



Escuela de Doctorado y Estudios de Posgrado

Programa de Doctorado en Ingeniería Industrial, Informática y Medioambiental
Línea de investigación 3: Observación y Modelización del Sistema Tierra-Atmósfera

Tesis Doctoral:

Estudio del Comportamiento de los *Swells* Provenientes del Hemisferio Sur en las Costas de las Islas Canarias

AUTOR: Emilio José Megías Dorado

DIRECTOR: Manuel Damián García Román
Departamento de Ingeniería Civil, Náutica y Marítima.

TUTOR: Juan Pedro Díaz González
Departamento de Física. Grupo de Observación de la Tierra y la Atmósfera (GOTA).

San Cristóbal de La Laguna, marzo 2024

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

**Programa de Doctorado en Ingeniería Industrial,
Informática y Medioambiental.**

Línea de investigación 3: Observación y
Modelización del Sistema Tierra-Atmósfera.

Tesis Doctoral por Compendio de Publicaciones

Autor:

Emilio José Megías Dorado

Ingeniero Agrónomo e Ingeniero Técnico de Obras Públicas

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



Listado de publicaciones que componen esta tesis (artículos publicados en revistas incluidas en el listado del Journal Citation Reports (JCR)):

1. Megías, E. (2021) "Observation of transhemispheric waves on the southern coast of the Canary Islands", Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Maritime Engineering, 174(2), pp. 34–52.
<https://doi.org/10.1680/jmaen.2020.30>.
2. Megías, E. and García-Román, M. (2022) "Influence of Trade Winds on the Detection of Trans-Hemispheric Swells near the Canary Islands", Atmosphere, 13(4), p. 505.
<https://doi.org/10.3390/atmos13040505>.
3. Megías, E. and García-Román, M. (2023) "A Methodology for Statistical Mean Wave Climate Regime Characterisation in Oceanic Islands: The Case of the Southern Coast of Tenerife", Journal of Marine Science and Technology, 31(3), Article 12
<https://doi.org/10.51400/2709-6998.2707>.

Otras publicaciones incluidas (libro de actas de congresos):

1. Megías, E. and García-Román, M. (2021) "Estimación del comportamiento de swells transhemisféricos en la costa de islas oceánicas mediante el uso del Número de Iribarren: El caso de la costa sur de Tenerife", en M. Berezowsky, A. Mendoza, and M. Arganis-Juarez (eds) Compilación de trabajos completos: XXIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica México. AMH - IAHR - Instituto de Ingeniería. UNAM. ISBN 979–888722468–8.

Manuscritos en proceso de revisión:

1. Megías, E. and García-Román, M. (2023) "Contribution of transhemispheric swells to the wave energy potential on the south coast of the Canary Islands".
Revista científica en la que está siendo evaluado: Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Energy.
Nº de referencia: ENER-2023-057

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



*“...Una ola, dos olas, tres olas.
Pasan los años y los siglos... y las olas no cesan.
Las olas van y vienen y se rompen...
Hay más olas que estrellas y que granos de arena....
Y contamos el Tiempo con las olas amargas coronadas de espuma...”*

Fragmento del poema *El Reloj*,
lo escribió León Felipe (1958),
lo cantó Enrique Morente (2003).

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



AGRADECIMIENTOS:

Enfrentarse a una página en blanco, y escribir “gracias” es harto complicado, se suelen mezclar sentimientos de profunda gratitud con otros compromisos de agradecimientos que, sin dejar de ser sinceros, no llegan a ser tan hondos... “como no voy a agradecer a Fulano, o a Mengano...”. En un intento de supuesta valentía y arrojo, voy a procurar ser lo más sincero y escueto posible, y en ese ejercicio de honestidad, se quedará gente sin citar que con pleno derecho deberían aparecer aquí, comienzo por tanto este apartado pidiéndoles disculpas.

Quiero dar las gracias a mi director de tesis, el Dr. Manuel García Román, por su ejercicio de generosidad, al compartir su escaso tiempo conmigo. También por darme la oportunidad de acceder a la *Venia Docendi* durante el curso 2022/23, algo que realmente he disfrutado mucho. No he podido tener mejor director de tesis.

También quiero dar las gracias al ingeniero de caminos D. Juan Antonio Afonso Mosegúe por abrirme una ventana al mar, yo soy un ingeniero de interior, que jugaba en los domingos de mi infancia entre maquinaria agrícola y aperos de labranza en el granero y el corral de la casa de mi abuelo, de espaldas al mar, en plena Marisma del Guadalquivir, no entre artes y aparejos de pesca, ni instrumentos náuticos.

A los dos, les tengo que agradecer que hayan contado conmigo para ser ponente en las cuatro últimas ediciones del Máster Interuniversitario en Ingeniería de Puertos y Costas impartido por las dos Universidades Públicas Canarias.

Agradecer también a mi tutor, el Dr. Juan Pedro Díaz González, por su rápida respuesta en todas las cuestiones que han ido apareciendo a lo largo de estos cursos.

Ya fuera del ámbito de Canarias, también quisiera agradecer sus interesantes comentarios al Dr. Claudio Freitas Neves, profesor de la Universidad Federal de Rio de Janeiro, y miembro del ASCE.

En esta investigación ha sido fundamental los datos procedentes de las boyas de aguas profundas y las boyas virtuales que el Organismo Público Puertos del Estado mantiene en Canarias, mi mayor gratitud y reconocimiento, en particular al Área del Medio Físico, sin cuyo trabajo sería imposible que publicaciones como las que componen esta tesis doctoral fueran posibles. Hermosa forma de hacer País desde la Ciencia y el Servicio Público, mil gracias.

Por último, quiero dar las gracias a mi mujer y a mi hijo, que me aguantan... ¡que no es poco!

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



PRÓLOGO:

Tras cinco años de trabajo, es momento de recoger toda esta travesía en una tesis. Se corre el riesgo de que el resultado sea una redacción deslavazada, más aún cuando estos estudios de doctorado se han realizado en el régimen de dedicación a tiempo parcial, compartiendo el tiempo y energía con el desempeño profesional, y con la familia.

¡Y que años!, agitados por una pandemia y una erupción volcánica como si fueran una dársena sin abrigo a temporal alguno. Y sin olvidar los terribles incendios forestales que nos tuvieron el alma en vilo.

Desde un primer momento, mi director de tesis y yo estuvimos de acuerdo en que la forma más interesante de abordar este doctorado era mediante la modalidad por compendio de publicaciones. Veíamos en esta modalidad la gran ventaja de poder llegar a un mayor número de ingenieros e investigadores desde la primera publicación, en esa necesidad de inmediatez que hoy en día nos hemos creado, además de pretender que los posibles resultados de la investigación no quedaran escondidos en un cajón, ya sea físico o virtual, sin servir de utilidad para otros compañeros.

Pero con esta modalidad es difícil mantener la idea de unidad del conjunto del trabajo de doctorado, que irremediamente se ha tenido que compartimentar en las etapas que han dado como resultado las distintas publicaciones.

Espero que en la redacción de esta tesis se haya conseguido transmitir ese concepto de unidad, donde el estudio de los *Swells* que llegan a Canarias desde el Hemisferio Sur se ha realizado desde una visión de conjunto, desde su origen a miles de millas náuticas, su transformación en tan larga travesía, sus efectos y hasta su posible aprovechamiento en las costas canarias.

En San Cristóbal de la Laguna, a 15 de marzo de 2024

Emilio Megías

Ingeniero Agrónomo e Ingeniero Técnico de Obras Públicas
Chartered Engineer, Member of the Institution of Civil Engineers

6

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGLQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



RESUMEN:

A las Islas Canarias llegan periódicamente *Swells* provenientes de áreas extratropicales del Hemisferio Sur.

Este tipo de oleaje, que necesita para su generación vientos de suficiente intensidad y unos *fetchs* de importancia para que se produzca la suficiente interacción entre dichos vientos y la superficie del océano, tiene como origen más habitual la zona suroeste del Atlántico Sur, frente a las costas meridionales de Sudamérica, e incluso más al sur del continente latinoamericano. Hay que resaltar la importante actividad ciclónica existente en esa zona, siendo un área donde la frecuencia e importancia de los temporales es sobradamente conocida.

El oleaje producido, recorre miles de millas náuticas, cruza el Ecuador, y alcanza las latitudes donde se sitúan las Islas Canarias, muy transformado, con grandes periodos, pero alturas pequeñas, lo que dificulta su detección.

La combinación de las características de este oleaje (muy poco peraltado), con las características habituales de las costas canarias (con una estrecha plataforma costera de pendiente considerable), y con las complejas características del clima marítimo de la zona (donde se produce la confluencia de mar de fondo proveniente de los dos hemisferios con el oleaje de viento local) dan como resultado una interacción muy interesante desde el punto de vista oceanográfico y de la ingeniería de costas.

Con este trabajo se ha pretendido estudiar el comportamiento de este oleaje a su llegada a Canarias, estudiando para ello los siguientes puntos:

- Su origen y posterior transformación durante tan larga travesía.
- Sus características principales a su llegada a estas latitudes.
- Dificultad en su detección, enmascaramiento entre el resto del oleaje que conforman el estado de la mar.
- La frecuencia de aparición, su distribución a lo largo del año.
- Su comportamiento a su llegada a la costa, pérdida de energía, tipo de rotura, y capacidad de remonte y rebase.
- Su interacción con las infraestructuras portuarias.
- La energía transportada por este tipo de oleaje y la posibilidad de aprovechamiento.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



A modo de escueto resumen, podemos afirmar, que este oleaje transhemisférico llega a Canarias con unas alturas muy modestas (su altura significativa rara vez superan los 2 m), pero con importantes periodos (habitualmente se producen registros de periodos de pico que superan los 18 s, que han llegado a alcanzar en algunos casos valores mayores a los 25 s). Respecto a su distribución a lo largo del año, aparecen claramente 2 picos en los registros, uno en primavera y otro en otoño. Aunque los mayores valores de altura de oleaje se registran en verano, coincidiendo con el invierno austral.

A pesar de su pequeña altura, su gran periodo hace que transporte gran cantidad de energía, que sin lugar a dudas lo convierte en un actor más en la dinámica litoral de la fachada sur de las islas. La interacción del pequeño peralte del oleaje con la acusada pendiente habitual en la costa insular hace que se den las condiciones necesarias para que se produzca la rotura tipo *plunging*, lo que puede propiciar eventos de remonte y rebase en el litoral expuesto.

Por otro lado, al ser habitual que las bocanas de las infraestructuras portuarias insulares estén orientadas al Sur, buscando el máximo abrigo contra el oleaje más importante, de componente Norte, sus dársenas estarán muy expuestas al oleaje de componente Sur, con el consiguiente riesgo que dicha exposición tiene para los elementos que conforman la infraestructura, y en el aumento de la agitación interior.

A pesar de ser un oleaje muy energético, a día de hoy, con el desarrollo y nivel de madurez alcanzado por la industria de las energías renovables marinas, este no alcanza el umbral para que su aprovechamiento sea rentable. Pero es parte integrante del clima marítimo de la zona, y no se puede descartar su aprovechamiento en un futuro. No hay que perder de vista el estudio del aprovechamiento conjunto en campos mixtos de energía eólica *offshore* – undimotriz.

PALABRAS CLAVES:

Altura Significante; Clima Marítimo; Energía del oleaje; Islas Canarias; Mar de fondo; Mar de viento; Oleaje transhemisférico; Periodo de Pico; Rotura de oleaje

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



ABSTRACT:

Swell waves periodically reach the Canary Islands from extratropical regions of the Southern Hemisphere.

These swell waves require winds of ample intensity and fetch to generate sufficient interaction between winds and the ocean surface. Typically, these swells originate in the southwestern region of the South Atlantic, off the southern coasts of South America, and extends even further south on the Latin American continent. Notable, the area experiences considerable cyclonic activity, with a high frequency and significance of storms.

The generated swell spans thousands of nautical miles, crossing the Equator before reaching the latitudes where the Canary Islands are located. It undergoes significant transformation, exhibiting extended periods but small heights, posing a challenge for detection.

The interaction between the peculiarities of these low-steepness swells, the typical features of the Canary coasts (exhibiting a narrow coastal platform of considerable slope), and with the complex characteristics of the maritime climate of the area (where swells from both hemispheres converge with the local sea waves) creates a fascinating dynamic from both the oceanographic and coastal engineering perspectives.

The aim of this work is to study the behavior of this swell on its arrival in the Canary Islands, studying the following points:

- The origin and subsequent transformation during its extended journey.
- The main characteristics on arrival at these latitudes.
- Difficulty in detection, being masked among the more regular waves that makes up the sea state.
- The frequency of their appearance and their distribution throughout the year.
- Behavior on arrival at the coast, including loss of energy, type of breaking, and capacity for run-up and overtopping.
- Interaction with port infrastructures.
- The energy transported by this type of wave and the possibility of harnessing it.

By way of a brief summary, we can state that this trans-hemispheric swell reaches the Canary Islands with modest wave heights (its significant height rarely exceeding 2 meters) but

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



noteworthy periods (commonly surpassing 18 s, occasionally reaching values exceeding 25 s). Its yearly distribution reveals two prominent peaks, one in spring and another in autumn. Notably, the highest wave heights occur during summer, aligning with the austral winter.

Despite its small height, the extended period of this swell results in the transportation of a substantial amount of energy, solidifying its role in the coastal dynamics of the southern shore of the islands. The interaction of the small wave steepness with the typically pronounced slope of the island coast creates conditions conducive to plunging breaking, potentially triggering run-up and overtopping events on the exposed coastline.

On the contrary, given that the entrances of the island's port infrastructures typically face south to seek optimal protection from the predominant North Swells, their docks become highly vulnerable to South Swells. This exposure poses risks to the structural elements of the infrastructures and leads to an escalation in internal agitation.

While these swells carry considerable energy, with the level of maturity in today's marine renewable energy industry, they do not reach the profitable threshold for their use. Nevertheless, it remains a significant component of the local wave climate, and its potential utilization should not be dismissed for the future. Exploring the possibilities of combined exploitation in integrated offshore wind-wave energy farms warrants careful consideration.

KEY WORDS:

Canary Islands; Peak Period; Sea wave; Significant Height; Swell; Transhemispheric waves;
Wave Breaking; Wave Climate; Wave Energy

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVG1Qi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN	17
1.1. El Archipiélago Canario.	18
1.2. Formación de las Islas Canarias, aspectos geológicos.....	19
1.3. Aspectos orográficos de las Islas Canarias	21
1.4. Definiciones previas: clima marítimo y estado del mar	22
1.5. El clima marítimo de Canarias	24
1.6. Los <i>Swells</i> provenientes del Hemisferio Sur.....	26
2. OBJETIVOS	28
2.1. Motivación.....	29
2.2. Hipótesis de partida.	30
2.3. Descripción pormenorizada de los objetivos de la investigación.	30
3. ESTADO DEL ARTE	32
3.1. Introducción.	33
3.2. El desarrollo del clima marítimo como campo de la ciencia.	33
3.3. Las teorías clásicas sobre el oleaje, ámbito de aplicación de cada una de ellas.....	35
3.4. Los parámetros descriptivos de la ola.	37
3.5. La teoría lineal.	38
3.6. La mar real como superposición de ondas sinusoidales.	39
3.7. Velocidad de grupo	40
3.8. Principales parámetros estadístico utilizados en el estudio del oleaje.	41
3.9. La energía de las olas.	43
3.10. Generación del oleaje, el mar de viento o <i>Sea</i>	44
3.11. Transformación del oleaje en aguas profundas: el mar de fondo o <i>Swell</i>	46
3.12. Discriminación entre oleaje tipo <i>Sea</i> y tipo <i>Swell</i>	47
3.13. El estudio de <i>Swells</i> de largo periodo.	48
3.14. Estudio de los <i>Swells</i> procedentes del Hemisferio Sur.....	49

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



3.15.	Eventos extremos de oleaje con componente Sur en las costas canarias.....	49
4.	METODOLOGÍA.....	51
4.1.	Fuentes de datos utilizadas.....	52
4.2.	La Boya REDEX Tenerife Sur.....	53
4.3.	Procesado previo de los datos.....	54
4.4.	Separación de los Swells transhemisféricos objetos del trabajo.....	55
4.5.	Definición de las condiciones necesarias para que se produzcan los Swells de largo periodo objeto de esta tesis.....	59
4.6.	Investigaciones realizadas, justificación de los aspectos estudiados mediante caso en estudio: Los eventos registrados durante el verano boreal de 2023.....	61
5.	RESULTADOS.....	66
5.1.	Presentación de resultados, correspondencia con publicaciones.....	67
5.2.	Origen de los Swells transhemisféricos (Publicación AR-01).....	69
5.3.	Comportamiento de los Swells a su llegada a la costa. Tipo de rotura. (Publicación VA-01).....	71
5.4.	Problemática en la detección de los Swells en estudio. Interacción con el oleaje de viento originado en Canarias (Publicación AR-02).....	73
5.5.	Metodología propuesta para el estudio estadístico del clima marítimo de Islas Oceánicas (Publicación AR-03).....	76
5.6.	Aprovechamiento energético de los Swells procedentes del Hemisferio Sur (Manuscrito VA-02).....	80
6.	CONCLUSIONES.....	82
6.1.	Introducción.....	83
6.2.	Discusión de los resultados.....	84
6.3.	Conclusiones.....	88
7.	FUTURAS INVESTIGACIONES.....	90
7.1.	Motivación.....	91
7.2.	Régimen extremal. Capacidad de inundabilidad de la costa.....	91

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



7.3.	Estudio de la transformación sufrida por los Swells transhemisféricos durante su travesía. Dispersión angular de los <i>Swells</i> de largo periodo.....	92
7.4.	Reflexión de los <i>Swells</i> de largo periodo en las costas canarias.....	92
7.5.	Partición de <i>Swells</i> transhemisféricos.....	93
8.	REFERENCIAS.....	94
9.	ÍNDICE DE ACRÓNIMOS.....	109
10.	ANEXOS.....	111
	Anexo 1: Datos de las revistas indexadas en el Journal Citation Reports (JCR).....	112
	Anexo 2: Enlaces a los artículos publicados en revistas indexadas (JCR).....	114
	Anexo 3: Certificados de aceptación para publicación.....	115

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Archipiélago Canario	18
Figura 2: Valle del Golfo en la isla de El Hierro	20
Figura 3: Mar de nubes en la fachada Norte de la isla de Tenerife	21
Figura 4: Playa de Corralejo, Fuerteventura	22
Figura 5: Oleaje de componente Sur-Suroeste, en la costa de El Rosario, Isla de Tenerife.....	27
Figura 6: Maqueta de Mulberry, Museo del día D de Portsmouth	34
Figura 7: Oleaje producido en canal del laboratorio de la Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de la ULL	36
Figura 8: Diagrama de aplicabilidad de Le Méhauté.....	36
Figura 9: Características de las olas.....	37
Figura 10: Composición de la mar total o real a partir de la suma de n familias de olas	40
Figura 11: Boya REDEXT de Tenerife Sur durante una parada técnica	53
Figura 12: Representación cualitativa aproximada del espectro medio del área Sur-Sureste frente a la costa de Tenerife	55
Figura 13: Flujo de trabajo seguido para la separación del oleaje en estudio.....	56
Figura 14: Arco de direcciones desde la que pueden llegar el oleaje de componente Sur	57
Figura 15: Histograma de frecuencias relativas para las lecturas del rango de direcciones θ_p filtradas	58
Figura 16: Registros tomados por la boya REDEXT Tenerife Sur, de T_p (línea) y de θ_p (puntos), correspondientes al mes de agosto de 2023.	62
Figura 17: Registros de la boya REDEXT Tenerife Sur de los eventos registrados en el mes de agosto que han pasado el cribado previo (puntos y líneas continuas) y líneas de tendencia obtenidas (líneas discontinuas).....	63
Figura 18: Artículo publicado en la revista <i>Maritime Engineering</i>	69
Figura 19: Portada de presentación realizada en el XXIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica IAHR (México 2021).	71
Figura 20: Artículo publicado en la revista <i>Atmosphere</i>	73

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGLQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



Figura 21: Composición de la mar total o real a partir de la suma de 2 *Swells* y mar de viento local 74

Figura 22: Artículo publicado en la revista *Journal of Marine Science and Technology* 76

Figura 23: Clasificación del conjunto de registros según su T_p 77

Figura 24: Sectores obtenidos para el rango de direcciones de procedencias al que está expuesto la Boya REDEXT Tenerife Sur (65-267°) 78

Figura 25: Ciclón extratropical localizado en el Océano Atlántico Sur potencial generador de *Swells* detectados en el Sur de Canarias 84

Figura 26: Histograma realizado con los valores de H_s de los registros de la boya REDEXT Tenerife Sur (años 2008-2022) clasificados como *Swells* provenientes del Hemisferio Sur..... 85

Figura 27: Rotura en *plunging* en la playa de la Tejita el 25 de agosto de 2023 87

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Características técnicas de la Boya de Tenerife Sur	53
Tabla 2: Altura H_s (m) resultante en mares completamente desarrollados en función del viento U_{10} (kt)	59
Tabla 3: <i>Fetch</i> meteorológico mínimo necesario (km) para alcanzar los máximos valores de H_s , en función de la velocidad del viento (m/s) y la duración del temporal (horas)	60
Tabla 4: Cálculo de distancia aproximada D y tiempo t de desplazamiento del oleaje en estudio desde su origen hasta Canarias.....	64
Tabla 5: Objetivos de la investigación, y artículos desarrollados que han abordado específicamente cada uno de estos objetivos.	68
Tabla 6: Clasificación de tipos de rotura según el número de Iribarren (I_{r0}).....	72

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

1. INTRODUCCIÓN

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



"We never dreamt that wave prediction would become a thriving business."

Walter H. Munk, 2010

Del apartado "Where the Swell Begins" del libro "Seventy years of exploration in oceanography: A prolonged weekend discussion with Walter Munk" (Von storch and Hasselmann, 2010)

1.1. El Archipiélago Canario.

El Archipiélago Canario es un conjunto de islas de origen volcánico localizado en el Océano Atlántico Norte, entre los 27º y 29º de latitud Norte y los 13º y 18º de longitud Oeste. Está formado por siete islas mayores (Lanzarote, Fuerteventura, Gran Canaria, Tenerife, La Gomera, La Palma, y El Hierro), cuatro islas menores (Aleganza, Montaña Clara, La Graciosa, e Isla de Lobos) y varios roques (Figura 1).

El Archipiélago Canario se emplaza sobre la corteza oceánica en el borde del continente africano, estando la Isla de Fuerteventura separada apenas 100 Km de dicho continente. Forman parte junto a las Azores, Madeira, Islas Salvajes y Cabo Verde, de la Región Macaronésica. Todos estos grupos de islas tienen un origen volcánico.



Figura 1: Archipiélago Canario, ubicado frente a la costa Oeste de África, de Oeste a Este se encuentran las islas de El Hierro, La Palma, La Gomera, Tenerife, Gran Canaria, Fuerteventura, Lanzarote y La Graciosa, al sureste de la imagen puede apreciarse la costa africana.

[\(https://emodnet.ec.europa.eu/geoviewer/\)](https://emodnet.ec.europa.eu/geoviewer/)

Precisamente este origen volcánico es de vital importancia para el desarrollo del presente trabajo, ya que de él depende directamente las principales características de las costas de

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



Canarias, lo que influirá de forma crucial en el comportamiento del oleaje incidente, es por ello por lo que se pasará a describir brevemente este origen volcánico.

1.2. Formación de las Islas Canarias, aspectos geológicos.

Han sido muchas las teorías propuestas para explicar los posibles orígenes de las Islas Canarias, siendo las más reconocidas la teoría de fractura propagante (Anguita y Hernan, 1975), la teoría del punto caliente o *hotspot* (Carracedo, 1979, 1996; Troll y Carracedo, 2016) y la teoría de los bloques levantados (Araña, V., Ortiz, 1991). Posteriormente, la teoría de fractura propagante fue revisada por sus autores mediante la presentación de un “modelo unificado” (Anguita y Hernán, 2000).

Actualmente, la teoría más aceptada quizás sea la del punto caliente, y es habitual que el caso de Canarias sea descrito como un ejemplo claro de este tipo de actividad volcánica de intraplaca (Acocella, 2021).

Los puntos calientes se producen por el afloramiento de penachos de material más caliente y ligero procedente del manto. Se calcula que hay entre 45 y 70 puntos calientes en todo el mundo, gran parte de ellos en la litosfera oceánica (Acocella, 2021). El término *hotspot* fue introducido por Morgan a principios de la década de los setenta (Morgan, 1971; Sleep, 1992).

Según la teoría del punto caliente, el Archipiélago Canario sería una alineación de islas volcánicas de intraplaca originada por una corriente de material ascendente en el manto terrestre, o pluma mantélica. A causa de la actividad volcánica se fue produciendo una acumulación de material sobre la corteza oceánica hasta que emergió Fuerteventura, 20 millones de años atrás. Van aflorando posteriormente, por el siguiente orden el resto de islas: Lanzarote, Gran Canaria, La Gomera, Tenerife, La Palma y finalmente El Hierro, esta última hace solo 1,1 millones de años. La antigüedad y rigidez de la corteza oceánica sobre la que se asientan las Canarias y su proximidad al borde continental pasivo africano puede ser el motivo de la falta de una subsidencia significativa, al contrario de otros archipiélagos oceánicos de intraplaca como el de Hawái (Carracedo, 2011). Como consecuencia de esta falta de subsidencia, las Islas Canarias permanecen emergidas tras más de 20 millones de años de evolución. Por lo que en ellas se puede apreciar el ciclo evolutivo completo de este tipo de islas oceánicas.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



La parte emergida de los edificios insulares que conforman estas islas tan solo es aproximadamente un 10%, quedando el resto bajo el nivel del mar. Una vez emergidas, las islas volcánicas están sujetas a dos grandes procesos:

- Procesos constructivos debidos a la constante actividad volcánica, que siguen aumentando y rejuveneciendo los edificios insulares.
- Procesos destructivos debidos a la erosión hídrica, eólica y marina, que tienden a dismantelar los edificios insulares, produciendo orografías abruptas, sembradas de valles, barrancos y acantilados, que van a suavizarse y redondearse en las islas más antiguas.

A estos procesos destructivos erosivos hay que sumar los grandes deslizamientos producidos en las islas, como los del Valle de Güímar o de la Orotava en la isla de Tenerife (Seisdedos, Ferrer y González de Vallejo, 2012; Ferrer *et al.*, 2013) o el del Valle del Golfo en la Isla del Hierro (León *et al.*, 2017), eventos catastróficos debidos a colapsos estructurales de los edificios volcánicos.



Figura 2: Valle del Golfo en la isla de El Hierro (Fotografía: Emilio Megías).

Todos estos procesos geológicos que sufren los edificios volcánicos conforman la línea de costa expuesta al oleaje. Esta génesis tan peculiar y distinta de la costa insular de Canarias en comparación a la producida habitualmente en los continentes más cercanos (Europa y África) hacen que la interacción costa-oleaje sea muy distinto al de las costas continentales.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



1.3. Aspectos orográficos de las Islas Canarias

A causa de los factores ya comentados en el apartado 1.2. (edad geológica, procesos destructivos y constructivos acaecidos, etc.) cada isla tendrá sus características orográficas propias.

Las islas occidentales (Tenerife, La Palma, La Gomera y El Hierro), mucho más jóvenes, y en las que hasta el momento han predominado los procesos de construcción volcánicos, son abruptas y carecen de plataformas costeras erosivas, motivo por el que no abundan en ellas las playas extensas. Las caras orientadas a barlovento de sus cumbres hacen de muralla que retiene la humedad de los vientos oceánicos, principalmente el alisio, donde este suele descargar su humedad antes de atravesar las dorsales que coronan los edificios insulares (Figura 3). Este fenómeno, conocido como mar de nubes, es un actor fundamental en la estructuración altitudinal de los ecosistemas del Archipiélago (Fernandez-Palacios *et al.*, 2004). En sus costas es habitual la presencia de acantilados, y la plataforma costera suele ser estrecha, siendo habitual que en sus playas aparezcan pendientes importantes.

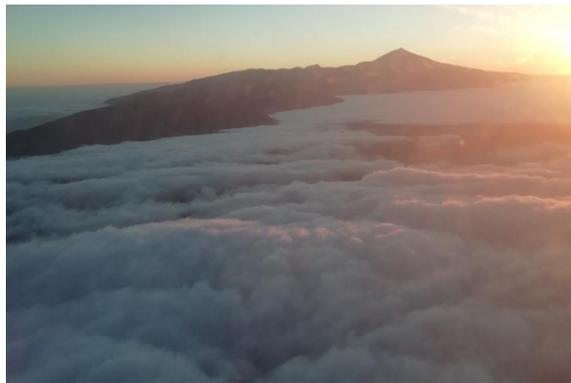


Figura 3: Mar de nubes en la fachada Norte de la isla de Tenerife. (Fotografía: Emilio Megías).

Las islas orientales (La Graciosa, Lanzarote y Fuerteventura, que comparten edificio geológico, y Gran Canaria) son mucho más antiguas, en ellas predominan los procesos destructivos, que como resultado les han conferido mucho menor porte, a causa del continuo proceso de desmantelamiento, motivo por el cual no pueden retener con facilidad la humedad de los vientos alisios. Esta característica, además de la proximidad a la zona de clima desértico del continente africano, provoca que sean mucho más áridas. Estas islas orientales cuentan con una red muy importante de drenaje, en forma de grandes barrancos. A diferencia de las islas más jóvenes, cuentan con plataformas costeras mayores y con extensas playas.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



Figura 4: Playa de Corralejo, Fuerteventura. (Fotografía: Emilio Megías).

En todas las islas del archipiélago, la franja litoral está salpicada de estructuras volcánicas singulares rígidas (roques, malpaíses, puntas, etc.) que, actuando como barreras naturales, limitan las distintas unidades fisiográficas. También es habitual la existencia de playas encajadas en las desembocaduras de barrancos y playas de perfil incompleto.

La orografía de cada edificio insular tendrá un importante papel en la canalización de los vientos alisios tan habituales en el Archipiélago (Azorin-Molina *et al.*, 2018), lo que influirá de forma determinante en el clima marítimo de las islas. Esta orografía, junto con la preponderancia de los vientos alisios y el resto de condiciones climáticas que se dan en la región donde se encuentra Canarias, favorecen la aparición habitual de *jets* costeros a niveles bajos en zonas como el sureste de Tenerife, o sureste y suroeste de Gran Canaria (Fernández Villares y Fernández González, 2019).

1.4. Definiciones previas: clima marítimo y estado del mar

Antes de comenzar a describir el clima marítimo de esta zona del Atlántico parece conveniente recordar dos conceptos fundamentales que se van a tratar a lo largo de todo este documento: El clima marítimo y el estado del mar. Para ello se acude a las Recomendaciones de Obras Marítimas (ROM), el programa que desde 1987, el por aquel entonces Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo (actual Ministerio de Transportes, Movilidad, y Agenda Urbana) impulsó y que a día de hoy sigue desarrollando Puertos del Estado. En la actualidad, el conjunto de recomendaciones ROM siguen siendo documentación técnico-científica de referencia no solo en el Estado Español, donde su aplicación es preceptiva en el ámbito de infraestructuras portuarias

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



de interés general, sino a nivel internacional. A continuación, se dan las definiciones que aparecen en la ROM 0.3-91 (MOPT, 1991):

- *“Clima Marítimo: Caracterización del oleaje en periodos largos de tiempo o descripción estadística de la variación en el dominio del tiempo de los Estados del Mar en un emplazamiento dado. Puede considerarse definido a partir de la estadística unidimensional y bidimensional de los parámetros geométrico-estadísticos y espectrales representativos del Estado del Mar en la zona considerada.*

[...]

- *Estado del mar: Situación temporal/espacial en la cual puede suponerse el fenómeno del oleaje real como estable energética y estadísticamente. Representa, por tanto, cada una de las situaciones en las que se puede separar la continua evolución del oleaje. En cada una de ellas el oleaje real puede ser tratado como un proceso estacionario en el tiempo, homogéneo en el espacio, y ergódico (muestras temporales/espaciales distintas de extensión finita suficiente, son estadísticamente iguales). Bajo estas condiciones, puede admitirse la descripción del oleaje durante periodos cortos de tiempo a partir de un único registro temporal.”*

El periodo de estudio de una serie de variables es la diferencia principal entre ambos conceptos, siendo el estado del mar, también llamado mar total, un estudio a muy corto plazo, mientras que la descripción del clima marítimo en un punto dado se realiza a partir de los distintos estados de mar acaecidos durante un amplio periodo de tiempo (serie temporal).

Es habitual que los parámetros que definen el estado del mar sean datos horarios de parámetros relacionados principalmente con la altura, periodo y dirección del oleaje, y que para definir el clima marítimo de una zona se trabajen con series temporales de varios años. Hay que recordar que para cualquier estudio de tendencia de series temporales es necesario un periodo de tiempo amplio, de al menos 10 años (Rodríguez Morilla, 2000).

El clima marítimo podrá centrarse en el régimen medio, donde se estudian las características del oleaje y viento regulares, o en el régimen extremal, donde se estudian los fenómenos más energéticos (temporales).

Acudiendo a la misma ROM anteriormente citada, se puede encontrar la definición de oleaje, así como las de oleaje de viento (*Sea*) y de fondo (*Swell*):

- *“Oleaje: Alteraciones producidas en la superficie del mar por la actuación continuada del viento sobre una superficie o área marítima (fetch) durante un cierto periodo de tiempo; siempre y cuando dicho fenómeno dé como resultado una gama de ondas aleatorias, de*

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



forma más o menos irregular y con diversas direcciones de propagación, con periodos entre 1 y 30 segundos.

[...]

- *Oleaje tipo Sea o mar de viento: Oleaje que se forma y desarrolla en una superficie líquida bajo la acción directa y continua del viento, generándose ondas elementales de altura, periodo, fase y dirección de propagación aleatorias e independientes, cuya interferencia da lugar a un aspecto caótico de la superficie líquida. El oleaje tipo Sea presenta generalmente ondas muy peraltadas con periodos y longitudes de onda pequeños, aunque en una amplia gama de frecuencias.*

[...]

- *Oleaje tipo Swell o mar de fondo: Oleaje que abandona el área de generación y se propaga a través de superficies marítimas sin estar sometido a la acción significativa del viento, y por tanto atenuándose progresivamente hasta su completa extinción. El oleaje tipo Swell presenta olas menos peraltadas que el oleaje tipo Sea, con periodos y longitudes de onda grandes en una gama estrecha de frecuencias. Da lugar en general a un aspecto ordenado y regular de la superficie líquida.”*

Aunque las definiciones mostradas del oleaje tipo Sea y tipo Swell dejan clara la diferencia entre ambos, hay que tener claro que el oleaje tipo Swell es producto de los cambios sufridos por el oleaje de viento. Por tanto, habrá infinitos estados intermedios entre ambos tipos. En un estado del mar, podrán coexistir distintas familias de oleaje con distintos orígenes y niveles de desarrollo.

El oleaje observado no es un fenómeno regular sino un proceso aparentemente aleatorio, que puede ser considerado de forma simplificada como la suma de un conjunto de ondas que viajan en distintas direcciones, con diferentes amplitudes, frecuencias y fases (Silva, 2005). La superposición de las distintas ondas dará como resultado el estado del mar. La descripción de este se podrá realizar mediante la descripción estadística temporal o mediante la descripción estadística espectral.

1.5. El clima marítimo de Canarias

Han sido varios los autores que han estudiado el clima marítimo del Archipiélago Canario desde distintas perspectivas. Unos mediante el uso de la descripción estadística temporal (Afonso, 2010; Guerra-Medina y Rodríguez, 2021; Rodríguez-Martín, Cruz-Pérez y Santamarta, 2022), y

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVG1Qi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



otros mediante la descripción estadística espectral (Lobeto *et al.*, 2022). Unos estudios están más centrados en el régimen medio (Gonçalves, Martinho y Guedes Soares, 2020) y otros en el régimen extremal (Suárez Palacios, Neves Lousada y Garrido Velarde, 2020).

Son tres fenómenos a escala global los que más influyen en el clima de la zona en estudio (y no solo el clima marítimo):

- La Oscilación del Atlántico Norte, más conocida por su acrónimo en inglés, NAO (North Atlantic Oscillation): Las fluctuaciones en la diferencia de presión atmosférica entre la baja islandesa y el alta de las Azores influye enormemente en el clima marítimo del Océano Atlántico Norte (Woolf, Challenor y Cotton, 2002), y particularmente en el de la Macaronesia (Cropper and Hanna, 2014). El anticiclón de las Azores influirá de forma decisiva en el régimen de los vientos alisios (Santana Pérez, 2020).
- Los Vientos Alisios: Estos vientos, que forman parte de la circulación general atmosférica, son los vientos que integran las células de Hadley, y que en el caso del Hemisferio Norte recorren el camino desde las altas presiones subtropicales hasta las bajas presiones y calmas ecuatoriales (Luis Mederos, 2018). Estos vientos del Noreste, como se verá más adelante, son fundamentales en el desarrollo del oleaje local.
- La corriente de Canarias (Cropper, 2013), gran protagonista del Clima Canario, compuesta por aguas frías procedentes del Norte del Océano Atlántico. Hay que resaltar la importancia que tiene para el clima de las Islas el afloramiento de aguas frías procedentes de esta corriente (Gómez-Letona *et al.*, 2017). La interacción entre el oleaje incidente y las corrientes influirá en las características de ambos (Peregrine y Jonsson, 1983; Kumar y Hayatdavoodi, 2023).

A estos tres actores climáticos de escala global, habrá que sumar componentes locales ya comentados en apartados anteriores, relacionados con la orografía de las islas y las características de sus costas. Hay que recordar en este punto la ya comentada reducida extensión de las plataformas costeras en este tipo de islas volcánicas, lo que hace que las infraestructuras portuarias y costeras queden fácilmente expuestas a la rotura del oleaje, que en caso de temporales será la situación más desfavorable (Afonso, 2015).

A continuación, se describen las distintas familias de oleaje que habitualmente se registran en las aguas canarias (García-Román, 2022a):

- Oleaje de tipo *Sea* y *Sea + Swell*, procedente de las direcciones NNE-NE, generado por los vientos alisios, con frecuencia del 90%-95% entre junio y septiembre, y del 45%-50%

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



- el resto del año. Afecta a las costas Norte, Este y Sureste de todas las islas, mientras que habrá mar en calma en las fachadas Oeste y Suroeste.
- Oleaje de tipo *Swell*, procedente del NNW-NW, generado por borrascas procedentes de la banda Norte de generación de ciclones extratropicales, con muy bajas presiones (por debajo de los 990 mb). Suele haber varios episodios a lo largo del año, normalmente de diciembre a marzo. Llegará desde el cuarto cuadrante oleaje con alturas importantes. Afecta a las costas Norte y Oeste de todas las islas, habrá mar en calma en las costas Este y Sureste, debido al abrigo que los propios edificios insulares producen.
 - Oleaje de *Sea + Swell*, procedente del W-NW, generado por borrascas menos intensas que las anteriores. Se darán de noviembre a abril. Llegando oleaje de poca intensidad. Afecta a las costas Oeste y en ocasiones Norte, habrá mar en calma en las costas Sur y Este.
 - Oleaje de tipo *Sea*, procedente del E-SE, generado por borrascas que no suelen ser muy intensas del área Canarias. Suelen darse de 4 a 6 episodios al año. Oleaje de viento de alturas moderadas. Afectará a las costas Este y Sureste.
 - Oleaje de tipo *Swell*, generado por borrascas en el Hemisferio Sur. Con poca altura del oleaje, pero periodos muy largos. Afecta a las fachadas expuestas a componentes de dirección Sur.

Pero además de estos sistemas de oleaje descritos, las aguas canarias están expuestas a otras familias de oleaje, de múltiple procedencia y características. Como ejemplo se podría citar el oleaje procedente del Oeste o Suroeste producido por borrascas que afecten en un momento concreto al Archipiélago Canario, el oleaje resultante de la acción de ciclones tropicales que puedan llegar a la Región Macaronésica en forma de tormenta tropical, u oleaje tipo *Sea* producto del régimen de vientos local.

1.6. Los *Swells* provenientes del Hemisferio Sur.

De todos los tipos de oleaje que son registrados en las costas canarias, descritos en el apartado anterior, quizás el gran desconocido sea el de los *Swells* procedentes del Hemisferio Sur.

Este tipo de oleaje, proveniente de áreas extratropicales del Hemisferio Sur, tiene como origen más plausible la zona Oeste del Atlántico Sur, frente a las costas Latinoamericanas. Cruza el Ecuador, alcanzando el Archipiélago, tras miles de kilómetros de travesía, muy transformado. Suelen tener grandes periodos, superando en muchas ocasiones los 20 segundos, pero alturas

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



pequeñas, que en contadas ocasiones superan los 2 m. Precisamente estas pequeñas alturas son las que dificultan su detección, quedando habitualmente enmascarado por el resto de oleaje. Como ya se ha indicado en el apartado anterior, este no es el único oleaje de componente Sur que llega a Canarias, por lo que será necesario el estudio de las características del que se esté dando en cada momento para poder diferenciarlos.



Figura 5: Oleaje de componente Sur-Suroeste, en la costa de El Rosario, Isla de Tenerife (Fotografía: Emilio Megías).

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

2. OBJETIVOS

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



“Se dará por conocido y demostrado todo lo que se refiere a otras disciplinas, limitándose únicamente a recordar e interpretar cuanto pueda interesar para dicho objeto. En los complejos temas que se tratan no se pretende llegar a utópicas exactitudes teóricas, sino aceptables aproximaciones prácticas.”

Ramón Iribarren Cavanilles, 1954

Del “Objeto de este Tratado”, en el capítulo primero de “Obras Marítimas, Oleajes y Diques”.

2.1. Motivación.

Para cualquier territorio costero es esencial el conocimiento profundo del clima marítimo al que está expuesto. Este conocimiento es fundamental para entender los procesos marítimos y costeros que se producen en el entorno, y a partir de ello, poder realizar una buena planificación de la actividad humana, y un correcto diseño de las infraestructuras necesarias.

El Archipiélago Canario no es una excepción, y al ser un territorio insular, aislado del resto del territorio nacional, esa necesidad se hace rabiosamente esencial. El océano no solo es la frontera que separa al Archipiélago del resto del territorio, sino que es el fundamental nexo que lo une al mundo. Curiosa esa doble función de las aguas que lo circundan, que ejerce de barrera física infranqueable a la vez que de puente con el exterior.

El estado de la mar en un área concreta está compuesto por una serie indefinida de oleaje proveniente de distintas direcciones y con características muy variadas (oleaje irregular y multidireccional). Dicho estado de la mar puede ser considerado como una composición de varios oleajes regulares y unidireccionales, cada uno con su dirección, longitud de onda, periodo y velocidad (De la Peña, 2007). Podrán coexistir oleaje tipo *Sea* y tipo *Swell*, así como múltiples estados intermedios.

Es sobradamente conocida la gran capacidad que tienen los *Swells* de viajar largas distancias conservando gran parte de su energía. Durante ese trayecto, las olas tipo *Sea*, muy irregulares, anárquicas y de cortos periodos, a medida que se alejan de su zona de generación, ya fuera del alcance de los vientos generadores, van disminuyendo su altura y aumentando su longitud de onda. Estas olas pueden alcanzar longitudes de onda de varios centenares de metros y periodos que pueden alcanzar los 25 segundos (Gómez Lahoz, 2013).

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVG1Qi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



El *Swell* más importante, y más estudiado que arriba las costas de Canarias tras una larga travesía es el que llega desde el cuarto cuadrante, cuya zona habitual de generación son las latitudes más septentrionales del Océano Atlántico, en el Hemisferio Norte. Pero no es el único que llega a Canarias desde zonas remotas, también pueden llegar *Swells* provenientes del Hemisferio Sur, profundamente transformados a causa de la gran distancia recorrida, en la que han ido disminuyendo paulatinamente su peralte. Sus características principales (muy baja altura de oleaje y frecuencia) hacen que queden fácilmente enmascarado por el resto del oleaje, lo que dificulta enormemente su detección. Es precisamente esa dificultad de detección, y su poca altura, lo que lo han convertido en el gran desconocido del clima marítimo de Canarias. Pero a pesar de su poca altura, un oleaje de este tipo, con periodos tan importantes, es capaz de transportar una gran cantidad de energía que influirá de forma decisiva en su comportamiento en la costa.

2.2. Hipótesis de partida.

Desde los primeros pasos dados en la investigación que aquí se describe, y tras la elaboración del estado del arte, durante el primer curso de estos estudios de doctorado, se creyó pertinente tomar las siguientes hipótesis de partida:

- Cada año, en mayor o menor medida, llegan a las Islas Canarias *Swells* procedentes del Hemisferio Sur cuya principal característica es la de tener una pequeña altura significativa y largos periodos.
- Este oleaje actúa sobre el Sur de las islas, en las zonas expuestas a este.
- La época de mayor llegada de este oleaje coincide con la época de mayor generación de temporales en el Hemisferio Sur.

2.3. Descripción pormenorizada de los objetivos de la investigación.

Los objetivos marcados durante esta investigación han sido:

- Detección de posibles fenómenos de *Swell* procedentes de Hemisferio Sur en las costas canarias mediante observación sistemática directa de la costa, comparación de dichas observaciones con las salidas de modelos numéricos y con las lecturas de las boyas de aguas profundas existentes en el Archipiélago. Búsqueda del posible origen en aquellos casos en los que existiera correlación entre la observación, modelo y registro de las boyas.
- Estudio estadístico de este tipo de oleaje en Canarias, determinando los principales parámetros que lo caracterizan (altura, periodo y dirección de proveniencia).

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



- Comportamiento de este oleaje en aguas someras, cuando los fondos marinos de las islas interactúan con el mar de fondo en estudio. Determinación de la forma de rotura.
- Estudio de la influencia de otros factores climáticos locales en su detección. Como son el viento, y otras familias de oleaje habituales en estas costas.
- Caracterización energética del oleaje en estudio, de cara a su posible aprovechamiento mediante equipos de energía undimotriz.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

3. ESTADO DEL ARTE

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



“Why do we need to introduce the random nature of sea waves into engineering practice? It is because the randomness is the fundamental characteristics of sea waves and its neglect leads to gross errors in engineering assessment”

Yoshimi Goda, 2010

Del prefacio a la tercera edición de *“Random Seas and Design of Maritime Structures”*

3.1. Introducción.

A continuación, se hace una breve descripción del estado del arte del campo de estudio al que se dedica esta tesis doctoral, y que sirve de partida para esta investigación. Esta recopilación del conocimiento actual sobre los *Swells* transhemisféricos que llegan a Canarias es fruto del trabajo de compilación y revisión de la bibliografía existente. Se centra únicamente en los conceptos y herramientas con los que se ha trabajado en la investigación.

3.2. El desarrollo del clima marítimo como campo de la ciencia.

El gran impulso en los estudios sobre la formación, crecimiento y propagación del oleaje tiene lugar durante la II Guerra Mundial, ante la necesidad del conocimiento del medio durante las operaciones en los Océanos Pacífico y Atlántico. Estos trabajos de predicción de oleajes y temporales fueron el inicio de la disciplina que hoy se conoce como “Clima marítimo” (Afonso, 2016).

Fue enorme el desarrollo científico conseguido en el bando aliado a ambos lados del Atlántico. Por la parte norteamericana las aportaciones más importantes llegaron desde el Scripps Institution of Oceanography (SIO), ubicado en San Diego, California, de la mano de sus dos figuras más ilustres, el noruego Harald U. Sverdrup y el austriaco Walter H. Munk (Pinardi *et al.*, 2017). Fueron ellos los responsables del gran avance en el conocimiento y descripción del oleaje, y de la formación en este campo de personal para el ejército.

En el lado británico, es obligado citar el British Wave Group, comandado por George Deacon (Von Storch y Hasselmann, 2010). Deacon dirigió un impresionante grupo de científicos, del nivel de Barber, Longuet-Higgins, o Ursell (Emery, 2021).

Un equipo combinado de meteorólogos británicos y norteamericanos fueron los responsables del estudio del oleaje de las playas de Normandía, donde se organizó el desembarco militar más célebre del siglo XX, la parte británica estaba comandada por Deacon, mientras que en la parte americana había alumnos de las clases de predicción de oleaje organizadas por Sverdrup en el SIO (Munk, 2013).

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



Entre las aportaciones más destacadas de esta época se encuentra el método de predicción de Sverdrup y Munk (Munk y Day, 2002). Con este método rudimentario, desarrollado a partir de teorías clásicas de oleaje, se realizaron predicciones para operaciones bélicas durante la guerra, entre ellas, la ya citada del desembarco de Normandía. Los resultados de estos trabajos no fueron publicados hasta el final de la guerra, cuando fueron desclasificados, en su artículo *“Wind, Sea, and Swell. Theory of relations for forecasting”* (Sverdrup y Munk, 1947). Es ese trabajo donde se define por primera vez el concepto de altura significativa (Goda, 2008).

El equipo británico, tras finalizar la guerra, también publicó trabajos de gran importancia, muestra de ello son *“Ocean Waves and Swell”* (Deacon, 1946) o *“The generation and propagation of ocean waves and swell”* (Barber y Ursell, 1948). La relación entre estos científicos de ambos lados del Atlántico siguió siendo fructífera tras el final de la guerra, como se puede comprobar en el artículo *“Directional recording of swell from distant storms”* (Munk *et al.*, 1963).

Testigos mudos de estos momentos tan dramáticos, y cruciales para la ingeniería marítima son los cajones prefabricados que aún sobreviven al paso del tiempo en las playas de Normandía, conocidos por su nombre en clave de Mulberry (Melchers y Howlett, 2021), los cuales fueron construidos en el Reino Unido y remolcados hasta su destino definitivo, para ejercer la función de abrigo durante el desembarco (Figura 6).

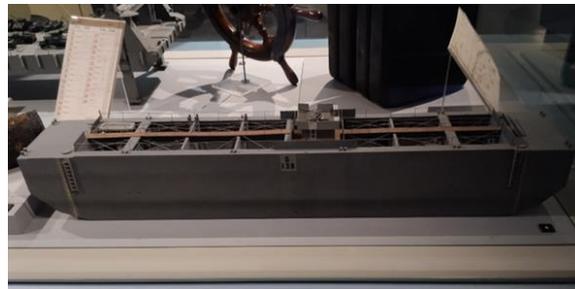


Figura 6: Maqueta de Mulberry, Museo del día D de Portsmouth (Fotografía: Emilio Megías).

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



3.3. Las teorías clásicas sobre el oleaje, ámbito de aplicación de cada una de ellas.

Es a mediados del siglo XIX, en el inicio de la época Victoriana, cuando se produce el gran desarrollo de los estudios sobre la hidrodinámica de las olas, principalmente en el Reino Unido, en un momento de grandes avances históricos para la ciencia y la ingeniería.

Los trabajos sobre los que se asientan las principales teorías sobre el oleaje, aún vigentes, provienen de esa época. Partiendo de los trabajos de grandes matemáticos y físicos de la Europa continental como Laplace, Lagrange, Poisson, Cauchy o Gerstner, figuras ilustres como las de Russell, Green, Airy, etc. y más tarde Stokes, realizarán sus aportaciones al otro lado del Canal de la Mancha (Craik, 2004).

De todas estas teorías, aquí se describirán las más extendidas, así como el ámbito de aplicación de cada una de ellas:

- La teoría lineal, o de Airy (1845), conocida como la de oleaje de pequeña amplitud. Es la más clásica, se ajusta aceptablemente bien en profundidades indefinidas, y es la más sencilla de aplicar. En ella se supone que la altura de ola es infinitesimalmente pequeña en comparación con las otras dimensiones, como longitud de onda y la profundidad del agua (Reeve, Chadwick y Fleming, 2004). Constituye la aproximación de 1^{er} orden a la teoría de Stokes.
- Las teorías de Stokes de 2^o, 3^{er} y 4^o orden (1847). Ajusta muy bien el oleaje en aguas profundas (García-Román, 2022b).
- La teoría c-noidal (1895), desarrollado por Korteweg y DeVries. Se ajusta muy bien al oleaje en profundidad reducida. Es compleja de utilizar. Es muy llamativo comprobar a simple vista, la gran aproximación que se consigue respecto al perfil real desarrollado en el canal de laboratorio (Figura 7).
- Teoría de la onda solitaria o solitón (1844), descrita por primera vez por el ingeniero escocés John Scott Russell, tras sus observaciones en un canal de poco calado, cercano a Edimburgo, donde una ola solitaria se propagaba a gran velocidad (Vega González, 2001). También utilizada en el estudio la rotura de los *Swells* en aguas someras, o del comportamiento de un tsunami. Los desarrollos teóricos posteriores de esta teoría, la trataron como un caso límite de la c-noidal. Teóricamente, la longitud de onda es infinita y no se le puede asociar ningún periodo (Aragonés Pomares y López Úbeda, 2017).

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



Figura 7: Oleaje producido en canal del laboratorio de la Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de la ULL (Fotografía: Emilio Megías).

El ámbito de aplicación de cada una de esas teorías fue estudiada y descrita décadas atrás (Le Méhauté, 1976). Es habitual definir las distintas regiones de validez de cada teoría con el ya clásico diagrama de Le Méhauté (Figura 8). Los ejes de dicho diagrama reflejan unos parámetros adimensionales que dependen de la altura de ola (H), periodo (τ), profundidad (d), y la aceleración de la gravedad (g).

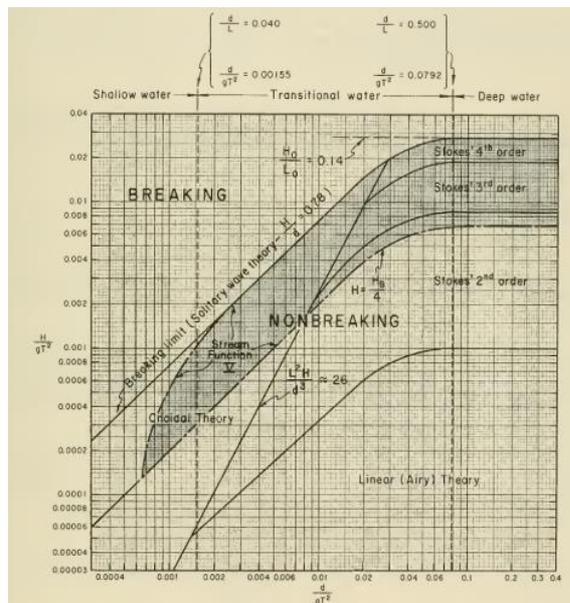


Figura 8: Diagrama de aplicabilidad de Le Méhauté, 1969 (Shore Protection Manual, 1984).

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



Introduciendo los valores habituales con los que se va a trabajar en dicho diagrama, se puede comprobar que el oleaje objeto de esta investigación queda dentro de la zona de aplicación de la teoría lineal de oleaje.

3.4. Los parámetros descriptivos de la ola.

Para la descripción de los parámetros descriptivos de una ola, utilizados no solamente en la teoría lineal, sino en cualquier método que se apoye en ondas regulares para la descripción del fenómeno del oleaje, servirá de ayuda la *figura 1-3. Wave characteristics*, del *Shore Protection Manual* (USACE, 1984) que se muestra a continuación (Figura 9). Se citarán dichos parámetros tanto en castellano como en inglés, que es como habitualmente se utilizan en el entorno internacional de la práctica ingenieril y científica, para ello servirá de guía el *Glosario de términos de ingeniería de puertos y costas* publicado por el CEDEX (Berenguer and Berenguer, 1993):

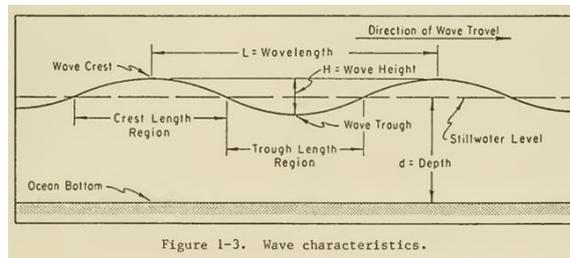


Figura 9: Características de las olas (Shore Protection Manual, 1984).

- Longitud de onda / Wavelength (L): La distancia horizontal entre dos puntos equivalentes en dos olas sucesivas.
- Altura de ola / Wave height (H): La distancia vertical entre una cresta y el seno precedente.
- Cresta / Wave crest: La parte de la ola que sobresale del nivel medio.
- Seno / Wave trough: La parte de la ola bajo el nivel medio.
- Profundidad / Depth (d): Distancia vertical desde un nivel de referencia de marea al fondo, también es habitual denotarla con la letra h minúscula.
- Nivel medio en reposo / Stillwater level: La elevación que tendría la superficie del agua sin la acción del oleaje.

Además de estos parámetros geométricos que aparecen en la Figura 9, es fundamental recordar el concepto de periodo (T), definido como el tiempo que tardan dos crestas sucesivas en pasar

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección https://sede.ull.es/validacion/	
Identificador del documento: 6282318	Código de verificación: /rVGlQi0
Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



por el mismo punto. Esta tesis se centra en las olas de gravedad, cuyos periodos quedan comprendidos entre 1 y 30 segundos, siguiendo la clasificación propuesta por Walter Heinrich Munk en el primer Congreso de Ingeniería Costera celebrado en octubre de 1950 en Long Beach, California (Munk, 1951).

Otros parámetros relacionados con los anteriores, que describen el movimiento ondulatorio de una ola regular, y que serán usados en el transcurso de esta tesis, son:

- Frecuencia (f):

$$f = \frac{1}{T} \quad (1)$$

- Frecuencia angular (ω):

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (2)$$

- Número de onda (k):

$$k = \frac{2\pi}{L} \quad (3)$$

- Celeridad (c):

$$c = \frac{L}{T} = \frac{\omega}{k} \quad (4)$$

- Peralte (ε):

$$\varepsilon = \frac{H}{L} \quad (5)$$

Para la definición de estos parámetros se ha asumido que el movimiento del oleaje tiene un periodo constante en la dirección de propagación (Dean y Dalrymple, 2001). Dicho de otra forma, se toma el oleaje como monocromático, de periodo único y constante.

Será habitual el uso del subíndice "0" para indicar que el valor del parámetro es el de aguas profundas, por ejemplo, es habitual nombrar la longitud de onda del oleaje en aguas profundas como L_0 .

3.5. La teoría lineal.

Como ya se ha comentado, una de las teorías más extendidas, por su simplicidad y suficiente ajuste para la práctica ingenieril es la teoría de Airy, también llamada teoría lineal o de oleaje de pequeña amplitud.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



La teoría de la onda lineal o de Airy se obtiene a partir las ecuaciones de conservación de masa y del momento, teniendo en cuenta una serie de asunciones (Almazán Garate y Palomino Monzón, 2000):

- La onda es regular y bidimensional.
- El agua es incompresible y los efectos de la viscosidad, tensión superficial y turbulencia son despreciables.
- El fondo es profundo y de profundidad constante.
- La amplitud de la ola es pequeña con relación a la longitud de onda y a la profundidad.

La ecuación (6) muestra la evolución en el espacio y en el tiempo de la perturbación del nivel de la superficie libre η respecto al nivel medio en reposo (Muñoz Pérez, 2011):

$$\eta(x, t) = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) \quad (6)$$

En el apartado anterior ya se han definido H , k y ω . El término $H/2$ es igual a la amplitud de la onda (a).

Mediante un cambio de fase, la expresión (6) también puede desarrollarse mediante la función seno, como puede encontrarse en gran parte de la bibliografía existente:

$$\eta(x, t) = \frac{H}{2} \sin(kx - \omega t) \quad (7)$$

3.6. La mar real como superposición de ondas sinusoidales.

Todas las ondas regulares que llegan a un punto, de distintas características (altura y longitud de onda) y procedencia, junto con el posible oleaje producido localmente en ese punto, se superponen e interfieren generando oleaje más complejo, que puede ser nombrado mar real (Medina, 1974).

Joseph Fourier demostró en el siglo XIX que cualquier onda periódica podía descomponerse en una superposición de ondas sinusoidales (Goldsmith, 2018). Este concepto de Fourier ha servido de gran ayuda para definir el concepto de mar real, o mar total, asimilándolo a la adición de un conjunto de ondas sinusoidales regulares. Quizás la más lograda y exitosa explicación esquemática de este concepto de estado del mar como suma de un conjunto de ondas sinusoidales, ha sido la figura incluida en la obra fundamental *“Practical Methods for Observing and Forecasting Ocean Waves by means of Wave Spectra and Statistics”* titulada “A Sum of Many

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



Simple Sine Waves Makes a Sea” (Pierson, Neumann y James, 1955), y que puede encontrarse en infinidad de manuales y trabajos académicos dedicados al estudio del clima marítimo.

En línea con ese concepto, se presenta en la Figura 10 una explicación esquemática de la formación del mar real, también llamado mar total, o estado del mar, a partir de la suma de n familias de oleaje:

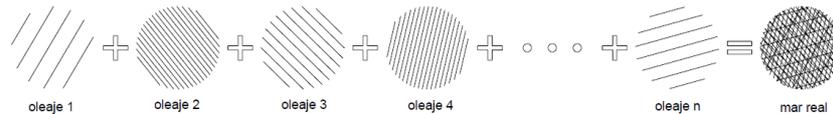


Figura 10: Composición de la mar total o real a partir de la suma de n familias de olas, las líneas paralelas representan los frentes de onda de cada familia de olas (Figura: Emilio Megías).

A este tipo de representaciones esquemáticas se volverá a acudir en el capítulo 5, a la hora de describir los trabajos desarrollados a lo largo de la investigación.

3.7. Velocidad de grupo

En un mar real el número de olas regulares con distintas longitudes de onda superpuestas puede ser enorme. Incluso en el caso de mar de fondo, mucho más regular, coexistirán olas de diferentes longitudes de onda que poco a poco irán agrupándose. Dicho grupo avanzará a su propia velocidad o celeridad, y será esa la velocidad con la que se mueve la energía de la ola (WMO, 2018). La velocidad del grupo de olas que se propaga (c_g) será distinta a la de una onda individual (c), quedando ambas relacionadas por un factor n (Carballo *et al.*, 2020):

$$c_g = n c \quad (8)$$

Dicho factor n queda definido por la siguiente expresión:

$$n = \frac{1}{2} \left(1 + \left(\frac{2kd}{\sinh 2kd} \right) \right) \quad (9)$$

Se demuestra que, en aguas profundas, el valor de n es $1/2$, por tanto, para esa situación, el valor de c_g será la mitad del de c .

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



3.8. Principales parámetros estadístico utilizados en el estudio del oleaje.

El análisis del oleaje, podrá realizarse principalmente desde dos perspectivas, por un lado, la descripción estadística temporal, y por el otro la descripción estadística espectral. Ambas metodologías se complementan en el análisis del oleaje (Silva, 2005). No conviene obviar el certero comentario que Yoshimi Goda hace en la introducción de la tercera edición de su magnífico libro “*Random Seas and Design of Maritime Structures*” (Goda, 2010), y cuya cita textual se ha utilizado como arranque del presente capítulo de la tesis: Nunca se debe olvidar que la aleatoriedad es la característica fundamental de las olas del mar.

Desde el punto de vista de la descripción estadística del oleaje (en el dominio del tiempo), los parámetros representativos de un registro de tamaño N de oleaje suelen centrarse en su altura y su periodo. De entre los más habituales, los utilizados en esta investigación han sido:

- Altura de ola significativa o significativa (H_s o $H_{1/3}$): Es la media aritmética del tercio de olas mayores del conjunto de N olas.
- Altura media (\bar{H}): Es la media aritmética del conjunto de N lecturas.
- Altura de ola media cuadrática (H_{rms}): Definida por la siguiente expresión:

$$H_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_i^2} \quad (10)$$

- Altura de ola máxima (H_{max}): Es la altura máxima de las olas de las N lecturas.
- Periodo medio (T_z): Es el periodo de tiempo medio entre dos cruces por cero ascendentes consecutivos, o entre dos cruces por cero descendentes consecutivos.

Si se acepta que los valores de altura de oleaje pueden ser descritos según la distribución de Rayleigh, la relación entre la altura significativa y la altura media sería la siguiente:

$$H_s = 1,6 \bar{H} \quad (11)$$

Respecto al valor de la altura máxima, su valor se suele estimar entre 1,6 y 2 veces la altura significativa (Goda, 2010):

$$H_{max} = (1,6 \sim 2,0) H_s \quad (12)$$

Estos parámetros pueden representarse en función de la desviación típica de la altura (σ):

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



$$H_s = 4 \sigma \quad (13)$$

$$\bar{H} = \sqrt{2\pi} \sigma \quad (14)$$

$$H_{rms} = 2\sqrt{2} \sigma \quad (15)$$

Desde el punto de vista del análisis espectral del oleaje (en el dominio de la frecuencia), el oleaje se estudia en términos de la energía asociada a diferentes frecuencias. El oleaje irregular observado se podrá descomponer en una suma de ondas sinusoidales (Aragonés Pomares y López Úbeda, 2017). Dicha descomposición se puede realizar mediante las series de Fourier, habitualmente mediante la transformada rápida de Fourier FFT (Silva, 2005).

Para encontrar el origen histórico del análisis espectral como herramienta clave en el estudio del oleaje hay que volver a la década de los años cuarenta, y a nombres ya citados anteriormente, Norman Barber, George Deacon y Fritz Ursell (Irvine, 2002). Posteriormente, serán especialmente destacables los trabajos de Willard J. Pierson (Pierson, Neumann y James, 1955; Pierson y Moskowitz, 1964), y los del equipo de trabajo del Joint North Sea Wave Observation Project (JONSWAP) liderados por el Premio Nobel Klaus Hasselmann (Hasselmann *et al.*, 1973).

El espectro de las olas será la distribución de la energía de las olas a lo largo de la frecuencia (WMO, 2018). Cuando dicha distribución de la energía se expresa únicamente respecto a la frecuencia se habla de espectro escalar o de frecuencia. Cuando se hace respecto a la frecuencia y dirección se habla de espectro direccional del oleaje (Goda, 2010).

Siendo $S(f)$ la función de densidad de energía asociada a la frecuencia f :

$$S(f) = \frac{1}{2} a(f)^2 \quad (16)$$

El momento de orden n del espectro será:

$$m_n = \int_0^\infty f^n S(f) df \quad (17)$$

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



Algunos de los parámetros estadísticos definidos anteriormente se podrán definir también a partir de estos momentos espectrales, es el caso de la altura significativa y el periodo medio:

$$H_s \simeq Hm_0 = 4\sqrt{m_0} \quad (18)$$

$$T_z \simeq Tm_{02} = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \quad (19)$$

También, a partir de los momentos espectrales, se define el Periodo energético (T_e) (Folley, 2017). Este parámetro es muy utilizado para realizar la caracterización energética del oleaje en el campo de las energías renovables marinas:

$$T_e = \frac{m_{-1}}{m_0} \quad (20)$$

Por último, el Periodo de pico (T_p) es el que corresponde a la frecuencia de las olas donde el espectro muestra su máximo de energía (f_p) (Kamphuis, 2000). La dirección en la que se da dicho máximo espectral es denominada dirección de pico (θ_p):

$$T_p = \frac{1}{f_p} \quad (21)$$

3.9. La energía de las olas.

Se demuestra que la energía total de una ola lineal simple puede expresarse como sigue:

$$E = \frac{1}{2}\rho_w g a^2 = \frac{1}{8}\rho_w g H^2 \quad (22)$$

Donde ρ_w es la densidad del agua, cuyo valor para el agua salada, suele tomarse como 1025 kg/m³. En este caso se da el fenómeno de equipartición de energía, repartiéndose la energía en partes iguales entre la cinética y la potencial (WMO, 2018).

La densidad del agua salada dependerá principalmente de la salinidad y la temperatura (Roberts *et al.*, 2010).

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



3.10. Generación del oleaje, el mar de viento o *Sea*.

El oleaje está formado por ondulaciones producto de la interacción entre el mar y el aire, siendo el viento el factor más influyente en su formación (Medina, 1974). Existirá oleaje cuyo origen sea distinto a este, como las producidas por procesos geológicos, pero quedan fuera del ámbito de este trabajo.

Son pocos los avances obtenidos en los estudios sobre la generación del oleaje hasta los años 50. Es en ese momento cuando Ursell realiza un profundo trabajo de recopilación y revisión de las investigaciones realizadas hasta entonces, que servirán como acicate para el desarrollo de los dos importantes trabajos que aparecerán poco después, los de Phillips y Miles (Mitsuyasu, 2002).

Son estas investigaciones de Owen M. Phillips desde la Universidad Johns Hopkins (Phillips, 1957) y de John W. Miles desde el SCRIPPS (Miles, 1957) las consideradas como punto de inflexión en este campo. De acuerdo con estos autores, existen dos fases de generación de la ola, en una primera, la acción del viento actuando sobre una superficie de agua completamente plana produce las primeras ondulaciones (crecimiento lineal), y en una segunda fase, el viento actúa sobre estas pequeñas olas acrecentándolas (crecimiento exponencial).

Como describía el ilustre ingeniero Ramón Iribarren, el oleaje en formación funciona como un eficaz captador y acumulador de energía (Iribarren, 1954), pero este crecimiento no es ilimitado, existirá una altura límite del oleaje donde se produce el descrestamiento, disipándose parte de su energía (Butt, 2018). Una ola romperá por forma cuando se alcanza la relación $H/L = 1/7$ (Peña Olivas, 2007). George Deacon apuntó que esta inestabilidad podía darse incluso antes de llegar a este valor (Deacon, 1946).

Son muchas las formulaciones desarrolladas a lo largo de las décadas que definen la aportación de energía al oleaje por la acción de los vientos que puede ser consultado en la literatura existente (Snyder y Cox, 1966; Snyder *et al.*, 1981; Komen, Hasselmann y Hasselmann, 1984), y que a día de hoy sigue siendo objeto de estudio.

Aparte de estos estudios que profundizan desde la mecánica de fluidos en la transmisión de energía del aire a la superficie del mar, a lo largo de la historia se han desarrollado métodos empíricos que describen la generación del oleaje con un sentido de eminente aplicación práctica. Como resultado se han propuesto una serie de formulaciones y nomogramas con los

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



que a partir del *fetch* geográfico (Iribarren, 1954), o a partir del *fetch* meteorológico, la intensidad y duración del viento se obtienen parámetros básicos que definen el oleaje (altura y periodo) (USACE, 1984).

Se puede decir que el oleaje generado dependerá del estado del mar previo a la acción del viento, así como de las características del campo de viento actuante (velocidad, dirección, alcance y duración) (WMO, 2018).

La existencia de una superficie suficiente para que se desarrolle el oleaje, sin restricciones de tiempo ni distancia para la acción del viento darán como resultado mares completamente desarrollados. A partir de ese momento, toda la energía que siga recibiendo de los vientos será consumida en la propagación o en la rotura (Almazán Garate y Palomino Monzón, 2000).

Goda propuso la siguiente expresión para obtener el tiempo mínimo de acción del viento t_{min} en horas, para que no sea factor limitante, para una velocidad de viento medido a 10 m de altura U_{10} (m/s) y un *fetch* meteorológico F (Km) dados (Goda, 2003):

$$t_{min} = F^{0,73} U_{10}^{-0,46} \quad (23)$$

Esta ecuación también puede expresarse en términos de *fetch* mínimo para un tiempo y velocidad del viento dadas:

$$F_{min} = t^{1,37} U_{10}^{0,63} \quad (24)$$

Para un mar completamente desarrollado, la altura significativa del oleaje expresada en metros, producto de la acción del viento, expresada en nudos, puede ser estimada según la siguiente expresión (WMO, 2018):

$$H_s \cong \left(\frac{U_{10}}{12,5} \right)^2 \quad (25)$$

En el caso de borrascas móviles de importancia, si estas se desplazan en la misma dirección del oleaje en generación, acompañando a este durante su traslación, el oleaje generado puede ser de gran importancia, al aumentar la duración de la fase de generación del oleaje (Hell, Ayet y Chapron, 2021).

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



El estudio de la generación de las olas de viento sigue estando abierto, y se siguen produciendo avances en el campo, gracias a la mejora de la potencia computacional y de las técnicas de observación, así como como en la formulación (Pizzo, Deike y Ayet, 2021).

3.11. Transformación del oleaje en aguas profundas: el mar de fondo o *Swell*.

Una vez que el oleaje abandona la zona de generación (*fetch*), y continua su travesía hasta llegar a costa (*decay*) este irá sufriendo paulatinamente cambios de importancia, debido a los fenómenos de decaimiento y dispersión:

- Decaimiento: A medida que el oleaje se propaga, se va produciendo un ligero decaimiento, su altura media va disminuyendo ligeramente debido a una suave pérdida de energía (USACE, 1984).
- Dispersión: la dispersión angular provocará una reducción de la altura de las olas a medida que el oleaje se propaga. Además, se producirá la dispersión de frecuencias, ya que las ondas más largas viajan más rápido que las más cortas (Reeve, Chadwick y Fleming, 2004).

El oleaje tipo *Swell* será más regular, con crestas largas y mucho más predecible que el tipo Sea (Pierson, Neumann y James, 1955). Se produce el fenómeno denominado transferencia no lineal de energía, por el cual la energía de ondas de bajo periodo es transferida a la de periodos mayores (García-Valdecasas Bernal, 2016), y se irá produciendo la agrupación y ordenación de las olas, las longitudes de onda podrán alcanzar varios centenares de metros (Gómez Lahoz, 2013).

Este oleaje tendrá capacidad de realizar largos recorridos en aguas profundas con muy poca pérdida de energía. Estos recorridos se realizan siguiendo los grandes círculos o rutas ortodrómicar (Young, 1999; Ewans, 2001; Pérez *et al.*, 2014). Durante la travesía su peralte irá disminuyendo.

De acuerdo con la teoría lineal, la velocidad de traslación o celeridad del mar de fondo, queda descrita por la expresión (4), que depende de la longitud de onda L . La longitud de onda podrá expresarse mediante la relación de dispersión (Dean y Dalrymple, 2001):

$$L = \frac{g}{2\pi} T^2 \tanh kh = L_0 \tanh kh \quad (26)$$

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



Hoy en día, gracias al gran desarrollo de la capacidad computacional, se cuenta con modelos de oleaje a escala global, de uso generalizado, ejemplo de ellos son los modelos de tercera generación utilizados por el ECMWF o el NOAA (ECMWF, 2016; WW3DG, 2019). Desde el desarrollo de los primeros métodos operacionales por Sverdrup y Munk, y la introducción del espectro de oleaje por Pierson (Komen, 1998) el desarrollo continúa. Hoy en día, los resultados de validación de las salidas de los modelos, al compararlos con mediciones instrumentales son buenos (Jiang, Babanin y Chen, 2016).

No hay que olvidar en este punto algunas importantes aportaciones prácticas realizadas en el siglo pasado para la previsión de la evolución del mar de fondo que han servido de gran ayuda cuando la capacidad de computación estaba muy limitada. Ejemplo son las que Bretschneider realizó en la década de los 50, y cuyos nomogramas desarrollados empíricamente siguen siendo de gran utilidad (Bretschneider, 1951) desde el punto de vista operacional, para predecir los cambios de período y de altura en función del *fetch* y del *decay*.

3.12. Discriminación entre oleaje tipo *Sea* y tipo *Swell*.

Aunque las diferencias entre el oleaje *Sea* y *Swell* son claras y bien conocidas, entre estos dos tipos de oleaje existen infinitos casos, dependiendo de la madurez del oleaje en cuestión. Esto hace que la discriminación del mar de viento y mar de fondo para un estado del mar concreto no sea tarea baladí. Para el caso de modelos espectrales, no hay una regla clara para diferenciar la energía generada localmente de la propagada desde otras zonas de generación (WMO, 2018).

Cuando el estado de la mar está compuesto por varias familias de oleaje, el espectro de frecuencia resultante será múltiplo (Chen *et al.*, 2015). El caso más simple de espectro múltiplo será un espectro bimodal compuesto por dos familias de oleaje (*Sea* + *Swell* 1 + *Swell* 2 en caso de ausencia de vientos). El ancho de banda del oleaje *Sea* normalmente será mucho mayor que el resultante para el *Swell*, cuya energía estará mucho más concentrada en torno a la frecuencia de pico. En el caso del uso de espectros de energía direccionales, como los suministrados por el Wavewatch III del NOAA, la separación entre las distintas familias de oleaje es clara a simple vista, quedando delimitada la frontera entre el mar de fondo y de viento.

Desde un punto de vista instrumental, son varias las opciones tomadas para realizar esta discriminación. Así por ejemplo, el National Data Buoy Center (NDBC) norteamericano trabaja con el peralte del oleaje para calcular la frecuencia umbral (NDBC, sin fecha). En otros casos, el

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



valor umbral (por ejemplo, del periodo) es fijado de una forma más arbitraria, proporcionando los parámetros para el oleaje acoplado al viento local (por debajo del valor umbral fijado para el periodo) y del oleaje desacoplado del viento local (por encima de ese valor umbral) (Como ejemplo ver (Ayan, sin fecha)).

Desde un punto de vista operativo, de poco servirá el uso de valores medios del conjunto de oleaje del estado de la mar, que pueden estar muy alejados de los parámetros reales de cada una de las familias de oleaje.

A lo largo de los últimos años se han ido proponiendo distintos procedimientos para la separación de las distintas familias de oleaje, y la discriminación entre *Sea* y *Swell* (Wang y Hwang, 2001; Portilla, Ocampo-Torres y Monbaliu, 2009; Hwang, Ocampo-Torres y García-Nava, 2012; Ailliot, Maisondieu y Monbet, 2013; Støle-Hentschel *et al.*, 2020). Al trabajar con espectros de oleaje, el método de partición consistirá en identificar dentro del espectro los distintos tipos de oleaje, con diferente origen meteorológico (Portilla-Yandún, 2018).

3.13. El estudio de *Swells* de largo periodo.

La capacidad que tiene este tipo de oleaje para recorrer largas distancias a lo largo de las cuencas oceánicas, en aguas profundas, con una mínima pérdida de energía, es conocida. Son legendarios los trabajos pioneros realizados décadas atrás, de seguimiento de *Swells* desde su generación hasta su llegada a costas distanciadas miles de millas náuticas (Barber y Ursell, 1948; Munk *et al.*, 1963; Snodgrass *et al.*, 1966).

Tras estas primeras investigaciones se ha seguido trabajando para identificar las zonas productoras del oleaje que posteriormente será capaz de desarrollarse hasta alcanzar el máximo nivel de madurez (Young, 1999; Alves, 2006).

Es habitual que sean las riberas occidentales de los continentes a los que lleguen este tipo de oleaje (Chen *et al.*, 2002). Su capacidad de alcanzar estas grandes distancias dependerá principalmente de la energía recibida durante su generación, y de la forma de la cuenca oceánica por donde se transmita, cuyos continentes ribereños harán de frontera y marcarán los límites de tan largos viajes.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



3.14. Estudio de los *Swells* procedentes del Hemisferio Sur.

Los *Swells* provenientes del Hemisferio Sur que llegan a Canarias, más concretamente, aquellos que tienen su origen en la zona extratropical del Océano Atlántico Sur y en el Océano Antártico, no han sido objeto de mucha atención por parte de la comunidad científica e ingenieril del Archipiélago. Eso, a pesar de lo interesante del fenómeno, y de que su acción se haga notar tanto en la costa como en las infraestructuras portuarias. Hay que recordar que la mayor parte de las bocanas de las dársenas están orientadas al Sur, al abrigo de los temporales más importantes que llegan a Canarias, de componente Noroeste, pero expuestas al oleaje objeto de esta investigación.

La primera publicación encontrada durante la elaboración de esta tesis que atiende este fenómeno es una nota técnica de la AEMET del 2007, disponible en el Archivo Climatológico y Meteorológico Institucional del AEMET Arcimis desde noviembre de 2021 (Portillo, Peñate de la Rosa y Conde, 2007). En dicho informe se describe el evento acaecido entre los días 8 y 10 de junio de 2006.

En el año 2012, tras los eventos de inundación marina acontecidos en el barrio Santacrucero de San Andrés a finales del verano de 2011, el Ingeniero de Caminos Juan Antonio Afonso Mosegúe, en su conferencia impartida en la Real Sociedad Económica de Amigos del País de Tenerife (RSEAPT), apunta como origen de dichos eventos extremos los *Swells* provenientes del Hemisferio Sur.

Posteriormente, se han publicado algunos artículos donde se presta atención a este tipo de oleaje, como el publicado en 2014 donde se estudia la acción de este *Swell* sobre las praderas marinas de *Cymodocea nodosa* en el Sur de Gran Canaria (Portillo, 2014), o el dedicado al oleaje de la zona, donde el oleaje proveniente del Hemisferio Sur también es citado (Semedo, 2018).

3.15. Eventos extremos de oleaje con componente Sur en las costas canarias.

Es habitual que cada cierto tiempo, los medios informativos locales se hagan eco de temporales que actúan sobre zonas costeras expuestas al Sur (fachadas Este y Oeste de las islas), que, a pesar de contar con alturas de ola bastante modestas, cuando se presentan junto con otras condiciones que influyen en el nivel del mar (marea astronómica y condiciones meteorológicas) producen rebases, inundaciones y situaciones de peligro.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



A continuación, se muestran algunos de estos titulares, acompañados en algunos casos por los subtítulos. Todos estos artículos hacen referencia a eventos que probablemente sean los de mayor intensidad acaecidos en lo que va de siglo (años 2011, 2014 y 2023):

- *“El mar vuelve a inundar San Andrés mientras el pueblo espera la escollera. Solo tres meses después de que el mar anegase por última vez la avenida de San Andrés, la jornada de ayer volvió a sembrar de nerviosismo el pueblo marinero. La especial altura de la pleamar y la histórica ausencia de una escollera bastaron para poner patas arriba medio barrio e inundar viviendas y comercios” (El Día, 2011).*
- *“Las Galletas reivindica obras de protección contra la furia del mar” (Diario de Avisos, 2011).*
- *“Canarias continuará en riesgo amarillo por fenómenos costeros.”(Europa Press, 2014).*
- *“El temporal deja un trágico balance.”(Canarias 7, 2014).*
- *“Momentos de tensión en Radazul por el fuerte oleaje: Las playas de El Rosario están cerradas al baño.”(El Día, 2023).*
- *“Las olas 'engullen' un pueblo de Fuerteventura: El mar penetra en las casas del pueblo de Giniginámar, en el municipio de Tuineje.”(La Provincia, 2023).*
- *“Canarias activa la situación de alerta por fenómenos costeros en todo el archipiélago con olas de hasta 2 metros.”(Europa Press, 2023).*

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

4. METODOLOGÍA

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



“Wind blowing over a water surface generates waves in the water by physical processes which cannot be regarded as known”

Fritz Ursell, 1956

Comienzo de la introducción de su monográfico “Wave generation by wind”

4.1. Fuentes de datos utilizadas.

Cuatro han sido las fuentes de datos principales utilizadas durante esta investigación:

- Datos de salida del modelo oceánico Wavewatch III (WW3): Desarrollado por el NOAA/NCEP a partir del WWI (TU Delft) y el WWII (NASA) (WW3DG, 2019). Es el modelo de tercera generación a escala global aplicado por el National Center for Environmental Prediction (NCEP). Durante el periodo de investigación de esta tesis, en la página del NCEP (<https://polar.ncep.noaa.gov/waves/wavewatch/>) se han podido consultar los datos de salida del modelo (altura, periodo y dirección) en forma de tablas, planos de oleaje o espectros bidimensionales.
- Mapas meteorológicos del European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF): El Centro Europeo de referencia tiene un gran abanico de mapas meteorológicos a disposición en su página web (<https://www.ecmwf.int/>), de gran utilidad para poder conocer las condiciones meteorológicas (presión atmosférica y velocidad del viento) en las zonas de origen del oleaje en estudio.
- Registros de las boyas de aguas profundas de Puertos del Estado: Con dichos registros, la entidad estatal Puertos del Estado conforma el conjunto de datos REDEXT (Puertos del Estado, 2015). En la página web de la entidad pública (<https://portus.puertos.es/#/>) se pueden consultar los datos procedentes de estas boyas fondeadas en aguas profundas, repartidas por todo el litoral español. En Canarias existen 2 boyas REDEXT, una al Sur de Tenerife y otra en el Noroeste de Gran Canaria. Los datos disponibles se agrupan en tres tipos: datos de oleaje, meteorológicos y oceanográficos.
- Salidas del modelo SIMAR: Puertos del Estado ha desarrollado y mantiene en servicio una densa red de boyas virtuales cuyas salidas pueden ser consultadas en su página web (<https://portus.puertos.es/#/>). Los datos SIMAR están formados por series temporales de parámetros de viento y oleaje procedentes de modelado numérico, abarcan el espacio temporal desde el año 1958 hasta la actualidad (Puertos del Estado, 2020).

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



4.2. La Boya REDEX Tenerife Sur.

La fuente de datos que sin lugar a dudas ha sido la más importante en todas las fases de este trabajo ha sido la boya REDEXT fondeada al Sur de la isla de Tenerife, frente a la punta de Rasca. Esto es debido a sus características técnicas, la profundidad del lecho marino en la zona de fondeo, y su ubicación.

Dicha boya, aunque está en servicio desde 1998, registra datos direccionales desde 2003. En la Tabla 1 se pueden consultar sus características técnicas más importantes. En la Figura 11 se muestra fotografía de la boya, tomada durante uno de sus traslados a puerto seguro, para la realización de labores de mantenimiento.

Tabla 1: Características técnicas de la Boya de Tenerife Sur (Fuente: Puertos del Estado).

Longitud	16.61° O
Latitud	28.00° N
Cadencia	60 Min
Código	2446
Profundidad	710 m
Inicio de medidas	1-4-1998
Tipo de sensor	Direccional Oce-Met
Modelo	SeaWatch
Conjunto de datos	REDEXT

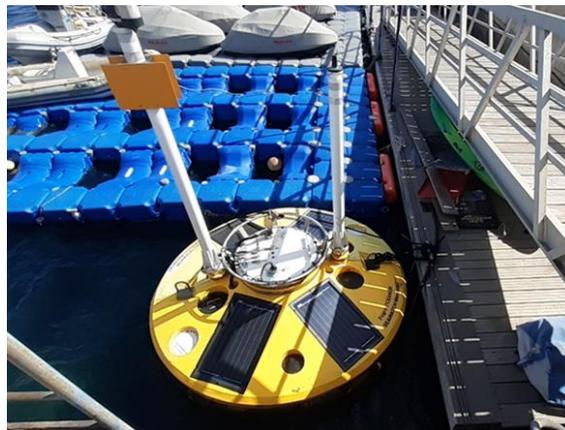


Figura 11: Boya REDEXT de Tenerife Sur durante una parada técnica, atracada en el Puerto Deportivo Marina San Miguel, en la costa Sur de Tenerife (Fotografía: Emilio Megías).

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



Debido a la gran profundidad de fondeo (710 m), el oleaje registrado por dicha boya se puede considerar de aguas profundas, sin que el lecho marino afecte a las características y comportamiento de este.

Hay que recordar que la profundidad límite entre aguas profundas y aguas de transición queda definida por la mitad de la longitud de onda que tiene el oleaje (Reeve, Chadwick y Fleming, 2004), para profundidades mayores a ese valor, el valor de $\tanh kh$ tiende a la unidad, por lo que sustituyendo dicho valor en la expresión (26):

$$L = L_0 = \frac{g}{2\pi} T^2 ; \text{ para } \tanh kh = 1 \quad (27)$$

Por otro lado, su ubicación al abrigo del mar de fondo más importante que llega a Canarias (el procedente del Noroeste) funciona como un filtro natural para las ondas procedentes de esa dirección. Esto es una gran ventaja para el caso en estudio, eliminando ruido en el espectro de las frecuencias bajas habituales para los *Swells*, facilitando el registro del oleaje objeto de este estudio, procedentes del sector Sur.

Los datos procedentes de la boya son principalmente series temporales de parámetros obtenidos a partir de los espectros. Estos parámetros descriptivos, valores numéricos relacionados principalmente con la altura, dirección y periodo, han sido la materia prima a partir de la cual se ha realizado el trabajo estadístico necesario. Cuando en los siguientes capítulos se haga referencia a la altura significativa H_s medida por la boya, realmente se está haciendo referencia a la altura significativa espectral Hm_0 .

4.3. Procesado previo de los datos.

Como en todo proceso de análisis de datos experimentales, es de vital importancia contar con series temporales con la suficiente ausencia de ruidos, evitando los datos incompletos, y con un número de registros suficientemente elevado (Soria *et al.*, 2007). Este ha sido el criterio a la hora de adquirir y procesar los datos con los que se ha trabajado.

Con tal fin se ha realizado la revisión de las series temporales obtenidas a partir de los registros de las boyas utilizadas. Previamente al filtrado de los datos, se han eliminado los valores atípicos y los datos incompletos e incoherentes. A modo de ejemplo, del total de posibles registros horarios para el periodo de 2009 a 2020, ambos inclusive (105.192 horas), un 97% cuentan con todos los campos de altura, periodo y dirección.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVG1Qi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



4.4. Separación de los Swells transhemisféricos objetos del trabajo.

Si se contara con los datos espectrales procedentes de la boya REDEXT Tenerife Sur necesarios para poder desarrollar el espectro medio de la zona donde se encuentra ubicada, se obtendría un espectro direccional similar al expuesto en la Figura 12, preparado en octubre de 2021 con fines docentes, donde se pretendía dejar reflejadas las tres familias de oleaje más importantes que confluyen en la zona:

- El mar de viento local, marcado en la figura como ①.
- El mar de fondo procedente del sector Norte que llega por el canal formado por las islas de Tenerife y Gran Canaria, numerado en la figura como ②.
- El mar de fondo procedente del Hemisferio Sur, protagonista de este trabajo, marcado en la figura como ③.

Como ya se ha comentado en el apartado 4.2, la isla de Tenerife sirve de abrigo al mar de fondo predominante en la región, el procedente del 4º cuadrante, que también aparece representado en la Figura 12.

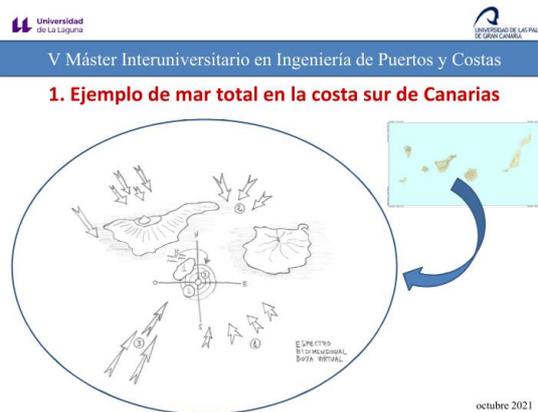


Figura 12: Representación cualitativa aproximada del espectro medio del área Sur-Sureste frente a la costa de Tenerife (Megías, 2021a).

La existencia de tres familias de oleaje (*Swells* provenientes de los dos hemisferios y mar de viento local) aparecen claramente en los espectros promediados, a partir de datos de reanálisis, realizados recientemente por investigadores del IH Cantabria (Lobeto *et al.*, 2022).

Como ya se ha comentado en el apartado 3.12 de esta tesis, la separación de las distintas familias de oleaje no es una tarea fácil. En el caso de abordar el problema mediante el uso de espectros

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



de frecuencia (espectros escalares), aún no hay un procedimiento generalizado de uso común, siendo múltiples las propuestas, algunas ya citadas. La interpretación de los espectros de oleaje ha de hacerse con sumo cuidado. De nada servirá el uso de parámetros medios del espectro que no tengan sentido físico alguno, siendo necesaria previamente la división de dicho espectro en particiones acordes con las distintas familias de oleaje (WMO, 2018).

Es muy interesante cómo aborda este tema Portilla-Yandún (Portilla-Yandún, 2022). Según este autor, trabajando con series espectrales suficientemente extensas en el tiempo, se pueden distinguir los distintos sistemas de oleaje originados por la acción concreta de ciertos agentes meteorológicos (por ejemplo: vientos producidos por tormentas extratropicales, vientos alisios, monzón, etc.). La partición espectral entre estos distintos sistemas de oleaje los realiza utilizando ambas coordenadas espectrales: frecuencia y dirección de procedencia (f, θ). En una fase posterior, se pasará al dominio del espacio definiendo los distintos campos de oleaje para una zona concreta.

En esta ocasión, la separación de los *Swells* procedentes del Hemisferio Sur del resto de oleaje se ha realizado siguiendo una filosofía similar, pero utilizando directamente los parámetros obtenidos a partir de los espectros horarios de la boya (T_p, θ_p, Hm_0). Es decir, en vez de realizar la tarea de partición de cada uno de los espectros para posteriormente realizar un trabajo estadístico espectral a partir de las particiones obtenidas, se ha optado por realizar la partición trabajando directamente sobre los parámetros espectrales característicos de cada registro. La obtención de estos datos y su posterior tratamiento, en forma de series temporales, es mucho más asequible. En contrapartida, en este proceso de reducción, se pierde información, ya que a cada estado del mar (registro horario de la boya) solo se le asigna una única terna de valores (T_p, θ_p, Hm_0), sin tener en consideración los sistemas de oleaje secundarios que puedan estar recogidos en cada espectro.

En la Figura 13 se muestra un diagrama de flujo donde se sintetiza el proceso seguido. Como se podrá comprobar, en vez de usar la frecuencia, se ha utilizado el periodo ($T= 1/f$):

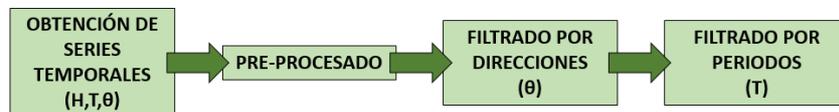


Figura 13: Flujo de trabajo seguido para la separación del oleaje en estudio.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



Las dos primeras etapas del proceso (obtención de las series temporales y preprocesado) ya han sido abordados en los apartados anteriores de este capítulo, por tanto, se pasa a describir las dos últimas etapas:

- Filtrado según dirección de procedencia: Teniendo en cuenta, como ya se ha comentado en el apartado 3.11, que el desplazamiento que el oleaje realiza en estas largas distancias sigue los grandes círculos o rutas ortodrómicas, es posible delimitar la ventana de direcciones del oleaje que llega a Canarias desde el Hemisferio Sur.

Esta ventana dependerá de la situación del Archipiélago en la cuenca Atlántica y de la forma de esta. Comparada con la forma mucho más abierta de la cuenca de otros océanos, como es el caso del Pacífico, el rango de direcciones para la propagación hacia el Hemisferio Norte de los *Swells* en el Atlántico es mucho más limitado. Quedará por tanto el rango de direcciones posibles en un estrecho arco, según se puede observar en la Figura 14.



Figura 14: Arco de direcciones desde la que pueden llegar el oleaje de componente Sur. En rojo la localización de Canarias frente a la costa noroeste de África.

Por tanto, el primer trabajo de procesado durante el tratamiento de los datos, será la separación de aquellos datos que pertenece a este rango de direcciones ($184^\circ \leq \theta \leq 208^\circ$) del resto de registros. Para ello, se utilizarán las direcciones de pico, es decir, las direcciones marcadas para el pico de energía del espectro de cada registro horario. Del total de los registros horarios de la boya para un periodo de tiempo que abarca los años 2008 al 2022, ambos inclusive, solo un 9,44% procede de estas direcciones.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



- Filtrado según el periodo del oleaje: Si se realiza un histograma de frecuencia relativa con los valores de periodos de pico (T_p) de los registros horarios de la boya, tras el filtrado según las direcciones propuestas ($184^\circ \leq \theta_p \leq 208^\circ$), se puede observar la existencia de 2 picos principales alrededor de los cuales se aglutinan la mayor parte de las lecturas (Figura 15). Estos dos picos corresponderán a dos sistemas de oleaje claramente diferenciados. Los valores aproximados de ambos picos son de 13 y 15 segundos. Estas magnitudes claramente corresponden a oleaje tipo *Swell*.

El conjunto de la izquierda (con su máximo para $T_p \approx 13$ s) estará formado por registros de oleaje tipo mar de fondo originado en aguas relativamente cercanas a Canarias, pero a una distancia suficiente para que este se desarrolle.

El conjunto de la derecha (con su máximo para $T_p \approx 15$ s) ya cuenta con unos valores de periodo que son clara señal de un *Swell* más maduro, cuyo origen con mucha probabilidad será más lejano.

Será el límite entre ambos grupos, en torno a $T_p \approx 14$ segundos, el tomado como umbral mínimo en la mayor parte de los trabajos publicados que componen esta investigación.

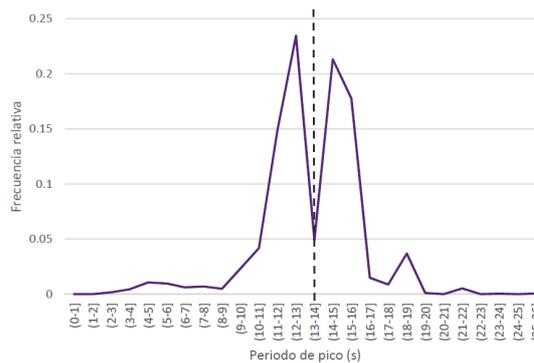


Figura 15: Histograma de frecuencias relativas para las lecturas del rango de direcciones θ_p filtradas ($184-208^\circ$). Periodo de estudio: 2008-2022.

Por tanto, el oleaje objeto de estudio de esta tesis doctoral será aquel recogido por la Boya de aguas profundas que Puertos del Estado mantiene al Sur de Tenerife, procedente de **direcciones de pico comprendidas entre 184 y 208°, con valores de periodo de pico iguales o mayores a 14 segundos.**

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



4.5. Definición de las condiciones necesarias para que se produzcan los Swells de largo periodo objeto de esta tesis.

Una vez que ya se tienen definidas los valores umbrales θ_p y T_p tomados para la fase de cribado de los registros, se pasa a estudiar las condiciones necesarias para que estos se den. Dicho estudio se centrará en el motor fundamental de generación del oleaje: el viento. Concretamente en su intensidad, tiempo y distancia de interacción con la superficie del océano.

No se entrará ahora en detalles sobre los posibles ciclones extratropicales causantes de estos vientos, ni en las distintas etapas de la evolución de estos ciclones, ni de cómo puede influir su movimiento de traslación, en el proceso de generación del oleaje. Simplemente se comprobará que la superficie de generación necesaria para el desarrollo del oleaje en estudio está disponible en el Océano Atlántico Sur.

Haciendo uso de la expresión (25) con la que se puede estimar la máxima H_s , a partir de la acción del viento (U_{10}) para mares completamente desarrollados, se obtienen los siguientes valores (Tabla 2).

Tabla 2: Altura H_s (m) resultante en mares completamente desarrollados en función del viento U_{10} (kt).

U_{10} (kt)	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42	44
U_{10} (m/s)	11.3	12.3	13.4	14.4	15.4	16.4	17.5	18.5	19.5	20.6	21.6	22.6
H_s (m)	3.1	3.7	4.3	5.0	5.8	6.6	7.4	8.3	9.2	10.2	11.3	12.4

Los valores de velocidad de viento usados en la Tabla 2, han sido elegidos a título orientativo, eventos donde se dan valores de esta magnitud son registrados regularmente en el Océano Atlántico Sur, tanto por los modelos meteorológicos como por mediciones instrumentales (Yuan, 2004; Young *et al.*, 2020; Derkani *et al.*, 2021), aunque es notable la escasez de registros disponibles, si se comparan con otras zonas del planeta (Campos *et al.*, 2018). Recordar que según la escala Beaufort, a partir de los 34 nudos comienza la clasificación de temporales (AEMET, sin fecha), este valor límite ha sido marcado en la tabla con una línea vertical.

En la Tabla 3 también se ha tenido en cuenta la duración del temporal haciendo uso de la expresión (24) para obtener el *fetch* meteorológico mínimo necesario para alcanzar los máximos valores de H_s correspondientes a oleaje completamente desarrollado, en función de la velocidad de viento y el tiempo de acción de este.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



Tabla 3: *Fetch* meteorológico mínimo necesario (km) para alcanzar los máximos valores de H_s , en función de la velocidad del viento (m/s) y la duración del temporal (horas).

t (h) \ U_{10} (m/s)	11.3	12.3	13.4	14.4	15.4	16.4	17.5	18.5	19.5	20.6	21.6	22.6
12	138.7	146.5	154.1	161.5	168.6	175.6	182.5	189.2	195.7	202.2	208.5	214.7
24	358.5	378.7	398.3	417.4	435.9	454.0	471.7	489.0	505.9	522.5	538.8	554.8
36	624.8	660.0	694.2	727.4	759.7	791.2	822.0	852.1	881.7	910.6	939.0	967.0
48	926.7	978.9	1029.5	1078.7	1126.7	1173.4	1219.1	1263.8	1307.6	1350.5	1392.7	1434.1
60	1258.1	1328.9	1397.7	1464.5	1529.5	1593.0	1655.0	1715.7	1775.2	1833.5	1890.7	1946.9
72	1615.0	1706.0	1794.3	1880.0	1963.5	2045.0	2124.6	2202.5	2278.9	2353.7	2427.2	2499.4
84	1994.8	2107.2	2216.2	2322.1	2425.2	2525.9	2624.2	2720.4	2814.7	2907.1	2997.9	3087.1
96	2395.2	2530.2	2661.0	2788.2	2912.1	3032.9	3151.0	3266.5	3379.7	3490.7	3599.7	3706.8

Los valores de duración utilizados en esta Tabla 3, son del orden de magnitud de los descritos en otros trabajos desarrollados para el Atlántico Sur (ver, por ejemplo (Gramcianinov *et al.*, 2020).

La gran extensión de la cuenca atlántica en la zona extratropical del Hemisferio Sur permite que se den mares completamente desarrollados en el caso de que se cumplan el resto de condiciones necesarias.

En los casos en los que la dirección del viento, con suficiente intensidad, *fetch* y duración para generar oleaje de importancia, esté convenientemente orientado, podrá generar oleaje con posibilidades de alcanzar las costas canarias, tras una larga travesía de miles de millas náuticas.

Como se podrá comprobar en los próximos apartados, esta casuística se da habitualmente. Hay que recordar que esta zona del Atlántico Sur es un área donde se originan un importante número de ciclones (Crespo, Porfirio y Jesus, 2020). De hecho, existen tres zonas bien definidas de generación de ciclones extratropicales al Este de Iberoamérica, concretamente frente a la costa Sur de Brasil, de Uruguay, y de Argentina (Reboita *et al.*, 2018; de Jesus *et al.*, 2021), aunque el área de generación no queda restringida a estas tres zonas, abarcando una enorme extensión del Atlántico Sur que llega hasta los Océanos Índico y Antártico (Amores y Marcos, 2020).

Por último, hay que tener en cuenta la interconexión entre las distintas cuencas oceánicas, el oleaje originado en el Sur del Océano Índico o Pacífico pueden penetrar en la cuenca Atlántica si se dan las condiciones necesarias para ello, de igual forma, oleaje producido en el Atlántico Sur podrá propagarse hacia estos (Alves, 2006).

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



4.6. Investigaciones realizadas, justificación de los aspectos estudiados mediante caso en estudio: Los eventos registrados durante el verano boreal de 2023.

Durante el desarrollo de esta investigación se han estudiado diferentes aspectos del oleaje transhemisférico, desde su génesis hasta su comportamiento en las aguas canarias. Para su descripción pormenorizada se hará uso de los eventos registrados durante el pasado verano del 2023, concretamente durante el mes de agosto.

Ha sido especialmente llamativo el continuo registro de oleaje proveniente del Sur, de baja altura y frecuencia, tomados por la boya REDEX Tenerife Sur durante este mes. Esto puede estar relacionado con el gran número de periodos de calma acaecidos en la zona de fondeo de la boya, hay que señalar que el número de registros de viento con velocidades menores a 3,4 m/s, correspondientes a niveles 0 (calma), 1 (ventolina) y 2 (flojo) de la escala Beaufort, fue un 50% mayor que la media de los últimos 10 meses de agosto (2014-2023). Esta disminución del viento ha podido facilitar el registro del oleaje en estudio gracias a la disminución de ruido (hay que recordar que el oleaje tipo *Sea* predominante es producido por el viento local).

La explicación de esta situación meteorológica queda fuera del ámbito de este trabajo, tan solo se darán dos apuntes. Por un lado, el valor del índice de la Oscilación del Atlántico Norte (NAO) para el mes de agosto ha sido marcadamente negativo, estando por debajo de -1 (NOAA, 2023). Hay que recordar la importante influencia de este índice en el régimen de vientos del Archipiélago (Marrero-Betancort *et al.*, 2020), produciéndose la disminución de la intensidad de estos ante un índice NAO negativo (Afonso, 2018). Por otro lado, hay que señalar la presencia del fenómeno de El Niño, generador de una redistribución a escala global de las pautas meteorológicas (WMO, 2023).

En la Figura 16 se muestran los registros de T_p y de θ_p para el mes de agosto del 2023, es fácilmente apreciable cómo la mayor parte de los registros con valores de T_p que superan los 14 s provienen de direcciones comprendidas en el rango de direcciones en estudio (184-208°).

También se puede comprobar cómo los registros que superan este valor umbral se encuentran ordenados, agrupados en varios eventos. En estos se aprecia cómo a partir de unos registros máximos (que en todos superan los 18 s menos en el último, que supera los 16 s), los valores de T_p van disminuyendo paulatinamente. Esto es debido a la ordenación del oleaje según sus

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



periodos, habitual en los mares de fondo maduros, donde las primeras olas que arriban una costa lejana son aquellas de menor frecuencia (con mayor celeridad) y a continuación irá llegando el oleaje cada vez más lento, con un menor periodo, y por tanto, menor celeridad.



Figura 16: Registros tomados por la boya REDEXT Tenerife Sur, de T_p (línea) y de θ_p (puntos), correspondientes al mes de agosto de 2023.

Esta naturaleza dispersiva de los mares de fondo puede aprovecharse para estimar de forma aproximada el origen de dicho oleaje, tomando ciertas licencias, como es la de suponer que todo el oleaje de un evento se ha generado en el mismo punto y en el mismo momento, o que durante la travesía el oleaje no ha sido afectado por ningún otro factor externo. Teniendo en cuenta este tipo de consideraciones, el ya citado Portilla-Yandún, siguiendo la teoría lineal, propone un desarrollo matemático a partir de la expresión de la velocidad de grupo para aguas profundas con la que obtener la distancia D recorrida por el *Swell* (Portilla-Yandún, 2012):

$$D = \frac{g}{4\pi m} \quad (28)$$

Donde g es la aceleración de la gravedad y m es la pendiente con la que va disminuyendo el valor de la frecuencia de pico de los registros. Dicha expresión ha sido recientemente utilizada por otros autores (Wang *et al.*, 2016; Amores y Marcos, 2020).

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVG1Qi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



Para poder aplicar la expresión (28) en los registros pertenecientes al mes de agosto del 2023 que han pasado los filtros comentados en el apartado 4.4. ha sido necesario calcular m . Con este propósito se ha obtenido la línea de tendencia de los eventos que han tenido una duración mayor de 24 horas a partir de los registros convenientemente depurados, pertenecientes a las primeras 24 horas (86.400 s) contadas a partir del registro de mayor T_p (Figura 17). El ajuste obtenido en estas rectas se cree suficiente, con valores del coeficiente R^2 entre 0,74 y 0,98.

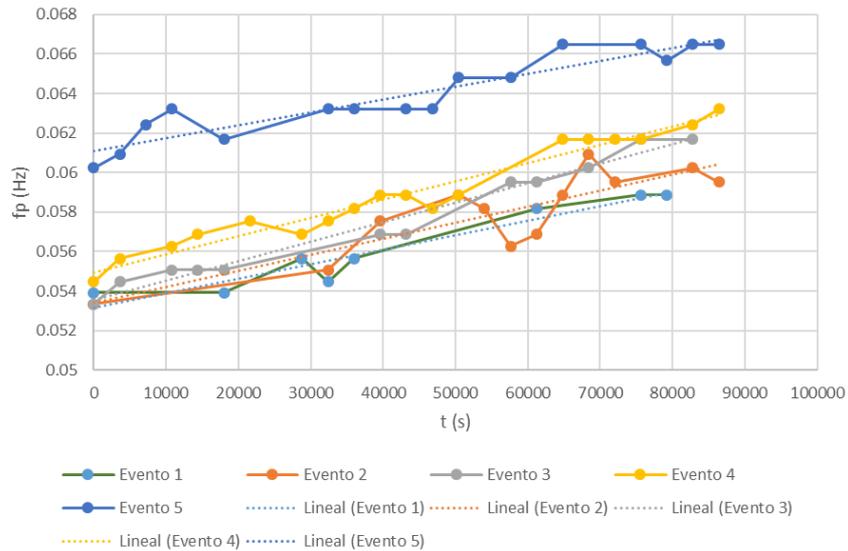


Figura 17: Registros de la boya REDEXT Tenerife Sur de los eventos registrados en el mes de agosto que han pasado el cribado previo (puntos y líneas continuas) y líneas de tendencia obtenidas (líneas discontinuas).

A partir de los valores de m y de T_p inicial de cada evento se ha calculado la distancia D , y con esta, la obtención de la velocidad de grupo C_g y posteriormente del tiempo transcurrido t desde la formación del oleaje hasta su llegada a las aguas canarias es directa, asumiendo que la celeridad es constante durante toda la travesía para cada grupo de olas que llegan hasta la boya. Los resultados se muestran en la Tabla 4.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección https://sede.ull.es/validacion/	
Identificador del documento: 6282318	Código de verificación: /rVGlQi0
Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



Tabla 4: Cálculo de distancia aproximada D y tiempo t de desplazamiento del oleaje en estudio desde su origen hasta Canarias.

EVENTO	Fecha primer registro	Tp inicial (s)	fp inicial (Hz)	θ_p media de registros (°)	R^2	m	Cg oleaje inicial (m/s)	D (m)	D (mn)	t (s)	t (días)
1	9 de agosto	18.55	0.0539	198	0.9503	7.57E-08	14.48	1.03E+07	5570	7.12E+05	8.24
2	11 de agosto	18.75	0.0533	204	0.7412	8.11E-08	14.64	9.63E+06	5200	6.58E+05	7.61
3	14 de agosto	18.75	0.0533	203	0.9775	1.02E-07	14.64	7.67E+06	4140	5.24E+05	6.06
4	20 de agosto	18.36	0.0545	201	0.9586	9.22E-08	14.33	8.47E+06	4570	5.91E+05	6.84
5	25 de agosto	16.60	0.0602	202	0.8805	6.52E-08	12.96	1.20E+07	6470	9.25E+05	10.70

Se puede observar que la distancia aproximada recorrida por el oleaje hasta llegar a Canarias ha sido siempre mayor a las 4.000 millas náuticas, quedando el origen de todos estos eventos por debajo de los 35° Sur. Se vuelve a insistir en que los valores mostrados en la Tabla 4 han de ser tomados con la suficiente reserva, al no tener en cuenta la influencia que han podido ejercer elementos externos (interacción con corrientes marinas y vientos en superficie, refracción producida por islas y cabos, etc.), pero suficientemente ajustados para el propósito buscado en este apartado.

Respecto a la H_s media de los registros considerados en estos cálculos, en ninguno de los cinco eventos se ha llegado a los 2 m, quedando por debajo de 1 metro en dos de ellos.

Son este tipo de oleaje los protagonistas de esta tesis doctoral, que ha sido desarrollada en distintas etapas, cada una de ella dedicada a un aspecto específico relacionado con los *Swells* transhemisféricos que llegan a Canarias desde el Sur.

Una primera etapa ha sido dedicada a la detección de los *Swells* y localización de su posible origen, buscando el fenómeno meteorológico que ha podido producir cada evento detectado. Los resultados han sido publicados en la revista *Maritime Engineering* del ICE (Megías, 2021b).

Posteriormente se ha estudiado la forma de rotura de este oleaje en las costas canarias, las conclusiones de esta etapa de trabajo han sido presentadas mediante una ponencia en el XXIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica IAHR, organizado en México durante el año 2021, y un artículo publicado en el libro de actas de dicho Congreso (Megías y García-Román, 2021).

Como se ha comentado en este apartado, las condiciones de viento en Canarias pueden afectar a la detección de este tipo de oleaje. La influencia de los vientos alisios prevalentes en las aguas canarias en la detección de los *Swells* transhemisféricos han sido el objetivo de la siguiente fase

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



de investigación. Sus resultados han sido publicados en la revista científica *Atmosphere* (Megías y García-Román, 2022).

Durante el transcurso de estas tres primeras etapas de investigación ha quedado patente la dificultad de caracterizar el clima marítimo de mares complejos como los que se dan en archipiélagos oceánicos, donde familias de oleaje originados localmente, conviven con mares de fondo provenientes de zonas más o menos remotas. A eso hay que sumar las características orográficas específicas de los archipiélagos de origen volcánico, que condicionan el comportamiento del viento, las corrientes, y por supuesto, el oleaje. La metodología desarrollada para estudiar el oleaje en estudio ha servido de base para proponer una metodología general para la caracterización del clima marítimo en archipiélagos oceánicos de origen volcánico, que ha sido publicado en forma de artículo en la revista taiwanesa *Journal of Marine Science and Technology* (Megías y García-Román, 2023).

La última etapa de investigación, ha sido dedicada a la caracterización energética de este oleaje, con el fin de estudiar su posible aprovechamiento como energía renovable marina. Los resultados obtenidos han sido recogidos en un manuscrito que en estos momentos está en proceso de revisión en revista científica.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

5. RESULTADOS

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



“In order to forecast Sea and Swell from weather data it is necessary to know the character of the waves produced by a given wind that blows for a known length of time over a known stretch of water, the fetch.”

Harald U. Sverdrup y Walter H. Munk, 1947

De la introducción del artículo pionero “Wind, Sea, and Swell. Theory of Relations For Forecasting”

5.1. Presentación de resultados, correspondencia con publicaciones.

A continuación, se vuelven a mostrar los objetivos marcados en esta tesis doctoral, ya explicados en el apartado 2.3. A cada uno de ellos se le ha asignado un código identificativo:

- OB-01: Detección de posibles fenómenos de *Swell* procedentes de Hemisferio Sur en las costas canarias mediante observación sistemática directa de la costa, comparación de dichas observaciones con las salidas de modelos numéricos y con las lecturas de las boyas de aguas profundas existentes en el Archipiélago. Búsqueda del posible origen en aquellos casos en los que existiera correlación entre la observación, modelo y registro de las boyas.
- OB-02: Estudio estadístico de este tipo de oleaje en Canarias, determinando los principales parámetros que lo caracterizan (altura, periodo y dirección de proveniencia).
- OB-03: Comportamiento de este oleaje en aguas someras, cuando los fondos marinos de las islas interactúan con el mar de fondo en estudio. Determinación de la forma de rotura.
- OB-04: Estudio de la influencia de otros factores climáticos locales en su detección, como son el viento y otras familias de oleaje existentes en las aguas canarias.
- OB-05: Caracterización energética del oleaje en estudio, de cara a su posible aprovechamiento mediante equipos de energía undimotriz.

De igual forma, se les asigna los siguientes códigos a los artículos publicados en revistas incluidas en el listado del Journal Citation Reports, resultantes de la investigación:

- AR-01: Megías, E. (2021) “Observation of transhemispheric waves on the southern coast of the Canary Islands”, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Maritime Engineering*, 174(2), pp. 34-52.
- AR-02: Megías, E. y García-Román, M. (2022) “Influence of Trade Winds on the Detection of Trans-Hemispheric Swells near the Canary Islands”, *Atmosphere*, 13(4), p. 505.
- AR-03: Megías, E. y García-Román, M. (2023) «A methodology for statistical mean wave climate regime characterisation in oceanic islands: the case of the southern coast of Tenerife», *Journal of Marine Science and Technology*, 31(3).

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



Los códigos asignados a otros trabajos publicados (actas de congresos) y manuscritos en revisión han sido:

- VA-01: Megías, E. y García-Román, M. (2021) “Estimación del comportamiento de swells transhemisféricos en la costa de islas oceánicas mediante el uso del Número de Iribarren: El caso de la costa Sur de Tenerife”, en M. Berezowsky, A. Mendoza, y M. Arganis-Juarez (eds.) *Compilación de trabajos completos: XXIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica México*. México: AMH - IAHR - Instituto de Ingeniería UNAM.
- VA-02: Megías, E. y García-Román, M. (2023) “Contribution of transhemispheric swells to the wave energy potential on the south coast of the Canary Islands”. Manuscrito en revisión.

En la Tabla 5, mediante el uso de los códigos propuestos, se relacionan los objetivos perseguidos con los artículos que los han tratado, se puede comprobar cómo en un mismo artículo se ha podido trabajar sobre más de uno de los objetivos de la tesis:

Tabla 5: Objetivos de la investigación, y artículos desarrollados que han abordado específicamente cada uno de estos objetivos.

Código objetivo	Código publicación/manuscrito
OB-01	AR-01
OB-02	AR-03, VA-01, VA-02
OB-03	VA-01
OB-04	AR-02, AR-03
OB-05	VA-02

En los siguientes apartados de este capítulo se describen de forma resumida cada una de las publicaciones desarrolladas durante estos años de investigación. El orden de presentación de cada uno de los trabajos se ha realizado siguiendo el orden cronológico de publicación. El último apartado se dedica al manuscrito que se encuentra en estos momentos en proceso de revisión.

Para la identificación de cada una de estos trabajos se ha seguido utilizando la codificación aquí presentada.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



5.2. Origen de los Swells transhemisféricos (Publicación AR-01).



Figura 18: Artículo publicado en la revista *Maritime Engineering* (*Proceedings of the Institution of Civil Engineers*).

<https://www.icevirtuallibrary.com/doi/abs/10.1680/jmaen.2020.30>

La llegada de los Swells procedentes del Hemisferio Sur a las aguas de Canarias ha sido analizada sistemáticamente durante un periodo de un año, concretamente desde abril de 2019 hasta marzo de 2020. Para ello se realizó el seguimiento del oleaje proveniente de direcciones Sur a Suroeste desde un punto de observación elegido en la costa Sureste de la isla de Tenerife, concretamente desde Radazul, en el término municipal de El Rosario.

Es en Radazul donde se dan las pendientes de la costa más acusadas del Archipiélago, por lo que se consigue la mayor cercanía posible de las aguas profundas a la costa. Se vuelve a recordar que la profundidad límite a partir de la cual se habla de aguas profundas es aquella marcada por la mitad de la longitud de onda del oleaje en aguas profundas ($L_0/2$) (Silva, 2005).

Además, gracias a su orientación, en esta zona se está al abrigo del oleaje más importante que llega a Canarias (los Swells provenientes del 4º cuadrante), lo que facilita la observación del resto de oleaje.

Aquellos eventos avistados han sido comparados con las lecturas de las boyas REDEXT fondeadas en Canarias (se han descartado eventos con T_p menores a 14 s y direcciones de procedencia fuera del abanico 180-225°). Posteriormente se han contrastado con las salidas del modelo WW3.

Se han analizado los eventos que han pasado este cribado, buscando el posible fenómeno meteorológico que lo podría haber originado.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



Un total de 6 eventos cumplieron con el protocolo de estudio preparado, pudiéndose afirmar que el mar de fondo observado eran *Swells* procedentes del Hemisferio Sur. Es muy llamativo ver cómo, aunque para este trabajo el rango de direcciones válidas fue menos restrictivo que el descrito en el apartado 4.4. Los 6 eventos que pasaron el proceso de cribado provenían de direcciones dentro de dicho abanico (184-208°). Las H_s correspondientes a los máximos registros de T_p de cada uno de estos eventos fueron de entre 20 y 130 cm, quedando patente, como era de esperar, el peralte reducido que tiene el oleaje en estudio.

Los fenómenos meteorológicos causantes de este oleaje fueron ciclones extratropicales de suficiente intensidad, con bajas que en muchos casos alcanzaron los 970 hPa de presión sobre el nivel del mar.

El hecho de que solo 6 eventos pasaran todas las fases del estricto proceso de detección no significa que fueran los únicos casos en los que se produjera la llegada de este tipo de oleaje. A cambio, queda poco margen para la duda sobre la procedencia desde el Hemisferio Austral de estos 6 conjuntos de familias de oleaje.

Los resultados de este año de seguimiento quedaron reflejados en el artículo titulado “*Observation of transhemispheric waves on the southern coast of the Canary Islands*” (Figura 18), publicado en marzo de 2021 en una de las revistas científicas del ICE británico, cuyo *abstract* se reproduce íntegramente a continuación:

“Swells that reach the coast of the Canary Islands from northern latitudes are well studied and documented, but scientific literature on the arrival of swells from the southern hemisphere is very scarce. The effects of this type of wave can be appreciated in the south coast of the Canary Islands at certain times of the year. These waves have low significant height, but long periods. The Spanish public system for forecasting of the marine environment (SIMAR database) may not be replicating this type of swell accurately. For this reason, its effect may have been underestimated in the design and management of coastal infrastructures. The aim of this research is to study the frequency and features of swells arriving from the extratropical region of the southern hemisphere to the Canary Islands, an archipelago located in the subtropical North Atlantic. For this purpose, a systematic visual observation of the waves reaching the coast of the Canary Island of Tenerife from the south, and comparisons with wave models and registers of buoys were carried out. The observation period was 1 year. A total number of six events with sufficient correlation were recorded. The possible origin of each of these events has been studied.”(Megías, 2021b).

70

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



**5.3. Comportamiento de los Swells a su llegada a la costa. Tipo de rotura.
 (Publicación VA-01).**

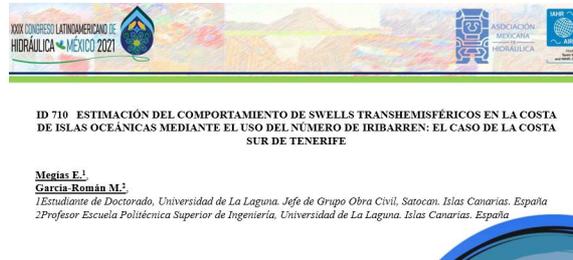


Figura 19: Portada de presentación realizada en el XXIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica IAHR (México 2021).

Para estudiar el comportamiento del mar de fondo proveniente del Hemisferio Sur a su llegada a la costa, se creyó interesante estudiar su forma de rotura en aguas someras. Es en ese último tramo del recorrido del oleaje hasta la costa, donde el fondo marino y el oleaje se afectarán mutuamente de manera más intensa.

Al igual que para definir las aguas profundas se hace uso de la longitud de onda del oleaje L (siendo para ese caso, profundidades mayores a la mitad de la longitud de onda en profundidades indefinidas $L_0/2$), para delimitar las aguas someras también se acude a la misma variable, quedando el límite entre las aguas someras y las de transición a una profundidad de $L/20$ o $L/25$, según autores (Muñoz Pérez, 2011), siendo en este caso L la longitud de onda para esa profundidad h . Para este trabajo quedó definida como $L/20$.

Para estudiar la rotura se acudió a la que quizás sea la expresión más extendida para relacionar las características del oleaje con las del lecho marino con el que interactúa: el número de Iribarren, o *surf similarity parameter*, como es también conocido en el mundo anglosajón.

El número de Iribarren (I_r) es un parámetro adimensional que relaciona la pendiente del fondo de la costa con el peralte de la ola (Grassa Garrido, 2018). Cuando para su obtención se utilizan los valores de altura y longitud de onda para aguas profundas, se suele denotar como I_{r0} :

$$I_{r0} = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{H_0}{L_0}}} \quad (29)$$

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVG1Qi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



Donde $\tan \alpha$ es la pendiente de la costa o estructura, H_o es la altura de ola en aguas profundas y L_o la longitud de onda en aguas profundas.

Dicho parámetro adimensional fue presentado por primera vez en el Congreso de Lisboa de la PIANC en 1949, siendo sus autores los ilustres Ingenieros Ramón Iribarren y Casto Nogales, pero es a partir de los trabajos de J.A. Battjes cuando realmente tomó un cariz universal para la clasificación de los tipos de rotura (Lechuga, 1999).

Battjes usó la relación entre pendiente de la playa y el peralte de la ola como criterio de estudio y clasificación de la rotura de oleaje, proponiendo los siguientes valores de I_{r0} (Battjes, 1974):

Tabla 6: Clasificación de tipos de rotura según el número de Iribarren (I_{r0}).

Tipo de rotura	I_{r0}
Spilling	< 0,5
Plunging	0,5 – 3,3
Surging o collapsing	> 3,3

Tras realizar un estudio de caracterización de la costa de la isla de Tenerife expuesta al *Swell* objeto de esta tesis doctoral (fachadas este y oeste), y de los registros de 10 años de la boya REDEXT Tenerife Sur que han superado el proceso de cribado descrito en el capítulo anterior, se ha pasado a estudiar el tipo de rotura resultante.

Como conclusiones más importantes, se puede afirmar que los *Swells* transhemisféricos que llegan a la costa de Tenerife procedentes del Hemisferio Sur, se caracterizan por tener pequeñas alturas e importantes longitudes de onda, más del 60% de los registros que han superado el proceso de cribado establecido tienen una H_s entre 40 y 80 cm. Se puede comprobar que los valores de I_{r0} obtenidos para las pendientes de la costa y peralte de estos *Swells* habituales coinciden con los valores de *plunging* marcados por Battjes. Hay que recordar que, a mayor periodo de la ola, y a mayor pendiente de la costa, mayor será la altura de rotura H_b (Sierra y Lo Presti Blanco, 1998).

Estos resultados fueron presentados mediante ponencia en el XXIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica IAHR, organizado en México el año 2021 (Figura 19), y en un artículo publicado en el libro de actas del congreso, titulado “*Estimación del comportamiento de Swells transhemisféricos en la costa de islas oceánicas mediante el uso del número de Iribarren: el caso de la costa Sur de Tenerife*”. A continuación, se reproduce su resumen:

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección https://sede.ull.es/validacion/	
Identificador del documento: 6282318	Código de verificación: /rVGlQi0
Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



“A las Islas Canarias llegan periódicamente Swells provenientes de áreas extra tropicales del Hemisferio Sur. Este tipo de oleaje, tiene como origen más plausible la zona oeste del Atlántico Sur, frente a las costas de Sudamérica. Cruza el ecuador, alcanzando las Islas, muy transformado, con grandes periodos, pero alturas pequeñas, lo que dificulta su detección. En el presente trabajo se ha estudiado el comportamiento de este oleaje a su llegada a las costas de la isla canaria de Tenerife, centrándose en el estudio de la rotura mediante el uso del Número de Iribarren. Se comprueba cómo la combinación de las características de este oleaje (muy poco peraltado), con las características habituales de estas costas (con una estrecha plataforma costera de pendiente considerable), dan como resultado que en gran parte de las ocasiones se den las condiciones necesarias para que se produzca la rotura tipo plunging, lo que puede propiciar eventos de remonte y rebase en el litoral expuesto.”
(Megías y García-Román, 2021).

5.4. Problemática en la detección de los Swells en estudio. Interacción con el oleaje de viento originado en Canarias (Publicación AR-02).

Influence of Trade Winds on the Detection of Trans-Hemispheric Swells near the Canary Islands

by Emilio Megías ^{1,2*} and Manuel García-Román ³

¹ School of Doctoral and Postgraduate Programs, University of La Laguna, 38200 La Laguna, S/C Tenerife, Canary Island, Spain

² Satocan SA, 38296 La Laguna, S/C Tenerife, Canary Island, Spain

³ Higher Polytechnic School of Engineering, University of La Laguna, 38001 La Laguna, S/C Tenerife, Canary Island, Spain

* Author to whom correspondence should be addressed.

Atmosphere 2022, 13(4), 505; <https://doi.org/10.3390/atmos13040505>

Submission received: 14 February 2022 / Revised: 15 March 2022 / Accepted: 18 March 2022 / Published: 22 March 2022

Figura 20: Artículo publicado en la revista *Atmosphere*.

<https://www.mdpi.com/2073-4433/13/4/505>

Durante las anteriores fases de investigación, ya descritas, llamaba mucho la atención como se concentraban los registros del oleaje en estudio en las estaciones de primavera y otoño, a pesar de la continua actividad ciclónica existente en las zonas extratropicales del Atlántico Sur, y la importancia de las borrascas existentes en esa área durante el invierno austral. Esto hizo pensar en posibles agentes externos a la génesis del oleaje que influyesen más que en origen, en destino. Por ello se ha creído conveniente estudiar cómo repercuten, sobre la detección de los Swells transhemisféricos, los agentes atmosféricos (viento) y el estado del mar local (resto de oleaje) en la zona de Canarias.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



Centrados en el viento, se ha estudiado la posible influencia de los alisios, vientos procedentes del Noreste, que son los más importantes que se dan en el Archipiélago Canario, en la detección de los *Swells*. Hay que tener en cuenta la importancia de estos vientos en la formación del oleaje local, que añadirá ruido al estado del mar en un momento dado, disminuyendo la posibilidad de detectar oleajes de poca altura, que podrían pasar desapercibidos.

Para explicar este efecto, siguiendo la misma filosofía de la ya mostrada Figura 10, se ha preparado la Figura 21. Atendiendo a ella, si se supone que el oleaje marcado como *Swell 1* es un mar de fondo proveniente del Atlántico Sur, el *Swell 2* un mar de fondo proveniente del Atlántico Norte, y las familias de olas marcadas como *Sea* componen el mar de viento producido por el régimen de vientos existente en las aguas canarias, está claro que cuanto más importante sean estas últimas, más desapercibido pasarán los *Swells*, más aún si tienen las bajas alturas características del oleaje transhemisférico.

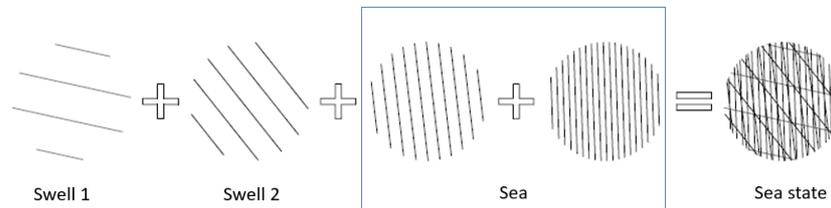


Figura 21: Composición de la mar total o real a partir de la suma de 2 *Swells* y mar de viento local, las líneas paralelas representan los frentes de onda de cada familia de olas, a mayor separación entre ellas, mayor longitud de onda y, por tanto, mayor periodo (Figura: Emilio Megías).

Para poder estudiar la afección de los vientos alisios en la detección del oleaje en estudio, se ha trabajado con 12 años de lecturas de oleaje y viento de la Boya REDEXT Tenerife Sur (2009-2020).

Un total del 70% de los registros de viento procedentes de la boya provienen del primer cuadrante, coincidiendo con las direcciones de procedencia de los vientos alisios.

En un primer paso, se relacionó el número de registros de oleaje que cumplía con los requisitos tomados para tratarlos como *Swells* transhemisféricos con la velocidad media del viento medida por la boya. Se vio claramente que los picos de registros se dan en los meses en los que la intensidad del viento es menor (primavera y otoño).

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección https://sede.ull.es/validacion/	
Identificador del documento: 6282318	Código de verificación: /rVGlQi0
Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



Realizando el estudio de los registros para distintos valores umbral de la velocidad del viento, se pudo obtener una ecuación de la recta que relaciona la proporción de registros anuales de *Swells* transhemisféricos (x) respecto al total de registros tomados a velocidades menores a esa velocidad umbral, en relación a la velocidad de viento umbral (y):

$$x = 0,0895 - 0,0038y \quad (30)$$

expresándose la velocidad del viento umbral y en m/s y la proporción de registros anuales x en tanto por uno. El coeficiente de determinación de la regresión lineal ha sido $R^2 = 0,9789$.

Al aplicar la expresión (30) para periodos de calma (tomando la velocidad y según la escala Beaufort como 0,2 m/s) se obtiene un resultado de $x = 0,0894$, lo que significa aproximadamente un 9% de los registros. En cambio, la proporción media anual de *Swells* procedentes del Hemisferio Sur respecto al conjunto total de los registros, sin limitación alguna en la velocidad del viento registrada por la boya, es de 4,6%. Esto puede dar una idea del gran número de eventos que al llegar a la zona donde se encuentra fondeada la boya, pasan desapercibidos bajo el ruido producido por el oleaje generado localmente por el viento.

La descripción del procedimiento y resultado de esta investigación quedaron reflejados en el artículo titulado *"Influence of Trade Winds on the detection of trans-hemispheric Swells near the Canary Island"* (Figura 20), publicado en marzo de 2022 en la revista *Atmosphere*, perteneciente a la editorial MDPI, cuyo resumen se reproduce íntegramente a continuación:

"Trade winds are common in the Canary Islands archipelago and affect not only the weather of the islands but also the local wave climate. On the other hand, the arrival in the Canaries of swells from the Southern Hemisphere is little known, but usual. The records of these swells arriving in the Canary Islands have two clear peaks throughout the year, one in spring and the other in autumn. In this work, how the trade winds influence the detection of this type of swells is studied. It is estimated that only approximately half of this type of wave that reaches the Canary Islands could be adequately recorded in the buoy output data tables by the action of these winds. Therefore, their effects may be underestimated in local wave climate studies." (Megías y García-Román, 2022).

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



5.5. Metodología propuesta para el estudio estadístico del clima marítimo de Islas Oceánicas (Publicación AR-03).

A methodology for statistical mean wave climate regime characterisation in oceanic islands: the case of the southern coast of Tenerife

[Emilio Megías](#), School of Doctoral and Postgraduate Programs, University of La Laguna, La Laguna, S/C Tenerife, Canary Island, 38200, Spain.

Follow

[Manuel García-Román](#), Higher Polytechnic School of Engineering, University of La Laguna, La Laguna, S/C Tenerife, Canary Island, 38001, Spain.

Figura 22: Artículo publicado en la revista *Journal of Marine Science and Technology*, editada por la National Taiwan Ocean University.

[\(https://jmstt.ntou.edu.tw/journal/vol31/iss3/12/\)](https://jmstt.ntou.edu.tw/journal/vol31/iss3/12/)

Como ya se comentó al principio del punto anterior, se ha creído conveniente estudiar cómo repercute, en la detección de los *Swells* protagonistas de esta tesis doctoral, el estado del mar del Sur de Canarias.

Esto ha supuesto un importante reto debido a la gran complejidad del clima marítimo de la zona de Canarias. Dicha complejidad ya ha sido comentada por otros autores (Afonso, 2018; Lobeto *et al.*, 2022). El problema se vuelve más difícil aun cuando los datos con los que se cuenta para esta labor son tablas de parámetros agregados (como ha sido), en lugar de la información completa que aporta la serie histórica de espectros de oleaje.

El trabajar con listados de parámetros, aunque como en este caso sean parámetros obtenidos a partir del espectro direccional de oleaje, conlleva riesgo de simplificación excesiva, pasando por alto importantes aspectos, con la posibilidad de llegar a conclusiones muy alejadas de la realidad a partir de valores medios que no representan a ninguno de los campos de oleaje presentes en la zona. En mares con distribuciones multimodales como el de Canarias, es necesario realizar un proceso previo de partición de las distintas familias de oleaje, algo para nada baladí, como ya se ha comentado en capítulos anteriores.

Se decidió descomponer los datos, que abarcaban los mismos 12 años ya descritos en el punto anterior (2009-2020) siguiendo un criterio similar al realizado para los *Swells* transhemisféricos

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



descrito en el apartado 4.4. Se clasificaron los registros usando valores umbrales de periodo de pico T_p y se sectorizó la dirección de procedencia de la siguiente forma:

- T_p : Para evitar que los datos de mares de fondo muy maduros, con bajas alturas de oleaje, pero grandes periodos, quedasen escondidos entre alturas mucho mayores, y teniendo en cuenta la experiencia adquirida en las fases previas de trabajo, se decidió diferenciar los *Swells* más maduros de los más jóvenes. Para ello, se realizó la división del conjunto de registros de la boya en tres grupos (Figura 23). Los valores límites de T_p para cada grupo se determinaron tras estudiar en detalle el histograma del conjunto total de datos, se puede comprobar que el valor determinado para realizar la partición entre los dos tipos de *Swells* es muy cercano a los 14 s utilizado en el resto de trabajos descritos en los puntos anteriores.

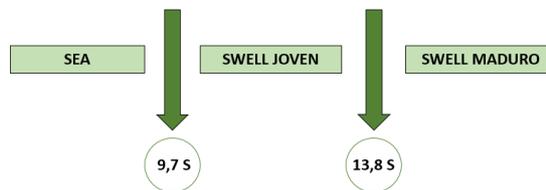


Figura 23: Clasificación del conjunto de registros según su T_p .

- Direcciones de procedencia: Se realizó un estudio de los distintos accidentes geográficos que delimitan los conjuntos de direcciones con similar *fetch* geográfico, de esta forma se han obtenido 7 sectores claramente diferenciados en los que dividir el arco de direcciones al que está expuesta la boya, desde el Noreste al Oeste (Figura 24):

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado

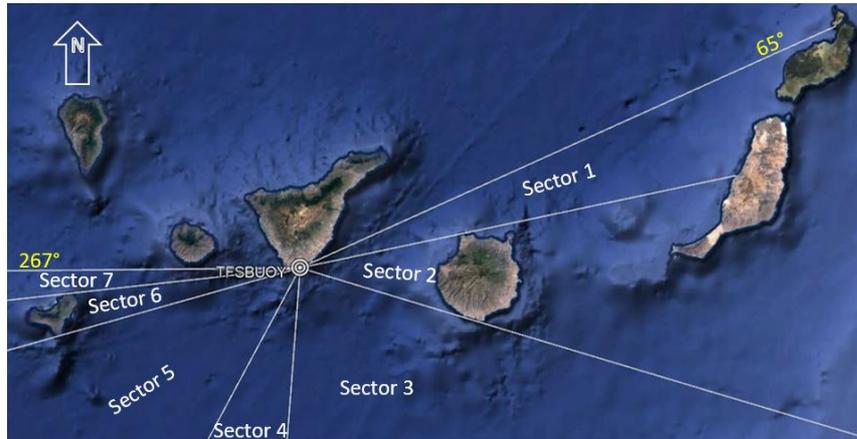


Figura 24: Sectores obtenidos para el rango de direcciones de procedencias al que está expuesto la Boya REDEXT Tenerife Sur (65-267°).

Los sectores obtenidos abarcan *fetchs* geográficos muy variados, desde las aproximadamente 50 millas náuticas que separan la boya de la vecina isla de Gran Canaria, hasta las más de 5.000 millas náuticas existentes en el sector 4 hasta llegar al continente Antártico (es precisamente a este sector 4 al que pertenecen el oleaje transhemisférico objeto de la tesis).

Este trabajo de clasificación de los datos según periodos (3 conjuntos) y direcciones de procedencia (7 sectores) dan como fruto la partición en 21 posibles conjuntos de datos de oleaje distintos. Tras el estudio estadístico aislado de cada uno de esos 21 conjuntos de datos se puede decir que se aprecia una distribución coherente de los registros de cada uno de ellos, y que pueden ser tratados como series temporales independientes. Al trabajar con los valores de las alturas significantes de cada uno de estos conjuntos, realizando los ajustes mediante las funciones de distribución de Weibull y Log-normal se han obtenido coeficientes de determinación muy altos, siempre por encima de 0,95. No es muy descabellado pensar que gran parte de los registros de cada uno de estos conjuntos se puede asimilar a un sistema de oleaje que comparte área de generación.

Respecto al clima marítimo de la zona, y a la relación del resto de oleaje con el mar de fondo en estudio, las conclusiones más importantes son:

- Las alturas de ola son, en línea general, bastante moderadas, las H_s medias mensuales solo superan 1 metro durante los meses de julio y agosto.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



- Se confirma que los vientos alisios provenientes del Noreste son uno de los principales factores que influyen en el clima marítimo de esta zona, siendo con diferencia, el mar de viento proveniente de los sectores 1 y 2 el oleaje predominante (direcciones comprendidas entre los 65° y los 107°). El 70% de los registros quedan dentro de valores de T_p de oleaje tipo *Sea*. Hay que resaltar el efecto de canalización que hacen los edificios insulares de Tenerife y Gran Canaria para el viento, corrientes y oleaje.
- Las direcciones de proveniencia más importantes para el mar de fondo (tanto joven como maduro) son aquellas pertenecientes a los sectores 4 y 5 (direcciones comprendidas entre los 185° y los 254°), coincidiendo con los sectores con mayor *fetch* geográfico expuestos a las direcciones Sur.
- Los meses donde los *Swells* procedentes de áreas extratropicales del Hemisferio Sur (es decir, los *Swells* maduros del sector 4) registran el mayor porcentaje de tiempo mensual donde son el oleaje predominante coinciden con los meses en los que ese mismo porcentaje disminuye para el mar de viento.

Respecto a la metodología de estudio desarrollada, puede ser interesante su uso para el estudio del clima marítimo de archipiélagos oceánicos con características similares a Canarias. Su gran aporte es que puede ser utilizado por profesionales de la ingeniería que no dominen aspectos abstractos de la teoría del oleaje, como pueden ser los relacionados con los espectros de ondas. Con series temporales en forma de tabla de datos de altura, periodo y dirección de procedencia suficientemente fiables, que suelen estar disponibles, y la ayuda de una hoja de cálculo, se puede realizar este tipo de estudio. Por supuesto, hay que tener en cuenta las limitaciones que todo método simplificado tiene.

La presentación de este método, y los resultados del estudio del clima marítimo realizado fue posible gracias al artículo publicado en la revista taiwanesa *Journal of Marine Science and Technology* (Figura 22). A continuación, se reproduce íntegramente su resumen:

“Oceanic islands of volcanic origin tend to have peculiar characteristics, such as: exposure to many wave directions; grouping in archipelagos; steep coastal slopes; and small coastal shelves. All these features require certain considerations in wave climate studies. These types of studies, when wave spectra are not available and have to be performed with parametric data, can be unreliable without an adequate systematic treatment. In this work we propose a methodology consisting of pre-classification according to the peak period and

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



subsequent separation into different sectors according to the geographical fetch. The island of Tenerife is the case study, and in particular the waves reaching its southern coast. Data from the existing deep-water buoy have been used in this work. A range of fetch lengths between the few miles of distance to the neighbouring islands, and more than 5500 nautical miles that separate it from the Antarctic region have been considered. The dominant type of waves and the direction of provenance in each season of the year have been characterised. The proposed methodology has been designed to be applied to any oceanic archipelago with similar characteristics to those mentioned above.”(Megías y García-Román, 2023).

5.6. Aprovechamiento energético de los Swells procedentes del Hemisferio Sur (Manuscrito VA-02).

La última fase de la investigación ha sido dedicada a la evaluación energética de los Swells transhemisféricos para su posible aprovechamiento como fuente de energía renovable mediante el uso de dispositivos convertidores de energía undimotriz, conocidos por su acrónimo en inglés WEC.

La energía total de una ola lineal ya fue comentada en el capítulo 3 de este documento, siendo la expresión (22) la que la cuantifica.

Para poder realizar la valoración energética, para el caso en estudio, se utilizó la serie temporal de 15 años de datos de la boya REDEXT de Tenerife (años 2008 a 2022), además de los datos del punto SIMAR más cercano a ésta (Punto 4023009), para poder comparar los parámetros de salida de la boya (datos instrumentales) con los del modelo oceánico (Hindcasting).

Las diferencias encontradas entre ambos conjuntos de datos son notables. Esto era de esperar, ya que los Swells provenientes del Hemisferio Sur no son considerados por el modelo, al quedar su zona de generación fuera del dominio de éste. Este tema ha sido de vital importancia durante todo el desarrollo de la tesis doctoral. La propia entidad Puertos del Estado advierte de esta limitación del modelo SIMAR (Puertos del Estado, 2020).

A continuación, se enuncian las distintas etapas de este trabajo:

- Recolección de datos y pretratamiento.
- Filtrado según direcciones de procedencia.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



- Estudio comparativo de los parámetros oceánicos del sector en estudio con respecto al conjunto total de registros.
- Estudio comparativo de los datos instrumentales con respecto a los datos del modelo SIMAR.
- Estudio de la influencia de otros factores en el registro de datos.
- Cálculo de los periodos energéticos T_e a partir de los momentos espectrales, según la expresión (20).
- Caracterización energética de los *Swells* transhemisféricos y comparación con los datos obtenidos para el conjunto del estado del mar.

El resultado de esta investigación se puede resumir en dos puntos principales:

- A pesar de los periodos tan largos que tiene este oleaje, las bajas alturas de ola con las que alcanza el Archipiélago debido a los efectos de la dispersión, penalizan enormemente la cantidad de energía resultante en su evaluación energética.
- Siendo α el factor que relaciona el periodo energético y el de pico (T_e/T_p), usado para obtener T_e a partir de T_p cuando no se cuenta con los datos espectrales necesarios para obtenerlo directamente (Cornett, 2008), se ha obtenido su valor para la zona en estudio. Para ello, a partir de los 15 años de registros de la boya REDEXT, y haciendo uso de los momentos espectrales suministrados por Puertos del Estado, se ha obtenido un valor de $\alpha = 0,87$, que podrá ser utilizado para futuros trabajos.

Los resultados de este trabajo se han reunido en un manuscrito con título "*Contribution of transhemispheric Swells to the wave energy potential on the south coast of the Canary Islands*".

En estos momentos se está en espera de respuesta por parte de la revista a la que fue enviado.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

6. CONCLUSIONES

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



“This manual is the result of many years of work by many people. It is as up-to-date and as correct as it is possible to make it. However, as in any science, newer and more up-to-date results are continuously being obtained.”

Pierson, W.J., Neumann, G. y James, R.W. 1955

De la introducción del método espectral pionero de pronóstico de oleaje *“Practical methods for observing and forecasting ocean waves by means of wave spectra and statistics”*

6.1. Introducción

La inclusión de esta cita antes de comenzar a describir las conclusiones obtenidas tras el desarrollo de esta investigación tiene una clara motivación: apelar a ella a modo de descargo de responsabilidad, si hasta tan ilustres científicos acudieron a ella, parece estar justificado el préstamo aquí realizado. De todos es sabido que se va generando conocimiento a partir del camino ya avanzado anteriormente, y que la acción de una única ola a su llegada a la costa es rápidamente borrada por la que le sucede. En este documento se describe la aportación resultante de esta investigación.

Dejando a un lado dicho descargo que, por otro lado, podría ser aplicable a gran parte de la producción científica, se pasa a la descripción de las conclusiones resultantes de esta tesis doctoral, esto se hará mediante dos apartados, la discusión de los resultados y el resumen de las conclusiones.

El primero, dedicado a la discusión de los resultados, aborda las conclusiones obtenidas en el estudio del origen de los *Swells* procedentes del Hemisferio Sur, en su caracterización estadística, en cómo influye en su detección las condiciones climáticas en Canarias, su comportamiento al llegar a aguas someras, su caracterización energética, y cómo este oleaje no es tenido en cuenta en el modelo SIMAR.

Además, se discute sobre la forma en la que se ha realizado la separación del resto de oleaje, la aplicación de esta metodología a otros sistemas de oleaje, y su posible uso para la caracterización del clima marítimo en archipiélagos oceánicos de similares características.

El segundo apartado, dedicado al resumen de las conclusiones, aborda el nivel de consecución de los objetivos marcados, el nivel de cumplimiento de las hipótesis de partida, y a modo de corolario, las aportaciones resultantes de esta investigación y ciertas recomendaciones.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



6.2. Discusión de los resultados.

- Origen del oleaje: Se puede afirmar que gran parte del oleaje que llega al extremo Sur de Tenerife, procedente del rango de direcciones 184-208°, y con periodos de pico T_p iguales o mayores a 14 s, procede del Hemisferio Sur. Esta afirmación se hace teniendo en cuenta la forma de la cuenca oceánica Atlántica, la situación geográfica del Archipiélago Canario, y el estudio de la distribución de los valores de periodo, altura y dirección de procedencia de los registros de la boya REDEXT Tenerife Sur. También se ha teniendo en cuenta las zonas de mayor actividad ciclónica del Océano Atlántico Sur y Antártico, asumiendo que los *Swells* se mueven a nivel planetario siguiendo las rutas ortodrómicas.
- Generación del oleaje: Su origen habitual es debido a la acción de ciclones suficientemente profundos originados en latitudes extratropicales. La gran superficie de la cuenca oceánica no es impedimento para que se den los *fetchs* efectivos necesarios para que los vientos asociados a estas bajas puedan transmitir a la superficie del agua la energía necesaria para la generación de oleaje tipo *Sea* que termine evolucionando como mar de fondo. Si dicho oleaje es suficientemente energético, y su área de origen y dirección de traslación es compatible con la forma de la cuenca oceánica y la posición geográfica de las Islas Canarias, podrá alcanzar el Archipiélago (Figura 25).

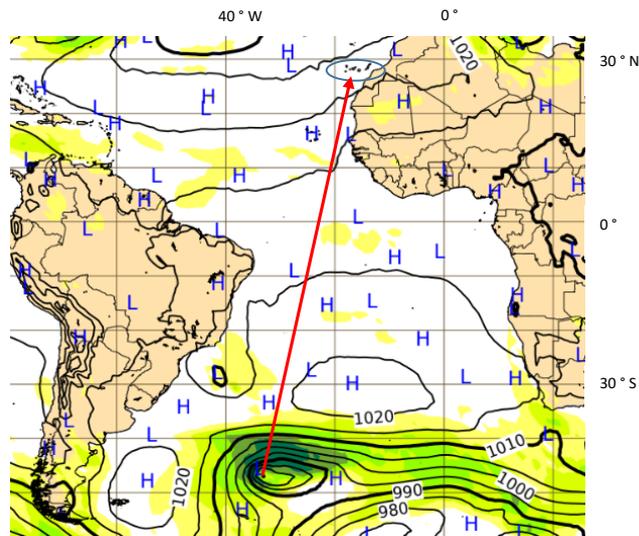


Figura 25: Ciclón extratropical localizado en el Océano Atlántico Sur potencial generador de *Swells* detectados en el Sur de Canarias (Extracto modificado de mapa previsión meteorológica para el 4 de marzo de 2020, fuente: ECMWF).

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



- Caracterización estadística del oleaje: La característica principal de este oleaje es el de contar con alturas moderadas pero largos periodos, que pueden llegar a superar los 25 segundos de T_p . Como dato ilustrativo, analizando los parámetros agregados del estado del mar procedentes de las lecturas de la boya REDEXT Tenerife Sur durante un periodo de 15 años (2008-2022), se puede observar como anualmente se superan, como media, en 34 ocasiones los 18 s, lo que supone una frecuencia de ocurrencia del 0,4 %. Esta frecuencia de registros con altos periodos puede explicarse por los ya comentados procesos de transferencia no lineal de energía. Respecto a la altura significativa H_s , su media para estos años es de 67 cm, el máximo registro es de 2,07 m, habiéndose superado los 2 m únicamente en 4 ocasiones. Estos bajos valores de la altura de ola pueden justificarse por los procesos de dispersión angular, y la pérdida de energía sufrida tras tan larga travesía, a pesar de que este tipo de oleaje tan poco perlado tiende a perder poca energía por unidad de longitud recorrida en aguas profundas. En la Figura 26 se muestra histograma de la H_s realizado a partir de la citada serie temporal donde se puede apreciar que la mayor parte de los registros se concentran entre los 30 y 90 cm.

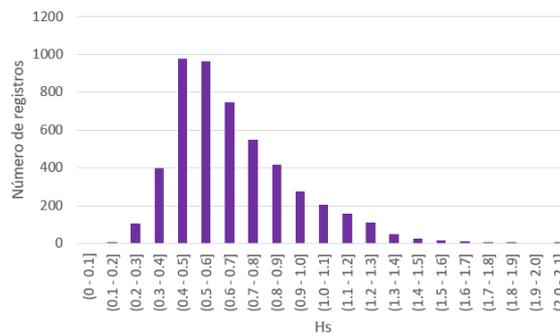


Figura 26: Histograma realizado con los valores de H_s de los registros de la boya REDEXT Tenerife Sur (años 2008-2022) clasificados como *Swells* provenientes del Hemisferio Sur.

- Frecuencia de detección: El 45 % de los registros procedentes de las direcciones de pico tomadas como válidas (comprendidas entre 184 y 208°) cuentan con valores de T_p de al menos 14 s, por lo que pueden contabilizarse como *Swells* procedentes del Hemisferio Sur. Estos registros constituyen el 4,2 % del total de las lecturas horarias de la boya.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



- Distribución anual de registros: Respecto al reparto de estas lecturas a lo largo del año, aparecen dos picos anuales, concretamente en las estaciones de primavera y verano, aunque los mayores valores de altura de oleaje se registran en verano, coincidiendo con el invierno austral.
- Influencia en su detección de otros factores a nivel local: Respecto a la influencia de otros factores en la detección de este mar de fondo, ha quedado suficientemente clara la influencia de la intensidad de los vientos alisios actuantes en el Archipiélago en la capacidad de detección de la boya, de tal forma que los picos de registros se dan en los meses en los que la intensidad del viento disminuye (primavera y otoño). Hay que tener en cuenta la importancia de estos vientos en la formación del oleaje local, que añadirá ruido al estado del mar, disminuyendo la posibilidad de detectar oleaje de poca altura, como son los *Swells* del Hemisferio Sur. Todos los factores climáticos (a una escala planetaria, sinóptica, mesoescalar o local) que influyan en el comportamiento de los vientos alisios en Canarias, influirá de alguna forma en la detección de los *Swells* en estudio. La reducción estimada del número de registros a causa del viento es del 49% respecto a los que se podrían detectar en ausencia de estos.

De igual forma influirá, en la detección de estos *Swells*, el estado de la mar en la zona donde se toman los registros. Cuanto mayor sea el número de familias de oleaje que conforman dicho estado del mar en un momento dado, y más energéticas sean estas familias de oleaje, mayor dificultad habrá para que en las lecturas de la boya sea posible detectar la presencia del oleaje protagonista de esta tesis doctoral.

- Fiabilidad de las salidas del modelo SIMAR para el estudio de oleajes transhemisféricos: Respecto a la validez de la red de boyas virtuales del modelo SIMAR de Puertos del Estado para el estudio del oleaje objeto de esta tesis, este no queda reflejado convenientemente, como la propia entidad estatal informa. Este hecho se ha podido corroborar mediante la comparación de las salidas de la boya virtual más cercana a la boya REDEXT Tenerife Sur con las de la propia boya. Es de suma importancia tenerlo en cuenta a la hora de realizar estudios de clima marítimo durante el desarrollo de proyectos de infraestructura en el litoral canario que quede expuesto a direcciones Sur y Suroeste. Para poder caracterizar los *Swells* procedentes del Hemisferio Sur será necesaria el uso de series temporales provenientes de modelos cuyo dominio abarque la zona de generación habitual de este oleaje, o de fuentes instrumentales expuestas a las direcciones de proveniencia.
- Tipo de rotura: Respecto a su comportamiento al interactuar con los fondos marinos canarios en aguas someras y con las infraestructuras existentes en la costa, se ha

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVG1Qi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



comprobado que gran parte de los valores del Número de Iribarren I_{r0} obtenidos para las pendientes habituales de la costa insular y el peralte usual de este oleaje quedan dentro del rango de valores marcados por Battjes para el tipo de rotura en *plunging*. En la Figura 27 se puede observar este tipo de rotura durante el evento del 25 de agosto de 2023, descrito en el apartado 4.6, en fotografía tomada en la playa de La Tejita (Termino municipal de Granadilla de Abona, isla de Tenerife). La combinación de las pendientes existentes en las costas insulares y de la pendiente de este tipo de oleaje favorecen los mecanismos de remonte y rebase en el litoral expuesto, pudiendo ser la altura de rotura H_b mucho mayor que la H_s . Hay que tener en cuenta que al no ser este mar de fondo el oleaje predominante, las infraestructuras portuarias y costeras del archipiélago suelen estar expuestas a él sin protección, siendo habitual que este oleaje pueda entrar por las bocanas de los puertos o llegar a pie de playa en zonas habilitadas para el baño, ya que el diseño de dichas infraestructuras se ha realizado, con buen criterio, con el objeto de conseguir el máximo abrigo de los temporales más energéticos (mares de fondo procedentes del sector norte, y oleaje de viento procedente del sector este).



Figura 27: Rotura en *plunging* en la playa de la Tejita el 25 de agosto de 2023. (Fotografía: Emilio Megías).

- Propuesta metodológica para el estudio del clima marítimo en islas oceánicas: Siguiendo un criterio similar al llevado a cabo en esta investigación para la separación de los registros pertenecientes a *Swells* transhemisféricos en las series temporales utilizadas, se ha desarrollado un método estadístico aproximado para la caracterización del clima

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



marítimo medio, de aplicación en archipiélagos oceánicos de origen y características geomorfológicas similares a Canarias, que estén expuestos a mares complejos con distribuciones multimodales. El método se basa en la clasificación de los registros usando valores umbrales de periodo de pico T_p y la sectorización de las direcciones de procedencia según su *fetch* geográfico. Como resultado se ha conseguido un método aproximado accesible para los profesionales que no estén habituados a trabajar con espectros de oleaje, pero que sí estén familiarizados con el uso de series temporales.

- Caracterización energética de los *Swells* transhemisféricos: Se ha evaluado el potencial energético de los *Swells* transhemisféricos para su posible aprovechamiento como fuente de energía renovable mediante el uso de dispositivos convertidores de energía undimotriz. A día de hoy, con el nivel tecnológico existente, y la coyuntura económica actual, se puede afirmar que el aprovechamiento energético de este oleaje aún no ha llegado al umbral de rentabilidad suficiente para que pueda ser considerado como una alternativa viable a corto plazo. Sí puede ser una gran oportunidad, para profundizar en su conocimiento, el uso combinado con otras fuentes de energía renovable que van a ser implantadas en la zona, como los parques eólicos *offshore*, con los que podría compartir tanto infraestructura, como medios técnicos y humanos. Como aportación en este campo, se ha calculado el factor α que relaciona el periodo energético y el de pico (T_e/T_p) para el área geográfica en la que se ubica la boya REDEXT Tenerife Sur, obteniéndose un valor de $\alpha = 0,87$.

6.3. Conclusiones.

Tras la conclusión de los trabajos de investigación realizados se llega a las siguientes conclusiones:

- Todos los objetivos marcados desde las primeras etapas de planificación de esta tesis doctoral, según fueron descritos en el apartado 2.3. han sido abordados, y los resultados obtenidos han sido descritos en los distintos manuscritos y publicaciones mostradas en el apartado 5.1.
- Se pueden dar por comprobadas las tres hipótesis de partida descritas en el apartado 2.2. añadiendo el siguiente comentario: La época de mayor llegada de este oleaje a Canarias no tiene por qué coincidir con la época donde mayor número de detecciones de estos eventos se da, ya que estas últimas están muy influidas por factores locales (viento y estado del mar en la zona de medida).

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



- Se puede afirmar que durante todas las estaciones del año llegan a las costas canarias *Swells* procedentes del Hemisferio Austral, cuya característica principal es su pequeño peralte. Las estaciones donde se producen mayores registros son durante la primavera y el otoño y la estación donde llegan estos *Swells* con mayor altura de ola es durante el verano boreal, coincidiendo con el invierno austral.
- Debido a las especiales características de estos *Swells* transhemisféricos, en combinación con las características de la plataforma costera de las Islas Canarias, se podrán ver favorecidas situaciones de rebases e inundación marina en las zonas expuestas. De igual forma, debido a la habitual orientación hacia el Sur de las bocanas de las dársenas existentes en el Archipiélago, se pueden producir episodios que aumenten la agitación interior, e incluso que puedan producir daños en las infraestructuras.
- Para poder seguir profundizando en el estudio de mares tan complejos como el existente al Sur de Canarias, es fundamental el desarrollo de espectros promediados que sean capaces de describir con suficiente fiabilidad dicha complejidad.
- En el caso de realizar estudios de caracterización de este tipo de mares multimodales mediante el uso de series temporales de altura, periodo y dirección de procedencia, es muy recomendable realizar la partición de los *Swells* en distintos grados de desarrollo, para evitar que las familias de oleaje más maduros, con grandes T_p pero bajas H_s queden enmascaradas. De igual forma, se cree conveniente la sectorización de las direcciones de procedencias agrupándolas según los *fetchs* geográficos.
- Sería de gran ayuda para estudios donde se aborde el clima marítimo de Canarias, ya sea con fines de desarrollo de nuevas infraestructuras, gestión de las existentes, o para trabajos de investigación, contar con una tercera boya de aguas profundas, al oeste de la isla de la Palma o El Hierro, para medir sin impedimento los *Swells* más energéticos, provenientes del cuarto cuadrante, y los más transformados, provenientes del tercer cuadrante, originados en el Hemisferio Sur.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

7. FUTURAS INVESTIGACIONES

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



“In view of the interest and possible applications of the study of waves it is doubtful whether the subject has received sufficient attention. Although much has been done, there are many questions of primary importance which cannot be satisfactorily answered.”

Deacon, G, 1946

De la introducción de su artículo “Ocean Waves and Swell”

7.1. Motivación.

La cita aquí elegida a modo de entradilla para el último capítulo de esta tesis es el inicio del artículo presentado por Sir George Deacon al año siguiente del fin de la 2ª Guerra Mundial (Deacon, 1946). Es sin lugar a dudas, una muestra de la dificultad de dar un trabajo por concluido en el campo de la ciencia y la ingeniería (quizás porque realmente nunca se terminan).

Las tesis doctorales no se concluyen, se entregan (Difabio de Anglat, 2011), y a eso se podría añadir que se entregan por necesidad. Es muy ilustrativo, a pesar de la distancia existente con el tema aquí tratado, el caso del Premio Príncipe de Asturias y Doctor Honoris Causa por las Universidades de Cádiz y Berklee Paco de Lucía: no le gustaban sus discos. En su búsqueda constante de la perfección no dudaba en decir que por él se habría pasado toda su vida grabando un único álbum (de Diego y Henández, 2002). Parece que este mal no solo aparece en el campo de la investigación, sino también en el de las artes, o de forma más general, en todo proceso creativo.

La necesidad de acotar el alcance de todo trabajo, obliga a poner un punto y final a esta tesis. Quedan por tanto temas por cubrir, que a continuación se esbozan, y que pueden servir para nuevos trabajos de investigación.

7.2. Régimen extremal. Capacidad de inundabilidad de la costa.

Como ya se ha comentado, debido a las características de los *Swells* en estudio y las particularidades de la plataforma costera canaria, se pueden producir eventos de inundación marina para el caso de oleaje especialmente energético, cuando el resto de componentes meteorológicos y astronómicos son favorables para ello. Existe un campo de trabajo abierto para la determinación de las zonas potencialmente sensible a este oleaje, y las posibles medidas correctoras.

Algunos pasos se han dado en este sentido desde la Dirección del Máster Interuniversitario en Ingeniería de Puertos y Costas, organizado por las dos Universidades Públicas Canarias, donde en mayo de 2023 fue defendido un Trabajo Fin de Máster que, al abordar la inundación marina

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



para una de las áreas turísticas más importantes del Sur de Tenerife, tuvo en cuenta este tipo de mar de fondo, teniendo en consideración para ello, información procedente de esta investigación (Cabrera Oliva, 2023).

7.3. Estudio de la transformación sufrida por los Swells transhemisféricos durante su travesía. Dispersión angular de los Swells de largo periodo.

A partir de los datos meteorológicos disponibles de la zona de origen de este mar de fondo, y con el auxilio de posibles boyas existentes en la cuenca oceánica del Atlántico Sur, además de los datos de la boya REDEXT Tenerife Sur, se puede estudiar la evolución de los parámetros que describen este oleaje (altura, periodo y dirección), a medida que aumenta la distancia recorrida.

Dentro de este apartado, es muy importante el estudio de la dispersión angular, de interés en el diseño de infraestructuras costeras y estructuras *offshore*. Para definir un espectro direccional de la energía se usa la dirección predominante de oleaje y una función de dispersión angular (Karimpour, 2018). El estudio de la distribución de la energía del oleaje en función de la dirección es un campo mucho menos desarrollado que el estudio de la distribución en función de la frecuencia (Goda, 2010). La determinación de la dispersión angular para oleaje producido por tormentas extratropicales no es un tema baladí, mucho más complejo en comparación con otras familias de oleaje, como el producido por tormentas tropicales (Forristall y Ewans, 1998). Son muy interesantes los trabajos realizados por Kevin Ewans con *Swells* llegados a la isla Norte de Nueva Zelanda desde el Oeste, con *fetchs* geográficos de casi 6.000 millas náuticas (similares al caso aquí estudiado), en los que no encontró una relación clara entre la dispersión angular y la distancia recorrida (Ewans, 2001). Es interesante el estudio para el caso de Canarias.

7.4. Reflexión de los Swells de largo periodo en las costas canarias.

Durante el desarrollo de la investigación recogida en el artículo publicado en la revista taiwanesa *Journal of Marine Science and Technology*, fue llamativo comprobar cómo en torno al 2% de los registros de la serie temporal de 12 años de la boya REDEXT Tenerife Sur provenían de la cercana costa de la isla que la abriga (direcciones de procedencia entre los 268° y los 64°, ver Figura 24).

Dichos registros contaban con valores de periodos de pico que abarcaban desde unos pocos segundos hasta otros que superan los 20 s. Esto puede dar pistas de su posible procedencia, desde mar de viento local producido en las inmediaciones de la boya responsable de las lecturas, hasta mar de fondo que posiblemente haya sido reflejado en la costa.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



El mecanismo de reflexión del oleaje en este tipo de costas con pendientes considerables y pequeña plataforma oceánica puede ser un campo interesante de trabajo.

7.5. Partición de *Swells* transhemisféricos.

Ya ha sido comentado la problemática existente para la separación de los distintos sistemas de oleaje que componen el estado del mar en un momento dado, y la dificultad del estudio independiente de cada uno de ellos en el capítulo dedicado al Estado del Arte (ver apartados 3.6 y 3.12).

El procedimiento seguido para la separación del sistema de oleaje objeto de esta tesis doctoral ha sido justificada en el capítulo dedicado a la Metodología (ver apartado 4.4), y dicho procedimiento ha sido extendido para todos los sistemas de oleaje que afectan a gran parte de la zona Sur del Archipiélago en el capítulo dedicado a los Resultados (ver apartado 5.5).

La metodología propuesta para la partición de un sistema de oleaje concreto, con un área de generación definida, aunque esta sea muy extensa (como es en el caso de los *Swells* transhemisféricos que llegan al Archipiélago) se cree suficiente robusta. Pero su aplicación para el estudio del conjunto del clima marítimo de un área en casos complejos como el de Canarias puede ser objeto de mejora. La elección de los periodos de pico umbrales expuestos en el apartado 5.5. pueden ser reestudiados para conseguir una metodología más sistemática y objetiva.

Por último, se cree necesario seguir avanzando en el uso de espectros promediados mediante el desarrollo de metodologías que faciliten su uso, no solo en investigación, sino para la práctica ingenieril, para mares tan complejos como el aquí tratado.

En San Cristóbal de La Laguna, a 15 de marzo de 2024

Emilio Megías

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVG1Qi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

8. REFERENCIAS

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



Acocella, V. (2021) *Volcano-Tectonic Processes*. Springer Cham. Disponible en:
<https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-030-65968-4>.

AEMET (sin fecha) *Escalas de viento y oleaje*. Available online. Disponible en:
https://www.aemet.es/documentos/es/conocerlas/maritima/escalas_de_viento_y_oleaje.pdf
(Accedido: 3 de enero de 2022).

Afonso, J.A. (2010) «Canarias y los Eventos extremos en el mar», en *Boletín de la Real Sociedad Económica de Amigos del País de Tenerife*. San Cristobal de La Laguna, España, pp. 63-111.

Afonso, J.A. (2015) «Infraestructuras marítimas en islas volcánicas», en L. Hernández-Gutiérrez y J.C. Santamarta (eds.) *Ingeniería Geológica en terrenos volcánicos. Métodos, Técnicas y Experiencias en las Islas Canarias*. Madrid. España: Ilustre Colegio Oficial de Geólogos, pp. 175-224.

Afonso, J.A. (2016) «El clima marítimo en la ingeniería de puertos y costas», en *III Máster Interuniversitario en Ingeniería de Puertos y Costas ULL-ULPGC. Curso 2016-2017*. La Laguna, Islas Canarias, España: Diapositivas de ponencia, p. 39.

Afonso, J.A. (2018) «Las zonas de clima marítimo del Atlántico, los climas marítimos de Canarias, Madeira y Africa Occidental.», en *IV Maestría Universitaria en Ingeniería de Puertos y Costas ULLPGC-ULL. Curso 2018-19*. Las Palmas de Gran Canaria, España: Diapositivas de ponencia, p. 173.

Ailliot, P., Maisondieu, C. y Monbet, V. (2013) «Dynamical partitioning of directional ocean wave spectra», *Probabilistic Engineering Mechanics*, 33, pp. 95-102. Disponible en:
<https://doi.org/10.1016/j.probenmech.2013.03.002>.

Almazán Garate, J.L. y Palomino Monzón, M. del C. (2000) *Descripción, medida y análisis del oleaje*. Disponible en: <http://www.almazan-ingenieros.es/data/archivo/Descripcion, medida y analisis del oleaje.pdf>.

Alves, J.H.G.M. (2006) «Numerical modeling of ocean swell contributions to the global wind-wave climate», *Ocean Modelling*, 11(1-2), pp. 98-122. Disponible en:
<https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2004.11.007>.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



Amores, A. y Marcos, M. (2020) «Ocean swells along the global coastlines and their climate projections for the twenty-first century», *Journal of Climate*, 33(1), pp. 185-199. Disponible en: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0216.1>.

Anguita, F. y Hernan, F. (1975) «A propagating fracture model versus a hot spot origin for the Canary islands», *Earth and Planetary Science Letters*, 27(1), pp. 11-19. Disponible en: [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0012-821X\(75\)90155-7](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0012-821X(75)90155-7).

Anguita, F. y Hernán, F. (2000) «The Canary Islands origin: A inifying model», *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 103(1-4), pp. 1-26. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(00\)00195-5](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(00)00195-5).

Aragónés Pomares, L. y López Úbeda, I. (2017) *Ingeniería Marítima I*. Alicante: Editorial Club Universitario.

Araña, V., Ortiz, R. (1991) «The Canary Islands: Tectonics, Magmatism and Geodynamic Framework. In: Kampunzu», en R.T. Kampunzu, A.B., Lubala (ed.) *Magmatism in Extensional Structural Settings*. Springer. Berlin. Disponible en: https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-642-73966-8_9.

Ayan, C. (sin fecha) *Spotter Data Partitioning for «sea» and «swell»*. Disponible en: <https://www.sofarocan.com/posts/spotter-data-partitioning-for-sea-and-swell>.

Azorin-Molina, C. *et al.* (2018) «Wind speed variability over the Canary Islands, 1948–2014: focusing on trend differences at the land–ocean interface and below–above the trade-wind inversion layer», *Climate Dynamics*, 50(11-12), pp. 4061-4081. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3861-0>.

Barber, N.F. y Ursell, F. (1948) «The generation and propagation of ocean waves and swell», *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 240(824), pp. 527-560.

Battjes, J. (1974) «Surf similarity», *Coastal Engineering Proceedings*, 14, pp. 466-480. Disponible en: <https://doi.org/doi:10.9753/icce.v14.26>.

Berenguer, J.M. y Berenger, I. (1993) *Glosario de términos de ingeniería de puertos y costas*. Madrid, España: CEDEX,MOPT.

Butt, T. (2018) *La ciencia del Surf*. Edición en español. Madrid, España: Ediciones Tutor SA.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



Cabrera Oliva, J.J. (2023) *Actuaciones de defensa en la costa de Las Américas-Los Cristianos (Tenerife) a resultas de la inundabilidad marina (ARPSIS y sus consecuencias jurídicas en el derecho a la propiedad privada*. Universidad de La Laguna y Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. Trabajo Final de Máster. Inédito.

Campos, R.M. et al. (2018) «Extreme wind-wave modeling and analysis in the south Atlantic ocean», *Ocean Modelling*, 124(February), pp. 75-93. Disponible en:
<https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2018.02.002>.

Canarias 7 (2014) «El temporal deja un trágico balance», 29 agosto.

Carballo, R. et al. (2020) *La energía del Oleaje. Una guía técnica para su aprovechamiento*. Madrid. España: Paraninfo.

Carracedo, J.C. (1979) *Paleomagnetismo e historia volcánica de Tenerife*. Santa Cruz de Tenerife: Aula de Cultura de Tenerife.

Carracedo, J.C. (1996) «Morphological and structural evolution of the western Canary Islands: hotspot-induced three-armed rifts or regional tectonic trends?», *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 72(1-2), pp. 151-162. Disponible en:
[https://doi.org/10.1016/0377-0273\(95\)00080-1](https://doi.org/10.1016/0377-0273(95)00080-1).

Carracedo, J.C. (2011) *Geología de Canarias I: Origen, evolución, edad y volcanismo*. Madrid, España: Rueda, S.L.

Chen, G. et al. (2002) «A global view of swell and wind sea climate in the ocean by satellite altimeter and scatterometer», *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 19(11), pp. 1849-1859. Disponible en:
[https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2002\)019<1849:AGVOSA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2002)019<1849:AGVOSA>2.0.CO;2).

Chen, Z. et al. (2015) «A practical method of extracting wind sea and swell from directional wave spectrum», *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 32(11), pp. 2147-2159. Disponible en: <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-15-0092.1>.

Cornett, A. (2008) «A global wave energy resource assessment», en *Proceedings of the eighteenth International Offshore and Polar Engineering Conference*. Vancouver, Canada.

Craik, A.D.D. (2004) «The origins of water wave theory», *Annual Review of Fluid Mechanics*, 36(1788), pp. 1-28. Disponible en: <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.36.050802.122118>.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



Crespo, N.M., Porfírio, R. y Jesus, E.M. De (2020) «Cyclones density and characteristics in different reanalyses dataset over South America», en *EGU General Assembly 2020*. Online, 4–8 May 2020. Disponible en: <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-11316>, 2020.

Cropper, T. (2013) «The weather and climate of Macaronesia: past, present and future», *Weather*, 68(11), pp. 300-307. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/wea.2155>.

Deacon, G. (1946) «Ocean Waves and Swell», *Occasional Paper of the Challenger Society*, 1. Disponible en: <https://journals.lib.unb.ca/index.php/ihr/article/view/26994>.

Dean, R.G. y Dalrymple, R.A. (2001) *Coastal Processes with Engineering Applications*. Cambridge University Press. Disponible en: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511754500>.

Derkani, M.H. *et al.* (2021) «Wind, waves, and surface currents in the Southern Ocean: Observations from the Antarctic Circumnavigation Expedition», *Earth System Science Data*, 13(3), pp. 1189-1209. Disponible en: <https://doi.org/10.5194/essd-13-1189-2021>.

Diario de Avisos (2011) «Las Galletas reivindica obras de protección contra la furia del mar», 31 agosto.

de Diego, J. y Henández, D. (2002) *Francisco Sánchez: Paco de Lucía*. España: ALEA TV, arte, RTVE.

Difabio de Anglat, H. (2011) «Las funciones del tutor de la tesis doctoral en educación», *Revista Mexicana de Investigación Educativa*, 16(50), pp. 935-959. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=14019000012>.

ECMWF (2016) «Part VII : ECMWF Wave Model IFS DOCUMENTATION – Cy40r1 Operational implementation 22 November 2013 PART VII : ECMWF WAVE MODEL Table of contents Numerical scheme», (November), pp. 1-79.

El Día (2011) «El mar vuelve a inundar San Andrés mientras el pueblo espera la escollera», 30 agosto.

El Día (2023) «Momentos de tensión en Radazul por el fuerte oleaje», 12 agosto.

Emery, W.J. (2021) *Why We Study the Physics of the Ocean: What Physical Oceanographers Really Do*. Newcastle upon Tyne: Cambridge Scholars Publishing.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



Europa Press (2014) «Canarias continuará en riesgo amarillo por fenómenos costeros», 27 agosto. Disponible en: <https://www.europapress.es/> (Accedido: 2 de septiembre de 2023).

Europa Press (2023) «Canarias activa la situación de alerta por fenómenos costeros en todo el archipiélago con olas de hasta 2 metros», 14 agosto. Disponible en: <https://www.europapress.es/> (Accedido: 2 de septiembre de 2023).

Ewans, K.C. (2001) «Directional spreading in ocean swell», *Proceedings of the International Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis*, 1(June), pp. 517-529. Disponible en: [https://doi.org/10.1061/40604\(273\)54](https://doi.org/10.1061/40604(273)54).

Fernandez-Palacios, J.M. *et al.* (2004) *Canarias. Ecología, Medio Ambiente y Desarrollo*. La Laguna, Islas Canarias, España: Centro de la Cultura Popular Canaria.

Fernández Villares, J. y Fernández González, S. (2019) «Jets costeros en Gran Canaria y Tenerife. Caracterización y mejora de la predicción», *Sexto Simposio Nacional de Predicción «Memorial Antonio Mestre»*, 1, pp. 223-240. Disponible en: <https://doi.org/10.31978/639-19-010-0.223>.

Ferrer, M. *et al.* (2013) «Güímar and la Orotava mega-landslides (Tenerife) and Tsunamis deposits in Canary Islands», *Landslide Science and Practice: Complex Environment*, 5(October), pp. 27-33. Disponible en: https://doi.org/10.1007/978-3-642-31427-8_3.

Folley, M. (2017) «Chapter 3 the Wave Energy Resource», en A. Pecher y J.P. Kofoed (eds.) *Handbook of Ocean Wave Energy*. Springer, Cham. Disponible en: https://doi.org/10.1007/978-3-319-39889-1_3.

Forristall, G.Z. y Ewans, K.C. (1998) «Worldwide measurements of directional wave spreading», *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 15(2), pp. 440-469. Disponible en: [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(1998\)015<0440:WMODWS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(1998)015<0440:WMODWS>2.0.CO;2).

García-Román, M. (2022a) «Breve descripción del clima marítimo y la costa canaria», en *Fundamentos de los aprovechamientos de la energía hidráulica y marina. Curso 2022-23*. La Laguna, Islas Canarias, España: Diapositivas asignatura. Máster Energías Renovables ULL, p. 26.

García-Román, M. (2022b) «Principales teorías del oleaje: Lineal, Stokes y Cnoidal», en *Fundamentos de los aprovechamientos de la energía hidráulica y marina. Curso 2022-23*. La Laguna, Islas Canarias, España: Diapositivas asignatura. Master Energías Renovables ULL.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVG1Qi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



García-Valdecasas Bernal, J.M. (2016) «Modelos oceánicos de propagación de oleaje», en *III Máster Interuniversitario en Ingeniería de Puertos y Costas ULL-ULPGC. Curso 2016-2017*. La Laguna, Islas Canarias, España: Diapositivas de ponencia, p. 109. Disponible en: https://www.puertos.es/es-es/BibliotecaV2/Modelos_oceanicos.pdf.

Goda, Y. (2003) «Revisiting Wilson's Formulas for Simplified Wind-Wave Prediction», *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 129(2), pp. 93-95. Disponible en: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-950x\(2003\)129:2\(93\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-950x(2003)129:2(93)).

Goda, Y. (2008) «Overview on the applications of random wave concept in coastal engineering», *Proceedings of the Japan Academy Series B: Physical and Biological Sciences*, 84(9), pp. 374-385. Disponible en: <https://doi.org/10.2183/pjab.84.374>.

Goda, Y. (2010) *Random Seas and Design of Maritime Structures, 3rd Edition, Advanced Series on Ocean Engineering*. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. Disponible en: <https://doi.org/doi:10.1142/7425>.

Goldsmith, M. (2018) *Waves. A very Short Introduction*. Oxford: Oxford University Press.

Gómez-Letona, M. et al. (2017) «Trends in primary production in the canary current upwelling system-A regional perspective comparing remote sensing models», *Frontiers in Marine Science*, 4(NOV), pp. 1-18. Disponible en: <https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00370>.

Gómez Lahoz, M. (2013) «Modelos de predicción de viento y oleaje», en *I Máster Interuniversitario en Ingeniería de Puertos y Costas ULL-ULPGC*. San Cristobal de La Laguna: Puertos del Estado. Disponible en: <http://www.puertos.es/en-us/Pages/BibliotecaV2.aspx>.

Gonçalves, M., Martinho, P. y Guedes Soares, C. (2020) «Wave energy assessment based on a 33-year hindcast for the Canary Islands», *Renewable Energy*, 152, pp. 259-269. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.01.011>.

Gramcianinov, C.B. et al. (2020) «Extreme waves generated by cyclonic winds in the western portion of the South Atlantic Ocean», *Ocean Engineering*, 213(January), p. 107745. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107745>.

Grassa Garrido, J.M. (2018) «La costa construida , el cambio de clima y el número de Iribarren. Built Coast , Climate Change and the Iribarren Parameter.», *Ingeniería Civil*, 191, pp. 57-73.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



Guerra-Medina, D. y Rodríguez, G. (2021) «Spatiotemporal variability of extreme wave storms in a beach tourism destination area», *Geosciences (Switzerland)*, 11(6), pp. 1-18. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/geosciences11060237>.

Hasselmann, K. *et al.* (1973) *Measurements of wind-wave growth and swell decay during the joint North Sea wave project (JONSWAP)*. Hamburg: Deutsches Hydrographisches Institut.

Hell, M.C., Ayet, A. y Chapron, B. (2021) «Swell Generation Under Extra-Tropical Storms», *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 126(9). Disponible en: <https://doi.org/10.1029/2021JC017637>.

Hwang, P.A., Ocampo-Torres, F.J. y García-Nava, H. (2012) «Wind sea and swell separation of 1D wave spectrum by a spectrum integration method», *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 29(1), pp. 116-128. Disponible en: <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-11-00075.1>.

Iribarren, R. (1954) *Obras Marítimas. Oleajes y Diques*. Madrid, España: Editorial Dossat.

Irvine, D. (2002) «The role of spectra in ocean waves physics», en Keith R. Bengtsson and Philip F. Rehbock (ed.) *Oceanographic History: The Pacific and Beyond*. University of Washington Press, p. 568.

de Jesus, E.M. *et al.* (2021) «Multi-model climate projections of the main cyclogenesis hot-spots and associated winds over the eastern coast of South America», *Climate Dynamics*, 56(1-2), pp. 537-557. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05490-1>.

Jiang, H., Babanin, A. V. y Chen, G. (2016) «Event-based validation of swell arrival time», *Journal of Physical Oceanography*, 46(12), pp. 3563-3569. Disponible en: <https://doi.org/10.1175/JPO-D-16-0208.1>.

Kamphuis, J.W. (2000) *Introduction to coastal engineering and management*. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.

Karimpour, A. (2018) *Ocean wave data analysis: : Introduction to Time Series Analysis, Signal Processing, and Wave Prediction*.

Komen, G. (1998) «10523-Physics-Ocean-Waves.Pdf», en *Seminar on Atmosphere-surface Interaction*. Reading: ECMWF.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



Komen, G.J., Hasselmann, S. y Hasselmann, K. (1984) «On the Existence of a Fully Developed Wind-Sea Spectrum», *Journal of Physical Oceanography*, 14(8), pp. 1271–1285. Disponible en: [https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1984\)014<1271:OTEOAF>2.0.CO;2](https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0485(1984)014<1271:OTEOAF>2.0.CO;2).

Kumar, A. y Hayatdavoodi, M. (2023) «Effect of currents on nonlinear waves in shallow water», *Coastal Engineering*, 181(September 2022), p. 104278. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2023.104278>.

De la Peña, J.M. (2007) *Guía técnica de estudios litorales (manual de costas)*. Madrid, España: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

La Provincia (2023) «Las olas “engullen” un pueblo de Fuerteventura», 13 agosto.

Le-Méhauté, B. (1976) *An Introduction to Hydrodynamics and Water Waves*. New York: Springer. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-85567-2>.

Lechuga, A. (1999) «Cincuenta años del parámetro de Iribarren (1949-1999)», *Ingeniería Civil*, (115), pp. 131-134. Disponible en: <https://ingenieriacivil.cedex.es/index.php/ingenieria-civil/article/view/1498>.

León Felipe (1958) *El Ciervo*. México: Editorial Grijalbo.

León, R. et al. (2017) «Multi-event oceanic island landslides: New onshore-offshore insights from El Hierro Island, Canary Archipelago», *Marine Geology*, 393, pp. 156-175. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2016.07.001>.

Lobeto, H. et al. (2022) «La complejidad del clima marítimo del oleaje en las costas del archipiélago de Canarias», en G.-M. M.E (ed.) *Libro de Resúmenes: XVI Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos*. Vigo: Editorial Universitat Politècnica de València.

Luis Mederos (2018) *Meteorología*. Bobadilla del Monte, Madrid, España: Ediciones Tutor SA.

Marrero-Betancort, N. et al. (2020) «Wind variability in the Canary Current during the last 70 years», *Ocean Science*, 16(4), pp. 951-963. Disponible en: <https://doi.org/10.5194/os-16-951-2020>.

Medina, M. (1974) *La mar y el tiempo*. 3ª. Barcelona: Editorial Juventud.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



Megías, E. (2021a) «Importancia de los swells del Hemisferio Sur en el clima marítimo de Canarias», en *V Máster Interuniversitario en Ingeniería de Puertos y Costas ULL-ULPGC. Curso 2021-22*. La Laguna, Islas Canarias, España: Diapositivas de ponencia, p. 17.

Megías, E. (2021b) «Observation of transhemispheric waves on the southern coast of the Canary Islands», *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Maritime Engineering*, 174(2), pp. 34-52. Disponible en: <https://doi.org/10.1680/jmaen.2020.30>.

Megías, E. y García-Román, M. (2021) «Estimación del comportamiento de swells transhemisféricos en la costa de islas oceánicas mediante el uso del Número de Iribarren: El caso de la costa sur de Tenerife», en M. Berezowsky, A. Mendoza, y M. Arganis-Juarez (eds.) *Compilación de trabajos completos: XXIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica México*. México: AMH - IAHR - Instituto de Ingeniería UNAM.

Megías, E. y García-Román, M. (2022) «Influence of Trade Winds on the Detection of Trans-Hemispheric Swells near the Canary Islands», *Atmosphere*, 13(4), p. 505. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/atmos13040505>.

Megías, E. y García-Román, M. (2023) «A methodology for statistical mean wave climate regime characterisation in oceanic islands: the case of the southern coast of Tenerife», *Journal of Marine Science and Technology*, 31(3). Disponible en: <https://doi.org/10.51400/2709-6998.2707>.

Melchers, R. y Howlett, C. (2021) «Reinforcement corrosion of the Phoenix caissons after 75 years of marine exposure», *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Maritime Engineering*, 174(1), pp. 19-30. Disponible en: <https://doi.org/10.1680/jmaen.2019.19>.

Miles, J. (1957) «On the generation of surface waves by shear flows», *Journal of Fluid Mechanics*, 3(2), pp. 185-204. Disponible en: <https://doi.org/10.1017/S0022112057000567>.

Mitsuyasu, H. (2002) «A historical note on the study of ocean surface waves», *Journal of Oceanography*, 58, pp. 109-120. Disponible en: <https://doi.org/10.1023/A:1015880802272>

MOPT (1991) *ROM 0.3-91 - Oleaje*. Dirección General de Puertos.

Morgan, W.J. (1971) «Convection plumes in the lower mantle», *Nature*, 230(5288), pp. 42-43. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/230042a0>.

Morente, E. (2003) *El pequeño reloj*. Virgin/Emi Music.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVG1Qi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



Munk, W. *et al.* (1963) «Directional recording of swell from distant storms», *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 255(1062), pp. 505-584. Disponible en: <https://doi.org/10.1098/rsta.2013.0039>.

Munk, W. y Day, D. (2002) «Harald U. Sverdrup and the war years», *Oceanography*, 15(4), pp. 7-29. Disponible en: <https://doi.org/10.5670/oceanog.2002.02>.

Munk, W.H. (1951) «Origin and Generation of Waves», en *Coastal Engineering Proceedings*. Long Beach, California, USA, october 1950. Disponible en: <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA062594.pdf>.

Munk, W.H. (2013) «The perfect storm», *Proceedings of the American Philosophical Society*, 157(4), pp. 369-392. Disponible en: <https://www.jstor.org/stable/24640223>.

Muñoz Pérez, J.J. (2011) *Ondas regulares y su aplicación a la ingeniería de costas. Servicio de Publicaciones, 2011. 1ª*. Cádiz: Servicio de Publicaciones. Universidad d Cádiz. Disponible en: <https://rodin.uca.es/xmlui/handle/10498/20998>.

NDBC (sin fecha) *Wave Steepness Algorithm*. Disponible en: <https://www.ndbc.noaa.gov/faq/algorithm.shtml> (Accedido: 1 de octubre de 2023).

NOAA, C.P.C. (2023) *North Atlantic Oscillation (NAO)*. Disponible en: <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/pna/norm.nao.monthly.b5001.curren.t.ascii.table> (Accedido: 16 de diciembre de 2023).

Peña Olivas, J.M. de la (2007) *Guía técnica de estudios litorales (manual de costas)*. Madrid. España: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

Peregrine, D.H. y Jonsson, I.G. (1983) *Interaction of Waves and Currents*. Fort Belvoir. Virginia, USA.

Pérez, J. *et al.* (2014) «ESTELA: A method for evaluating the source and travel time of the wave energy reaching a local area», *Ocean Dynamics*, 64(8), pp. 1181-1191. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10236-014-0740-7>.

Phillips, O. (1957) «On the generation of waves by turbulent wind», *Journal of Fluid Mechanics*, 2(5), pp. 417-445. Disponible en: <https://doi.org/10.1017/S0022112057000233>.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



Pierson, W.J. y Moskowitz, L. (1964) «Aproposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S.A. Kitaigorodskii», *Journal of Geophysical Research*, 69, pp. 5181-5190.

Pierson, W.J., Neumann, G. y James, R.W. (1955) *Practical Methods for Observing and Forecasting Ocean Waves by means of Wave Spectra and Statistics*. Hydrographic Office. Department of the Navy. USA.

Pinardi, N. et al. (2017) «The sea: The science of ocean prediction», *Journal of Marine Research*, 75(3), pp. 101-102. Disponible en: <https://doi.org/10.1357/002224017821836833>.

Pizzo, N., Deike, L. y Ayet, A. (2021) «How does the wind generate waves?», *Physics Today*. American Institute of Physics, pp. 38-43. Disponible en: <https://doi.org/10.1063/PT.3.4880>.

Portilla-Yandún, J. (2012) «Storm-source-locating algorithm based on the dispersive nature of ocean swells», *Avances*, 4(1), pp. C22-C36.

Portilla-Yandún, J. (2018) «The Global Signature of Ocean Wave Spectra», *Geophysical Research Letters*, 45(1), pp. 267-276. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/2017GL076431>.

Portilla-Yandún, J. (2022) «The World Ocean Wave Fields Discerned From ERA-Interim Spectra», *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 127(12), pp. 1-16. Disponible en: <https://doi.org/10.1029/2022JC018775>.

Portilla, J., Ocampo-Torres, F.J. y Monbaliu, J. (2009) «Spectral partitioning and identification of wind sea and swell», *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 26(1), pp. 107-122. Disponible en: <https://doi.org/10.1175/2008JTECHO609.1>.

Portillo, E. (2014) «Relation between the type of wave exposure and seagrass losses (*Cymodocea nodosa*) in the south of Gran Canaria (Canary Islands - Spain)», *Oceanological and Hydrobiological Studies*, 43(1), pp. 29-40. Disponible en: <https://doi.org/10.2478/s13545-014-0114-2>.

Portillo, E., Peñate de la Rosa, I. y Conde, J. (2007) *Mar De Fondo En Las Islas Canarias Procedente Del Atlántico Sur. La Importancia De Incorporar Las Condiciones De Contorno Del Modelo Wam Al Atlántico Sur*. Disponible en: <https://repositorio.aemet.es/handle/20.500.11765/13189>.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



Puertos del Estado (2015) *Conjunto de datos: REDEXT*. Ministerio de Fomento. Disponible en: https://bancodatos.puertos.es//BD/informes/INT_2.pdf (Accedido: 27 de diciembre de 2021).

Puertos del Estado (2020) *Conjunto de datos SIMAR*. Ministerio de Fomento. Disponible en: https://bancodatos.puertos.es/BD/informes/INT_8.pdf (Accedido: 27 de diciembre de 2021).

Reboita, M.S. *et al.* (2018) «Extratropical cyclones over the southwestern South Atlantic Ocean: HadGEM2-ES and RegCM4 projections», *International Journal of Climatology*, 38(6), pp. 2866-2879. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/joc.5468>.

Reeve, D., Chadwick, A. y Fleming, C. (2004) *Coastal Engineering: Processes, theory and design practice*, Spon Press. Oxon: Spon Press.

Roberts, P.J.W. *et al.* (2010) *Marine Wastewater Outfalls and Treatment Systems*. London: International Water Association Publishing.

Rodríguez-Martín, J., Cruz-Pérez, N. y Santamarta, J.C. (2022) «Maritime Climate in the Canary Islands and its Implications for the Construction of Coastal Infrastructures», *Civil Engineering Journal (Iran)*, 8(1), pp. 24-32. Disponible en: <https://doi.org/10.28991/CEJ-2022-08-01-02>.

Rodríguez Morilla, C. (2000) *Análisis de series temporales*. Madrid, España: Editorial La Muralla.

Santana Pérez, L.M. (2020) *¿ En Canarias soplan vientos alisios o vientos norte? Primera Parte*. Disponible en: <https://www.museosdetenerife.org/muna-museo-de-naturaleza-y-arqueologia/articulo-de-divulgacion-en-canarias-hay-alisios-o-vientos-del-norte-primera-parte-por-luis-manuel-santana-perez/> (Accedido: 6 de agosto de 2023).

Seisdedos, J., Ferrer, M. y González de Vallejo, L.I. (2012) «Geological and geomechanical models of the pre-landslide volcanic edifice of Güímar and La Orotava mega-landslides (Tenerife)», *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 239-240, pp. 92-110. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2012.06.013>.

Semedo, A. (2018) «Seasonal Variability of Wind Sea and Swell Waves Climate along the Canary Current: The Local Wind Effect», *Journal of Marine Science and Engineering*, 6(1), p. 28. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/jmse6010028>.

Sierra, J.P. y Lo Presti Blanco, A. (1998) «Estudio comparativo de criterios de rotura del oleaje regular», *Ingeniería del agua*, 5(1), pp. 23-34. Disponible en: <https://doi.org/10.4995/ia.1998.2741>.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



Silva, R. (2005) *Análisis y descripción estadística del oleaje*. Mexico DF: Universidad Nacional Autónoma de México.

Sleep, N.H. (1992) «Hotspot Volcanism and Mantle Plumes», *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 20(1), pp. 19-43. Disponible en:
<https://doi.org/10.1146/annurev.ea.20.050192.000315>.

Snodgrass, F.E. et al. (1966) «Propagation of ocean swell across the Pacific», *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 259(1103), pp. 431-497.

Snyder, R.L. et al. (1981) «Array measurements of atmospheric pressure fluctuations above surface gravity waves», *Journal of Fluid Mechanics*, 102, pp. 1-59. Disponible en:
<https://doi.org/https://doi.org/10.1017/S0022112081002528>.

Snyder, R.L. y Cox, C.S. (1966) «A field study of the wind generation of ocean waves», *J. Mar. Res.*, 24, pp. 141-178.

Soria, E. et al. (2007) *Análisis de datos experimentales*. Valencia: Editorial UPV.

Støle-Hentschel, S. et al. (2020) «Extreme Wave Statistics in Combined and Partitioned Windsea and Swell», *Water Waves*, 2(1), pp. 169-184. Disponible en:
<https://doi.org/10.1007/s42286-020-00026-w>.

Von Storch, H. y Hasselmann, K. (2010) *Seventy years of exploration in oceanography: A prolonged weekend discussion with walter munk*, *Seventy Years of Exploration in Oceanography: A Prolonged Weekend Discussion with Walter Munk*. Disponible en:
<https://doi.org/10.1007/978-3-642-12087-9>.

Suárez Palacios, J., Neves Lousada, S.A. y Garrido Velarde, J. (2020) «Análisis del clima marítimo en la Región Macaronésica. Consideraciones Generales a tener en cuenta en los archipiélagos: Casos prácticos en las Islas Canarias», en J. Mora Aliseda, J. Garrido Velarde, y J. Castro Serrano (eds.) *Espacios y sociedades en transformación*. 1ª edición. Cizur Menor: Thomson Reuters.

Sverdrup, H.U. y Munk, W.H. (1947) «Wind, Sea, and Swell. Theory of Relations For Forecasting», *US Hydrographic Office*, (601), p. 44.

Troll, V.R. y Carracedo, J.C. (2016) *The Geology of the Canary Islands*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier. Disponible en: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/C2015-0-04268-X>.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



USACE (1984) *Shore Protection Manual. VOL I*. 4th ed., 2. Vicksburg, Mississippi: Coastal Engineering Research Center. US Army Corps of Engineers.

Vega González, L. (2001) «La ola», *Gaceta de la Real Sociedad Matematica Española*, 4(3), pp. 528-566.

Wang, D.W. y Hwang, P.A. (2001) «An operational method for separating wind sea and swell from ocean wave spectra», *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 18(12), pp. 2052-2062. Disponible en: [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2001\)018<2052:AOMFSW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2001)018<2052:AOMFSW>2.0.CO;2).

Wang, X. *et al.* (2016) «Validation and parameter sensitivity tests for reconstructing swell field based on an ensemble kalman filter», *Sensors (Switzerland)*, 16(12). Disponible en: <https://doi.org/10.3390/s16122000>.

WMO (2018) *Guide to Wave Analysis and Forecasting*, WMO-No. 702. Editado por T. Bruns. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization. Disponible en: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10979.

WMO (2023) *El Niño/La Niña Update*. Disponible en: <https://filecloud.wmo.int/share/s/vpWKE5HbQEa6QuG3UW7CYw>.

Woolf, D.K., Challenor, P.G. y Cotton, P.D. (2002) «Variability and predictability of the North Atlantic wave climate», *Journal of Geophysical Research*, 107(C10). Disponible en: <https://doi.org/10.1029/2001jc001124>.

WW3DG, T.W.I.D.G. (2019) «User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 6.07», *NOAA / NWS / NCEP / MMAB Technical Note*, (333), p. 311.

Young, I.R. (1999) «Seasonal variability of the global ocean wind and wave climate», *International Journal of Climatology*, 19(9), pp. 931-950. Disponible en: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0088\(199907\)19:9<931::AID-JOC412>3.0.CO;2-O](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0088(199907)19:9<931::AID-JOC412>3.0.CO;2-O).

Young, I.R. *et al.* (2020) «The wave climate of the southern ocean», *Journal of Physical Oceanography*, 50(5), pp. 1417-1433. Disponible en: <https://doi.org/10.1175/JPO-D-20-0031.1>.

Yuan, X. (2004) «High-wind-speed evaluation in the Southern Ocean», *Journal of Geophysical Research D: Atmospheres*, 109(13), pp. 1-10. Disponible en: <https://doi.org/10.1029/2003JD004179>.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

9. ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



Lista de acrónimos utilizados en la tesis:

AEMET: Agencia Estatal de Meteorología

ASCE: American Society of Civil Engineers

CEDEX: Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas

ECMWF: European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

FFT: Fast Fourier Transform

IAHR: International Association for Hydro-Environment Engineering and Research

ICE: Institution of Civil Engineers (UK)

IH Cantabria: Instituto de Hidráulica Ambiental, Universidad de Cantabria

JCR: Journal Citation Reports

MOPT: Ministerio de Obras Públicas y Transportes

MOPU: Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo

NAO: North Atlantic Oscillation

NCEP: National Center for Environmental Prediction(USA)

NDBC: National Data Buoy Center (USA)

NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration (USA)

PIANC: Permanent International Association of Navigation Congresses

ROM: Recomendaciones de Obras Marítimas

RSEAPT: Real Sociedad Económica de Amigos del País de Tenerife

SIO: Scripps Institution of Oceanography

USACE: U.S. Army Corps of Engineers

WEC: Wave Energy Converter

WMO: World Meteorological Organization

WW3: Wavewatch III

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVG1Qi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

10. ANEXOS

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



Anexo 1: Datos de las revistas indexadas en el Journal Citation Reports (JCR).

A continuación, se muestran los datos principales de las revistas indexadas en el Journal Citation Reports, donde se han publicado los tres artículos que justifican la modalidad de tesis por compendio de publicaciones:

1. Megías, E. (2021) "Observation of transhemispheric waves on the southern coast of the Canary Islands", Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Maritime Engineering, 174(2), pp. 34–52.
<https://doi.org/10.1680/jmaen.2020.30>

Revista: Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Maritime Engineering.

ISSN: 1741-7597

EISSN: 1751-7737

Editorial: ICE Publishing

País: Reino Unido

Año publicación: 2021

Factor de Impacto 2021: 5,952

Cuartil: Q1

2. Megías, E. and García-Román, M. (2022) "Influence of Trade Winds on the Detection of Trans-Hemispheric Swells near the Canary Islands", Atmosphere, 13(4), p. 505.
<https://doi.org/10.3390/atmos13040505>

Revista: Atmosphere.

ISSN: n/d

EISSN: 2073-4433

Editorial: MDPI

País: Suiza

Año publicación: 2022

Factor de Impacto 2022: 2,9

Cuartil: Q3

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



3. Megías, E. and García-Román, M. (2023) "A Methodology for Statistical Mean Wave Climate Regime Characterisation in Oceanic Islands: The Case of the Southern Coast of Tenerife", Journal of Marine Science and Technology, 31(3), Article 12
<https://doi.org/10.51400/2709-6998.2707>

Revista: Journal of Marine Science and Technology - Taiwan

ISSN: 1023-2796

EISSN: 2709-6998

Editorial: National Taiwan Ocean University

País: Taiwán

Año publicación: 2023

Factor de Impacto 2022 (Aún no disponible dato 2023): 0,5

Cuartil: Q4

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



Anexo 2: Enlaces a los artículos publicados en revistas indexadas (JCR).

Se aportan los enlaces a las publicaciones descritas en el anexo 1:

1. Título: Observation of transhemispheric waves on the southern coast of the Canary Islands.
Autores: Emilio Megías
Año publicación: 2021
Revista: Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Maritime Engineering
Enlace a publicación:

<https://www.icevirtuallibrary.com/doi/10.1680/jmaen.2020.30>

2. Título: Influence of Trade Winds on the Detection of Trans-Hemispheric Swells near the Canary Islands.
Autores: Emilio Megías y Manuel García Román
Año publicación: 2022
Revista: Atmosphere
Enlace a publicación:

<https://doi.org/10.3390/atmos13040505>

3. Título: A Methodology for Statistical Mean Wave Climate Regime Characterisation in Oceanic Islands: The Case of the Southern Coast of Tenerife.
Autores: Emilio Megías y Manuel García Román
Año publicación: 2023
Revista: Journal of Marine Science and Technology - Taiwan
Enlace a publicación:

<https://jmstt.ntou.edu.tw/journal/vol31/iss3/12/>

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



Anexo 3: Certificados de aceptación para publicación.

A continuación, se adjuntan los certificados correspondientes a las publicaciones descritas en el anexo 1, y de la participación como ponente en el XXIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica, México 2021:

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



25th September 2023

Corresponding author certificate

To whom it may concern,

This letter certifies that Emilio José Megías Dorado was the corresponding author for the article "Observation of transhemispheric waves on the southern coast of the Canary Islands", published in *Maritime Engineering*. This article was first published online March 04, 2021 (<https://doi.org/10.1680/imaen.2020.30>).

Megías, E. (2021) 'Observation of transhemispheric waves on the southern coast of the Canary Islands', *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Maritime Engineering*, 174(2), pp. 34–52.

ICE Publishing would like to thank the author of the article for their work published in the journal and for their contribution to the Institution of Civil Engineers role as a Learned Society.

Kind regards,

Craig

Craig Schaper
Journals Editor
ICE Publishing, part of registered UK charity ICE
8 Storey's Gate
London SW1P 3AT, UK
www.icevirtuallibrary.com [ICE Publishing News](#)



Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVG1Qi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



海 洋 學 刊 **Journal of Marine Science and Technology**
國立臺灣海洋大學 National Taiwan Ocean University
202 基隆市中正區光華路2號 No.2, Pei-Ning Rd., Keelung202, Taiwan, R.O.C.
Tel : +886-2-2462-2192 ext.2911 E-mail : jmst@mail.ntou.edu.tw
Fax : +886-2-2463-3429 Website : http://jmst.ntou.edu.tw

Decision: Acceptance of JMARSCITECHTAIW-D-23-00055

September 8, 2023

Dear Dr. Emilio Megías,

The paper you submitted to *the Journal of Marine Science and Technology* :

Ref. No.	JMARSCITECHTAIW-D-23-00055
Title	A methodology for statistical mean wave climate regime characterisation in oceanic islands: the case of the southern coast of Tenerife
Author(s)	Emilio Megías, Manuel García-Román

has been accepted for publication by JMST.

Your continuous support to JMST will be highly appreciated.

Sincerely yours,

Chen-Hsiu Laih
Editor-in-Chief



Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVGlQi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07

Emilio José Megías Dorado



ASOCIACIÓN MEXICANA DE HIDRÁULICA

XXIX CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA MÉXICO 2021

IAHR
INTERNATIONAL ASSOCIATION OF
HYDROLOGICAL ENGINEERS

La Asociación Mexicana de Hidráulica (AMH) y la Asociación Internacional de Ingeniería e Investigación Hidro-Ambiental (IAHR)

Otorgan el presente Certificado a:

Emilio Megías

Por su participación como Ponente del Artículo ESTIMACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE SWELLS TRANSEMISFÉRICOS EN LA COSTA DE ISLAS OCEÁNICAS MEDIANTE EL USO DEL NÚMERO DE IRIBARREN: EL CASO DE LA COSTA SUR DE TENERIFE con ID 710 en el marco del XXIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica "México 2021" Celebrado del 15 al 19 de Noviembre, en formato VIRTUAL

PROF. PABLO DANIEL SPALLETTI
Presidente del Comité División Latinoamericana IAHR

M. EN I. DANIEL MARTINEZ BAZUA
Presidente Asociación Mexicana de Hidráulica

No del Certificado: CATLHM21247

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 6282318 Código de verificación: /rVG1Qi0

Firmado por: EMILIO JOSÉ MEGÍAS DORADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 18/03/2024 17:02:51
Manuel Damián García Román UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 19:24:14
Juan Pedro Díaz González UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	18/03/2024 21:57:07