

Estudio experimental del transporte de cantidad de movimiento bajo la influencia de viento

Lira-Loarca, Andrea^a; Addona, Fabio^b; Clavero, María^c; Longo, Sandro^d; Baquerizo, Asunción^e; Losada, Miguel Ángel^f

^aGrupo de Dinámica de Flujos Ambientales (GDFA), Instituto Interuniversitario de Investigación del Sistema Tierra en Andalucía, Universidad de Granada, Granada, España; aliraloarca@ugr.es, ^bDipartimento di Ingegneria e Architettura (DIA), Università di Parma, Italia; fabio.addona@studenti.unipr.it, ^cGrupo de Dinámica de Flujos Ambientales (GDFA), Instituto Interuniversitario de Investigación del Sistema Tierra en Andalucía, Universidad de Granada, Granada, España; mclavero@ugr.es, ^dDipartimento di Ingegneria e Architettura (DIA), Università di Parma, Italia; sandro.longo@unipr.it, ^eGrupo de Dinámica de Flujos Ambientales (GDFA), Instituto Interuniversitario de Investigación del Sistema Tierra en Andalucía, Universidad de Granada, Granada, España; abaqueri@ugr.es, ^fGrupo de Dinámica de Flujos Ambientales (GDFA), Instituto Interuniversitario de Investigación del Sistema Tierra en Andalucía, Universidad de Granada, Granada, España; mlosada@ugr.es

Resumen

En este trabajo se presentan los resultados preliminares de una serie de ensayos realizados en el Canal de Interacción Atmósfera-Océano (CIAO) del Instituto Interuniversitario de Investigación del Sistema Tierra en Andalucía. Se realizaron ensayos para analizar la influencia del viento en el transporte de cantidad de movimiento y en las componentes del tensor de Reynolds bajo una combinación de oleaje generado mediante palas y oleaje generado por viento. Se pone en evidencia las inconsistencias respecto a orden de magnitud y signo de la componente turbulenta en estudios previos y se estudia el coeficiente de reflexión y la fase como parámetros fundamentales en la caracterización del estudio y la necesidad de profundizar en éstos en trabajos futuros.

Palabras clave: cantidad de movimiento, oleaje por viento, tensor de Reynolds, interacción oleaje-viento

1. Introducción

En las últimas décadas se ha ampliado el interés por el conocimiento de los procesos de intercambio entre la atmósfera y el océano a diferentes escalas. La capa límite atmosférica marina (ABL) y la capa límite oceánica (OBL) están repletas de procesos de flujo de pequeña y gran escala. Fenómenos como la formación de spray, burbujas, turbulencia, vórtices y ondas superficiales e internas influyen en gran medida en el transporte vertical de cantidad de movimiento, calor, vapor de agua, etc. Numerosos estudios se han enfocado en el análisis del transporte de cantidad de movimiento ya que es de gran interés para la comprensión de diversos fenómenos hidrodinámicos como la rotura del oleaje, las corrientes, la sobre elevación al paso de una borrasca (*storm surge*), etc. y tiene aplicaciones inmediatas en ingeniería como por ejemplo en el desarrollo de modelos para la predicción del oleaje.

La metodología general del estudio de flujos con una componente turbulenta se basa en la descomposición de las variables en el valor medio, la componente periódica y las fluctuaciones, $u = \bar{u} + \tilde{u} + u'$ y $w = \bar{w} + \tilde{w} + w'$ para la velocidad horizontal y vertical respectivamente. Las soluciones lineales y no-lineales de oleaje regular sobre fondo horizontal indican que existe un desfase de $\pi/2$ entre las velocidades horizontal \tilde{u} y vertical \tilde{w} del movimiento oscilatorio y, por tanto, no existe un término equivalente al tensor de Reynolds asociado al movimiento periódico ($\overline{\tilde{u}\tilde{w}} = 0$). Sin embargo, numerosos estudios experimentales y de campo han comprobado que $\overline{\tilde{u}\tilde{w}} \neq 0$ aunque sin llegar a un consenso respecto a su origen y orden de magnitud (Olfateh et al., 2017).

En condiciones de viento, esto implica que la componente turbulenta del tensor no es el único mecanismo que transfiere cantidad de movimiento del aire al agua. De hecho, en los fenómenos de generación de oleaje y de sobre elevación por viento existe un mecanismo asociado a la componente periódica que es proporcional a $\overline{\tilde{u}\tilde{w}} < 0$ gracias al cual el transporte de cantidad de movimiento y de energía debido al viento se transfiere a la columna de agua (Nielsen et al., 2011). En la literatura se encuentran distintas teorías sobre la razón por la cual el viento proporciona una distribución de presión no uniforme sobre la superficie libre, aunque ninguno proporciona una explicación simple de por qué esto genera un desfase distinto entre \tilde{u} y \tilde{w} .

Olfateh et al. 2017 realizan estudios experimentales y apuntan a la reflexión y la circulación secundaria como posibles fuentes de las inconsistencias encontradas en el orden de magnitud del transporte de cantidad de movimiento. Desde el año 2011 se llevan a cabo estudios sobre el intercambio de la cantidad de movimiento entre atmósfera y océano en el Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales en colaboración con la Universidad de Parma. Los ensayos se realizan en un túnel de viento abierto, de baja velocidad, de 3 metros de longitud y sección de ensayo de 43x36 cm. En su interior se introduce un tanque con agua, de forma que la lámina libre del tanque es forzada por el viento generado en el túnel y se estudia la estructura y evolución de las capas límites atmosférica y oceánica. (Longo, 2012; Longo et al., 2012a, 2012b; Longo y Losada 2012). Siguiendo estas líneas de trabajo se plantean una serie de ensayos para el análisis del transporte de cantidad de movimiento teniendo en cuenta la reflexión y la fase de la onda reflejada, parámetro no tenido en cuenta en estudios anteriores.

2. Metodología

2.1 Canal de Interacción Atmósfera-Océano

Para la realización de este trabajo se han planteado ensayos con oleaje regular e irregular generado mediante palas y oleaje generado por viento en el Canal de Interacción Atmósfera-Océano (CIAO) del Instituto Interuniversitario de Investigación del Sistema Tierra en Andalucía (Figura 1). El canal está dedicado al estudio de la interacción entre las capas límite atmosférica y oceánica y los dispositivos que se encuentren en esta interface (Nieto et al., 2015). Es una instalación única a nivel nacional y puntera a nivel internacional con tres componentes principales:

- Un sistema de generación de oleaje (canal de oleaje), de anchura 1 m, profundidad de agua de diseño 0.70 m, y longitud 15 m con posibilidad de generación de olas de 1 a 5 segundos de periodo y hasta 25 cm de altura.
- Un sistema de generación de viento (túnel de viento) de circuito cerrado de 24 m de longitud y capacidad de generar vientos de hasta 12 m/s por lo que es posible la generación de oleaje con una longitud efectiva de fetch de aproximadamente 1 m.
- Un sistema de generación de corrientes doble (para generar corrientes a doble altura) con velocidad máxima de



0.75 m/s.

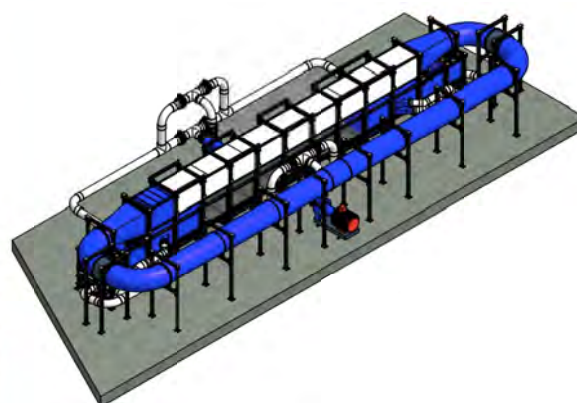


Fig. 1. Vista e infografía 3D del Canal de Interacción Atmósfera-Océano

Tanto el sistema de oleaje como de corrientes son reversibles, de tal manera que pueden simularse todos los fenómenos en direcciones de propagación iguales u opuestas. Este aspecto es fundamental para este estudio, ya que, al tener dos palas de generación controladas mediante software en los extremos opuestos del canal es posible controlar la reflexión

de oleaje generado y obtener completa absorción o reflexión parcial de las ondas. En este estudio se plantearon ensayos con oleaje regular e irregular generado mediante palas y oleaje generado por viento.

2.2 Instrumentación

En la Figura 2 se puede observar el dispositivo experimental utilizado para la realización de este trabajo. Para las medidas de nivel se utilizaron sensores acústicos en distintos puntos a lo largo de la longitud del canal. Las medidas del campo de velocidad en la columna de agua se realizaron mediante Anemometría Laser Doppler 2D en una sección del canal donde el oleaje se puede considerar como completamente desarrollado (Sensor 4). En este mismo punto se tomaron medidas de la velocidad de viento en la columna de aire utilizando un tubo Pitot para las distintas velocidades

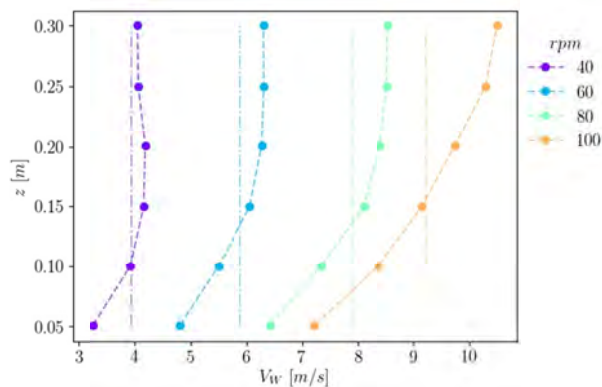


angulares del motor utilizado en los ensayos.

Fig. 2. Dispositivo experimental

3. Resultados

En este trabajo se presenta un serie de resultados preliminares de ensayos realizados en el CIAO bajo condiciones de oleaje regular e irregular generado mediante palas y su combinación con oleaje generado por viento. En primer lugar era necesaria la caracterización del perfil de viento en el sección de medida del velocidades para el correcto análisis de la influencia del viento en el transporte de cantidad de movimiento y la energía aportada por este. En la Figura 3 se presenta el perfil de velocidad de viento obtenido para distintas velocidades angulares del túnel de viento y distintas altura de la columna de aire. El sistema de generación de viento trabaja hasta 100 rpm lo cual se traduce a una velocidad media de aproximadamente 9.3 m/s y en superficie alcanza una velocidad aproximada de 7 m/s. Se observa el perfil logarítmico de la velocidad de viento y el efecto de la fricción con la superficie libre en la capa límite lo que supone una



reducción de la velocidad.

Fig. 3. Perfil de velocidad de viento

En primer lugar se realizaron ensayos con oleaje generado solamente por viento sin generación por palas. En la Figura 4 se presentan los espectros de superficie libre en distintos puntos del canal. Se observa que los periodos picos del oleaje generado por viento oscilan entre ≈ 0.15 a 0.4 s para la velocidad de viento más alta utilizada en los ensayos. Como era esperar se obtiene un aumento en la energía y en el periodo con velocidades de viento mayores y conforme

aumenta la longitud de fetch y el oleaje se considera desarrollado (Figura 5). Respecto a la altura de ola se obtienen valores 1-5 cm en la zona de del perfil de velocidades. Asimismo se realizaron ensayos con una combinación de oleaje generado mediante sistema de palas y oleaje generado por viento. Es importante destacar el sistema de generación de oleaje presente en el CIAO ya que al disponer de palas tipo pistón en ambos extremos del canal y un sistema de reflexión activa, es posible generar oleaje con una completa absorción o con distintos porcentajes de reflexión controlado mediante software. En la Figura 6 se presentan los espectros de superficie libre en los ensayos de oleaje regular con características $H=6$ cm y $T_p=1.6$ s en combinación con oleaje generado por viento en la misma dirección. Se observa que el pico principal de energía corresponde al oleaje regular caracterizado por ser de banda estrecha mientras que el oleaje por viento corresponde a un espectro de banda ancha con valores de energía del orden de cien veces menor.

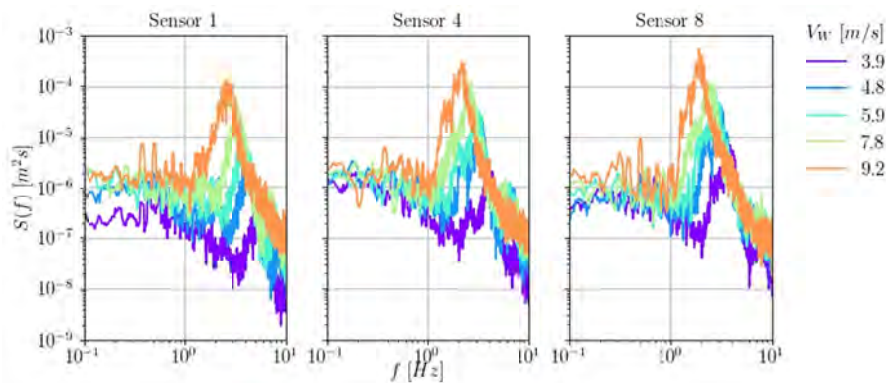


Fig. 4. Espectros de superficie libre en distintos puntos del canal durante los ensayos de oleaje generado por viento

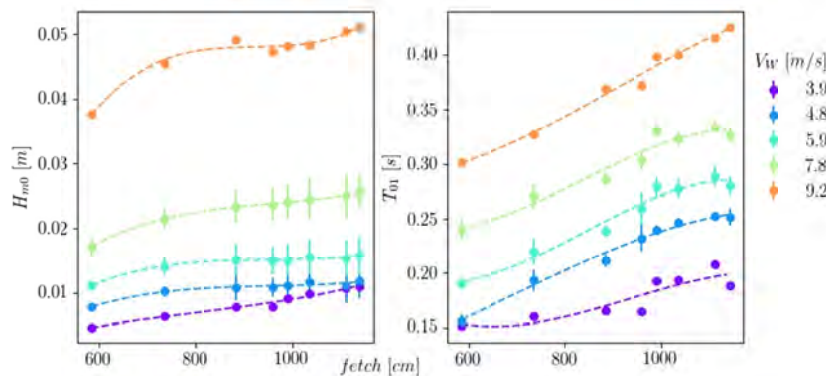


Fig. 5. Estadísticos del oleaje obtenidos en ensayos de oleaje generado por viento

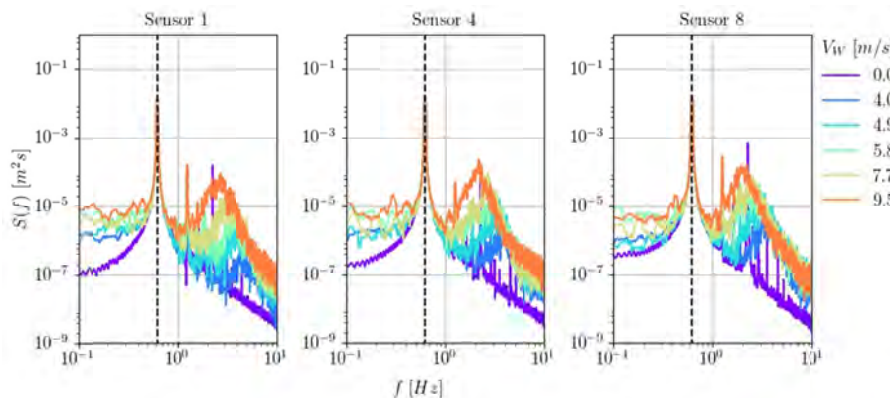
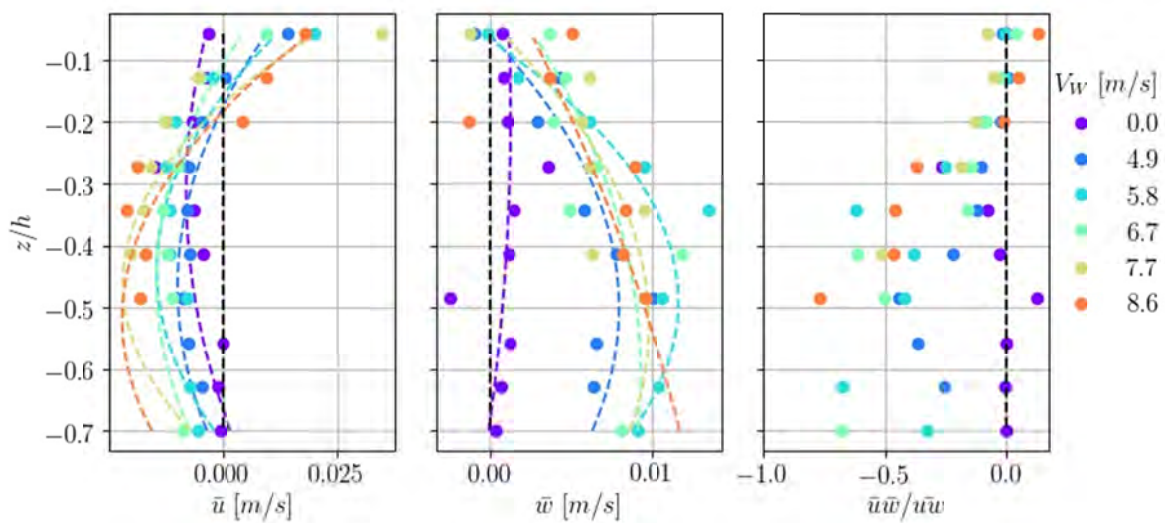


Fig. 6. Espectros de superficie libre en distintos puntos del canal durante los ensayos de combinación de oleaje regular y oleaje generado por viento.

En la Figura 7 se presentan los valores de la componente media de las velocidades horizontales y verticales obtenidas mediante el sistema de anemometría láser a lo largo de la columna de agua. Los patrones de comportamiento del flujo medio en oleaje generado por viento son complejos. Por una parte, el esfuerzo tangencial del viento sobre la superficie genera velocidades medias positivas con la distribución vertical dependiendo también de las propiedades del oleaje. Además debido a que es un túnel cerrado, existen flujos de retorno en vertical y es posible que se genere flujo transversal que depende de las características de la instalación. Se observa como existe una influencia clara debido al viento. Se tienen velocidades medias positivas en superficie, es decir en la dirección del viento mientras que son negativas en profundidad debido a una circulación cortante en vertical. En general, las velocidades medias aumentan con la velocidad de viento. Esta circulación en vertical contribuye al transporte de cantidad de movimiento en la parte media de la columna de agua. En el tercer panel se muestra la contribución relativa del flujo medio al transporte de



cantidad de movimiento.

Fig. 7. Componente media de la velocidad horizontal y vertical en la columna de agua en ensayos de oleaje regular y viento

En las Figura 8 y 9 se presentan las comparaciones de los resultados de estudio previos (Olfateh et al., 2017), de dos ensayos distintos (ADV y PIV) y los obtenidos en los ensayos realizados en el CIAO en este trabajo. Se observa que se obtiene aproximadamente el mismo orden de magnitud, sin embargo la tendencia de los datos no es definitiva. Olfateh et al. (2017) indican que la reflexión puede ser un factor predominante en las variaciones de los términos periódicos y turbulentos de los esfuerzos totales si bien es necesario seguir profundizando en este estudio para intentar llegar a conclusiones definitivas. En este estudio se ha comprobado que existe un cambio en el coeficiente de reflexión y la fase de la onda reflejada dependiente de la velocidad de viento (Figura 10). siendo un término que no suele tenerse en cuenta en estudio previos al tener resultados promediados en horizontal.

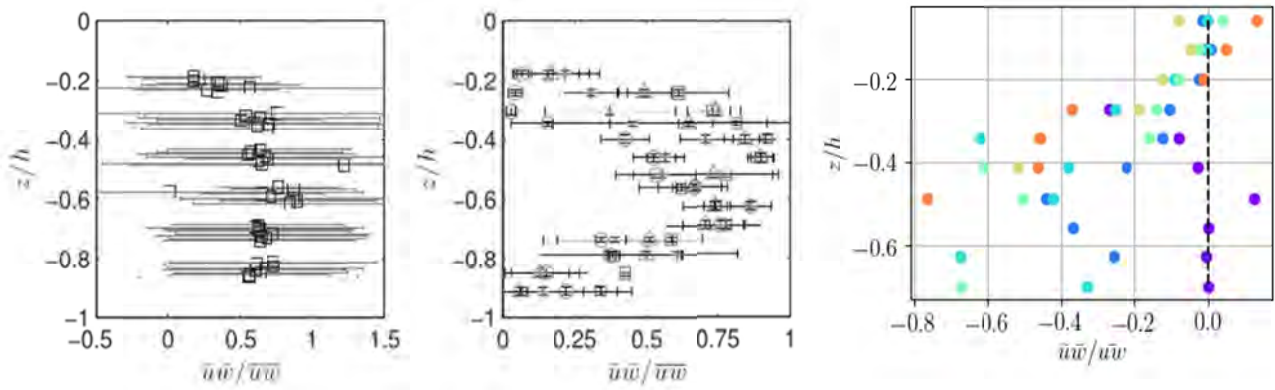


Fig. 8. Comparación con estudios previos de la correlación de la componente media en ensayos de oleaje regular y viento. Los primeros paneles corresponden a resultados de Olfateh et al., 2017 de datos obtenidos mediante sistema ADV y PIV, respectivamente. El tercer panel son los resultados obtenidos en los experimentos realizados en el CIAO.

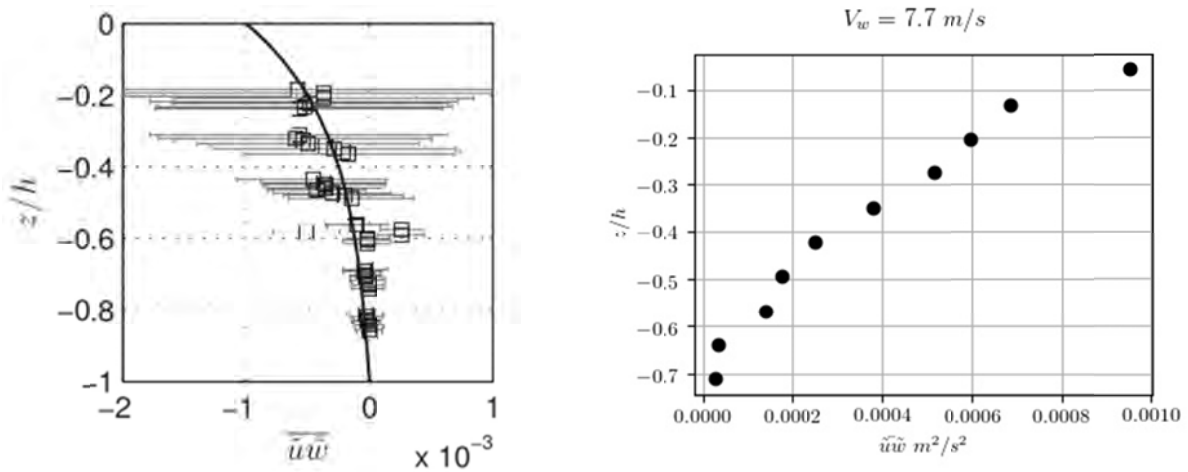


Fig. 9. Comparación con estudios previos de la correlación de la componente turbulenta en ensayos de oleaje regular y viento. (Datos de Olfateh et al 2017 y los obtenidos en este estudio).

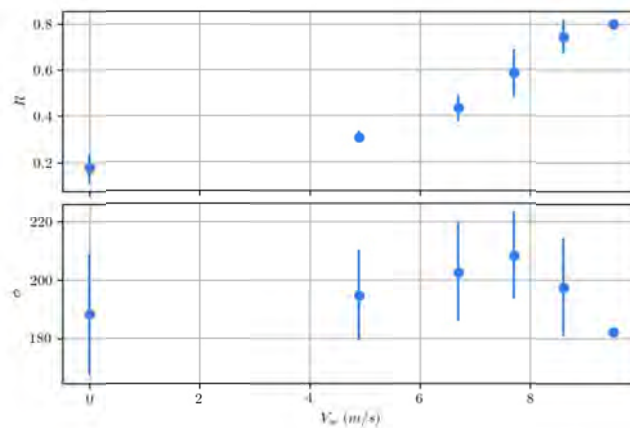


Fig. 10. Coeficiente de reflexión y fase en ensayos de oleaje regular y viento.

4. Conclusiones

Se han realizado una serie de ensayos de con el fin de tener un mejor entendimiento del transporte de cantidad de movimiento bajo la influencia de viento. El Canal de Interacción Atmósfera-Océano es una instalación puntera a nivel mundial que permite el análisis de fenómenos complejos como el análisis de las componentes medias y turbulentas del tensor de Reynolds bajo condiciones turbulentas. Los resultados de este trabajo y su comparación con estudios previos ponen en evidencia que existen inconsistencias respecto al orden de magnitud y signo de las componentes del tensor de Reynolds bajo la influencia de viento, sin embargo, apuntan que el coeficiente de reflexión y la fase de la onda reflejada son parámetros clave para la caracterización del transporte de cantidad de movimiento y el tensor de Reynolds y será estudiado en trabajos futuros.

Referencias

Artículo de una revista o periódico

- NIELSEN, P., CALLAGHAN, D. P., y BALDOCK, T. E. (2011). “Downward transfer of momentum by wind-driven waves” en *Coastal Engineering*, 58(12), 1118–1124.
- LONGO, S. (2012). “Wind-generated water waves in a wind tunnel: Free surface statistics, wind friction and mean air flow properties” en *Coastal Engineering*, 61, 27–41.
- LONGO, S., CHIAPPONI, L., CLAVERO, M., MÄKELÄ, T. y LIANG, D., (2012a). “Study of the turbulence in the air-side and water-side boundary layers in experimental laboratory wind induced surface waves” en *Coastal Engineering*, 69, 67–81.
- LONGO, S., LIANG, D., CHIAPPONI, L. y AGUILERA-JIMÉNEZ, L. (2012b). “Turbulent flow structure in experimental laboratory wind-generated gravity waves” en *Coastal Engineering*, 64, 1–15.
- LONGO, S. y LOSADA, M. A. (2012). “Turbulent structure of air flow over wind-induced gravity waves” en *Experiments in Fluids*, 53(2), 369–390.
- OLFATEH, M., WARE, P., CALLAGHAN, D. P., NIELSEN, P., y BALDOCK, T. E. (2017). “Momentum transfer under laboratory wind waves” en *Coastal Engineering*, 121, 255–264.

Ponencias de congresos

- NIETO, S., LIRA-LOARCA, A., CLAVERO, M. Y LOSADA, M. A. (2015). “Canal de Interacción Atmósfera-Océano (CIAO)” en *XIII Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos*. Avilés, España.