, el nivel de aguas quietas y el nivel mareal mínimo.

A continuación se presentan las características hidro-morfodinámicas medias durante la campaña de terreno en Mataquito. Específicamente se entrega el valor de la altura significativa del oleaje (H_s), período peak del oleaje (T_p), el rango mareal relativo (RTR , siguiendo *Masselink and Short* (1993.)), la pendiente (s), el diámetro mediano (D_{50}) y el parámetro de Gourlay (Ω , siguiendo *Gourlay* (1968)).

Tabla 3.1: Características hidro-morfodinámicas de Mataquito

H_s (m)	T_p (s)	RTR	s	D_{50} (mm)	Ω
1.36	9.4	0.6	0.05	0.2	1.4

3.2.2. Nha Trang

Nha Trang Beach (12°14'N, 109°11'E) es una playa intermedia y uniforme longitudinalmente, localizada en el sureste de Vietnam, en la provincia de Khanh Hoa. Una campaña de terreno (*Almar et al.*, 2014a) se realizó entre el 3 y 10 de Diciembre del 2013 en el marco del proyecto francés ANR COASTVAR. Durante esta campaña se realizaron mediciones de topografía de playa, clima de oleaje (ADCP AWAC), corrientes (Nortek Vectrino II microprofiler) y de la zona de *swash* usando la técnica de video. Se montó un transecto *cross-shore* de 20 palitos metálicos de color negro, cubriendo el *surf*

y *swash* cada 1 (m) entre palitos. Los palitos fueron grabados a 25 Hz por una cámara SONY CX-240 FULL HD. Adicionalmente se instalaron tres sensores de presión (*Ocean Science*) registrando a 8 Hz el *surf* y las partes baja y media del *swash* (Fig .3.5a). Los sensores fueron montados por sobre el nivel del fondo inicial, a 11, 5 y 8 centímetros, respectivamente. Estos fueron fijados a una pequeña estructura metálica según lo ilustra la figura 3.5b. Al igual que en Mataquito, se utiliza un período de mediciones sincronizadas de 30 minutos, correspondientes al día 5 de Diciembre del 2013.

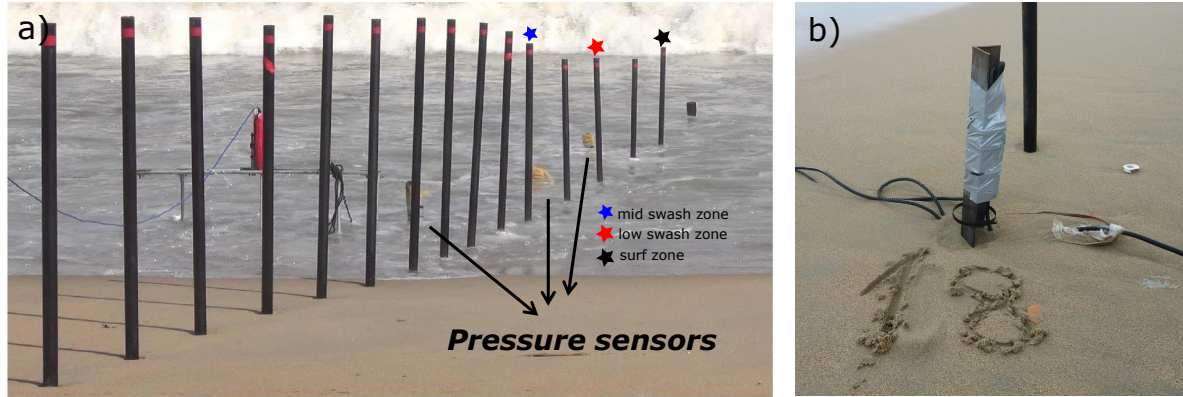


Figura 3.5: Set-up utilizado en Nha Trang. a) Transecto *cross-shore* de la zona de *swash* y *surf* registrado. b) Estructura metálica como sistema de sujeción de los sensores de presión. Fotos por cortesía de investigadores del *Institut de recherche pour le développement (IRD)*.

A diferencia de Mataquito, la resolución ($m/pixel$) se obtiene a través del número de pixeles cubiertos por el diámetro conocido de cada palito. La georeferenciación a un sistema de coordenadas conocido se realiza relativa al borde superior de cada palito, los cuales fueron medidos con un teodolito.

A continuación se presentan las características hidro-morfodinámicas medias durante la campaña de terreno en Nha Trang.

Tabla 3.2: Características hidro-morfodinámicas de Nha Trang

H_s (m)	T_p (s)	<i>RTR</i>	s	D_{50} (mm)	Ω
1	8	1	0.15	0.3	1.5

3.2.3. Grand Popo

Dos campañas de terreno han sido realizadas en la playa Grand Popo, Benin, Golfo de Guinea. En esta sección se hace referencia a la primera de estas, pero solo en términos generales pues la técnica fue aplicada sin la disposición co-localizada de otro instrumento convencional.

Grand Popo (6.2°N, 1.7°E) es una playa reflectiva expuesta a *swells* provenientes desde altas la-

titudes del Atlántico sur. Un estudio de terreno fue llevado a cabo entre el 19 y 28 de Febrero del 2013, en el marco del proyecto francés *Reponse du littoral du Golfe de Guinee a un forcage oceanique multiechelle: de l'evenementiel a la variabilite climatique*. Grand Popo presenta una terraza uniforme en dirección *alongshore* a baja marea, seguida por una parte altamente reflectiva y un patrón rítmico *cusp horn* relativamente uniforme ($L \sim 35$ (m)) en la parte alta de la playa. Durante este estudio se realizaron mediciones de topografía de playa (RTK GPS), clima de oleaje (ADCP RDI WORKHOUSE), batimetría (ecosonda GARMIN GPS MAP526S), entre otros. Adicionalmente se aplicó el método propuesto en este trabajo para medir la zona de *swash*; dos transectos *cross-shore* (uno en el *beach cusp* y otro en el *beach horn* adyacente) fueron registrados a 25 Hz por una cámara SONY CX-240 full HD durante períodos de tiempo de aproximadamente 5 horas en cada día del experimento.

A continuación se presentan las características hidro-morfodinámicas medias durante la campaña de terreno en Grand Popo.

Tabla 3.3: Características hidro-morfodinámicas de Grand Popo

H_s (m)	T_p (s)	RTR	s	D_{50} (mm)	Ω
2.4	12	1	0.16	0.6	3.5

Mayor información sobre la campaña de terreno y algunos resultados físicos sobre la zona de *swash* pueden ser encontrados en los trabajos de *Almar et al.* (2014b) y *Ibaceta et al.* (2014), respectivamente.

3.2.4. Reñaca

Una campaña de terreno fue realizada el día 29 de Septiembre del 2015 en la playa Reñaca (Viña del Mar, Chile). Reñaca ($32^{\circ}58'S$, $71^{\circ}32'W$) es una playa micromareal, abierta y dominada por el oleaje, la cual presenta estructuras morfológicas del tipo *beach-cusp* consistentes en una secuencia de bahías (*embayments*) y promontorios (*horns*), con un espaciamento que varía normalmente de 20 a 100 (m) (*Agredano et al.*, 2015). En este experimento se dispusieron tres palitos separados cada 2 (m), los cuales fueron registrados por una cámara SONY HDR-CX190 FULL HD a una frecuencia temporal de 30 Hz (Fig. 3.6a). Los palitos fueron numerados del 1 al 3 en dirección *offshore*. Adicionalmente se utilizaron dos sensores ultrasónicos (Massa M300-95) ubicados a 0.19 (m) longitudinalmente de los palitos 1 y 3, y a una altura desde el nivel del fondo inicial de 0.8 (m) y 1.1 (m), respectivamente (Fig. 3.6b).

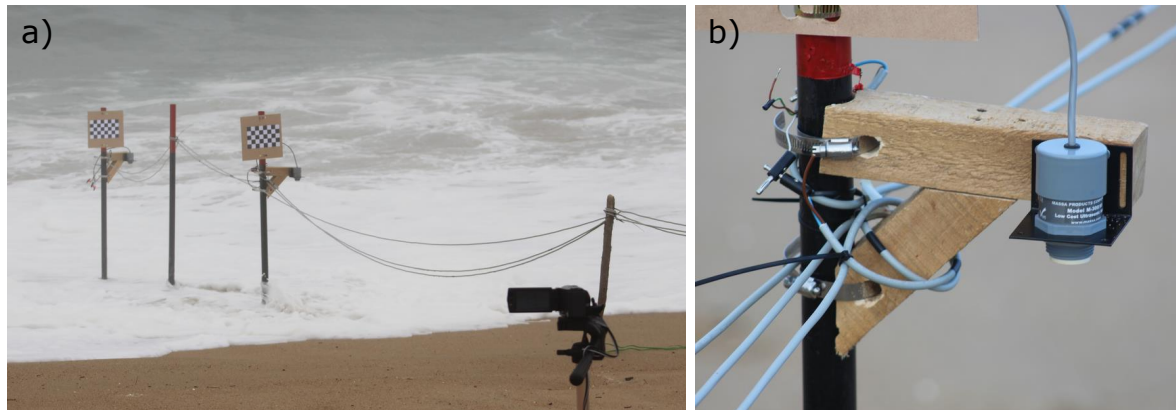


Figura 3.6: Set-up utilizado en Reñaca. a) Palitos en un transecto *cross-shore* registrados por una cámara SONY HDR-CX190. b) Sensor ultrasónico Massa M300-95

En la posición *cross-shore* del palito central (2) se dipuso un sensor de presión KELLER SERIES 26-Y a 0.07 (m) del palito y enterrado bajo 0.05 (m) del nivel de fondo inicial. No obstante, en este trabajo no se trabajaron las mediciones del sensor de presión debido a problemas con la adquisición de datos de éste durante el experimento. Además, se realizaron mediciones de la topografía de playa mediante el uso de un GPS diferencial. El perfil de playa y la disposición de instrumentos se muestra en la figura Fig. 3.7.

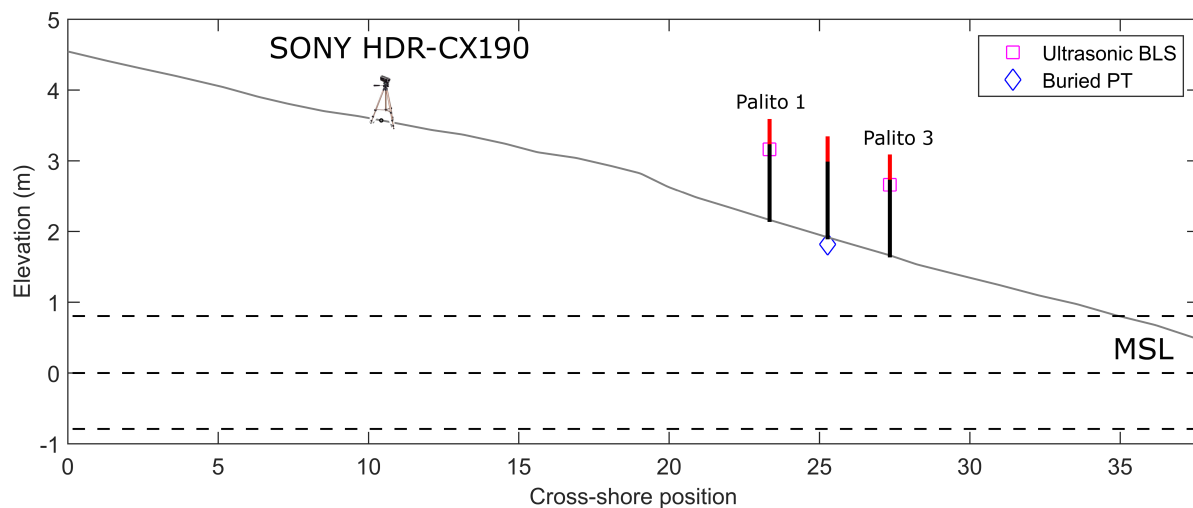


Figura 3.7: Set-up utilizado en Reñaca para medir la zona de *swash*. Las líneas horizontales discontinuas representan desde arriba hacia abajo: el nivel mareal máximo del día, el nivel de aguas quietas y el nivel mareal mínimo.

Al igual que en Mataquito, la resolución de cada palito fue obtenida usando una dimensión conocida de 30 centímetros, medida desde el borde superior de cada uno. Adicionalmente se dispuso de tableros de ajedrez en los bordes superiores de los palitos 1 y 3, con el fin de realizar una *rectificación* de los registros de video originales, para contrastar con el enfoque de transformación de unidades obtenido aquí y en experimentos previos. Esto será detallado en las secciones posteriores de este trabajo.

Para efectos de comparación, se dispone de 1:30 horas de mediciones sincronizadas de video y sensores ultrasónicos en la posición del palito 1, y 1:00 hora de mediciones en la posición del palito 3.

Finalmente, a diferencia de los estudios anteriores, no se dispone de características hidro-morfodinámicas medias durante la presente campaña de terreno.

3.3. Parámetros Estadísticos y Criterios de Comparación

En los experimentos realizados se utilizaron tanto instrumentos convencionales como el método propuesto para medir la zona de *swash*. A partir de estas series de tiempo co-localizadas y sincronizadas es posible obtener parámetros estadísticos que sirven como herramienta de validación, con el fin de establecer la calidad del método propuesto en base a cuantificaciones físicas.

Se utilizó la raíz del error cuadrático medio (*RMSE*), cuya definición se presenta en la ecuación 3.1

$$RMSE(X) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_{c,i} - X_{v,i})^2}{N}} \quad (3.1)$$

donde X corresponde a un parámetro genérico, N es la cantidad total de datos, y los subíndices (c, i) y (v, i) corresponden al valor i -ésimo medido con un instrumento convencional y la técnica de video, respectivamente. El parámetro estadístico *RMSE* mide el promedio de los errores al cuadrado, o bien la calidad de cierta predicción. Si $RMSE=0$, los valores obtenidos con la técnica propuesta son iguales a los medidos con una técnica convencional y conforme *RMSE* crece, la calidad de los datos medidos disminuye. Adicionalmente, se usan herramientas estadísticas para la comparación de datos, tales como el ajuste de regresión robusto (*DuMouchel and O'Brien., 1989*) y el uso de histogramas de distribución.

Además de los criterios de comparación cuantitativos recién descritos, se considera también el uso de criterios cualitativos para comparar la técnica propuesta con las mediciones de instrumentos convencionales. Esto se realiza mediante inspección visual de las mediciones y la interpretación física de los resultados entregados por los parámetros estadísticos, apoyándose en las limitaciones y ventajas de los instrumentos convencionales, descritas en el capítulo 1. Lo anterior, con el fin de establecer las ventajas y desventajas del método propuesto y fundar las conclusiones de este trabajo.

Capítulo 4

PROCESAMIENTO DE DATOS

En el presente Capítulo se exponen en detalle las metodologías y algoritmos utilizados para procesar la información obtenida a partir de los instrumentos convencionales (LIDAR, sensores de presión y sensores ultrasónicos) y de la técnica propuesta, que permiten extraer series de tiempo de elevación de la superficie libre y del nivel del fondo de la zona de *swash*.

4.1. Procesamiento de Instrumentos Convencionales

4.1.1. LIDAR

Los datos *raw* de LIDAR fueron procesados de la forma siguiente. En primer lugar, se obtuvieron las series de tiempo georeferenciadas mediante el uso de puntos de posición conocida en un transecto *cross-shore*, necesarios para definir la orientación del LIDAR según lo descrito en el trabajo de *Blenkinsopp et al.* (2010). Posteriormente, se aplicó un filtro del tipo *de-spike* basado en el gradiente de dos mediciones consecutivas, lo anterior para reducir el ruido aleatorio y las posibles mediciones erróneas debido al paso de personas. Luego, las series de tiempo fueron promediadas en el tiempo usando una media móvil (0.2 (s)) y espacialmente interpoladas en una grilla regular en dirección *cross-shore*, según lo especificado en el trabajo de *Martins et al.* (2015). A continuación se identificaron las series de tiempo de LIDAR co-localizadas con mediciones de video de los palitos *seaward* y *landward*, descritos en la sección 3.2.1. Luego, las series de tiempo de LIDAR fueron interpoladas a una frecuencia temporal igual a la obtenida desde el registro de video.

La separación entre la superficie libre y el nivel del fondo del *swash* se hizo siguiendo el criterio propuesto por *Almeida et al.* (2015), usando un umbral de la varianza (σ_{umb}^2) en una ventana móvil de un segundo (σ_{1s}^2) de las series de tiempo. Se utilizaron umbrales de varianza iguales a $\sigma_{umb}^2 = 5.2 \cdot 10^{-6}$ (m^2) y $\sigma_{umb}^2 = 4.5 \cdot 10^{-6}$ (m^2) para las posiciones *seaward* y *landward*, respectivamente, los cuales fueron determinados empíricamente en un procedimiento de prueba y error para las condiciones

presentes. Valores de σ_{1s}^2 mayores que σ_{umb}^2 definen la superficie libre y valores menores el nivel de fondo. Una vez identificados los instantes con varianzas móviles mayores y menores al umbral, se termina el procedimiento separando el nivel de la superficie del nivel de fondo considerando una altura mínima de eventos de *swash* igual a 0.02 (m) y una duración mínima de intervalos de exposición de fondo de 1 (s), según lo muestra la figura 4.1.

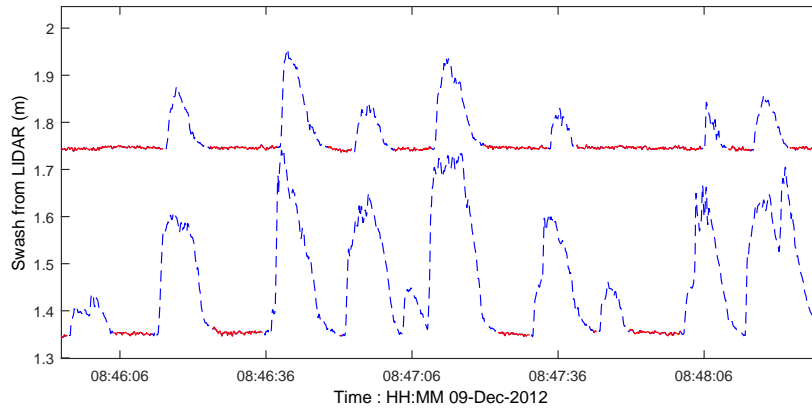


Figura 4.1: Separación entre la superficie libre (línea azul discontinua) y el nivel del fondo (línea roja continua) del LIDAR siguiendo el criterio propuesto por *Almeida et al. (2015)*. La serie de tiempo superior corresponde a la posición *landward* y la inferior a la posición *seaward*.

Se evidencia que los intervalos de nivel de fondo según LIDAR no son constantes durante cada lapso de exposición. Para comparar valores de nivel de fondo entre técnicas, se optó por utilizar el promedio del nivel de fondo en cada exposición detectada para LIDAR.

4.1.2. Sensores de Presión

El software incluido con los sensores utilizados entrega directamente mediciones en unidades de presión, las cuales fueron transformadas en unidades de elevación asumiendo una densidad del agua (ρ_w) obtenida en sitio, igual a 1031 (kg/m^3). Posteriormente, los valores fueron geofrenciadas según la posición conocida de cada sensor, para comparar directamente con las series de tiempo de video. La figura 4.2 muestra las mediciones en unidades de elevación (z) durante tres minutos, para las posiciones baja (Fig. 4.2a) y media (Fig. 4.2b) del *swash*. En ambas posiciones se observan intervalos de tiempo con valores relativamente constantes, iguales a $z_1 = 0.159$ (m) (posición baja, Fig. 4.2a) y $z_2 = 0.661$ (m) (posición media, Fig. 4.2b), los cuales son atribuidos a la *presión* medida por el sensor al estar en contacto con el elemento de sujeción descrito en la sección 3.2.2 (Refiérase a la figura 3.5b). A diferencia de estudios anteriores (*Baldock et al., 2006a; Brocchini and Baldock, 2008; Jensen et al., 2009*), el sensor no mide el nivel de fondo pues se encuentra posicionado por sobre el arena.

Para comparar directamente con valores de superficie libre obtenidos desde video, se optó por filtrar

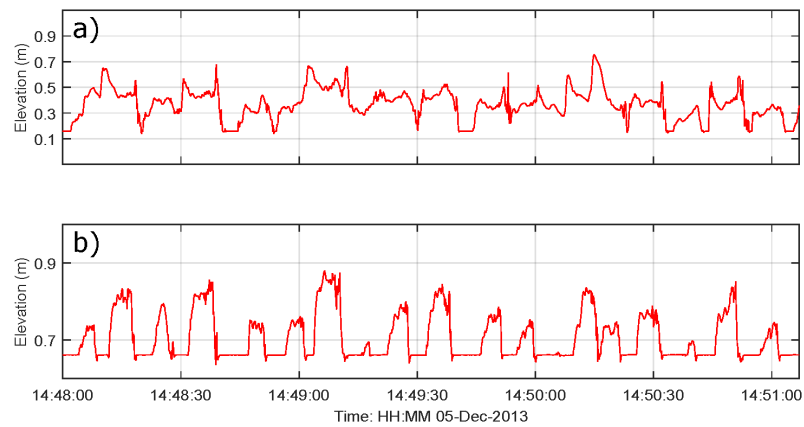


Figura 4.2: Mediciones de altura obtenidas por los sensores de presión en la (a) parte baja del *swash* y (b) parte media del *swash*.

manualmente las series de tiempo medidas por los sensores de presión bajo los valores $z_1 = 0.159$ (m) y $z_2 = 0.661$ (m) en las posiciones baja y media del *swash*, respectivamente, según lo muestra la figura 4.3. Mediante el filtro de las series de tiempo bajo estos valores, se prescinde de valores de elevación z no asociados a la superficie libre del agua.

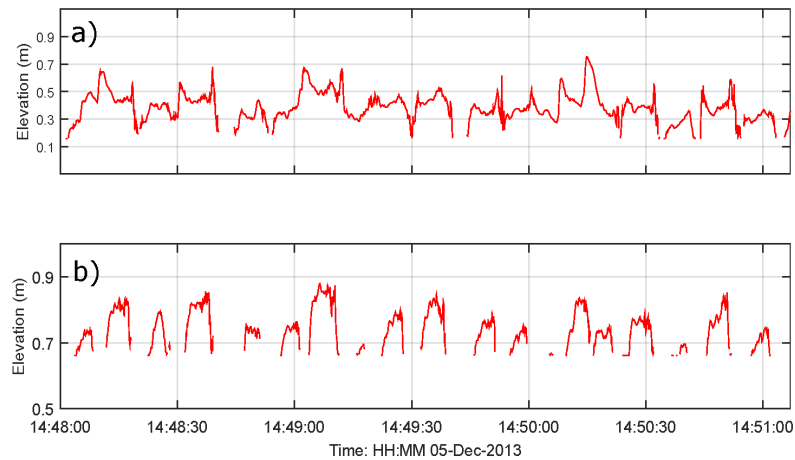


Figura 4.3: Mediciones de altura de la superficie libre del agua obtenida por los sensores de presión filtradas bajo los valores (a) $z_1 = 0.159$ (m) y (b) $z_2 = 0.661$ (m), para la parte baja y media del *swash*, respectivamente.

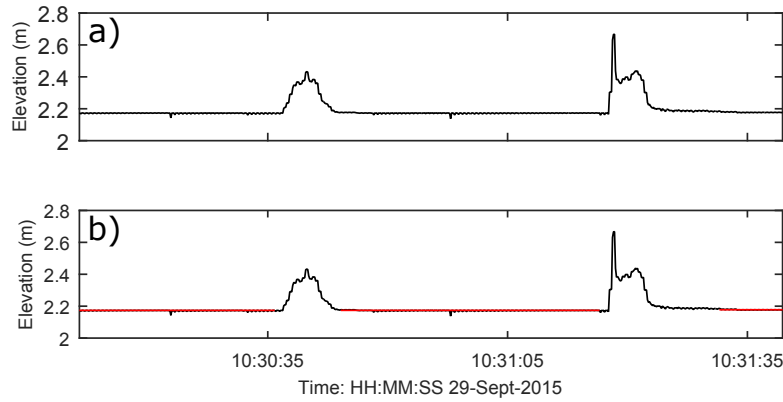


Figura 4.4: Separación del nivel del fondo y la superficie libre del swash medida por un sensor ultrasónico. a) Datos *raw*. b) Nivel del fondo (línea roja continua) separado de la superficie libre (línea negra continua).

4.1.3. Sensores Ultrasónicos

Las mediciones *raw* obtenidas por los sensores ultrasónicos entregan series de tiempo de la superficie libre y nivel del fondo del *swash* en conjunto. En primer lugar, se georeferencian las señales, conocida la posición de cada sensor respecto a un punto previamente medido. Según la literatura, la separación entre el nivel de fondo y la superficie libre se realiza normalmente siguiendo un criterio de razón de cambio de mediciones consecutivas bajo cierto umbral (*Turner et al.*, 2008), lo cual define los instantes de tiempo de nivel de fondo constante. En el presente estudio se usó un criterio diferente, pues las mediciones del nivel de fondo no resultaron lo suficientemente constantes (Fig. 4.4a) para ser discriminadas de la superficie libre según el criterio recién descrito. De hecho, el trabajo de *Turner et al.* (2008) indica que el criterio propuesto fue escogido empíricamente, y que eventualmente podría variar para otras condiciones en sitio (ej.: tamaño del grano).

El criterio efectivamente utilizado en el presente trabajo fue similar al aplicado para LIDAR (*Almeida et al.*, 2015), proponiendo un valor umbral de la desviación estándar móvil en una ventana de tiempo de 2.5 (s) ($\sigma_{2.5s}$) igual a $\sigma_{umb} = 0.009$ (m) para los dos sensores ultrasónicos dispuestos. Se consideró que cada intervalo de nivel de fondo sea mayor a 1 (s) y que la elevación de éste sea igual a la envolvente superior de cada intervalo, según se ilustra en la figura (Fig. 4.4b).

4.2. Procesamiento de Datos del Método Propuesto

4.2.1. Introducción

El video registra la intensidad de luz reflejada o emitada por las superficies presentes. Por ejemplo, en aguas poco profundas y cuando una ola se encuentra en proceso de rompimiento, el proceso de

reflexión especular no es de gran importancia pues el carácter turbulento y espumoso de una ola rompiendo se traduce en mecanismos de dispersión isotrópica que facilitan la observación del fenómeno. Por otro lado, zonas de oleaje *no saturado* se caracterizan por un mecanismo de reflexión especular, dependiente de la luz incidente sobre la superficie del agua y el ángulo relativo entre la ola y la cámara.

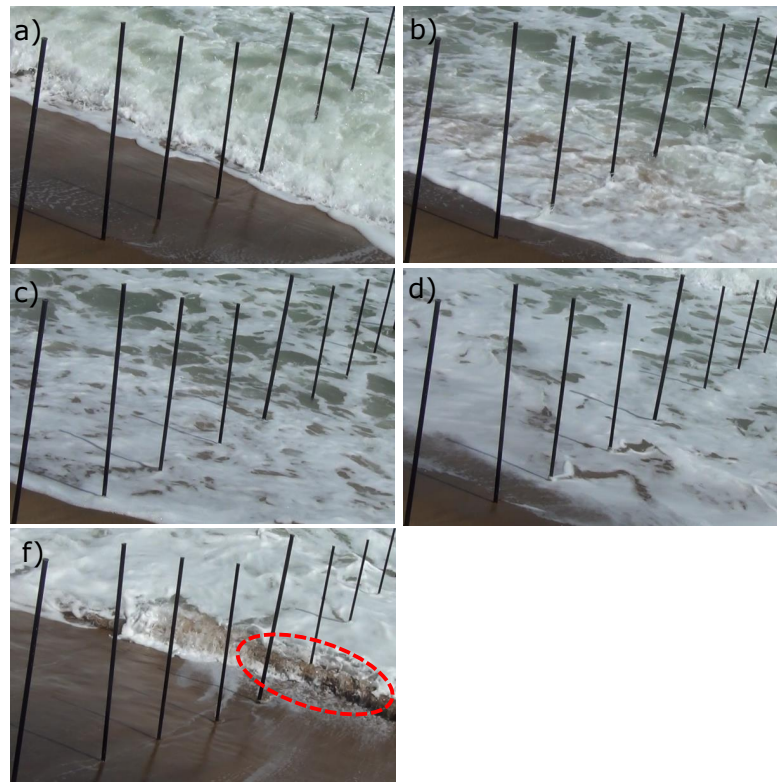


Figura 4.5: Tomas instantáneas de algunas fases del *swash*. a) *Bore* incidente del *inner surf zone* en el momento del colapso. b) Fase del *uprush*. c) Fase del *uprush* cercana al máximo *run-up*. Notar que la capa de agua en el borde del *uprush* posee alta presencia de espuma, facilitando la discriminación de señales debido al mecanismo de dispersión isotrópica. d) Fase del *backwash* en donde se pueden generar flujos supercríticos que posteriormente se encuentran con el *bore* incidente. Notar que parte del *backwash* presenta poca espuma aún existiendo un flujo. e) Resalto hidráulico (encerrado en línea roja discontinua).

En la zona de *swash* coexisten ambos fenómenos; una vez que el *bore* incidente colapsa en la línea de costa, aumenta súbitamente su velocidad en una capa de agua turbulenta que emite señales ópticas fáciles de discriminar (Fig. 4.5a,b). Conforme el *bore* se propaga hacia la costa en el *uprush*, los mecanismos de reflexión especular van tomando importancia; la masa de agua se propaga siguiendo un comportamiento *balístico* (*Shen and Meyer, 1963*), en el cual la disminución de velocidad del *bore* se traduce en un flujo menos turbulento y en donde la espuma presente es advectada hasta la posición del máximo *run-up* (Fig. 4.5c), coexistiendo sectores de alta y baja intensidad óptica en la zona de *swash*. Lo anterior se puede observar de manera similar en la fase de *backwash*, en donde la gravedad

es el principal forzante del aumento de velocidad del flujo desde zonas de baja velocidad hasta zonas de flujo supercrítico (Fig. 4.5d) que pueden generar resaltos hidráulicos (Fig. 4.5e) al encontrarse con otro *bore* incidente (*Brocchini and Baldock, 2008*). Estos fenómenos generan un desafío para la identificación de la señal óptica, pues la alta dinámica del *swash* se traduce en intensidades ópticas que pueden variar en el tiempo según el fenómeno presente. En otras palabras, una posición fija de un transecto *cross-shore* presenta alta dinamicidad, coexistiendo diversos fenómenos tales como el colapso del *bore*, fase de *uprush* o *backwash*, resaltos hidráulicos, presencia del nivel de fondo, espuma remanente dejada por el *backwash*, o la transformación en zona de *surf* al aumentar el nivel mareal o al existir mayor *set-up*, perdiéndose el carácter intermitente del *swash*. En contraste, la zona de *surf* presenta menos dificultades pues la discriminación de señales se reduce a la identificación de zonas de rompimiento activo de alta intensidad y de espuma remanente respecto a zonas sin presencia de oleaje rompiente (*Catalan et al., 2011*). Para sobreponerse a lo anterior, en este trabajo se han generado algoritmos semiautomatizados que permiten extraer las series de tiempo de la superficie libre y nivel de fondo del *swash*, los cuales serán explicados a continuación.

4.2.2. Generación de Timestacks

Los algoritmos de procesamiento de imágenes desarrollados en este trabajo son aplicados sobre diagramas espacio-temporales, conocidos como *timestacks* o *time-space maps*. La generación de *timestacks* consiste en la extracción de un arreglo de píxeles a lo largo de líneas rectas (*stacklines*) que cubren longitudinalmente cada palito, para formar así diagramas espacio-temporales de las bandas *RGB* (*Red, Green, Blue*) presentes en cada posición del transecto. Bajo la hipótesis que cada palito se mantiene inmóvil durante los períodos de medición, se trazan manualmente líneas a lo largo de cada uno (Fig. 4.6, línea magenta discontinua) para la extracción de arreglos de píxeles.

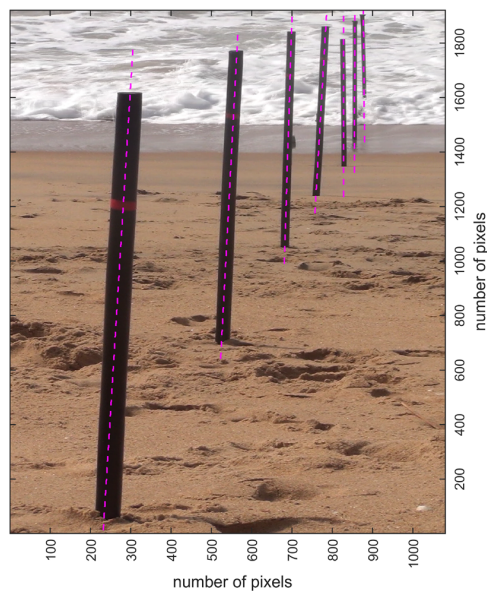


Figura 4.6: Trazado de *stacklines* (línea magenta discontinua) a lo largo de cada palito. A partir de cada línea se generan los *timestacks* de cada palito.

Otra alternativa para el trazado de *stacklines* a lo largo de cada palito se ha llevado a cabo para corridas de mayor duración, distintas a las utilizadas en este trabajo. Este método alternativo obtiene automáticamente la orientación de cada *stackline*, siendo esta la que la presenta mayor cantidad de píxeles de intensidad conocida respecto a otras orientaciones en que la línea cubre zonas no deseadas, correspondientes al segundo plano del video. La intensidad conocida corresponde al color del palito y es definida previamente según cada experimento.

Una vez definidas las *stacklines*, se generan *timestacks* de usualmente dos a cuatro minutos de duración. Este período se asume como un período suficiente para que las condiciones hidrodinámicas del *swash* y la intermitencia de este no presenten alta variabilidad. A modo de ilustración, la figura 4.7 muestra 4 minutos de *timestacks* correspondientes a tres posiciones de un transecto de *swash*. Desde arriba hacia abajo, se observa el *bore* incidente en una posición ubicada en la parte baja del *swash*

(Fig. 4.7a) hasta llegar a la parte alta de la playa (Fig. 4.7c).

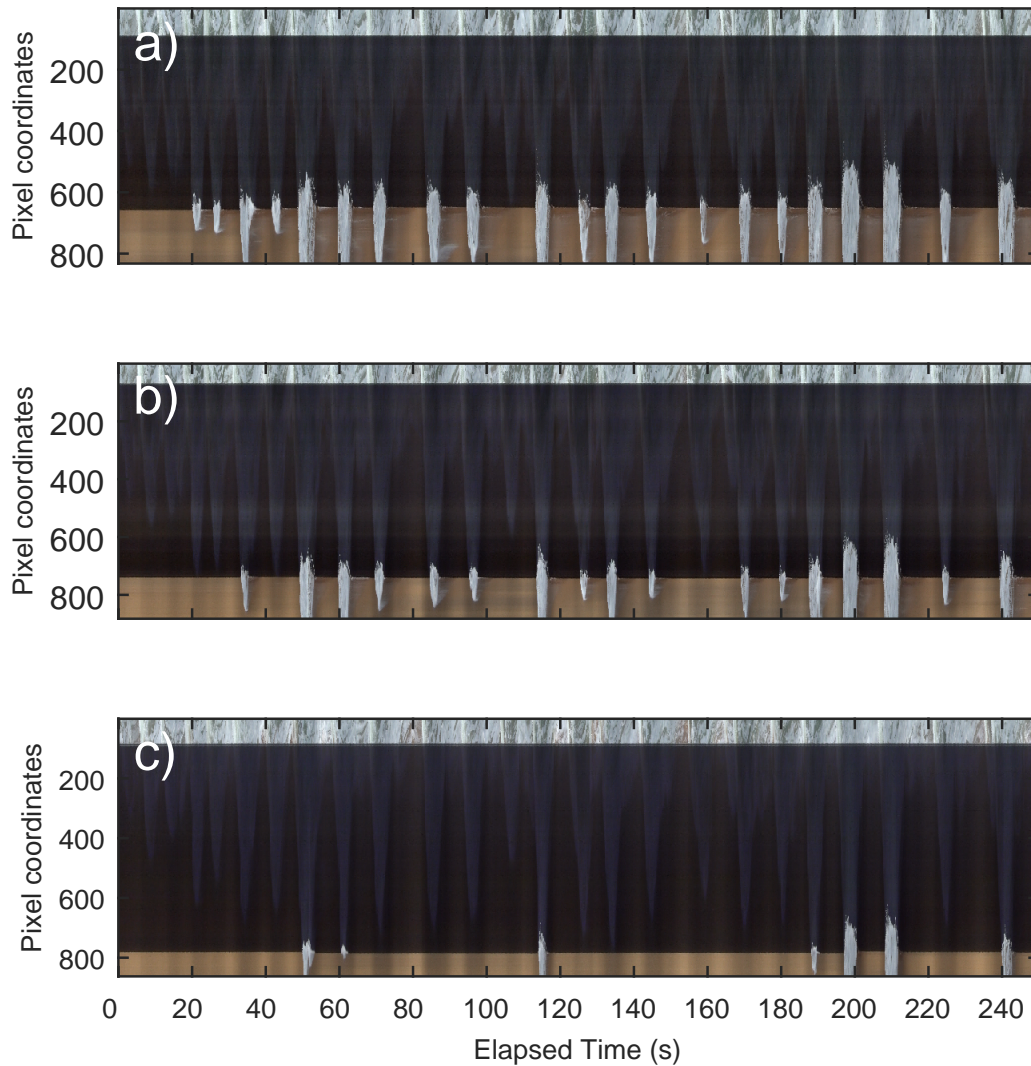


Figura 4.7: *Timestacks* de 4 minutos de duración correspondientes a tres posiciones de un transecto *cross-shore* de *swash*.

4.2.3. Detección de la Superficie Libre y Nivel del Fondo

La discriminación de señales se basa en la variación de intensidad óptica entre palitos, agua y nivel del fondo. El procedimiento descrito en esta sección se aplica sobre cada *timestack* por separado y obedece las siguientes etapas consecutivas.

1. Transformación de intensidades de bandas *RGB* a otra intensidad conveniente.
2. Identificación y aplicación de intensidades umbrales que permiten la detección de eventos de *swash* y del nivel de fondo.
3. Transformación de unidades de pixeles a unidades georeferenciadas.

4.2.3.1. Transformación de intensidades de pixel a otra intensidad conveniente

Los *timestacks* en formato de bandas *RGB* son transformados en matrices bidimensionales de intensidad óptica. En los experimentos presentes, usualmente se han utilizado palitos de color negro, el cual presenta alto contraste respecto a intensidades de colores claros asociados al agua y arena. Para discriminar estas intensidades, se ha utilizando la siguiente transformación desde *RGB* a matrices de intensidad óptica, o $I(\xi, t)$, donde ξ es la coordenada vertical de un *timestack* que representa la coordenada a lo largo de un palito y t la coordenada horizontal que representa el tiempo:

- $I(\xi, t) = 0.2989R + 0.5870G + 0.1140B$, correspondiente a una escala de grises.

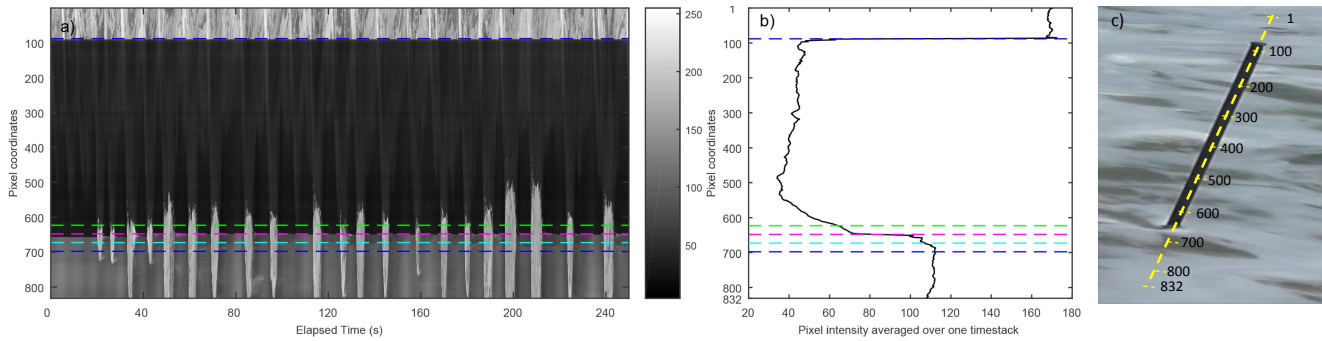


Figura 4.8: a) *Timestack* de la figura 4.7a en escala de grises y b) Intensidad de pixeles promediada a lo largo del *timestack* completo, $I(\xi, \bar{t})$. Las líneas azules discontinuas representan los límites superior (*top*) e inferior (*liminf*) y sirven como dominio de trabajo para las etapas siguientes del procesamiento de datos. La línea magenta discontinua es definida como \overline{bed} y las líneas verde y cian discontinuas son definidas como $\overline{overbed}$ y $\overline{underbed}$, respectivamente. c) Imágen del palito que muestra el sistema de referencia de las coordenadas verticales (ξ) usadas en los *timestacks*.

Obtenido el mapa bidimensional de intensidad óptica, se definen ciertos parámetros que servirán en las etapas consecutivas del procesamiento de datos. Estos parámetros se definen a continuación.

- \overline{bed} , define la coordenada ξ que representa el nivel medio de fondo (Fig. 4.8a, línea magenta discontinua) del *timestack*. Se obtiene automáticamente a partir del cambio drástico de intensidad de pixeles (Fig. 4.8b, línea magenta discontinua) de la matriz de intensidades promediada en el

tiempo $I(\xi, \bar{t})$. Notar que el sistema de referencias de la coordenada ξ se define a partir de la *stackline* trazada manualmente a lo largo de cada palito (línea amarilla discontinua, Fig. 4.8c).

- *top*, es la posición ξ que representa el borde superior del palito (Fig. 4.8a, línea azul discontinua superior) y es también obtenida a partir del fuerte cambio de intensidades de pixeles (Fig. 4.8b, línea azul discontinua superior) de la matriz $I(\xi, \bar{t})$.
- *liminf*, es la posición ξ (Fig. 4.8a,b línea azul discontinua inferior) que no tiene sentido físico y se utiliza para definir un dominio de trabajo más acotado que la dimensión vertical completa del *timestack*. Se obtiene a partir de la expresión $liminf = \overline{bed} + ny$, donde ny se fija igual a 50 pixeles, que para los rangos de resolución presentes en el método propuesto, representa una distancia de aproximadamente 5 a 20 (*cm*). Estos valores se asumen lo suficientemente grandes para que *liminf* se encuentre siempre por debajo del nivel de fondo de un *timestack*.
- $\overline{underbed}$ (Fig. 4.8a,c, línea cian discontinua), define la posición ξ ligeramente inferior al nivel de fondo medio, y se obtiene a partir de la expresión $\overline{underbed} = \overline{bed} + 0.5ny$.
- $\overline{overbed}$ (Fig. 4.8a,c, línea verde discontinua) define la posición ξ ligeramente superior al nivel de fondo medio, y se obtiene a partir de la expresión $\overline{overbed} = \overline{bed} - 0.5ny$.

Definidos los parámetros anteriores, se trabaja sobre la matriz $I(\xi, t)$ acotada verticalmente entre las posiciones $\xi = top$ y $\xi = liminf$.

4.2.3.2. Detección de la superficie libre y del nivel de fondo

El objetivo de esta etapa es la obtención de las series de tiempo del *swash* en unidades de pixeles. En primer lugar, se identifican los intervalos de tiempo correspondientes al nivel de fondo, aislados de los eventos de *swash*. Como se ha señalado anteriormente, esto se logra mediante un algoritmo semiautomatizado que define una intensidad umbral calculada en la posición fija $\xi = \overline{underbed}$. Consecuentemente, se ha definido una intensidad umbral (I_{thrB}) que aísla los intervalos de nivel de fondo, según la siguiente expresión.

$$I_{thrB} = \overline{\overline{I(\overline{underbed}, t)}} + c\sigma(I(\overline{underbed}, t)) \quad (4.1)$$

Donde c es un coeficiente que varía según las condiciones en sitio y la posición *cross-shore* a ser detectada. Este parámetro define la cantidad de desviaciones estándares por sobre la media de $\overline{I(\overline{underbed}, t)}$ y debe ser calibrado por el usuario según las condiciones presentes. La sección 4.2.3.3 presenta un ejemplo de la obtención de este parámetro.

A modo de ejemplo, la figura 4.9 muestra la aislación de intervalos mediante la aplicación de I_{thrB} . La figura 4.9a muestra un *timestack* de la parte baja del *swash* (Fig. 4.7a) y en cian discontinuo se muestra la posición $\xi = \overline{underbed}$. Además, se muestra la intensidad óptica (Fig. 4.9b) a lo largo de $\xi = \overline{underbed}$. $I(\overline{underbed}, t)$ presenta valores en el rango de $I \sim 70$ a $I \sim 120$, los cuales definen intervalos de tiempo con presencia de arena. Estos intervalos son interrumpidos por altos gradientes

que representan el arribo de ciclos de *swash*, caracterizados por intensidades ópticas superiores ($I > \sim 150$) asociadas a la espuma y turbulencia. La línea azul continua representa el valor del umbral $I_{thrB} = 164.4$, calculado usando $c = 1.6$. Cada instante de tiempo que posee un pixel de intensidad óptica mayor a I_{thrB} es considerado parte de un evento, transformando $I(\xi, t)$ en otra matriz con intervalos de nivel de fondo identificados separadamente (Fig. 4.9c). Se considera que los intervalos correspondientes a eventos deben durar por lo menos 1 segundo. En caso contrario, se consideran como parte de un intervalo de nivel de fondo.

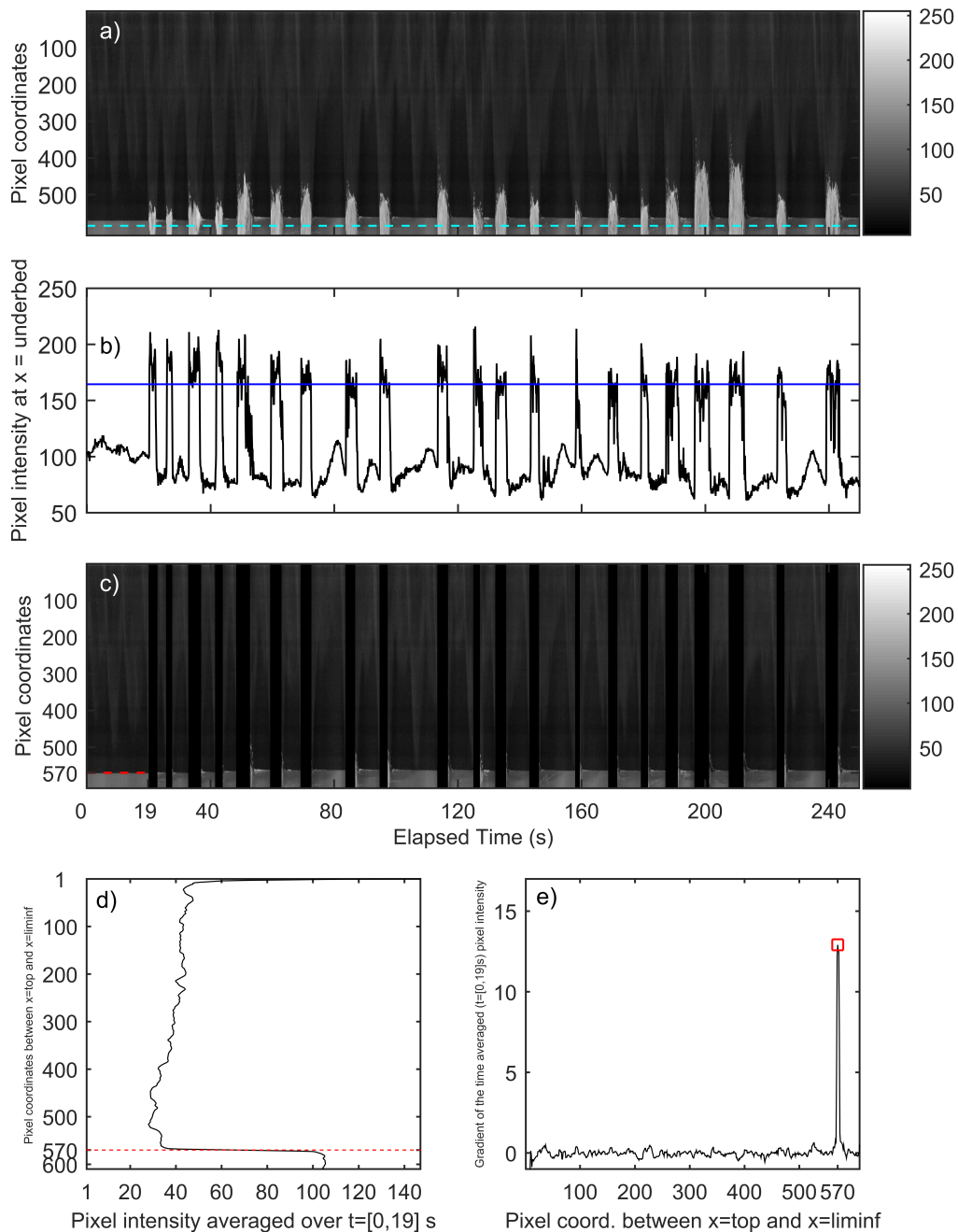


Figura 4.9: a) *Timestack* de la figura 4.7a en escala de grises. Se identifica la posición $\overline{\text{underbed}}$ (cian discontinua). b) Serie de tiempo de intensidad óptica sobre $\xi = \overline{\text{underbed}}$. La línea azul continua representa el umbral $I_{thrB} = 164.4$, para un valor de $c = 1.6$. c) *Timestack* una vez aplicada la intensidad umbral I_{thrB} . Los bloques de color negro representan instantes de tiempo en que existe la presencia de un evento de *wash*. La línea roja discontinua representa el nivel del fondo en el intervalo $t = 0$ a 19 segundos. d) Intensidad de píxeles en la coordenada ξ , promediada entre $t = 0$ y 19 segundos. La línea roja discontinua representa la posición del nivel del fondo, $\xi = 570$, encontrada según (e) el máximo gradiente (cuadro rojo) de intensidad óptica promediada en el mismo intervalo de tiempo.

A pesar del criterio de aislación adoptado, existen valores de intensidad menores a I_{thrB} que representan parte de un evento de *swash*. Sin embargo, como se explicó anteriormente, el objetivo del uso de esta intensidad no es la identificación precisa de la superficie libre, sino de los intervalos con presencia de nivel de fondo. En este sentido, se calcula una intensidad I_{thrB} superior a la intensidad que representa efectivamente la presencia de agua, prescindiendo de valores de intensidad asociados a fenómenos de menor intensidad, tales como la espuma remanente dejada por el *backwash* y la reflexión de la luz sobre el arena saturada. Por ejemplo, el uso de la intensidad umbral I_{thrB} identifica instantes de agua como si fuesen arena. Esto se observa en las caras posteriores de algunos eventos ($t \sim 55, 86$ segundos), asociados a un *backwash* menos turbulento o a la espuma remanente dejada por ellos. Lo anterior no se considera un problema pues el objetivo de esta etapa es identificar niveles de fondo, prescindiendo de la superficie del agua que será detectada posteriormente mediante otra intensidad umbral.

Una vez identificados los intervalos de nivel de fondo, se detecta la elevación de éste en cada lapso de exposición. A modo de ejemplo, se describe la detección del nivel de fondo en el intervalo que va desde $t = 0$ a $t = 19$ segundos. Se obtiene el nivel de fondo (Fig. 4.9c y d, línea roja discontinua) identificando el máximo gradiente de intensidad (Fig. 4.9e, cuadro rojo), correspondiente a la transición entre el palito y el arena. En el presente caso, la posición $\xi = 570$ representa el máximo gradiente de intensidad promediada entre $t = 0$ y $t = 19$ segundos. El mismo procedimiento es aplicado separadamente sobre cada intervalo de nivel de fondo, obteniendo la serie de tiempo de esta variable a lo largo del *timestack* completo. A continuación se detecta la superficie libre de los eventos de *swash*, siguiendo un procedimiento similar al del nivel de fondo. Primeramente se define una intensidad umbral, I_{thrW} , que separa la superficie libre *swash* del resto de la matriz $I(\xi, t)$, según la siguiente expresión.

$$I_{thrW} = \overline{I(\overline{overbed}, t)} + k\sigma(I(\overline{overbed}, t)) \quad (4.2)$$

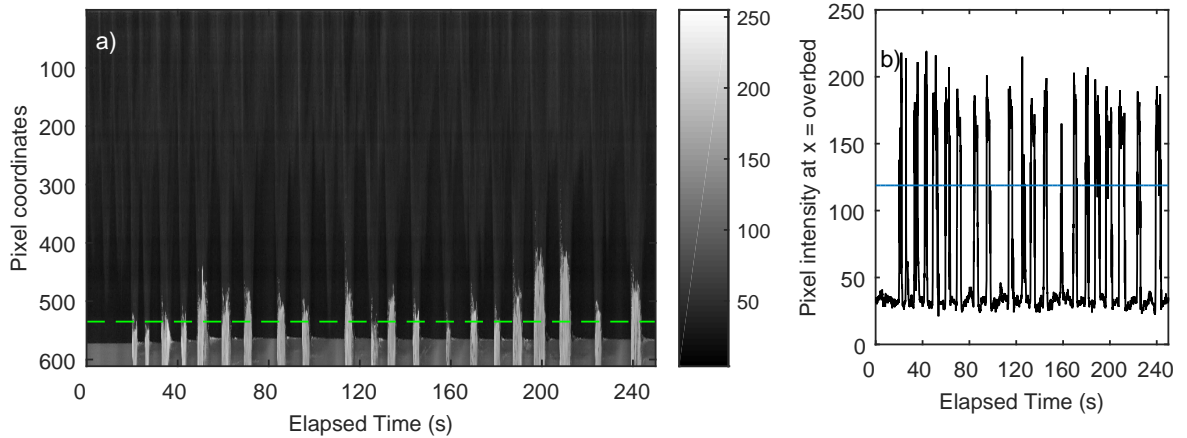


Figura 4.10: a) *Timestack* de la figura 4.7a en escala de grises. Sobre él se identifica la posición $\overline{overbed}$ (línea verde discontinua). b) Serie de tiempo de intensidades de pixel a lo largo de $\xi = \overline{overbed}$. La línea azul continua representa el umbral $I_{thrW} = 118.81$, calculado mediante el valor de $k = 1$.

Donde k es un coeficiente que define la cantidad de desviaciones por sobre la media de $\overline{I(\overline{overbed}, t)}$. Su elección debe ser empíricamente elegida por el usuario, según las condiciones en sitio y de cada posición *timestack*. La sección 4.2.3.3 describe la selección de este valor.

La figura 4.10a muestra la imagen sobre la cual se identifica la posición $\xi = \overline{overbed}$ (línea verde discontinua). El cálculo de I_{thrW} (con $k = 1$) se realiza sobre esta posición (Fig. 4.10b), siguiendo una estructura similar a I_{thrB} . A diferencia del caso anterior, I_{thrW} se calcula a lo largo de una línea de pixeles que presenta intensidades asociadas al palito y al agua, prescindiendo del nivel de fondo, el cual introduce intensidades mayores que el color del palito. Consecuentemente, es de esperarse que según el valor de k escogido, se obtengan valores de I_{thrW} menores a I_{thrB} , tal que sea posible detectar ciclos de *swash* completos y no solamente parte de ellos.

Todos los pixeles de intensidad óptica mayor a I_{thrW} son considerados como agua ($I_{thrW} > 118.81$ en este caso), transformando el *timestack* en una matriz binaria de unos (presencia de superficie libre) y ceros (presencia de palito o nivel de fondo), como se muestra en la figura 4.11a. Obtenido el mapa binario, se aplica un filtro morfológico del tipo erosión-dilatación para minimizar y/o deshacerse de la presencia de espuma remanente y de salpicaduras de agua (*splashes*) producidos por la interacción entre la superficie libre del *swash* y el palito. Las figuras 4.11a y b muestran la matriz binaria antes y después de la aplicación del filtro, respectivamente.

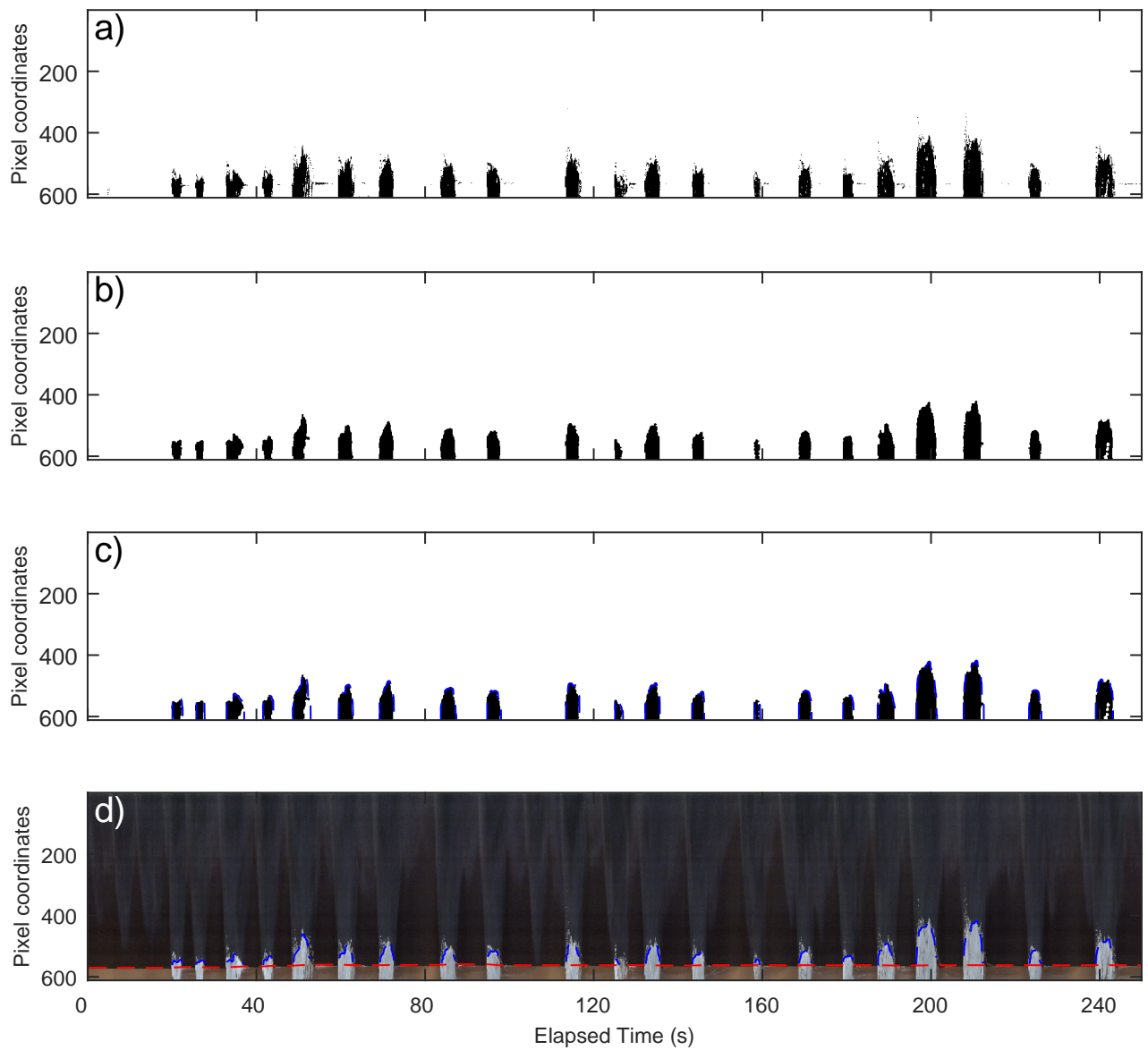


Figura 4.11: a) Mapa binario producto de la aplicación de la intensidad umbral I_{thrW} . b) Mapa binario una vez aplicado el filtro morfológico del tipo erosión-dilatación. c) Detección de la superficie libre del *swash*. d) *Timestack* en conjunto con las series de tiempo detectadas: nivel de fondo (línea roja discontinua) y superficie libre (línea azul discontinua)

A continuación se identifica el cambio abrupto entre unos y ceros, correspondiente al nivel de la superficie libre del *swash* (Fig. 4.10c, línea azul discontinua). Finalmente, la serie de tiempo de nivel de fondo es re-interpolada sobre los intervalos de superficie libre y unida a esta para obtener series de tiempo del *swash* (Fig. 4.11d), de las cuales se puede obtener identificar los niveles de exposición del fondo y de la superficie libre.

4.2.3.3. Determinación de los parámetros c y k

La intermitencia y dinamicidad de la zona de *swash* introduce alta variabilidad dependiendo del *timestack* en estudio. En esta sección se describe en primer lugar la determinación del parámetro c , que permite la aislación de los intervalos de nivel de fondo de un *timestack*. La determinación de c se presenta para tres posiciones de un transecto de *swash*, en la parte baja, media y alta (Refiérase a la figura 4.7).

El cálculo de I_{thrB} sobre la posición $\overline{underbed}$ introduce la necesidad de emplear mayores valores de c conforme se trabaja en una posición del transecto alejada del colapso del bore; en la parte baja del *swash* existe una mayor cantidad de eventos, lo cual se traduce en la presencia de altas intensidades de pixel sobre $\overline{underbed}$. Ésto genera valores de I_{thrB} mayores para un valor de c fijo. En este sentido, es de esperarse que una posición correspondiente a la parte baja del *swash* requiera un menor valor de c para definir una intensidad I_{thrB} que aisle adecuadamente los eventos de los intervalos de exposición del fondo.

El criterio utilizado para la elección del parámetro c es el siguiente. Para cada posición del *swash*, se seleccionan dos *timestacks* de duración total igual a 8 minutos. Este período es considerado adecuado para representar un *estado de mar* en el cual la intermitencia del *swash* sea relativamente constante en una posición *cross-shore* fija, dejando de lado la posible presencia de ondas de infragravedad. A partir de los *timestacks* se cuenta manualmente la cantidad de intervalos de exposición de fondo, comparando este número con la cantidad de intervalos detectados automáticamente mediante el uso de I_{thrB} , para distintos valores de c .

La figura 4.12 muestra un análisis de sensibilidad del parámetro c , variando su valor en 0.2 unidades desde 1 a 3. Para cada posición del *swash* se obtiene el error relativo entre la cantidad de intervalos detectados y los efectivamente existentes. Se observan valores de c que minimizan este error, existiendo un valor estable (*plateau*) entre el error relativo asociado al c seleccionado y al de los valores adyacentes.

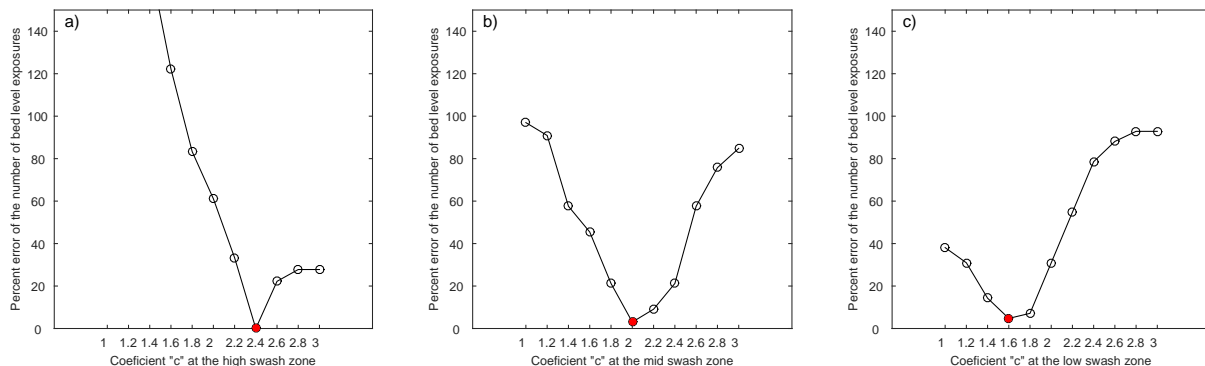


Figura 4.12: Elección del parámetro c (círculo sólido rojo) que minimiza el error relativo entre en la cantidad de niveles de exposición de fondo existentes y detectados en las posiciones a) alta ($c = 2.4$, error=0%) b) media ($c = 2$, error=3%) y c) baja ($c = 1.6$, error=4.76 %) del *swash*.

Por otro lado, el valor de k se selecciona mas bien empíricamente pues a diferencia del nivel de fondo, es difícil definir un índice automático que identifique la calidad de la detección de la superficie libre, a diferencia del uso de I_{thrB} que selecciona c mediante el número de intervalos de exposición. En este sentido, se espera que usuario seleccione los valores de k tales que la superficie libre sea detectada por completo, considerando las fases de *uprush* y *backwash*. La calidad de esta detección debe ser chequeada por el usuario.

Para las tres posiciones *cross-shore* usadas en la determinación de c , se ha concluido empíricamente que el uso de un valor de $k = c - 0.6$ entrega valores de k tales que I_{thrW} varía en el rango de intensidad óptica desde 94.27 a 118.81, las cuales detectan los ciclos de *swash* por completo, y que posteriormente son unidos a la serie de tiempo de nivel de fondo previamente encontrada.

4.2.3.4. Transformación desde Pixeles a Unidades Georeferenciadas

Según se explicó en la sección 3.1, se han utilizado referencias de dimensión conocida para transformar desde unidades de pixeles a otra unidad de elevación georeferenciada (*real world coordinates*). Lo anterior se ha hecho considerando tres enfoques; i) el diámetro conocido de los palitos respecto a la cantidad de pixeles ocupados por esta dimensión (Fig. 4.13a), (ii) el número de pixeles ocupados por el largo superior del palito pintado en un color diferente (Fig. 4.13b,c,d y e) y (iii) un proceso de *rectificación* mediante el uso de tableros de ajedrez dispuestos en el borde superior de cada palito (Fig. 4.13d).

Los enfoques (i) y (ii) se llevan a cabo al inicio de las mediciones, asumiendo que la resolución de cada palito no cambia mientras ocurren las mediciones. Esto se realiza seleccionando manualmente los pixeles ocupados por la dimensión conocida, obteniendo una resolución ($m/pixel$) que disminuye conforme el objetivo se aleja de la cámara. Los valores típicos obtenidos son de orden $O(10^{-3})$ ($m/pixel$). La hipótesis principal sobre la cual se apoya este procedimiento es la disposición vertical de los palitos tal que las líneas (o ejes) de orientación de estos pertenecen a planos imaginarios paralelos, los que a su vez son paralelos al sensor interno de la cámara. Lo anterior se traduciría en bajos ángulos de incidencia (*grazing angles*) que en conjunto con las cortas distancias entre la cámara y palitos permitirían la omisión de correcciones por distorsiones del lente y rotación de la cámara. Esto se discutirá en la sección 5 en conjunto con el enfoque (iii). Para los enfoques (i) y (ii), se obtienen las resoluciones ($m/pixel$) de la tabla 4.1. La nomenclatura de cada palito se informa según la descripción hecha en la sección 1. Refiérase a las figuras 3.4, 3.5 y 3.7.

Finalmente, la referencia absoluta de las series de tiempo se hace relativa al borde superior de cada palito, el cual es identificado en cada *timestack* mediante la variable *top* y en sitio a través de las mediciones *GPS* hechas al comienzo de cada experimento.

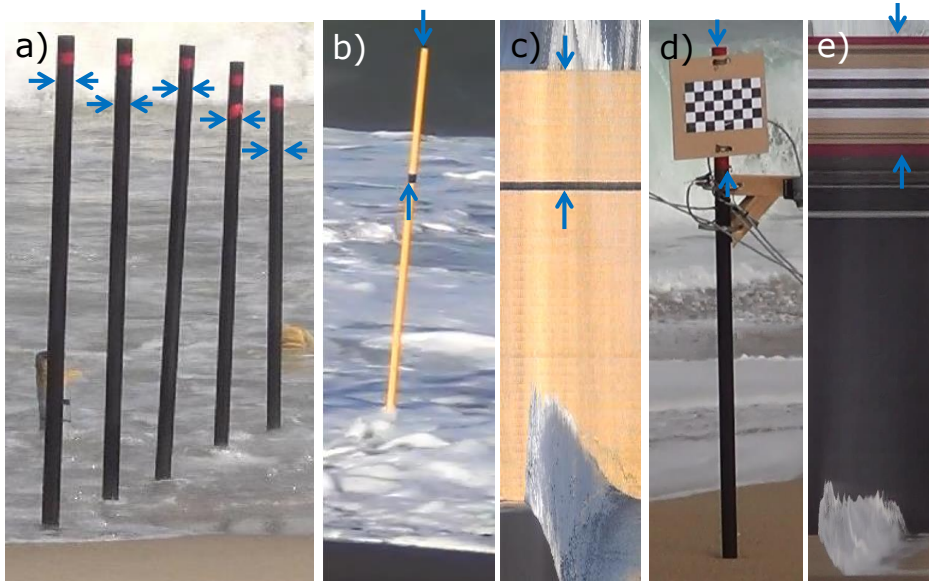


Figura 4.13: Referencia de dimensión conocida utilizadas en en a) Nha Trang (diámetro 3 cm). b) Mataquito (30 cm desde el borde superior del palito hasta el borde inferior de una cinta negra). c) Representación de la imagen anterior en forma de *timestack* para la obtención de la resolución a partir del número de píxeles. d) Reñaca (30 cm de color rojo). e) Número de píxeles seleccionados manualmente a partir del *timestack*.

Tabla 4.1: Resoluciones utilizadas en cada experimento/palito

Nha Trang		Mataquito		Reñaca	
Palito	Resolución (m/pixel)	Palito	Resolución (m/pixel)	Palito	Resolución (m/pixel)
<i>surf</i>	0.0023	<i>seaward</i>	0.0026	<i>1</i>	0.0015
<i>swash bajo</i>	0.0018	<i>landward</i>	0.0032	<i>3</i>	0.0019
<i>swash medio</i>	0.0014				

Capítulo 5

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Capacidades del Método

Las capacidades de la técnica propuesta para medir variaciones del nivel del fondo y de la superficie libre del *swash* son enunciadas en esta sección. A modo de ilustración, la figura 5.1a muestra una hora de series tiempo correspondientes a tres posiciones de un transecto *cross-shore* de palitos. Las dos series de tiempo superiores, correspondientes a la parte baja (línea negra continua) y media (línea negra discontinua) del *swash*, muestran episodios de erosión interrumpidos por períodos de acreción. El cambio total del nivel del fondo es de 6 (cm) (acrección) en la parte baja del *swash*, mientras las partes media y alta (línea gris discontinua) presentan un cambio neto nulo del nivel del fondo entre el comienzo y fin de las mediciones. La figura 5.1b muestra en mayor detalle los cuatro minutos de series de tiempo encerrados en el cuadro negro de la figura 5.1a. El paso de eventos de *swash* individuales es evidente, exhibiendo su típico perfil asimétrico (Hughes, 1992) más la presencia de interacción entre eventos (ej. $t = 905$ (s)) de *swash* (Hughes and Moseley, 2007; Brocchini and Baldock, 2008) en la parte baja de la playa. En las subsecciones siguientes se presenta la validación del método propuesto en contraste con cada uno de los instrumentos convencionales. Como paso a previo al análisis, se debe verificar la sincronización de la señal de video con los otros sensores. En cada experimento, se sincronizaron los relojes de cada sistema de adquisición utilizado (cámara HD y sistema de adquisición de datos de otro instrumento). No obstante, se ha observado que la cámara recibe la señal inicial ligeramente después (~ 1 s) de iniciada la grabación, por lo que se deben sincronizar las mediciones con un método alternativo. Para esto, se identifican cuidadosamente los pasos de *bores* incidentes correspondientes al *uprush* de los evento de *swash*, como lo muestra la figura 5.2. En secciones anteriores se explicó el procedimiento utilizado para identificar los intervalos de nivel de fondo y de superficie libre en cada técnica de medición. Según cada intervalo encontrado y para efectos de comparación, se considerarán solo los instantes de tiempo en que coexisten nivel de fondo o superficie libre entre dos técnicas. Lo anterior, debido a que cierto procesamiento de datos puede discriminar según fondo o agua de manera distinta en instantes de tiempo comunes. Una vez sincronizados los instrumentos y encontrados los

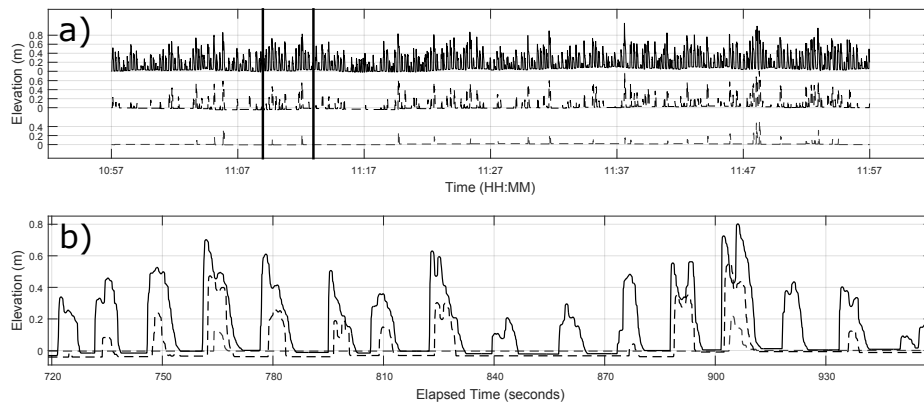


Figura 5.1: Ilustración de series de tiempo del *swash* en tres posiciones de un transecto *cross shore*. a) Una hora de mediciones b) Zoom de 240 segundos de duración. Las 3 series de tiempo están referenciadas a un nivel $z = 0$ m, correspondientes al nivel de fondo inicial de cada una.

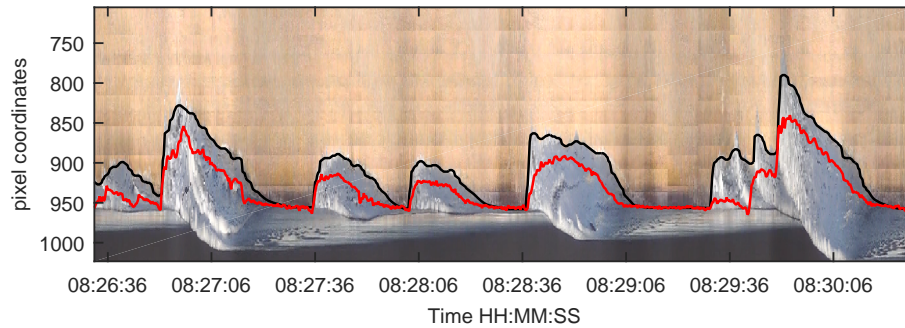


Figura 5.2: Ejemplo de sincronización de señales apoyándose de la ocurrencia de arribo de frentes de ola.

intervalos comunes de nivel de fondo y/o superficie libre del *swash*, se procede a validar la técnica propuesta.

5.2. Comparación con Sensores de Presión

A modo de primer enfoque, la figura 5.3 muestra 30 minutos de series de tiempo de sensores de presión (línea roja discontinua) y video (línea negra continua), en la zona de *surf* (Fig. 5.3a), parte baja (Fig. 5.3b) y media (Fig. 5.3c) del *swash*. Las diferencias *RMSE* son de 0.046 (m), 0.075 y 0.058 (m), respectivamente. Como se señaló en la sección 4.1.2, la comparación fue realizada solamente en intervalos de tiempo correspondientes a la superficie libre, ya que el sensor de presión se encontraba por sobre el nivel del fondo. A diferencia de lo anterior, las series de tiempo del *surf* son comparadas directamente ya que el sensor correspondiente estuvo siempre en sumersión. Para entender mejor las diferencias entre ambos instrumentos, se refiere a la figura 5.4, la cual muestra los primeros cinco minutos de mediciones.

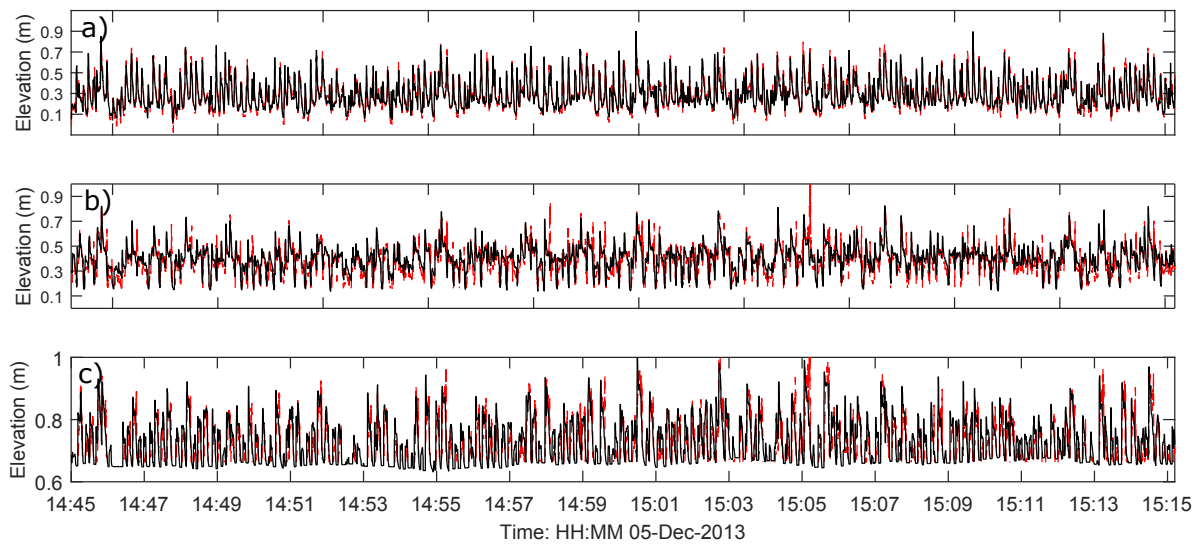


Figura 5.3: Series de tiempo de las mediciones hechas mediante video (línea negra continua) y sensores de presión (línea roja discontinua) en el a) *surf* b) parte baja del *swash* y c) parte media del *swash*.

Una similitud adecuada se observa en la zona de *surf*, en donde el video representa favorablemente la forma de los frentes de ola y de las caras posteriores de estas (*back face*). Las diferencias en los frentes de ola se atribuyen mayoritariamente a la presencia de vacío en la columna de agua, produciéndose la subestimación de la altura del *bore* por parte del sensor de presión, ya que la suposición de comportamiento hidrostático asume que la columna de fluido está compuesta totalmente por agua. Lo anterior no es correcto pues la zona de *surf* exhibe un comportamiento bifásico, en el cual la fase del *roller* (Svendsen, 1984) se caracteriza por la presencia de burbujas (ver por ejemplo el trabajo de Blenkinsopp and Chaplin (2007)). En este sentido, se establece que la zona de *surf* es medida favorablemente con la técnica de video propuesta, similar a lo advertido por autores anteriores (Ebersole and Hughes, 1987, 1988; Bayram and Larson, 2000).

Por otro lado, la zona de *swash* presenta mayores discrepancias en la forma y altura del *bore*; largas

diferencias se observan en los frentes de ola (*uprush*), mientras que las caras posteriores de los eventos de *swash* tienden a ser mejor representadas por el video. Estas diferencias son atribuidas a la disposición en sitio de los elementos e instrumentos utilizados. Por un lado, la disposición de palitos en el *swash* influye sobre el flujo libre del *bore* en la fase del *uprush*, produciéndose un punto de estancamiento en el manto del palito y a su vez un flujo en dirección vertical (*splash*) en la cara delantera del palito. Lo anterior se muestra en círculos punteados de la figura 5.5. La figura 5.5a muestra el *bore* incidente en el *inner surf*, el cual no se ve mayoritariamente afectado por la disposición de los palitos. Esto puede ser atribuido en parte a las bajas velocidades del flujo cercano al colapso. Por otro lado, el flujo en el *swash* se ve afectado por la presencia de los palitos. La figura 5.5b muestra la fase del *uprush*, observándose un flujo secundario por delante de cada palito, y de distinto carácter al flujo presente en una posición *cross-shore* adyacente. Consecuentemente, estos flujos secundarios o *salpicaduras* son registrados en la generación de *timestacks*, detectando una superficie libre mayor. Además, la fase del *backwash* presenta un comportamiento similar que no es registrado por el video pues el *splash* se produce en la cara trasera del palito (Fig. 5.5c, círculo negro discontinuo). Sin embargo, la estructura de sujeción utilizada en los sensores de presión (Fig. 5.5d) introduce un fenómeno similar, el cual se puede apreciar claramente en la figura 5.5c (círculo discontinuo rojo) y en las mayores alturas registradas por el sensor de presión durante la fase de *backwash* en los gráficos de series de tiempo. A partir del experimento realizado en Nha Trang, se establece que la disposición en sitio de los sensores de presión según fueron dispuestos

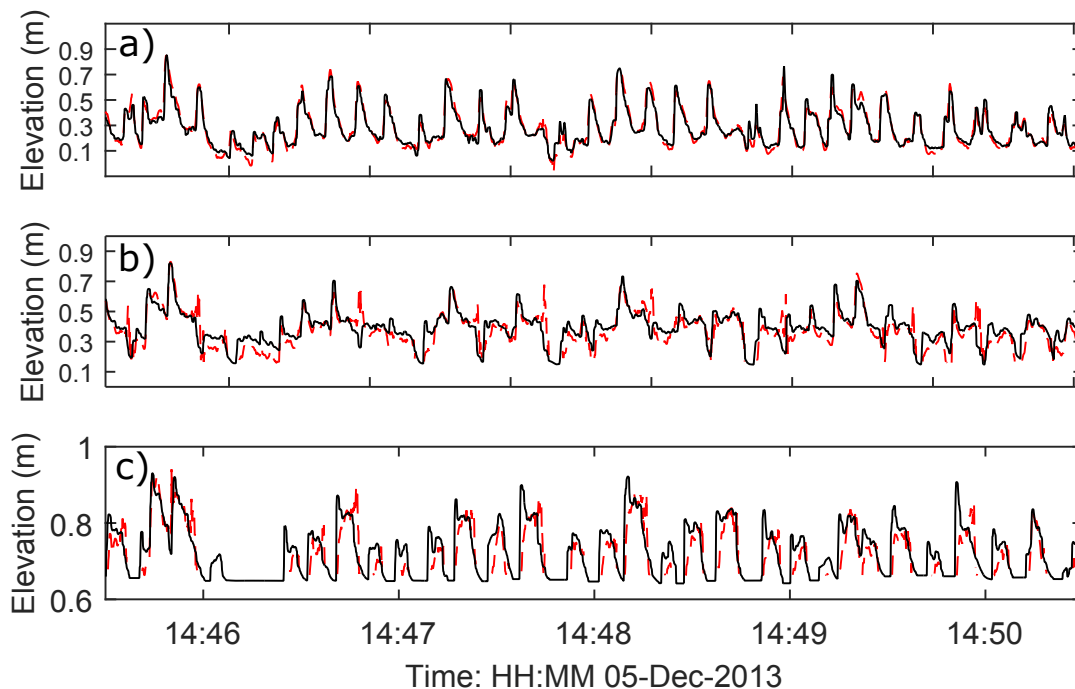


Figura 5.4: Detalle de cinco minutos de comparación entre ambos instrumentos en la zona de a) *surf* b) parte baja del *swash* y c) parte media del *swash*. Notar que las mediciones de sensor de presión en la figura (b) y (c) muestran solo parte de la superficie libre del *swash*, según se indicó en la sección 4.

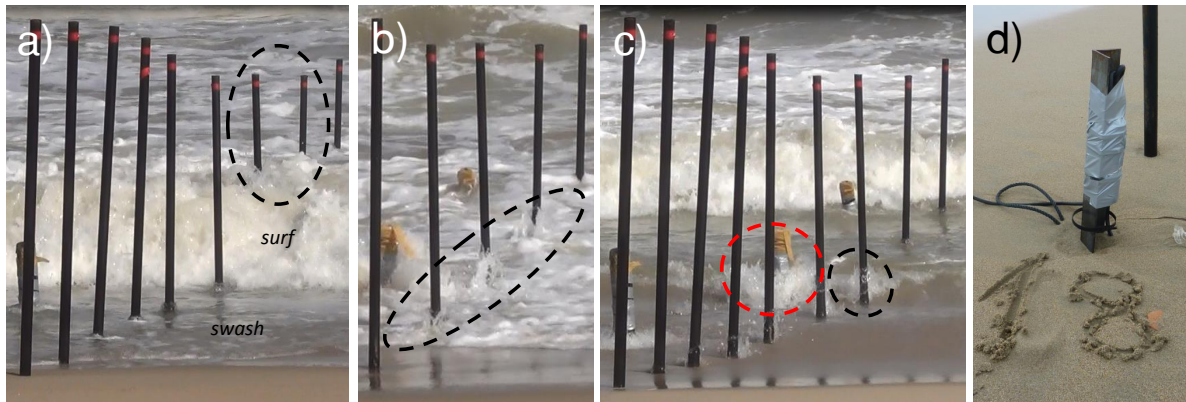


Figura 5.5: a) Influencia de los palitos sobre el *bore* incidente en el *surf*. b) Fase del *uprush*. Se puede observar que los *bores* son influenciados por la presencia de los palitos. c) Fase del *backwash*. Se observa un flujo secundario producido por la estructura que sujeta los sensores de presión (círculo rojo discontinuo). d) Estructura de sujeción de los sensores de presión.

en esta playa, no es recomendable, pues los flujos secundarios introducen discordancias respecto a la superficie libre efectivamente existente. En este sentido, se recomienda una disposición enterrada de estos sensores, tal que permita medir la superficie libre y el nivel del fondo, como se ha hecho en estudios anteriores (ver sección 1). Por otro lado, la presencia en sitio de palitos dilucida una primera fuente de error que será retomada al comparar con las mediciones de LIDAR.

5.3. Comparación con LIDAR

5.3.1. Análisis Estadístico

Como segundo enfoque, se presenta una comparación entre la técnica propuesta y LIDAR. A diferencia de la comparación con sensores de presión, esta sección presenta un análisis relativo a la superficie libre y al nivel de fondo. La figura 5.6 muestra series de tiempo de 30 minutos de comparación entre la técnica propuesta (línea negra continua) y LIDAR (línea roja discontinua) para las posiciones *seaward* y *landward*. A modo de primer contraste y previo a la comparación separada de nivel de fondo y agua, se obtienen diferencias *RMSE* iguales a 0.044 (m) y 0.023 (m) para las series de tiempo completas de las posiciones *seaward* y *landward*, respectivamente. Para entender estas discrepancias, la figura 5.7 presenta en detalle los primeros cinco minutos de series de tiempo. En la posición *seaward* (Fig. 5.7a) se observan diferencias en el frente de los eventos de *swash*, siendo estos de mayor magnitud según las mediciones hechas con video y menos suave que las mediciones de LIDAR. La profundidad del agua en la parte posterior de los eventos o fase del *backwash* presenta también una mayor altura en las series de tiempo registradas con video. Esto se atribuye preliminarmente a que el video detecta correctamente la superficie del *backwash* producto del cambio en intensidad óptica, a diferencia del LIDAR que se ve afectado debido al carácter menos turbulento de esta fase, en donde la penetración

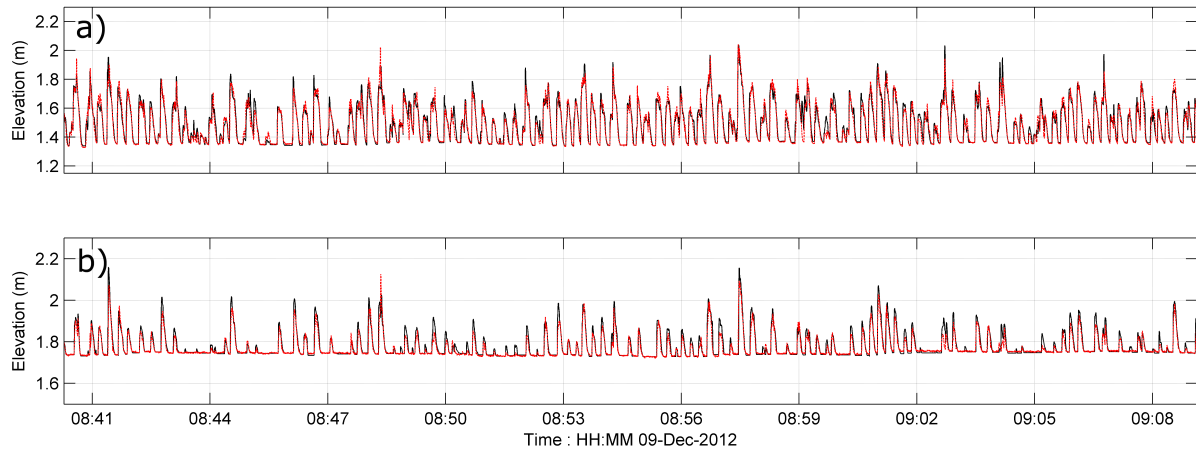


Figura 5.6: Series de tiempo de las mediciones hechas con video (línea negra continua) y LIDAR (línea roja discontinua) en las posiciones de palitos a) *seaward* b) *landward*. Ver nomenclatura utilizada en la sección 1, figura 3.4.

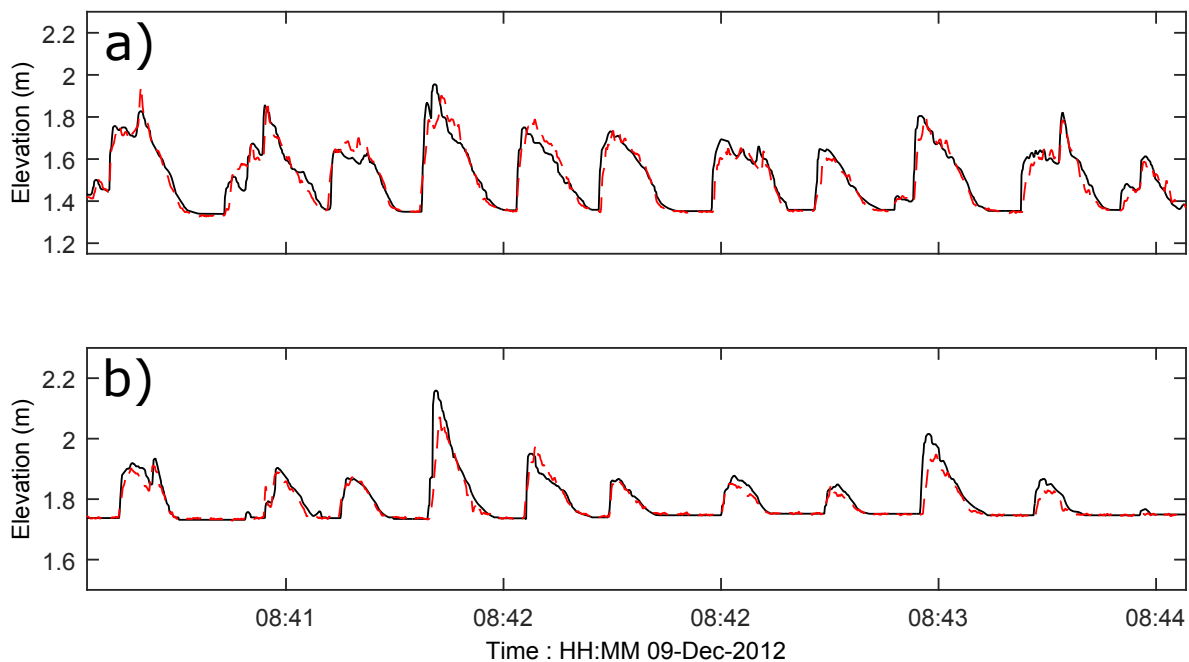


Figura 5.7: Detalle de la comparación entre video y LIDAR en las posiciones. a) *seaward* y b) *landward*.

del laser puede eventualmente ocurrir. Por otro lado, se observan las mismas diferencias en la posición *landward* (Fig. 5.7b), lo cual se atribuye a las mismas causas ya descritas. Se presentan gráficos de dispersión de la superficie libre, separando las fases de *uprush* y *backwash* (Fig. 5.8). No se dispone de mediciones de campos de velocidad, por lo que la separación de ambas fases fue hecha seleccionando los intervalos de altura creciente (*uprush*) y decreciente (*backwash*) de las series de tiempo de superficie

libre filtrada en la baja frecuencia (*low-pass filtered*), con una frecuencia de corte igual a 0.5 s^{-1} . Lo anterior se considera fidedigno para el análisis estadístico *grueso* aquí presentado, aunque en la realidad podría ocurrir que la inversión del flujo ocurra antes que el cambio de altura creciente a decreciente.

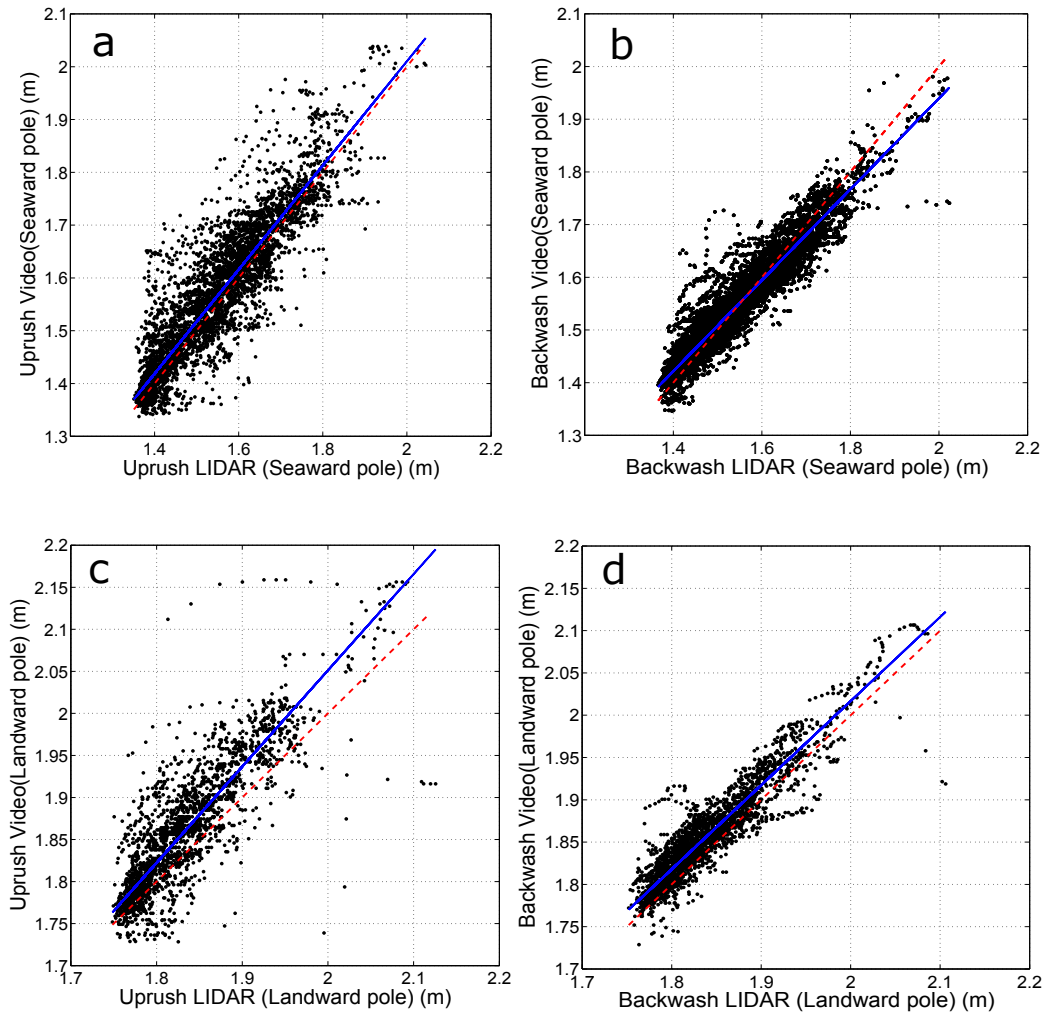


Figura 5.8: Gráficos de dispersión de la superficie libre según la fase-posición del *swash*. a) *Uprush-seaward* ($R^2 = 0.81$). b) *Backwash-seaward* ($R^2 = 0.89$). c) *Uprush landward* ($R^2 = 0.71$). d) *Backwash-landward* ($R^2 = 0.85$). Las líneas azul continúas representan la regresión obtenida y las líneas rojas discontinúas representan la recta de pendiente 1 : 1.

En la posición *seaward*, la fase del *uprush* derivada desde el LIDAR presenta una buena correlación ($R^2 = 0.81$) mientras que el *backwash* presenta una mejor correlación con coeficiente de determinación $R^2 = 0.89$. En la posición *landward*, el *uprush* presenta mayor dispersión ($R^2 = 0.71$) respecto a la fase del *backwash* ($R^2 = 0.85$). Adicionalmente, se presentan gráficos de dispersión de la posición del

nivel del fondo durante los intervalos de tiempo entre eventos de *swash* consecutivos (Fig. 5.9). Según lo señalado en la sección 4, la elevación del nivel de fondo entregada por el LIDAR se obtiene como el promedio de la serie de tiempo z dentro cada intervalo de fondo identificado. En contraste, el video entrega niveles de fondo constantes entre ciclos de *swash*. Las regresiones obtenidas entregan resultados desde bien correlacionados a moderados, con coeficientes de determinación iguales a $R^2 = 0.82$ y $R^2 = 0.69$ en las posiciones *seaward* y *landward*, respectivamente. Diferencias entre los niveles de fondo muestran concordancias satisfactorias, con diferencias de máximo 1.2 (cm) en ambas posiciones.

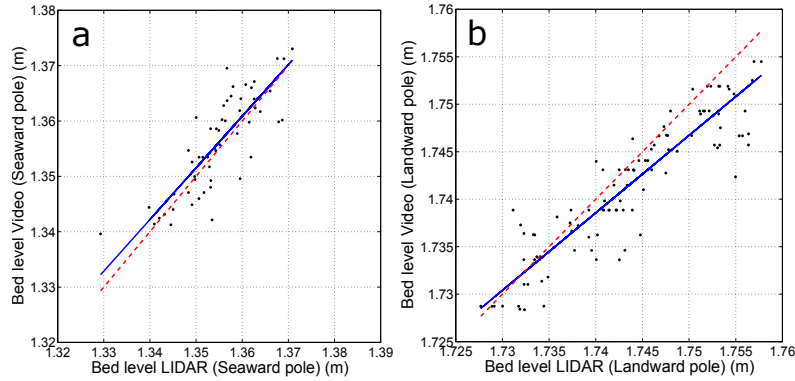


Figura 5.9: Gráficos de dispersión del nivel de fondo georeferenciado en las posiciones a) *seaward* ($R^2 = 0.82$) b) *Landward* ($R^2 = 0.69$). Las líneas azul continuas representan la regresión obtenida y las líneas rojas discontinuas representan la recta de pendiente 1 : 1.

5.3.2. Discusión de Resultados

La directa comparación entre la técnica de video y el LIDAR muestra resultados favorables. No obstante, los gráficos de dispersión de los niveles de fondo muestran diferencias del orden $O(\text{cm})$. Como análisis preliminar, se obtuvo una diferencia *RMSE* de las series de tiempo mayor en la posición *seaward*. Una causa de esta diferencia es probablemente la distancia de la cámara al palito y la correspondiente disminución en resolución, lo cual ocurre también para el LIDAR, el cual se ve afectado en su precisión horizontal y vertical al alejar el objetivo del escáner (Vousdoukas *et al.*, 2014). A continuación, se describen posibles fuentes de error adicionales junto a las ventajas y desventajas de la técnica propuesta respecto al LIDAR.

5.3.2.1. Desempeño del video para identificar y medir la superficie libre

Comparaciones entre profundidades de la superficie libre del *swash* entregan correlaciones moderadas a buenas. Mejores correlaciones fueron obtenidas en la fase del *backwash*; la posición *landward* (Fig. 5.8d) entrega una buena correlación con una regresión (línea azul continua) por sobre la recta de ajuste perfecto (línea roja discontinua). Estas diferencias son causadas probablemente por la penetración del laser en la superficie del agua debido a la menor presencia de burbujas respecto al *uprush*.

En la posición *seaward* (Fig. 5.8b) se observan diferencias similares entre la regresión y la recta de pendiente 1 : 1, para valores de profundidad absoluta bajo los 1.6 (m) aproximadamente, donde flujos de menor profundidad poseen menor presencia de aire debido a su mayor cercanía al límite del *run-up* máximo, favoreciendo la penetración del láser. Consecuentemente, se espera que la profundidad de la superficie libre sea obtenida mejor con video para la fase de *backwash*. Desafortunadamente no se puede concluir lo mismo a partir de las mediciones de Nha Trang, ya que como se explicó anteriormente, el *backwash* fue medido incorrectamente mediante sensores de presión.

Por otro lado, se observa menor concordancia en la fase del *uprush*, con la evidencia de mayor dispersión en los gráficos generados (Fig. 5.8a y c). La mayor causa de estas diferencias es posiblemente la intrusión del palito en el flujo de agua, similar a lo descrito anteriormente para Nha Trang. Inspección visual en sitio y de los videos *raw* evidenciaron que los palitos influyen notablemente en la hidrodinámica presente. A modo de ejemplo, las figuras 5.10a y b muestran el *surf* y *swash*. Similar a Vietnam, se observa que el paso del *surf* no introduce flujos secundarios. En contraste, el *uprush* se ve fuertemente afectado por los palitos. Como se mostró en la sección 4.2.3.2, el procesamiento de imágenes involucra el uso filtros que disminuyen el ruido producto de salpicaduras (Fig. 4.11b). Sin embargo, los palitos inducen flujos que en algunos casos no pueden ser filtrados y que por ende son detectados, sobreestimando la profundidad del *swash* (Fig. 5.10c, flecha azul). Finalmente, se observa que las salpicaduras en la fase del *backwash* son producidas por detrás del palito, favoreciendo la buena detección de la superficie del agua en esta fase (Fig. 5.10a y c, flecha morada).

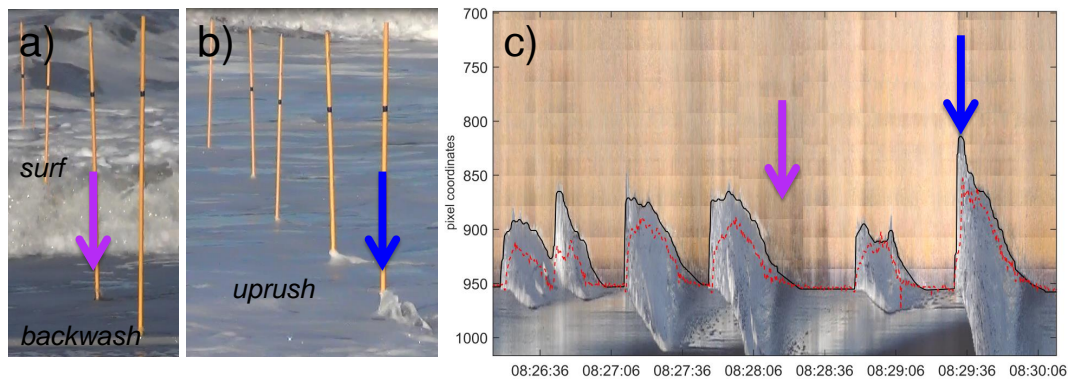


Figura 5.10: Influencia de los palitos sobre el *bore* incidente en el (a) *surf* y *backwash* b) *uprush*. c) *Timestack* sobre el cual se grafican la superficie detectada por video (línea negra continua) y el LIDAR (línea roja discontinua). Se puede observar (flecha azul) que los flujos secundarios en el *uprush* son detectados, sobrestimando la altura de la superficie libre en esta fase. Además, las salpicaduras producidas en el *backwash* (flecha morada) no son problema pues estas son producidas por detrás del palito y filtradas por los algoritmos utilizados.

5.3.2.2. Desempeño del video para identificar y medir los niveles de fondo

A pesar de la ventaja del video en la separación de las zonas secas y húmedas debido a la naturaleza sinóptica existente, es preciso indicar que el método de separación no es completamente robusto pues por un lado es semiautomatizado y por otro, la elección de las intensidades umbrales es susceptible a fallar producto de la alta dinamicidad presente en la zona de *swash*. La presencia de intervalos de nivel de fondos saturados, las variaciones en la intensidad de pixeles a lo largo de un evento de *swash* y la intermitencia o periodo de los eventos varían considerablemente según cada imagen y sitio de estudio. Una ventaja del video respecto a los errores en la detección es que las diferencias de señal óptica permiten el chequeo de la detección, la cual en el peor de los casos puede ser corregida manualmente. De hecho, la detección del *swash* en la playa Mataquito fue hecha mayoritariamente mediante la corrección manual del nivel de fondo, ya que para las condiciones presentes fue difícil semiautomatizar un método de detección preciso que identifique las variaciones existentes. Por ejemplo, la figura 5.11 muestra tres minutos de pixeles detectados (panel superior). En la parte inferior se observa en detalle el cuadro rojo del panel superior, en donde se observa que la transición del palito al nivel del fondo y del nivel del fondo a los eventos no presenta diferencias aprubtas fáciles de identificar producto de la saturación y la reflexión del sol. La mayoría de los datos extraídos de Mataquito fueron detectadas manualmente para el nivel de fondo, mientras que la superficie libre fue detectada siguiendo un enfoque similar al explicado en la sección 4.2.3.2, según el calculo de I_{thrW} . El chequeo y corrección de la detección podría generar cambios de $O(1 \text{ pixel})$, lo cual se traduce en cambios de orden de magnitud igual a la resolución del palito. Lo anterior puede ser de orden mayor o igual a los cambios del nivel del fondo ocurrentes en esta parte de la playa, según se explicará en las secciones siguientes.

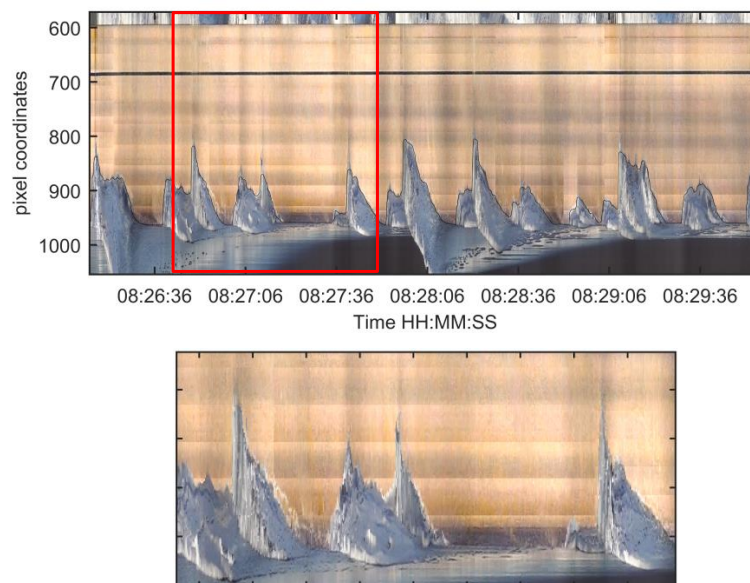


Figura 5.11: Ejemplo de detección en Mataquito y problema asociado a las condiciones en sitio.

No obstante, respecto a la capacidad del video para medir los niveles de fondo, comparaciones directas entre exposiciones de este muestran una concordancia aceptable en ambas posiciones. Notablemente, los niveles de fondo identificados a partir de video pueden ser definidos adecuadamente, ya que el procedimiento utilizado define niveles de fondo fijos y sin problemas de estabilidad ni de variaciones de señal, mientras que LIDAR presenta problemas al medir objetivos fijos; por ejemplo, *Blenkinsopp et al.* (2010) encontró variaciones de hasta ± 2.5 (*mm*). Resultados similares han sido reportados en el trabajo de *Vousdoukas et al.* (2014), existiendo desviaciones estándar de hasta 4.2 (*mm*) durante intervalos de exposición del fondo. Lo anterior puede ser un causante de las discrepancias presentes en los niveles de fondo medidos por LIDAR y video. De hecho, desviaciones estándar obtenidas desde LIDAR en este trabajo, reportan valores de hasta $\sigma = 4$ (*mm*) para intervalos individuales de nivel de fondo, en ambas posiciones *cross-shore*. A modo de ejemplo, y con el fin de demostrar la capacidad del video para definir niveles de exposición fijos, se ha calculado el error relativo entre niveles de exposición entre ambas técnicas, definido como $|\overline{z_{i,lidar}} - z_{i,video}|$, donde $\overline{z_{i,lidar}}$ es el promedio de la serie de tiempo de LIDAR en el nivel de exposición *i-ésimo* y $z_{i,video}$ el nivel de fondo entregado por el video en el intervalo *i* correspondiente. En la posición *landward*, 101 intervalos de exposiciones de nivel de fondo han sido identificado comúnmente entre ambas técnicas, de los cuales el 82 % de ellos poseen un error relativo menor a un valor de 5 (*mm*). Este valor umbral es considerado una diferencia razonable debido a los problemas de estabilidad del LIDAR y las variaciones de las series de tiempo que entrega éste durante niveles de exposición fijos. En la posición *seaward*, el 71 % de 56 intervalos de exposiciones del fondo se encuentran bajo la diferencia de 5 (*mm*).

Por otra parte, la dificultad del LIDAR al medir objetivos de agua cercanos al *run-up* se observa claramente en la figura 5.7 (hora 08:44). El laser penetra la columna de agua, mientras que el video reconoce el lente de agua de baja profundidad.

5.3.2.3. Variaciones longitudinales del nivel de fondo

Previamente se mostró que la elevación del nivel de fondo exhibe discrepancias entre ambas técnicas, existiendo diferencias del orden de $O(cm)$ entre LIDAR y video al contrastar la elevación del nivel de fondo en exposición. Una posible causa a estas discrepancias son las variaciones longitudinales del nivel del fondo.

Durante el experimento realizado, la distancia entre transectos medidos fue de 3 (*m*), lo cual no es ideal para los propósitos de validación de este trabajo. En este contexto, es posible la existencia de variaciones longitudinales del transporte de sedimentos. A modo de ejemplo, *Masselink et al.* (2009) demostraron que la presencia de una estructura de andamio (*scaffold rig*) no influía sustancialmente en los procesos del *swash*, exhibiendo series de tiempo de la hidro y morfodinámica en posiciones separadas longitudinalmente cada 2 (*m*). A partir de esta comparación (Fig.4 de este trabajo, panel inferior), se observan señales de sensores ultrasónicos *virtualmente idénticas*, con tendencias similares en la evolución del nivel de fondo pero con diferencias de $O(cm)$, similar a lo ocuriente en Mata-

quito. En el presente trabajo, se observan diferencias del nivel de fondo de hasta 1.2 (*cm*) con una separación entre transectos medidos de 3 (*m*) y una tendencia similar entre series de tiempo (ver Fig. 5.6). Además, observaciones en sitio durante el mismo experimento demostraron fuertes variaciones del perfil de playa en la dirección longitudinal, en donde migraciones de los patrones *beach-cusp* a razón de 1.5 (*m/h*) fueron reportadas para patrones rítmicos de $L \sim 30$ (*m*) (Cienfuegos et al., 2014). En la misma línea, Ibaceta et al. (2014) mostró diferencias sustanciales entre dos transectos de *swash*, en donde eventos de naturaleza erosiva o de acreción en un transecto no presentaban el mismo comportamiento en otro transecto sincronizado.

Si bien no es posible afirmar con claridad que las diferencias encontradas entre LIDAR y video son producto de la distancia entre transectos o de la incapacidad del método propuesto, se han nombrado casos en que la primera de estas causas es la razón principal de estas discrepancias, dejando la pregunta abierta ante este problema y apoyando la capacidad del video para identificar el nivel de fondo.

5.4. Comparación con sensores ultrasónicos

Finalmente se realiza una comparación entre el método propuesto y sensores ultrasónicos. El día de realización de este experimento fue adverso, debido a la alta presencia de neblina que entorpeció los registros de video. En consecuencia, el procesamiento de imágenes de los *timestacks* fue difícil, decidiéndose trabajar solamente con la detección del nivel de fondo. Por suerte, las ventajas y desventajas de la representación de la superficie libre mediante video fue ya estudiada a cabalidad en contraste con otros instrumentos convencionales. En esta sección se presenta la comparación del nivel de fondo de la posición de los palitos 1 y 3 (Refiérase a la figura 3.7).

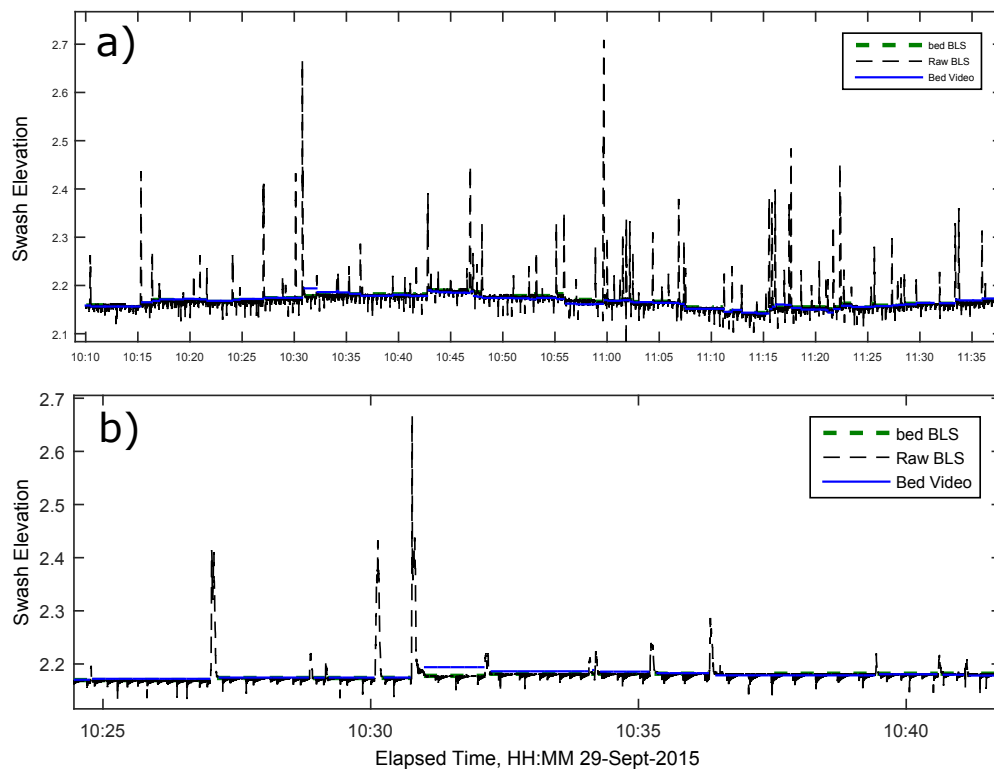


Figura 5.12: a) 90 minutos de series de tiempo medidas por el sensor ultrasónico (línea negra discontinua) en la posición del palito 1. b) Detalle de 15 minutos de mediciones. En ambas figuras se trazan los niveles de fondo para el sensor ultrasónico (verde) y video (azul).

En la figura 5.12a se muestran 90 minutos de series de tiempo de la superficie libre y nivel de fondo (línea negra discontinua) medidas por el sensor ultrasónico en la posición del palito 1. Adicionalmente se trazan las elevaciones del nivel de fondo en cada exposición, según el sensor ultrasónico (línea verde) y video (línea azul). Se observa una tendencia similar entre niveles de fondo obtenidos por ambas técnicas, con la presencia de períodos de erosión interrumpidos por ciclos de acreción. A pesar de la buena correlación entre ambas señales ($R^2 = 0.87$) y la baja diferencia RMS presente ($0.0041\ m$),

el estudio detallado de ambas series de tiempo presenta diferencias importantes al enfocarse en la alta frecuencia temporal ($T \sim$ evento de *swash*). Por ejemplo, la figura 5.14 muestra la distribución de los cambios del nivel de fondo (Δz) producidos por eventos de *swash* individuales, según ambas técnicas. Los valores de Δz fueron calculados como la diferencia entre el nivel el fondo medido después y antes de cada evento, siguiendo la definición de *Hughes and Moseley (2007)* y *Blenkinsopp et al. (2011)*, quienes definen un evento de *swash* como el intervalo entre ocurrencias consecutivas de nivel de fondo. Es importante destacar que los histogramas fueron generados utilizando la distinta resolución de ambas técnicas, siendo esta de 1 (*mm*) para los sensores ultrasónicos y la de los valores indicados en la tabla 4.1 para el video, para cada posición *cross-shore*. En el eje de las abscisas, sin embargo, son informados los valores de Δz correspondientes a la resolución del video.

Respecto a la figura 5.14a (palito 1), ambas distribuciones están centradas en el valor $\Delta z = 0 m$, pero el porcentaje de eventos asociados a partir del video es menor, distribuyendo los cambios de nivel de fondo hacia valores de Δz contiguos ($\Delta z = \pm 0.0015 m$) y que presentan bajo o nulo porcentaje según el sensor ultrasónico. Lo anterior se puede atribuir al procesamiento de datos del video (ver sección 5.5.1), en el cual la detección de la transición palito-fondo puede resultar en la selección de una unidad de pixel menor o mayor al correcto, significando una variación del nivel de fondo detectado en una unidad de resolución $\pm 0.0015 m$ (ver tabla 4.1, Palito 1). Adicionalmente, la distribución del video presenta un evento de mayor magnitud ($\Delta z = 0.018 m$) no registrado por el sensor ultrasónico (Fig. 5.12b, 10:31 hrs). Conclusiones similares se desprenden a partir de la posición del palito 3. La figura 5.13a muestra 60 minutos de señales similares a las definidas en la posición 1. La comparación es comprometedora desde el punto de vista estadístico ($R^2 = 0.91$ y diferencia *RMS* de $0.010 m$). No obstante, la figura 5.13b muestra períodos de tiempo en que ambas series de tiempo son interrumpidas por diferencias mayores en los niveles de exposición del fondo, a pesar de tener una tendencia similar (ej.: ciclo de erosión-acreción entre las 10:40 y 10:45 horas).

Respecto a la alta frecuencia temporal, se observan resultados similares a la posición del palito 1. Refiriéndose a la figura 5.14b, ambas distribuciones están centradas en el valor de Δz nulo, sin embargo se observa una redistribución hacia cambios del nivel de fondo de un pixel ($\Delta z = \pm 0.0019 (m)$). Notablemente, los valores correspondientes a dos veces la resolución de video ($\Delta z = \pm 0.0038 (m)$) se asemejan al porcentaje calculado a partir de los sensores ultrasónicos.

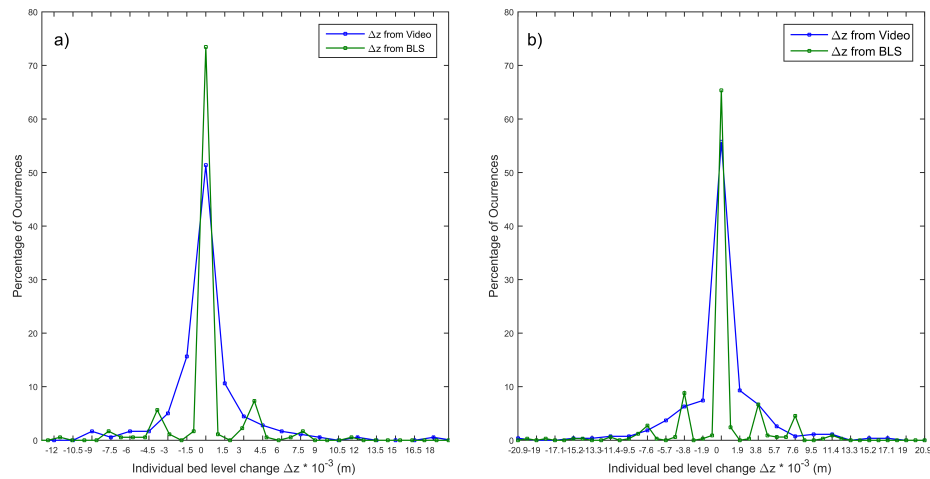


Figura 5.14: Distribución de los cambios de nivel de fondo, Δz , producidos por eventos de swash individuales en las posiciones de palitos a) 1 y b) 3. En verde se presentan las distribuciones a partir de sensores ultrasónicos y en azul según el video.

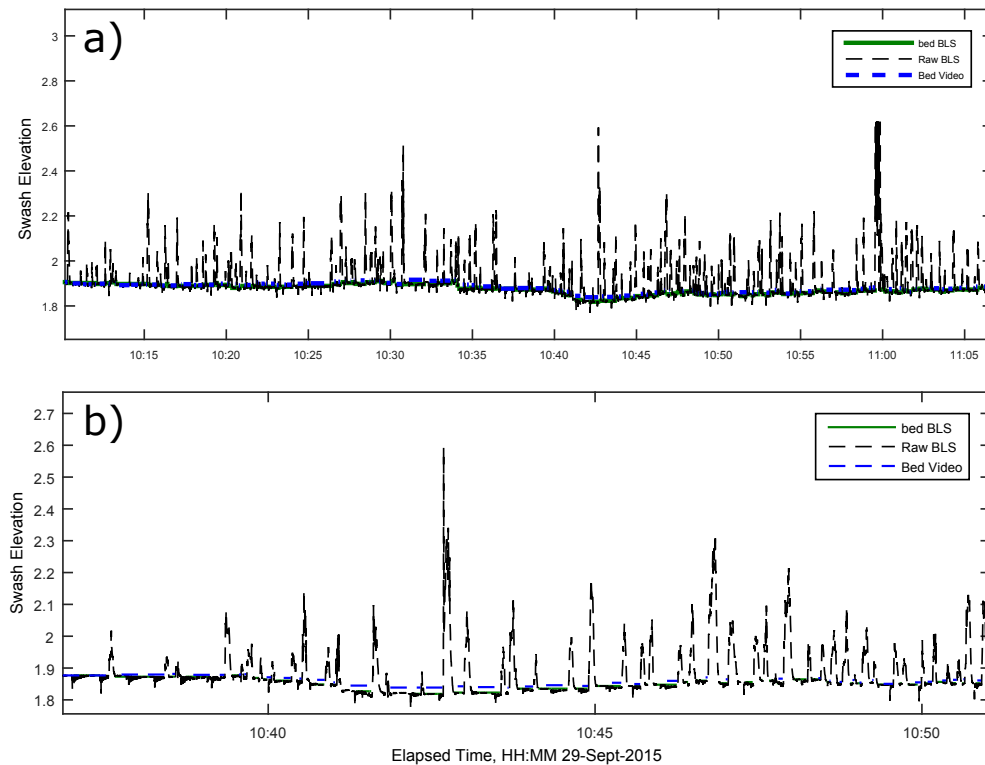


Figura 5.13: a) 60 minutos de series de tiempo medidas por el sensor ultrasónico (línea negra continua) en la posición del palito 3. b) Detalle de 15 minutos de mediciones. En ambas figuras se trazan los niveles de fondo para el sensor ultrasónico (verde) y video (azul).

A modo de comprender a cabalidad las variaciones ola a ola, se trazaron gráficos que muestran la evolución del nivel del fondo según el número de olas (eventos de *swash*) acumulados en el tiempo.

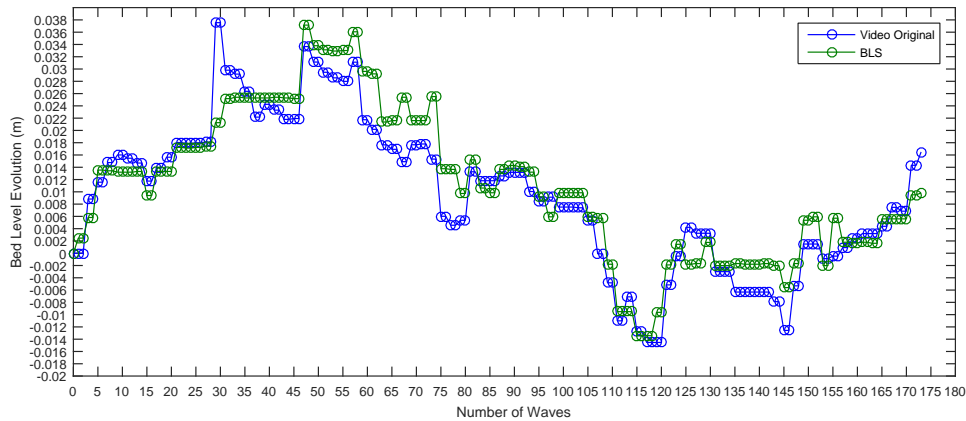


Figura 5.15: Evolución del nivel del fondo acumulado según el número de olas (eventos) ocurrientes en la posición del palito 1 para video (azul) y sensor ultrasónico (verde).

La figura 5.15 muestra la evolución del nivel del fondo para los 90 minutos de series de tiempo, en donde 176 olas han sido identificadas. Se observa que ambas representaciones siguen una tendencia similar. Sin embargo, se exhiben drásticas diferencias respecto al carácter erosivo o de acreción de una ola individual o un grupo de estas. Por ejemplo, entre las olas número 30 y 45 se exhibe que el sensor ultrasónico registra una pequeña a nula variación del nivel de fondo, a diferencia del video que manifiesta un alto ciclo de acreción, seguido por ciclos de erosión. Comportamientos similares se observan en las olas posteriores.

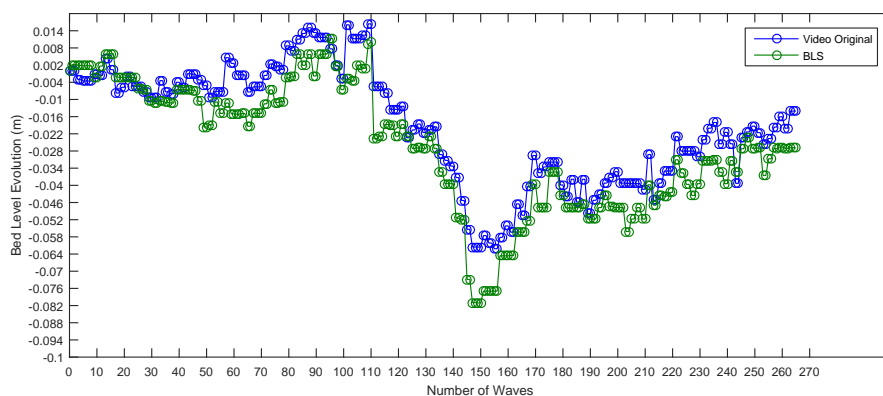


Figura 5.16: Evolución del nivel del fondo acumulado según el número de olas (eventos) ocurrientes en la posición del palito 3 para video (azul) y sensor ultrasónico (verde).

Resultados similares se observan en la posición del palito 3 (Fig. 5.16), habiendo ciclos de olas que

producen cambios de nivel de fondo pequeños o nulos según un instrumento, y cambios erosivos o de acreción de mayor magnitud según los registros de la otra técnica. A pesar de esto, la tendencia de ambas señales es similar respecto a una escala temporal que va desde un grupo de olas hasta escalas de $O(\text{min})$ y $O(\text{h})$.

5.4.1. Análisis respecto a la transformación pixel-unidades geoferenciadas

Según lo descrito en la sección 4.2.3.4, la disposición vertical de los palitos es tal que los ejes a lo largo de cada uno de ellos pertenecen a planos imaginarios paralelos al sensor interno de la cámara. En principio, esto permitiría no corregir los registros de video por la inclinación de la cámara respecto al objetivo, pues los errores asociados serían despreciables, apoyándose además de la baja distancia entre la cámara y los palitos. Para comprobar lo anterior, se dispusieron tableros de ajedrez en el borde superior de los palitos 1 y 3, a modo de tener puntos de control de posición conocida que definen la orientación del plano de cada palito. La figura 5.17a muestra un *frame* de un video registrado durante

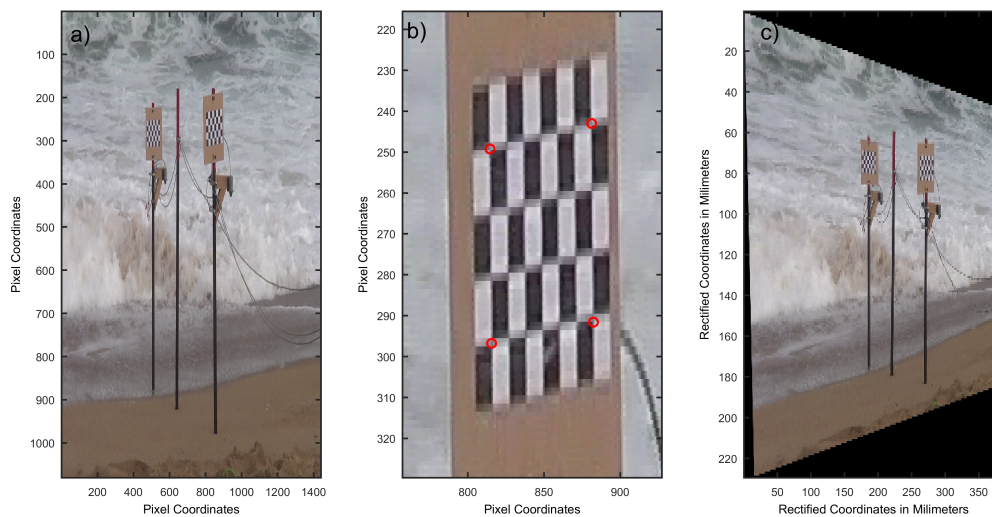


Figura 5.17: Proceso de rectificación. a) Frame Original. b) Puntos de control del palito 1 usados para proyectar la imagen original. c) Frame rectificado sobre el cual se traza una *stackline* a lo largo del palito.

la campaña de Reñaca. Refiriéndose al palito 1, la figura 5.17b muestra cuatro puntos de control de distancia conocida entre ellos, los cuales son usados para definir una transformación geométrica proyectiva (*rectificación*) (Fig. 5.17c).

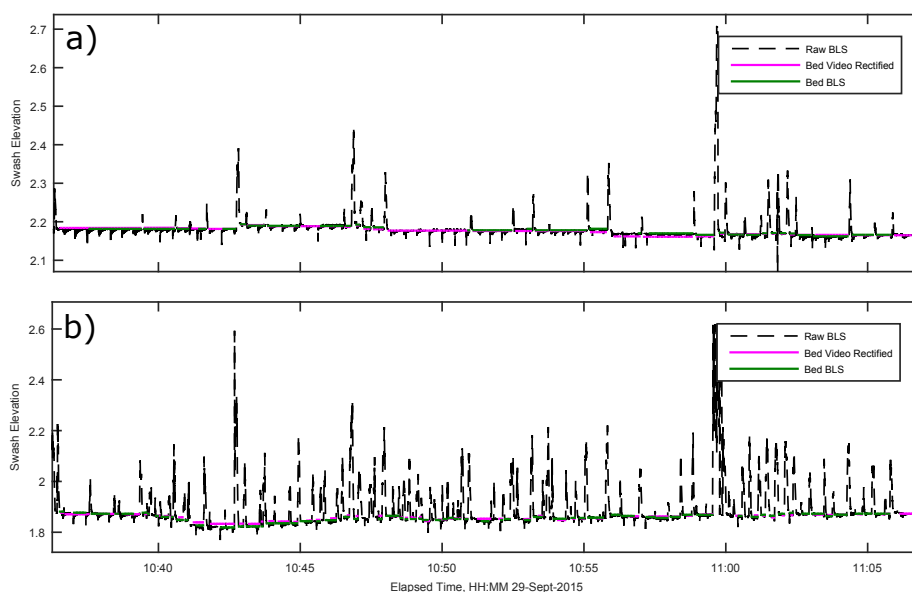


Figura 5.18: Series de tiempo de 30 minutos de elevación del *swash* en las posiciones del a) palito 1. b) palito 3. Las líneas negras discontinuas corresponden a las mediciones *raw* de sensores ultrasónicos. En verde y magenta se trazan los niveles de fondo según el sensor ultrasónico y el video rectificado, respectivamente.

Una vez definida la transformación, se generaron *timestacks* para un período de 30 minutos, correspondientes a la duración en que no se observaron variaciones significativas del borde superior del palito respecto al registro de video (ver sección 5.5.3). Consecuentemente, se rectificó cada *frame* y se generaron *timestacks* a lo largo del eje del palito. Notar que el proceso de rectificación es distinto para cada posición, pues los puntos de control utilizados en cada palito son diferentes. Posteriormente se detectaron los niveles de fondo, obteniéndose las series de tiempo de la figura 5.18. En esta figura se evidencian resultados similares al video sin rectificación, existiendo diferencias notorias entre los niveles de exposición del nivel de fondo a pesar de tener tendencias similares. Adicionalmente, se realiza un análisis de la evolución del fondo en la escala ola a ola.

La figura 5.19 muestra la evolución del fondo ola a ola de media hora de series de tiempo. Se observa que las curvas correspondientes al video rectificado presentan las mismas deficiencias del video original, aún cuando su tendencia es similar a la de curva generada a partir de sensores ultrasónicos. A pesar de estas diferencias, existe una mejora sustancial con respecto al cambio neto total para el caso de video rectificado y las mediciones con sensor ultrasónico del palito 3 (Fig. 5.19b). No obstante, esto se atribuye más bien a una coincidencia pues los valores de nivel de fondo durante la media hora presentan diferencias mayores en la alta frecuencia temporal. Se puede concluir a priori que la disposición vertical de los palitos y las bajas distancias entre ellos y la cámara, permiten la representación del *swash* a través de la georeferenciación basada en referencias de dimensión conocida de los enfoques (i) y (ii), descritos en las secciones anteriores. No obstante, esto no significa que la alta frecuencia temporal sea

bien representada con este método, pues los problemas para reproducir estas variaciones se asocian más bien al procesamiento de imágenes y a las bajas resoluciones de orden de magnitud igual o mayor que las variaciones de $O(mm)$ que ocurren comúnmente en la zona de *swash*.

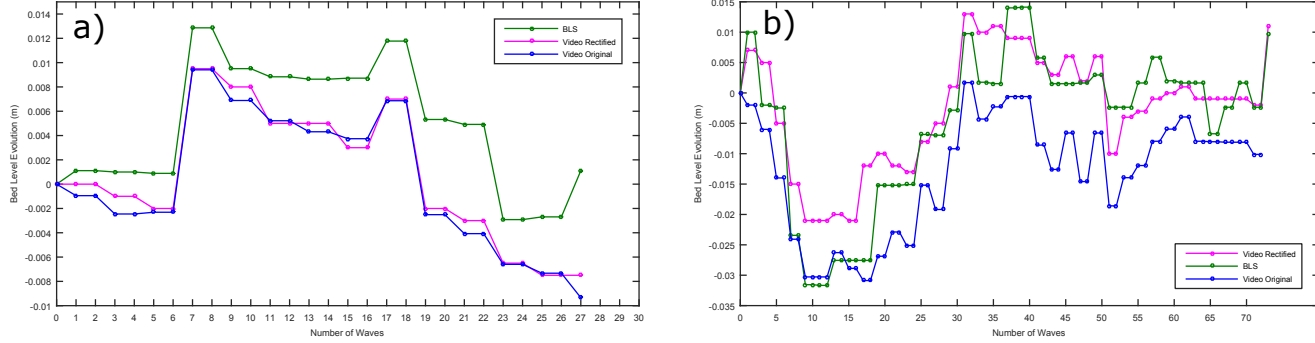


Figura 5.19: Evolución del nivel del fondo acumulado según el número de olas (eventos) ocurrientes en la posición del palito a) 1 y b) 3.

5.4.2. Importancia de la cuantificación precisa del *swash* en la alta frecuencia temporal

Hasta ahora se ha evidenciado que el video es capaz de medir las variaciones del nivel del fondo, mostrando tendencias similares a los instrumentos convencionales y en escalas de tiempo de grupos de ola o incluso mayores (refiérase a las figuras 5.6, 5.12a y 5.12c). No obstante, discrepancias se han encontrado al enfocarse en la evolución ola a ola. Lo anterior es una importante limitancia del método propuesto pues la correcta cuantificación de estos ciclos ha sido caracterizada últimamente como sustancial para entender las variaciones morfológicas de la costa, evidenciándose que una cantidad pequeña de eventos de *swash* son responsables de los cambios netos totales durante ciclos mareales completos (Masselink *et al.*, 2009; Blenkinsopp *et al.*, 2011; Puleo *et al.*, 2014). Por otro lado, el uso de mediciones de Δz en varias posiciones han sido utilizados por diversos autores (e.g. Baldock *et al.*, 2006b; Brocchini and Baldock, 2008; Turner *et al.*, 2009) para estimar el volumen del flujo de sedimentos *cross-shore* (q_{vi}) por delante del sensor i ésimo durante ciclos de *swash* individuales, mediante la siguiente expresión:

$$q_{vi} = \frac{\Delta x}{2} (\Delta z_i + 2\Delta z_{i+1} + \dots + 2\Delta z_{n-1} + \Delta z_n) \quad (5.1)$$

y el correspondiente flujo de masa por evento de *swash* es:

$$Q_i = (1 - p)\rho_s q_{vi} \quad (5.2)$$

donde Δx es el espaciamiento entre sensores, $\rho_s = 2650 \text{ kg m}^{-3}$ es la densidad del sedimento, $p = 0.35$ es la porosidad del sedimento y n denota la posición de la posición medida inmediatamente atrás (en dirección *off-shore*) del *run-up* máximo.

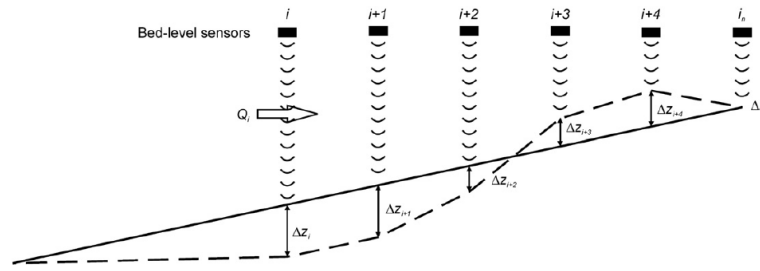


Fig. 5. Definition sketch for the calculations of net cross-shore sediment flux using Eq. (1). The solid line represents the initial bed condition and the dotted line marks the modified position of the bed after a single bed inundation event. Sensor i_i is the first sensor landward of the maximum uprush limit.

Figura 5.20: Imágen de referencia para calcular el flujo de volumen de sedimentos. Figura tomada desde el trabajo de *Blenkinsopp et al.* (2011).

En este sentido, cálculos confiables del flujo volumétrico (q_{vi}) o másico (Q_i) de sedimentos deben ser calculados a partir de (i) transectos compuestos de un alto número de sensores (es decir, valores pequeños de Δx) tal que el run-up máximo se encuentre siempre dentro del dominio de medición y (ii) cuantificaciones confiables de Δz con precisión del orden milimétrico. Ambas condiciones recién descritas introducen un desafío al estimar el transporte de sedimentos mediante video, pues por un lado, un alto número de palitos introduciría bajas resoluciones en los palitos más alejados de la cámara, lo cual conlleva la obtención de valores de Δz no confiables según lo explicado en la sección anterior. Consecuentemente, el cálculo de q_{vi} no sería adecuado.

5.5. Fuentes de Error Adicionales

5.5.1. Identificación del nivel de fondo

En secciones anteriores se demostró que los cambios de nivel de fondo (Δz) en la alta frecuencia temporal no son medidos con precisión a partir del video. Una de las causas es la resolución ($m/pixel$) asumida, que puede ser del mismo orden de magnitud de los valores de Δz que efectivamente se desean obtener. Además, el video posee la desventaja de no definir el cambio abrupto palito-arena a través de un solo pixel, existiendo una transición que suele ocurrir en magnitudes desde uno hasta tres pixeles. Por ejemplo, en la sección 4.2.3.2 se ha descrito que el nivel de fondo se obtiene a partir del máximo gradiente de intensidad promediada en un lapso de tiempo. A modo de contrastar este procedimiento con otro similar, se desarrolló un algoritmo que ajusta una función del tipo sigmoideal a cada serie de intensidades de pixel promediada. La ecuación ajustada es similar a una función logística del tipo $\overline{I(x)} = \frac{\overline{I_\infty}}{1+e^{-\alpha(x-x_\alpha)}}$, donde $\overline{I(x)}$ es la intensidad de pixeles promediada a lo largo de un intervalo de exposición de fondo, $\overline{I_\infty}$ es el valor al cual tiende $\overline{I(x)}$ cuando $x \rightarrow \infty$, α es la constante de decaimiento y x_α es la coordenada x que define el punto de inflexión y simetría de la función sigmoide. A partir de cada nivel de fondo encontrado según el gradiente máximo, se genera una serie de tiempo que es ajustada mediante la función logística. La figura 5.21a muestra un *timestack* y la respectiva detección

del nivel de fondo usando el procedimiento original (línea roja continua) y según el ajuste sigmoideal de cada intervalo de exposición (línea verde continua). A modo de ejemplo, la figura 5.21b muestra el ajuste (línea magenta continua) de la serie de intensidad de pixeles (línea negra continua) del intervalo de exposición que va desde $t = 0$ a $t = 19$ segundos. En este caso en particular, el nivel de fondo encontrado según el máximo gradiente (círculo rojo) resulta igual al definido por el punto de inflexión del ajuste (x_α , asterisco verde). Sin embargo, la observación detallada de los niveles de fondo encontrados en periodos mayores reportan diferencias entre ambos procedimientos. Por ejemplo, el *timestack* de la figura 5.21a presenta 22 intervalos de nivel de fondo, de los cuales solo 7 entregan el mismo nivel según ambos enfoques de detección. Trece intervalos entregan diferencias de ± 1 pixel y dos intervalos difieren en 3 pixeles. A partir de estas diferencias, surgen variaciones en los valores de Δz , lo cual restringe la habilidad del video para obtener los cambios de nivel de fondo con confianza.

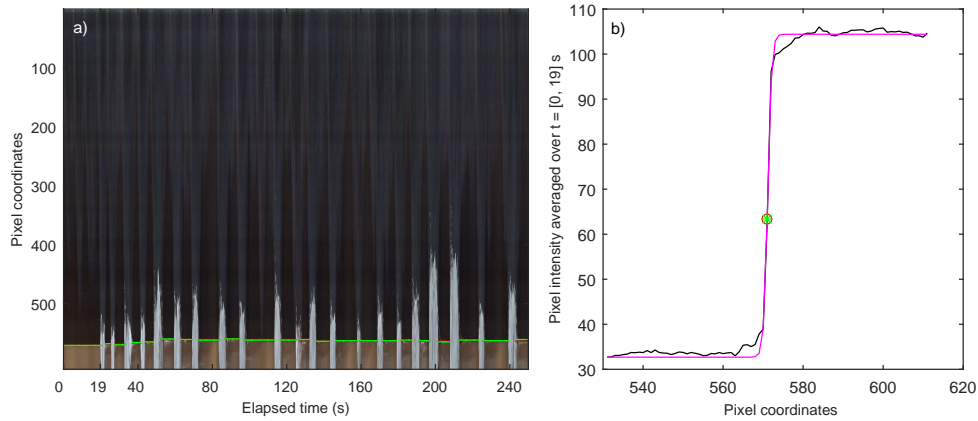


Figura 5.21: Detección del nivel de fondo usando dos enfoques. a) *timestack* y el nivel de fondo detectado según el máximo gradiente de la intensidad promediada (línea roja continua) y según el ajuste sigmoideal de la intensidad promediada (línea verde continua). b) Ejemplo de la detección del nivel de fondo entre $t=0$ y 19 segundos. En negro se observa la intensidad de pixeles y en magenta el ajuste sigmoideal de esta serie. El círculo rojo representa el máximo gradiente y el asterisco verde la posición que define el punto de inflexión de la sigmoide ajustada.

5.5.2. Influencia del palito en el nivel de fondo contiguo

Un posible problema a considerar en el uso de la técnica propuesta es la influencia del palito en el área contigua a él, la cual es propensa a sufrir el fenómeno de *socavación*. Observaciones de los videos *raw* registrados no alcanzan a evidenciar este problema debido a la resolución de las imágenes. Sin embargo, se disponen imágenes de la base de los palitos al final de los experimentos realizados en Reñaca y Nha Trang, de donde se puede contrastar lo enunciado en la primera parte de este párrafo. La figura 5.22 muestra cuatro situaciones en donde se observa socavación alrededor de la base de los palitos. Para cada subfigura, se muestra un detalle de la socavación y la correspondiente *piscina* (línea roja discontinua). La figura 5.22a muestra variaciones pequeñas alrededor de un palito situado en una

zona no saturada, las cuales pueden ser del orden de $O(mm)$ en profundidad. El mismo fenómeno se puede apreciar claramente en las subfiguras siguientes (Fig. 5.22b: Reñaca, Fig. 5.22c y d: Nha Trang) debido a que el palito se encuentra en una zona saturada, facilitando la formación de una *piscina* alrededor del palito. Estudios previos referentes a este tema han reportado socavación en condiciones diversas. Por ejemplo, *Arnaud et al.* (2013) midieron el efecto de la socavación en las zonas de *surf* y *swash*, encontrando valores de socavación de hasta 30 (cm). Sin embargo, este trabajo consideró barras mas gruesas de 5 (cm) de diámetro. En estricto rigor, el efecto de socavación dependerá de las condiciones hidrodinámicas presentes, del diámetro de palitos y del sedimento presente, por lo que a priori es difícil establecer conclusiones sobre cuando podría ocurrir este fenómeno.

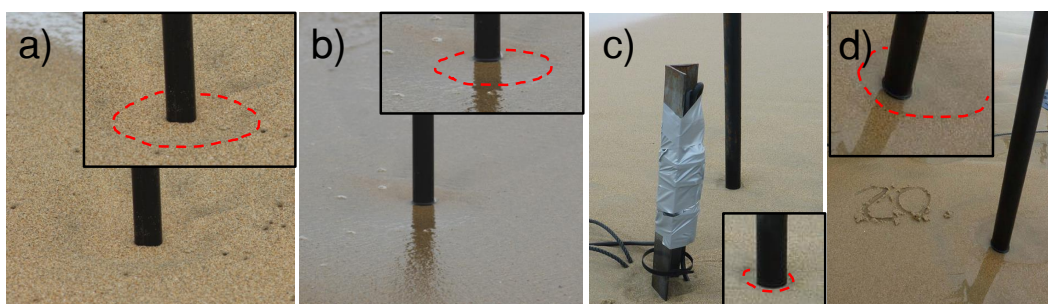


Figura 5.22: Socavación alrededor de la base de los palitos en a) Reñaca, zona no saturada. b) Reñaca, zona saturada. c) Nha Trang, zona no saturada. d) Nha Trang, zona saturada. En cuadros negros se ve el detalle del fenómeno y en línea continua roja, el borde de la *piscina* creada alrededor del palito.

5.5.3. Movimientos del palito y/o cámara

Una fuente de error a considerar es la vulnerabilidad de los palitos ante variaciones del borde superior. Parte del procesamiento de datos incluye la georeferenciación de las mediciones respecto al borde superior o *top* medido al comienzo de las mediciones. En este sentido, se debe procurar que la posición del borde al comienzo de las mediciones no sufra variaciones. Lo anterior se puede solucionar mediante la detección del borde superior en píxeles sobre cada *timestack*. Además, rotaciones leves del palito no debiesen causar grandes errores ya que son proporcionales en la vertical al coseno de un ángulo pequeño.

Sin embargo, existen casos en que los palitos pueden ser removidos o rotados considerablemente desde su posición original, en parte por las altas condiciones hidrodinámicas incidentes y/o por la poca profundidad de hincamiento de estos. En base a la experiencia adquirida en las 4 playas donde se ha aplicado el método, se recomienda hincar los palitos a por lo menos un metro de profundidad. En caso contrario, la vulnerabilidad ante vibraciones o grandes movimientos ha evidenciado ser muy alta.

Por otro lado, se deben utilizar accesorios físicos de sujeción de la cámara que no introduzcan movimientos de esta. Específicamente, se recomienda utilizar un trípode que asegure la estaticidad

completa de la cámara durante los períodos de medición. Se ha observado que parte del mecanismo de un tripode convencional tiende a rotar, pues la observación detallada de *timestacks* sincronizados correspondientes a 3 palitos (Fig. 5.23) evidencian movimientos de patrón similar en el borde superior. Lo anterior es posible solo ante movimientos de la cámara y requiere de estricto cuidado, ya que variaciones significativas respecto al borde superior inicial se traducen en variaciones de $O(cm)$ para los palitos más alejados de la cámara. En conclusión, se recomienda descartar mediciones que presenten movimientos o vibraciones bruscas de los palitos y/o cámara.



Figura 5.23: Parte superior de cada palito en el experimento de Reñaca, en las posiciones. a) palito 1. b) palito 2. c) palito 3. Se puede observar que los bordes superiores siguen la misma tendencia.

5.6. Resumen

Se ha presentado la validación del método video-palito en contraste con tres instrumentos convencionales. En principio, se han obtenido comparaciones estadísticas comprometedoras, con buenas correlaciones y diferencias *RMSE* de magnitudes que van desde el orden $O(mm)$ a ordenes mayores de centímetros. Gran parte de estas diferencias es atribuida a la superficie libre, debido a la influencia de los palitos en flujo libre del *swash*. En base a lo anterior, observaciones en sitio indican que los palitos impactan considerablemente al flujo, produciéndose la sobrestimación de la superficie libre en los frentes del *bore* o *uprush*. Notablemente, se evidencia que el mecanismo de detección empleado es capaz de detectar satisfactoriamente la fase del *backwash*, a diferencia de lo que ocurre con el instrumento convencional utilizado (LIDAR).

Por otro lado, la comparación directa de los niveles de exposición del fondo presentan una estadística satisfactoria. A pesar de presentarse diferencias del orden de $O(cm)$ en niveles de exposición del fondo, las series de tiempo comparadas siguen tendencias similares al observarlas en una escala

de tiempo mayor a la del objetivo de este trabajo. En contraste, al centrarse en la alta frecuencia temporal, se observan diferencias drásticas respecto al carácter erosivo o de acreción de los eventos de *swash* individuales, lo cual es una gran limitancia del método propuesto ya que son precisamente los fenómenos físicos a esta escala temporal los que se encuentran menos comprendidos. Si bien se han descrito las posibles fuentes de error causantes de estas discrepancias, se establece como razón principal a la combinación de las bajas resoluciones presentes versus los órdenes de magnitud que se desean medir, siendo estos últimos en la mayoría de los casos, menores a la graduación entregada por el video.

CONCLUSIONES

El presente trabajo tuvo como objetivo el diseño y validación de un nuevo método de medición de la superficie libre y nivel de fondo de la zona de *swash*, basado en los registros de video de un transecto *cross-shore* de barras circulares (*palitos*) dispuestos verticalmente. En primer lugar, se generaron algoritmos de procesamiento de imágenes para extraer series de tiempo desde videos registrados en experimentos anteriores. Adicionalmente se generaron algoritmos de procesamiento de datos para obtener elevaciones desde instrumentos convencionales (sensores ultrasónicos, LIDAR y sensores de presión), los cuales fueron instalados en terreno para contrastar con la técnica propuesta. Además, se diseñó y llevó a cabo un nuevo experimento, en el cual se aplicó la técnica tomando consideraciones relativas al procesamiento de imágenes *rectificación* no aplicadas en los experimentos previos.

A partir de las series de tiempo extraídas, se formularon las ventajas y limitancias del método, basándose en la información de indicadores estadísticos y en las características de los instrumentos convencionales. Se concluyó que el método propuesto es capaz de representar las series de tiempo del *swash* siguiendo tendencias similares a las entregadas por otros instrumentos, en escalas de tiempo desde grupos de olas a horas. Además, los indicadores estadísticos proporcionaron resultados prometedores, con la presencia de bajos errores cuadráticos medios y correlaciones desde moderadas a buenas entre mediciones de *swash* obtenidas a partir de video y algún otro instrumento. No obstante, el método presenta deficiencias al representar la alta frecuencia temporal, en un enfoque ola a ola. Entre las razones de la incapacidad del método para reproducir adecuadamente la alta frecuencia temporal del *swash*, se establece que la principal causa recae en el proceso de imágenes, que en conjunto con las bajas resoluciones presentes, introducen errores de magnitud iguales o mayores a las variaciones de $O(mm)$ ocurrientes usualmente en el nivel del fondo del *swash*. Desde el punto de vista de la hidrodinámica, la superficie libre es afectada por la presencia en sitio de los palitos, produciéndose la sobrestimación de la profundidad del agua en la fase del *uprush*. Afortunadamente, la fase del *backwash* de un evento individual no se ve afectada por la presencia del palito, posibilitando una cuantificación confiable de la profundidad del agua en esta fase.

A pesar de las limitancias del método, este posee la ventaja de ser simple de instalar y de bajo costo, aunque necesita mayor procesamiento que los instrumentos convencionales. En este contexto, se recomienda aplicar el método en dominios espaciales acotados, según la cantidad de palitos dispuestos y la distancia de estos a la cámara, tal que la resolución de las mediciones sea adecuada para las

variaciones físicas que se desean cuantificar.

REFERENCIAS

Aagaard, T., and J. Holm (1989), Digitization of wave run-up using video records, *Journal of Coastal Research*, 5(3)(547–551.).

Agredano, R., R. Cienfuegos, P. Catalan, and E. Mignot (2015), Descripción de la evolución mensual de la playa reñaca y el impacto de las marejadas de agosto 2015, in *XXII Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica*.

Almar, R., N. Bonneton, P. Bonneton, J. Lefebvre, V. Dinh, T. Nguyen, L. T.B, and N. V.D. (2014a), Swash hydro-morphodynamics at the low-tide terrace beach during post-typhoon recovery period, nha trang bay, vietnam, in *19th IAHR-APD 2014 Congress. 21-24 September 2014*.

Almar, R., Y. Du Penhoat, N. Honkonnou, B. Castelle, R. Laibi, E. Anthony, S. N., G. Degbe, R. Chuchla, Z. Sohou, and M. Dorel (2014b), The grand popo beach 2013 experiment, benin, west africa: from short timescale processes to their integrated impact over long-term coastal evolution, *Journal of Coastal Research*.

Almeida, L., G. Masselink, P. Russell, and M. Davidson (2015), Observations of gravel beach dynamics during high energy wave conditions using a laser scanner, *Geomorphology*, 228(0), 15 – 27, doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.08.019>.

Arnaud, G., S. Abadie, and D. Morichon (2013), Observation of over-scouring effect in the surf and swash zones, in *7th International Conference on Coastal Dynamics, Arcachon-France*.

Austin, M., and D. Buscombe (2008), Morphological change and sediment dynamics of the beach step on a macrotidal gravel beach, *Marine Geology*, 249, 167–183.

Austin, M., and G. Masselink (2006), Observations of morphological change and sediment transport on a steep gravel beach, *Marine Geology*, 229, 59–77.

Baldock, T. (2009), Discussion of measurement of wave-by-wave bed-levels in the swash zone by ian l. turner, paul e. russell, tony butt [coastal eng. 55 (2008) 1237-1242], *Coastal Engineering*, 56(3), 380 – 381, doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2008.12.002>.

Baldock, T., B. M., and M. Hughes (2006a), Field observations of instantaneous cross-shore free surface profiles and flow depths in the swash zone, in *Coastal Dynamics 2005*.

- Baldock, T., B. M.P., and M. Hughes (2006b), Field observations of instantaneous cross-shore free surface profiles and flow depths in the swash zone., in *In: Sanchez- Archilla, A. (Ed.), CD-ROM. ASCE, Reston.*
- Bayram, A., and M. Larson (2000), Wave transformation in the nearshore zone: comparison between a boussinesq model and field data, *Coastal Engineering*, 39(2â€“4), 149 – 171, doi:http://dx.doi.org/10.1016/S0378-3839(99)00056-3.
- Blenkinsopp, C., and J. Chaplin (2007), Void fraction measurements in breaking waves, *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 463(2088), 3151–3170, doi:10.1098/rspa.2007.1901.
- Blenkinsopp, C., M. Mole, I. Turner, and W. Peirson (2010), Measurements of the time-varying free-surface profile across the swash zone obtained using an industrial {LIDAR}, *Coastal Engineering*, 57(11â€“12), 1059 – 1065, doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2010.07.001.
- Blenkinsopp, C., I. Turner, G. Masselink, and P. Russell (2011), Swash zone sediment fluxes: Field observations, *Coastal Engineering*, 58(1), 28 – 44, doi:10.1016/j.coastaleng.2010.08.002.
- Brocchini, M., and T. E. Baldock (2008), Recent advances in modeling swash zone dynamics: influence of surf-swash interaction on nearshore hydrodynamics and morphodynamics, *Reviews of Geophysics*, 46, RG3003, doi:10.1029/2006RG000215.
- Catalan, P. A., M. C. Haller, R. A. Holman, and W. J. Plant (2011), Optical and microwave detection of wave breaking in the surf zone, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(6), 1879–1893.
- Chardon-Maldonado, P., J. C. Pintado-Patiño, and J. A. Puleo (2015), Advances in swash-zone research: Small-scale hydrodynamic and sediment transport processes, *Coastal Engineering*, pp.–, doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2015.10.008.
- Cienfuegos, R., M. Villagran, J.-C. Aguilera, P. Catalán, B. Castelle, and R. Almar (2014), Video monitoring and field measurements of a rapidly evolving coastal system: the river mouth and sand spit of the mataquito river in chile., *Journal of Coastal Research*., SI 70(ISSN 0749-0208), 639–644.
- Ciriano, Y., G. Coco, K. R. Bryan, and S. Elgar (2005), Field observations of swash zone infragravity motions and beach cusp evolution, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 110(C2), n/a–n/a, doi:10.1029/2004JC002485, c02018.
- Cox, D., and S. Shin (2003), Laboratory measurements of void fraction and turbulence in the bore region of surf zone waves, . *Journal of Engineering Mechanics*, 129(10).
- DuMouchel, W. H., and F. L. O'Brien. (1989), Integrating a robust option into a multiple regression computing environment., in *Computer Science and Statistics: Proceedings of the 21st Symposium on the Interface. Alexandria, VA: American Statistical Association.*

- Ebersole, B., and S. Hughes (1987), Duck85 photopole experiment. technical report cerc-87-18, *U.S. Army Waterways Experiment Station - Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, MS*.
- Ebersole, B., and S. Hughes (1988), Superduck photopole experiment. draft technical report,, *U.S. Army Waterways Experiment Station, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, MS*.
- Elfrink, B., and T. Baldock (2002), Hydrodynamics and sediment transport in the swash zone: a review and perspectives, *Coastal Engineering*, 45(3&ac82;4), 149 – 167, doi:http://dx.doi.org/10.1016/S0378-3839(02)00032-7, surface and Swash Zone Mechanics.
- Gourlay, M. (1968), Beach and dune erosion tests, in *Report No. M935/M936, Delft Hydraulics Laboratory, Delft, The Netherlands*.
- Holland, K. T., and R. A. Holman (1997), Video estimation of foreshore topography using trinocular stereo, *Journal of Coastal Research*, 13(1), 81–87.
- Holland, K. T., and J. A. Puleo (2001), Variable swash motions associated with foreshore profile change, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 106(C3), 4613–4623.
- Holland, K. T., B. Raubenheimer, R. T. Guza, and R. A. Holman (1995), Runup kinematics on a natural beach, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 100(C3), 4985–4993, doi:10.1029/94JC02664.
- Holman, R., and M. C. Haller (2013), Remote sensing of the nearshore, *Annual Review of Marine Science*, 5(1), 95–113, doi:10.1146/annurev-marine-121211-172408, pMID: 22809186.
- Holman, R., and J. Stanley (2007), The history and technical capabilities of Argus, *Coastal Engineering*, 54, 477–491, doi:10.1016/j.coastaleng.2007.01.003.
- Hughes, M. (1992), Application of a nonlinear shallow-water theory to swash following bore collapse on a sandy beach, *Journal of Coastal Research*, 8 (3)(562–578).
- Hughes, M., and A. Moseley (2007), Hydrokinematic regions within the swash zone., *Continental Shelf Research*, 27 (15)(2000–2013).
- Hughes, M. G., G. Masselink, and R. W. Brander (1997), Flow velocity and sediment transport in the swash zone of a steep beach @articleJGRC:JGRC6215, Title = Runup kinematics on a natural beach, Author = Holland, K. T. and Raubenheimer, B. and Guza, R. T. and Holman, R. A., Journal = Journal of Geophysical Research: Oceans, Year = 1995, Number = C3, Pages = 4985–4993, Volume = 100, Doi = 10.1029/94JC02664, ISSN = 2156-2202, Keywords = Surface waves and tides, Instruments and techniques, Url = http://dx.doi.org/10.1029/94JC02664 , *Marine Geology*, 138(1&ac82;2), 91 – 103, doi:http://dx.doi.org/10.1016/S0025-3227(97)00014-5.
- Hughes, M. G., T. Aagaard, T. E. Baldock, and H. E. (2014), Spectral signatures for swash on reflective, intermediate and dissipative beaches, *Marine Geology*, 355(0), 88 – 97, doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.margeo.2014.05.015.

- Ibaceta, R., R. Almar, J. Lefebvre, T. Senoo, W. Layrea, and 2014 (2014), High frequency monitoring of swash hydromorphodynamics on a reflective beach (grand popo, benin), in *International Conference on Coastal Engineering, Seoul, Corea*.
- Jensen, S. G., T. Aagaard, T. E. Baldock, A. Kroon, and M. Hughes (2009), Berm formation and dynamics on a gently sloping beach; the effect of water level and swash overtopping, *Earth Surface Processes and Landforms*, *34*(11), 1533–1546, doi:10.1002/esp.1845.
- Kulkarni, C., F. Levoy, O. Monfort, and M. J. (2004), Morphological variations of a mixed sediment beachface (teignmouth, uk)., *Continental Shelf Research*, *24*(1203-1218).
- Lanckriet, T., J. Puleo, and N. Waite (2013), A conductivity concentration profiler for sheet flow sediment transport, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, *38*(1), 55–70, doi:10.1109/JOE.2012.2222791.
- Lanckriet, T., J. Puleo, G. Masselink, I. Turner, D. Conley, B. C., and R. P. (2014), A comprehensive field study of swash-zone processes, part 2: Sheet flow sediment concentrations during quasi-steady backwash, *Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering*, *140*(1), 29–42, doi:http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000209.
- Larson, M., S. Kubota, and L. Erikson (2004), Swash-zone sediment transport and foreshore evolution: field experiments and mathematical modeling, *Marine Geology*, *212*(1𠇄), 61 – 79, doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.margeo.2004.08.004.
- Martins, K., C. E. Blenkinsopp, and J. Zang (2015), Monitoring individual wave characteristics in the inner surf with a 2-dimensional laser scanner (lidar), *Journal of Sensors, Article ID 7965431*.
- Masselink, G., and M. Hughes (1998), Field investigation of sediment transport in the swash zone, *Continental Shelf Research*, *18*(10), 1179 – 1199, doi:http://dx.doi.org/10.1016/S0278-4343(98)00027-2.
- Masselink, G., and J. Puleo (2006), Swash-zone morphodynamics, *Continental Shelf Research*, *26*(661-680).
- Masselink, G., and P. Russell (2006), Flow velocities, sediment transport and morphological change in the swash zone of two contrasting beaches, *Marine Geology*, *227*(3𠇄), 227 – 240, doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.margeo.2005.11.005.
- Masselink, G., and A. Short (1993.), The effect of tide range on beach morphodynamics and morphology: a conceptual beach model, *Journal of Coastal Research*, *9* (3)(785–800).
- Masselink, G., P. Russell, I. Turner, and C. Blenkinsopp (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*(1𠇂), 18 – 35, doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.margeo.2009.09.003.
- Miziguchi, M. (1984), Swash on a natural beach, in *Proceedings of the 19th Coastal Engineering Conference*, pp. 678–694.

- Power, H. E., R. A. Holman, and T. E. Baldock (2011), Swash zone boundary conditions derived from optical remote sensing of swash zone flow patterns, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *116*(C6), n/a–n/a, doi:10.1029/2010JC006724, c06007.
- Puleo, J., T. Lanckriet, and C. Blenkinsopp (2014), Bed level fluctuations in the inner surf and swash zone of a dissipative beach, *Marine Geology*, *349*, 99 – 112, doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.margeo.2014.01.006.
- Puleo, J. A., and T. Butt (2006), The first international workshop on swash-zone processes, *Continental Shelf Research*, *26*(5), 556 – 560, doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2006.01.008, swash-Zone Processes 1st International Workshop on Swash-Zone Processes.
- Puleo, J. A., and A. Torres-Freyermuth (2015), The second international workshop on swash-zone processes, *Coastal Engineering*, pp.–, doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2015.09.007.
- Raubenheimer, B., R. T. Guza, S. Elgar, and N. Kobayashi (1995), Swash on a gently sloping beach, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *100*(C5), 8751–8760, doi:10.1029/95JC00232.
- Sallenger Jr., A., and B. Richmond (1984), High-frequency sediment-level oscillations in the swash zone, *60*(1-4), 155–164–.
- Shen, M. C., and R. E. Meyer (1963), Climb of a bore on a beach part 3. run-up, *Journal of Fluid Mechanics*, *16*, 113–125, doi:10.1017/S0022112063000628.
- Svendsen, I. A. (1984), Mass flux and undertow in the surf zone, *Coastal Engineering*, *8*, 347–365, doi:10.1016/0378-3839(84)90030-9.
- Turner, I. L., P. E. Russell, and T. Butt (2008), Measurement of wave-by-wave bed-levels in the swash zone, *Coastal Engineering*, *55*(12), 1237 – 1242, doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2008.09.009.
- Turner, I. L., P. E. Russell, T. Butt, C. E. Blenkinsopp, and G. Masselink (2009), In-situ estimates of net sediment flux per swash: Reply to discussion by t.e. baldock of measurement of wave-by-wave bed-levels in the swash zone., *Coastal Engineering*, *56*(9), 1009 – 1012, doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2009.06.001.
- van der Zanden, J., J. M. Alsina, I. Cáceres, R. H. Buijsrogge, and J. S. Ribberink (2015), Bed level motions and sheet flow processes in the swash zone: Observations with a new conductivity-based concentration measuring technique (ccm+), *Coastal Engineering*, *105*, 47 – 65, doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2015.08.009.
- Van Wellen, E., T. Baldock, A. Chadwick, and D. Simmonds (2000), Longshore sediment transport in the swash zone, in *Proceedings of the 27th International Conference on Coastal Engineering*, edited by ASCE, pp. 3139–3150.

Villagran, M., R. Cienfuegos, G. J. Almar, R., P. Catalán, C. Camaño, and J. Dominguez (2011), Natural post tsunami recovery of mataquito river mouth after 2010 chilean tsunami. procc., in *AGU Fall Meeting Conference (San Francisco, USA)*.

Vousdoukas, M., T. Kirupakaramoorthy, H. Oumeraci, M. de la Torre, F. WÅ¼bbold, B. Wagner, and S. Schimmels (2014), The role of combined laser scanning and video techniques in monitoring wave-by-wave swash zone processes, *Coastal Engineering*, 83, 150 – 165, doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2013.10.013>.

Weir, F. M., M. G. Hughes, and T. E. Baldock (2006), Beach face and berm morphodynamics fronting a coastal lagoon, *Geomorphology*, 82(3â€“4), 331 – 346, doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.05.015>.