



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
INGENIERÍA CIVIL – INGENIERÍA DE COSTAS Y RIOS

**MODELADO FÍSICO Y NUMÉRICO DE LA TRANSFORMACIÓN DEL OLEAJE EN  
ARRECIFES CORALINOS DURANTE EVENTOS EXTREMOS**

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
JULIAN RODRÍGUEZ BURGUETTE

TUTOR PRINCIPAL:  
DR. ALEC TORRES FREYERMUTH  
INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

SISAL, YUCATÁN, NOVIEMBRE DE 2023



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dr. Appendini A. Christian M.  
Secretario: Dra. Medellín Mayoral Gabriela  
1 er. Vocal: Dr. Torres Freyermuth Alec  
2 do. Vocal: Dr. Pintado Patiño José Carlos  
3 er. Vocal: Dra. Franklin Gemma Louise

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Laboratorio de Ingeniería y Procesos Costeros, Instituto de Ingeniería, UNAM. Unidad Académica Sisal, Yucatán, México.

**TUTOR DE TESIS:**

Dr. Alec Torres Freyermuth



---

**FIRMA**

## Resumen

Los arrecifes coralinos son un ecosistema que disipa de manera eficiente el oleaje. A lo largo de los años se han desarrollado diversos trabajos dedicados a estudiar la transformación del oleaje en arrecifes coralinos a partir del análisis de observaciones en el campo, ensayos en el laboratorio con modelos físicos, y modelación numérica. Sin embargo, existen pocos estudios en la literatura enfocados a investigar el *runup* en playas protegidas por arrecifes durante condiciones de oleaje extremo con períodos de retorno,  $Tr$ , grandes ( $Tr > 100$  años). En este trabajo se desarrollaron ensayos de laboratorio en un modelo físico, a escala 1:60, considerando la morfología del arrecife coralino de Teahupo'o, situado en Tahití, Polinesia Francesa. Este arrecife es conocido por la rotura violenta del oleaje incidente debido al cambio repentino de la profundidad del agua con una pendiente pronunciada (1:2.29) a barlomar del arrecife. Las mediciones de laboratorio fueron de utilidad para la calibración y validación de un modelo numérico transitorio que resuelve las ecuaciones no-lineales de aguas someras con corrección no-hidrostática (SWASH). A pesar de las simplificaciones para simular la rotura de las olas, el modelo numérico SWASH predice satisfactoriamente la variación de la altura del oleaje y el *runup*. Sin embargo, el modelo no reproduce de manera satisfactoria las velocidades en el punto de rotura. Los resultados de las simulaciones numéricas, en conjunto con la base de datos de laboratorio, son útiles para la evaluación de parametrizaciones de *runup* existentes. Las parametrizaciones de *runup* desarrolladas en estudios previos para arrecifes funcionan de manera satisfactoria para períodos de retorno menores a 100 años.

## **Agradecimientos**

En primer lugar, agradezco a dios por guiarme en cada etapa de mi vida, por darme la fortaleza y el entendimiento para seguir adelante, y por poner en mi vida a las personas correctas en el momento adecuado.

En segundo lugar, agradezco a mis padres y mi hermano por motivarme a cumplir mis metas, por su cariño, por su incondicional apoyo moral e inclusive económico, y por siempre estar presentes en los momentos que más los he necesitado.

En tercer lugar, agradezco a mi tutor, el Dr. Alec Torres Freyermuth, por la oportunidad de desarrollarme académicamente en el Laboratorio de Ingeniería y Procesos Costeros IIUNAM y por todo el apoyo brindado durante el desarrollo de este trabajo. Muchas gracias por su paciencia, tolerancia, y por siempre disponer de su tiempo en compartir su valioso conocimiento.

Agradezco a la Dra. Gabriela Medellín Mayoral, la Dra. Gemma Louise Franklin, el Dr. Christian Appendini Albrechtsen y el Dr. José Carlos Pintado Patiño por compartir sus conocimientos, y por sus comentarios y observaciones en la revisión de este trabajo.

El apoyo técnico del Ocean. Camilo Sergio Rendon Valdez fue fundamental para el desarrollo de los ensayos en el canal de oleaje. También, agradezco al Ing. Gonzalo Martín Ruiz, al M.I. Juan Alberto Gómez Liera y al Dr. José López González por el apoyo técnico durante mis estudios de maestría.

Agradezco a toda la comunidad LIPC. Al grupo de catedráticos por las enseñanzas que me dieron a lo largo de mis estudios, siempre impartiendo clases de calidad y con la total disposición en resolver dudas. A mis compañeros y amigos por los buenos momentos y por motivarme a culminar este trabajo.

Agradezco a mis amigos de Veracruz por los buenos momentos durante mis visitas vacacionales. También, un agradecimiento especial a la familia Tejeda Ortiz por abrirme las puertas de su casa en Mérida, darme asilo y facilitar mi estancia.

Agradezco al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) por el financiamiento de la beca de maestría (No. 800818), al proyecto “Estudio de la transformación de oleaje en arrecifes coralinos durante eventos extremos” (PAPIIT-DGAPA UNAM IN102221) por el apoyo financiero para realizar los ensayos en el modelo físico y la elaboración de esta tesis, y al proyecto “Resiliencia de socioecosistemas costeros asociados al turismo ante covid 19 y cambio climático” (PAPIIT-DGAPA UNAM BV300123). Finalmente, agradezco al LIPC y al LANRESC por el acceso a la infraestructura y equipo utilizado en esta tesis.

# Contenido

Resumen.....	II
Agradecimientos.....	III
1. Introducción.....	1
1.1. Motivación.....	1
1.2. Antecedentes.....	3
1.3. Justificación.....	6
1.4. Hipótesis.....	6
1.5. Objetivos.....	6
1.5.1. General.....	6
1.5.2. Específicos.....	6
1.6. Estructura de la tesis.....	7
2. Estado del arte.....	8
2.1. Arrecifes coralinos.....	8
2.2. Transformación del oleaje en arrecifes coralinos.....	10
2.2.1. Ondas infragravitatorias.....	11
2.2.2. Setup y runup.....	12
2.3. Modelado Numérico.....	14
2.3.1. Modelo SWASH.....	15
2.3.3. Rotura del oleaje.....	17
2.3.4. Aplicaciones en arrecifes.....	18
2.4. Parametrizaciones de runup.....	20
2.5. Modelado físico.....	24
2.5.1. Ventajas y desventajas de los modelos físicos.....	24
2.5.2. Tipos de modelos físicos.....	25
2.5.3. Condiciones de similitud y escalas.....	25
3. Metodología.....	29
3.1. Zona de estudio.....	29
3.2. Modelado físico.....	30
3.2.1. Infraestructura.....	30
3.2.2. Diseño del experimento.....	31
3.2.3. Configuración de ensayos.....	33
3.2.4. Instrumentación.....	36
3.3. Modelado numérico.....	39
3.3.1. Implementación del modelo SWASH.....	39
3.3.2. Calibración del modelo SWASH.....	40

3.4. Análisis de los datos .....	42
3.4.1. Análisis del oleaje .....	42
3.4.2. Análisis del runup .....	43
4. Resultados .....	45
4.1. Modelado físico .....	45
4.1.1. Transformación del oleaje .....	45
4.1.2. Velocidades .....	49
4.1.3. Runup .....	51
4.1.4. Análisis de reflexión .....	54
4.2. Modelado numérico .....	55
4.2.1. Validación del modelo SWASH .....	55
4.2.2. Evaluación de parametrizaciones de runup utilizando el modelo SWASH	
61	
5. Discusiones .....	64
5.1. Modelado físico .....	64
5.2. Limitaciones de modelo SWASH .....	65
5.3. Parametrizaciones y factor escala .....	67
6. Conclusiones .....	71
Bibliografía .....	73

## Índice de figuras

Figura 1. Arrecife coralino en la costa norte de Moorea, Polinesia Francesa (Tomada de Monismith (2007)). .....	8
Figura 2. Tipología de arrecifes coralinos de acuerdo con su morfología. Tomada de <a href="https://www.geographyalltheway.com/igcse_geography/gcse-coasts/coral_reefs.htm">https://www.geographyalltheway.com/igcse_geography/gcse-coasts/coral_reefs.htm</a> . .....	9
Figura 3. Principales zonas de los arrecifes coralinos (Tomada de NOAA). .....	9
Figura 4. Ejemplo de espectro de oleaje donde se muestra la banda infragravitatoria (De Aagaard & Masselink (1999). Tomada de Masselink et al., 2011). .....	11
Figura 5. Componentes de runup. Tomada de <a href="https://www.usgs.gov/centers/spcmssc/science/storm-impact-scale">https://www.usgs.gov/centers/spcmssc/science/storm-impact-scale</a> . .....	13
Figura 6. Ubicación de zona de estudio. a) Arrecife de Teahupo'o. b) Isla de Tahití, Polinesia Francesa. c) Polinesia Francesa con respecto a Australia. d) Rosa de oleaje de la zona de estudio. .....	29
Figura 7. Canal de Oleaje del LIPC de la Universidad Nacional Autónoma de México. ....	30
Figura 8. Esquema de canal de oleaje. ....	31
Figura 9. Sistema de generación de oleaje en el canal. ....	31
Figura 10. Perfil batimétrico construido en el canal de oleaje. ....	32
Figura 11. a) Colocación de bloques. b) Colocación de gravilla. c) Colocación de capa de concreto. ....	33
Figura 12. Altura de ola significativa correspondiente a cada periodo de retorno ensayado. ....	34
Figura 13. Sensores resistivos      Figura 14. Sensor de Runup .....	36

Figura 15. Esquema de ubicación de sensores resistivos para ensayos con periodo pico 2.5 s. ....	37
Figura 16. Esquema de ubicación de sensores resistivos para ensayos con periodo pico 1.5 s. ....	38
Figura 17. Esquema de ubicación de sensores resistivos para ensayos de onda solitaria. .	38
Figura 18. Velocímetro electromagnético Valeport. ....	38
Figura 19. Serie temporal de elevación de superficie libre de forzamiento (línea punteada azul) y onda larga forzada (línea continua negra) correspondiente al Caso e1. ....	40
Figura 20. Ejemplo de serie temporal de runup correspondiente a ensayo e2. Se muestra la elevación del nivel del agua ( $\eta$ ), setup máximo y picos máximos de runup. ....	43
Figura 21. Función de distribución acumulada (CDF) para extraer el valor de excedencia del 2 %. ....	44
Figura 22. Inicio de rotura en S7. Caso e2. ....	45
Figura 23. Intermedio de rotura en S7. Caso e2. ....	46
Figura 24. Final de rotura en S7. Caso e2. ....	46
Figura 25. Series temporales de superficie libre medidos en sensores a) S5, b) S7, c) S13 y d) S16 correspondiente al caso e2. ....	46
Figura 26. Resultados correspondientes al caso e2 ( $H_s=0.113$ m y $T_p= 2.5$ s). a) Altura de ola significativa. b) Setup inducido por las olas. c) Perfil del arrecife. ....	47
Figura 27. Componentes a) incidente y b) infragravitatoria de la altura de ola significativa. Caso e2 ( $H_s=0.113$ m y $T_p= 2.5$ s). ....	48
Figura 28. Espectros de oleaje medidos en S5, S7, S13 Y S16. Caso e2. ....	49
Figura 29. Espectros de oleaje medidos en S14, S15, S16 y sensor de runup. Caso e2. ....	49
Figura 30. Sincronización de la superficie libre del agua y la velocidad de corriente, Caso e2. ....	50
Figura 31. Velocidad promedio en función de la energía del oleaje incidente. ....	50
Figura 32. Valores de a) asimetría (skewness) y b) kurtosis obtenidas en cada ensayo. ....	51
Figura 33. Serie temporal de runup correspondiente al caso e2. ....	52
Figura 34. Swash incidente e infragravitatorio en función del parámetro de Hunt. ....	52
Figura 35. a) Setup máximo, b) Swash total y c) Runup 2% de excedencia en función del parámetro de Hunt. ....	53
Figura 36. Validación del modelo SWASH con mediciones de superficie libre y runup en el laboratorio. Muestra las series temporales de elevación de superficie libre del agua para distintos sensores verticales y sensor de runup. Caso e2 ( $H_s=0.113$ m y $T_p= 2.5$ s). ....	55
Figura 37. Resultados medidos y simulados correspondientes al caso e2 ( $H_s=0.113$ m y $T_p= 2.5$ s). a) Altura de ola significativa. b) Setup inducido por las olas. c) Perfil del arrecife. ....	57
Figura 38. Resultados medidos y simulados correspondientes al caso e2 ( $H_s=0.113$ m y $T_p= 2.5$ s). a) Altura de ola significativa incidente. b) Altura de ola significativa infragravitatoria. c) Perfil del arrecife. ....	57
Figura 39. Comparativa de evolución de densidad espectral en todo el dominio, a) medida y b) simulada. Las líneas representan cortes del espectro del oleaje visualizado en Figura 34. ....	58
Figura 40. Espectro de oleaje medido: a) al pie del arrecife ( $x=0$ m), b) punto de rotura ( $x=1.52$ m), c) cresta del arrecife ( $x=4.87$ m) y d) arrecife plano ( $x=8.01$ m). Línea continua representa el espectro medido en laboratorio y línea discontinua representa el espectro obtenido en el modelo SWASH. ....	58
Figura 41. Espectro de oleaje medido y simulado. a) Forzamiento ( $x=-16.997$ m). b) Runup. ....	59

Figura 42. a) Swash incidente, b) swash infragravitatorio c) setup máximo y d) $R_{2\%}$ , medidos y simulados. ....	60
Figura 43. Resultados de simulaciones escaladas a prototipo de a) swash incidente, b) swash infragravitatorio c) setup máximo y d) $R_{2\%}$ . Las líneas negras y rojas discontinuas representan las parametrizaciones de Stockdon et al. (2006), considerando la pendiente de la playa y del arrecife frontal, respectivamente. Línea negra continua representa el ajuste con coeficientes calibrados. ....	62
Figura 44. Evaluación de distintas parametrizaciones de runup a escala prototipo. ....	63
Figura 45. Ejemplificación de proceso de rotura en modelo SWASH. ....	66
Figura 46. a) Series temporales de a) superficie libre del agua y b) velocidad, medidas y simuladas en punto de rotura ( $x=1.52$ m). ....	66
Figura 47. Comparativa de $R_{2\%}$ simulados y ensamble de parametrizaciones dimensional y adimensional (Franklin & Torres-Freyermuth, 2022). ....	68
Figura 48. Comparativa de parametrización adimensional (Franklin & Torres-Freyermuth, 2022) aplicada en escala prototipo. ....	69
Figura 49. a) Altura de ola significativa incidente. b) Altura de ola significativa infragravitatoria. c) Perfil del arrecife. Comparativa de caso e1 ( $H_s=0.12$ m y $T_p= 2.5$ s) a escala prototipo, considerando diferentes valores de coeficiente de fricción (Manning) y longitud de mezcla de Prandtl. ....	69
Figura 50. Serie temporal de runup para caso e1 ( $H_s=0.12$ m y $T_p= 2.5$ s) a escala prototipo, considerando diferentes valores del coeficiente de fricción (Manning) y longitud de mezcla de Prandtl. ....	70

## Índice de tablas

Tabla 1. Algunas de las parametrizaciones de runup y swash relevantes. ....	23
Tabla 2. Productos adimensionales importantes en la hidráulica. (Adaptado de Hughes (1993)). ....	27
Tabla 3. Factores de escala de Froude para distintas variables. (Adaptado de Briggs (2013)). ....	28
Tabla 4. Coordenadas X-Z de perfil batimétrico. ....	32
Tabla 5. Resumen de las condiciones de los ensayos. ....	34
Tabla 6. Distintos arreglos de sensores utilizados durante ensayos. ....	37
Tabla 7. Rango de profundidad relativa en función del número de capas K en SWASH (The Swash Team, 2023). ....	39
Tabla 8. Parámetros estadísticos calculados en cada sensor correspondientes al caso 1. ....	41
Tabla 9. Resumen de resultados a escala de prototipo. ....	53
Tabla 10. Coeficientes de reflexión calculados a escala prototipo. ....	54
Tabla 11. Parámetros estadísticos correspondientes a cada sensor. Caso e2. ....	56
Tabla 12. Parámetros estadísticos correspondientes a cada variable de la Figura 42. ....	60
Tabla 13. Parámetros estadísticos obtenidos para cada parametrización evaluada (Figura 44). ....	63

## 1. Introducción

### 1.1. Motivación

Los arrecifes coralinos son uno de los ecosistemas más diversos, biológicamente complejos y, también, uno de los más amenazados del mundo (Carpenter et al., 2008; Mumby & Steneck, 2008; Álvarez-Filip et al., 2009; Rodríguez et al., 2022). Están presentes en la mayoría de los mares tropicales y son el hábitat de una gran variedad de especies marinas. Se calcula que el 25% de la vida marina depende de los arrecifes coralinos en algún punto de su ciclo de vida (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos [EPA], 2023). Están relacionados ecológicamente con pastos marinos, manglares y lagunas costeras. Por otro lado, se estima que alrededor de 500 millones de personas dependen de los arrecifes coralinos para sostener la economía y obtener alimento e ingresos del turismo y la pesca (Hoegh-Guldberg et al., 2019; Roelvink et al., 2021). A pesar de su importancia, el funcionamiento de estos ecosistemas es poco conocido por los habitantes locales, tomadores de decisiones y desarrolladores, lo cual ha propiciado que sean destruidos o degradados.

Diversos autores han demostrado que los arrecifes coralinos sirven como barreras de protección costera natural (Munk & Sargent, 1948; Lugo-Fernández et al., 1998; Ferrario et al., 2014) ante inundaciones por efecto del oleaje y la erosión costera (Elliff & Silva, 2017; Reguero et al., 2018; Roelvink et al., 2021). Estos sistemas pueden disipar eficientemente hasta el 97% de la energía del oleaje incidente (Ferrario et al., 2014). Los corales de EUA reducen el riesgo a los peligros marinos con beneficios de alrededor de \$1.8 billones de USD anuales (Reguero et al., 2021).

Los riesgos de inundación en zonas arrecifales no solo se deben a tormentas locales sino también, y con mayor frecuencia, al oleaje generado a distancia (tipo *swell*) (Hoeke et al., 2013; Pearson et al., 2017). Lo anterior, promueve que la energía del oleaje infragravitatorio a menudo predomina en la línea de costa, promoviendo un mayor *runup* y, en consecuencia, un aumento en la probabilidad de inundación (Shimozono et al., 2015; Cheriton et al., 2016; Pearson et al., 2017).

Se espera que los eventos de inundación sean cada vez más frecuentes debido al cambio climático. Algunas proyecciones recientes estiman que, para finales del siglo XXI, el nivel del mar podría superar los 2 metros por encima de los niveles registrados en el año 2000 (Storlazzi et al., 2018). Esto, sugiere un gran impacto para las zonas costeras protegidas por arrecifes, dado que, la mayoría de los arrecifes tienen elevaciones máximas inferiores a 4 m y elevaciones medias inferiores a 2 m sobre el nivel del mar (Vitousek et al., 2017).

Por otro lado, estudios previos muestran que los arrecifes coralinos se están degradando aceleradamente debido a diversos factores como la contaminación, la sobrepesca, aumento de temperatura y acidificación de los océanos (Pandolfi et al., 2011). Esto provoca una pérdida en la elevación de los arrecifes y la rugosidad. Ruiz de Alegria-Arzaburu et al. (2013) reporta que, la pérdida de un metro en la altura del arrecife reduce aproximadamente el 10% de la capacidad de disipación del oleaje,

aumentando el transporte de sedimentos y la erosión de la playa. Además, el constante estrés al que se encuentran sometidos retrasa la capacidad de recuperación natural de los arrecifes, contribuyendo a una disminución anual entre 1 y 2% de la cobertura de coral (Bruno y Selig, 2007; Roelvink et al., 2021).

Es muy probable que la vulnerabilidad a las inundaciones a lo largo de las costas protegidas por arrecifes vaya en aumento. Por lo tanto, es necesario predecir con precisión la hidrodinámica asociada a estas regiones durante condiciones de oleaje extremo y así, poder planificar e implementar medidas de mitigación (Franklin & Torres-Freyermuth, 2022). La transformación del oleaje en estos ambientes está controlada por procesos no lineales incluyendo la rotura del oleaje. Por lo tanto, los modelos de propagación de oleaje basados en teoría lineal fallan en describir los procesos principales. Trabajos previos se han enfocado en la implementación de modelos no-lineales en estos ambientes (Nwogu & Demirbilek, 2010; Yao et al., 2012; Buckley et al., 2014) para evaluar su capacidad de predecir la transformación del oleaje y el *runup*. El *runup* es fundamental para evaluar de manera adecuada los niveles de agua extremos en la costa (Almar et al., 2021). Sin embargo, existen pocos trabajos enfocados a estudiar el *runup* en estos ambientes durante condiciones de oleaje extremo con períodos de retorno mayores a 100 años. En este trabajo se pretende evaluar la capacidad de un modelo numérico y de las parametrizaciones existentes para predecir el *runup* en playas protegidas por arrecifes.

## 1.2. Antecedentes

Los arrecifes coralinos ofrecen diversos servicios ecosistémicos entre los que destaca la protección natural de la costa durante eventos extremos (Ferrario et al, 2014; Ruiz de Alegría-Arzaburu, et al., 2013; Osorio-Cano et al., 2019). Diversos autores han reconocido que los arrecifes coralinos juegan un papel importante en la disipación de la energía del oleaje incidente en zonas costeras y ayudan a mitigar el peligro de inundación (Lugo-Fernández et al., 1998; Péquignet et al., 2011). Las zonas arrecifales suelen conformarse por pendientes pronunciadas y un arrecife somero que se extiende hacia la costa. El oleaje incidente suele romper violentamente cerca de la pendiente arrecifal (*fore reef*), generando altas tasas de disipación (Pomeroy et al., 2012; Quataert et al., 2015), para luego continuar la propagación del bore turbulento sobre la cresta arrecifal e introducirse a la laguna. Por otro lado, la alta rugosidad de los arrecifes de coral proporciona una tasa de disipación adicional asociada a la fricción en el fondo (Lowe et al., 2005). La rotura del oleaje genera un aumento en el nivel medio del mar (*setup*), y, debido a la transferencia no-lineal de energía dentro del espectro, la energía infragravitatoria generalmente domina desde la llanura arrecifal (*reef flat*) hasta la costa, ambas contribuyendo al *runup*.

A lo largo de los últimos años, el estudio de estos ecosistemas ha cobrado relevancia, particularmente en un contexto de cambio climático en el que el aumento del nivel del mar y la intensificación de las tormentas incrementará el riesgo en la costa (Baldock et al., 2013; Masselink et al., 2020). Estudios previos han utilizado diferentes metodologías, incluyendo mediciones en el campo (Péquignet et al. 2014; Monismith, 2014; Wandres et al., 2020), modelado numérico (Torres-Freyermuth et al., 2012; Yao et al., 2012; Franklin et al., 2013, 2018; Buckley et al., 2022), y modelado físico (Gourlay, 1994; Demirbilek et al., 2007; Buckley et al. 2015, 2016), para entender los diferentes procesos de transformación del oleaje en estos ambientes. Sin embargo, las mediciones de campo son difíciles de realizar debido a la complejidad de instalar equipos durante condiciones de oleaje muy energético. Por otro lado, a pesar de sus limitaciones, la combinación de modelos físicos y numéricos presentan ventajas para la comprensión de los procesos de transformación del oleaje y los efectos en el *runup* bajo condiciones de oleaje extremo.

Los trabajos pioneros enfocados en estudiar la transformación del oleaje en arrecifes se llevaron a cabo en canales de oleaje bajo condiciones controladas de laboratorio. Seelig (1983) analizó la relación entre el *setup* y un parámetro de flujo de energía de las olas. Reportó que el *setup* incrementa a medida que disminuye el nivel del agua en la llanura arrecifal. Asimismo, fue de los primeros trabajos en reportar mediciones de *runup* y la influencia del oleaje regular e irregular en el mismo. Gourlay (1994) realizó ensayos considerando diversas condiciones de oleaje y niveles de agua, con el objetivo de determinar las relaciones que existen entre los niveles extremos de agua en las lagunas arrecifales y el oleaje incidente en aguas profundas. Gourlay (1996) describió una parametrización adimensional para el *setup* en términos de la profundidad relativa del agua sobre la llanura arrecifal y el peralte del oleaje.

Demirbilek et al. (2007) realizaron una serie de experimentos de laboratorio de un modelo físico idealizado a escala reducida del arrecife de la isla de Guam, ubicado en el océano Pacífico, para estudiar el rol del viento en la transformación del oleaje y el *runup*. Este set de datos fue por más de una década la referencia para la calibración y validación de los modelos numéricos. Por su parte, Buckley et al. (2015, 2016) realizaron ensayos de laboratorio del perfil representativo de un arrecife con pendiente 1:5, para investigar los procesos en la zona de rompientes que controlan la variabilidad media del nivel del agua. Se simularon casos con diferentes combinaciones de alturas de ola y profundidad en reposo, sobre un fondo liso y, posteriormente, sobre un fondo rugoso, para evaluar su influencia. Sus estudios sugieren que la rugosidad disminuye el *setup* a diferencia de lo que sugieren resultados basados en modelos numéricos (Franklin et al. 2013). Yao et al. (2017) realizó ensayos en un canal de oleaje utilizando un modelo idealizado incorporando una cresta arrecifal. Concluyeron que el *setup* sobre el arrecife plano puede incrementar significativamente por efecto de las dimensiones de la cresta arrecifal.

Los modelos numéricos hidrodinámicos son una herramienta que nos puede ayudar a mejorar la comprensión de la hidrodinámica de los arrecifes coralinos. Pueden utilizarse para predecir los procesos costeros en condiciones actuales y futuras, y determinar su impacto relativo en el *runup* de las olas (Buckley et al., 2022). Existen una gran variedad de modelos numéricos utilizados para simular la transformación del oleaje en arrecifes coralinos; sin embargo, algunos presentan ciertas limitaciones. Por ejemplo, los modelos espectrales (promediados en fase) (ej. SWAN; Booij et al., 1999) no son capaces de reproducir, los procesos que dominan la dinámica cercana a la costa, las ondas infragravitatorias y el *runup*.

El estudio de la rotura del oleaje y su hidrodinámica asociada en estos ambientes requiere de modelos numéricos transitorios no-lineales capaces de simular la transformación no-lineal del oleaje y el proceso de rotura. Por lo tanto, se desarrollaron modelos tipo *surfbeat* (ej. Roelvink et al, 2009) que permiten simular eficientemente estos procesos. Sin embargo, los movimientos en la zona de *swash* se desprecian o se parametrizan, lo que puede dar lugar a imprecisiones importantes en la predicción del *runup* (Quataert et al; 2020; Buckley et al., 2022). Los modelos numéricos que resuelven las ecuaciones de Navier-Stokes con el promediado de Reynolds y un modelo de turbulencia (Lin & Liu, 1998; Losada et al., 2008) tienen la capacidad de mejorar la descripción de la rotura en estos ambientes, sin embargo, demandan un mayor tiempo computacional. Por otro lado, los modelos basados en las ecuaciones no-lineales de aguas someras (Zijlema et al., 2011) han sido ampliamente utilizados (Torres-Freyermuth et al., 2012; Quataert et al., 2020; Franklin & Torres-Freyermuth et al., 2022) debido al equilibrio entre la eficiencia computacional y la capacidad de capturar los procesos físicos relevantes.

La mayoría de los estudios se han concentrado en la modelación unidimensional (1D) de la transformación del oleaje, *setup* y *runup* a lo largo de un transecto transversal a la costa (ej. Nwogu & Demirbilek, 2010; Torres-Freyermuth et al., 2012; Quataert et

al., 2015). Algunos otros trabajos se han enfocado en la modelación bidimensional horizontal (2DH), enfocados a la variación longitudinal de la hidrodinámica costera asociada a los arrecifes (ej. Van Dongeren et al., 2013).

Muchos de los trabajos encontrados en la literatura han servido como base para el desarrollo de parametrizaciones de *runup*. Estas, permiten una evaluación rápida de la vulnerabilidad costera a escala regional y global (ej. Almar et al., 2021). Sin embargo, estas formulaciones se desarrollan principalmente para playas y no se han evaluado exhaustivamente en condiciones de oleaje extremo (Franklin & Torres-Freyermuth, 2022).

A pesar de la existencia de distintos trabajos asociados al estudio de la hidrodinámica asociada a los arrecifes coralinos, la mayoría consideran condiciones de tormentas típicas y existen pocos esfuerzos enfocados a evaluar la transformación del oleaje y el *runup* durante eventos extremos. Por otro lado, el número de trabajos en la literatura asociados al estudio del *runup* en playas protegidas por arrecifes es relativamente bajo. Por lo tanto, este trabajo estará enfocado en el estudio del oleaje y la hidrodinámica durante eventos extremos con períodos de retorno mayores a 100 años y sus implicaciones en el *runup*. El objetivo es evaluar la capacidad del modelo numérico SWASH para reproducir la transformación del oleaje bajo estas condiciones para, posteriormente, poder implementarlo en la evaluación de modelos paramétricos existentes en la literatura.

### 1.3. Justificación

Los arrecifes coralinos juegan un papel fundamental en la economía de muchas zonas costeras; además, ofrecen una protección natural a la costa al disipar la energía del oleaje incidente. Se espera que esta protección disminuya gradualmente debido a los efectos del cambio climático y a la degradación de los arrecifes por acción del ser humano. Por lo tanto, el estudio de la hidrodinámica en arrecifes coralinos es importante para mejorar la toma de decisiones relacionadas con el peligro de inundación y la gestión de las zonas costeras. Para la evaluación del riesgo a inundación en estos ambientes se utilizan parametrizaciones y modelos numéricos. Sin embargo, existen pocos estudios enfocados a su evaluación durante condiciones de oleaje extremo.

La medición de la hidrodinámica en arrecifes coralinos durante condiciones de oleaje extremo es complicada, debido a la dificultad para fijar los instrumentos y a que los intervalos de medición del flujo, por parte de los instrumentos, pueden verse rebasados. Por otro lado, los modelos físicos y numéricos son herramientas que permiten investigar de manera controlada los procesos complejos asociados con la transformación del oleaje durante eventos extremos. Debido a ello, en este trabajo se pretende estudiar, a través de un modelo físico, la transformación del oleaje en un sistema arrecifal y el *runup* asociado bajo condiciones extremas. Los resultados permitirán calibrar y validar modelos numéricos y parametrizaciones existentes.

### 1.4. Hipótesis

El modelo numérico SWASH y las parametrizaciones existentes en la literatura tienen limitaciones para predecir el  $R_{2\%}$  en playas protegidas por arrecifes coralinos durante condiciones de oleaje extremo.

### 1.5. Objetivos

En este trabajo, se plantearon el siguiente objetivo general y objetivos específicos:

#### 1.5.1. General

- Estudiar la transformación del oleaje y la hidrodinámica en arrecifes coralinos durante eventos extremos ( $T_r > 100$  años).

#### 1.5.2. Específicos

Para cumplir con el objetivo general se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- Realizar ensayos de laboratorio de un modelo físico idealizado de un arrecife coralino considerando distintas condiciones de oleaje extremo incidente.
- Calibrar y validar el modelo numérico no-hidrostático SWASH utilizando los datos de laboratorio.
- Implementar el modelo numérico calibrado para el estudio de la transformación del oleaje y el *runup* asociado en playas protegidas por arrecifes coralinos ante distintas condiciones de oleaje incidente.

- Evaluar la funcionalidad de distintas parametrizaciones empíricas del  $R_{2\%}$  en playas protegidas por arrecifes coralinos durante condiciones de oleaje extremo ( $T_r > 100$  años).

### 1.6. Estructura de la tesis

El presente documento se compone de seis capítulos. El primer capítulo presenta la introducción, exponiendo la motivación para la elaboración del trabajo de investigación, así como los antecedentes. Asimismo, se presentan la justificación del problema, la hipótesis y los objetivos planteados.

El capítulo dos presenta una revisión del estado del arte, haciendo énfasis en la transformación del oleaje en arrecifes coralinos y su hidrodinámica asociada. Por otro lado, se describen las características principales, ecuaciones de gobierno y sus aplicaciones en arrecifes, del modelo numérico empleado en este trabajo (SWASH). También, se presenta una revisión de las distintas parametrizaciones empíricas de *runup* en playas. Finalmente, se presentan las características principales del modelado físico.

El capítulo tres describe la metodología seguida para el modelado físico y numérico. Por un lado, se describe la construcción del modelo físico de un arrecife y la selección de los ensayos de laboratorio. Por otro lado, con respecto al modelado numérico, se describe la calibración y validación del modelo numérico SWASH, así como la parametrización del *runup*. El capítulo cuatro muestra los resultados obtenidos a partir de la modelación física y la implementación del modelo numérico para el estudio de la transformación del oleaje. También, se presentan los resultados de la evaluación de las parametrizaciones empíricas. En el capítulo cinco se discuten las limitaciones del modelo y de las parametrizaciones de *runup*, así como el factor de la escala en la implementación del modelo numérico. Finalmente, el capítulo seis muestra las conclusiones del trabajo de investigación.

## 2. Estado del arte

### 2.1. Arrecifes coralinos

Los arrecifes coralinos se encuentran presentes en la mayoría de las zonas tropicales alrededor del mundo. Son sistemas conformados por pólipos de coral, conocidos como *corales duros* o *constructores de arrecifes*, que segregan capas de carbonato de calcio (Figura 1). El coral crece extendiendo su esqueleto y añadiendo más pólipos, formando colonias de corales que, con el tiempo, conformaran un arrecife (Monismith, 2007). Aunado a ello, diversas especies de plantas y animales forman parte de este hábitat, por ejemplo, algas marinas y moluscos de gran tamaño sirven como cimiento para nuevos corales.



Figura 1. Arrecife coralino en la costa norte de Moorea, Polinesia Francesa (Tomada de Monismith (2007)).

Darwin (1842) clasifica los arrecifes coralinos en función de su morfología e identifica tres principales tipos: (1) arrecifes periféricos (*fringing reefs*), los cuales son arrecifes estrechos que se extienden desde la costa y suelen presentar lagunas someras, así como una pendiente arrecifal pronunciada; (2) arrecifes de barrera (*barrier reefs*), son arrecifes estrechos y alargados, separados de la costa por lagunas que suelen tener menos de 30 m de profundidad. Pueden ser continuos o separados por pasajes de anchura y profundidad variable, que permiten la entrada del mar a la laguna; (3) arrecifes atolones (*atoll reefs*), son arrecifes que rodean una o varias lagunas centrales. Pueden tener una forma circular, elíptica o de herradura y presentan gran variabilidad en tamaño (Masselink et al., 2011) (Figura 2).

Types of coral reefs

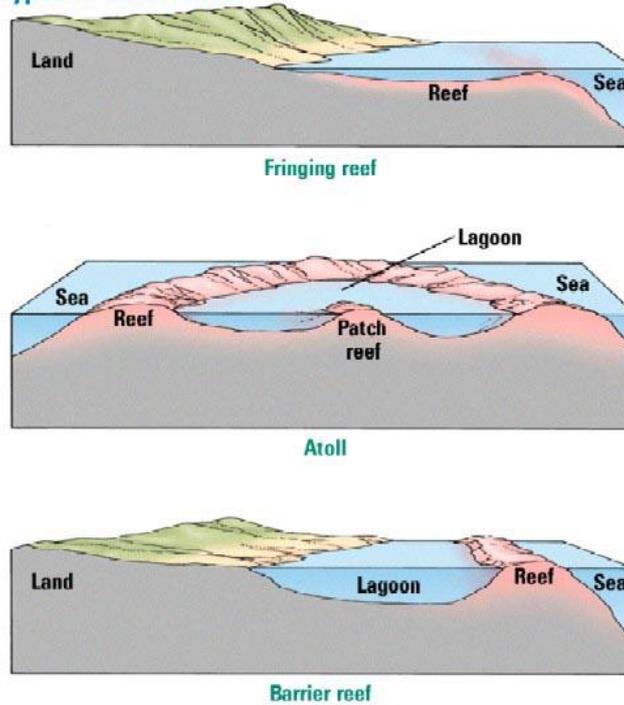


Figura 2. Tipología de arrecifes coralinos de acuerdo con su morfología. Tomada de [https://www.geographyalltheway.com/igcse\\_geography/gcse-coasts/coral\\_reefs.htm](https://www.geographyalltheway.com/igcse_geography/gcse-coasts/coral_reefs.htm).

Estos tipos de arrecifes coralinos se conforman de diferentes zonas definidas de acuerdo con la profundidad del agua y la dinámica del oleaje. Se pueden identificar cuatro zonas principales: (1) el arrecife frontal (*fore reef*), es la parte exterior o barlomar del arrecife; (2) la cresta arrecifal (*reef crest*), es el punto más alto del arrecife, generalmente recibe el mayor impacto de la energía del oleaje y puede quedar expuesto durante condiciones de marea baja; (3) el arrecife posterior (*back reef*), es la zona interna del arrecife que conecta a la cresta arrecifal y la llanura arrecifal; y, 4) la llanura arrecifal (*reef flat*), es una zona plana que comúnmente se encuentra posterior a la cresta arrecifal y que se encuentra protegida de la acción del oleaje. En algunos arrecifes, la ubicación de esta puede coincidir con la laguna arrecifal (*reef lagoon*) (Figura 3).

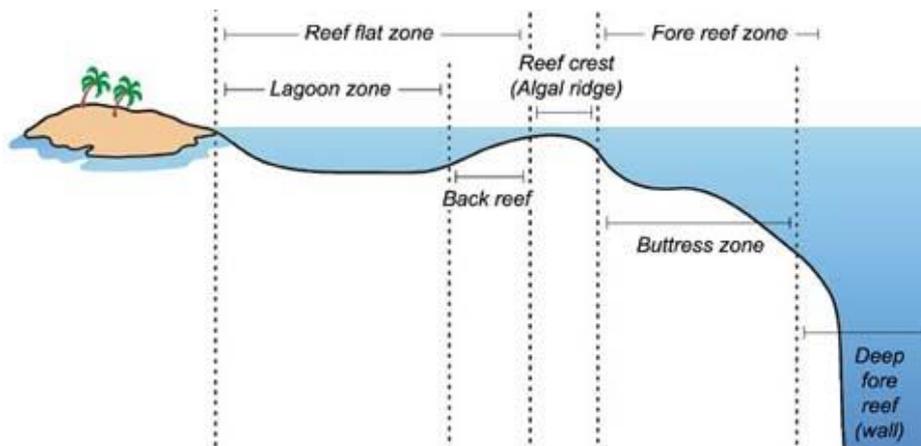


Figura 3. Principales zonas de los arrecifes coralinos (Tomada de NOAA).

## 2.2. Transformación del oleaje en arrecifes coralinos

El oleaje representa la energía dominante en la mayoría de las zonas costeras y la exposición de la costa incrementa aún más durante condiciones de oleaje extremo. En general, los procesos de transformación del oleaje son importantes debido al efecto que tiene en la hidrodinámica costera. Estos procesos están dominados principalmente por la disminución de la profundidad, ocasionando los siguientes procesos de transformación del oleaje (Dean & Dalrymple, 1991):

- 1) **Asomeramiento:** ocurre cuando el tren de olas se acerca a la costa, se observa una reducción en la longitud y un aumento en la altura de la ola.
- 2) **Rotura:** se produce cuando la altura de la ola alcanza una magnitud aproximada a la profundidad local ( $H=h$ ). La ola se vuelve inestable y rompe, generando una gran cantidad de disipación de energía por medio de la turbulencia. Por otro lado, el movimiento oscilatorio del oleaje se transforma en procesos con diferentes escalas temporales incluyendo los flujos medios y ondas infragravitatoria.
- 3) **Refracción:** ocurre cuando un tren de olas que se propaga oblicuamente interactúa con una disminución de la profundidad. El frente de la ola en aguas profundas viaja a una mayor celeridad que la parte de la ola en aguas someras, por lo tanto, se produce un giro de la ola en dirección paralela a las isobatas.
- 4) **Difracción:** se caracteriza por una transferencia de energía lateral a lo largo de la cresta de la ola y perpendicular a la dirección de propagación, cuando existe una discontinuidad en la amplitud producto de la interacción entre el tren de olas y algún obstáculo mientras se propaga en dirección a la costa.
- 5) **Reflexión:** ocurre cuando el oleaje se aproxima a la costa e interactúa con un obstáculo. Esta interacción puede generar un tren de olas en dirección contraria a la dirección incidente.

En el caso de los arrecifes coralinos, el oleaje experimenta un cambio drástico en la profundidad, dado que los arrecifes se caracterizan por la presencia de una pendiente pronunciada. Esto, provoca que las olas que se propagan a través de los arrecifes coralinos sufran transformaciones significativas debido a la variación en el fondo, la pendiente arrecifal, la reflexión en el arrecife frontal, la rotura de las olas, la fricción del fondo y la percolación sobre sustratos porosos (Nwogu & Demirbilek, 2010). La mayor parte de la energía se disipa mediante el proceso de rotura en el arrecife frontal. Esto genera corrientes transversales y propician un incremento en el nivel medio del mar (*setup*) dentro de la laguna arrecifal.

Una parte de la energía incidente se transfiere a frecuencias bajas del espectro (*ondas infragravitatorias*) que se propagan hasta la cara de la playa. Diversos autores han demostrado que estos dos parámetros (*setup* y *ondas infragravitatorias*) dominan en estos ambientes (Pomeroy et al., 2012; Buckley et al., 2022).

En las zonas de rompientes y *swash*, la teoría lineal deja de predecir correctamente debido a la no linealidad del oleaje en estas zonas. Sin embargo, la mayoría de estos

modelos utilizan una suposición de pendiente suave (Berkhoff, 1972) que, en el caso de los arrecifes coralinos, puede ser violada. Por lo tanto, es necesario recurrir a otras teorías más adecuadas para aguas someras. Por ejemplo, los modelos numéricos que se basan en las ecuaciones de Navier-Stokes son capaces de reproducir los efectos no lineales.

### 2.2.1. Ondas infragravitatorias

Los espectros de energía de señales de oleaje y corrientes derivados de mediciones hidrodinámicas en la zona de rompientes se caracterizan por la presencia de energía en frecuencias inferiores ( $< 0.05$  Hz) a las del oleaje incidente (Masselink et al., 2011). Este movimiento se denomina *ondas infragravitatorias* u *ondas largas*, y representan fluctuaciones de agua en periodos que oscilan entre 20 segundos y 5 minutos (Masselink et al., 2019).

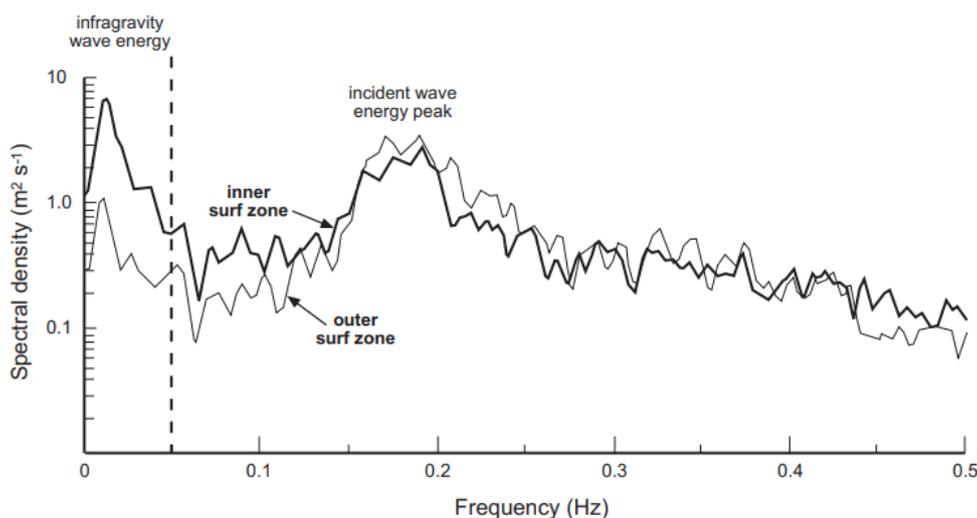


Figura 4. Ejemplo de espectro de oleaje donde se muestra la banda infragravitatoria (De Aagaard & Masselink (1999). Tomada de Masselink et al., 2011).

Existen dos mecanismos principales de generación de ondas infragravitatorias:

(1) Las ondas infragravitatorias vinculadas se generan por interacciones no lineales entre las componentes de las ondas cortas. Son ondas agrupadas de segundo orden que se propagan desde aguas profundas con la celeridad del grupo de olas primarias y se encuentran en antifase ( $180^\circ$  fuera de fase) (Longuet-Higgins & Stewart, 1962). Se asume que la onda larga vinculada se libera por la rotura de las ondas cortas en la zona de rompientes y continúa propagándose hacia la costa como una onda libre.

(2) Las ondas infragravitatorias generadas por el punto de ruptura, se generan dentro de la zona de rompientes y están relacionadas con la variación del punto de rotura de las ondas cortas (Symonds et al., 1982). Este mecanismo genera dos ondas infragravitatorias con origen en el punto de ruptura del oleaje: una ola que se propaga hacia la costa (en fase) y una ola que viaja en dirección costa afuera u *offshore* (en antifase) (Masselink et al., 2019).

En arrecifes coralinos, estudios previos han demostrado que las ondas infragravitatorias dominan los procesos sobre la llanura arrecifal y la costa. Esta energía puede quedar atrapada en la llanura arrecifal y generar un efecto de resonancia que incrementa su amplitud, por lo cual, tiene influencia en los niveles de *runup* en la cara de la playa (Péquignet et al., 2009; Nwogu & Demirbilek, 2010). La resonancia ocurre cuando las ondas estacionarias reflejadas en la costa coinciden con la geometría del arrecife. Por lo tanto, cada ola que se propaga en dirección a la costa añade energía a la ola atrapada (Buckley et al., 2022). La amplificación resonante ocurre cuando las frecuencias de las ondas infragravitatorias (0.004-0.04 Hz) y de frecuencias muy bajas (<0.004 Hz) en la llanura arrecifal coinciden con la frecuencia natural del arrecife (Pearson et al., 2017):

$$f_n = \frac{(2n+1)\sqrt{gh_{reef}}}{4W_{reef}} \quad (1)$$

donde  $n$  es el número de modo,  $g$  es la gravedad,  $h_{reef}$  y  $W_{reef}$  es la profundidad y el ancho de la llanura arrecifal, respectivamente.

### 2.2.2. Setup y runup

El *setup* se define como la sobre-elevación del nivel del mar inducida por la rotura del oleaje en aguas someras. Longuet-Higgins & Stewart (1962) explicaron el *setup* de manera matemática mediante el concepto de *tensor de radiación*, definido como el exceso de flujo de *momentum* debido a la presencia de las olas. Durante la propagación del oleaje existe una transferencia de *momentum* debido a las variaciones de presión y velocidad debajo de las olas. El tensor de radiación se puede calcular con base en la teoría lineal (Masselink et al., 2011) como se muestra en la siguiente ecuación:

$$S_{xx} = \frac{3}{2}E = \frac{3}{16}\rho gH^2 \quad (2)$$

donde  $S_{xx}$  es la componente transversal del tensor de radiación en aguas someras,  $E$  es la energía del oleaje,  $g$  es la gravedad,  $\rho$  es la densidad del agua y  $H$  es la altura de la ola. Sin embargo, cuando aplicamos esta ecuación en la zona de rompientes, queda expresada como:

$$\frac{dS_{xx}}{dx} + \rho g(h + \bar{\eta}) \frac{d\bar{\eta}}{dx} = 0 \quad (3)$$

Donde  $h$  es la profundidad local y  $\bar{\eta}$  es la variación de la superficie libre del agua.

El tensor de radiación afecta directamente en el gradiente de la superficie libre en aguas someras. Durante el asomeramiento la altura de las olas crece y, por lo tanto, también el tensor de radiación. Esto genera un gradiente positivo que debe equilibrarse con un gradiente negativo del nivel medio del mar. Esta disminución de la superficie del agua se le conoce como *setdown*. Por el contrario, después de la rotura del oleaje, la altura de las olas decrece considerablemente y, por tanto, el tensor de radiación disminuye. Esto genera un gradiente positivo del nivel medio. Este fenómeno se conoce como *setup* (Masselink et al., 2011). En el caso de los arrecifes

coralinos, a medida que las olas cortas incidentes se propagan y rompen sobre la pendiente del arrecife frontal o en la cresta del arrecife, se generan gradientes de tensor de radiación que se equilibran principalmente mediante un aumento en el *setup* inducido por el oleaje en la llanura arrecifal (Péquignet et al., 2009; Becker et al., 2014).

Por otro lado, el remonte de la ola o *runup* se define como la elevación vertical máxima en la cara de la playa medida con respecto al nivel del mar en reposo (Stockdon et al., 2006). Por lo general, las fórmulas de *runup* para ondas irregulares se presentan en términos estadísticos del *runup*, por ejemplo, el *runup* máximo de una serie temporal ( $R_{max}$ ), o el *runup* del 2% de excedencia de las olas ( $R_{2\%}$ ). Estas formulaciones son criterios que se utilizan a menudo en la ingeniería de costas.

El *runup* se compone principalmente de dos componentes: el *setup* máximo en la cara de la playa inducido por el oleaje, y el *swash*, que se refiere al movimiento oscilante del oleaje, variable en el tiempo, en la playa (Figura 5). Dado que los diferentes procesos desencadenan oscilaciones de alta y baja frecuencia, el *swash* se analiza comúnmente en términos de frecuencia de infragravedad y onda incidente ( $S_{if}$ , 0.003-0.05 Hz y  $S_{in}$ , 0.05-0.5 Hz).

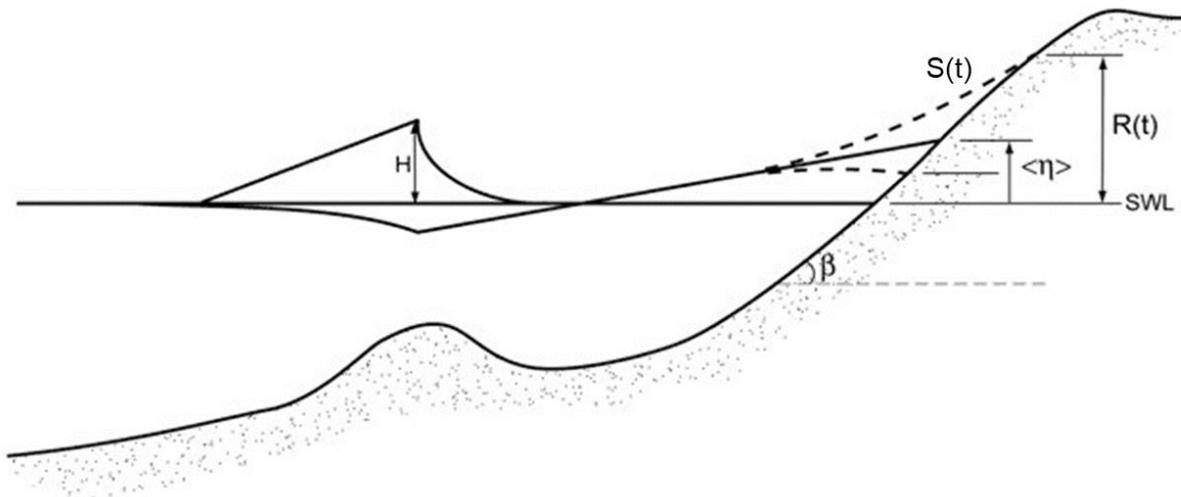


Figura 5. Componentes de runup. Tomada de <https://www.usgs.gov/centers/spcmssc/science/storm-impact-scale>.

### 2.3. Modelado Numérico

El uso de modelos numéricos para estudiar la propagación del oleaje en zonas costeras ha aumentado su popularidad debido a su capacidad para reproducir los fenómenos físicos que ocurren en la realidad. Estas herramientas han evolucionado considerablemente en los últimos años, gracias a los avances que han permitido incrementar el poder computacional.

En la actualidad, los modelos numéricos se pueden clasificar principalmente en dos tipos (Battjes, 1994):

- **Modelos promediados en la fase o modelos espectrales:** se basan en las ecuaciones de conservación de energía espectral y asumen que las propiedades de las olas varían lentamente a escala de la longitud de onda. Permiten observar la evolución del espectro de frecuencias y la altura de ola significativa ( $H_s$ ). No requieren una alta resolución espacial, por lo que pueden ser aplicados en mayores áreas. Por ejemplo, los modelos WAVEWATCH III (Tolman, 1991) y SWAN (Booij et al., 1999; Ris et al., 1999).
- **Modelos que resuelven la fase o modelos transitorios:** se basan en las ecuaciones no estacionarias de conservación de masa y *momentum*. Generalmente, estos modelos incorporan la no-linealidad del oleaje y son aplicados para evaluar la dinámica cercana a la costa inducida por el oleaje. Requieren una mayor resolución espacial y tiempo de cómputo. Algunos ejemplos son, los modelos numéricos tipo RANS (COBRAS, Lin & Liu, 1998), modelos tipo Boussinesq (BOUSS 2D, Nwogu & Demirbilek, 2010; FUNWAVE 2D, Wei et al., 1995; MIKE21 (BW), Madsen & Sørensen, 1992) y modelos no-lineales de aguas someras (ej. SWASH; Zijlema et al., 2013). Estos modelos permiten evaluar la variación de la superficie libre en el espacio y el tiempo, lo que facilita el estudio de los procesos en la zona de rompientes y *swash*. El oleaje y la hidrodinámica están completamente acopladas a través de la solución de las ecuaciones de gobierno.

Para la mayoría de las aplicaciones en ingeniería de costa y procesos costeros, los modelos transitorios más eficientes son los modelos no-lineales y los basados en la aproximación de Boussinesq. Estos, demandan un menor costo computacional en comparación con los modelos tipo RANS o LES. Por lo anterior, para este trabajo se utilizó el modelo numérico SWASH para el estudio de la transformación del oleaje en arrecifes coralinos. En la siguiente sección se hace una breve descripción del modelo SWASH y las ecuaciones de gobierno.

### 2.3.1. Modelo SWASH

El modelo Simulating WAVes till Shore (SWASH) (Zijlema et al., 2011) es un modelo no-hidrostático transitorio de código abierto desarrollado por Delft University of Technology (<http://swash.sourceforge.net>). El modelo está basado en los trabajos de Stelling & Zijlema (2003), Stelling & Duijnmeijer (2003), Zijlema & Stelling (2005, 2008), Smit et al. (2013) y Zijlema (2020). Su propósito es simular flujos rotacionales no hidrostáticos, de superficie libre, en una, dos o tres dimensiones, y es esencialmente aplicable a regiones costeras.

El modelo ha sido validado con una serie de casos de prueba analíticos, de laboratorio y de campo (Zijlema, 2012; Rijnsdorp et al., 2014; Smit et al., 2014). Estos estudios han demostrado la capacidad de SWASH de reproducir las principales características de la dinámica de las zonas de rompientes y *swash*.

El modelo contempla los siguientes fenómenos físicos (The SWASH team, 2023):

- Propagación del oleaje, dispersión de frecuencia, asomeramiento, refracción y difracción.
- Interacción no lineal ola-ola
- Rotura del oleaje
- *Runup* y *rundown*
- Movimiento de la línea de costa
- Fricción de fondo
- Reflexión y transmisión parcial
- Interacción oleaje-estructura
- Interacción oleaje-corrientes
- Interacción del oleaje con cuerpos rígidos en movimiento
- Oleaje inducido por corrientes
- Oleaje inducido por viento
- Mezcla turbulenta vertical
- Atenuación del oleaje por vegetación acuática
- Oleaje por marea
- Barras de arena
- Transporte de sedimentos no-cohesivo en suspensión

SWASH se basa en un método explícito de diferencias finitas de segundo orden para mallas escalonadas, en el que la masa y el *momentum* se conservan estrictamente en un nivel discreto. Como consecuencia, este esquema simple y eficiente es capaz de rastrear la ubicación real de la rotura del oleaje incidente (The SWASH team, 2023).

El dominio computacional consta de columnas de ancho constante en la dirección  $x$  y  $y$ , y capas verticales entre el fondo fijo y la superficie libre que varían espacialmente.

### 2.3.2. Ecuaciones de gobierno

El modelo SWASH está basado en las ecuaciones no lineales de aguas someras (NLSW, por sus siglas en inglés) con la adición de un término de presión no-hidrostática. Estas ecuaciones se derivan al integrar en la vertical las ecuaciones de Navier-Stokes con el promediado de Reynolds (RANS), que comprenden la conservación de la masa y *momentum* para un fluido incompresible con una densidad constante y una superficie libre (Zijlema et al., 2011). En un dominio horizontal bidimensional, las ecuaciones se expresan de forma no conservativa como:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{h} \int_{-d}^{\zeta} \frac{\partial q}{\partial x} dz + c_f \frac{u|u|}{h} = \frac{1}{h} \left( \frac{\partial h\tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial h\tau_{xy}}{\partial y} \right) \quad (5)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{1}{h} \int_{-d}^{\zeta} \frac{\partial q}{\partial y} dz + c_f \frac{v|v|}{h} = \frac{1}{h} \left( \frac{\partial h\tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial h\tau_{yy}}{\partial y} \right) \quad (6)$$

donde  $t$  es el tiempo, los ejes horizontales  $x$  y  $y$  están situados en el nivel de agua en reposo y el eje  $z$  en dirección vertical.  $\zeta(x, y, t)$  es la elevación de la superficie libre medida desde el nivel del agua en reposo ( $d$ ),  $h = \zeta + d$  es la profundidad total.  $u$  y  $v$  son las velocidades de flujo promediadas en profundidad en dirección  $x$  y  $y$ , respectivamente. La presión hidrostática está dada por  $q$ ,  $c_f$  es el coeficiente adimensional de fricción del fondo y  $\tau_{ij}$  representa los esfuerzos turbulentos horizontales.

La integral del gradiente de presión no hidrostática sobre la profundidad del agua en la Ecuación (5) se expresa como (Stelling & Zijlema, 2003):

$$\int_{-d}^{\zeta} \frac{\partial q}{\partial x} dz = \frac{1}{2} h \frac{\partial q_b}{\partial x} + \frac{1}{2} q_b \frac{\partial(\zeta-d)}{\partial x} \quad (7)$$

donde  $q_b$  es la presión no-hidrostática en el fondo.

Aplicando el esquema de Keller-box (Lam & Simpson, 1976) e introduciendo los términos de velocidad en dirección  $z$  en la superficie libre y en el fondo ( $w_s$  y  $w_b$ , respectivamente), la ecuación de *momentum* en vertical se expresa como:

$$\frac{\partial w_s}{\partial t} = \frac{2q_b}{h} - \frac{\partial w_b}{\partial t} \quad (8)$$

donde, los términos advectivos y difusivos han sido despreciados al ser pequeños en comparación con la aceleración vertical, la cual está determinada por el gradiente de presión no-hidrostática. La velocidad vertical en el fondo,  $w_b$ , se puede determinar:

$$w_b = -u \frac{\partial d}{\partial x} - v \frac{\partial d}{\partial y} \quad (9)$$

La ecuación de conservación de masa se expresa:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{w_s - w_b}{h} = 0 \quad (10)$$

El coeficiente de fricción del fondo se expresa como una función basada en el coeficiente de rugosidad de Manning ( $n$ ). Este coeficiente aumenta conforme la profundidad de agua decrece.

Esta expresión proporciona una mejor representación de la dinámica de las olas en la zona de rompientes en comparación con otras formulaciones de fricción conocidas, como el coeficiente de Chézy y la ecuación de Colebrook-White (Zijlema et al., 2011):

$$c_f = \frac{n^2 g}{h^3} \quad (11)$$

### 2.3.3. Rotura del oleaje

SWASH emplea un modelo de turbulencia para aproximar la mezcla turbulenta y la disipación debido a la rotura de las olas. Permite reproducir eficazmente el movimiento turbulento a gran escala en la zona de surf, suponiendo que la turbulencia se encuentra en equilibrio local. Este modelo se introduce mediante los términos de esfuerzos turbulentos, expresados como:

$$\tau_{xx} = 2V_t \frac{\partial u}{\partial x}, \tau_{xy} = \tau_{yx} = V_t \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right), \tau_{yy} = 2V_t \frac{\partial v}{\partial y} \quad (12)$$

A su vez, estos términos se basan en una aproximación de viscosidad turbulenta que determina la escala en la que ocurre la disipación. La viscosidad de remolino horizontal puede implementarse a partir de tres distintas teorías: Viscosidad de remolino constante, longitud de mezcla de Prandtl y el modelo de Smagorinsky. Sin embargo, para el caso de mezcla horizontal, se utiliza la hipótesis de Prandtl dada por:

$$V_t = l_m^2 \sqrt{2 \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2} \quad (13)$$

Donde:  $l_m$  es la longitud de mezcla considerada proporcional a una altura de ola típica,  $V_t(x, y, t)$  es la viscosidad de remolino (*eddy viscosity*) horizontal.

Las ecuaciones anteriores permiten reproducir las características generales de una rotura cuasi-estable y capturar la dinámica de las olas y corrientes en la zona de rompientes a mayor escala. Esto, debido a que no son capaces de modelar procesos como la rotura tipo voluta, arrastre de aire y la producción de turbulencia inducida por la ola después de que se vuelve inestable y se inicia la rotura (Smit et al., 2014).

SWASH considera la rotura de las olas como una discontinuidad o salto hidráulico. La conservación de *momentum* prevalece a través del salto hidráulico, por lo cual, la energía se disipa proporcionalmente a la altura de la ola local elevada al cubo ( $H^3$ ).

En el modelo SWASH, el campo de flujo en toda la columna de agua debajo del frente turbulento se considera un fenómeno de sub-malla (Smit et al., 2014). Esto requiere de una resolución vertical alta para capturar con precisión la dinámica de la rotura. Si la resolución es insuficiente, las velocidades horizontales generalmente cerca de la cresta se subestiman y se pospone el inicio de la rotura (Smit et al., 2013).

Smit et al. (2013), desarrollaron un método de aproximación frontal hidrostática (HFA) para evitar el uso de una resolución vertical fina, reduciendo considerablemente el tiempo computacional. Este método considera una tasa de cambio de la elevación de la superficie libre con respecto al tiempo.

Cuando esta condición excede cierto umbral en función de la velocidad del frente de ola, se considera el inicio del proceso de rotura:

$$\frac{\partial z}{\partial t} > \alpha \sqrt{gh} \quad (14)$$

Es decir, cuando un punto de la malla se encuentra en el frente de una ola en rotura, las aceleraciones verticales ya no se resuelven y la presión no hidrostática se establece en cero. Una vez que se inicia la rotura, el umbral  $\alpha$  se reduce a  $\beta$  ( $\beta < \alpha$ ) en puntos de la malla vecinos para permitir la persistencia del proceso. Se sugiere valores de  $\alpha = 0.6$  y  $\beta = 0.3$  (Smit et al., 2013; The SWASH team, 2023).

#### 2.3.4. Aplicaciones en arrecifes

El modelo SWASH ha sido ampliamente utilizado en el estudio de la hidrodinámica asociada a los arrecifes coralinos. En esta sección se hace una breve revisión de algunos de los trabajos relevantes registrados en la literatura.

Uno de los primeros trabajos fue el desarrollado por Zijlema (2012), quien validó el modelo SWASH con los resultados del experimento de laboratorio desarrollado por Demirebilek et al. (2007). El modelo fue capaz de reproducir la transformación del oleaje en un arrecife idealizado con diferentes condiciones de oleaje incidente y demostró la capacidad de SWASH para reproducir la propagación de las olas infragravitatorias después de la cresta arrecifal. También, la evolución espectral y el punto de rotura simulado concordaron con las observaciones.

Torres-Freyermuth et al. (2012) analizaron los niveles extremos de agua inducidos por el oleaje en la laguna de Puerto Morelos, Quintana Roo, México. El modelo fue validado con los experimentos de laboratorio de Demirebilek et al. (2007) y con mediciones de campo (Coronado et al., 2007), mostrando comparaciones satisfactorias. Posteriormente, el modelo se implementó en diferentes transectos transversales a la costa, para estudiar el papel de la geometría del arrecife en los niveles de agua extremos. Los resultados mostraron que el *setup* varía en función de la profundidad en la laguna arrecifal mientras que las ondas infragravitatorias varían en función de la anchura de la zona arrecifal. También, los resultados sugieren que los arrecifes de barrera pueden actuar como una protección natural contra las inundaciones, o como un potenciador del peligro de inundación, dependiendo de las condiciones de oleaje incidente ya que pueden llegar a producir resonancia.

Buckley et al. (2014) realizaron una evaluación de tres distintos modelos numéricos, SWAN, SWASH y XBeach. Se implementó el perfil idealizado de Demirebilek et al. (2007) y se evaluó la capacidad de predecir alturas de ola, espectros de energía, oleaje infragravitatorio y *setup*. Específicamente en el caso de SWASH, la calibración del parámetro de rotura  $\alpha = 1.5$  (originalmente  $\alpha = 0.6$ ) mejoró sustancialmente la predicción de los parámetros mencionados.

Franklin et al. (2018), analizaron el papel del sistema arrecife-duna en la protección costera bajo las condiciones climáticas actuales en Puerto Morelos. Los resultados numéricos sugieren que la degradación del ecosistema aumenta la vulnerabilidad de

la costa para tormentas con períodos de retorno menores de 10 años. Asimismo, resaltan la importancia de incluir la marea de tormenta en las simulaciones. También, sugieren que las parametrizaciones existentes en la literatura para playas no son aplicables en estos ambientes y pueden ser mejoradas incorporando características de la geometría del arrecife. Esto, motivó que Franklin & Torres-Freyermuth (2022) dedicaran esfuerzos en el desarrollo de nuevas parametrizaciones a través de la combinación de la modelación numérica y herramientas de *machine learning*. Ellos sugieren que la predicción puede mejorar al incorporar parámetros de la geometría del arrecife como la elevación de la cresta arrecifal, el ancho de la laguna, la profundidad del arrecife plano y la pendiente del arrecife delantero. Para ello, implementaron el modelo SWASH en un perfil idealizado 2DV a escala prototipo (Demirbilek et al., 2007) para la simulación de distintos casos con diferentes condiciones de oleaje incidente. El efecto de la rugosidad en el fondo, así como los procesos tridimensionales no fueron considerados en este trabajo.

Recientemente, Rijnsdorp et al. (2021) evaluaron los flujos medios bidimensionales y la dinámica del setup en el sistema arrecife-laguna de Ningaloo, Australia Occidental. El modelo se validó con mediciones de campo de alta resolución obtenidas mediante sensores en la zona de *swash*, y lograron un ajuste satisfactorio. Los resultados muestran que los flujos cercanos a la costa están dominados principalmente por la fuerza del oleaje debido a la intensa rotura. Por otro lado, el setup en la laguna arrecifal está dominado por los esfuerzos en el fondo. Liu et al. (2021) validaron el modelo con dos experimentos de laboratorio (Demirbilek et al., 2007; Liu et al., 2020) y posteriormente lo implementaron en un conjunto de 100 simulaciones para evaluar la incertidumbre en la predicción del runup en arrecifes coralinos. Estos autores muestran que la componente infragravitatoria del *swash* es el principal generador de incertidumbre. Esta componente está relacionada principalmente con la variabilidad de la rugosidad en la superficie del arrecife, lo que sugiere un mayor esfuerzo al momento de desarrollar modelos físicos y numéricos, como se sugiere en trabajos anteriores. Buckley et al. (2022) evaluaron el efecto de la rugosidad mediante el modelo SWASH aplicando un modelo de dosel que permite simulaciones del efecto de alta rugosidad en la dinámica del oleaje y flujos medios (Suzuki et al., 2019). El modelo fue capaz de reproducir las observaciones de laboratorio con superficie lisa y áspera (Buckley et al., 2015; 2016). A pesar de la diversidad de trabajos que se pueden encontrar en la literatura, los esfuerzos en evaluar condiciones de oleaje extremo y sus implicaciones en el *runup* son limitados. Por otro lado, la mayoría de los trabajos no consideran pendientes muy pronunciadas en el arrecife delantero ( $\beta_s < 1:5$ ).

## 2.4. Parametrizaciones de *runup*

El *runup* es uno de los parámetros más importantes en la ingeniería costera. A menudo, se emplea para evaluar el peligro de inundación en playas y el rebase en estructuras costeras. Debido a ello, se ha buscado desarrollar una metodología que permita predecir el comportamiento del *runup* con eficiencia.

Con el paso de los años, se han desarrollado distintas parametrizaciones empíricas para predecir  $R_{max}$  y  $R_{2\%}$ , a partir de experimentos de campo, laboratorio y modelación numérica (ej. Ruggiero et al., 2001; Stockdon et al., 2006; Medellín et al., 2016). La ventaja de las parametrizaciones empíricas con respecto al modelado físico y numérico es que permiten realizar una evaluación rápida, efectiva y de bajo costo. Estas formulaciones se basan en parámetros simples como la altura y longitud de la ola, o la pendiente de la playa. Sin embargo, existen pocos estudios en la literatura enfocados a formulaciones que incluyan parámetros morfológicos característicos de un arrecife coralino.

En la actualidad no existe una parametrización universal del *runup* debido a la complejidad de predecir los procesos no-lineales que ocurren en las zonas de rompientes y *swash*, que se complican en morfologías complejas. En esta sección se presenta un breve resumen de las parametrizaciones empíricas de *runup* relevantes aplicables principalmente en playas, desarrolladas a lo largo de los últimos años (Tabla 1), en base a la investigación de Gomes da Silva et al. (2020).

Una de las primeras parametrizaciones que se reportan en la literatura es la desarrollada por Hunt (1959), la cual propone una relación empírica entre el *runup* generado por oleaje monocromático y el número de Iribarren (Iribarren & Nogales, 1949), asociado al tipo de rotura del oleaje. Se expresa como:

$$\frac{R}{H_o} = K\xi_0 \quad \therefore R = K\beta\sqrt{(H_oL_o)} \quad (15)$$

Donde:

$K=2.3$  y  $3$  para oleaje promedio y oleaje de tormenta, respectivamente.

$\xi_0$  = Numero de Iribarren.

$\beta\sqrt{(H_oL_o)}$  = Parámetro de escala de Hunt

El parámetro de escala de Hunt ha servido de base para el desarrollo de distintas parametrizaciones, por ejemplo, Holman (1986) estudió la relación entre el punto crítico de reflexión de las olas y el *runup*, considerando la pendiente de la zona de *swash*, expresada como:

$$\frac{R_{2\%}}{H_o} = 0.20 + 0.83\xi_0 \quad (16)$$

Diversos autores han investigado el papel de la pendiente de la playa en las parametrizaciones. Nielsen & Hanslow (1991) analizaron mediciones de campo en seis playas de Australia y propusieron dos formulaciones diferentes en función de la pendiente de la playa.

Mencionan que, para pendientes suaves, el *runup* solo está en función de la altura y longitud de la ola (Ec. 17). Ruggiero et al. (2001) desarrollaron un modelo paramétrico con aplicación en playas disipativas (Ec. 18). El modelo fue validado con mediciones en diferentes playas en las costas de Oregón, Estados Unidos. Brinkkemper et al. (2013) utiliza un acoplamiento de los modelos SWAN y SWASH para evaluar la influencia de la morfología de la playa y el nivel de la marea en el *runup* (Ec. 19). Por su parte, Medellín et al. (2016) realizaron un análisis del *runup* en Dzilam de Bravo, Yucatán, México. Con esta información proponen un nuevo modelo paramétrico (Ec. 20).

$$R_{2\%} = 1.0005\beta_s(H_0L_0)^{0.5} \text{ para } \beta_s \geq 0.1,$$

$$R_{2\%} = 0.0834(H_0L_0)^{0.5} \text{ para } \beta_s < 0.1 \quad (17)$$

$$R_{2\%} = 0.27(\beta_s H_0 L_0)^{0.5} \quad (18)$$

$$R_{2\%} = 0.24(\beta_s H_0 L_0)^{0.5} \quad (19)$$

$$R_{2\%} = 0.189(\beta_s H_0 L_0)^{0.5} \quad (20)$$

Vousdoukas et al. (2012) investigaron el efecto de la marea y la velocidad del viento en el  $R_{2\%}$  en una playa de Portugal y propusieron formulaciones que incluían estos parámetros:

$$R_{2\%} = 0.53\beta_s(H_0L_0)^{0.5} + 0.58\xi_0\sqrt{\frac{H_0^3}{L_0}} + 0.45 \quad (21)$$

$$R_{2\%} = 0.503\beta_s(H_0L_0)^{0.5} + 0.878\xi_0\sqrt{\frac{H_0^3}{L_0}} - 0.016U + 0.188\eta + 0.457 \quad (22)$$

Donde:

$U$ = velocidad del viento

$\eta$ = nivel de marea

Por su parte, Atkinson et al. (2017) comparó estas formulaciones, junto con otros 10 modelos paramétricos, con mediciones de campo recopiladas en 11 playas de Australia. Los resultados mostraron una gran variabilidad entre playas y ningún modelo paramétrico fue constante. Por lo tanto, propusieron nuevas parametrizaciones que se ajustaban a sus observaciones (Ec. 23 y 24). Sin embargo, mencionan que la incertidumbre ya existente podría crecer durante condiciones de eventos extremos. En la ecuación 24, el segundo término representa la elevación debida al *setup*.

$$R_{2\%} = 0.99\beta_s(H_0L_0)^{0.5} \quad (23)$$

$$R_{2\%} = 0.92\beta_s(H_0L_0)^{0.5} + 0.16H_0 \quad (24)$$

Por otro lado, Torres-Freyermuth et al. (2019) investigaron el efecto de la incertidumbre relacionada con la aleatoriedad del oleaje en el  $R_{2\%}$ , realizando diferentes simulaciones del mismo espectro de olas en una playa plana. Propone una parametrización que incluye la incertidumbre correspondiente:

$$R_{2\%} = (1.76 \pm 0.19N_{\sigma})\beta_s(H_0L_0)^{0.5} \quad (25)$$

Donde  $N_{\sigma} = 3$ .

Stockdon et al. (2006) desarrollaron una serie de parametrizaciones que, hasta el momento, son las más aceptadas por la comunidad científica. Ellos utilizaron la información de 10 experimentos realizados en la costa este y oeste de Estados Unidos y Países Bajos. Propusieron una formulación general para  $R_{2\%}$  que incluía el *setup* y las componentes infragravitatoria e incidente del *swash* ( $\bar{\eta}$ ,  $S_{ig}$ , y  $S_{inc}$ , respectivamente). Cada una de estas componentes se obtiene de su propia formulación, basadas en el parámetro de Hunt (Ec. 26-29). Se asume que estas parametrizaciones son aplicables a arrecifes, sin embargo, estudios recientes argumentan la necesidad de incluir el factor de la morfología del arrecife para una predicción adecuada (ej. Franklin et al., 2018).

$$R_{2\%} = 1.1 \left[ \bar{\eta} + \frac{\sqrt{S_{ig}^2 + S_{inc}^2}}{2} \right] \quad (26)$$

$$\bar{\eta} = 0.35\beta_s(H_0L_0)^{0.5} \quad (27)$$

$$S_{ig} = 0.06(H_0L_0)^{0.5} \quad (28)$$

$$S_{inc} = 0.75\beta_s(H_0L_0)^{0.5} \quad (29)$$

Con el objetivo de estandarizar las parametrizaciones, Pasarella et al. (2018) utiliza herramientas de *machine learning* en forma de programación genérica para desarrollar parametrizaciones de *swash*. Demostraron que estas herramientas pueden reducir los errores en las predicciones. En base a esta metodología, Franklin & Torres-Freyermuth (2022) implementaron esta herramienta para el desarrollo de parametrizaciones de *runup* en arrecifes coralinos. Obtuvieron una parametrización dimensional y adimensional (Ec. 30 y 31, respectivamente). Sin embargo, la ecuación adimensional no puede aplicarse a profundidades con respecto a la llanura arrecifal igual a 0. También, mediante esta misma metodología, realizaron una optimización de la parametrización de Stockdon (Ec. 32).

$$R_{2\%} = 0.108(H_0) + \left(\frac{L_0}{L_w}\right) + (H_0C_r\beta_r) + 0.000186(H_0h_rL_w) \quad (30)$$

$$R_{2\%} = \left[ 0.53 + 0.099 \left( \frac{\tan(\beta_r)}{\left(\frac{H_0}{L_0}\right)^{0.5}} \right) + \frac{0.013}{\frac{C_r}{h_r} - 0.23} - 0.016 \left( \frac{L_w}{(T_p(9.82h_r))^{0.5}} \right) \right] H_0 \quad (31)$$

$$R_{2\%} = 0.227(0.0934H_0L_0 + 61.88H_0L_0\beta_r^2)^{0.5} - 1.247\beta_r(H_0L_0)^{0.5} \quad (32)$$

Donde:

$L_w$ = longitud de la laguna arrecifal.

$C_r$ = altura de cresta arrecifal.

$h_r$ = profundidad con respecto al arrecife plano.

Astorga-Moar & Baldock (2023) realizaron una serie de experimentos de laboratorio de un arrecife periférico idealizado para estudiar el *runup* en la costa. El set de datos obtenido fue comparado con diversos modelos paramétricos sin encontrar un ajuste satisfactorio. Por otro lado, se derivaron cuatro nuevas parametrizaciones basadas en la formulación de Hunt (1959) y ajustadas a condiciones de oleaje costa afuera (Ec. 33-34) y al pie de la playa (Ec. 35-36):

$$R_{2\%} = 1.36\xi_0 H_o \quad (33)$$

$$R_{2\%} = 0.91\xi_0 H_o + 0.61H_o \quad (34)$$

$$R_{2\%} = 1.09\xi_0 H_s \quad (35)$$

$$R_{2\%} = 0.84\xi_0 H_s + 0.749H_s \quad (36)$$

Tabla 1. Algunas de las parametrizaciones de *runup* y *swash* relevantes.

Autor	Modelo Paramétrico	Aplicación
Hunt (1959)	$\frac{R}{H_o} = K\xi$	Playas
Holman (1986)	$\frac{R_{2\%}}{H_o} = 0.20 + 0.83\xi_0$	Playas
Mase (1989)	$\frac{R_{2\%}}{H_o} = 1.86\xi_0^{0.71}$	Playas
Nielsen & Hanslow (1991)	$R_{2\%} = 1.0005\beta_s(H_o L_o)^{0.5}$ para $\beta_s \geq 0.1$ , $R_{2\%} = 0.0834(H_o L_o)^{0.5}$ para $\beta_s < 0.1$	Playas
Ruggiero et al. (1996)	$R_{2\%} = 0.5H_o - 0.22$	Playas
Ruessink et al. (1998)	$S_{ig} = 0.28H_o + 0.16$ $\frac{S_{ig}}{H_o} = 0.02 + 2.2\xi_0$	Playas
Ruggiero et al. (2004)	$S_{ig} = 0.33H_o + 0.33$ $S_{in} = 0.11H_o - 0.03$	Playas
Senechal et al. (2011)	$S = 2.14 \tanh(0.4H_o)$ $S_{ig} = 2.04 \tanh(0.36H_o)$	Playas
Park and Cox (2016)	$R_{2\%} = 1.1 \left( 0.35 \tan\beta_s (H_o L_o)^{0.5} + 0.5 [H_o L_o (0.563 \tan\beta_s^2 + 0.0004)]^{0.5} \right)$ $R_{2\%} = 1.1C \left( 0.35 \tan\beta_s (H_o L_o)^{0.5} + 0.5 [H_o L_o (0.563 \tan\beta_s^2 + 0.0004)]^{0.5} \right)$	Berma
Passarella et al. (2018)	$S_{tot} = 12.314\beta + 0.087T_p - 0.047 \frac{T_p}{H_o}$ $S_{tot} = 146.737\beta^2 + \frac{T_p H_o^3}{5.800 + 10.595H_o^3} - 4397.838\beta^4$	Playas

## 2.5. Modelado físico

La rotura del oleaje no se puede describir con modelos analíticos debido a la complejidad del flujo turbulento. Los estudios de campo permiten caracterizar estos ambientes de manera confiable. Sin embargo, intervienen un mayor número de variables, lo que dificulta la interpretación de datos en procesos específicos (Dalrymple, 1985).

Por otro lado, los modelos físicos permiten representar un sistema real, generalmente a escala reducida, donde la principal fuerza dominante que actúa sobre el sistema se representa en el modelo proporcionalmente (Hughes, 1993). Esta herramienta permite encontrar soluciones técnica y económicamente óptimas a problemas de ingeniería hidráulica. Además, los forzamientos se pueden controlar y variar sistemáticamente, a diferencia de las mediciones en el campo (Kamphuis, 1991). A menudo, es necesario recurrir a modelos físicos para predecir el comportamiento del prototipo y resolver problemáticas que no se examinan fácilmente en la naturaleza (Hughes, 1993). Por lo anterior, los modelos físicos juegan un papel importante en muchas de las áreas que conforman la ingeniería hidráulica.

En la actualidad, se hace referencia al concepto de modelado híbrido cuando los resultados de un modelo físico de una región compleja se utilizan como condiciones de frontera en un modelo numérico integral. Alternativamente, los resultados del modelo numérico pueden usarse para proporcionar información para las condiciones de frontera del modelo físico, También, los modelos físicos pueden ser utilizados para proporcionar información de calibración y validación para los modelos numéricos (Kamphuis, 1991).

### 2.5.1. Ventajas y desventajas de los modelos físicos

Algunas de las ventajas de usar modelos físicos para reproducir los procesos cercanos a la costa son (Dalrymple, 1985):

- El modelo físico replica los procesos físicos sin las suposiciones que deben hacerse en los modelos analíticos o numéricos.
- El tamaño reducido del modelo permite una recopilación de datos más sencilla y a un costo reducido, a diferencia de la recopilación de datos de campo que suele ser mucho más costosa y difícil.
- Permiten simular un amplio número de condiciones ambientales de manera controlada.
- Permiten obtener una retroalimentación visual del modelo y un análisis cualitativo de los procesos físicos.

A pesar de las ventajas que ofrecen los modelos físicos, existen algunos puntos desfavorables:

- Puede existir diferencias por efecto de la escala, debido a la incapacidad de simular todas las variables relevantes en la relación correcta entre sí. Los efectos de escala son para el modelo físico lo que las suposiciones en las ecuaciones de gobierno son para el modelo numérico (Le Mehaute, 1990).
- Puede ser complicado crear condiciones realistas del prototipo.
- Algunas de los forzamientos y las condiciones de contorno que actúan en la naturaleza no se incluyen en el modelo físico, y deben considerarse durante la evaluación de los resultados.
- Los modelos físicos son más caros de operar que los modelos numéricos.

A pesar de estas deficiencias, es posible modelar con precisión los procesos cercanos a la costa para una amplia gama de problemas, teniendo en consideración los efectos de escala del modelo físico.

### **2.5.2. Tipos de modelos físicos**

Los modelos físicos se pueden clasificar en base a sus características físicas en:

#### **Modelos de fondo fijo**

Estos modelos tienen límites sólidos que no pueden ser modificados por los procesos hidrodinámicos a los que son sometidos. Se utilizan para estudiar el oleaje, las corrientes o los fenómenos hidrodinámicos similares en el laboratorio bajo condiciones controladas. También, se utilizan para simular la interacción oleaje-estructura (por ejemplo: la reflexión, la transmisión y la disipación del oleaje). Los efectos de escalamiento en estos modelos son razonablemente bien entendidos y generan resultados confiables si se es cuidadoso en el desarrollo de los experimentos.

#### **Modelos de fondo móvil**

Estos modelos están conformados por material que puede reaccionar ante las fuerzas hidrodinámicas que se le apliquen, es decir, pueden responder de manera similar a los procesos que ocurren en el prototipo. Sin embargo, los efectos del escalamiento en modelos utilizados para estudiar problemas sedimentarios pueden variar. En consecuencia, los resultados de modelos de fondo móvil deben ser revisados cuidadosamente en el contexto de modelos similares que ha tenido éxito en el pasado. Ejemplos: evolución del perfil de playa, erosión de dunas, respuesta de los rellenos de playa a las tormentas, entre otros.

### **2.5.3. Condiciones de similitud y escalas**

Para asegurarse de que el modelo sea capaz de reproducir el comportamiento del prototipo lo más real posible, se deben de cumplir ciertas leyes básicas de similitud hidráulica:

- La similitud geométrica o similitud de forma, se refiere a la relación entre las dimensiones del modelo y prototipo, es decir, las escalas de líneas homólogas deben ser semejantes.
- La similitud cinemática o similitud de movimiento se cumple cuando la velocidad y aceleración tienen las mismas proporciones en el modelo y en el prototipo. Por lo tanto, también deben de tener una escala de tiempos que cumpla con esta condición.
- La similitud dinámica o similitud de fuerzas, las fuerzas ejercidas por el fluido en puntos homólogos del modelo y prototipo deben tener las mismas proporciones. Esta relación se denomina escala de fuerzas y surge de la Segunda Ley de Newton, que establece que la fuerza de inercia es igual a la suma de estas fuerzas externas (Briggs, 2013).

Los requisitos de similitud varían según el problema que se estudie y el grado de precisión deseado en la reproducción del modelo. Los modelos completamente similares son modelos en los que los valores de todos los parámetros adimensionales relevantes en el prototipo se mantienen en el modelo. La relación entre los parámetros del modelo y el prototipo se denota por la relación de escala, la cual está definida de la siguiente manera:

$$N_x = \frac{X_p}{X_m} = \frac{\text{Valor de } X \text{ en prototipo}}{\text{Valor de } X \text{ en modelo}} \quad (37)$$

donde  $N_x$  es la relación de escala de prototipo a modelo del parámetro  $X$  y los subíndices  $p$  y  $m$  representan al prototipo y modelo, respectivamente.

Generalmente, el modelado físico se puede simplificar como la interacción de dos fuerzas principales, ya que las otras fuerzas involucradas juegan un papel menor (Briggs, 2013). Esto es posible gracias al análisis dimensional, el cual es un procedimiento racional que permite combinar variables físicas en productos adimensionales, reduciendo así el número de variables que intervienen en un problema. Las variables fundamentales son magnitudes físicas que son únicamente dependientes de sí mismas, permitiendo que el resto de las magnitudes (magnitudes derivadas) puedan expresarse en función de estas.

La formulación de los productos adimensionales se puede lograr por inspección utilizando algún procedimiento formal o una combinación de ambos. El procedimiento más conocido para el desarrollo del análisis dimensional se le atribuye a Buckingham (1914). El teorema de  $\pi$  de Buckingham establece que:

*"En una ecuación dimensionalmente homogénea que implica "n" variables, el número de productos adimensionales que se pueden formar a partir de "n" variables es "n - r", donde "r" es el número de dimensiones fundamentales abarcadas por las variables".*

A partir de este teorema, han surgido distintos productos adimensionales que son importantes en el campo de la hidráulica. Estos productos se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Productos adimensionales importantes en la hidráulica. (Adaptado de Hughes (1993)).

Número de Reynolds	$Re = \frac{\rho VL}{\mu} = \frac{VL}{\nu}$
Número de Froude	$Fr = \frac{V}{\sqrt{gL}}$
Número de Euler	$Eu = \frac{F}{\rho V^2 L^2} = \frac{P}{\rho V^2}$
Número de Weber	$We = \frac{\rho V^2 L}{\sigma}$
Número de Cauchy	$Ca = \frac{\rho V^2}{E}$
Número de Mach	$Ma = \frac{V}{c}$
Número de Strouhal	$St = \frac{wL}{V}$

donde:

$\rho$ = densidad

V= velocidad

L=longitud

$\mu$ = coeficiente de viscosidad dinámica

$\nu$ =coeficiente de viscosidad cinemática

g= gravedad

F= fuerza

P= presión

$\sigma$ = tensión superficial

E= módulo de elasticidad

c = velocidad del sonido

W= frecuencia angular

Ningún fluido puede satisfacer todos los requisitos de similitud dinámica (Briggs, 2013). Dado que el mismo fluido (por ejemplo, el agua) suele usarse tanto para el modelo como para el prototipo. Por lo tanto, es imposible lograr una similitud dinámica exacta para el oleaje. La tensión superficial y la compresibilidad generalmente se desprecian ya que son relativamente pequeñas. También, la viscosidad se puede despreciar en la mayoría de los modelos de superficie libre (Briggs, 2013). Por otro lado, las fuerzas de inercia siempre están presentes.

La mayoría de los modelos hidráulicos en ingeniería costera se escalan de acuerdo con el criterio de similitud de Froude, siendo el más importante al diseñar un modelo físico costero. Las fuerzas predominantes son de tipo gravitatorio y de inercia:

$$\frac{F_I}{F_g} = \frac{\rho V^2 L^2}{\rho g L^3} = \frac{V^2}{gL} = Fr^2 \quad (38)$$

Por lo tanto:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gL}} \quad (39)$$

El criterio de similitud de Froude requiere que el número de Froude sea igual en modelo y prototipo:

$$F_r = \left( \frac{v}{\sqrt{gL}} \right)_m = \left( \frac{v}{\sqrt{gL}} \right)_p \quad (40)$$

La Tabla 3 muestra los factores de escala derivados del criterio de similitud de Froude para variables comúnmente utilizadas en modelos físicos (Briggs, 2013).

Tabla 3. Factores de escala de Froude para distintas variables. (Adaptado de Briggs (2013)).

Variable	Unidades	Similitud	Escala de Froude
Longitud	L	G	$\lambda$
Área	L <sup>2</sup>	G	$\lambda^2$
Volumen	L <sup>3</sup>	G	$\lambda^3$
Angulo	deg	G	1
Tiempo	T	K	$\lambda^{0.5}$
Frecuencia	T <sup>-1</sup>	K	$\lambda^{-0.5}$
Velocidad	LT <sup>-1</sup>	K	$\lambda^{0.5}$
Aceleración	LT <sup>-2</sup>	K	$\lambda$
Viscosidad cinemática	L <sup>2</sup> T <sup>-1</sup>	K	$\lambda^{1.5}$
Masa	M	D	$\lambda^3$
Densidad	ML <sup>-3</sup>	D	1
Viscosidad dinámica	ML <sup>-1</sup> T <sup>-1</sup>	D	$\lambda^{1.5}$
Presión	ML <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup>	D	$\lambda$
Fuerza	MLT <sup>-2</sup>	D	$\lambda^3$
Energía	ML <sup>2</sup> T <sup>-2</sup>	D	$\lambda^4$
Potencia	ML <sup>2</sup> T <sup>-3</sup>	D	$\lambda^{3.5}$

\*M= Masa, L=Longitud, T=Tiempo.

G=Similitud geométrica, K=Similitud cinemática, D=Similitud dinámica.

### 3. Metodología

En el presente capítulo se describe la metodología desarrollada para el estudio de la transformación del oleaje en arrecifes coralinos durante eventos extremos. Este estudio se conforma de tres componentes principales. La primera corresponde al modelado físico. Los ensayos se realizaron en el canal de oleaje del Laboratorio de Ingeniería y Procesos Costeros del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México utilizando un modelo físico a escala 1:60. El segundo componente consiste en la calibración y validación del modelo numérico no-hidrostático SWASH. Finalmente, se evaluaron distintas parametrizaciones de *runup* basadas en los resultados de la modelación física y numérica.

#### 3.1. Zona de estudio

La zona de estudio corresponde a la región de Teahupo'o, ubicada en la costa suroeste de la isla de Tahití, Polinesia Francesa, en el sur del Océano Pacífico (Figura 6). Esta zona se caracteriza por la rotura violenta del oleaje al interactuar con el arrecife. Teahupo'o es reconocido mundialmente por ser sede de la competencia anual de surf *Billabong Pro-Tahití*, como parte del *World Championship Tour (WTC)* del circuito de surf de la *Association of Surfing Professionals World Tour*. Además, será la sede de la misma disciplina durante los Juegos Olímpicos de París 2024.

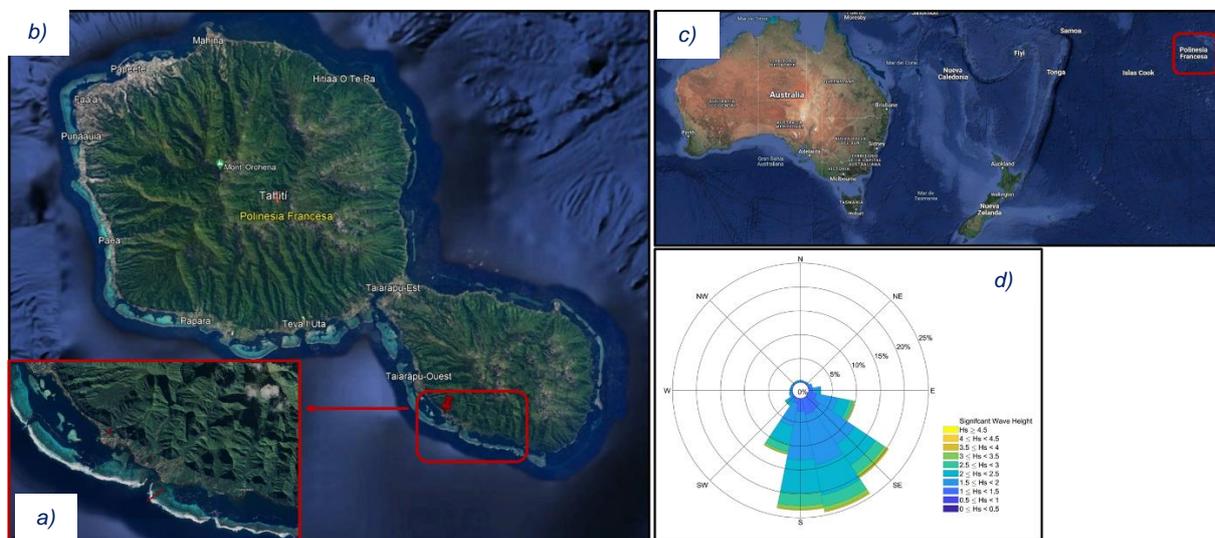


Figura 6. Ubicación de zona de estudio. a) Arrecife de Teahupo'o. b) Isla de Tahití, Polinesia Francesa. c) Polinesia Francesa con respecto a Australia. d) Rosa de oleaje de la zona de estudio.

Tahití se caracteriza por la rotura del oleaje incidente con alturas de olas de hasta 7 metros. Presenta una alta exposición de oleaje *swell* con periodos largos y medios provenientes del Pacífico sur, que recorren miles de kilómetros antes de golpear violentamente sobre su arrecife. El oleaje se proviene principalmente desde el sur, desde SW hasta SE (Hansen, 2022).

Otra característica importante en este arrecife es la inusual batimetría de Tahití, la cual presenta un cambio abrupto en la profundidad del fondo marino justo antes de la presencia del arrecife.

Tahití tiene una pendiente pronunciada de aguas profundas a someras. El fondo cae a más de 300 m de profundidad a tan solo 0.5 km de la costa, y a más de 1600 m de profundidad a 4.8 km de la costa.

Como resultado, la propagación del oleaje no se ve afectada por el fondo del océano sino hasta que se encuentran a menos de 1 km de la costa, lo que genera una rotura de ola en voluta muy particular, caracterizada por una lengua ancha sobre el arrecife somero de Teahupo'o.

La batimetría local alrededor de Teahupo'o se caracteriza por la presencia de un arrecife de coral extremadamente poco profundo, que alcanza una profundidad mínima de hasta 51 cm con respecto a la superficie del agua. El oleaje incidente se eleva rápidamente desde las profundidades, incrementado su altura debido al asomeramiento en el borde de la plataforma arrecifal poco profunda que sobresale desde la profundidad de 45 m en una pendiente de proporción aproximada 1:1. Cruzando la profundidad de 6 m, en la zona de surf, la pendiente disminuye a una proporción de 1:3 (Surflin Forecast Team, 2022).

### 3.2. Modelado físico

#### 3.2.1. Infraestructura

Los ensayos de laboratorio se llevaron a cabo en el canal de oleaje del Laboratorio de Ingeniería y Procesos Costeros (LIPC) perteneciente a la Unidad Académica Sisal del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (Figura 7). El canal de oleaje tiene una longitud de 40 m, ancho de 0.8 m, y altura de 1.27 m.



Figura 7. Canal de Oleaje del LIPC de la Universidad Nacional Autónoma de México.

El canal está conformado, en la parte central, por láminas de cristal templado montadas en una estructura de acero, para facilitar la visualización, y dos cascos de concreto en los extremos. En uno de los extremos se ubican la zona de generación donde se posiciona la pala y en el extremo opuesto se ubica la zona de disipación. En la Figura 8 se muestran las dimensiones de las zonas descritas anteriormente.

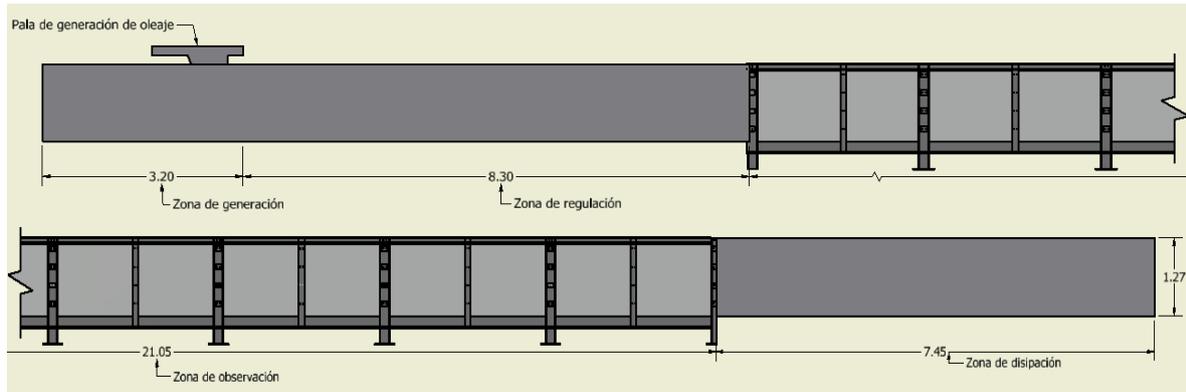


Figura 8. Esquema de canal de oleaje.

El canal de oleaje está equipado con un generador de oleaje unidireccional (GOU), conformado por una pala tipo pistón con una potencia de 7.5 KW y 1.2 m de carrera. Este sistema es capaz de generar oleaje regular, oleaje irregular de segundo orden, y ondas solitarias (Figura 9) (VTI, 2015). El sistema de generación utiliza el software AwaSys6, desarrollado por Aalborg University, encargado de controlar el GOU. Cuenta con un sistema de absorción activa de oleaje que suprime el oleaje reflejado que incide sobre la pala.



Figura 9. Sistema de generación de oleaje en el canal.

### 3.2.2. Diseño del experimento

Para los experimentos se construyó un modelo idealizado en 2D y a escala 1:60, del arrecife de Teahupo'o. Para definir el perfil batimétrico representativo de la zona, se utilizó la información batimétrica reportada por Harris et al. (2018). El transecto comprende desde la zona de agua profunda a 45 m hasta la laguna interior, posterior a la cresta del arrecife.

El perfil se extendió para representar una llanura arrecifal desde la profundidad máxima del interior de la laguna arrecifal. Se incluyó una playa con pendiente 1:9.64. En la Figura 10 se muestra el perfil modelado en el cual se pueden observar las condiciones típicas de la zona costera basado en la morfología del arrecife Teahupo'o y con las modificaciones antes mencionadas. Las coordenadas se muestran en la Tabla 4.

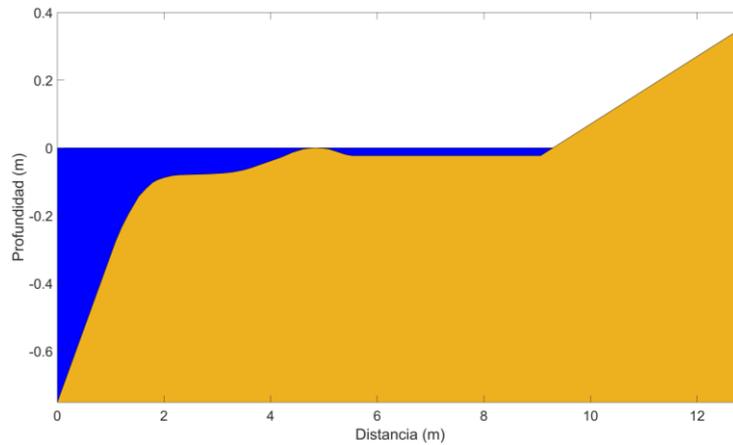


Figura 10. Perfil batimétrico construido en el canal de oleaje.

Tabla 4. Coordenadas X-Z de perfil batimétrico.

X (m)	Z (m)
0.00	0.00
1.09	0.47
1.20	0.52
1.34	0.56
1.53	0.61
1.67	0.63
1.79	0.65
1.88	0.66
2.01	0.66
2.16	0.67
2.30	0.67
2.81	0.67
3.11	0.68
3.29	0.68
3.48	0.69
3.62	0.69
4.21	0.72
4.41	0.74
4.50	0.74
4.61	0.75
4.75	0.75
4.85	0.75
4.99	0.75
5.09	0.75
5.40	0.73
5.50	0.73
5.55	0.73
5.58	0.73
9.07	0.73
12.87	1.11

Para la construcción del perfil del arrecife se consideró un modelo de fondo fijo. Se realizó el trazo con la configuración de la sección antes descrita, donde el pie del arrecife se ubicó a 18.34 m desde la pala de generación de oleaje. La construcción de la batimetría fue realizada por personal del Laboratorio de Ingeniería y Procesos Costeros (Figura 11). El modelo está conformado por una capa de bloques de concreto de 15x20x40 cm, seguido de una capa de grava de aproximadamente 20 cm de espesor y, finalmente, una capa de 5 cm de espesor de concreto ( $f_c=250 \text{ kg/cm}^2$ ). Para darle un acabado liso, se añadió una capa de concreto fino.

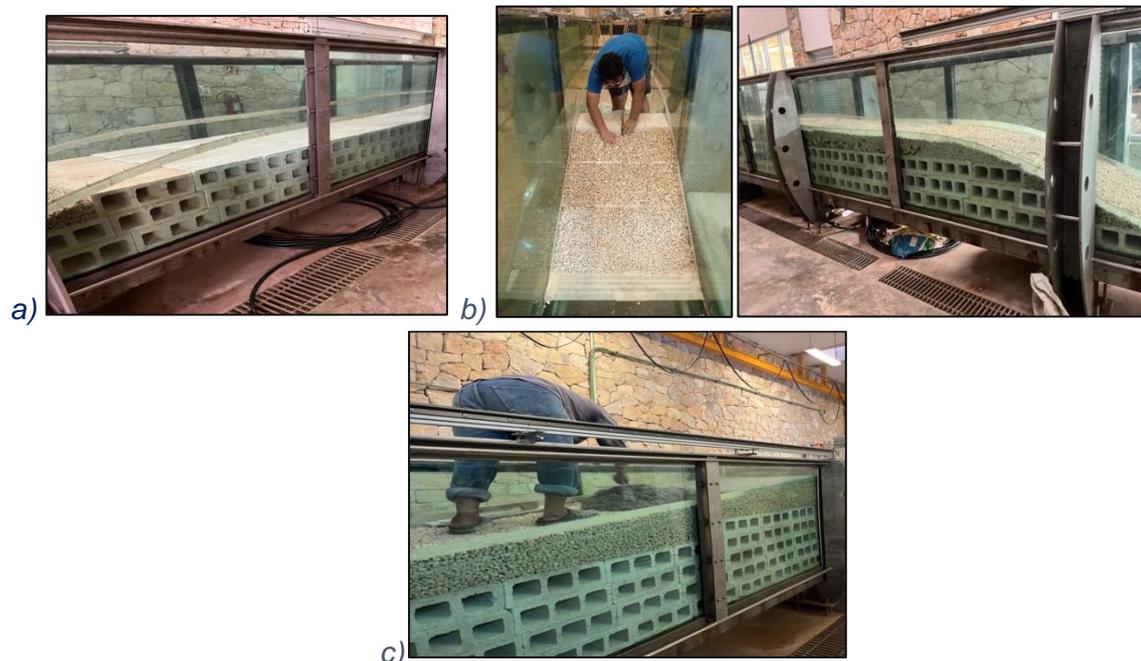


Figura 11. a) Colocación de bloques. b) Colocación de gravilla. c) Colocación de capa de concreto.

### 3.2.3. Configuración de ensayos

Se realizaron 47 ensayos con diferentes condiciones de oleaje. La Tabla 5 resume la configuración de cada uno de los experimentos. Se utilizó una base de datos de reanálisis del oleaje de ERA-5 obtenidos a una profundidad aproximada de 50 m. Los datos de oleaje tienen una cobertura de enero de 1959 a las 00:00 horas hasta el 31 de diciembre de 2021 a las 21:00 horas, con datos cada 3 horas. A partir de esta información, se realizó una caracterización del oleaje extremo donde se determinó la altura de ola significativa ( $H_s$ ) correspondiente a los periodos de retorno de 5, 10, 50, 100, 200, 500 y 1000 años (Figura 12). Se utilizó el método de máximos anuales para definir un evento extremal en función de  $H_s$ . Posteriormente, los máximos anuales se ajustaron a una función de distribución generalizada de valores extremos (GEV) para evaluar cada periodo de retorno. Para cada condición de oleaje se determinaron, arbitrariamente, periodos pico de 11.5 s y 19 s para simular oleaje tipo *swell*.

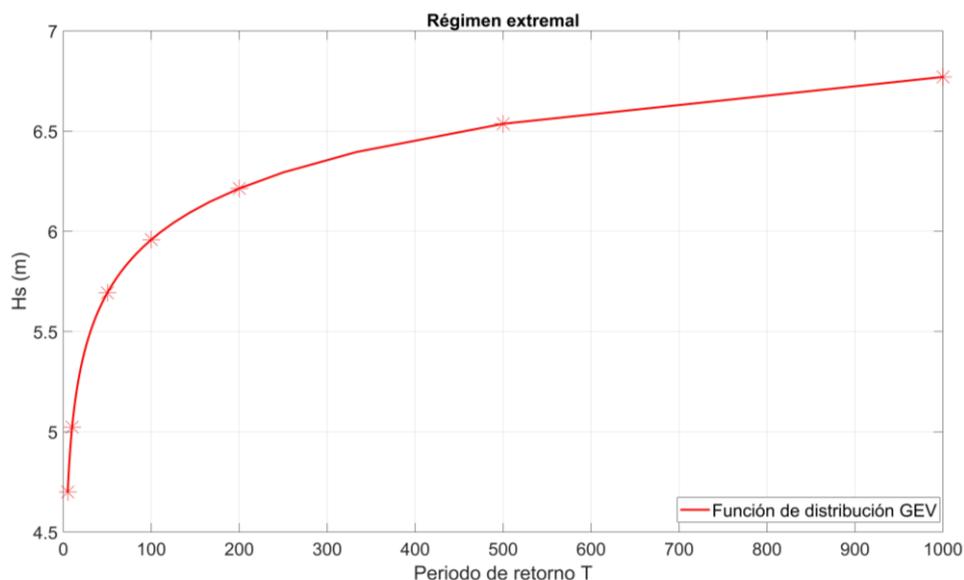


Figura 12. Altura de ola significativa correspondiente a cada periodo de retorno ensayado.

Utilizando los factores de escala de Froude, para los ensayos de laboratorio a escala 1:60, se estimaron las alturas de ola significantes asociadas a los periodos de retorno antes mencionados, para los períodos de pico espectral correspondientes (1.5 y 2.5 segundos). De acuerdo con la escala seleccionada, la profundidad total en el canal de 75.2 cm, corresponde a una profundidad real de 45 m. Para la generación de oleaje irregular de segundo orden se utilizó un espectro tipo *JONSWAP* (*Joint North Sea Wave Analysis*), con un factor de intensificación de pico  $\gamma = 3.3$  y se aplicó el método de fase aleatoria. También, se generó oleaje monocromático y ondas solitarias, bajo los mismos parámetros de altura de ola y periodo según sea el caso.

En el caso de oleaje irregular y monocromático, los ensayos tuvieron una duración de 10 minutos y se registraron mediciones a 50 Hz en cada uno de los sensores. En el caso de onda solitaria, los ensayos duraron aproximadamente 1.5 min y se registraron mediciones a 16 Hz. Para todos los datos, la adquisición de datos inició justo al momento en que el generador de olas comenzó su funcionamiento con el nivel del agua en reposo.

Tabla 5. Resumen de las condiciones de los ensayos.

Casos Ensayados				
Caso	H <sub>s</sub> (m)	T <sub>p</sub> (s)	h (m)	Oleaje
e1	0.12	2.5	0.752	Irregular
e2	0.113	2.5	0.752	Irregular
e3	0.109	2.5	0.752	Irregular
e4	0.104	2.5	0.752	Irregular
e5	0.099	2.5	0.752	Irregular
e6	0.095	2.5	0.752	Irregular
e7	0.084	2.5	0.752	Irregular
e8	0.078	2.5	0.752	Irregular
e9	0.12	2.5	0.752	Regular
e10	0.099	2.5	0.752	Regular

Casos Ensayados				
Ensayo	H <sub>s</sub> (m)	T <sub>p</sub> (s)	h (m)	Oleaje
e11	0.078	2.5	0.752	Regular
e12	0.12	1.5	0.752	Irregular
e13	0.113	1.5	0.752	Irregular
e14	0.109	1.5	0.752	Irregular
e15	0.104	1.5	0.752	Irregular
e16	0.099	1.5	0.752	Irregular
e17	0.095	1.5	0.752	Irregular
e18	0.084	1.5	0.752	Irregular
e19	0.078	1.5	0.752	Irregular
e20	0.12	1.5	0.752	Regular
e21	0.099	1.5	0.752	Regular
e22	0.078	1.5	0.752	Regular
e23	0.113	1.5	0.752	Irregular
e24	0.113	2.5	0.752	Irregular
e25	0.01	~	0.752	Onda solitaria
e26	0.02	~	0.752	Onda solitaria
e27	0.03	~	0.752	Onda solitaria
e28	0.04	~	0.752	Onda solitaria
e29	0.05	~	0.752	Onda solitaria
e30	0.12	1.5	0.752	Regular
e31	0.078	1.5	0.752	Regular
e33	0.078	~	0.752	Onda solitaria
e34	0.084	~	0.752	Onda solitaria
e35	0.095	~	0.752	Onda solitaria
e36	0.099	~	0.752	Onda solitaria
e37	0.104	~	0.752	Onda solitaria
e38	0.109	~	0.752	Onda solitaria
e39	0.113	~	0.752	Onda solitaria
e40	0.12	~	0.752	Onda solitaria
e41	0.15	~	0.752	Onda solitaria
e42	0.12	~	0.752	Onda solitaria
e43	0.113	~	0.752	Onda solitaria
e44	0.12	1.5	0.752	Irregular
e45	0.12	2.5	0.752	Irregular
e46	0.12	2.5	0.752	Regular
e47	0.12	2.5	0.752	Regular

### 3.2.4. Instrumentación

Se instalaron sensores tipo resistivo, marca VTI, de 23", 31", 39" y 78" de longitud. Los sensores permitieron medir la posición instantánea de la superficie libre con una frecuencia de muestreo de 16 y 50 Hz (Figura 13). Este tipo de sensores forman parte del Sistema de Adquisición de Datos (SAD), constituido por dos ológrafos, cada uno con 16 canales, en los cuales se registran las variaciones de voltaje producto del oleaje. La configuración de este sistema se realizó con el software WAVELAB 3 de *Alborg University* con el cual se especifican el tiempo y frecuencia de las mediciones.

A partir de los datos de voltaje medidos por estos sensores se pueden obtener las elevaciones de superficie libre mediante una curva de calibración. Los sensores de nivel se calibraron al mismo tiempo durante 20 segundos, realizando mediciones en reposo a tres niveles de agua diferentes (76 cm, 80 cm, y 84 cm) y ajustando un polinomio de primer orden a los voltajes medidos. Esto, da como resultado la conversión de las señales medidas de voltaje a centímetros. La serie temporal de elevación es utilizada para determinar las alturas y períodos del oleaje en cada sensor.



Figura 13. Sensores resistivos



Figura 14. Sensor de Runup

Se instalaron entre 15 y 17 sensores resistivos verticales, con tres configuraciones distintas. La Tabla 6 muestra las posiciones de los sensores para cada uno de los arreglos utilizados. En los casos de  $T_p = 2.5s$  y  $T_p = 1.5s$ , se modificó la posición de los sensores S2-S4 en función de la longitud de onda, para el análisis de reflexión. El sensor S9 fue añadido a partir del ensayo 9. Las figuras 15, 16 y 17 muestran los esquemas de la ubicación de los sensores para los diferentes períodos ensayados. Los sensores ubicados sobre la cresta del arrecife fueron colocados de modo que la parte inferior tocara la superficie para asegurarse de tener lecturas limpias, debido a la poca profundidad en esa sección. El sensor de *runup* fue instalado sobre la superficie de la pendiente de la playa para medir la serie temporal de *runup* generado por el oleaje (Figura 14).

Tabla 6. Distintos arreglos de sensores utilizados durante ensayos.

Sensor	Coordenada x (m) $T_p=2.5$ s	Coordenada x (m) $T_p=1.5$ s	Coordenada x (m) Onda Solitaria
S1	-16.997	-16.997	-16.997
S2	-7.946	-3.966	-4.156
S3	-7.32	-3.649	-3.839
S4	-6.384	-3.173	-3.553
S5	0	0.000	-3.331
S6	0.952	0.952	-3.173
S7	1.522	1.522	0.000
S8	1.93	1.930	0.952
S9	2.701	2.701	1.522
S10	3.857	3.857	1.930
S11	4.352	4.352	2.701
S12	4.578	4.578	3.857
S13	4.879	4.879	4.352
S14	5.19	5.190	4.578
S15	5.597	5.597	4.879
S16	8.017	8.017	5.190
S17	9.065	9.065	5.597
S18	-	-	8.017
S19	-	-	9.065

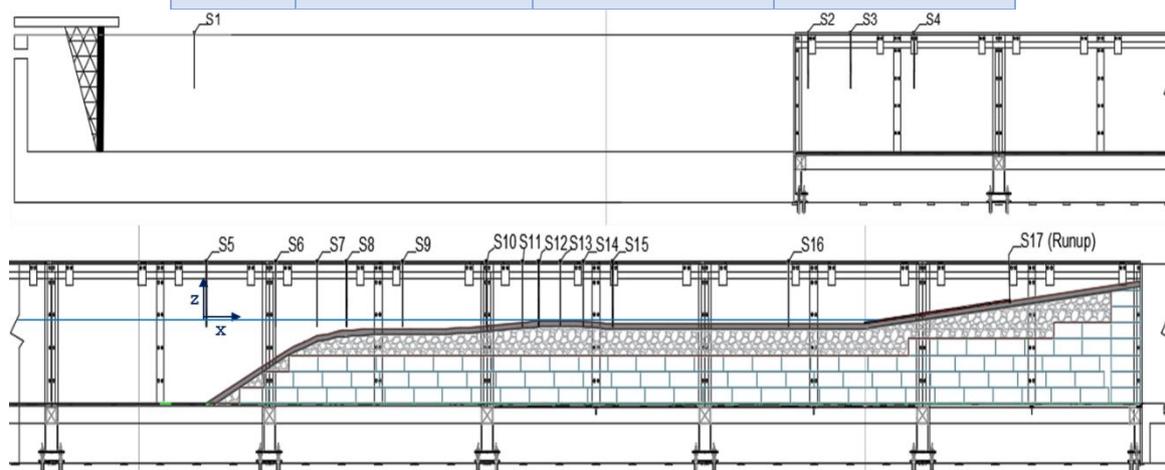


Figura 15. Esquema de ubicación de sensores resistivos para ensayos con periodo pico 2.5 s.

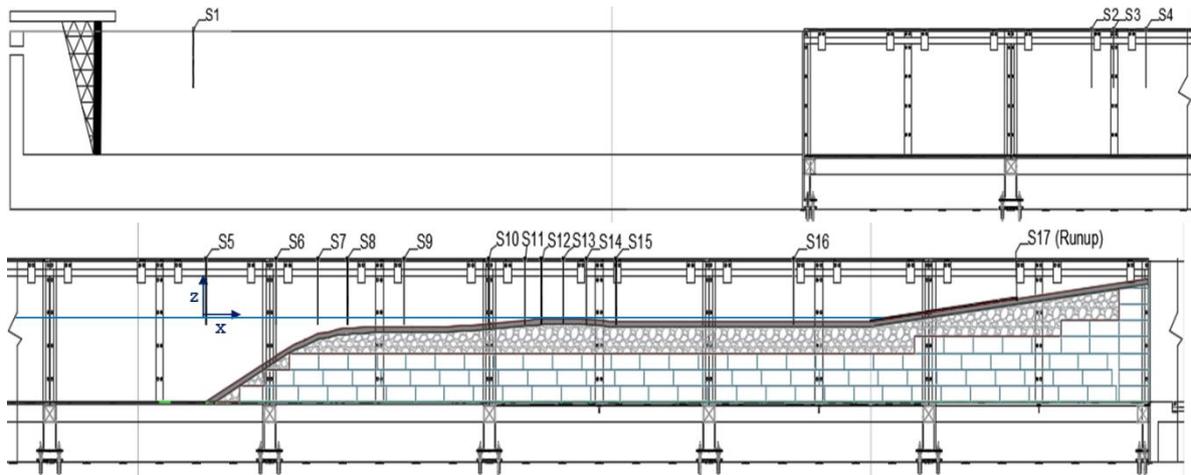


Figura 16. Esquema de ubicación de sensores resistivos para ensayos con periodo pico 1.5 s.

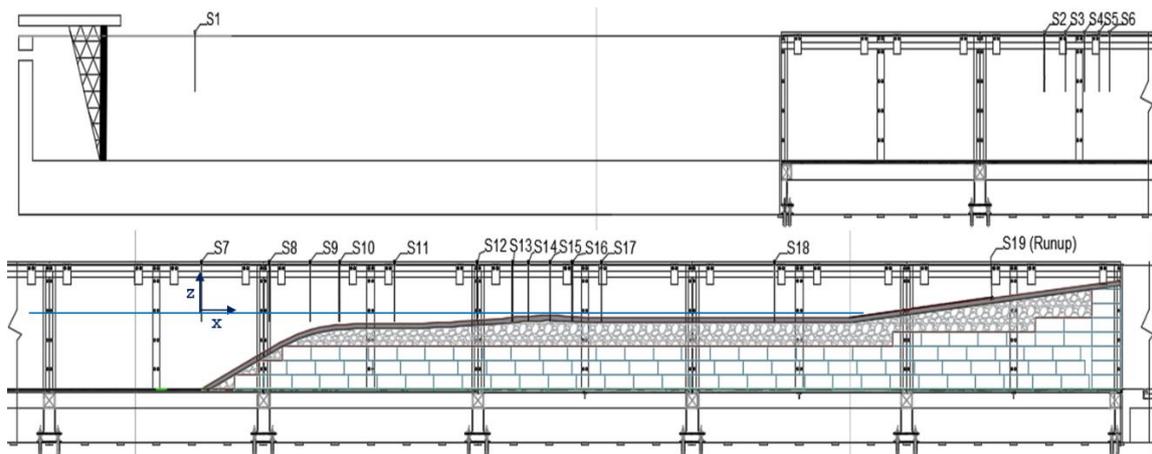


Figura 17. Esquema de ubicación de sensores resistivos para ensayos de onda solitaria.

Por último, se instaló un velocímetro electromagnético marca *Valeport* (modelo 802). El velocímetro se ubicó a 6.3 cm del fondo, en la posición del sensor S7 para los ensayos con periodos de 1.5 y 2.5 s. Por otro lado, para los ensayos de onda solitaria, el velocímetro electromagnético fue colocado en la posición del sensor S9. Este sensor es el encargado de medir el flujo en el punto de rotura (Figura 18). Las mediciones se realizaron con una frecuencia de muestreo de 16 Hz.



Figura 18. Velocímetro electromagnético Valeport.

### 3.3. Modelado numérico

#### 3.3.1. Implementación del modelo SWASH

Para la implementación del modelo no-hidrostático SWASH 2DV, se utilizó el perfil batimétrico de Teahupo'o a escala 1:60, tal y como se mostró en la modelación física (Figura 10). Se estableció el dominio computacional desde  $x = 0$  hasta  $x = 29.86$  m simulando el canal de oleaje físico. Se definió una malla regular con  $\Delta x = 0.01$  m, con un total de 2987 nodos computacionales. De acuerdo con las recomendaciones de The Swash team (2023) para la resolución vertical (Tabla 7), se determinó utilizar una sola capa ( $K=1$ ) dado que el error en la precisión es solo de 3 % para una profundidad relativa  $kd \leq 2.9$ . En la serie de casos simulados, el caso más desfavorable ( $d=0.752$  m y  $T_p=1.5$  s)  $kd= 1.48$ .

Tabla 7. Rango de profundidad relativa en función del número de capas  $K$  en SWASH (The Swash Team, 2023).

K	Rango	error
1	$kd \leq 0.5$	1%
1	$kd \leq 2.9$	3%
2	$kd \leq 7.7$	1%
3	$kd \leq 16.4$	1%

Para garantizar la estabilidad numérica en la solución de las ecuaciones, el paso de tiempo de integración ( $\Delta t$ ) se restringió según la condición CFL (Courant–Friedrichs–Lewy). Se determinó un paso de tiempo  $\Delta t = 0.01$  s y un rango para el número de Courant de 0.1-0.6. Todas las simulaciones tienen una duración de 600 s y el tiempo computacional de cada simulación es de 20-25 minutos en un ordenador Intel Core i5-8250U de 1.60GHz. De acuerdo con estudios anteriores, se utilizaron los parámetros de rotura de ola  $\alpha = 0.6$  y  $\beta = 0.3$ , para todas las simulaciones (Smit et al., 2013; 2014). Se implementó un módulo de turbulencia basado en la viscosidad de remolino horizontal. Peláez-Zapata et al. (2018) sugiere el uso de la longitud de mezcla de Prandtl  $l_m = 0.01$  m en arrecifes coralinos, por lo tanto, se utilizó ese valor en todas las simulaciones.

Para el forzamiento del modelo, se utilizaron las series temporales de superficie libre registradas en el sensor S1, siendo el sensor más alejado del arrecife. La energía en la banda de frecuencia de infragravedad está conformada por la onda libre reflejada y la onda forzada incidente (Fiedler et al., 2018). Sin embargo, SWASH considera únicamente la energía incidente como forzamiento (Rijnsdorp, 2011). Por lo tanto, para el forzamiento, la serie temporal de superficie libre se define como la superposición lineal entre las ondas cortas incidentes (ondas de frecuencia primaria) y la onda larga forzada incidente (contribución de segundo orden) (Torres-Freyermuth et al., 2010) (Figura 19). Se aplicó un filtrado de paso alto en la señal original para obtener las ondas de frecuencia primaria. Posteriormente, se calculó la componente de segundo orden con base en la teoría de Longuet-Higgins & Stewart (1960) (Baldock et al., 1996; Torres-Freyermuth et al., 2010). Por otro lado, se implementó la condición *weakly-reflective* en la frontera de generación y una condición de radiación de *Sommerfeld* al final del dominio numérico, para minimizar los efectos de la reflexión.

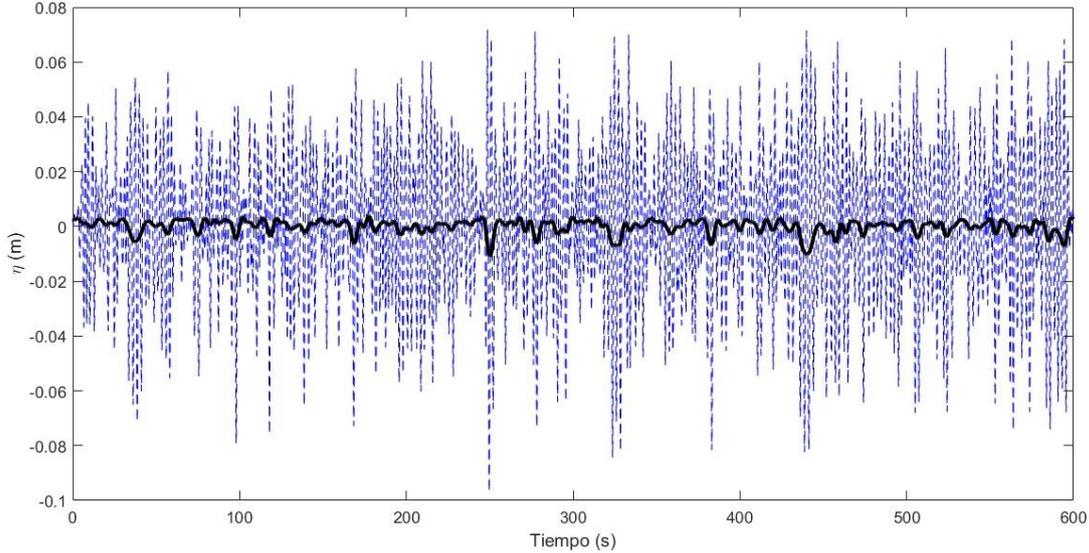


Figura 19. Serie temporal de elevación de superficie libre de forzamiento (línea punteada azul) y onda larga forzada (línea continua negra) correspondiente al Caso e1.

### 3.3.2. Calibración del modelo SWASH

El modelo SWASH es sensible a diferentes parámetros físicos, sin embargo, en simulaciones de arrecifes coralinos, el coeficiente de fricción en el fondo (Manning) toma mayor relevancia debido a su relación con la rugosidad (Peláez-Zapata et al., 2018; Franklin et al., 2018). Por esta razón, se determinó utilizar el coeficiente de Manning como parámetro físico a calibrar. La calibración consiste en realizar simulaciones para un caso de estudio (Caso e1), asignando diferentes valores al coeficiente de Manning, desde 0.009 hasta 0.022 con 7 valores intermedios, con el fin de identificar el mejor ajuste entre simulación y observación.

Se utilizaron tres parámetros estadísticos para evaluar el error en cada simulación. El coeficiente de correlación lineal de Pearson ( $r$ ), la raíz del error cuadrático medio,  $RMSE$ , y el sesgo, o  $Bias$ , se expresan como:

$$r = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M})^2} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}} \quad (41)$$

$$RMSE = \left( \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (M_i - O_i)^2 \right)^{1/2} \quad (42)$$

$$Bias = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_i - \bar{O}_i) \quad (43)$$

donde  $M_i$  y  $O_i$  son el valor simulado y observado, respectivamente;  $\bar{M}$  y  $\bar{O}$  son el promedio del valor simulado y observado, respectivamente;  $N$  es el número de datos comparados.

En el caso del coeficiente de correlación, un valor igual a uno representa un ajuste perfecto. Por otro lado, valores de  $Bias$ , superiores e inferiores a cero, representan una sobreestimación y subestimación, respectivamente.

Se calcularon los parámetros estadísticos, comparando las series temporales observadas y simuladas en cada uno de los sensores verticales y sensor de *runup* (Tabla 8). Se observa que la variación entre los parámetros estadísticos en cada sensor es mínima en función del coeficiente de fricción, sin embargo, se identificó que un valor de 0.014 otorga el mejor ajuste. Este valor es consistente con coeficientes de fricción reportados en estudios previos, utilizados en arrecifes (Yao et al., 2014, Peláez-Zapata et al., 2018).

Tabla 8. Parámetros estadísticos calculados en cada sensor correspondientes al caso 1.

Coeficiente de fricción	Parametro estadístico	Sensor															
		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	Ru
0.009	Corr. Coef.	0.9538	0.8703	0.8532	0.8397	0.6984	0.7173	0.6769	0.6021	0.6471	0.6746	0.6911	0.6846	0.7003	0.7383	0.7614	0.7666
	RMSE (m)	0.0103	0.0155	0.0161	0.0170	0.0226	0.0250	0.0323	0.0275	0.0140	0.0113	0.0121	0.0119	0.0090	0.0083	0.0078	0.0107
	BIAS (m)	0.0052	0.0058	0.0055	0.0057	0.0059	0.0043	0.0043	0.0061	0.0051	0.0034	0.0083	0.0091	0.0052	0.0048	0.0048	-0.0020
0.01	Corr. Coef.	0.9538	0.8703	0.8533	0.8396	0.6985	0.7166	0.6772	0.6020	0.6466	0.6751	0.6916	0.6853	0.7039	0.7397	0.7615	0.7680
	RMSE (m)	0.0103	0.0155	0.0161	0.0170	0.0226	0.0250	0.0322	0.0275	0.0140	0.0113	0.0121	0.0120	0.0091	0.0084	0.0078	0.0106
	BIAS (m)	0.0052	0.0058	0.0055	0.0057	0.0059	0.0043	0.0043	0.0062	0.0051	0.0035	0.0084	0.0091	0.0053	0.0049	0.0049	-0.0020
0.011	Corr. Coef.	0.9539	0.8703	0.8537	0.8394	0.6984	0.7163	0.6766	0.6013	0.6459	0.6749	0.6924	0.6864	0.7090	0.7414	0.7623	0.7694
	RMSE (m)	0.0103	0.0155	0.0161	0.0170	0.0226	0.0250	0.0322	0.0275	0.0140	0.0113	0.0122	0.0120	0.0091	0.0084	0.0078	0.0105
	BIAS (m)	0.0052	0.0058	0.0055	0.0057	0.0059	0.0043	0.0043	0.0062	0.0052	0.0036	0.0085	0.0092	0.0054	0.0050	0.0050	-0.0019
0.012	Corr. Coef.	0.9539	0.8706	0.8539	0.8399	0.6996	0.7171	0.6766	0.6009	0.6460	0.6748	0.6926	0.6877	0.7148	0.7432	0.7621	0.7706
	RMSE (m)	0.0103	0.0155	0.0161	0.0170	0.0226	0.0249	0.0322	0.0275	0.0140	0.0113	0.0122	0.0121	0.0091	0.0084	0.0078	0.0105
	BIAS (m)	0.0052	0.0058	0.0055	0.0057	0.0059	0.0043	0.0044	0.0063	0.0052	0.0037	0.0086	0.0094	0.0056	0.0051	0.0050	-0.0019
0.013	Corr. Coef.	0.9541	0.8708	0.8541	0.8399	0.6999	0.7180	0.6763	0.6002	0.6448	0.6750	0.6923	0.6865	0.7161	0.7432	0.7604	0.7708
	RMSE (m)	0.0102	0.0155	0.0161	0.0170	0.0225	0.0249	0.0322	0.0276	0.0140	0.0113	0.0123	0.0122	0.0091	0.0084	0.0079	0.0105
	BIAS (m)	0.0052	0.0058	0.0055	0.0057	0.0059	0.0043	0.0044	0.0063	0.0053	0.0038	0.0087	0.0095	0.0057	0.0051	0.0051	-0.0018
0.014	Corr. Coef.	0.9543	0.8715	0.8544	0.8404	0.7004	0.7184	0.6757	0.5998	0.6450	0.6742	0.6934	0.6873	0.7199	0.7447	0.7604	0.7722
	RMSE (m)	0.0102	0.0155	0.0160	0.0169	0.0225	0.0249	0.0323	0.0276	0.0140	0.0113	0.0123	0.0122	0.0091	0.0084	0.0079	0.0104
	BIAS (m)	0.0052	0.0058	0.0055	0.0057	0.0059	0.0043	0.0044	0.0064	0.0053	0.0039	0.0088	0.0096	0.0059	0.0052	0.0052	-0.0018
0.015	Corr. Coef.	0.9545	0.8716	0.8547	0.8409	0.7008	0.7192	0.6768	0.5991	0.6441	0.6735	0.6936	0.6876	0.7236	0.7459	0.7603	0.7732
	RMSE (m)	0.0102	0.0154	0.0160	0.0169	0.0225	0.0248	0.0322	0.0276	0.0140	0.0114	0.0124	0.0123	0.0091	0.0085	0.0080	0.0104
	BIAS (m)	0.0052	0.0058	0.0055	0.0058	0.0059	0.0043	0.0045	0.0064	0.0054	0.0040	0.0089	0.0097	0.0060	0.0053	0.0053	-0.0017
0.016	Corr. Coef.	0.9546	0.8721	0.8552	0.8413	0.7023	0.7196	0.6772	0.5982	0.6433	0.6723	0.6923	0.6868	0.7257	0.7455	0.7594	0.7725
	RMSE (m)	0.0102	0.0154	0.0160	0.0169	0.0224	0.0248	0.0321	0.0276	0.0141	0.0114	0.0124	0.0124	0.0092	0.0085	0.0080	0.0104
	BIAS (m)	0.0052	0.0058	0.0055	0.0058	0.0059	0.0043	0.0044	0.0065	0.0055	0.0041	0.0090	0.0098	0.0061	0.0054	0.0053	-0.0017
0.022	Corr. Coef.	0.9552	0.8726	0.8564	0.8429	0.7030	0.7215	0.6744	0.5951	0.6382	0.6715	0.6883	0.6795	0.7233	0.7375	0.7462	0.7668
	RMSE (m)	0.0101	0.0154	0.0159	0.0168	0.0223	0.0246	0.0322	0.0277	0.0142	0.0114	0.0128	0.0130	0.0096	0.0089	0.0084	0.0105
	BIAS (m)	0.0052	0.0058	0.0055	0.0058	0.0059	0.0043	0.0047	0.0068	0.0059	0.0047	0.0097	0.0106	0.0068	0.0059	0.0058	-0.0014

### 3.4. Análisis de los datos

En esta sección se presenta una descripción del procesamiento de datos obtenidos a partir de la modelación física y numérica. Se realizó un análisis estadístico y espectral a partir de las series temporales del oleaje en cada uno de los sensores. Se calcularon parámetros característicos del oleaje para poder evaluar los procesos relevantes. También, se analizaron las series temporales de velocidad medida por el velocímetro electromagnético en cada uno de los ensayos. Los valores experimentales pueden ser convertidos a escala prototipo mediante la escala de Froude, utilizando el factor de escala del modelo 1:60. En el caso de la velocidad de corriente y periodo del oleaje, el factor de escala es  $\sqrt{60}$ .

#### 3.4.1. Análisis del oleaje

Se obtuvieron los parámetros característicos que describen el comportamiento del oleaje. El procesamiento de los datos se realizó mediante el software MATLAB®. Para el análisis de datos no se consideraron los primeros 20 s ya que es el tiempo requerido para que las olas lleguen a todos los sensores (*spin-up*). El tiempo total de registro analizado fue de 580 s para cada caso.

Se realizó el cálculo de la densidad espectral de la serie temporal de la superficie libre del agua en cada uno de los sensores mediante la transformada rápida de Fourier, con una resolución de frecuencia de  $df=0.0031$  Hz. Posteriormente se aplicó un filtro de *Savitzky-Golay* para suavizar el espectro medido. A partir del espectro  $S(f)$  se derivan los parámetros integrales en función del momento de orden  $j$  que se define como:

$$m_0 = \int_0^{f_n} S(f) df \quad (44)$$

Este proceso permite obtener el periodo pico correspondiente como:

$$T_p = \frac{1}{f_p} \quad (45)$$

donde  $f_p$  es la frecuencia correspondiente al pico máximo de densidad espectral.

La altura de ola significativa  $H_s$  se define a partir de la siguiente formulación:

$$H_s = 4 * \sqrt{m_0} = 4 * STD(\eta(t)) \quad (46)$$

donde  $m_0$  denota el momento espectral de orden cero,  $STD$  representa la desviación estándar y  $\eta(t)$  representa la serie temporal de superficie libre.

La sobreelevación del nivel medio del agua (*setup*,  $\bar{\eta}$ ), inducido por la rotura del oleaje (Longuet-Higgins & Stewart, 1964), se calculó tomando el promedio de la serie temporal de elevación de la superficie libre del agua, en relación con el nivel medio en reposo, en cada uno de los sensores.

En el caso de las velocidades, con base en las mediciones del velocímetro electromagnético, se obtuvieron las series temporales de velocidad. Se realizó un filtrado de las señales para eliminar los valores atípicos asociados a la ausencia de

agua por efecto del *setdown*. La velocidad promedio se calculó como la media de la serie temporal de velocidad. Por otro lado, se calcularon los parámetros de kurtosis y asimetría a partir del momento de orden 3 y 4, respectivamente, de las series temporales de velocidad.

La asimetría de  $\zeta$  se define por (Fedele & Tayfun, 2009):

$$Ske = \frac{\langle \zeta^3 \rangle}{\langle \zeta^2 \rangle^{3/2}} \quad (47)$$

dónde:  $\langle \rangle$  indican un promedio de conjunto.

La curtosis de  $\zeta$  se define como (Mori & Janssen, 2006):

$$Kur = \frac{\langle \zeta^4 \rangle}{\langle \zeta^2 \rangle^2} \quad (48)$$

### 3.4.2. Análisis del runup

El *runup* se define como la elevación vertical excedida por el 2% de los eventos de *runup* ( $R_{2\%}$ ) (Holman, 1986). Los eventos de *runup* se estimaron utilizando el método de picos locales en las series temporales de *runup* modeladas y observadas (Douglas, 1990). Siguiendo la metodología de Stockdon et al. (2006), se identificaron los máximos de *runup* (picos) por encima del nivel medio del mar y se determinó un umbral de 0.005 m para restringir que el pico identificado fuese significativamente mayor que los puntos de datos vecinos (Figura 20). Posteriormente, el  $R_{2\%}$  se determinó a partir de la función de distribución acumulativa de los máximos discretos (Stockdon et al., 2006) (Figura 21). El runup máximo,  $R_{max}$  se determinó encontrando el máximo de los picos ascendentes (Lashley et al., 2018). Por otro lado, el *setup* máximo ( $\bar{\eta}_{max}$ ) se calculó como la media de la serie temporal del sensor de *runup*.

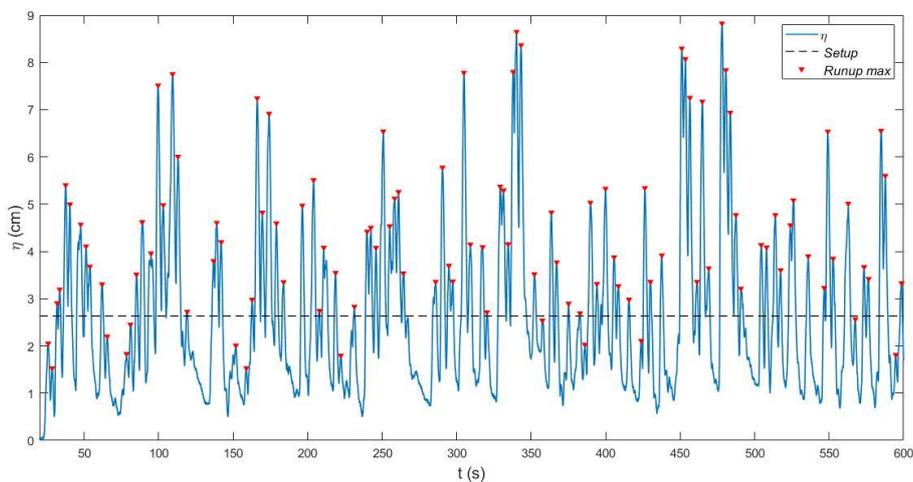


Figura 20. Ejemplo de serie temporal de runup correspondiente a ensayo e2. Se muestra la elevación del nivel del agua ( $\eta$ ), setup máximo y picos máximos de runup.

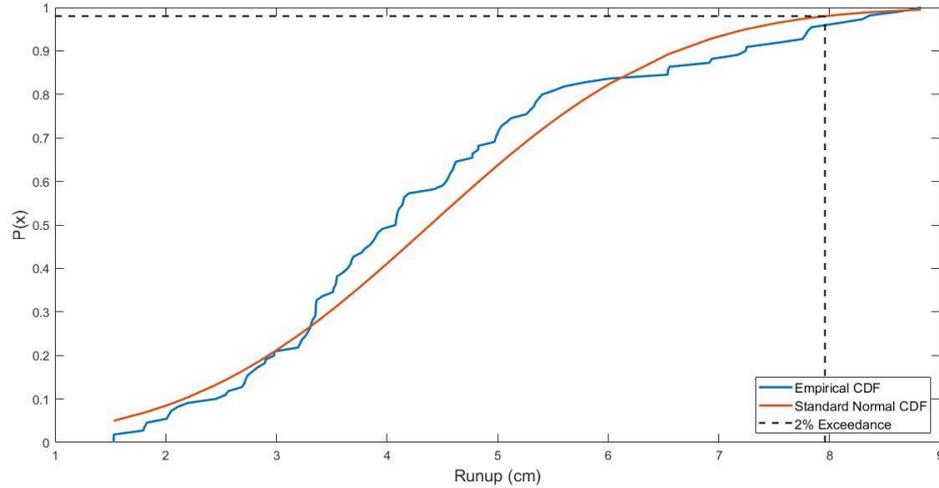


Figura 21. Función de distribución acumulada (CDF) para extraer el valor de excedencia del 2 %.

Por otro lado, la componente del *swash* puede calcularse a partir de las series temporales de *runup*. El *swash* se conforma por componentes asociadas al oleaje incidente y a las ondas infragravitatorias, a partir de la energía relacionada a cada una de las bandas de frecuencia:

$$H_{s,(if)} = 4 * \sqrt{\sum_{f_1}^{f_c} E(f)df} \quad (49)$$

$$H_{s,(in)} = 4 * \sqrt{\sum_{f_c}^{f_2} E(f)df} \quad (50)$$

donde:

$H_{s,(if)}$  = componente infragravitatoria de la altura de ola significativa de *swash*

$H_{s,(in)}$  = componente incidente de la altura de ola significativa de *swash*

$E(f)$  es el espectro de energía de la superficie libre del agua

$f_1 = df$ , es la resolución de frecuencia

$f_p$  = frecuencia pico

$f_c = f_p/2$

$f_2 = 3f_p$

Stockdon et al. (2006) proponen una relación general para calcular el *runup* y el *swash* total en función de sus componentes:

$$S = \sqrt{H_{s,(if)}^2 + H_{s,(in)}^2} \quad (51)$$

$$R_{2\%} = \langle \eta \rangle + \frac{S}{2} \quad (52)$$

## 4. Resultados

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de los ensayos en el modelo físico (Sección 4.1) y la modelación numérica (Sección 4.2). Por su parte, la sección 4.3 muestra la comparación del *runup* obtenido a partir del modelo numérico y las parametrizaciones existentes en la literatura.

### 4.1. Modelado físico

#### 4.1.1. Transformación del oleaje

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir de los ensayos realizados en el canal de oleaje, específicamente para los casos de oleaje irregular. Las Figuras 22-24 muestran la evolución del oleaje en rotura, correspondiente al caso e2 ( $H_s=0.113$  m y  $T_p= 2.5$  s). Estas imágenes fueron captadas en la zona de los sensores S7-S8, localizados al finalizar la primera pendiente (1:2.29) del perfil batimétrico (Figura 15). Se pudo identificar que el punto de rotura se localiza en la posición del sensor S7.

Se observó que, debido al cambio abrupto en la profundidad, la rotura del oleaje frecuentemente es del tipo *voluta* o *plunging*. Este comportamiento se observó con mayor consistencia durante los ensayos con  $T_p=1.5$  s. Posterior a la rotura, se genera una gran cantidad de turbulencia, y la propagación del bore turbulento a través de la cresta arrecifal. A pesar de la presencia de la cresta arrecifal, la rotura de las olas reformadas es significativamente menor. Esto tiene gran influencia en la cantidad de energía que logra llegar a la playa. Por otro lado, en distintos momentos durante el ensayo, se observó una gran acumulación de agua sobre la llanura arrecifal debido a la sobreelevación del nivel medio, o *setup*, asociado a la rotura del oleaje. Esta acumulación, al interactuar con grupos de olas altas, incide en un mayor impacto en el *runup* asociado a frecuencias infragravitatorias. También, se observó una disminución en las oscilaciones de *runup* asociadas a periodos cortos.



Figura 22. Inicio de rotura en S7. Caso e2.



Figura 23. Intermedio de rotura en S7. Caso e2.



Figura 24. Final de rotura en S7. Caso e2.

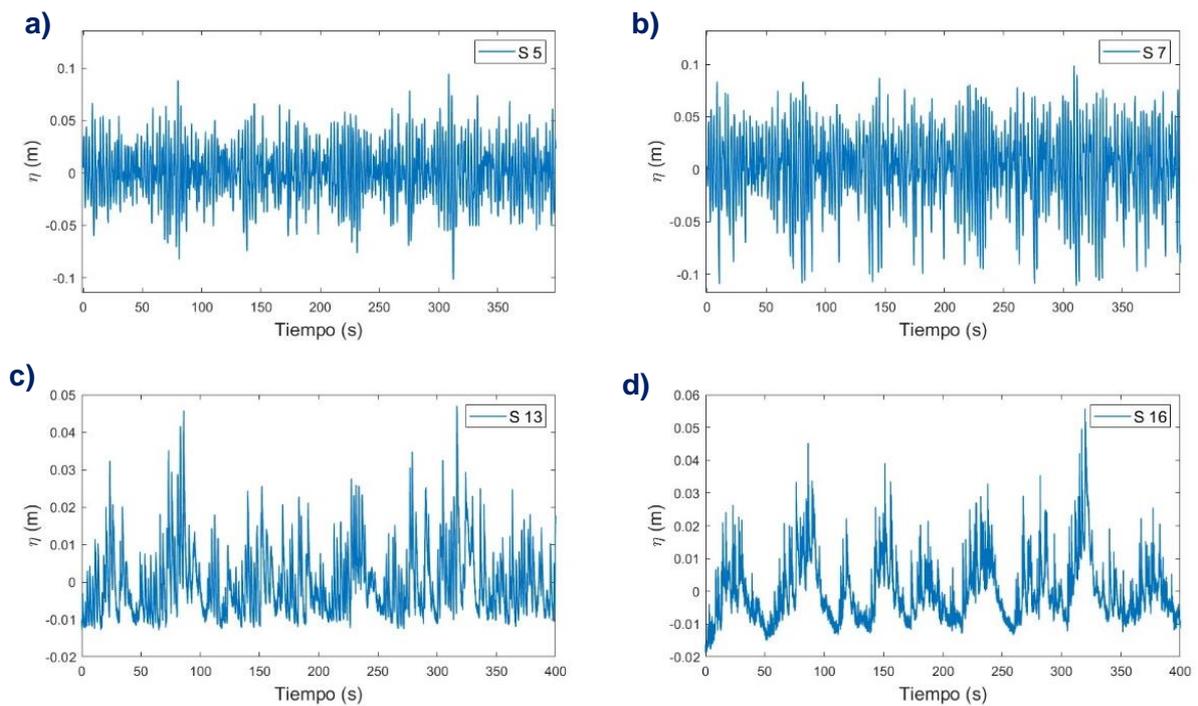


Figura 25. Series temporales de superficie libre medidos en sensores a) S5, b) S7, c) S13 y d) S16 correspondiente al caso e2.

La evolución del oleaje se analizó a partir de las series temporales de superficie libre medidas en cada uno de los sensores para cada ensayo (Tabla 6). La Figura 25 muestra un ejemplo de las series temporales obtenidas para el caso e2, correspondiente a los sensores S5, S7, S13, y S16. Estos sensores se ubicaron al pie del arrecife, punto de rotura, cresta y llanura arrecifal, respectivamente. Se observa una evolución en el nivel de la superficie libre del agua a medida que el oleaje incidente se propaga hacia la costa. En el sensor S7 se registra mayor nivel de la superficie libre, asociado al asomeramiento del oleaje. Posterior a la rotura, el nivel de la superficie libre decrece significativamente. Este comportamiento es consistente en todos los casos ensayados. Finalmente, en el sensor S17 dominan las oscilaciones de baja frecuencia.

La Figura 26 muestra la variación de la altura de ola significativa ( $H_s$ ) y el *setup* en cada uno de los sensores del caso e2. Se observa que  $H_s$  aumenta significativamente en la pendiente arrecifal (1:2.29), debido al asomeramiento del oleaje; la altura máxima del oleaje se registró en el sensor S7 ( $x=1.52$  m). Posterior a la rotura,  $H_s$  decrece gradualmente hasta alcanzar un ~50% de la  $H_s$  incidente antes de la cresta arrecifal. Después, mantiene un comportamiento cuasi-constante en la llanura arrecifal. La tasa de disipación entre la altura de ola, en *offshore* y en la llanura arrecifal, es de alrededor del 66%; esto sugiere que la tasa de disipación por fricción en el fondo tiene menor relevancia en estos ensayos.

Por su parte, el nivel medio del mar muestra un comportamiento constante hasta que interactúa con el arrecife. El *setdown* máximo se presenta en el punto de rotura y, posteriormente, el *setup* aumenta gradualmente debido a la rotura hasta alcanzar el valor máximo en la cara de la playa. En la llanura arrecifal, el *setup* representa aproximadamente un 17% de la altura de ola significativa *offshore*; por su parte, el *setup* máximo es de alrededor del 24% y se presenta en la cara de la playa, medido mediante el sensor de runup.

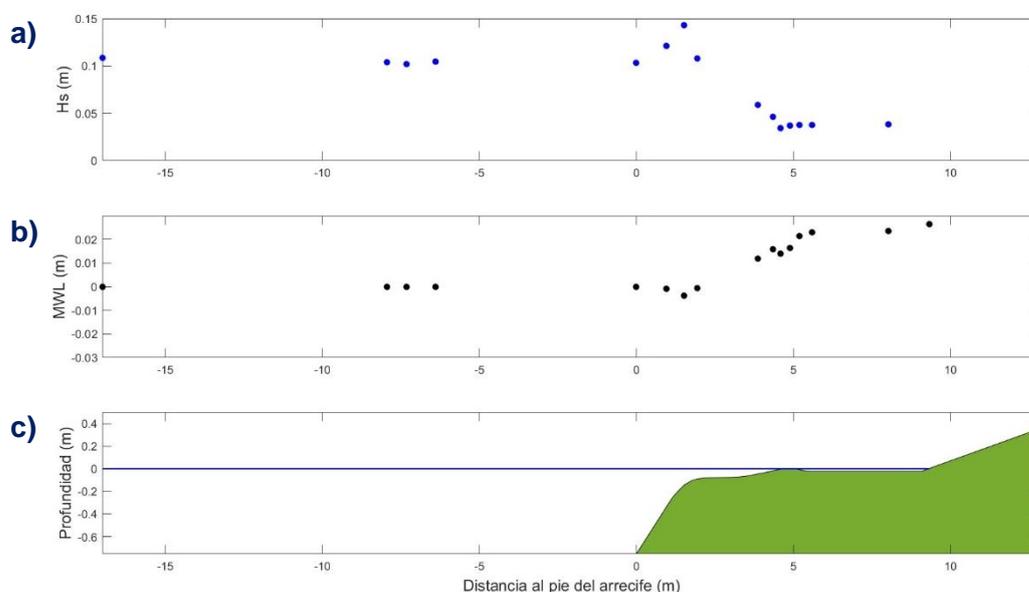


Figura 26. Resultados correspondientes al caso e2 ( $H_s=0.113$  m y  $T_p=2.5$  s). a) Altura de ola significativa. b) Setup inducido por las olas. c) Perfil del arrecife.

Se calcularon las componentes incidentes e infragravitatorias ( $H_{sin}$  y  $H_{sif}$ , respectivamente) de la altura de ola significativa medida en cada sensor, para cada caso de estudio. La Figura 27 muestra la variación de las dos componentes para el caso e2. La componente del oleaje incidente domina previo a la rotura del oleaje, representando un  $\sim 98\%$  de  $H_s$ ; posteriormente,  $H_{sin}$  se reduce gradualmente hasta alcanzar un  $\sim 16\%$  en la llanura arrecifal. A su vez, la componente infragravitatoria se mantiene relativamente constante a lo largo del dominio. Se observa un ligero pico, en el punto de rotura que puede estar asociado a la interacción con el asomeramiento del grupo de ondas cortas. Por otro lado, se observa una disminución en la cresta arrecifal. Después de la rotura, la componente infragravitatoria es un  $\sim 60\%$  mayor que la componente incidente en la llanura arrecifal.

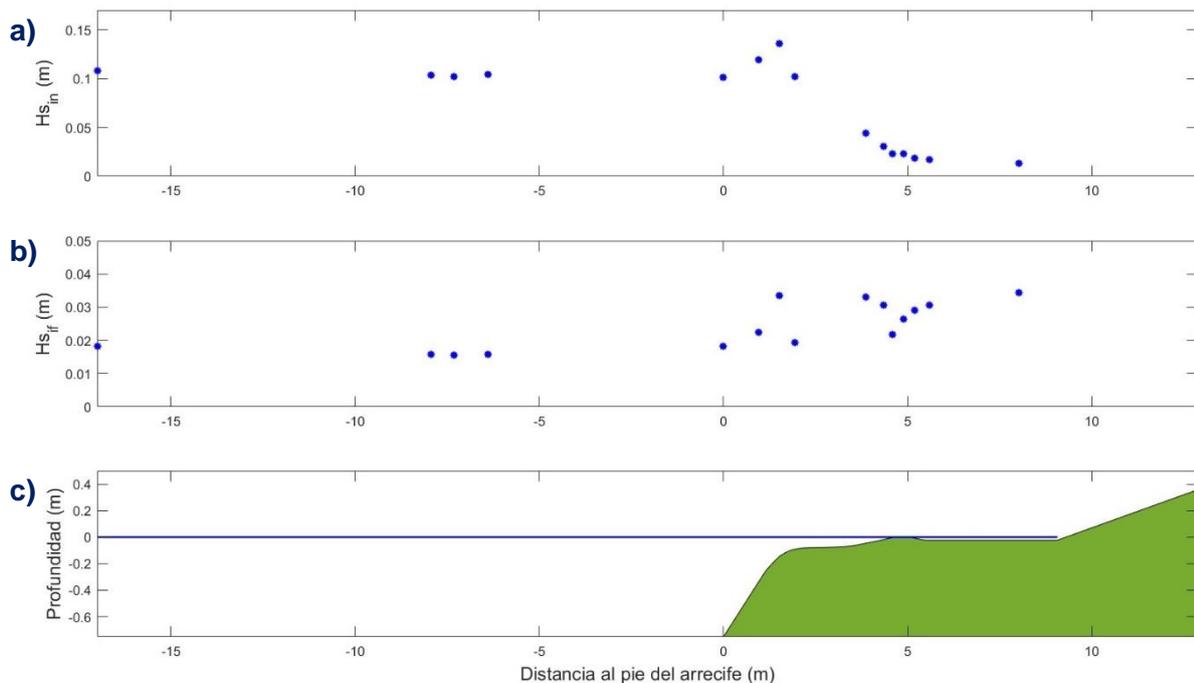


Figura 27. Componentes a) incidente y b) infragravitatoria de la altura de ola significativa. Caso e2 ( $H_s=0.113$  m y  $T_p=2.5$  s).

Lo anterior, se aprecia más claramente en los espectros de energía, obtenidos a partir de las series temporales. Las Figuras 28 y 29 muestran la variación del espectro medido en diferentes sensores para el caso e2. La energía del oleaje se concentra principalmente en la frecuencia pico incidente (0.4 Hz), en los sensores S5 y S7, ubicados al pie del arrecife y el punto de rotura. Posterior a la rotura, la energía en dicha frecuencia decrece drásticamente debido a la rotura; acompañada de un aumento gradual en las frecuencias infragravitatorias ( $f < 0.05$  Hz), que domina desde la cresta hasta la llanura arrecifal y el runup (sensores S14, S15, S16 y S17) (Figura 29).

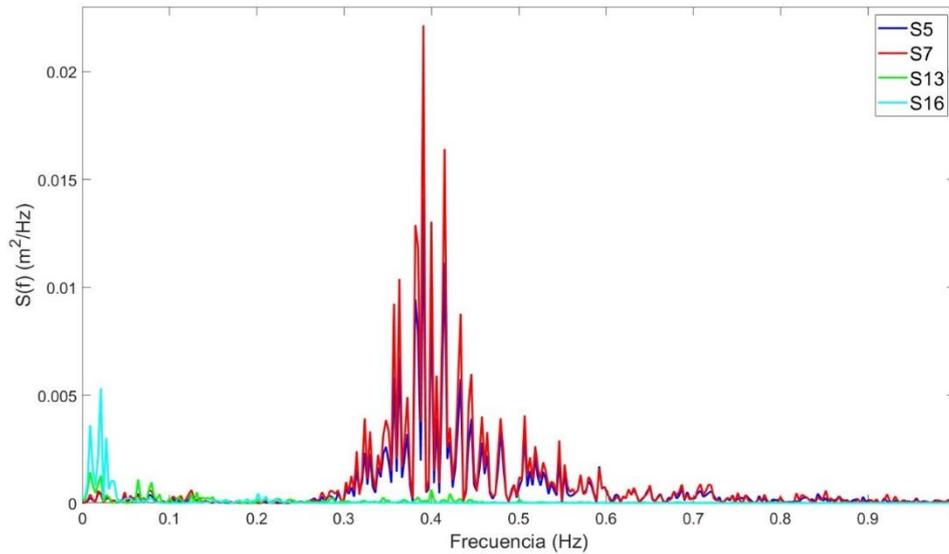


Figura 28. Espectros de oleaje medidos en S5, S7, S13 Y S16. Caso e2.

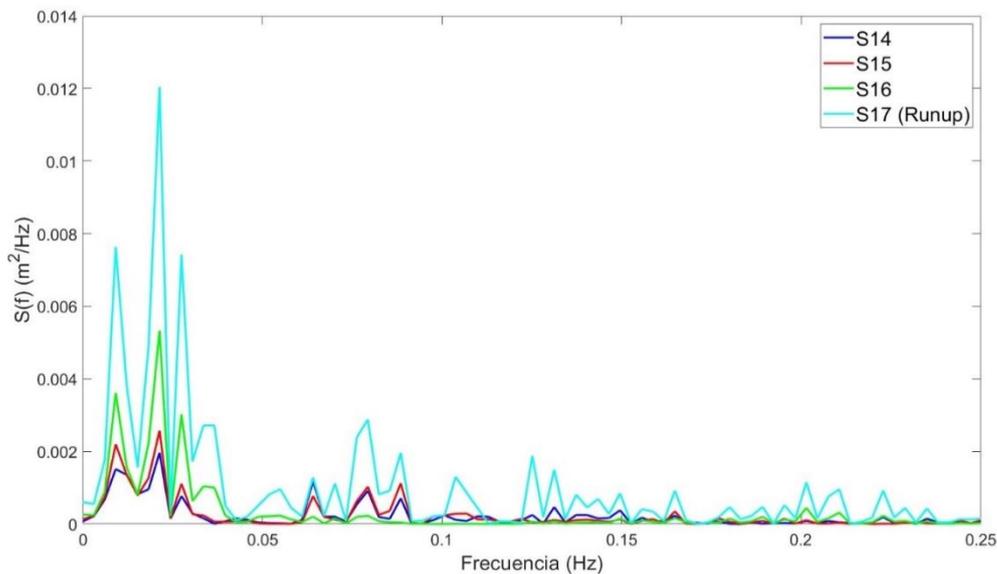


Figura 29. Espectros de oleaje medidos en S14, S15, S16 y sensor de runup. Caso e2.

#### 4.1.2. Velocidades

En base a las mediciones del velocímetro electromagnético se obtuvo la serie temporal de velocidad. Se aplicó el filtrado de *Savitzky-Golay* para los picos asociados al ruido en la señal. La Figura 30 muestra la sincronización de la velocidad de corriente y la variación en la superficie libre del agua. Se obtuvieron magnitudes de velocidad máximas cercanas a 1 m/s. Por otro lado, la velocidad de la corriente *undertow* se calculó a partir del promedio de la serie temporal de la velocidad. Sin embargo, los valores pequeños sugieren que la elevación a la cual se realizaron las mediciones no fue la indicada para capturar la corriente *undertow*. La Figura 31 muestra la velocidad promedio obtenida en función de la energía incidente. Se observa poca correlación con el parámetro de Hunt. Los valores obtenidos para la misma energía del oleaje son ligeramente mayores en los casos con periodo pico mayor (2.5 s).

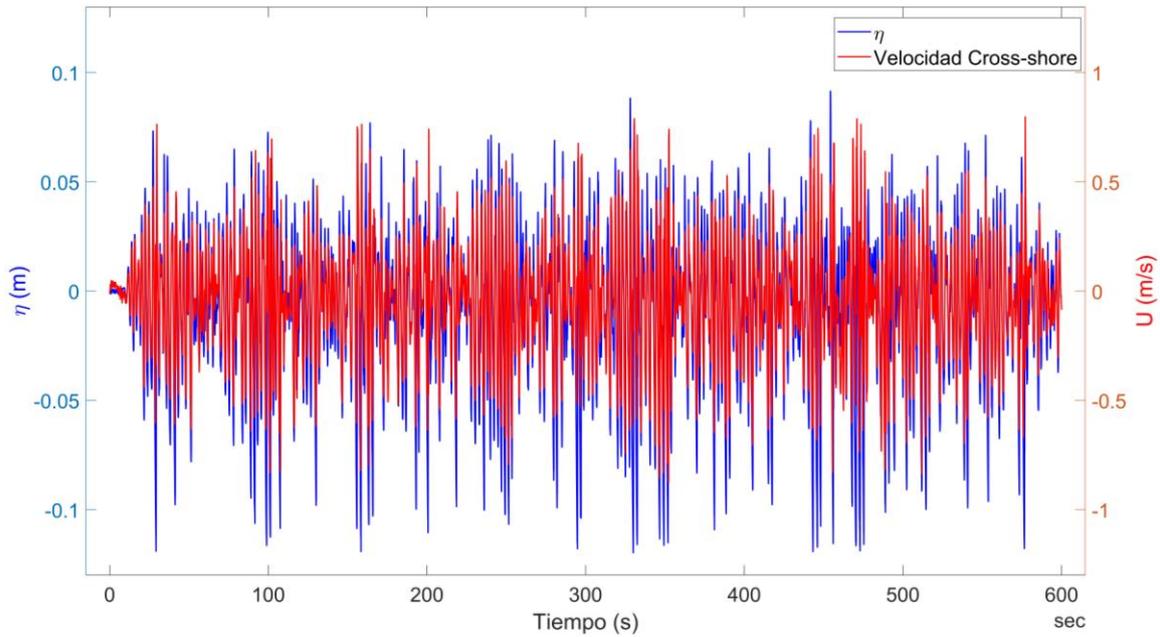


Figura 30. Sincronización de la superficie libre del agua y la velocidad de corriente, Caso e2.

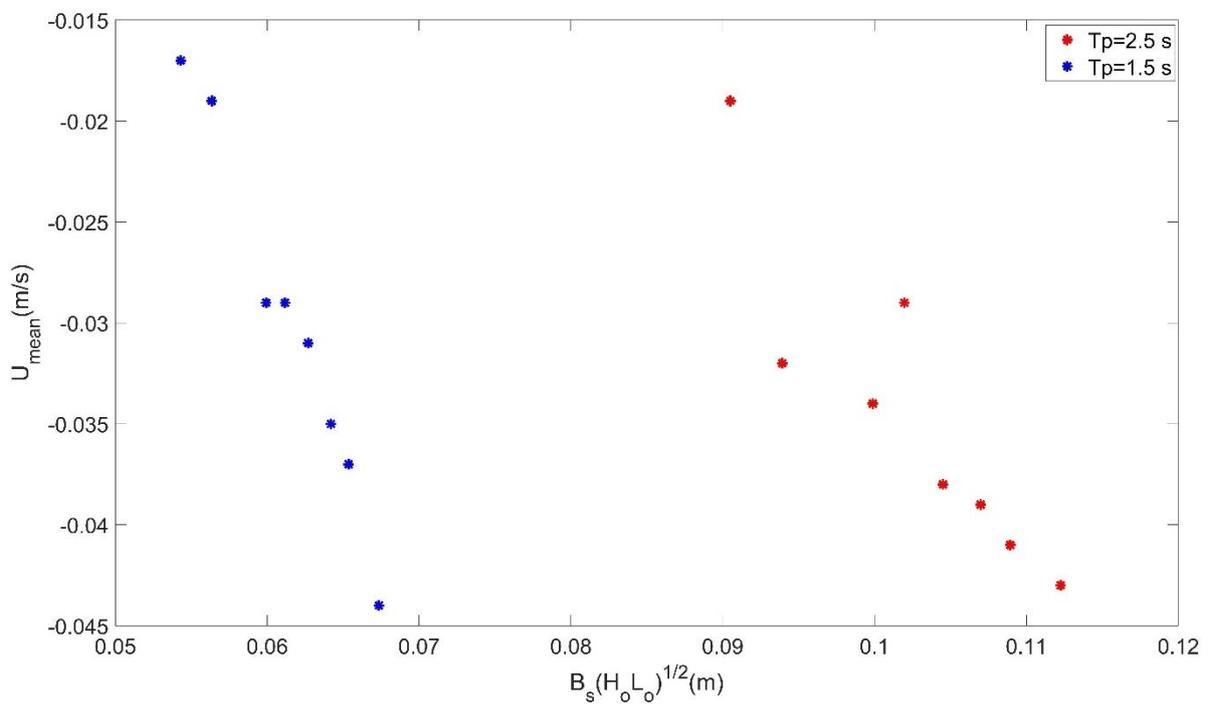


Figura 31. Velocidad promedio en función de la energía del oleaje incidente.

Por otro lado, la Figura 32 muestra los resultados de *kurtosis* y *asimetría* obtenidos en cada ensayo. En todos los casos no superó una magnitud de 0.45 y 3.1, respectivamente. Sin embargo, se encontró gran dispersión en los resultados lo que hace imposible encontrar una relación clara.

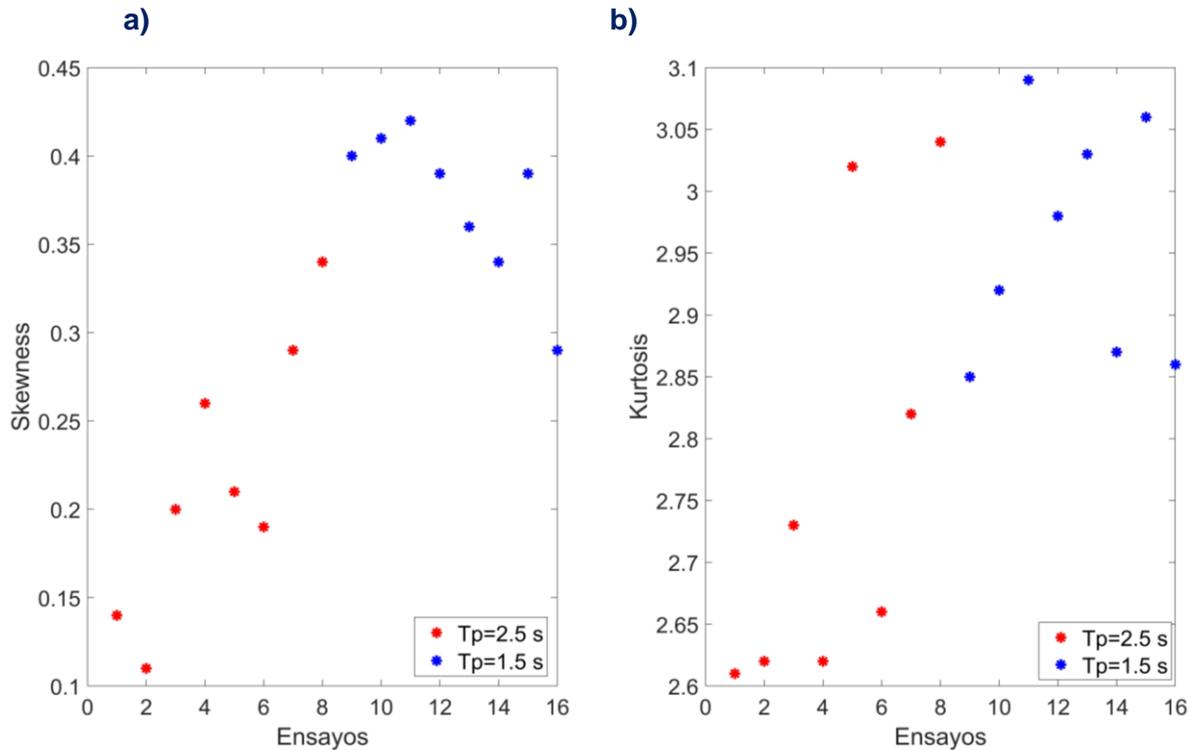


Figura 32. Valores de a) asimetría (skewness) y b) kurtosis obtenidas en cada ensayo.

#### 4.1.3. Runup

Como se mencionó en secciones anteriores, el runup se puede obtener a partir de las series temporales medidas mediante el método de máximos locales. También, las componentes del *swash* se pueden obtener mediante el espectro de energía. La Figura 33 muestra el ejemplo de la medición obtenida por el sensor de *runup*, correspondiente al ensayo e2. Los máximos corresponden a los periodos asociados con las ondas infragravitatorias.

La Figura 34 muestra la comparativa de las componentes del *swash* para cada ensayo en función del número de Iribarren ( $\xi$ ). Se observa que, en todos los casos, la componente incidente es menor a la componente infragravitatoria, por lo que, la altura de ola significativa del *swash* se encuentra dominada principalmente por la energía de infragravedad. Sin embargo, la componente de onda incidente no es despreciable para los casos más energéticos. También, se observa que ambas componentes se incrementan gradualmente en función del número de Iribarren. La mayoría de los casos ensayados se encuentran en condiciones disipativas e intermedias. La Figura 35 muestra el comportamiento de  $\bar{\eta}_{max}$ ,  $R_{2\%}$  y  $S$  en función del número de Iribarren. Se puede observar que el  $R_{2\%}$  se encuentra dominado principalmente por la altura de ola significativa de *swash*. Los tres parámetros tienden a aumentar en función del oleaje incidente, principalmente por el periodo del oleaje, y mantienen una proporción similar en la contribución de  $\bar{\eta}_{max}$  y  $S$  en  $R_{2\%}$ . Se observa que la contribución de  $\bar{\eta}_{max}$  en el  $R_{2\%}$  está por debajo del 30%, mientras que  $S$  puede llegar a representar hasta el 80% de  $R_{2\%}$ .

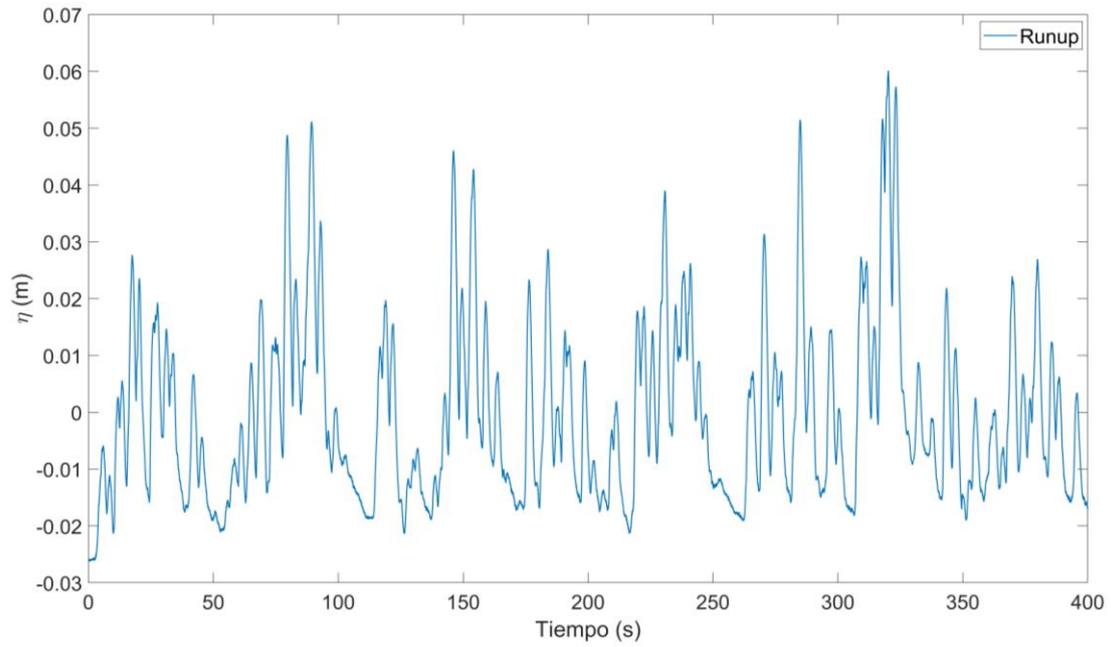


Figura 33. Serie temporal de runup correspondiente al caso e2.

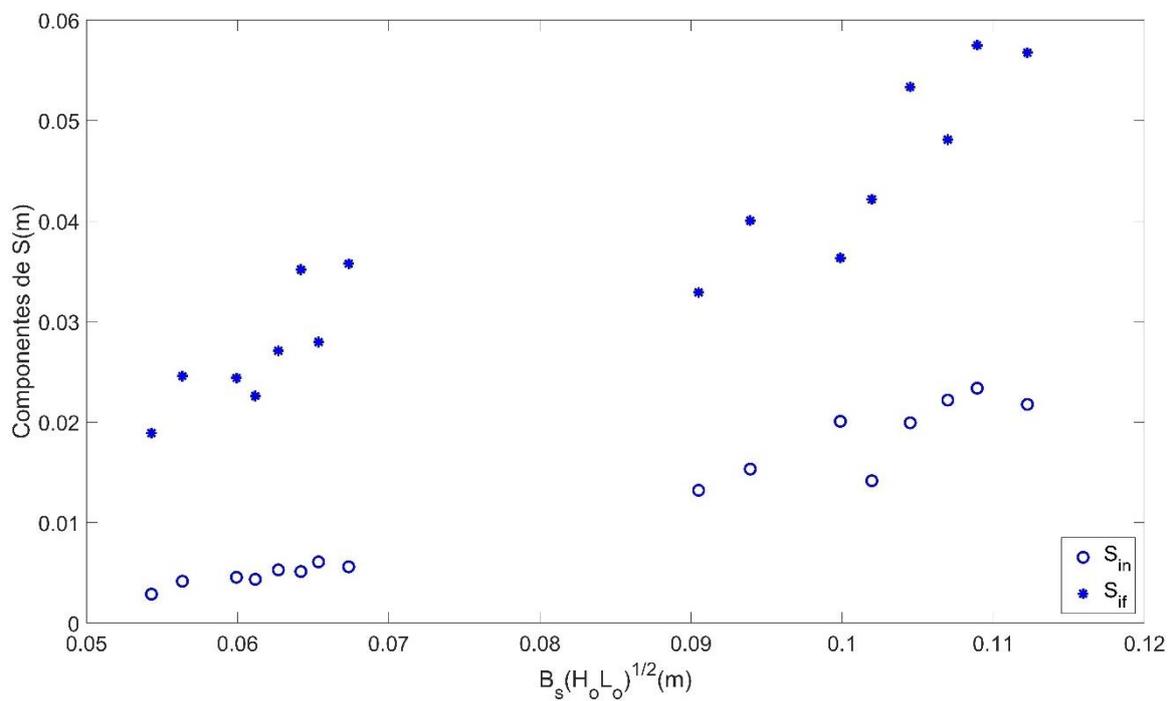


Figura 34. Swash incidente e infragravitatorio en función del parámetro de Hunt.

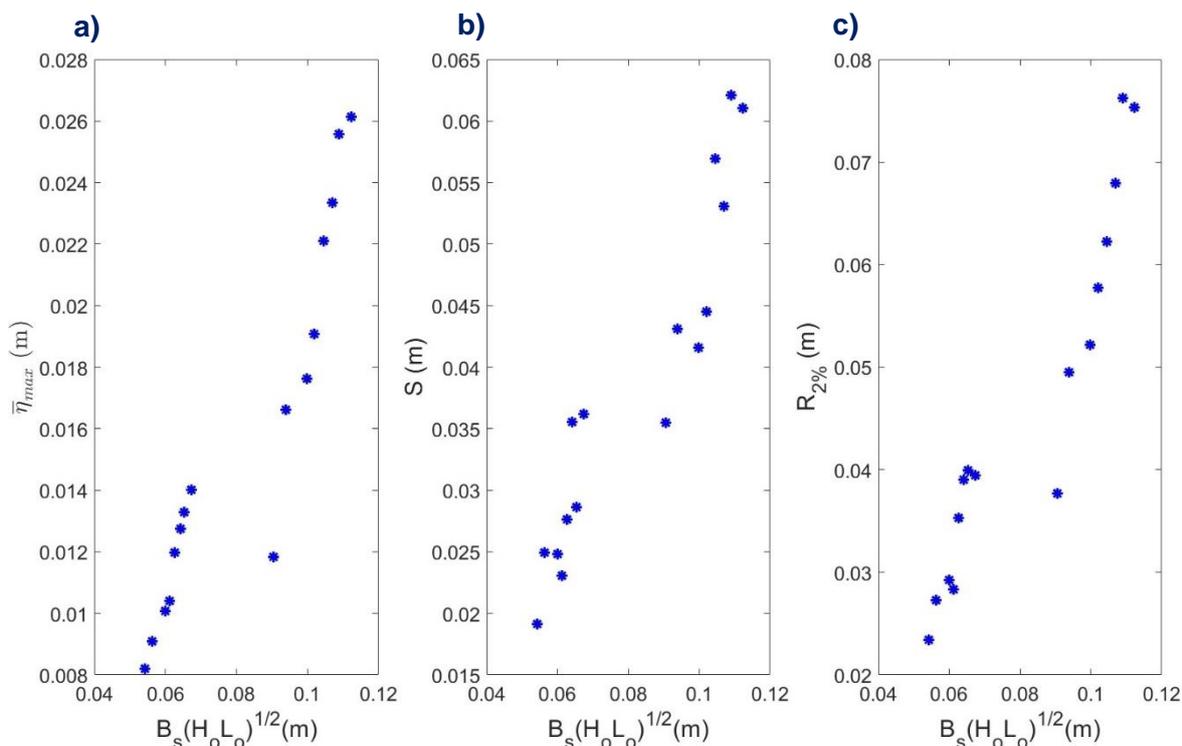


Figura 35. a) Setup máximo, b) Swash total y c) Runup 2% de excedencia en función del parámetro de Hunt.

Por último, la Tabla 9 muestra un resumen de los resultados de los ensayos convertidos a escala prototipo.

Tabla 9. Resumen de resultados a escala de prototipo.

Ensayo	H <sub>s</sub> (m)	T <sub>p</sub> (s)	$\bar{\eta}_{max}$ (m)	S (m)	R <sub>2%</sub> (m)	U <sub>max</sub> (m/s)	$\bar{U}$ (m/s)
e1	7.20	19.36	1.57	3.66	4.71	6.52	-0.33
e2	6.78	19.36	1.53	3.72	4.78	6.19	-0.31
e3	6.54	19.36	1.40	3.18	4.21	6.29	-0.30
e4	6.24	19.36	1.33	3.42	3.86	5.67	-0.29
e5	5.94	19.36	1.14	2.67	3.68	6.23	-0.23
e6	5.70	19.36	1.06	2.50	3.23	4.65	-0.26
e7	5.04	19.36	1.00	2.58	3.12	4.42	-0.25
e8	4.68	19.36	0.71	2.13	2.34	3.75	-0.15
e12	7.20	11.62	0.84	2.17	2.54	4.26	-0.34
e13	6.78	11.62	0.80	1.72	2.60	4.14	-0.29
e14	6.54	11.62	0.77	2.13	2.58	4.02	-0.27
e15	6.24	11.62	0.72	1.66	2.30	3.91	-0.24
e16	5.94	11.62	0.62	1.38	1.81	3.72	-0.23
e17	5.70	11.62	0.60	1.49	1.95	3.57	-0.23
e18	5.04	11.62	0.55	1.50	1.93	3.26	-0.15
e19	4.68	11.62	0.49	1.15	1.57	3.07	-0.13

#### 4.1.4. Análisis de reflexión

Se utilizaron las series temporales de los sensores S2-S4, colocados antes del arrecife, para medir la reflexión al pie del arrecife coralino. El software *WaveLab* fue de utilizado para separar el tren de ondas incidente y reflejado en cada uno de los casos ensayados. Este software basa su funcionamiento en el método propuesto por Andersen et al. (2017). La separación entre sensores se definió acorde a las recomendaciones expuestas por Mansard & Funke (1980), en función de la longitud de la ola calculada a partir de la teoría lineal.

Se obtuvieron las alturas de ola incidente y reflejada para cada uno de los ensayos compuestos por oleaje irregular (Tabla 10). Posteriormente se calculó el coeficiente de reflexión en porcentaje ( $K_r$ ). En todos los casos,  $K_r$  no supera el 20% de reflexión, mostrando valores similares en los casos que comparten el mismo periodo pico. Estos resultados, complementan el análisis de la transformación del oleaje y sugieren que la mayor parte de la energía incidente se disipa mediante el proceso de rotura; sin embargo, bajo condiciones más energéticas, la energía del oleaje transmitida en la llanura arrecifal podría incrementarse y tener mayor incidencia en el runup.

Tabla 10. Coeficientes de reflexión calculados a escala prototipo.

Ensayo	$H_s$ (m)	$T_p$ (s)	$H_i$ (m)	$H_r$ (m)	$K_r$ (%)
e1.dat	7.20	19.36	6.42	1.08	16.86
e2.dat	6.78	19.36	6.36	1.14	17.5
e3.dat	6.54	19.36	6.12	1.08	17.25
e4.dat	6.24	19.36	5.7	0.9	16.17
e5.dat	5.94	19.36	5.46	0.9	16.03
e6.dat	5.70	19.36	5.16	0.78	15.47
e7.dat	5.04	19.36	4.68	0.72	15.57
e8.dat	4.68	19.36	4.08	0.54	13.55
e12.dat	7.20	11.62	6.24	0.72	11.43
e13.dat	6.78	11.62	5.82	0.66	11.58
e14.dat	6.54	11.62	5.82	0.72	12.87
e15.dat	6.24	11.62	5.46	0.66	11.57
e16.dat	5.94	11.62	5.16	0.54	10.31
e17.dat	5.70	11.62	4.92	0.54	10.77
e18.dat	5.04	11.62	4.38	0.48	10.33
e19.dat	4.68	11.62	4.14	0.42	10.16

## 4.2. Modelado numérico

### 4.2.1. Validación del modelo SWASH

Para validar la capacidad del modelo numérico SWASH, se compararon los resultados numéricos con las mediciones en el laboratorio. La Figura 36 muestra las series temporales de elevación de superficie libre, observadas y simuladas, en sensores correspondientes al caso e2 ( $H_s=0.113$  m y  $T_p=2.5$  s). La Tabla 11 muestra un resumen de los parámetros estadísticos calculados en cada sensor, correspondientes al caso e2. En general, estos parámetros sugieren un buen ajuste del modelo con los resultados de laboratorio. Sin embargo, después de la rotura (S7-S9) el coeficiente de correlación lineal de Pearson disminuye ligeramente. Al propagarse cerca de la cresta arrecifal, los parámetros estadísticos mejoran gradualmente. Sin embargo, en la cresta arrecifal se observa la mayor sobreestimación por parte del modelo con relación a sensores previos (S13,  $Bias=0.0090$  m), asociado principalmente a la fricción en el fondo y a las propias limitaciones del modelo, así como dificultades para la medición de la superficie libre en esa zona tan somera. El modelo SWASH mejora la predicción en la llanura arrecifal y el *runup* (S16 y S17, respectivamente). En este último, el modelo se ajusta bien a las observaciones, sin embargo, se observa una ligera subestimación principalmente en los picos máximos ( $Bias=-0.0017$  m).

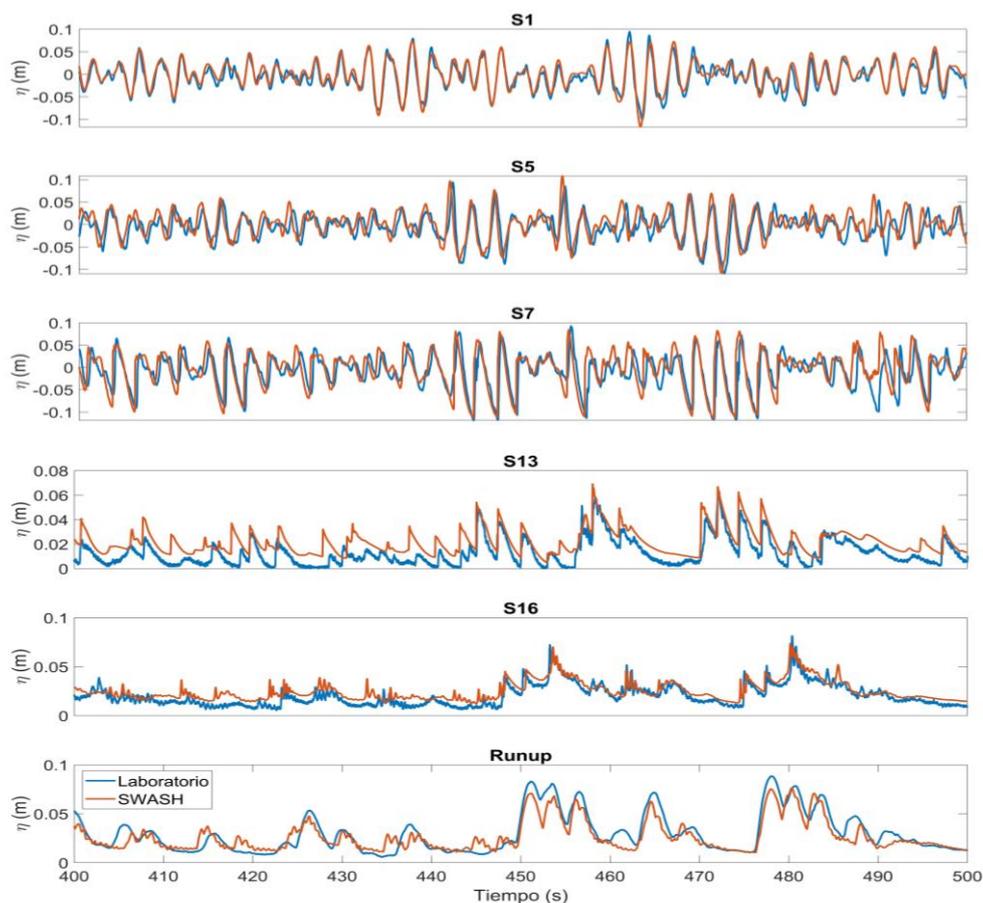


Figura 36. Validación del modelo SWASH con mediciones de superficie libre y runup en el laboratorio. Muestra las series temporales de elevación de superficie libre del agua para distintos sensores verticales y sensor de runup. Caso e2 ( $H_s=0.113$  m y  $T_p=2.5$  s).

Tabla 11. Parámetros estadísticos correspondientes a cada sensor. Caso e2.

Sensor	RMSE (m)	Bias (m)	r	r <sup>2</sup>
S1	0.0101	0.0053	0.95	0.90
S2	0.0144	0.0053	0.87	0.76
S3	0.0150	0.0052	0.86	0.74
S4	0.0159	0.0054	0.85	0.71
S5	0.0212	0.0053	0.71	0.50
S6	0.0232	0.0048	0.74	0.54
S7	0.0298	0.0041	0.70	0.48
S8	0.0266	0.0064	0.60	0.36
S9	-	-	-	-
S10	0.0142	0.0053	0.63	0.40
S11	0.0106	0.0033	0.70	0.49
S12	0.0114	0.0082	0.73	0.53
S13	0.0112	0.0090	0.75	0.56
S14	0.0084	0.0056	0.78	0.60
S15	0.0078	0.0052	0.81	0.65
S16	0.0074	0.0049	0.83	0.69
S17(R <sub>u</sub> )	0.0089	-0.0017	0.86	0.73

La Figura 37 muestra la comparación entre el laboratorio y el modelo de la variación de la altura de ola significativa ( $H_s$ ) y el *setup* a lo largo del dominio. En general se observa un buen ajuste para ambas variables, siendo más visible en el *setup*. En  $H_s$  se observa una ligera sobreestimación en el punto de rotura. A pesar de esto, presenta un buen ajuste de los parámetros estadísticos, con  $r=0.99$ ,  $RMSE=0.0075$  m y  $Bias=0.0058$  m. Por su parte, el *setup* presenta un  $r=0.99$ ,  $RMSE=0.0015$  m y  $Bias=0.00054$  m.

Por otro lado, se evaluó la capacidad del modelo de simular las componentes incidente e infragravitatoria ( $H_{sin}$  y  $H_{sif}$ , respectivamente) de la altura de ola significativa. La Figura 38 muestra la comparación entre las observaciones y las simulaciones en la variación de estas componentes en todo el dominio. Se puede observar un buen ajuste en ambos casos; sin embargo, el ajuste es más favorable en la componente  $H_{sin}$ . Esta componente presenta parámetros estadísticos de  $r=0.99$ ,  $RMSE=0.0074$  m y  $Bias=0.0057$  m. Por su parte, la componente  $H_{sif}$  presenta parámetros de  $r=0.80$ ,  $RMSE=0.0049$  m y  $Bias=0.0026$  m. La disminución en el coeficiente de correlación lineal de Pearson se asocia a la sobreestimación visible en la zona de rompientes.

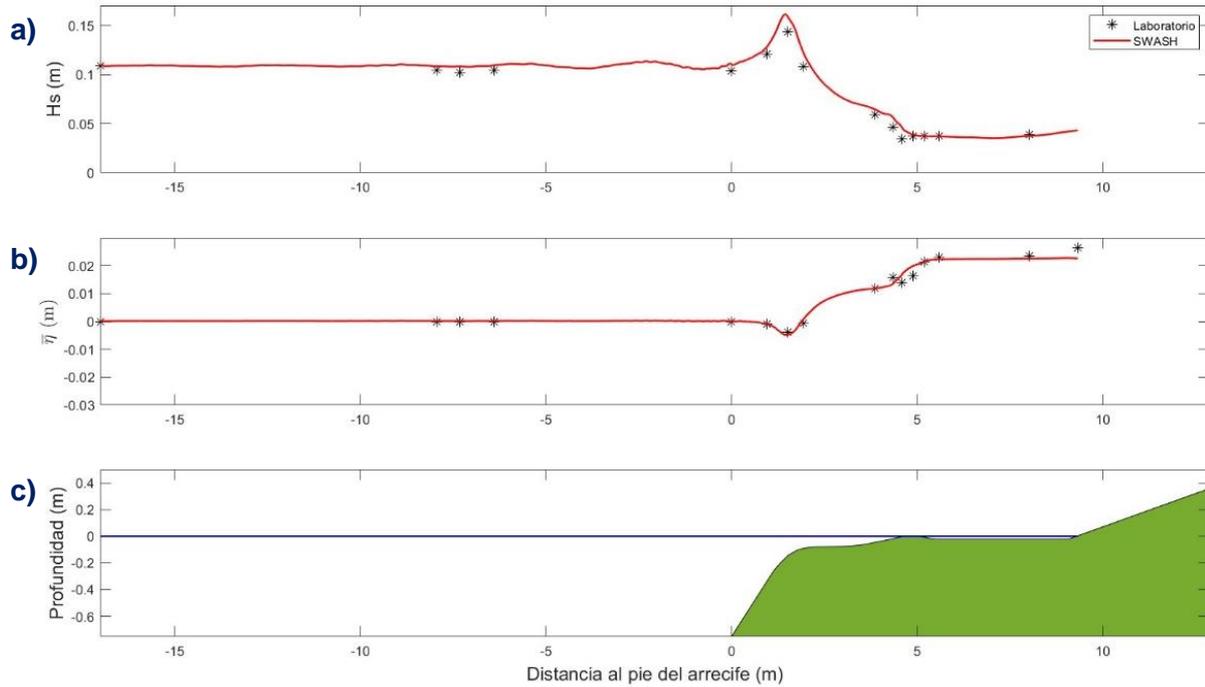


Figura 37. Resultados medidos y simulados correspondientes al caso e2 ( $H_s=0.113$  m y  $T_p=2.5$  s). a) Altura de ola significativa. b) Setup inducido por las olas. c) Perfil del arrecife.

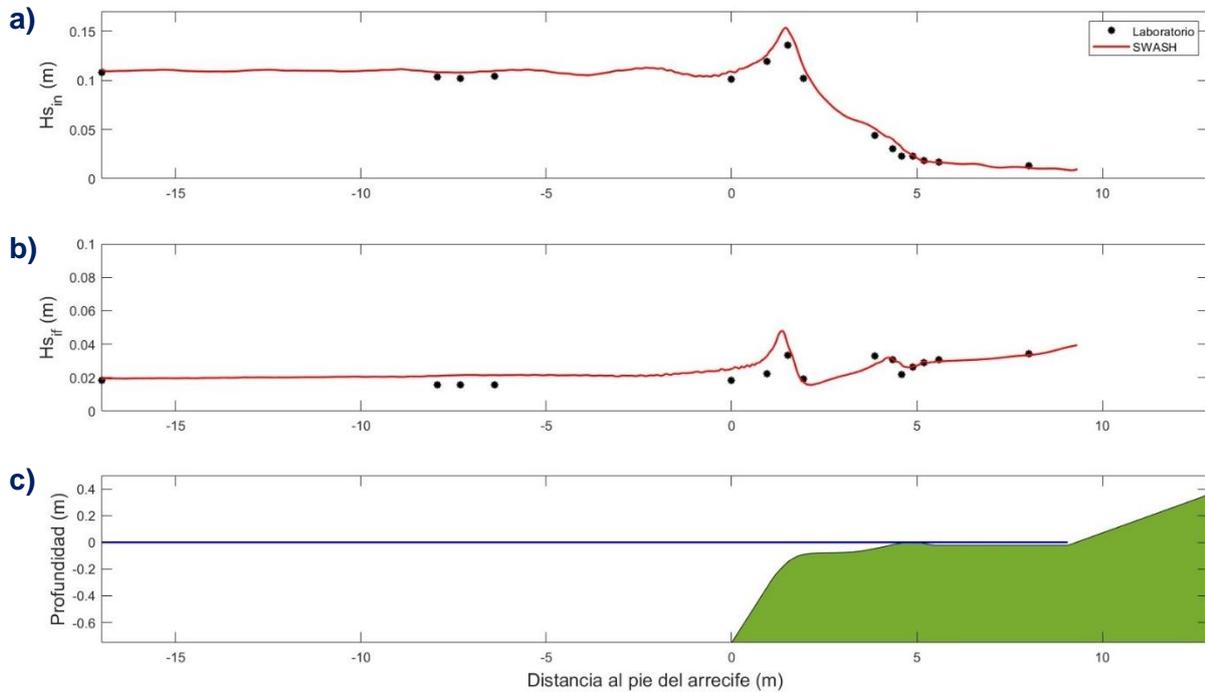


Figura 38. Resultados medidos y simulados correspondientes al caso e2 ( $H_s=0.113$  m y  $T_p=2.5$  s). a) Altura de ola significativa incidente. b) Altura de ola significativa infragravitatoria. c) Perfil del arrecife.

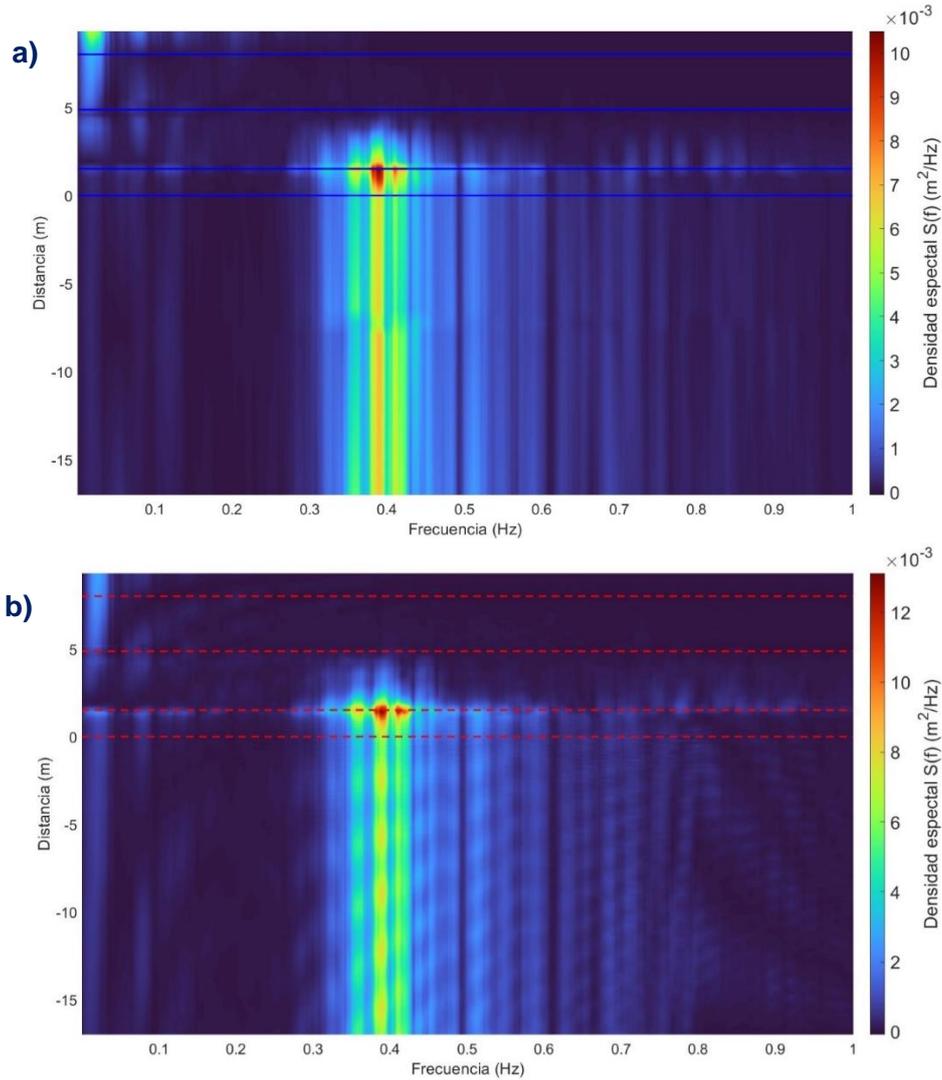


Figura 39. Comparativa de evolución de densidad espectral en todo el dominio, a) medida y b) simulada. Las líneas representan cortes del espectro del oleaje visualizado en Figura 34.

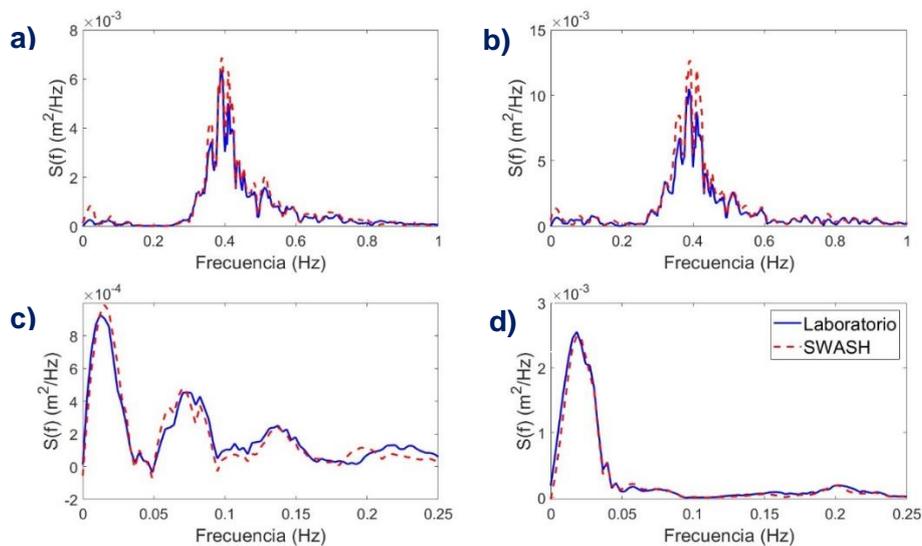


Figura 40. Espectro de oleaje medido: a) al pie del arrecife ( $x=0\text{m}$ ), b) punto de rotura ( $x=1.52\text{ m}$ ), c) cresta del arrecife ( $x=4.87\text{ m}$ ) y d) arrecife plano ( $x=8.01\text{ m}$ ). Línea continua representa el espectro medido en laboratorio y línea discontinua representa el espectro obtenido en el modelo SWASH.

La Figura 39 muestra la evolución de la densidad espectral en función de la frecuencia y la posición de los sensores, para los resultados observados y simulados del caso e2 (incisos a) y b), respectivamente). Esta gráfica permite ver la variación espacial de la energía asociada al espectro del oleaje. Se puede observar que, antes de la rotura del oleaje, la mayor parte de la energía se concentra alrededor de la frecuencia pico del oleaje incidente (0.4 Hz) debido a que domina la energía del oleaje de onda corta. En  $x=1.522$  m la densidad espectral disminuye considerablemente debido a la disipación del oleaje por rotura. La disipación, dentro de la zona de rompientes, está acompañada por un incremento en la energía concentrada en las bajas frecuencias ( $f < 0.05$  Hz), que alcanza un valor máximo cercano a la costa. Al comparar las observaciones con las simulaciones podemos notar un comportamiento similar en la evolución de la energía; sin embargo, se observan diferencias en las magnitudes de los picos de densidad espectral.

Las líneas azules continuas y rojas discontinuas, en los incisos a) y b) de la Figura 39, representan cortes que corresponden a distintas posiciones a lo largo del canal (Figura 40). Los espectros de energía en los sensores S5 y S7 presentan un comportamiento similar, con una frecuencia pico cercana a 0.4 Hz. Sin embargo, la densidad espectral aumenta significativamente en el sensor S7, ubicado cerca del punto de rotura. Este incremento está asociado al incremento en la altura de ola significativo por efecto del asomeramiento. Se observa que en la cresta arrecifal la energía se concentra principalmente en frecuencias menores a 0.12 Hz. Sin embargo, aún se presenta energía en frecuencias menores a 0.25 Hz. En la llanura arrecifal, se observa que, en su mayoría, la energía de las frecuencias primarias ( $f=0.4$  Hz) se ha disipado y se incrementa la energía en las frecuencias bajas ( $f \leq 0.05$  Hz). Por otro lado, se observa que el modelo sobreestima la densidad espectral en el sensor S7, mientras que se ajusta correctamente a la distribución en las frecuencias. Estas diferencias se asocian principalmente a la sobreestimación en la componente infragravitatoria mostrada en la Figura 38.

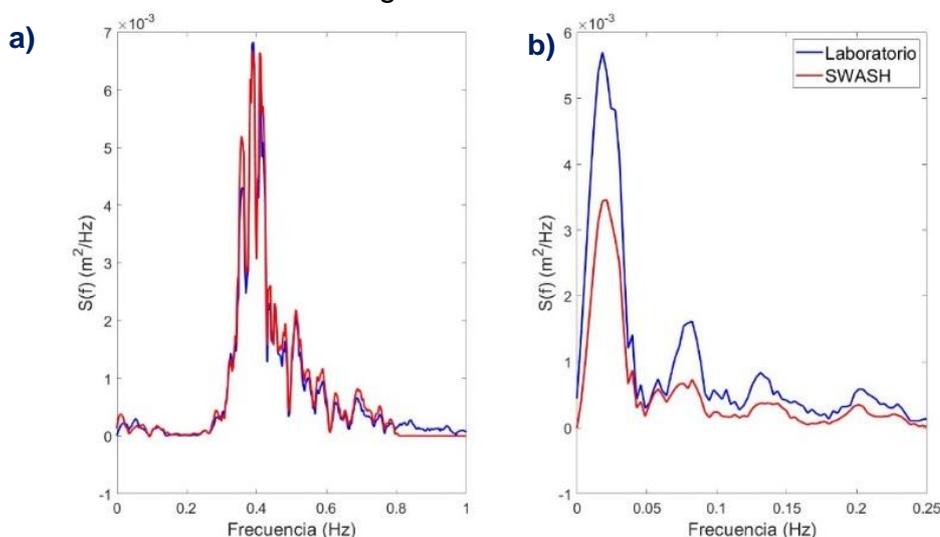


Figura 41. Espectro de oleaje medido y simulado. a) Forzamiento ( $x=-16.997$  m). b) Runup.

La Figura 41 muestra la comparativa entre el espectro de energía utilizado como forzamiento y el espectro de runup. Se observa claramente que el espectro de runup simulado subestima las observaciones, a diferencia de la ligera sobreestimación que se puede identificar en la zona de rompientes. A pesar de esto, el ajuste se considera aceptable dado que reproduce la distribución de las frecuencias correctamente.

Continuando con la validación, se compararon las variables  $\bar{\eta}_{max}$ ,  $S_{in}$ ,  $S_{if}$  y  $R_{2\%}$ , medidas y simuladas. En la Figura 42 se observa que el modelo predice satisfactoriamente las mediciones de laboratorio del  $\bar{\eta}_{max}$  y sobreestima ligeramente en  $S_{in}$ . Por otro lado, se observa una subestimación en la componente infragravitatoria, presentando un  $Bias=-0.010$  m y un  $RMSE= 0.0104$  m (Figura 41). A pesar de esto, el coeficiente de correlación lineal de Pearson fue de 0.974. Esto tiene incidencia directa en el  $R_{2\%}$ , donde se observa una subestimación en valores asociados a periodos de retorno mayores a 100 años. El  $R_{2\%}$  presentó un  $Bias=-0.008$  m, un  $RMSE= 0.0090$  m y  $r=0.968$ . Sin embargo, dado que las diferencias son mínimas, se considera que el modelo es capaz de simular distintas condiciones de oleaje incidente. La buena predicción de  $R_{2\%}$  es resultado de la sobreestimación de  $S_{in}$  y la subestimación de  $S_{if}$ . La tabla 12 muestra un resumen de los parámetros estadísticos correspondientes a cada variable.

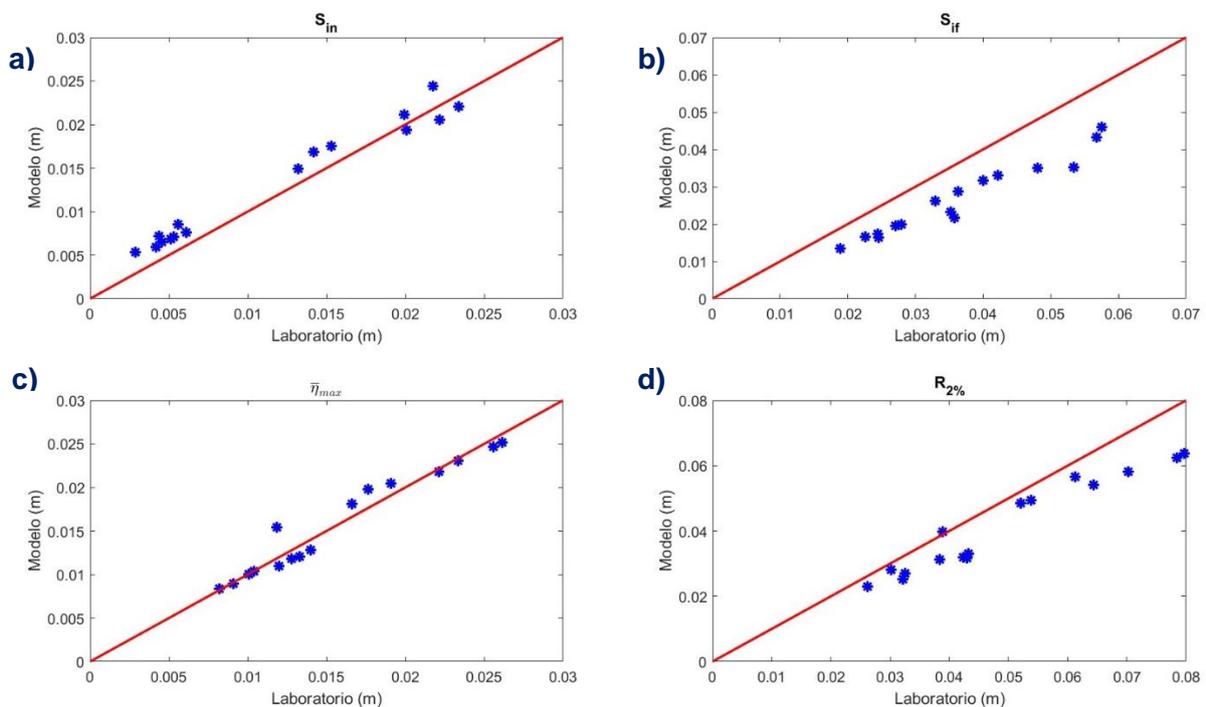


Figura 42. a) Swash incidente, b) swash infragravitatorio c) setup máximo y d)  $R_{2\%}$ , medidos y simulados.

Tabla 12. Parámetros estadísticos correspondientes a cada variable de la Figura 42.

Variable	RMSE (m)	Bias (m)	r	r <sup>2</sup>
$S_{in}$	0.0020	0.001	0.987	0.973
$S_{if}$	0.0104	-0.010	0.974	0.948
$\bar{\eta}_{max}$	0.0013	0.0001	0.973	0.947
$R_{2\%}$	0.0090	-0.008	0.968	0.937

#### 4.2.2. Evaluación de parametrizaciones de runup utilizando el modelo SWASH

Una vez validado, el modelo SWASH fue utilizado para simular el runup asociado a condiciones de oleaje que no se consideraron en los experimentos de laboratorio. Esto, con el fin de ampliar el intervalo de condiciones y poder evaluar distintas parametrizaciones de runup en arrecifes coralinos. El modelo fue implementado a escala modelo y, posteriormente, los resultados de runup fueron escalados a prototipo mediante el factor de escala de Froude (1:60).

Se simularon 100 casos con oleaje irregular, considerando alturas de ola significantes correspondientes a los periodos de retorno evaluados en laboratorio (Figura 12) y mayores (8, 9 y 10 m, en escala prototipo). También, se utilizaron periodos picos, a escala prototipo, de 11.6 s, 15.5 s y 19.3 s. Por otro lado, se utilizaron las predicciones relativas de sobre elevación del nivel medio del mar reportadas por el IPCC AR5 para la región de Tahiti (Harris et al., 2018). El aumento previsto del nivel del mar para el escenario de emisiones RCP 4.5 y RCP 8.5, correspondientes al período 2081-2100, son en promedio de 0.48 m y 0.62 m, respectivamente. El forzamiento se realizó mediante un espectro de oleaje tipo JONSWAP con un factor de intensificación de pico,  $\gamma = 3.3$ .

Siguiendo la misma metodología, mostrada en la sección 3.4, se calcularon las variables  $\bar{\eta}_{max}$ ,  $S_{in}$ ,  $S_{if}$  y  $R_{2\%}$ . La Figura 43 muestra los resultados de las simulaciones en función del oleaje incidente en aguas profundas, los cuales presentan un comportamiento relativamente lineal. A su vez, se comparan los resultados con las parametrizaciones de Stockdon et al. (2006). La línea negra discontinua representa esta parametrización considerando la pendiente de la playa (1:9.64). Por otro lado, la línea roja discontinua representa a la parametrización considerando la pendiente del arrecife (1:18.81). La línea negra continua representa el mejor ajuste, calibrando los coeficientes de las parametrizaciones de Stockdon et al. (2006).

Se encontró que, el mejor ajuste presenta parámetros estadísticos relativamente buenos. Para  $\bar{\eta}_{max}$  se calculó un  $RMSE = 0.2112$  m y  $r = 0.7618$ . En el caso de las componentes  $S_{in}$  y  $S_{if}$ , se calcularon,  $RMSE$  de 0.2607 m y 0.2989 m, y coeficientes de correlación de Pearson ( $r$ ) de 0.7271 y 0.7513, respectivamente. El  $R_{2\%}$  presentó un  $RMSE = 0.3359$  m y  $r = 0.8591$ . En todas las variables, las parametrizaciones de Stockdon et al. (2006) en playas sobreestiman considerablemente las simulaciones. Esto es consistente con lo reportado por Stockdon et al. (2014); ellos concluyeron que estas parametrizaciones tienden a sobreestimar en condiciones de oleaje extremo.

Por otro lado, al considerar la pendiente del arrecife en las parametrizaciones, se mantiene la sobreestimación en  $S_{in}$ ; sin embargo, el ajuste mejora notablemente en el  $\bar{\eta}_{max}$ , aunque subestima en  $\sim 13\%$ . En el caso del  $R_{2\%}$ , la parametrización sobreestima en  $\sim 10\%$ . Esto es consistente con lo observado por Franklin et al. (2018), quienes demostraron la importancia de incluir parámetros geométricos del arrecife en las parametrizaciones.

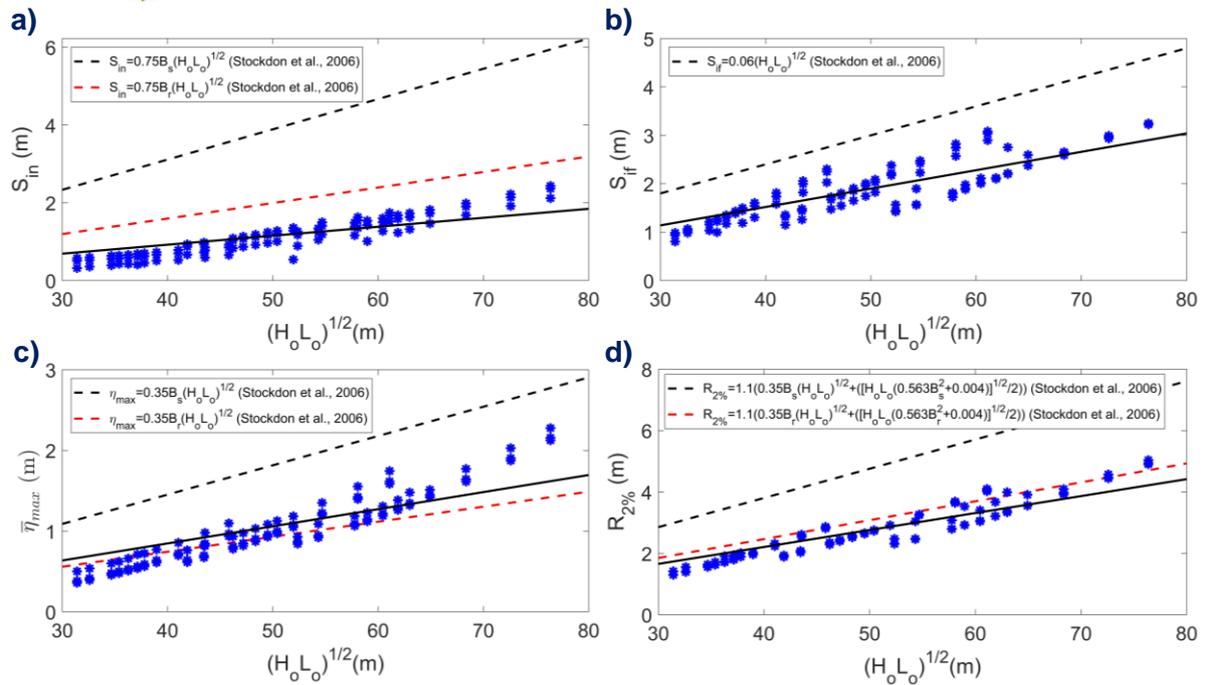


Figura 43. Resultados de simulaciones escaladas a prototipo de a) swash incidente, b) swash infragravitatorio c) setup máximo y d)  $R_{2\%}$ . Las líneas negras y rojas discontinuas representan las parametrizaciones de Stockdon et al. (2006), considerando la pendiente de la playa y del arrecife frontal, respectivamente. Línea negra continua representa el ajuste con coeficientes calibrados.

Finalmente, las simulaciones de  $R_{2\%}$  se comparan con las parametrizaciones de Ruggiero et al. (2001) (Ec. 18), Brinkkemper et al. (2013) (Ec. 19), Stockdon et al. (2006) optimizada, y las parametrizaciones dimensional y adimensional de Franklin & Torres-Freyermuth (2022) (Ec. 30, 31 y 32, respectivamente). La Figura 44 muestra esta comparativa, donde se observa que, en general las parametrizaciones de Ruggiero y Brinkkemper, sobreestiman considerablemente, y presentan un *Bias* de 1.58 m y 1.10 m, respectivamente; en la parametrización dimensional ocurre un comportamiento similar, pero en menor medida, con un *Bias* de 0.77 m.

Se observa que la parametrización adimensional de Franklin & Torres-Freyermuth (2022) presenta una buena comparación para valores de  $R_{2\%} < 4$  m que corresponde al intervalo de casos utilizados para su desarrollo. Por otro lado, la fórmula dimensional de esos mismos autores funciona relativamente bien para los valores de oleaje extremo. Stockdon optimizada presenta un ajuste satisfactorio en valores bajos de  $R_{2\%}$ ; sin embargo, a valores mayores, se observa una tendencia a la saturación que hace que el ajuste se vuelva deficiente. Esto provoca que el *Bias* para estos casos sea de -0.22 m y -0.18 m, respectivamente. En el caso de la parametrización adimensional el coeficiente de correlación de Pearson es de 0.73, siendo el de ajuste más deficiente. La tabla 13 muestra un resumen de los parámetros estadísticos correspondientes a cada parametrización evaluada. En general, ninguna de estas parametrizaciones funciona para las condiciones de oleaje más energético.

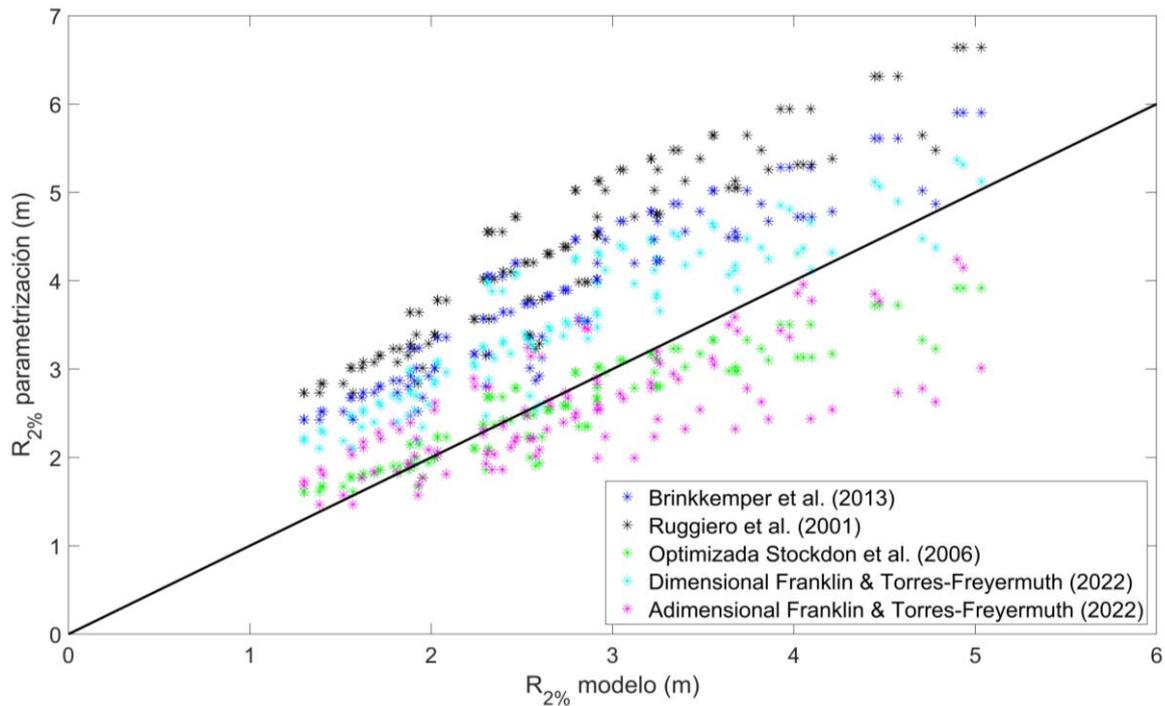


Figura 44. Evaluación de distintas parametrizaciones de runup a escala prototipo.

Tabla 13. Parámetros estadísticos obtenidos para cada parametrización evaluada (Figura 44).

Parametrización	RMSE (m)	Bias (m)	r	r <sup>2</sup>
Brinkkemper	1.1556	1.1071	0.9340	0.8724
Ruggiero	1.6321	1.5888	0.9340	0.8724
Stockdon Optimizada	0.4430	-0.1897	0.9340	0.8724
Dimensional	0.8668	0.7758	0.9046	0.8182
Adimensional	0.6523	-0.2206	0.7373	0.5436

## 5. Discusiones

En este trabajo se evaluó la capacidad de un modelo numérico y las fórmulas paramétricas existentes en la literatura para predecir el *runup* en playas protegidas por arrecifes coralinos durante oleaje extremo. Para ello, se realizaron ensayos de laboratorio a escala 1 a 60 para medir la transformación del oleaje para diferentes condiciones. Durante este trabajo se identificaron algunos factores relevantes relacionados con el modelado físico, el modelado numérico, y las parametrizaciones de *runup*.

### 5.1. Modelado físico

El proceso de rotura domina en la disipación del oleaje, principalmente en las ondas cortas, y produce una alta transferencia de energía a las bandas infragravitatorias; por lo tanto, se ha demostrado que las ondas infragravitatorias libres dominan en estos ambientes. Algunos autores han demostrado que la fricción en el fondo juega un papel muy importante en la disipación de las ondas largas y, por lo tanto, en su incidencia en el *runup*. Una limitante del modelo físico es la dificultad de reproducir la rugosidad del fondo, característica de los arrecifes coralinos. Sin embargo, dado que en este trabajo se utilizó un fondo liso, podría producirse una subestimación en las tasas de disipación, principalmente cerca de la cresta y sobre la llanura arrecifal, en comparación con lo que ocurre en la realidad. Por otro lado, esta subestimación podría tomar relevancia en arrecifes con pendientes menos pronunciadas ( $>1:2.29$ ). En general, esta situación genera incertidumbre en la transformación del oleaje.

También, se considera relevante el factor humano en la construcción del modelo. Dado que el perfil está compuesto por variaciones en la pendiente muy pequeñas, se debe ser muy cuidadoso al momento de trazar la batimetría dentro del canal de oleaje y asegurarse, al momento de la construcción, que el ancho del perfil sea completamente homogéneo. Por otro lado, la instrumentación también puede generar incertidumbre. Específicamente, se identificó que el sensor de *runup* puede no medir en ciertos momentos durante la realización del ensayo. Esto ocurre debido a que la lámina de agua no era lo suficientemente profunda. A pesar de esto, los resultados fueron satisfactorios, dado que  $R_{2\%}$  está asociado a los picos máximos que si fueron bien capturados; sin embargo, se debe prestar atención en trabajos futuros. Las mediciones del velocímetro electromagnético no fueron capaces de representar la corriente *undertow*; esto puede estar limitado por la poca profundidad local y el ruido asociado a la alta turbulencia generada por la rotura. Se sugiere considerar mediciones en distintos puntos a lo largo del dominio y a diferentes elevaciones para un mejor análisis de la hidrodinámica.

## 5.2. Limitaciones de modelo SWASH

Los resultados del modelo SWASH reproducen de manera satisfactoria las observaciones de laboratorio. Sin embargo, se observa una sobreestimación de la energía infragravitatoria en la zona de rompientes; por otro lado, se produce una subestimación en el *runup*, asociado a una mala predicción de las ondas infragravitatorias.

Se identificaron algunos factores que inciden en este comportamiento. Por un lado, se relaciona a la capacidad del modelo de simular la componente de segundo orden (onda infragravitatoria vinculada) con base en la teoría de Longuet-Higgins & Stewart (1960). Rijnsdorp et al. (2014) mencionan que la precisión con la que se reproduce la solución de segundo orden está relacionada con el número de capas verticales, ya que las propiedades dispersivas y no lineales de SWASH mejoran al aumentar el número de capas. Bajo esta condición de frontera, el modelo sobreestima la energía cuando se simula en una capa vertical. En cambio, existe un mejor ajuste cuando se utiliza entre 2 y 4 capas verticales; sin embargo, el coste computacional se incrementa considerablemente. Aun cuando se utilice una resolución vertical aceptable, el modelo SWASH no reproducirá correctamente la componente de segundo orden. La funcionalidad de la teoría de segundo orden de Hasselmann (1962), que generalmente se aplica en el modelo SWASH, no fue evaluada en este trabajo; sin embargo, lo anterior sugiere que se debe considerar y comparar ambas teorías.

Por otro lado, una de las limitantes del modelo SWASH es que el proceso de rotura está parametrizado, por lo cual, es sensible a errores en la disipación de oleaje. El modelo no es capaz de simular la superficie bi-convexa durante la rotura en voluta (Figura 45). La turbulencia está parametrizada con base en la longitud de mezcla de Prandtl, que en este caso es de 0.01 m, de acuerdo con el trabajo de Peláez-Zapata et al. (2018). Sin embargo, los resultados muestran que este parámetro puede ser objeto de calibración. En la Figura 46 se observa que, en el punto de rotura, la elevación de la superficie libre está bien representada; sin embargo, la comparativa de la velocidad presenta mayores discrepancias, debido al módulo de turbulencia. Otro factor que se debe considerar es que, al implementar el modelo en una sola capa, la velocidad se calcula promediada en profundidad. Las simplificaciones en el proceso de rotura pueden provocar una sobreestimación en las ondas infragravitatorias libres asociadas a la rotura del oleaje (ej. Rijnsdorp et al., 2014), consistente con los resultados de este trabajo.

En el caso de la fricción en el fondo, también parametrizada, tiene una influencia directa en la disipación de las ondas infragravitatorias después de la rotura. La subestimación observada en la serie temporal de *runup* puede estar asociado a una sobreestimación en el coeficiente de fricción utilizado; pero una disminución de este parámetro podría ocasionar un desajuste a lo largo del dominio. Además, durante el proceso de calibración se observó que las variaciones en los parámetros estadísticos eran mínimas al modificar este parámetro.

Dado que, en la realidad, este parámetro es variable a lo largo del perfil, se entiende que exista una sobreestimación o subestimación en algunas zonas del dominio numérico. Por lo tanto, este comportamiento sugiere la necesidad de calibrar este parámetro en cualquier trabajo futuro.

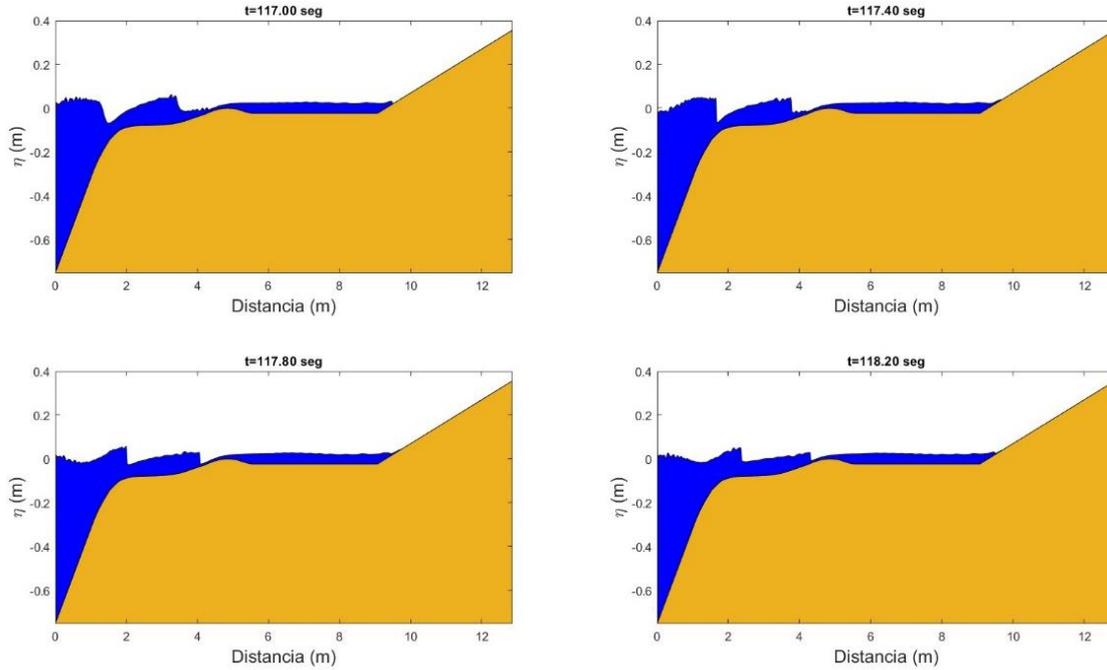


Figura 45. Ejemplificación de proceso de rotura en modelo SWASH.

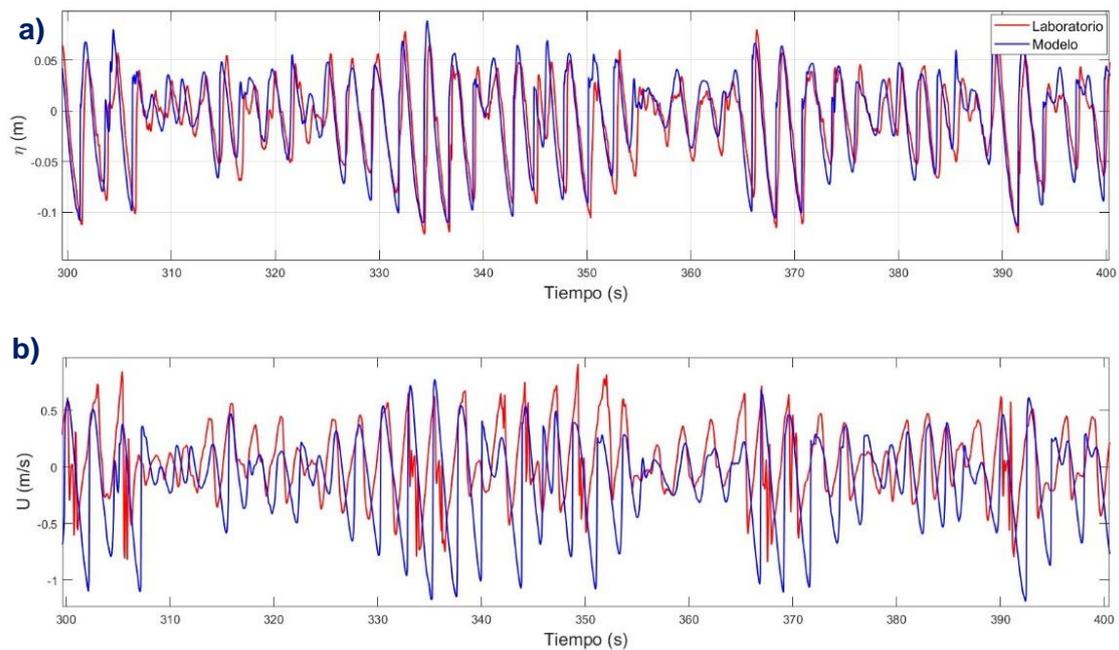


Figura 46. a) Series temporales de a) superficie libre del agua y b) velocidad, medidas y simuladas en punto de rotura ( $x=1.52$  m).

### 5.3. Parametrizaciones y factor escala

El desarrollo de una parametrización aplicable a cualquier tipo de playa representa un reto en la ingeniería costera y hasta la fecha no se han tenido buenos resultados. Existe gran variabilidad en el comportamiento de las parametrizaciones y diversos factores pueden generar errores en la predicción. Algunos de estos factores pueden estar relacionados con las condiciones del oleaje incidente y las características geomorfológicas de la zona de estudio. Por otro lado, la mayoría de las parametrizaciones consideran una aproximación unidimensional (1D), lo que limita la predicción en condiciones reales (Gomes da Silva et al., 2019). El efecto de excluir las interacciones 2D y 3D, como las mareas y las corrientes, puede generar incertidumbre en la predicción de las parametrizaciones.

A partir de los resultados del modelo SWASH y las predicciones de las parametrizaciones en el  $R_{2\%}$ , se observa una sobreestimación considerable en las parametrizaciones enfocadas a playas. Esto, se asocia principalmente a que, durante su desarrollo, solo se consideró un set de datos de oleaje incidente en condiciones normales, excluyendo oleaje extremo. También, estas parametrizaciones, únicamente varían en función de los parámetros del oleaje incidente y la pendiente de la playa; por lo tanto, se ignora la gran variedad en la morfología del arrecife coralino y la incidencia directa en la tasa de disipación por fricción en el fondo. Generalmente, el punto de rotura en los arrecifes coralinos se ubica lejos de la costa, lo cual explica la mejora en el ajuste de las parametrizaciones de Stockdon et al. (2006) al utilizar la pendiente del arrecife. Esto sugiere que la pendiente del arrecife juega un papel más importante que el coeficiente de fricción, consistente con el trabajo de Pearson et al. (2017) (Franklin & Torres-Freyermuth, 2022). Sin embargo, esto puede variar dependiendo de las características morfológicas del arrecife, las condiciones del oleaje incidente y el nivel del mar (Lowe et al., 2005; Pearson et al., 2017).

Por otro lado, las parametrizaciones de Franklin & Torres-Freyermuth (2022) presentan un ajuste deficiente en condiciones de oleaje extremo. La parametrización adimensional presenta la limitante que solo puede ser aplicable en escala prototipo y en condiciones de oleaje similares a las utilizadas durante su desarrollo. Se observa una tendencia a la saturación a magnitudes de  $R_{2\%}$  mayores. Por su parte, la parametrización dimensional presenta un ajuste aceptable en magnitudes de  $R_{2\%}$  bajas, pero tiende a saturar y sobreestimar en magnitudes de  $R_{2\%}$  mayores. A diferencia de la parametrización dimensional, se puede aplicar en diferentes escalas. El ensamble de ambas parametrizaciones se muestra en la Figura 47. Presenta un  $RMSE=0.4932$  m, menor al presentado por cada una individualmente; además, presenta un  $Bias=0.2776$  m y  $r=0.9092$  que, en conjunto, muestran el mejor ajuste. Esto sugiere que una calibración de los coeficientes de estas parametrizaciones podría mejorar significativamente la predicción.

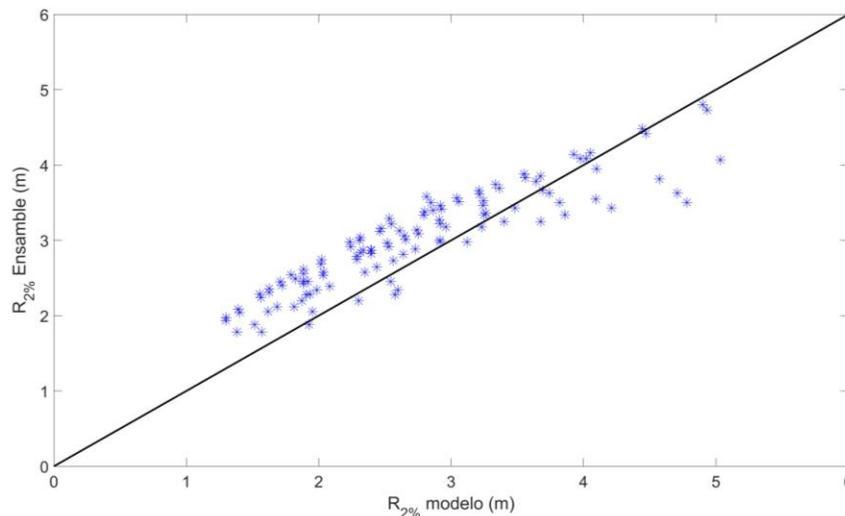


Figura 47. Comparativa de  $R_{2\%}$  simulados y ensamble de parametrizaciones dimensional y adimensional (Franklin & Torres-Freyermuth, 2022).

Parece ser que el factor de la escala juega un papel importante en el desarrollo de las parametrizaciones. La Figura 48 muestra una comparativa de la funcionalidad de la parametrización adimensional evaluada en escala modelo (multiplicada por 60) y en escala prototipo. Se observa una subestimación considerable en la escala prototipo, con un  $Bias=-1.08$  m. Esta subestimación puede asociarse a los parámetros de fricción y turbulencia utilizados en las simulaciones (a escala prototipo) que conforman el set de datos utilizado en el desarrollo de las parametrizaciones; es decir, la subestimación se podría generar al no considerar el factor escala en el coeficiente de fricción ( $cf$ ) y la longitud de mezcla de Prandtl ( $lm$ ).

La Figura 49 muestra la evolución de  $H_s$  y el  $setup$  para el caso e1, a escala prototipo, considerando diferentes combinaciones de  $cf$  y  $lm$ . La línea amarilla representa el caso con los parámetros físicos no escalados ( $cf=0.014$  y  $lm=0.01$ ). Se observa una considerable subestimación, principalmente en el  $setup$ . En la Figura 49, podemos observar que la serie temporal de runup también sufre una subestimación importante. Cuando los parámetros físicos se escalan ( $cf=0.0272$  y  $lm=0.6$ ) los resultados son prácticamente iguales a los resultados de escala modelo (1:60). Esta situación podría tener influencia en el ajuste deficiente de las parametrizaciones con los resultados de este trabajo. Por lo tanto, es necesario considerar correctamente el factor escala en las simulaciones y en el set de datos utilizados en el desarrollo de nuevas parametrizaciones.

En general, se observa una mayor variación al modificar  $lm$ , asociado al módulo de turbulencia. Esto, refuerza la idea de considerar a este parámetro para la calibración del modelo en trabajos futuros.

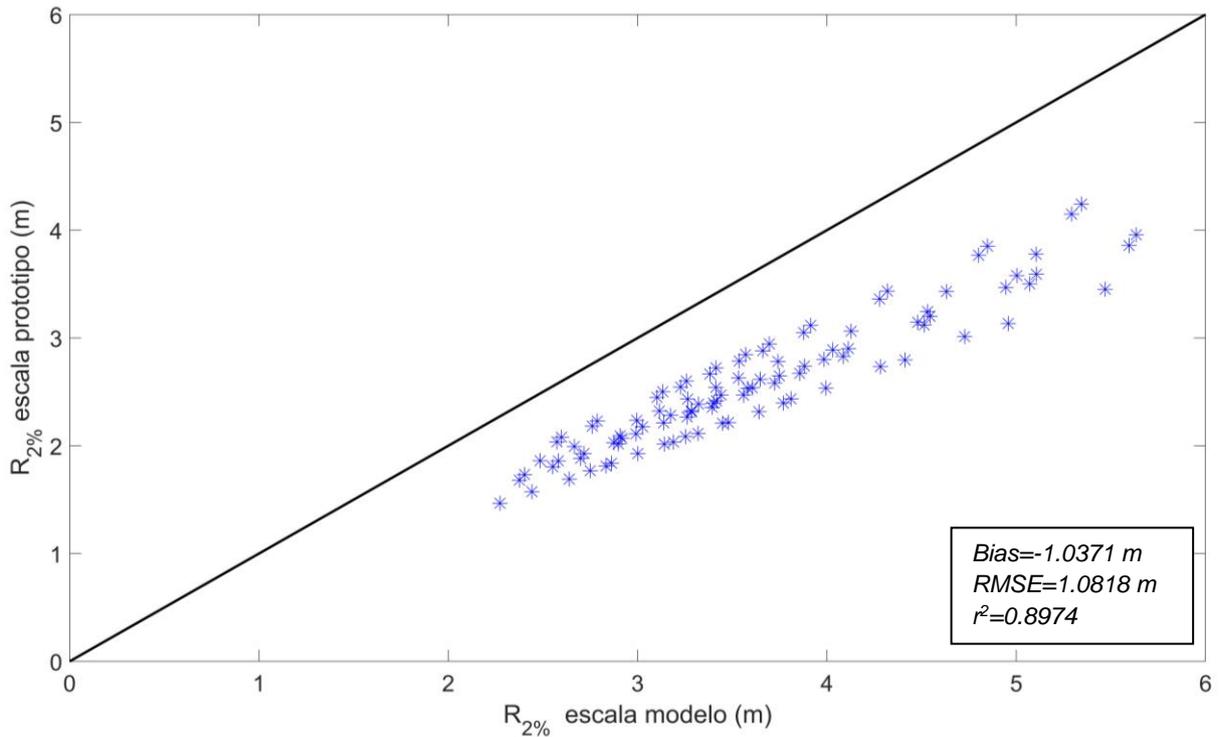


Figura 48. Comparativa de parametrización adimensional (Franklin & Torres-Freyermuth, 2022) aplicada en escala prototipo.

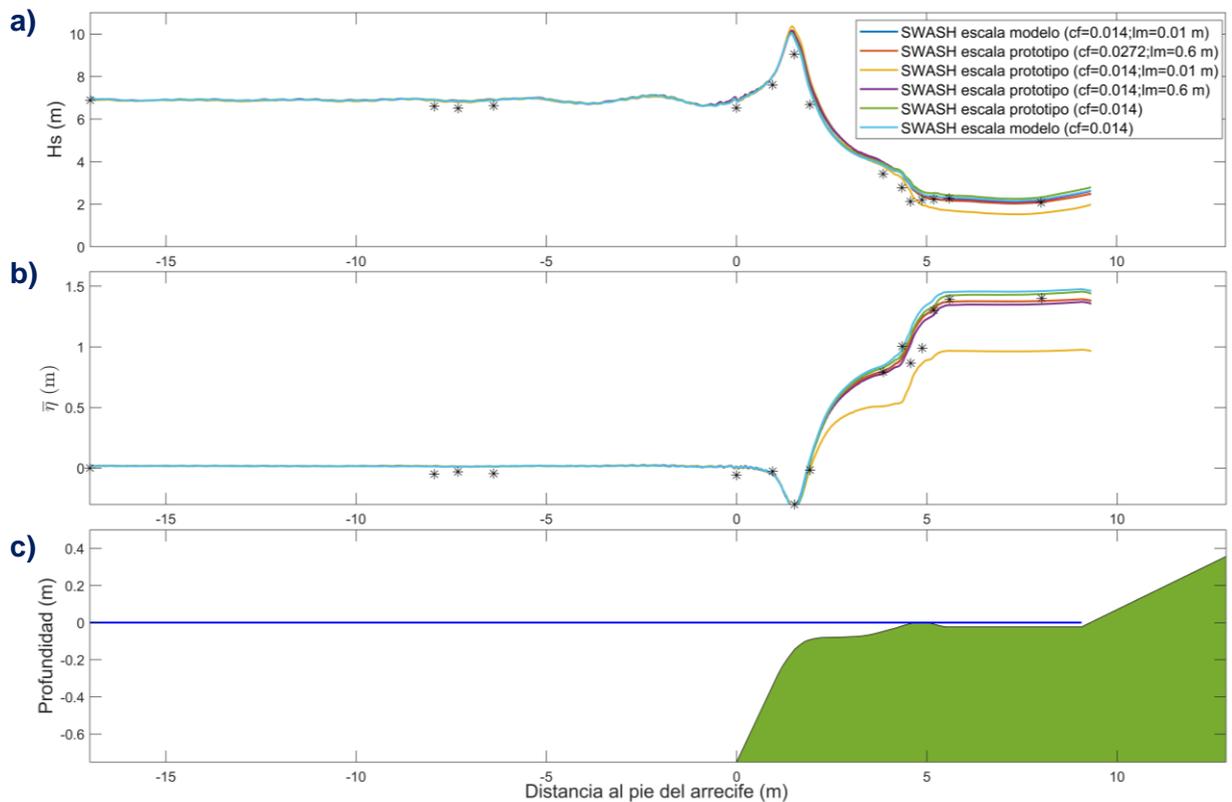


Figura 49. a) Altura de ola significativa incidente. b) Altura de ola significativa infragravitatoria. c) Perfil del arrecife. Comparativa de caso e1 ( $H_s=0.12$  m y  $T_p=2.5$  s) a escala prototipo, considerando diferentes valores de coeficiente de fricción (Manning) y longitud de mezcla de Prandtl.

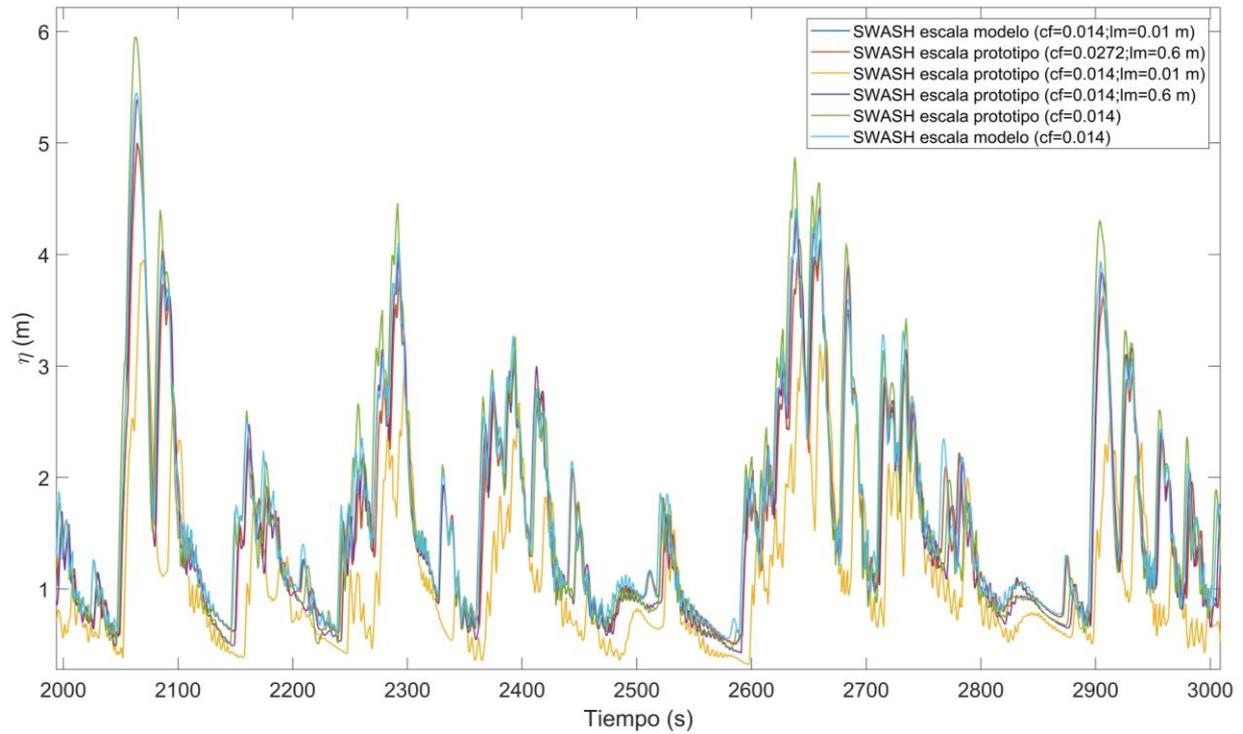


Figura 50. Serie temporal de runup para caso e1 ( $H_s=0.12$  m y  $T_p=2.5$  s) a escala prototipo, considerando diferentes valores del coeficiente de fricción (Manning) y longitud de mezcla de Prandtl.

## 6. Conclusiones

En este trabajo se realizaron ensayos de laboratorio en un canal de oleaje para modelar la transformación del oleaje e hidrodinámica, durante condiciones de oleaje extremo, en un arrecife coralino. Los resultados mostraron una elevada tasa de disipación de hasta el 50%, debido a la rotura del oleaje inducida por la presencia de una pendiente pronunciada, en la banda de frecuencias del oleaje incidente. Después de la rotura, consistente con estudios previos, la energía en la banda de frecuencias de la infragravedad domina, principalmente sobre la llanura arrecifal y en el *runup*. Se observó que el *runup* está dominado por la componente infragravitatoria del *swash*, y que el *setup* y la componente incidente del *swash* tienen una contribución similar. A partir de los ensayos de laboratorio, se generó un amplio conjunto de datos que pueden servir para la validación de distintos modelos numéricos por parte de la comunidad científica.

Los ensayos de laboratorio permitieron la calibración y validación del modelo numérico SWASH. Se identificó que un coeficiente de fricción de Manning de 0.014 presenta simulaciones con mejor ajuste, principalmente en la serie temporal de *runup*; a pesar de que, al modificar su valor, no se identificaron diferencias importantes en  $r$ ,  $RMSE$  y  $Bias$ . Este valor es consistente con el utilizado en estudios previos (Peláez-Zapata et al., 2018; Franklin et al., 2018).

Al comparar las series temporales de elevación de superficie libre, se observa una ligera sobreestimación en los sensores cercanos a la cresta arrecifal, sin embargo, la comparativa de  $H_s$  y *setup* muestra que el modelo simula de manera satisfactoria la transformación del oleaje en arrecifes coralinos. A pesar de sus limitaciones para reproducir de manera cualitativa la rotura en estos ambientes (rotura en voluta), el modelo es capaz de simular el proceso de rotura. Sin embargo, se observa una ligera sobreestimación en la zona de rompientes que mejora gradualmente al acercarse a la llanura arrecifal. En el caso del *runup*, SWASH subestima los picos máximos en la serie temporal, asociados a las ondas infragravitatorias.

Las variables  $\bar{\eta}_{max}$ ,  $S_{in}$ ,  $S_{if}$  y  $R_{2\%}$  se ajustaron correctamente a las mediciones, con coeficientes de correlación lineal de Pearson mayores a 0.96. La componente infragravitatoria presentó una subestimación, asociado a lo observado en las series temporales de *runup*. Esto resultó en una subestimación en el  $R_{2\%}$ ; sin embargo, el ajuste se considera aceptable, dado que las diferencias son mínimas.

Una vez validado, el modelo SWASH fue implementado para simular el *runup* asociado a condiciones de oleaje y nivel del mar no consideradas en los ensayos de laboratorio. Este nuevo set de datos se utilizó para evaluar distintas parametrizaciones de *runup*. Se observó una sobreestimación al utilizar parametrizaciones de *runup* en playas. Las parametrizaciones de Stockdon et al. (2006) sobre estiman considerablemente al utilizar la pendiente de la playa y el ajuste mejora al considerar la pendiente del arrecife.

En el caso de las parametrizaciones de Franklin & Torres-Freyermuth (2022), el mejor ajuste se da en valores de *runup* menores para la fórmula adimensional y en valores extremos para la fórmula dimensional. La mejor predicción es obtenida a partir del ensamble de estas dos formulaciones.

En general, los resultados de este trabajo demuestran que, a pesar de las limitaciones para modelar la rotura en voluta, el modelo SWASH es una herramienta que permite simular la transformación de oleaje extremo en arrecifes coralinos de manera satisfactoria y con un coste computacional bajo al implementarse solamente con una capa vertical. Por otro lado, se demuestra que las parametrizaciones de *runup* existentes fallan para condiciones de oleaje extremo. Las parametrizaciones que incluyen parámetros geométricos del arrecife solo son aplicables a cierto rango de condiciones de oleaje incidente, excluyendo oleaje extremo. Por lo tanto, se sugiere ampliar esfuerzos en el desarrollo de nuevas parametrizaciones que sean aplicables a condiciones de oleaje incidente muy energético en estos ambientes. Las limitaciones del modelo SWASH para simular las velocidades en el punto de rotura podría mejorarse con el uso de modelos RANS con un esquema VOF para modelar la rotura tipo voluta.

## Bibliografía

- Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (24 de mayo de 2023). *Información básica sobre los arrecifes de coral*. <https://espanol.epa.gov/espanol/informacion-basica-sobre-los-arrecifes-de-coral#arrecifes>.
- Almar, R., Ranasinghe, R., Bergsma, E. W., Diaz, H., Melet, A., Papa, F., ... & Kestenare, E. (2021). A global analysis of extreme coastal water levels with implications for potential coastal overtopping. *Nature communications*, 12(1), 3775.
- Alvarez-Filip, L., Dulvy, N. K., Gill, J. A., Côté, I. M., & Watkinson, A. R. (2009). Flattening of Caribbean coral reefs: region-wide declines in architectural complexity. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 276(1669), 3019-3025.
- Andersen, T. L., Eldrup, M. R., & Frigaard, P. (2017). Estimation of incident and reflected components in highly nonlinear regular waves. *Coastal Engineering*, 119, 51-64.
- Astorga-Moar, A., & Baldock, T. E. (2023). Assessment of wave overtopping models for fringing reef fronted beaches. *Coastal Engineering*, 186, 104395.
- Baldock, T. E., Swan, C., & Taylor, P. H. (1996). A laboratory study of nonlinear surface waves on water. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 354(1707), 649-676.
- Battjes, J. A. (1994): Shallow water wave modelling. *Proceedings of the International Symposium on Waves-Physical and Numerical Modelling*, Vol.I, pp. 1-23.
- Becker, J. M., Merrifield, M. A., & Ford, M. (2014). Water level effects on breaking wave setup for Pacific Island fringing reefs. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119(2), 914-932.
- Berkhoff, J. C. (1972). Computation of combined refraction-diffraction. In *Coastal Engineering 1972* (pp. 471-490).
- Booij, N. R. R. C., Ris, R. C., & Holthuijsen, L. H. (1999). A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation. *Journal of geophysical research: Oceans*, 104(C4), 7649-7666.
- Briggs, M. J. (2013). *Basics of physical modeling in coastal and hydraulic engineering*. US Army Engineer Research and Development Center [Coastal and Hydraulics Laboratory].
- Brinkkemper, J., Torres-Freyermuth, A., Mendoza, E., & Ruessink, B. (2013). Parametrization of wave run-up on beaches in Yucatan, México: A numerical study. In *Coastal Dynamics*, volume 2, pages 225–234.
- Bruno, J. F., & Selig, E. R. (2007). Regional decline of coral cover in the Indo-Pacific: timing, extent, and subregional comparisons. *PLoS one*, 2(8), e711.
- Buckingham, E. (1914). On physically similar systems; illustrations of the use of dimensional equations. *Physical review*, 4(4), 345.
- Buckley, M., Lowe, R., Hansen, J., 2014. Evaluation of nearshore wave models in steep reef environments. *Ocean Dynam.* 64, 847–862. <http://dx.doi.org/10.1007/s10236-014-0713-x>.
- Buckley, M.L., Lowe, R.J., Hansen, J.E., Van Dongeren, A.R., 2015. Dynamics of wave setup over a steeply sloping fringing reef. *J. Phys. Oceanogr.* 45 (12), 3005–3023.
- Buckley, M., Lowe, R., Hansen, J., van Dongeren, A., 2016. Wave setup over a fringing reef with large bottom roughness. *J. Oceanogr.* 46, 2317–2333.
- Buckley, M.L., Lowe, R.J., Hansen, J.E., van Dongeren, A.R., Storlazzi, C.D., 2018. Mechanisms of wave-driven water level variability on reef-fringed coastlines. *J. Geophys. Res.: Oceans* 123 (5), 3811–3831.

- Buckley, M. L., Lowe, R. J., Hansen, J. E., van Dongeren, A. R., Pomeroy, A., Storlazzi, C. D., ... & Green, R. H. (2022). Wave-Driven Hydrodynamic Processes Over Fringing Reefs With Varying Slopes, Depths, and Roughness: Implications for Coastal Protection. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 127(11), e2022JC018857.
- Carpenter, K. E., Abrar, M., Aeby, G., Aronson, R. B., Banks, S., Bruckner, A., Chiriboga, A., Cortes, J., Delbeek, J. C., DeVantier, L., Edgar, G. J., Edwards, A. J., Fenner, D., Guzman, H. M., Hoeksema, B. W., Hodgson, G., Johan, O., Licuanan, W. Y., Livingstone, S. R., ... Wood, E. (2008). One-third of reef-building corals face elevated extinction risk from climate change and local impacts. *Science*, 321(5888), 560-563. <https://doi.org/10.1126/science.1159196>.
- Cheriton, O. M., Storlazzi, C. D., & Rosenberger, K. J. (2016). Observations of wave transformation over a fringing coral reef and the importance of low-frequency waves and offshore water levels to runup, overwash, and coastal flooding. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121, 3121–3140. <https://doi.org/10.1002/2015jc011231>.
- Dalrymple, R. A. (1985). Introduction to Physical Models in Coastal Engineering. *Physical Modelling in Coastal Engineering*. Ed., A. A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands, pp 3-9.
- Darwin C (1842) The structure and distribution of coral reefs. University of California Press, Berkeley, p 214.
- da Silva, P. G., Medina, R., Gonzalez, M., & Garnier, R. (2019). Wave reflection and saturation on natural beaches: The role of the morphodynamic beach state in incident swash. *Coastal Engineering*, 153, 103540.
- da Silva, P., Coco, G., Garnier, R., Klein, A.H., 2020. On the prediction of runup, setup and swash on beaches. *Earth-Sci. Rev.* 204, 103148.
- Dean, R. G., & Dalrymple, R. A. (1991). *Water wave mechanics for engineers and scientists* (Vol. 2). world scientific publishing company.
- Demirbilek, Z., Nwogu, O. G., and Ward, D. L.: Laboratory study of wind effect on runup over fringing reefs, Tech. Rep. ERDC/CHL TR-07-04, U.S. Army Corps of Engineers, 2007.
- Douglas, S. (1990). Estimating runup on beaches: A review of the state of the art (Final Report).
- Elliff, C. I., & Silva, I. R. (2017). Coral reefs as the first line of defense: Shoreline protection in face of climate change. *Marine environmental research*, 127, 148-154.
- Ferrario, F., Beck, M. W., Storlazzi, C. D., Micheli, F., Shepard, C. C., & Aioldi, L. (2014). The effectiveness of coral reefs for coastal hazard risk reduction and adaptation. *Nature Communications*, 5, 3794. <https://doi.org/10.1038/ncomms4794>.
- Franklin, G., Mariño-Tapia, I., Torres-Freyermuth, A., 2013. Effects of reef roughness on wave setup and surf zone currents. *J. Coast. Res.* 65 (Sp2), 2005–2011.
- Franklin, G.L., Torres-Freyermuth, A., Medellin, G., Allende-Arandia, M.E., Appendini, C.M., 2018. The role of the reef–dune system in coastal protection in puerto morelos (Mexico). *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 18 (4), 1247–1260. <http://dx.doi.org/10.5194/nhess-18-1247-2018>.
- Franklin, G. L., & Torres-Freyermuth, A. (2022). On the runup parameterisation for reef-lined coasts. *Ocean Modelling*, 169, 101929. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2021.101929>.
- Gourlay, M.: Wave transformation on a coral reef, *Coast. Eng.*, 23, 17–42, 1994.
- Gourlay, M. R. (1996). Wave set-up on coral reefs. 1. Set-up and wave-generated flow on an idealised two-dimensional horizontal reef. *Coastal Engineering*, 27(3-4), 161-193.
- Hansen, K. (2 de mayo de 2022). *Tahiti's Heavy Waves*. NASA Earth Observatory. <https://earthobservatory.nasa.gov/images/150079/tahitis-heavy-waves>

- Hasselmann, K. (1962). On the non-linear energy transfer in a gravity-wave spectrum Part 1. General theory. *Journal of Fluid Mechanics*, 12(4), 481-500.
- Harris, D. L., Rovere, A., Casella, E., Power, H., Canavesio, R., Collin, A., et al. (2018). Coral reef structural complexity provides important coastal protection from waves under rising sea levels. *Science Advances*, 4, eaao4350. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aao4350>.
- Hoegh-Guldberg, O., Pendleton, L., & Kaup, A. (2019). People and the changing nature of coral reefs. *Regional Studies in Marine Science*, 30, 100699.
- Hoeke, R. K., McInnes, K., Kruger, J., McNaught, R. J., Hunter, J. R., & Smithers, S. G. (2013). Widespread inundation of Pacific islands triggered by distant-source wind-waves. *Global and Planetary Change*, 108, 128–138. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2013.06.006>
- Holman, R. A. (1986). Extreme value statistics for wave run-up on a natural beach. *Coastal Engineering*, 9(6), 527-544.
- Hughes, S. A. (1993). *Physical models and laboratory techniques in coastal engineering* (Vol. 7). World Scientific.
- Hunt, IA., 1959a. Design of seawalls and breakwaters. *J. Waterw. Port. Coast. Ocean Eng.* 85, 123–152.
- Kamphuis, J. W. (1991). *Physical Modeling. Handbook of Coastal and Ocean Engineering*, J. B. Herbich, Ed., Vol 2, Gulf Publishing Company, Houston, Texas.
- Lam, D. C. L., & Simpson, R. B. (1976). Centered differencing and the box scheme for diffusion convection problems. *Journal of computational physics*, 22(4), 486-500.
- Lashley, C. H., Roelvink, D., van Dongeren, A., Buckley, M. L., & Lowe, R. J. (2018). Nonhydrostatic and surfbeat model predictions of extreme wave run-up in fringing reef environments. *Coastal Engineering*, 137, 11–27. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2018.03.007>
- Le Mehaute, B. 1990. Similitude. *Ocean Engineering Science*. Ed., Vol 9, Part B in the series *The Sea*, John Wiley and Sons, New York, pp 955-980.
- Lin, P., & Liu, P. L. F. (1998). A numerical study of breaking waves in the surf zone. *Journal of fluid mechanics*, 359, 239-264.
- Liu, Y., Liao, Z., Fang, K., & Li, S. (2021). Uncertainty of wave runup prediction on coral reef-fringed coasts using SWASH model. *Ocean Engineering*, 242, 110094.
- Liu, Y., Li, S., Chen, S., Hu, C., Fan, Z., & Jin, R. (2020). Random wave overtopping of vertical seawalls on coral reefs. *Applied Ocean Research*, 100, 102166.
- Longuet-Higgins, M. S., & Stewart, R. W. (1962). Radiation stress and mass transport in gravity waves, with application to 'surf beats'. *Journal of Fluid Mechanics*, 13(4), 481-504.
- Losada, I. J., Lara, J. L., Guanche, R., & Gonzalez-Ondina, J. M. (2008). Numerical analysis of wave overtopping of rubble mound breakwaters. *Coastal engineering*, 55(1), 47-62.
- Lowe, R. J., Koseff, J. R., & Monismith, S. G. (2005). Oscillatory flow through submerged canopies: 1. Velocity structure. *Journal of Geophysical Research*, 110, C10016. <https://doi.org/10.1029/2004jc002788>.
- Lugo-Fernández, A., Roberts, H. H., Wiseman, W. J., Jr., & Carter, B. L. (1998). Water level and currents of tidal and infragravity periods at Tague Reef, St. Croix (USVI). *Coral Reefs*, 17, 343–349. <https://doi.org/10.1007/s003380050137>.
- Mansard, E. P., & Funke, E. R. (1980). The measurement of incident and reflected spectra using a least squares method. In *Coastal Engineering 1980* (pp. 154-172).

- Mase, H. (1989). Random wave runup height on gentle slope. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 115(5), 649-661.
- Masselink, Gerd, et al. *Introduction to Coastal Processes and Geomorphology*, Taylor & Francis Group, 2011.
- Masselink, G., Tuck, M., McCall, R., van Dongeren, A., Ford, M., & Kench, P. (2019). Physical and numerical modeling of infragravity wave generation and transformation on coral reef platforms. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124(3), 1410-1433.
- Masselink, G., Beetham, E., & Kench, P. (2020). Coral reef islands can accrete vertically in response to sea level rise. *Science Advances*, 6(24), eaay3656.
- Medellín, G., Brinkkemper, J.A., Torres-Freyermuth, A., Appendini, C.M., Mendoza, E.T., Salles, P., 2016. Run-up parameterization and beach vulnerability assessment on a barrier island: a downscaling approach. *Nat. Hazard. Earth Sys. Sci.* 16 (1), 167–180.
- Monismith, S. G. (2007). Hydrodynamics of coral reefs. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 39, 37-55.
- Monismith, S. G. (2014). Flow through a rough, shallow reef. *Coral Reefs*, 33(1), 99-104.
- Mumby, P. J., & Steneck, R. S. (2008). Coral reef management and conservation in light of rapidly evolving ecological paradigms. *Trends in ecology & evolution*, 23(10), 555-563.
- Munk, W. H., & Sargent, M. C. (1948). Adjustment of Bikini Atoll to ocean waves. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 29, 855–860. <https://doi.org/10.1029/TR029i006p00855>.
- Nielsen, P., & Hanslow, D. J. (1991). Wave runup distributions on natural beaches. *Journal of Coastal Research*, 1139-1152.
- Nwogu, O., & Demirbilek, Z. (2010). Infragravity wave motions and runup over shallow fringing reefs. *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering*, 136(6), 295-305.
- Osorio-Cano, J. D., Alcérreca-Huerta, J. C., Mariño-Tapia, I., Osorio, A. F., Acevedo-Ramírez, C., Enríquez, C., et al. (2019). Effects of roughness loss on reef hydrodynamics and coastal protection: approaches in Latin America. *Estua. Coasts* 42, 1742–1760.
- Pandolfi, J. M., Connolly, S. R., Marshall, D. J., & Cohen, A. L. (2011). Projecting coral reef futures under global warming and ocean acidification. *science*, 333(6041), 418-422.
- Park, H., & Cox, D. T. (2016). Empirical wave run-up formula for wave, storm surge and berm width. *Coastal Engineering*, 115, 67-78.
- Passarella, M., Goldstein, E.B., Demuro, S., Coco, G., 2018. The use of genetic programming to develop a predictor of swash excursion on sandy beaches. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 18, 599–611. <http://dx.doi.org/10.5194/nhess-18-599-2018>.
- Pearson, S. G., Storlazzi, C. D., van Dongeren, A. R., Tissier, M. F. S., & Reniers, A. J. H. M. (2017). A Bayesian-based system to assess wave-driven flooding hazards on coral reef-lined coasts. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 122, 10099–10117. <https://doi.org/10.1002/2017jc013204>.
- Peláez-Zapata, D. S., Montoya, R. D., & Osorio, A. F. (2018). Numerical study of run-up oscillations over fringing reefs. *Journal of Coastal Research*, 34(5), 1065-1079.
- Péquignet, A. C. N., Becker, J. M., Merrifield, M. A., & Aucan, J. (2009). Forcing of resonant modes on a fringing reef during tropical storm Man-Yi. *Geophysical Research Letters*, 36, L03607. <https://doi.org/10.1029/2008gl036259>.
- Péquignet, C., Becker, J. M., Merrifield, M. a., & Boc, S. J. (2011). The dissipation of wind wave energy across a fringing reef at Ipan, Guam. *Coral Reefs*, 30:71–82.

- Péquignet, A. C. N., Becker, J. M., & Merrifield, M. A. (2014). Energy transfer between wind waves and low-frequency oscillations on a fringing reef, I pan, Guam. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119(10), 6709-6724.
- Pomeroy, A., Lowe, R., Symonds, G., van Dongeren, A., & Moore, C. (2012). The dynamics of infragravity wave transformation over a fringing reef. *Journal of Geophysical Research*, 117, C11022. <https://doi.org/10.1029/2012jc008310>.
- Quataert, E., Storlazzi, C., van Rooijen, A., Cheriton, O., & van Dongeren, A. (2015). The influence of coral reefs and climate change on wave-driven flooding of tropical coastlines. *Geophysical Research Letters*, 42, 6407–6415. <https://doi.org/10.1002/2015gl064861>.
- Quataert, E., Storlazzi, C., van Dongeren, A., & McCall, R. (2020). The importance of explicitly modelling sea-swell waves for runup on reef-lined coasts. *Coastal Engineering*, 160, 103704. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2020.103704>.
- Reguero, B. G., Beck, M. W., Agostini, V. N., Kramer, P., & Hancock, B. (2018). Coral reefs for coastal protection: A new methodological approach and engineering case study in Grenada. *Journal of environmental management*, 210, 146-161.
- Reguero, B. G., Storlazzi, C. D., Gibbs, A. E., Shope, J. B., Cole, A. D., Cumming, K. A., & Beck, M. W. (2021). The value of US coral reefs for flood risk reduction. *Nature Sustainability*, 4(8), 688-698.
- Rodríguez, R., Báez Taveras, D.B., Valcárcel Abud, A., Evangelista Pérez, D.Y., Bello De Lillo, Y.P., y Matos Mercedes, J. (2022). Importancia de los viveros de coral y su impacto socioeconómico. *AULA Revista de Humanidades y Ciencias Sociales*, 68 (1), 78-91 <http://doi.org/1033413/aulahcs.2022.68i1.199>.
- Roelvink, D., Reniers, A., van Dongeren, A., van Thiel de Vries, J., McCall, R., & Lescinski, J. (2009). Modelling storm impacts on beaches, dunes, and barrier islands. *Coastal Engineering*, 56, 1133–1152. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2009.08.006>.
- Roelvink, F. E., Storlazzi, C. D., Van Dongeren, A. R., & Pearson, S. G. (2021). Coral reef restorations can be optimized to reduce coastal flooding hazards. *Frontiers in Marine Science*, 8, 653945.
- Rijnsdorp, D. P., Smit, P. B., & Zijlema, M. (2014). Non-hydrostatic modelling of infragravity waves under laboratory conditions. *Coastal Engineering*, 85, 30-42.
- Rijnsdorp, D. P., Buckley, M. L., da Silva, R. F., Cuttler, M. V. W., Hansen, J. E., Lowe, R. J., et al. (2021). A numerical study of wave-driven mean flows and setup dynamics at a coral reef-lagoon system. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 126, e2020JC016811. <https://doi.org/10.1029/2020JC016811>.
- Ruggiero, P., Komar, P. D., McDougal, W. G., & Beach, R. A. (1996). Extreme water levels, wave runup and coastal erosion. In *Coastal Engineering 1996* (pp. 2793-2805).
- Ruggiero, P., Komar, P. D., McDougal, W. G., Marra, J. J., & Beach, R. A. (2001). Wave runup, extreme water levels and the erosion of properties backing beaches. *Journal of coastal research*, 407-419.
- Ruggiero, P., Holman, R. A., & Beach, R. A. (2004). Wave run-up on a high-energy dissipative beach. *Journal of Geophysical Research*, 109, C06025. <https://doi.org/10.1029/2003jc002160>.
- Ruiz de Alegria-Arzaburu, A., Mariño-Tapia, I., Enriquez, C., Silva, R., & González-Leija, M. (2013). The role of fringing coral reefs on beach morphodynamics. *Geomorphology*, 198, 69-83.
- Ruessink, B. G., Kleinhan, M. G., & Van den Beukel, P. G. L. (1998). Observations of swash under highly dissipative conditions. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 103(C2), 3111-3118.
- Seelig, W. N. (1983). Laboratory study of reef-lagoon system hydraulics. *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering*, 109(4), 380-391.

- Senechal, N., Coco, G., Bryan, K. R., & Holman, R. A. (2011). Wave runup during extreme storm conditions. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 116(C7).
- Shimozono, T., Tajima, Y., Kennedy, A. B., Nobuoka, H., Sasaki, J., & Sato, S. (2015). Combined infragravity wave and sea-swell runup over fringing reefs by super typhoon Haiyan. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 120, 4463–4486. <https://doi.org/10.1002/2015jc010760>.
- Smit, P., Zijlema, M., & Stelling, G. (2013). Depth-induced wave breaking in a non-hydrostatic, near-shore wave model. *Coastal Engineering*, 76, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2013.01.008>.
- Smit, P., Janssen, T., Holthuijsen, L., Smith, J., 2014. Non-hydrostatic modeling of surf zone wave dynamics. *Coast. Eng.* 83, 36–48.
- Stelling, G. S., & Duinmeijer, S. A. (2003). A staggered conservative scheme for every Froude number in rapidly varied shallow water flows. *International journal for numerical methods in fluids*, 43(12), 1329-1354.
- Stelling, G., & Zijlema, M. (2003). An accurate and efficient finite-difference algorithm for non-hydrostatic free-surface flow with application to wave propagation. *International journal for numerical methods in fluids*, 43(1), 1-23.
- Stockdon, H. F., Holman, R. A., Howd, P. A., & Sallenger, A. H. (2006). Empirical parameterization of setup, swash, and runup. *Coastal Engineering*, 53, 573–588. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2005.12.005>.
- Stockdon, H. F., Thompson, D. M., Plant, N. G., & Long, J. W. (2014). Evaluation of wave runup predictions from numerical and parametric models. *Coastal Engineering*, 92, 1-11.
- Storlazzi, C. D., Gingerich, S. B., van Dongeren, A. p. R., Cheriton, O. M., Swarzenski, P. W., Quataert, E., et al. (2018). Most atolls will be uninhabitable by the mid-21st century because of sea-level rise exacerbating wave-driven flooding. *Science Advances*, 4, eaap9741. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aap9741>.
- Surflin Forecast Team (10 de agosto de 2022). *Mechanics of Teahupoo, Tahiti*. <https://www.surflin.com/surf-news/mechanics-of-teahupoo-tahiti-surf-worlds-heaviest-wave/31797>.
- Suzuki, T., Altomare, C., Veale, W., Verwaest, T., Trouw, K., Troch, P., & Zijlema, M. (2017). Efficient and robust wave overtopping estimation for impermeable coastal structures in shallow foreshores using SWASH. *Coastal Engineering*, 122, 108-123.
- Suzuki, T., Hu, Z., Kumada, K., Phan, L. K., & Zijlema, M. (2019). Non-hydrostatic modeling of drag, inertia and porous effects in wave propagation over dense vegetation fields. *Coastal Engineering*, 149, 49–64. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2019.03.011>.
- Symonds, G., Huntley, D. A., & Bowen, A. J. (1982). Two-dimensional surf beat: Long wave generation by a time-varying breakpoint. *Journal of Geophysical Research*, 87, 492–498. <https://doi.org/10.1029/JC087iC01p00492>.
- The SWASH team (2023). SWASH user manual: SWASH version 9.01. Delft University of Technology.
- Torres-Freyermuth, A., Lara, J. L., & Losada, I. J. (2010). Numerical modelling of short-and long-wave transformation on a barred beach. *Coastal Engineering*, 57(3), 317-330.
- Torres-Freyermuth, A., Mariño Tapia, I., Coronado, C., Salles, P., Medellín, G., Pedrozo-Acuña, A., Silva, R., Candela, J., & Iglesias-Prieto, R. (2012). Wave induced extreme water levels in the Puerto Morelos fringing reef lagoon. *Natural Hazards and Earth System Science*, 12:3765–3773.

- Torres-Freyermuth, A., Pintado-Patiño, J.C., Pedrozo-Acuña, A., Puleo, J.A., Baldock, T.E., 2019. Runup uncertainty on planar beaches. *Ocean Dyn.* 69 (11–12), 1359–1371. <http://dx.doi.org/10.1007/s10236-019-01305-y>.
- Van Dongeren, A., Lowe, R., Pomeroy, A., Trang, D. M., Roelvink, D., Symonds, G., & Ranasinghe, R. (2013). Numerical modeling of lowfrequency wave dynamics over a fringing coral reef. *Coastal Engineering*, 73, 178–190. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng>.
- Vitousek, S., Barnard, P. L., Fletcher, C. H., Frazer, N., Erikson, L., and Storlazzi, C. D. (2017). Doubling of coastal flooding frequency within decades due to sea-level rise. *Nature* 7:1399. doi: 10.1038/s41598-017-01362-7.
- Vousdoukas, M. I., Wziatek, D., & Almeida, L. P. (2012). Coastal vulnerability assessment based on video wave run-up observations at a mesotidal, steep-sloped beach. *Ocean Dynamics*, 62, 123-137.
- Wandres, M., Aucan, J., Espejo, A., Jackson, N., De Ramon N'Yeurt, A., & Damlamian, H. (2020). Distant-source swells cause coastal inundation on Fiji's Coral Coast. *Frontiers in Marine Science*, 7, 546.
- Yao, Y., Huang, Z. H., Monismith, S. G., & Lo, E. Y. M. (2012). 1DH Boussinesq modeling of wave transformation over fringing reefs. *Ocean Engineering*, 47, 30–42.
- Yao, Y., Becker, J.M., Merrifield, M.A., 2014. Boussinesq modeling of wave transformation over fringing reefs: two case studies of field observations. In: *Ocean Sci. Meeting 2014, Honolulu, Hawaii, USA* (OS014-14397).
- Yao, Y., He, W., Du, R., & Jiang, C. (2017). Study on wave-induced setup over fringing reefs in the presence of a reef crest. *Applied Ocean Research*, 66, 164-177.
- Yao, Y., Huang, Z. H., He, W. R., & Monismith, S. G. (2018). Wave-induced setup and wave-driven current over Quasi-2DH reef-lagoon-channel systems. *Coastal Engineering*, 138, 113–125. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2018.04.009>.
- Yao, Y., Chen, S. G., Zheng, J. H., Zhang, Q. M., & Chen, S. B. (2020). Laboratory study on wave transformation and run-up in a 2DH reef-lagoon-channel system. *Ocean Engineering*, 215, 107907. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107907>.
- Yao, Y., Chen, X., Xu, C., Jia, M., & Jiang, C. (2021). Numerical modelling of wave transformation and runup over rough fringing reefs using VARANS equations. *Applied Ocean Research*, 118, 102952. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2021.102952>.
- Zijlema, M., & Stelling, G. S. (2005). Further experiences with computing non-hydrostatic free-surface flows involving water waves. *International journal for numerical methods in fluids*, 48(2), 169-197.
- Zijlema, M., & Stelling, G. S. (2008). Efficient computation of surf zone waves using the nonlinear shallow water equations with non-hydrostatic pressure. *Coastal Engineering*, 55(10), 780-790.
- Zijlema, M., Stelling, G., & Smit, P. (2011). SWASH: An operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal waters. *Coastal Engineering*, 58, 992–1012. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.05.015>.
- Zijlema, M., (2012). Modelling wave transformation across a fringing reef using SWASH. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(33), currents.26. <https://doi.org/10.9753/icce.v33.currents.26>.
- Zijlema, M. (2020). Computation of free surface waves in coastal waters with SWASH on unstructured grids. *Computers & Fluids*, 213, 104751.