



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Infraestructura costera que
pone en riesgo las zonas de
surf: Caso de Zicatela,
Oaxaca**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Civil

P R E S E N T A

Félix Fernando Carranco Trujillo

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Rodolfo Silva Casarín



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2026



**PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y
HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL
(Titulación con trabajo escrito)**



De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado INFRAESTRUCTURA COSTERA QUE PONE EN RIESGO LAS ZONAS DE SURF: CASO DE ZICATELA, OAXACA que presenté para obtener el título de INGENIERO CIVIL es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.

FELIX FERNANDO CARRANCO TRUJILLO
Número de cuenta: 318258153

Agradecimientos

A mis padres, Aída y Víctor, por brindarme todo el cariño, amor, apoyo y sabiduría todos los días, que me impulsan a ser una mejor persona. Gracias por nunca dejar de creer en mí.

A mis tíos, Irma y Gustavo, por sus palabras y apoyo de diversas maneras que me han sido de soporte para no desistir.

A mis amigos más cercanos, Mau y Martín, por quedarse y haber hecho de la licenciatura un lugar menos pesado.

A mi amigo Erick, por haberse convertido en una amistad invaluable. Gracias por estar en los momentos difíciles, por apoyarme siempre y por darme el impulso de superarme.

A Twenty One Pilots, Selena Gómez y Blackpink, su música me ha acompañado gran parte de mi vida, además de ser ese apoyo en los momentos más complicados.

Índice

A.	Introducción	11
a.	Importancia	12
b.	Justificación	14
B.	Objetivos	17
a.	Objetivo general	17
b.	Objetivos específicos	17
1.	Estado del arte	18
1.1.	Infraestructura costera y su función	18
1.1.1.	Propagación, refracción, difracción, reflexión, someramiento y rotura del oleaje	19
1.3.	Efectos de focalización del oleaje	24
1.4.	Modelos de oleaje. Ecuación de la pendiente suave	26
1.4.1.	Ecuación de la pendiente suave modificada	28
1.4.1.1.	Ecuaciones del medio poroso	30
1.4.1.2.	Factor de disipación de energía	33
2.	Descripción de la zona de estudio y zonas de comparación	35
2.1.	Zicatela, Oaxaca	35
2.1.1.	Ubicación geográfica	35
2.1.2.	Características físicas de la costa	35
2.1.3.	Zicatela, la capital del surf en México	37
2.1.4.	Infraestructura costera existente en Zicatela	38
2.2.	Hossegor, Francia	40
2.3.	Nazaré, Portugal	41
2.4.	Half Moon Bay, Estados Unidos	43
3.	Materiales y datos	45
3.1.	Modelos y bases de datos utilizadas	45
3.1.1.	ERA5	45
3.1.2.	GEBCO	46
3.1.3.	MWAPON	46
3.2.	Procesamiento de datos	47
4.	Metodología	48
4.1.	Caracterización del clima marítimo	48
4.1.1.	Parámetros estadísticos	48

4.1.2.	Temporadas climáticas	50
4.1.3.	Rosas de oleaje y periodo de ola	50
4.1.4.	Probabilidad conjunta altura de ola y periodo	51
4.2.	Análisis batimétrico	51
4.3.	Modelación hidrodinámica con MWAPON.....	52
5.	Resultados	53
5.1.	Zicatela, Oaxaca.....	53
5.1.1.	Parámetros estadísticos.....	53
5.1.2.	Clima marítimo	54
5.1.3.	Cañón submarino y batimetría	58
5.1.4.	Modelación hidrodinámica con MWAPON	62
5.1.4.1.	Transformaciones del oleaje inducidas por el cañón submarino	64
5.1.4.1.1.	Caso más energético.....	65
5.1.4.1.2.	Caso disminuyendo la reflexión	66
5.1.4.2.	Superficie libre, altura de ola y energía	67
5.1.4.3.	Corrientes inducidas por el oleaje	76
5.2.	Caracterización de sitios de surf similares	79
6.	Discusión	82
7.	Conclusiones y trabajo futuro	87
7.1.	Conclusiones	87
7.2.	Futuras líneas de investigación	89
8.	Referencias	91

Índice de figuras

Figura 1. Número de publicaciones por categoría relacionada con el surf. Tomado de: <i>Oceanographic considerations for the management and protection of surfing breaks</i> (2008).	13
Figura 2. Refracción del oleaje. Tomado de: <i>Coastal Engineering</i> (2018).	20
Figura 3. Difracción de las olas en (a) estructura única y (b) estructura doble. Tomado de: <i>Coastal Engineering</i> (2018).	20
Figura 4. Difracción y reflexión sobre una barrera. Tomado de: <i>Coastal Engineering</i> (2018).	21
Figura 5. Cambio en la forma de la ola en su propagación hacia aguas someras. Tomado de: <i>Wave behaviour outside the surf zone</i> (2020).	22
Figura 6. Tipos de rotura de ola. Tomado de: <i>Breaking waves</i> (2020).	23
Figura 7. Rayos incidentes de manera paralela en espejo parabólico. Tomado de: <i>Focusing properties of spherical and parabolic mirrors</i> (2009).	25
Figura 8. Corte longitudinal del Royal Albert Hall con el techo elipsoidal. Tomado de: <i>Sound concentration caused by curved surfaces</i> (2013).	25
Figura 9. Instalación de reflectores convexos suspendidos. Tomado de: <i>Sound concentration caused by curved surfaces</i> (2013).	26
Figura 10. (A) Límites para las diferentes teorías de oleaje. (B) Diferentes tipos de ola. Tomado de: <i>Wave behaviour outside the surf zone</i> (2020).	27
Figura 11. Esquema y sistema de referencia para la teoría lineal sobre un medio poroso. Tomado de: <i>Modelo unificado de propagación de oleaje e hidrodinámica no lineal</i> (2006).	31
Figura 12. Localización de la playa de Zicatela, Oaxaca.	35
Figura 13. Erosión y acreción en Bahía Principal. Tomado de: <i>Evaluación histórica de los procesos de erosión y acreción en las playas de Puerto Escondido, Oaxaca</i> (2025).	36
Figura 14. Erosión y acreción en Playa Zicatela. Tomado de: <i>Evaluación histórica de los procesos de erosión y acreción en las playas de Puerto Escondido, Oaxaca</i> (2025).	37
Figura 15. Escollera ubicada en Bahía Principal. Tomado de: <i>Zicatela: lo que está matando la ola más icónica de México</i> (2025).	39
Figura 16. Condición actual de la escollera. Tomado de: <i>Zicatela: lo que está matando la ola más icónica de México</i> (2025).	39
Figura 17. Batimetría de la Bahía de Biscay. Tomado de: <i>An Algorithm to Retrieve Chlorophyll, Dissolved Organic Carbon, and Suspended Minerals From Great Lakes Satellite Data</i> (2013).	40

Figura 18. Refracción y focalización del oleaje sobre Bahía de Biscay. Tomado de: <i>The Science (and Magic) Behind Hossegor's Waves</i> (2025).	41
Figura 19. Batimetría Cañón de Nazaré. Tomado de: <i>Garret McNamara surfs "highest ever" wave off Portugal</i> (2013).....	42
Figura 20. Refracción y focalización del oleaje sobre Nazaré. Tomado de: <i>Portuguese Hydrographic Institute</i> (2022).....	43
Figura 21. Refracción y focalización del oleaje sobre Maverick. Tomado de: <i>Mechanics of Maverick's</i> (2022).	44
Figura 22. Rosa de altura de ola y periodo de ola correspondientes a Zicatela. Registro completo.	54
Figura 23. Rosa de altura de ola y periodo de ola correspondientes a Zicatela. Temporada ciclónica.	55
Figura 24. Rosa de altura de ola y rosa de periodo de ola correspondientes a Zicatela. Temporada no ciclónica.....	56
Figura 25. Probabilidad conjunta de altura de ola y periodo correspondientes a Zicatela. Temporada ciclónica.....	57
Figura 26. Probabilidad conjunta de altura de ola y dirección de ola correspondientes a Zicatela. Temporada ciclónica.	57
Figura 27. Batimetría de Zicatela.	58
Figura 28. Perfil batimétrico del cañón submarino.	59
Figura 29. Mapa de profundidades obtenido con Python 3.	59
Figura 30. Interacción del oleaje con la batimetría de la zona. Tomado de: <i>Mechanics: Puerto Escondido, México</i> (2022).	60
Figura 31. Mapa de longitudes de onda obtenido con Python 3.	61
Figura 32. Mapa de altura de ola correspondiente a las características del caso 16.	63
Figura 33. Mapa de altura de ola correspondiente a las características del caso 16 de la Tabla 5.	65
Figura 34. Oleaje con modificación en la batimetría.	66
Figura 35. Superficie libre. Caso 16 con batimetría modificada.	67
Figura 36. Superficie libre con acercamiento a Bahía Principal.	68
Figura 37. Zonas A, B, C y D correspondientes al análisis espacial de la dirección de oleaje.	69
Figura 38. Dirección de propagación del oleaje en la zona A.	70
Figura 39. Dirección de propagación del oleaje en la zona B.	70
Figura 40. Dirección de propagación del oleaje en la zona C.	71
Figura 41. Dirección de propagación del oleaje en la zona D.	71
Figura 42. Zonas 1, 2 y 3 correspondientes al análisis de la distribución espacial de la altura de ola en Playa Zicatela.	72

<i>Figura 43. Variación longitudinal de altura de ola correspondiente a la línea batimétrica de 5 m.</i>	<i>73</i>
<i>Figura 44. Variación longitudinal del flujo de energía correspondiente a la línea batimétrica de 5 m. ...</i>	<i>73</i>
<i>Figura 45. Localización del eje del cañón y el Eje1 adicional.</i>	<i>74</i>
<i>Figura 46. Altura de ola correspondiente al eje del cañón submarino.</i>	<i>75</i>
<i>Figura 47. Flujo de energía correspondiente al eje del cañón submarino.</i>	<i>75</i>
<i>Figura 48. Altura de ola correspondiente al Eje 1.</i>	<i>75</i>
<i>Figura 49. Flujo de energía correspondiente al Eje 1.</i>	<i>76</i>
<i>Figura 50. Corrientes inducidas por el oleaje.</i>	<i>77</i>
<i>Figura 51. Corrientes en la zona cercana a Bahía Principal.</i>	<i>78</i>
<i>Figura 52. Zona de concentración de las corrientes submarinas.</i>	<i>79</i>
<i>Figura 53. Rosa de altura de ola y rosa de periodo de ola para Hossegor, Francia. Temporada de oleaje.</i> <i>.....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 54. Rosa de altura de ola y rosa de periodo de ola para Nazaré, Portugal. Temporada de oleaje.</i> <i>.....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 55. Rosa de altura de ola y rosa de periodo de ola para Half Moon Bay, EE. UU. Temporada de</i> <i>oleaje.</i>	<i>80</i>

Índice de tablas

<i>Tabla 1. Valores recomendados para coeficiente de arrastre C_D. Modificado de: Adecuación de un modelo hidrodinámico para grandes dominios (2025)</i>	<i>34</i>
<i>Tabla 2. Parámetros estadísticos de altura de ola.</i>	<i>53</i>
<i>Tabla 3. Parámetros estadísticos del periodo de ola.</i>	<i>53</i>
<i>Tabla 4. Lista de casos a ejecutar en MWAPON</i>	<i>62</i>
<i>Tabla 5. Lista de casos adicionales para simulación</i>	<i>64</i>

Resumen

Las zona costera de Playa Zicatela y Bahía Principal han presentado procesos naturales de acreción y erosión como resultado del transporte de sedimentos, corrientes litorales y factores climáticos, así como de actividades antrópicas, entre las que se encuentran la urbanización y la construcción de infraestructura costera.

Los efectos antrópicos han acelerado los procesos sedimentarios en la zona, con tasas de acreción de 2,08 m/año y 1,31 m/año, respectivamente. Este efecto desencadena problemas que afectan al comercio, el turismo y las actividades recreativas. Además, la evolución de la morfología costera ha modificado la manera en la que se propaga el oleaje.

El análisis realizado en la presente tesis muestra la interacción del oleaje con las condiciones morfológicas actuales de la playa de Zicatela. Mediante la modelación numérica, empleando el software MWAPON, fue posible realizar simulaciones para analizar la transformación del oleaje tomando como parámetros las condiciones batimétricas, temporadas ciclónicas y características del oleaje en la zona de rompientes gracias al estudio previo del clima marítimo de la región.

Los resultados de simulación muestran corrientes de retorno que se presentan en la zona de Bahía Principal, que inducen a la reflexión del oleaje en la costa norte, el cual interactúa con el oleaje que se propaga hacia Playa Zicatela. Como consecuencia de esta interacción, las olas que se concentran por efecto del cañón submarino son desplazadas fuera de él.

Por otra parte, el análisis de la batimetría modificada en Bahía Principal evidencia una alteración en las propiedades reflectivas de la playa, que afecta directamente la propagación y altura del oleaje incidente en Playa Zicatela, observándose una disminución en la extensión de las zonas de rompientes y en las alturas máximas de ola; en este último, se observó que aun con la disminución en la reflectividad de la

playa, el oleaje en la zona de rompientes presenta alturas de hasta 3 m. Considerando la altura inicial de modelación de 1 m, se puede notar que las propiedades de la playa posteriores a la modificación batimétrica, sumados a los efectos de la transformación del oleaje, son capaces de incrementar hasta tres veces la altura de ola.

A. Introducción

El surf es uno de los deportes acuáticos que mayor presencia tiene a nivel mundial. Turistas y deportistas viajan hacia las costas que presentan mayor calidad de oleaje y rompientes para la práctica del deporte. El oleaje adecuado se presenta bajo condiciones morfológicas que lo hacen posible, por lo que no en cualquier costa puede desarrollarse el deporte de manera profesional.

En México, son 30 sitios, distribuidos en 9 estados, reconocidos por presentar oleaje apto para la práctica de surf, lo que da lugar a un sitio de surf cada 367 kilómetros, considerando los 11.000 kilómetros de costa con los que cuenta el país. Estos sitios pueden ser encontrados en los estados de Oaxaca, Nayarit, Baja California, Baja California Sur y Sinaloa, por mencionar algunos. Sin embargo, no todos presentan las mejores condiciones ni la mejor calidad en rompientes (Hoffman, 2025).

A través de los años, la erosión y la acreción de las zonas costeras son efectos que se desarrollan mediante procesos como consecuencia del transporte de sedimentos, corrientes litorales y factores meteorológicos. Por otro lado, actividades antropogénicas, como la urbanización y la construcción de infraestructura costera, aceleran estos procesos, reduciendo la escala de cientos de años a 20, 10 o inclusive 5 años (Scarfe, 2008).

La playa de Zicatela ha sido reconocida a nivel mundial por presentar oleaje apto para el desarrollo del surf, su morfología le permite desarrollar olas grandes y desafiantes de hasta seis metros de altura, siendo atractivas para los surfistas. Sus particulares características la han llevado a ser nombrada el Pipeline Mexicano.

La calidad del oleaje y el reto que conlleva a los surfistas lograr dominar este tipo de olas son de las características que los deportistas buscan constantemente, ello ha sido encontrado en esta playa. Por ello, la protección en la calidad del oleaje toma

relevancia cuando se amenaza con la modificación de sus características atractivas, además del riesgo para el desarrollo económico.

Los sitios de buenas rompientes son raros, pero no los millones de surfistas que existen, lo que conlleva una alta demanda en muchos de estos sitios (Henríquez, 2004).

a. Importancia

La práctica de surf ha estado presentando crecimiento en popularidad alrededor del mundo. Con su introducción en el año 1915 en Australia, y su posterior crecimiento después de la segunda guerra mundial, la industria que desarrolla el equipamiento necesario para la práctica del deporte hizo posible que una mayor cantidad de personas tuviera accesibilidad a su compra y uso. Desde entonces, la extensión de la práctica ha llegado hasta lugares poco comunes, contando con cerca de 2,5 millones de surfistas tan solo en los Estados Unidos (Lazarow, 2007).

La popularidad del surf creó un mercado con bastante rentabilidad y una creciente industria en equipo, vestimenta y mercancía, además de ser partícipe de estrategias en temas de turismo en diversas zonas costeras.

Dado lo anterior, la conservación, preservación y mantenimiento de zonas costeras con características atractivas para el deporte se vuelve más relevante. En contraste, las investigaciones en materia de protección costera, y especialmente relacionadas con la cultura del surf, no cuentan con un amplio desarrollo en la literatura científica, lo que limita la comprensión actividades antrópicas en las condiciones de oleaje y dinámica litoral.

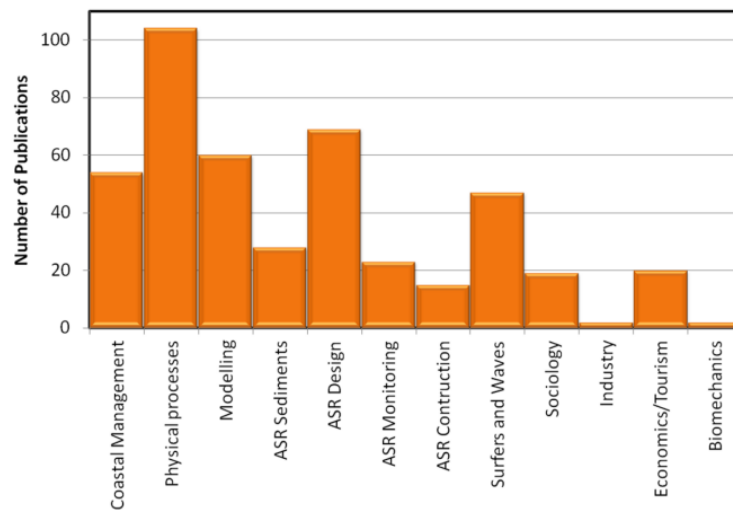


Figura 1. Número de publicaciones por categoría relacionada con el surf. Tomado de: Oceanographic considerations for the management and protection of surfing breaks (2008).

La Figura 1 muestra las publicaciones de textos científicos relacionados con el surf dentro del periodo 1971 a 2007. Dado que no se consideró necesaria una actualización cuantitativa del número de publicaciones por categoría, solo se pretende evidenciar la tendencia histórica de las publicaciones. Se muestra entonces, una predominancia en investigaciones en procesos físicos, que incluyen condiciones sedimentarias y oceanográficas alrededor de los sitios de surf, hidrografía y la ciencia del surf; y en menor cantidad, un enfoque hacia la protección costera, donde se incluye teoría, protección de rompientes, espacios costeros recreativos, impactos ambientales, conflictos entre el surf y usos costeros, y ejemplos de los impactos a los sitios de surf (Scarfe, 2008).

De acuerdo con Arroyo et al. (2023), cerca del 63% de las zonas de rompientes no se encuentran dentro de áreas protegidas, indicando que este porcentaje de oleaje y los sistemas biodiversos que se localizan en los alrededores sean susceptibles a las afectaciones producto de actividades humanas.

Las zonas de rompientes son razonablemente resilientes a fuerzas naturales costeras, como la marea y el oleaje. Uno de los cambios físicos que pueden comprometer a las

rompientes y su calidad es la modificación de la batimetría; sin embargo, estos cambios pueden presentarse naturalmente dentro de cientos o miles de años. No ocurre así con la alteración artificial de la costa, donde se incluyen la construcción de rompeolas, alteración a las dunas costeras, dragado de canales, protección rígida de las costas, alteración de las rutas de transporte de sedimentos, y la modificación general de las costas y cuencas hidrográficas, que aceleran los procesos del transporte de sedimentos (Scarfe, 2008).

Desde la declaración de Bahía de Todos Santos, en Baja California, como reserva mundial del surf en 2014, ha incrementado el interés en la protección de las zonas costeras en los sitios de surf (Arroyo et al. 2023). Con la reciente inclusión de Puerto Escondido a la lista de reservas mundiales de surf, por parte de *Save The Waves Coalition*, se aumentaron los esfuerzos para la protección de zonas costeras que cuentan con un enorme impacto para la práctica del deporte.

b. Justificación

La protección costera constituye un área de investigación que se encuentra en constante desarrollo debido a la creciente necesidad de conservar y gestionar adecuadamente las zonas litorales. El mantenimiento de estas zonas no solo beneficia al sector ambiental, sino también a las actividades turísticas y económicas que se presentan en regiones estratégicas y emblemáticas a nivel local, nacional e incluso internacional, así como lo es Puerto Escondido.

El reconocimiento del lugar de manera internacional coloca a las actividades de mantenimiento y conservación en un sitio con altas expectativas, puesto que representa una fuente de comercio y de ingresos económicos para los residentes locales; mientras que para los turistas nacionales e internacionales representa una fuente de esparcimiento y entretenimiento.

La zona de interés ha presentado cambios que han afectado de manera notoria el aspecto físico y la dinámica del oleaje, lo que ha provocado afectaciones para diferentes sectores. El estudio de esta zona costera de Oaxaca busca proporcionar un análisis sustentado en la literatura disponible y en simulaciones numéricas, con el propósito de elaborar representaciones visuales como gráficos y mapas para comprender con mayor claridad el efecto negativo que se ha estado presentando en el sitio.

El presente trabajo tiene como objetivo analizar el comportamiento del oleaje bajo las características morfológicas actuales de la zona de estudio. Asimismo, se explicarán los fenómenos de la transformación del oleaje y su influencia en la dinámica costera local haciendo uso de simulaciones numéricas detalladas y software de análisis para el mismo.

A pesar de que los sitios con características como las que presenta Zicatela se encuentran alrededor del mundo, son limitados los estudios que analizan de manera detallada la dinámica costera producto de la interacción entre la batimetría, oleaje e infraestructura artificial, y los procesos de transformación del oleaje sobre la calidad de las condiciones para la práctica del surf.

En el caso específico de la playa de Zicatela, no se encontró literatura con un enfoque similar al que se pretende en este trabajo. La información técnica que será presentada será de utilidad para incrementar la calidad en los criterios de toma de decisiones en temas relacionados a la protección y gestión costera para la conservación del valor ambiental, turístico, recreativo y cultural de la zona.

En el artículo realizado por Valencia (2023), se presentan los resultados de una serie de entrevistas realizada a habitantes de Puerto Escondido. Dentro de las entrevistas, se menciona que tanto la población local como los turistas nacionales e internacionales manifestaron la importancia de mantener en óptimas condiciones la

playa de Zicatela, reconociendo que el prestigio internacional del sitio ha generado beneficiado económicos, turísticos y sociales. De igual manera, expresaron la importancia de preservar las condiciones naturales que han permitido el desarrollo de esta actividad.

A pesar de ello, la percepciones mostradas no cuentan con respaldo técnico ni científico que expliquen los procesos costeros involucrados. La comunidad reconoce el valor de Zicatela, pero se requiere de evidencia científica para comprender y sustentar su conservación.

B. Objetivos

a. Objetivo general

Analizar las condiciones de la transformación del oleaje en las costas de Bahía Principal y Playa Zicatela, con el fin de evaluar las condiciones morfológicas de la zona que favorecen la práctica de surf, así como sustentar, con base en la literatura científica, la importancia de la zona para su conservación y aprovechamiento recreativo.

b. Objetivos específicos

- Comparar el efecto de focalización con sitios internacionales de características similares.
- Analizar el efecto de focalización producto del cañón submarino cercano a la costa haciendo uso de modelación hidrodinámica.
- Analizar el comportamiento del oleaje y sus características frente a los cambios batimétricos en aguas profundas, intermedias y someras.
- Evaluar la transformación del oleaje frente a las condiciones batimétricas reflejantes y frente a condiciones donde la capacidad reflectiva de la playa es disminuida.

1. Estado del arte

1.1. Infraestructura costera y su función

De acuerdo con Mustapa et al. (2017), un rompeolas es una estructura construida por el hombre con el propósito de resistir la energía del oleaje. La construcción de la estructura está enfocada en la protección de un área determinada como puertos, embarcaderos o asentamientos humanos. Asimismo, el diseño de la estructura debe ser capaz de disipar la energía del oleaje mediante la combinación de diversos mecanismos hidrodinámicos, tales como el rompimiento del oleaje, el flujo a través de medios porosos, la reflexión, la transmisión y el rebase del oleaje.

Se pueden encontrar dos tipos de configuración de rompeolas: fijas y flotantes. Los rompeolas del tipo fijo, como lo son las escolleras, se caracterizan por mantener una posición fija con respecto al terreno y su forma con respecto al tiempo (Huidobro, 2009).

Una escollera está conformada por escollos, bloques de piedra o elementos de concreto, colocados en diferentes espesores y capas con base en criterios ingenieriles aprobados. Estos elementos deben cumplir con la función de disipar la energía y proteger las costas o puertos del transporte de sedimentos en ambas direcciones de la costa provocado por el oleaje, que se conoce como deriva litoral (Horton, 1948; Huidobro, 2009).

La deriva litoral tiende a poseer una dirección dominante del transporte neto de sedimentos, conocido como *downcoast*. Es importante destacar que, a largo plazo, no es posible contrarrestar la erosión y la acreción en los lugares cercanos donde se coloque la estructura, sino que los redistribuye en los sectores adyacentes. La existencia de la erosión en un punto se verá compensada con aportación de sedimentos en otra (Jellet y Holmes, 1999).

Hay que mencionar, además, que la construcción de este tipo de estructuras acelera los cambios morfológicos en la zona litoral y playas adyacentes, intensificando tanto en la erosión como la acreción de sedimentos (Horton, 1948).

1.1.1. Propagación, refracción, difracción, reflexión, someramiento y rotura del oleaje

El oleaje es producto de la propagación de energía mecánica a lo largo de la superficie del agua. Esta energía tiene diversos orígenes como el viento, perturbaciones meteorológicas, sismos o atracción de cuerpos celestes (Sundar et al., 2018).

El comportamiento del oleaje durante su propagación hacia la costa conlleva una serie de transformaciones que modifican su dirección, altura y distribución de energía. Dentro de los principales procesos asociados a la transformación del oleaje se encuentran la refracción, difracción, reflexión, someramiento y rotura. Estos procesos se presentan como consecuencia de la variación en la batimetría del fondo marino y de la presencia de estructuras naturales o artificiales que interactúan con los trenes de ola (Sundar et al., 2018).

La refracción del oleaje puede describirse como un fenómeno generado por la batimetría de la zona. Cuando la profundidad del agua es mayor que la mitad de la longitud de onda, el tren de olas viaja sin verse afectado por la fricción del fondo marino. Conforme un tren de olas avanza hacia la costa y la longitud de onda disminuye, las olas comienzan a friccionar con el fondo marino, provocando que las olas que se encuentran en aguas más profundas avancen con mayor rapidez que las olas encontradas en aguas someras. Derivado de la diferencia de velocidades, las olas comienzan a cambiar de dirección, ajustándose a las líneas batimétricas (Sundar et al., 2018).

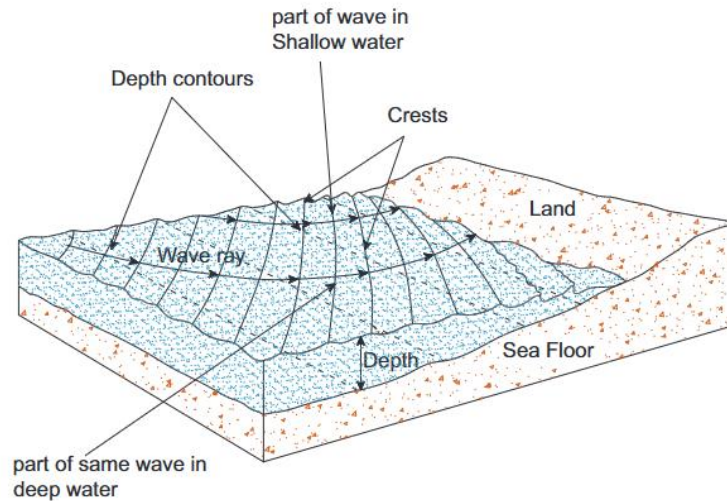


Figura 2. Refracción del oleaje. Tomado de: Coastal Engineering (2018).

La difracción se presenta debido a la remoción de una porción del tren de ola, en consecuencia, existe una alteración en la propagación de la energía a lo largo de la cresta. Cuando una o más estructuras naturales o artificiales se interponen en la dirección de propagación del oleaje, las olas pivotean alrededor del borde del obstáculo, lo que distorsiona los frentes de ola. Asimismo, la generación de gradientes de energía, provocado por la remoción de una porción del tren de ola, induce una transferencia lateral de energía que permite al oleaje penetrar en la zona protegida (Huidobro, 2009; Sundar et al., 2018).

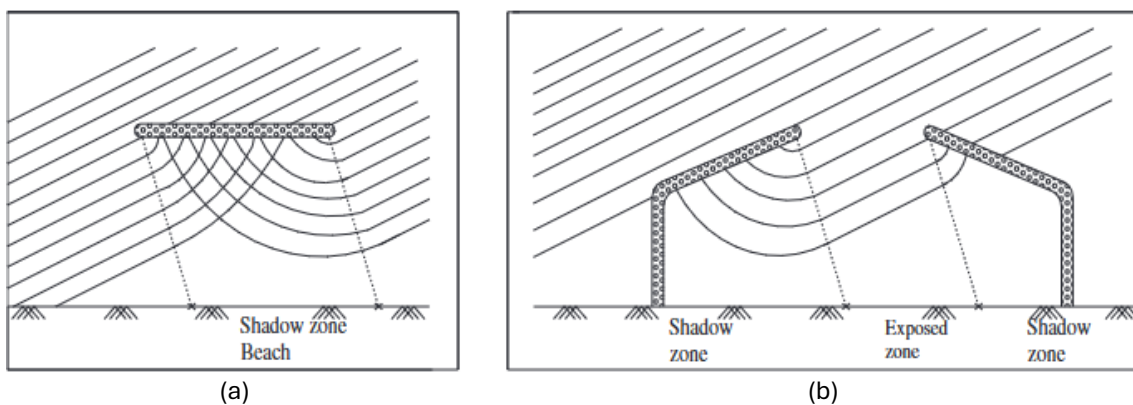


Figura 3. Difracción de las olas en (a) estructura única y (b) estructura doble. Tomado de: Coastal Engineering (2018).

En cuanto a la reflexión del oleaje, este ocurre cuando la energía no disipada de un tren de olas impacta con una estructura rígida, generando una ola reflejada en dirección opuesta. El ángulo de impacto será el mismo ángulo con el que se genere la onda incidente, que puede ir desde los 0 grados, cuando impacta directamente la estructura, hasta los 90 grados. La intensidad de la onda reflejada dependerá de la capacidad de la estructura para disipar energía (Sundar et al., 2018).

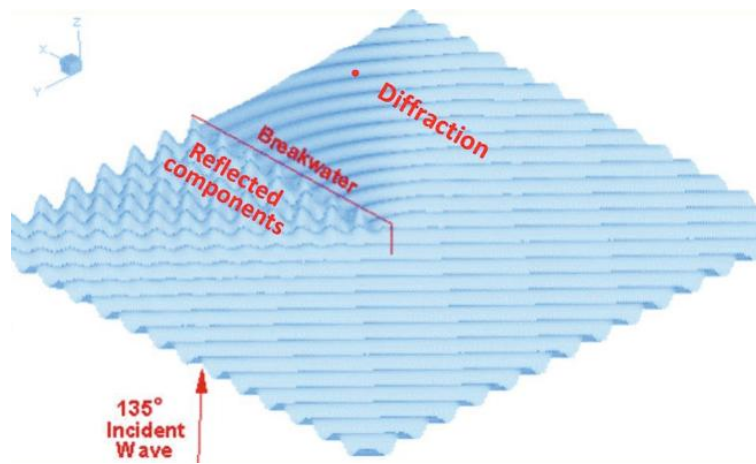


Figura 4. Difracción y reflexión sobre una barrera. Tomado de: Coastal Engineering (2018).

De acuerdo con Bryan et al. (2020), mientras el oleaje se encuentra sobre aguas profundas, la ola se aproxima a una forma sinusoidal sin verse afectada por el fondo marino. Conforme se va aproximando a zonas poco profundas, el tren de olas comienza a presentar crestas más pronunciadas y valles relativamente planos. Este proceso continúa hasta que la ola se vuelve inestable y finalmente rompe, a este efecto se le conoce como someramiento. Esta parte de la transformación puede ocurrir en cualquier ola que esté controlada por el fondo marino, afectando su velocidad y longitud de onda, sin que se vea afectado su periodo.

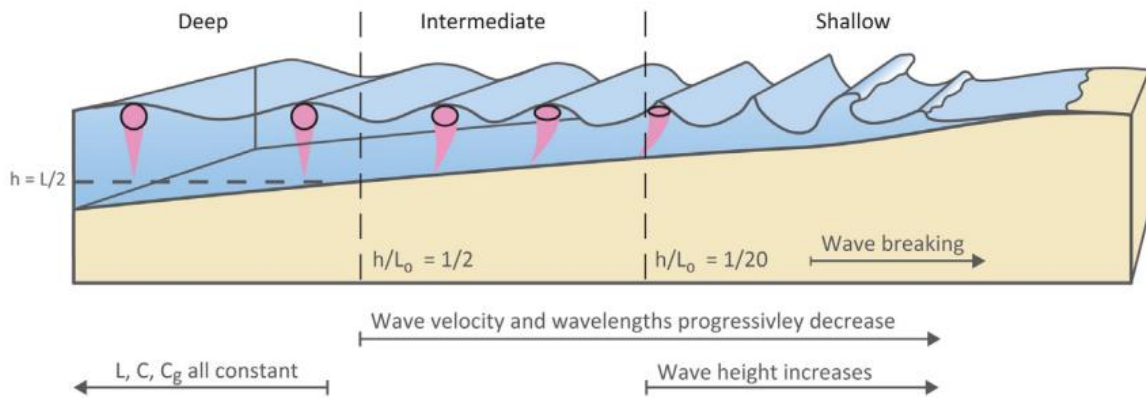


Figura 5. Cambio en la forma de la ola en su propagación hacia aguas someras. Tomado de: *Wave behaviour outside the surf zone* (2020).

Finalmente, como parte de la transformación del oleaje, ocurre la rotura. Dentro de esta parte de la transformación, la inclinación de la línea de costa juega un papel importante, pues determina de qué manera romperá el oleaje.

Existen cuatro tipos principales de rompiente: descrestamiento (spilling), voluta (plunging), ascendente (surging) y colapsante (collapsing). De acuerdo con Henríquez (2004), los surfistas han mostrado un mayor interés por aquellas con rompiente de voluta y, en menor medida, en olas con rompiente de descrestamiento. Por otro lado, olas con rompiente ascendentes y colapsantes han sido consideradas como no aptas para la práctica de surf.

En la rompiente tipo descrestamiento, estas se caracterizan por tener crestas que incrementan gradualmente su curvatura, volviéndose progresivamente más tendidas y menos empinadas hasta que alcanzan la inestabilidad y finalmente rompen (Gaughan, 1973).

En las rompientes de tipo voluta, la cresta de la ola viaja a velocidades más altas que el resto de la ola, provocando que se curve y encierre una masa de aire dentro de la ola. Este tipo de rompiente es el más deseado por los surfistas, puesto que la

inclinación de la cara interior proporciona la velocidad necesaria para poder desarrollar acrobacias (Gaughan, 1973).

En cuanto a las rompientes ascendentes, la superficie del agua se mantiene, en su mayoría, plana, exceptuando los momentos en los que se producen ondulaciones durante el proceso de escurrimiento, reflejándose una gran proporción de la energía del oleaje (Gaughan, 1973).

Por último, las rompientes colapsantes se caracterizan porque la porción inferior de la ola colapsa hacia adelante y posteriormente se comporta como una rompiente tipo voluta incompleta. En esta rotura se genera una parte mínima de masa de aire, burbujas y espuma, pero sin que exista salpicadura (Gaughan, 1973).

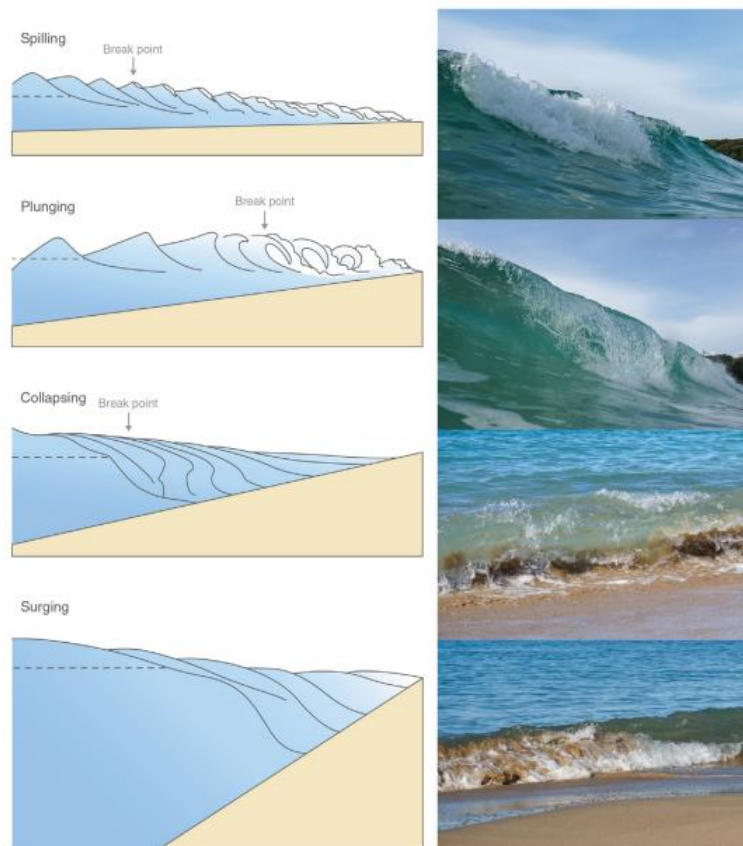


Figura 6. Tipos de rotura de ola. Tomado de: *Breaking waves* (2020).

Otro factor relevante es la dirección del viento con respecto a la línea de costa. La forma de rompimiento del oleaje también está determinada por la presencia de vientos de tierra (offshore) y vientos de mar (onshore). Los vientos de tierra retrasan a la ola de romper, causando que la ola rompa en aguas más someras, así como incrementa la intensidad con la que rompe; caso contrario ocurre con los vientos de mar, donde provocan que la ola rompa de manera anticipada, aunque también induce al rompimiento en olas colapsantes (Galloway et al., 1989).

1.3. Efectos de focalización del oleaje

La focalización de ondas es un fenómeno físico que describe la concentración de energía en regiones específicas del espacio como procesos de refracción, reflexión o geometría del medio. Este comportamiento se manifiesta en otro tipo de ondas como las electromagnéticas y las acústicas, donde las propiedades del medio o la geometría del entorno inducen la convergencia de las ondas.

Para ejemplificar el efecto en las ondas electromagnéticas, se tomará como recurso el espejo parabólico. Un espejo parabólico posee la propiedad de reflejar todos los rayos de luz paralelos al eje de simetría que entran al espejo hacia un único punto llamado foco. Este efecto es reversible, la energía que nace del foco será reflejada de manera paralela al eje de simetría (Haber, 2009).

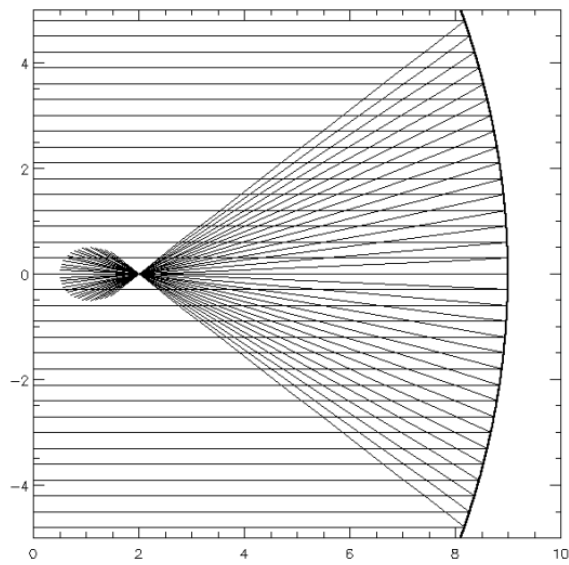


Figura 7. Rayos incidentes de manera paralela en espejo parabólico. Tomado de: *Focusing propeties of spherical and parabolic mirrors* (2009).

Como segundo ejemplo se tiene la focalización de las ondas acústicas. El efecto es similar al que ocurre con las ondas electromagnéticas. Un ejemplo claro de la focalización se presenta en el interior del Royal Albert Hall. Debido a la construcción elipsoidal del techo, el sonido reflejado provocaba un fuerte eco dentro del recinto.

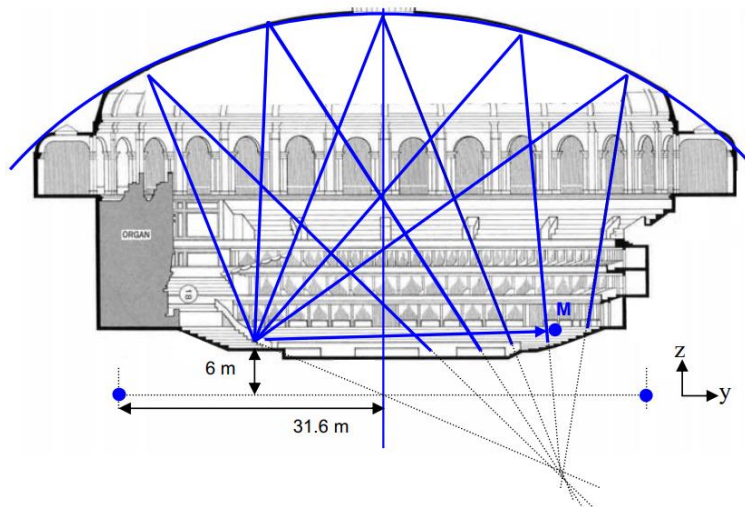


Figura 8. Corte longitudinal del Royal Albert Hall con el techo elipsoidal. Tomado de: *Sound concentration caused by curved surfaces* (2013).

Para dar solución al problema, se instalaron reflectores convexos suspendidos a lo largo de toda el área del techo, esto evitó que el sonido generado fuera focalizado en un punto del recinto y con ello evitar el eco generado (Vercammen, 2013).

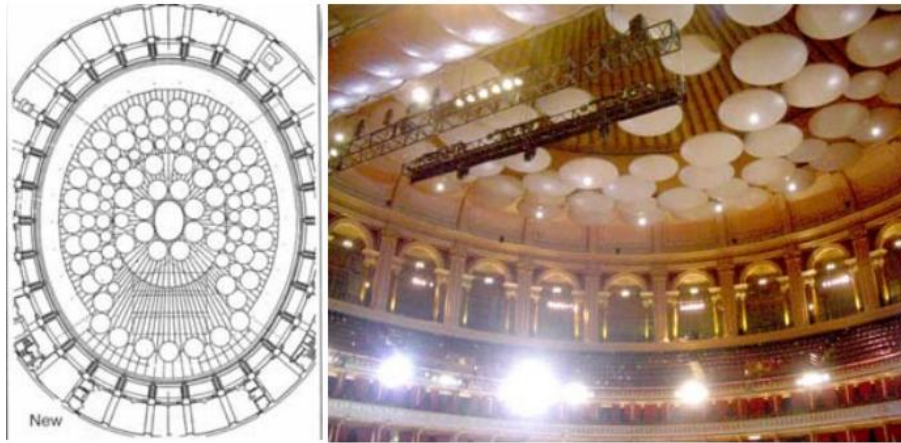


Figura 9. Instalación de reflectores convexos suspendidos. Tomado de: Sound concentration caused by curved surfaces (2013).

1.4. Modelos de oleaje. Ecuación de la pendiente suave

Para modelar la transformación del oleaje producto de la fricción del fondo, turbulencia y el rompimiento de las olas, diversos autores han desarrollado ecuaciones para lograr aproximar el modelo a la realidad.

En un inicio, se llevó a cabo el desarrollo de ecuaciones que modelaran el comportamiento de un oleaje simplificado y que se desarrolla sobre un fondo horizontal invariable. Derivado de la profundidad constante, la transformación del oleaje no se incluye dentro de lo modelado. Las ecuaciones que se desarrollaron inicialmente se incluyen dentro de la teoría lineal de Airy, la teoría de ondas de Stokes, la teoría Cnoidal, y, por último, la teoría de la onda solitaria (Martínez, 2004).

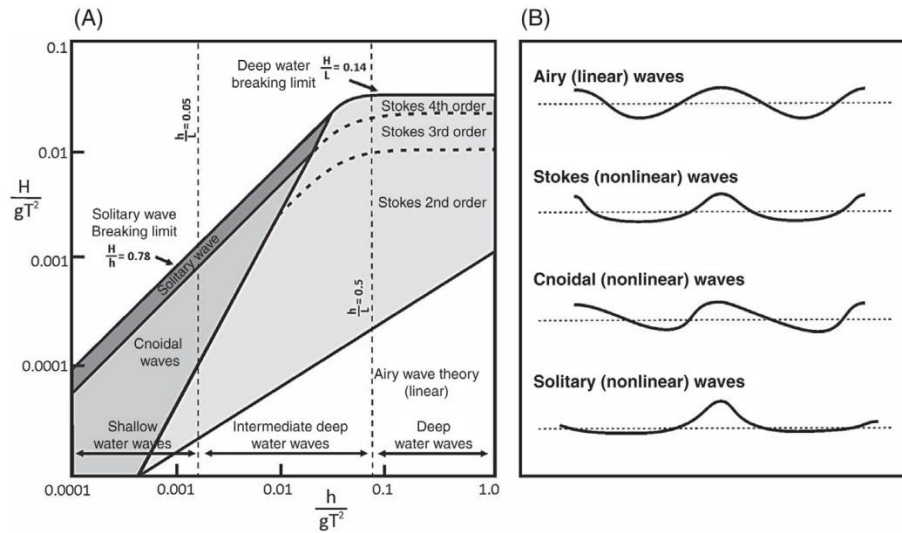


Figura 10. (A) Límites para las diferentes teorías de oleaje. (B) Diferentes tipos de ola. Tomado de: Wave behaviour outside the surf zone (2020).

La Figura 10 muestra los límites aplicables para cada una de las teorías para profundidades constantes, donde H representa la altura de ola, h la profundidad, g la gravedad y T el periodo. La linealidad en la teoría de Airy indica que la ola puede ser representada como una onda sinusoidal, en cambio, las demás teorías muestran que la ola no es simétrica como en la teoría lineal, sino que se presentan variaciones en crestas y valles.

Posteriormente, se introdujeron modelos que incluyeran un fondo variable tanto para aguas profundas como para aguas someras, aunque aún con determinadas restricciones; así como también se incluyó la transformación del oleaje (Martínez, 2004).

Una de las ecuaciones que más destaca es la ecuación de la pendiente suave, originalmente desarrollada por Berkhoff (1973), asumiendo que los modos evanescentes no son relevantes para los trenes de olas que se propagan a través de un fondo con variación lenta. La ecuación desarrollada por Berkhoff propone un procedimiento promediado en la vertical para reducir las ecuaciones de gobierno a 2

dimensiones horizontales, logrando así obtener una ecuación de refracción y difracción.

La ecuación de la pendiente suave provee de una serie de aproximaciones de la transformación lineal del oleaje a lo largo de un fondo impermeable. Debido a la complejidad del modelado, esta ecuación es aplicable únicamente para fondos con cambios graduales en su pendiente, aquellos con una relación máxima 1:3 (Martínez, 2004).

Se han desarrollado ecuaciones a partir de la ecuación de la pendiente suave con el objetivo de modelar el comportamiento del oleaje con mayor precisión. Estas ecuaciones son pioneras de la ecuación de la pendiente suave modificada.

1.4.1. Ecuación de la pendiente suave modificada

Anteriormente se mencionó que la ecuación de la pendiente suave contaba con restricciones varias que dificultaba la generación de aproximaciones adecuadas para diversas topografías en cuanto a la propagación del oleaje. Kirby (1986) propone en su ecuación, conocida como la ecuación de la pendiente suave extendida, un modelo donde el perfil del fondo marino puede describirse como dos componentes superpuestas, la componente de la ecuación de la pendiente suave, y una componente que representa las pequeñas irregularidades en el fondo como ondulaciones y rugosidades. Con esto, la nueva ecuación extendida incluye los pequeños cambios rápidos presentes en el fondo.

Posteriormente, O'Hare y Davies (1993), desarrollaron el modelo matricial de aproximaciones sucesivas, donde el fondo marino es representado con pequeños escalones, calcula el comportamiento individual para posteriormente sumar los respectivos efectos de dispersión y obtener el comportamiento general. Massel (1993) también propuso su modelo propio que incluye modos evanescentes capaces de modelar fondos marinos con pendientes elevadas. Finalmente, Chamberlain y Porter

(1995), desarrollaron una versión de la ecuación de la pendiente suave que describe de manera más acertada el comportamiento de la dispersión del oleaje sobre fondos con ondulaciones periódicas simples y doblemente periódicas.

Sin embargo, la ecuación de la pendiente suave modificada parte de las aproximaciones realizadas por Berkhoff (1973) y la ecuación de la pendiente suave derivada por Chamberlain y Porter (1995). La ecuación modificada presenta limitaciones como la no inclusión de los efectos lineales del oleaje, modos evanescentes, restricciones del método numérico y las posibles absorciones o reflexiones artificiales en las fronteras.

Por último, Silva et al. en 2005, presentaron una solución numérica del sistema de ecuaciones obtenido con la ecuación de la pendiente suave independiente del tiempo. El modelo incorpora la disipación de energía e integra una aproximación de segundo orden para representar las condiciones de frontera.

A continuación, se definirá de manera sintetizada la deducción que condujo a la ecuación de la pendiente suave modificada. Para la deducción detallada, puede consultarse *Modelo unificado de propagación de oleaje e hidrodinámica no lineal* (2006).

De acuerdo con la teoría lineal del oleaje, o la teoría de Airy, se presentan las siguientes ecuaciones:

Relación de dispersión:

$$\sigma^2 = gk \tanh kh \quad \text{ec. 1}$$

Elevación de la superficie del agua:

$$\eta = \Re \left[-\frac{i\sigma}{g} \cosh(kh) A e^{i(kx - \sigma t)} \right] \quad \text{ec. 2}$$

Potencial de velocidades:

$$\Phi(x, z, t) = \Re \left[-\frac{i\sigma}{g} a \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \right] e^{i(kx-\sigma t)} \quad \text{ec. 3}$$

Donde $\Re [\]$ denota la parte real del argumento, h la profundidad del nivel medio del mar, σ la frecuencia angular $\frac{2\pi}{T}$, k el número de onda $\frac{2\pi}{L}$, L la longitud de onda, a la amplitud de onda, g la aceleración debida a la fuerza de gravedad, x el eje de propagación y t el tiempo.

Dentro de la teoría lineal se considera una onda monocromática viajando sobre un fondo horizontal e impermeable; y un fluido ideal, incompresible e irrotacional. Debido a estas limitaciones, se buscó obtener una ecuación que permitiera la modelación sobre una capa permeable, que además permitiera introducir la disipación de energía y el efecto provocado de reflexión y transmisión.

Finalmente, se han desarrollado las expresiones de un tren lineal monocromático sobre un medio poroso (Rojanakamthorn et al., 1989; Losada et al., 1995; Silva et al., 2002).

1.4.1.1. Ecuaciones del medio poroso

La teoría lineal dentro de un medio poroso aborda la relación de dispersión, la elevación de la superficie del agua y los potenciales de velocidades asociados al flujo de filtración y descarga.

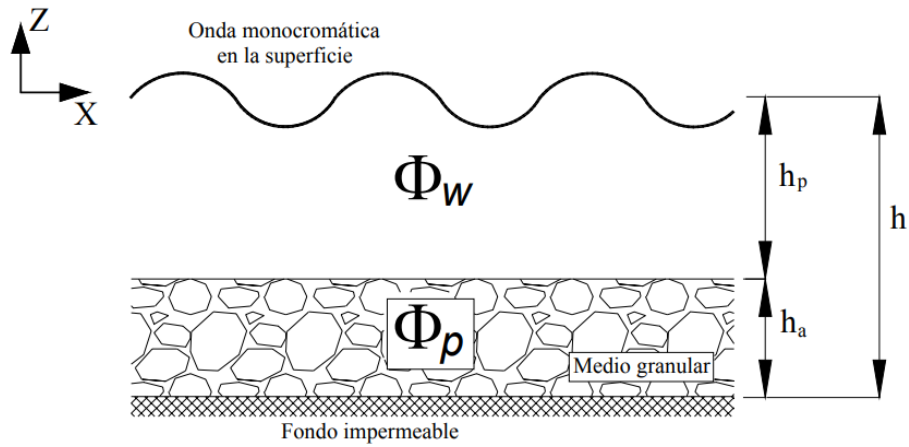


Figura 11. Esquema y sistema de referencia para la teoría lineal sobre un medio poroso. Tomado de: Modelo unificado de propagación de oleaje e hidrodinámica no lineal (2006).

La Figura 11 muestra el esquema que ha sido utilizado para el desarrollo de la ecuación que permita describir la interacción entre el flujo oscilatorio en agua y el flujo oscilatorio dentro de un medio poroso. La profundidad del agua está determinada por h_p , el grosor de la capa de medio poroso como h_a y el calado total como h .

La solución de las ecuaciones y condiciones de contorno toma en cuenta ondas progresivas. De esta manera, se obtiene una solución más simple que representa la propagación de energía y que permite resolver las ecuaciones de forma directa.

Considerando lo anterior y resolviendo el sistema, se logran obtener las siguientes ecuaciones:

Relación de dispersión:

$$\frac{\sigma^2}{g} = K \frac{\tanh Kh - F}{1 - F \tanh Kh} \quad \text{ec. 4}$$

Potencial de velocidades en el agua:

$$\Phi_w = -\frac{igH}{2\sigma} \left(\frac{\cosh K(h+z) - F \sinh K(h+z)}{\cosh(Kh) - F \sinh(Kh)} \right) e^{i(-\sigma t + Kx)} \quad \text{ec. 5}$$

Potencial de velocidades en el medio poroso:

$$\Phi_p = -\frac{igH}{2\sigma} \left(\frac{1 - F \tanh Kh_a}{\cosh(Kh) - F \sinh(Kh)} \right) \left(\frac{\cosh K(h+z)}{s + if} \right) e^{i(-\sigma t + Kx)} \quad \text{ec. 6}$$

Donde:

$$F = \left(1 - \frac{\varepsilon}{s + if} \right) \frac{\tanh(Kh_a)}{1 - \frac{\varepsilon}{s + if} \tanh^2(Kh_a)}$$

s : es la porosidad efectiva del medio

f : es el coeficiente de fricción

i : es la unidad imaginaria

ε : la permeabilidad del medio

Sin embargo, las condiciones en las que se aplican las ecuaciones previas son aquellas que consideran una profundidad y espesor de la capa porosa constantes.

Silva et al. (2005) propuso una solución a la ecuación de propagación considerando una capa finita de medio poroso sobre un fondo impermeable y variable. La ecuación resultante es la ecuación de la pendiente suave independiente del tiempo, a la cual se le añadió artificialmente un término que incluye la disipación de energía, que se muestra a continuación:

$$\nabla_h (I_1 \nabla_h \phi) + \phi [(k^2 + i\sigma D)I_1 + r(h)] = 0 \quad \text{ec. 7}$$

Donde:

$$D = f_D + f_B$$

f_D : factor de disipación por rotura

f_B : factor de disipación por fricción

1.4.1.2. Factor de disipación de energía

La interacción del oleaje con el fondo marino es más significativa cuando se presenta un fondo vegetado. A su vez, el grado de afectación dependerá de si la vegetación presente se encuentra sumergida, sumergida y emergida, o completamente emergida (Cruz-Juárez, 2025).

La deducción y el desarrollo detallado de la ecuación para la disipación de energía puede consultarse en *Adecuación de un modelo hidrodinámico para grandes dominios* (2025).

El factor de disipación de energía debida a la vegetación se incluye dentro de la ecuación de la pendiente suave como se presenta a continuación:

$$\nabla(C C_g \cdot \nabla \Phi_w) + \Phi_w \left(\frac{C_g}{C} \sigma^2 + i\sigma\gamma_v - G \right) = 0 \quad \text{ec. 8}$$

Donde C es la celeridad, C_g la celeridad de grupo, Φ_w la función del potencial de velocidades y γ_v el factor de disipación debido a la vegetación.

Mediante la equivalencia de las ecuaciones anteriores se deduce que:

$$D = \frac{\gamma_g}{C C_g} \quad \text{ec. 9}$$

Donde el factor de disipación se expresa de la forma:

$$\gamma_g = \frac{2}{3\pi} C_D b_v N_v \frac{k^2 g^2 (\sin^3 kh_v + 3 \sinh kh_v)}{3 \cos h^3 kh} H \quad \text{Ec. 10}$$

El coeficiente de arrastre C_D estará determinado por el tipo de vegetación. La siguiente tabla muestra valores recomendados para los tipos macroalga, pasto marino, mangle y árbol (Cruz-Juárez, 2025).

Tabla 1. Valores recomendados para coeficiente de arrastre C_D . Modificado de: Adecuación de un modelo hidrodinámico para grandes dominios (2025).

Fundador de la vegetación	CD recomendado
Macroalga	0,05 – 0,5
Pasto marino	1,61 – 2,0
Mangle	1,75 – 3,5
Árbol	5 - 18

2. Descripción de la zona de estudio y zonas de comparación

2.1. Zicatela, Oaxaca

2.1.1. Ubicación geográfica

La playa de Zicatela está ubicada en localidad de Brisas de Zicatela, al oriente de Puerto Escondido en el estado de Oaxaca, México. La representación gráfica se encuentra mostrada en la siguiente figura.



Figura 12. Localización de la playa de Zicatela, Oaxaca.

2.1.2. Características físicas de la costa

Bahía Principal está conformada por 1,1 kilómetros de longitud con la presencia de un remanente de laguna en la zona este. Por su parte, Playa Zicatela cuenta con 3,8 kilómetros de longitud, protegida en la parte este por una punta rocosa que actúa como espigón (Acevedo-Granados et al., 2025).

De acuerdo con Acevedo-Granados (2025), Bahía Principal presenta una acreción de 1,31 m/año, mientras que Playa Zicatela ha presentado acreción en su línea de costa

con una razón de 2,08 m/año, lo cual describe una ganancia de terrenos al mar. Por lo tanto, y de acuerdo con Salinas (2025), Bahía Principal ha presentado acumulaciones de sedimentos principalmente en la zona cercana a la escollera construida. La acumulación de sedimentos ha provocado una reducción en la profundidad del fondo marino y el avance de línea de costa, lo que afecta a las embarcaciones dificultando su atraque cerca de Bahía Principal. Como evidencia de este proceso, el ancho de la playa aumentó de aproximadamente 45 m a cerca de 120 m.

Por otro lado, se determinó que la pendiente de la costa de Bahía Principal es del 13,4%, mientras que Playa Zicatela presenta una pendiente promedio de 6,12%

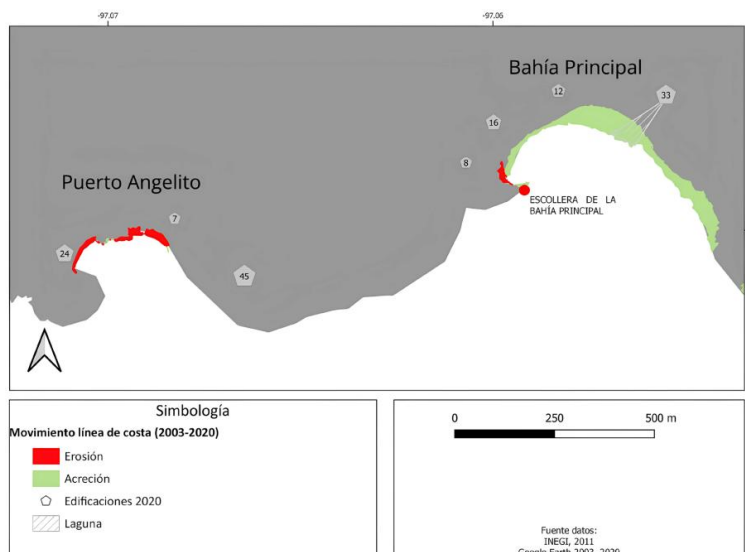


Figura 13. Erosión y acreción en Bahía Principal. Tomado de: Evaluación histórica de los procesos de erosión y acreción en las playas de Puerto Escondido, Oaxaca (2025).

De manera gráfica, la Figura 13 y la Figura 14 muestran la acreción y erosión en Bahía Principal y en Playa Zicatela. Los mapas fueron generados con registros comprendidos entre 2003 y 2020.



Figura 14. Erosión y acreción en Playa Zicatela. Tomado de: Evaluación histórica de los procesos de erosión y acreción en las playas de Puerto Escondido, Oaxaca (2025).

Las actividades humanas han sido el principal motivo del cambio morfológico en la zona de la playa. Como se mencionó anteriormente, el espigón construido afectó en la interacción con las corrientes marinas, además de la acreción de la línea de costa por el aporte de sedimentos y la construcción de infraestructura hotelera (Salinas, 2025).

2.1.3. Zicatela, la capital del surf en México

Puerto Escondido alberga excelentes sitios donde el oleaje cumple con condiciones óptimas para la práctica del surf, sitios entre los que se encuentra Punta Colorada y Zicatela. Playa Zicatela alberga una de las mejores rompientes del mundo, lo que la ha llevado a su reconocimiento internacional.

El oleaje de la zona ha logrado que la zona de Puerto Escondido sea nombrada como la décima cuarta reserva mundial de surf, otorgada por Save The Waves Coalition en 2025. La reserva incluye 10 kilómetros de costa, y las rompientes de Playa Zicatela, Punta Colorada, Playa Marinero, Playa Carrizalillo, entre otras (Save The Waves Coalition, 2026)

El oleaje en la zona es apto para practicar surf debido a sus condiciones morfológicas. La batimetría de la zona muestra un cañón submarino de más de 3 kilómetros de profundidad, lo que, al acercarse a la costa y disminuyendo su profundidad, genera en las olas el efecto de someramiento, elevando su altura. Zicatela es una playa de mar abierto, con arena fina de color gris y pendientes pronunciadas.

En la zona, el oleaje se caracteriza por tener olas de aproximadamente de uno a dos metros en temporadas bajas que son asociadas a los meses de diciembre a abril. En cambio, las olas de mayores alturas que se presentan son de hasta seis metros de altura, las cuales ocurren durante los meses de mayo a noviembre. Estas temporadas climáticas son coincidentes con temporadas de formación de huracanes en la costa del pacífico. Es entonces cuando las olas son aprovechadas por su calidad elevada para la práctica del deporte.

En gran medida, los eventos de alto oleaje son consecuencia de los efectos de refracción y someramiento derivados del cañón submarino presente cercano a la costa de Zicatela. Actualmente no se cuenta con estudios que analicen las características físicas y morfológicas del cañón submarino; sin embargo, Bezaury et al. (2011) describen la presencia de sedimentos suaves de tipo arena y lodo, además de profundidades registradas desde la plataforma hasta la zona abisal inferior de hasta 5.616 metros.

2.1.4. Infraestructura costera existente en Zicatela

Bahía Principal cuenta con una escollera que fue construida a finales de los años 70, con el principal objetivo de proteger a las pequeñas embarcaciones pesqueras contra el oleaje y las corrientes marinas, y servir de base a un muelle. Dentro de sus características, la escollera cuenta con un ancho y largo aproximado de 15 y 50 metros respectivamente, conformado por bloques de rocas del orden de uno a dos metros de diámetro (nmásmedia, 2025).



Figura 15. Escollera ubicada en Bahía Principal. Tomado de: Zicatela: lo que está matando la ola más icónica de México (2025).

Actualmente, la escollera se encuentra deteriorada debido al paso del huracán Erick en junio del 2025. En consecuencia, locales de la zona unieron esfuerzos para retirar escombros y parte de la estructura que aún se mantenía de pie. A pesar de no lograr retirar la estructura completamente, esto por falta de maquinaria, los locales mostraron el descontento por la construcción de la obra (nmásmedia, 2025).



Figura 16. Condición actual de la escollera. Tomado de: Zicatela: lo que está matando la ola más icónica de México (2025).

2.2. Hossegor, Francia

Al suroeste de Francia se ubica la región de Hossegor, la cual es reconocida internacionalmente por la calidad de oleaje que ofrece a los surfistas. La principal razón del excelente oleaje es debido al cañón de Capbreton, ubicado en la Bahía de Biscay. El cañón submarino cuenta con una extensión de 300 km de longitud, desarrollándose de manera paralela a la costa norte de España en dirección suroeste. El cañón no se desarrolla de manera recta, sino de manera sinuosa alcanzando profundidades de hasta 3.800 metros (Brocheray et al., 2014). La Bahía de Biscay, al ser una franja abierta, actúa como embudo y atrae un buen *swell* de largo periodo desde miles de kilómetros de distancia, además, no existen islas, arrecifes o plataformas que lo detengan.

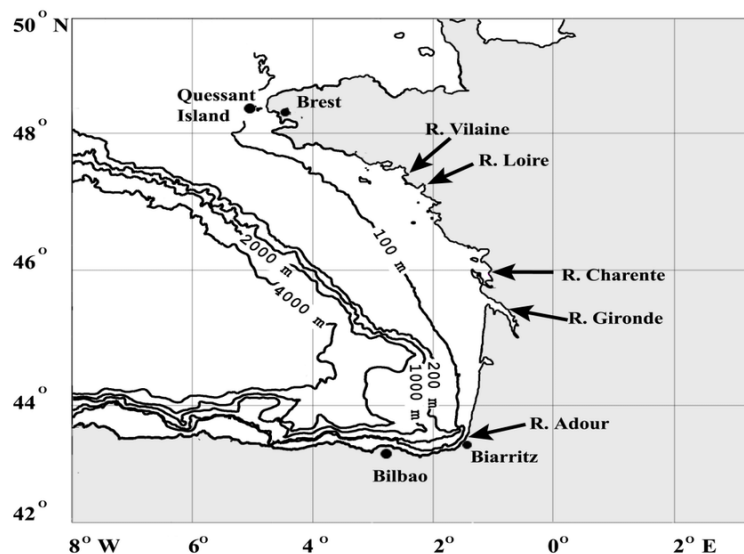


Figura 17. Batimetría de la Bahía de Biscay. Tomado de: *An Algorithm to Retrieve Chlorophyll, Dissolved Organic Carbon, and Suspended Minerals From Great Lakes Satellite Data* (2013).

Se puede encontrar buen oleaje sin importar la temporada del año, sin embargo, es variable en cuanto a sus características. En verano se presenta oleaje bajo, ideal para principiantes; en primavera y otoño las olas comienzan a desarrollarse con mayor

fuerza y altura; finalmente invierno, que destaca por ser la mejor temporada para el surf en la zona (Rafferty, 2025a).

La línea de costa está dividida en sectores, entre los que se encuentran: Les Culs Nus, La Gravière, Le Nord y Le Sud, siendo La Nord el sector que ha reportado olas de entre 1,5 hasta 6 metros, de acuerdo con la revista Ultimate France (2024). Asimismo, se han reportado periodos de oleaje entre 10 y 11 segundos y direcciones de viento predominantes del este.

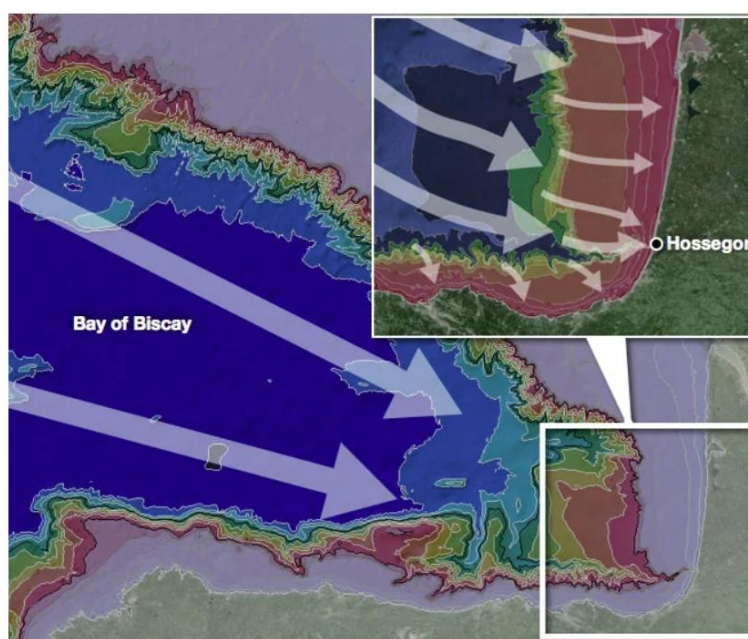


Figura 18. Refracción y focalización del oleaje sobre Bahía de Biscay. Tomado de: *The Science (and Magic) Behind Hossegor's Waves* (2025).

2.3. Nazaré, Portugal

La ciudad de Nazaré presenta un caso similar al de Hossegor. A menos de 1 km de Nazaré se encuentra el cañón submarino Nazaré. Este cañón se extiende con una longitud aproximada de 210 km, alcanzando profundidades de hasta 4.900 metros. Dentro de los primeros 5 kilómetros, el cañón llega a tener un ancho de 1,5 kilómetros, y rápidamente llega a extenderse hasta los 2,5 kilómetros (Lastras et al., 2008).

Las olas de Nazaré se encuentran entre las mejores del mundo. La altura media de oleaje se encuentra entre los 15 y 20 metros, una característica única que brinda retos y dificultades a surfistas (Francis, 2024).

La temporada de oleaje se divide en dos partes: la primera está comprendida entre los meses octubre a abril y la segunda de abril a septiembre. Es dentro de la primera temporada donde se puede encontrar el mejor oleaje con las mejores condiciones; en la segunda temporada, aún es posible encontrar buen oleaje, aunque con alturas de ola ligeramente menores (Francis, 2024).

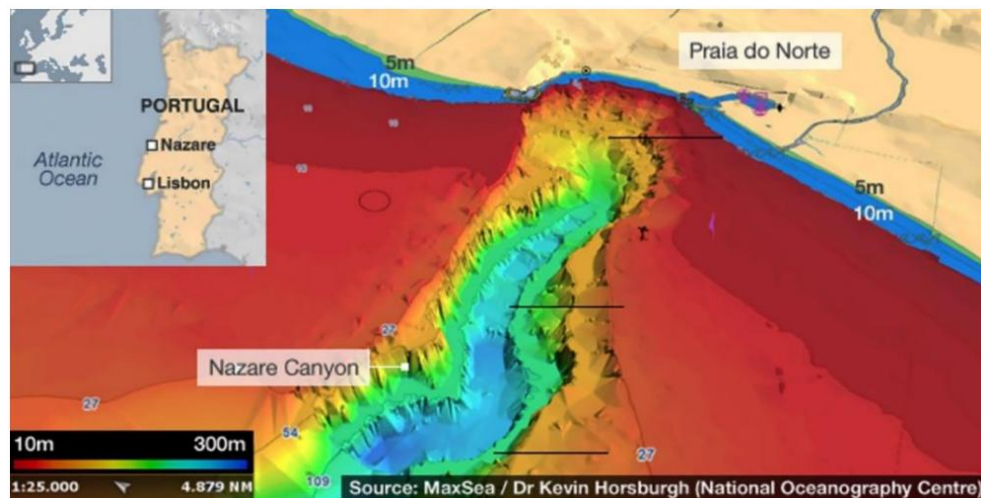


Figura 19. Batimetría Cañón de Nazaré. Tomado de: Garret McNamara surfs “highest ever” wave off Portugal (2013).

La batimetría que se encuentra en el Cañón de Nazaré provee de mejores condiciones para el desarrollo de olas de gran altura. Las distintas curvaturas desempeñan un papel importante, puesto que contribuyen a la refracción y convergencia del oleaje. La cabecera del cañón está a menos de 1,5 kilómetros de la zona litoral, esto contribuye, especialmente al oleaje de largo periodo, a focalizarlo a la costa y permitir que aumente la altura de ola en la zona de rompientes, como se muestra en la Figura 20.

A partir de la cabecera del cañón hacia la línea de costa, el fondo marino incrementa gradualmente, suficientemente somero como para que el oleaje rompa (Carmo, 2022).



Figura 20. Refracción y focalización del oleaje sobre Nazaré. Tomado de: Portuguese Hydrographic Institute (2022).

2.4. Half Moon Bay, Estados Unidos

En el estado de California, se encuentra la ciudad de Half Moon Bay, reconocida por presentar movimiento turístico gracias al oleaje apto para la práctica de surf. Las condiciones geomorfológicas en la playa de Maverick han posicionado a este lugar como uno de los más riesgosos para la práctica de surf, puesto que, a diferencia de los fondos arenosos que corresponden a los lugares anteriores, esta zona está compuesta por un fondo de rocas irregulares, lo que incrementa el riesgo de lesiones en las caídas. El oleaje también es otro factor de riesgo debido al reporte de alturas de ola que alcanzan los 18 metros de alto y periodos de hasta 25 segundos, además, las bajas temperaturas del mar aumentan el riesgo de incidentes derivados por hipotermia (Inn, s. f.).

El mejor oleaje apto para la práctica del deporte se encuentra dentro de los meses noviembre a marzo, con mar de fondo intenso y de mayor desafío asociado a olas de gran tamaño; sin embargo, dentro de los meses diciembre a febrero aún es posible encontrar oleaje consistente (Surfline, 2026).

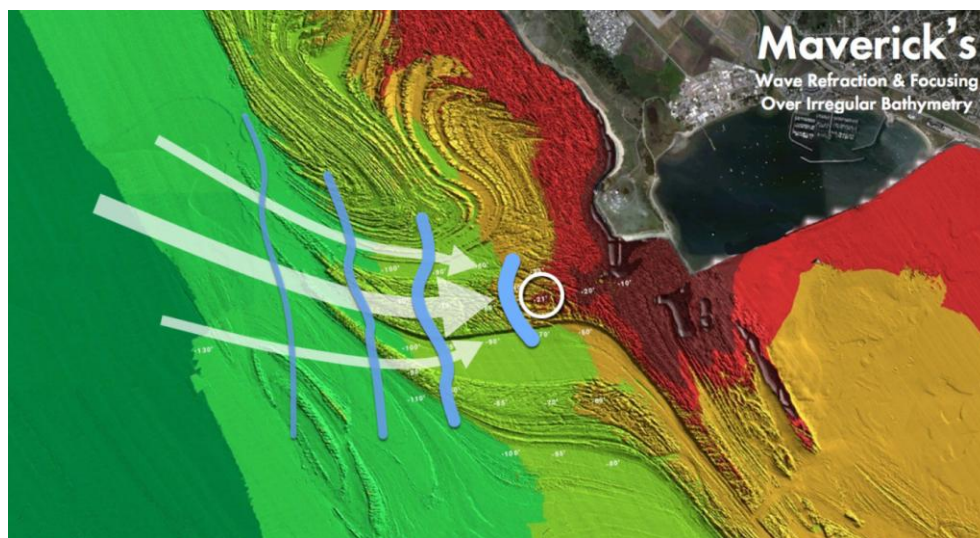


Figura 21. Refracción y focalización del oleaje sobre Maverick. Tomado de: *Mechanics of Maverick's* (2022).

La figura anterior muestra la batimetría de la zona cercana a Half Moon Bay. Se aprecia la refracción y la focalización del oleaje hacia la zona de la playa de Maverick. El resultado de este comportamiento deriva en la convergencia del oleaje proveniente del oeste y noroeste. Esta convergencia genera un efecto de concentración de energía provocando el incremento en la altura de las olas en la zona de rompiente (Abalone, 2014).

3. Materiales y datos

3.1. Modelos y bases de datos utilizadas

3.1.1. ERA5

A lo largo del tiempo, se han monitoreado variables como la temperatura, presión, viento, precipitación, humedad, entre otras; sin embargo, los instrumentos y herramientas disponibles no registraban información de manera constante ni precisa. Por ello, para disponer de una mayor cantidad de datos a escala global, hoy en día se emplean técnicas de reanálisis (Copernicus, s.f).

El reanálisis que se emplea en los datos de ERA5 se caracteriza por hacer uso de métodos numéricos aplicados a observaciones climáticas pasadas. En conjunto con modelos climáticos, el proceso de reanálisis es capaz de proporcionar estimaciones consistentes y confiables (Copernicus, s.f).

La información está disponible en la página de ERA5 dentro de la sección Climate Data Store. En el sitio web, se pueden encontrar los registros en cuadrículas regulares de latitud y longitud con una resolución de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$, con parámetros atmosféricos en 37 niveles de presión, lo que permite representar una estructura vertical de la atmósfera (Copernicus, s.f).

Los datos que se utilizarán en la presente tesis son los asociados a registros de oleaje y viento. Dicha información es proporcionada con registros a partir de 1940 hasta la actualidad, con retrasos de cinco días con respecto al tiempo real. Estos datos proporcionan información de la altura de ola, dirección y el periodo asociado a cada hora de registro. Por otro lado, los datos asociados al viento indican la dirección y velocidad, de igual manera, con registros cada hora (Copernicus, s.f).

Cabe mencionar que los datos son provistos por Copernicus Climate Change Service, el cual provee de información relacionada al clima de cualquier parte del mundo.

Copernicus es uno de los seis servicios que pertenece al Copernicus Earth Observation Programme de la Unión Europea (Copernicus, s.f).

3.1.2. GEBCO

GEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans, por sus siglas en inglés) es un grupo de geocientíficos e hidrógrafos que trabajan en conjunto para generar bases de datos públicas correspondientes a la batimetría de los océanos alrededor del mundo. La cooperación internacional y las innovaciones tecnológicas hacen posible el desarrollo de los mapas cartográficos. La página opera mediante la Organización Hidrográfica Internacional (OHI) y la Comisión Oceanográfica Intergubernamental (COI) de la UNESCO. Los volúmenes de información son recopilados y almacenados en el Centro de Datos Batimétricos Digitales (DCBD) de forma libre y sin restricciones (Lamarche et al., 2025).

La información batimétrica fue obtenida, inicialmente, mediante sistemas de medición acústica, actualmente se utilizan sondas acústicas multihaz que permiten cartografiar amplias zonas del fondo marino (GEBCO, s.f).

Los datos de batimetría que se utilizarán en los modelos de análisis de zonas emblemáticas de surf han sido obtenidos de la página de GEBCO, el cual proporciona datos de elevaciones en metros en cuadrículas con intervalos de 15 segundos (GEBCO, s.f).

3.1.3. MWAPON

MWAPONCC es un programa computacional que modela simulaciones de oleaje mediante la solución de ondas lineales que se propagan por fondos que pueden o no ser variables haciendo uso de la ecuación modificada de la pendiente suave. El nombre proviene de las siglas en inglés *Model for WAve Propagation On the coast*, donde la *N* indica que tiene incluidas las ecuaciones del medio poroso y *CC* indica que

las corrientes inducidas por el oleaje pueden ser calculadas con el modelo CoCo (Silva, 2010).

El software es capaz de aproximarse a los valores reales de refracción, difracción, someramiento, reflexión, disipación inducida por fricción de fondo y la rotura del oleaje. En la naturaleza, existen ocasiones en el que la rotura no disipa completamente la energía del oleaje, eventualmente puede conducir a la recomposición de las olas; para simular este efecto, el programa simula la rotura mediante un modelo que determina la variación espacial de la energía del oleaje (Silva, 2010).

Como datos de salida, el programa proporciona resultados de amplitudes máximas de ola y la superficie libre instantánea, que pueden ser graficados con el programa Surfer (Martínez et al., 2013).

3.2. Procesamiento de datos

Para el procesamiento de datos, se requirió hacer uso del software QGIS y los graficadores Surfer y Grapher 11. El software QGIS permitió obtener los datos y visualización de la batimetría en las zonas de interés a partir de capas ráster proporcionadas por GEBCO.

Los archivos GRD que el software MWAPON proporciona al final de las simulaciones fueron procesados haciendo uso de Surfer. De esta manera fue posible obtener las representaciones gráficas de amplitudes de ola, superficie libre, direcciones de propagación del oleaje y de las corrientes inducidas por el oleaje.

Finalmente, haciendo uso de Grapher 11 y la recolección de datos del oleaje proporcionada por ERA5, fue posible obtener las rosas de oleaje asociadas a las alturas de ola y periodos con direcciones de propagación.

4. Metodología

4.1. Caracterización del clima marítimo

4.1.1. Parámetros estadísticos

El cálculo de los parámetros estadísticos correspondientes a la zona de estudio permitirá definir un estado de mar (Chávez, 2011). Estos parámetros son los relacionados con la altura de ola media, altura de ola máxima, altura de ola significativa, altura de ola un medio, un décimo, un centésimo y un milésimo. Asimismo, se aplicó el procedimiento con los datos correspondientes al periodo.

Se obtendrán los parámetros estadísticos mediante un código desarrollado en Python 3, debido a la gran cantidad de datos que provee ERA5.

La altura de ola media está definida mediante la ecuación:

$$\bar{H} = \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} H_i \quad \text{ec. 11}$$

La altura de ola cuadrática media está definida por:

$$H_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} H_i^2} \quad \text{ec. 12}$$

Donde:

N_0 número de datos de reanálisis

H_i valores de altura de ola

La altura de ola máxima corresponde a la ola más alta registrada.

La altura de ola un medio se obtiene con el promedio del 50% de las olas más altas registradas.

La altura de ola significativa, o un tercio, se obtiene con el promedio del 33.3% de las olas más altas registradas.

La altura de ola un décimo se obtiene con el promedio del 10% de las olas más altas registradas.

La altura de ola un centésimo se obtiene con el promedio del 1% de las olas más altas registradas.

La altura de ola un milésimo se obtiene con el promedio del 0.1% de las olas más altas registradas.

Si bien se obtendrán los mismos parámetros estadísticos correspondientes al periodo de ola, el cálculo se realizará con los periodos asociados a las mayores alturas de ola. No obstante, se mostrarán las ecuaciones correspondientes al periodo medio y al periodo cuadrático medio:

Periodo medio:

$$\bar{T} = \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} T_i \quad \text{ec. 13}$$

Periodo cuadrático medio:

$$T_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} T_i^2} \quad \text{ec. 14}$$

Donde:

N_0 número de datos de reanálisis

T_i valores de periodo de ola

4.1.2. Temporadas climáticas

Para comenzar con el análisis de la zona de estudio, se requirió separar los datos de reanálisis provistos por ERA5. De acuerdo con la Dirección General Adjunta de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología (s. f.), las temporadas ciclónicas para la zona de Zicatela se dividen en los siguientes dos periodos:

- Temporada ciclónica: comprendida entre los meses de mayo a noviembre
- Temporada no ciclónica: comprendida entre los meses de diciembre a abril

Durante la temporada de huracanes, la presencia de marejadas ciclónicas toma lugar en la zona de estudio. Una marejada ciclónica es un evento que provoca un aumento en el nivel del mar por encima de la marea pronosticada astronómica (NOAA, s. f.).

La acumulación de olas es un efecto derivado de la presencia de los ciclones cercanos. Este genera que las olas que rompen en la zona costera no regresen inmediatamente al mar, sino que son empujadas hacia la playa, dando como resultado un incremento en el nivel del agua (NOAA, s. f.).

4.1.3. Rosas de oleaje y periodo de ola

A partir de los datos obtenidos mediante ERA5, fue posible obtener las rosas de oleaje y periodo, utilizando el registro completo desde 1940 a 2024, generadas mediante el uso del software Grapher11.

Las rosas de oleaje y periodo que se analizarán con mayor detalle serán aquellas que se encuentran dentro de la temporada ciclónica. Asimismo, se incluirán las gráficas correspondientes a la temporada no ciclónica y al registro completo.

Para las rosas de altura de ola y periodo correspondientes a Francia, Portugal y Estados Unidos, se analizará únicamente el periodo correspondiente a las temporadas identificadas como las más favorables del surf.

4.1.4. Probabilidad conjunta altura de ola y periodo

El análisis requiere conocer de qué manera se relacionan las variables altura de ola, periodo y dirección. Por ello se hizo uso de la probabilidad conjunta en el análisis de datos.

Dentro de la definición de probabilidad conjunta, sean X y Y dos variables aleatorias discretas definidas dentro de un espacio muestral, la distribución de probabilidad para sus ocurrencias simultáneas se representa mediante una función con valores $f(x, y)$ para cualquier par de valores (x, y) . Por consiguiente:

$$f(x, y) = P(X = x, Y = y)$$

es decir, los valores $f(x, y)$ dan la probabilidad de que los resultados ocurran al mismo tiempo (Walpol et al., 2012)

En este sentido, el análisis de los datos requirió del desarrollo de un script de Python que permitiera analizar los cerca de 745.100 datos que proporciona el registro de ERA5 y conocer la probabilidad asociando los parámetros altura de ola, periodo y dirección de propagación. De esta manera, se puede visualizar gráficamente qué características posee la ola más probable de ocurrir.

De igual manera se realizó el análisis de probabilidad del registro completo y el correspondiente a la temporada ciclónica.

4.2. Análisis batimétrico

Los datos obtenidos mediante la página de GEBCO fueron utilizados para introducirlos primeramente en QGIS y posteriormente en Surfer. En QGIS se manejaron los datos a manera de obtener una malla que fuera posible introducir en Surfer. Posteriormente, en Surfer se generaron los mapas correspondientes a la batimetría de Playa Zicatela.

Nuevamente se desarrolló un script de Python que permitiera realizar un mapa de profundidades con el archivo GRD generado en Surfer de la batimetría de la zona de estudio.

Finalmente, haciendo uso de Python, se generó un archivo en formato TIFF que pudiera importarse en el programa QGIS, esto con el objetivo de obtener y visualizar de mejor manera el perfil batimétrico correspondiente al cañón cercano a la costa.

4.3. Modelación hidrodinámica con MWAPON

Para comenzar el análisis en el software MWAPON, se requerirán los datos obtenidos previamente con las gráficas de probabilidad conjunta. Se introducirán en el programa las condiciones de oleaje que presentan la mayor probabilidad de ocurrencia en la zona.

Con la obtención de la altura de ola más probable y sus respectivas características de periodo y dirección, y con el objetivo de visualizar el comportamiento del oleaje bajo distintas condiciones, se establecieron variaciones individuales de cada uno de los parámetros de entrada, modificando de manera individual el periodo, altura de ola y la dirección de propagación, alrededor de las características de ola más probable. Las variaciones en la dirección, altura y periodo se establecieron en $\pm 2,5^\circ$, $\pm 0,25$ metros y $\pm 0,25$ segundos, respectivamente.

Usando el programa computacional WAPON, se introducirán las condiciones de oleaje mencionadas anteriormente. Dentro de la modelación se pretende evaluar el comportamiento hidrodinámico que se asemeje a las condiciones reales y estadísticamente representativas dentro de la zona de estudio.

Los archivos generados con formato GRD, se procesarán dentro de programas externos con el objetivo de poder obtener una representación visual de las condiciones.

5. Resultados

5.1. Zicatela, Oaxaca

5.1.1. Parámetros estadísticos

Una vez que se procesaron los datos mediante un script en Python, los resultados se muestran en las siguientes tablas.

Tabla 2. Parámetros estadísticos de altura de ola.

Parámetro		Altura de ola (m)
Altura de ola máxima	H_{max}	5.305
Altura de ola media	$\bar{H}$	1.410
Altura de ola cuadrática media	H_{rms}	1.453
Altura de ola un medio	$H_{1/2}$	1.666
Altura de ola significativa	$H_{1/3}$	1.787
Altura de ola un décimo	$H_{1/10}$	2.112
Altura de ola un centésimo	$H_{1/100}$	2.761
Altura de ola un milésimo	$H_{1/1000}$	3.535

Los datos de oleaje se han ordenado de manera descendente con respecto a la altura de oleaje. Los resultados se muestran consistentes, pues se puede apreciar un aumento en las medias de las alturas de ola conforme se consideran subconjuntos cada vez más restringidos de los valores superiores.

Tabla 3. Parámetros estadísticos del periodo de ola.

Parámetro		Periodo (s)
Periodo de ola máxima	T_{max}	23.694
Periodo de ola media	$\bar{T}$	13.330
Periodo de ola cuadrático medio	T_{rms}	13.516
Periodo de ola un medio	$T_{1/2}$	13.786
Periodo de ola significativa	$T_{1/3}$	13.920
Periodo de ola un décimo	$T_{1/10}$	13.822
Periodo de ola un centésimo	$T_{1/100}$	11.697

A diferencia de los parámetros estadísticos de la altura de ola, los parámetros del periodo no presentan el mismo comportamiento. Se aprecia una tendencia al decrecimiento, mostrando que las alturas de ola más altas no se encuentran directamente relacionadas con periodos de mayor duración.

5.1.2. Clima marítimo

A continuación, se muestran las rosas de oleaje y periodo correspondientes al registro completo con los datos proporcionados por ERA5.

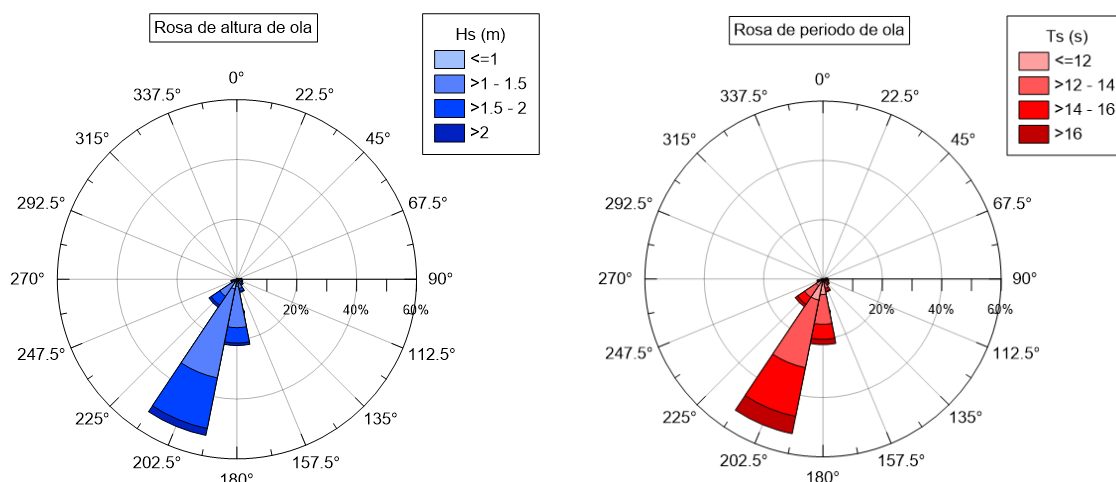


Figura 22. Rosa de altura de ola y periodo de ola correspondientes a Zicatela. Registro completo.

El registro completo muestra tendencias de altura de oleaje comprendidas entre 1 y 1,5 metros en dirección 202,5°. Asimismo, se muestra la rosa de periodo de ola, donde se aprecia la predominancia hacia la misma dirección con periodos comprendidos entre los 12 y 14 segundos.

Para continuar con el análisis en la temporada ciclónica, se generaron las rosas correspondientes, dando como resultado las siguientes gráficas:

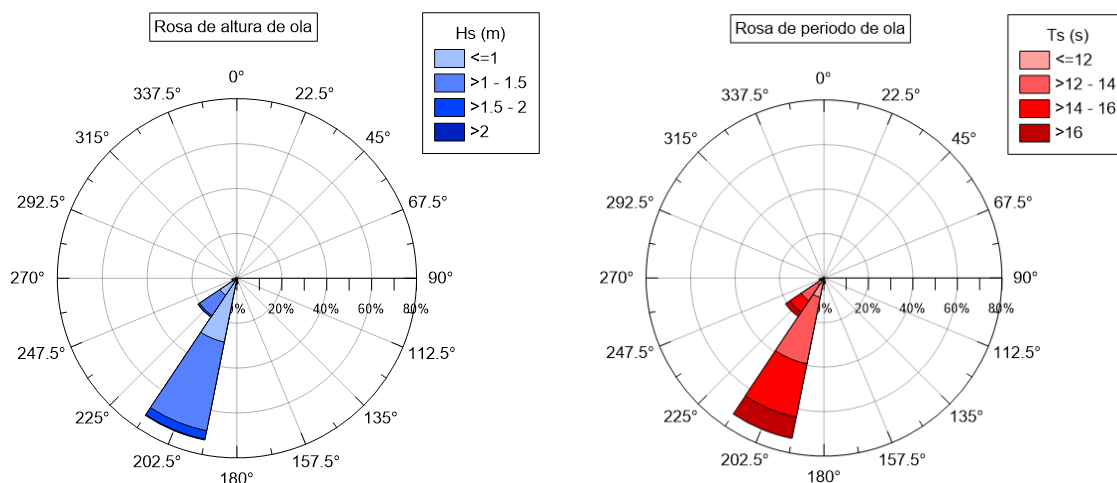


Figura 23. Rosa de altura de ola y periodo de ola correspondientes a Zicatela. Temporada ciclónica.

En la Figura 23 se muestran las rosas para la altura de ola y periodo de ola, respectivamente. En la rosa de altura de ola se aprecia que las olas más probables de ocurrir son aquellas entre 1 y 1,5 metros de altura, abarcando cerca del 45% de las olas totales; en cuanto al periodo más probable, se encuentra comprendido entre los 12 y 14 segundos, pero con porcentaje de ocurrencia destacable correspondiente entre los 14 y 16 segundos. Las olas provienen de la dirección 202,5°, concentrándose cerca del 70% de las olas totales.

Comparado con el registro completo mostrado en la Figura 22, la dirección de propagación proveniente del sur disminuye significativamente. Durante la temporada ciclónica, se puede notar que ocurre una concentración en la dirección de origen del oleaje.

Finalmente, en cuanto al oleaje en temporadas no ciclónicas, las rosas de altura de ola y periodo se muestran a continuación.

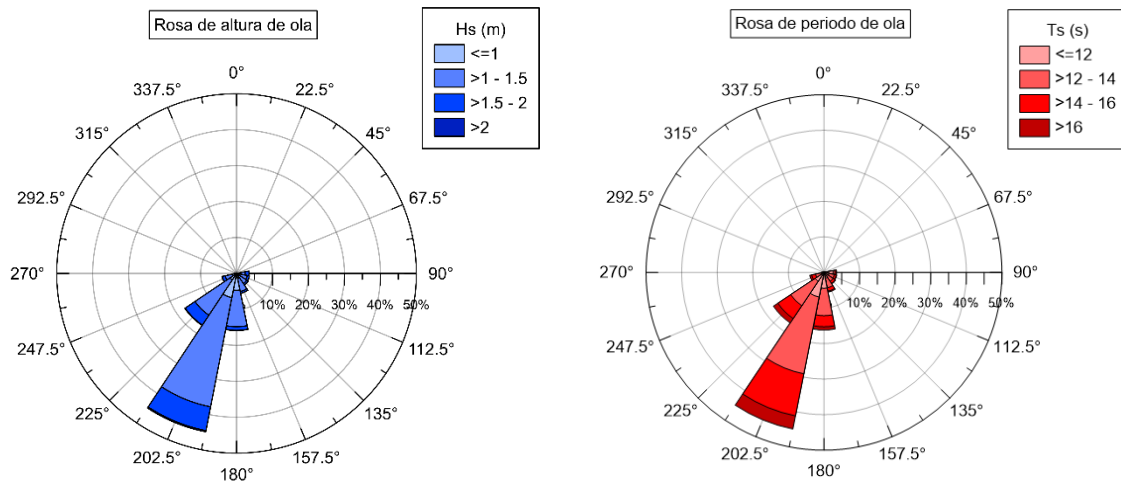


Figura 24. Rosa de altura de ola y rosa de periodo de ola correspondientes a Zicatela. Temporada no ciclónica.

En la temporada no ciclónica se disminuye el porcentaje de olas con alturas comprendidas entre los 1 y 1,5 metros y oleaje con periodos entre los 12 y 14 segundos, al 35% y 25%, respectivamente. Por otro lado, se aprecia un incremento en el oleaje proveniente de los 180° y 225°. De manera concisa, en temporadas no ciclónicas las olas disminuyen su altura máxima, de manera ligera el periodo, y aumenta la dispersión de la dirección de origen del oleaje.

Para tener como valores de referencia los datos que serán introducidos en MWAPON, se utilizaron las siguientes figuras, que muestran la probabilidad conjunta Altura de ola - Periodo y Altura de ola - Dirección de ola.

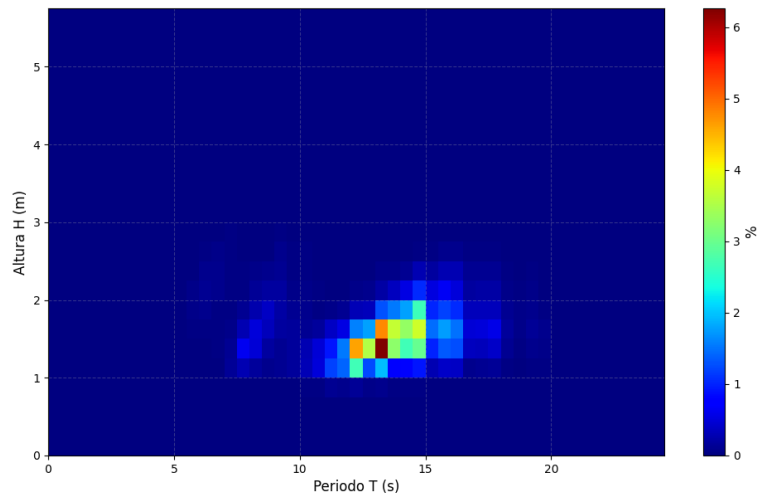


Figura 25. Probabilidad conjunta de altura de ola y periodo correspondientes a Zicatela. Temporada ciclónica.

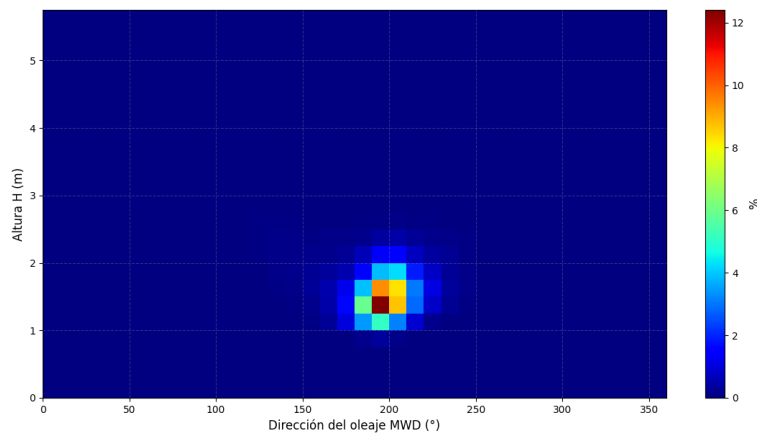


Figura 26. Probabilidad conjunta de altura de ola y dirección de ola correspondientes a Zicatela. Temporada ciclónica.

La obtención de las olas más frecuentes y probables dará paso a uno de los objetivos de la presente tesis. De la gráfica de probabilidad conjunta correspondiente a la temporada ciclónica, se aprecia que las olas más previsibles son aquellas que presentan alturas de olas de 1,25 a 1,50 metros, periodos comprendidos entre 13 y 13,5 segundos, y direcciones entre los 190 y 200 grados.

5.1.3. Cañón submarino y batimetría

Con los datos proporcionados por GEBCO fue posible obtener un gráfico que permitiera mostrar la batimetría de la zona de estudio. Con ello, se analizó con mayor detalle la presencia del cañón submarino próximo a Bahía Principal. Los gráficos obtenidos se muestran a continuación.

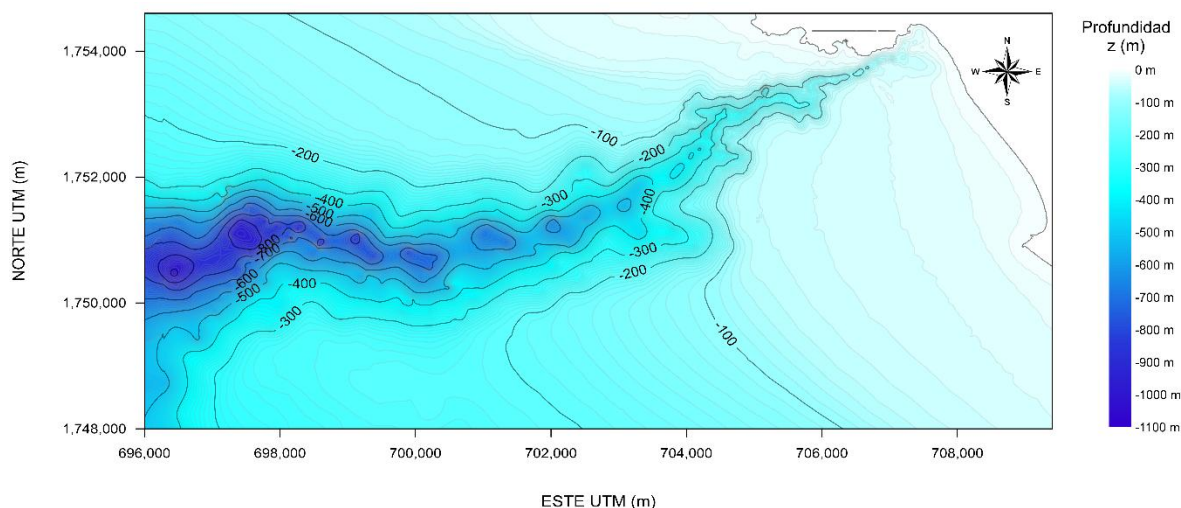


Figura 27. Batimetría de Zicatela.

Dentro del rango establecido se muestra solo una porción perteneciente al cañón submarino; no obstante, se logra apreciar que se llegan a profundidades de hasta 1.000 m. En la siguiente figura se muestra el perfil correspondiente al cañón, donde la distancia 0 indica el extremo izquierdo mostrado en la Figura 45, y el extremo derecho corresponde a la punta del cañón, cercano a la costa.

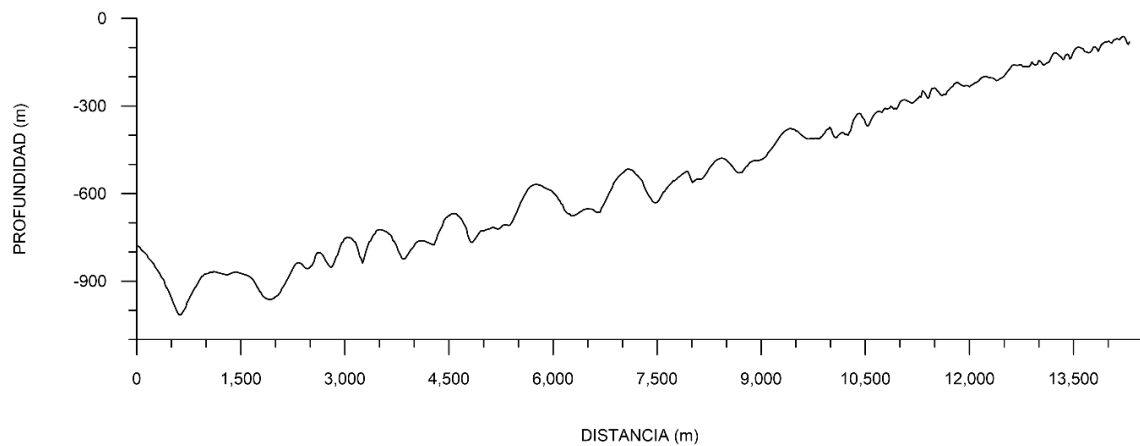


Figura 28. Perfil batimétrico del cañón submarino.

De igual manera, se desarrolló un mapa de profundidades correspondiente a la zona de estudio mediante un script en Python.

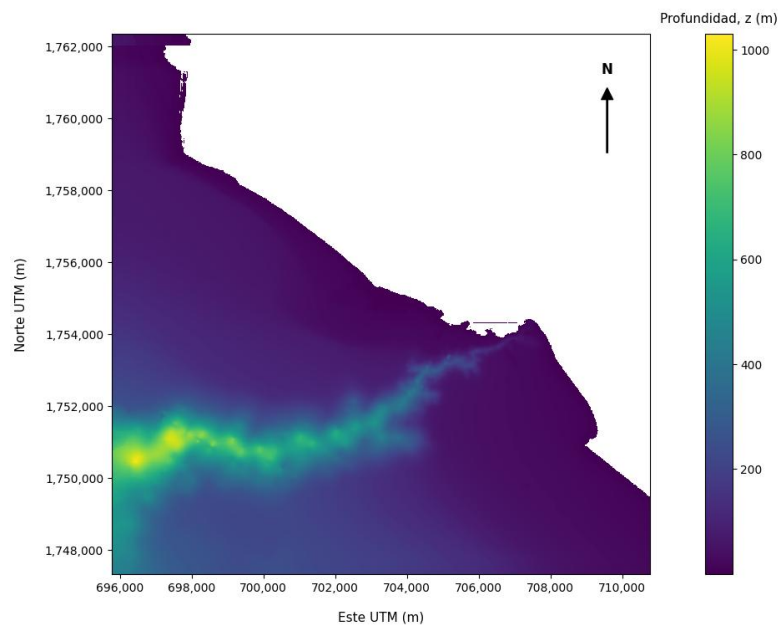


Figura 29. Mapa de profundidades obtenido con Python 3.

La presencia del cañón submarino afecta significativamente el comportamiento del oleaje local, tal como se revisó anteriormente en los casos de Hossegor, Nazaré y Half Moon Bay.

Aunque en la Figura 27 el cañón se muestra acotado en la región suroeste, la profundidad del cañón descende varios metros más. A pesar del reconocimiento nacional e internacional de la zona y su influencia en el oleaje, el cañón submarino carece de estudios batimétricos detallados que permitan definir sus características puntuales.

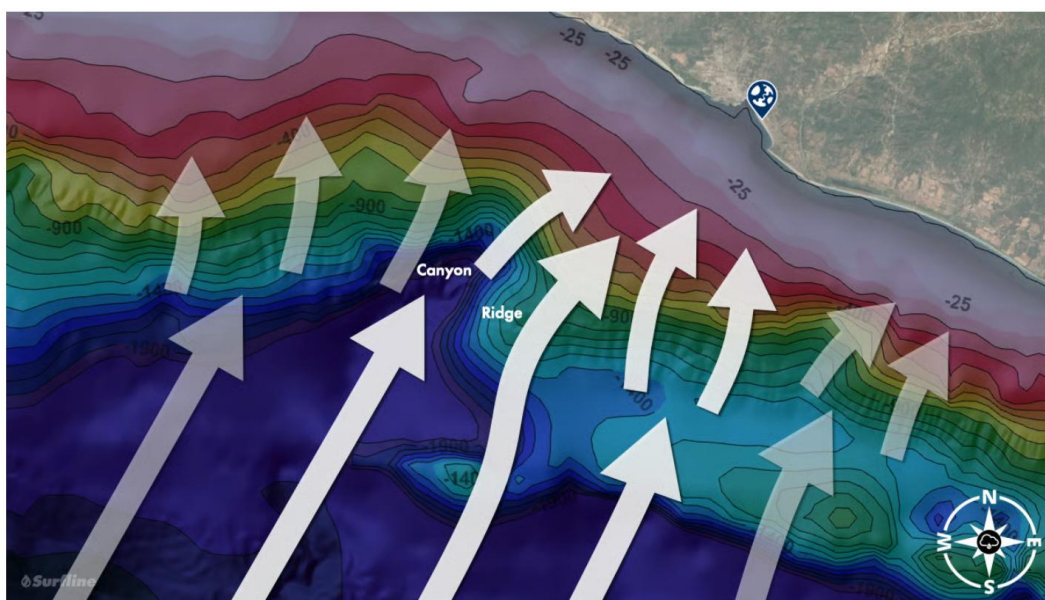


Figura 30. Interacción del oleaje con la batimetría de la zona. Tomado de: Mechanics: Puerto Escondido, México (2022).

En la Figura 30 y como resultado de la interacción del swell con las líneas isóbatas, se resalta con flechas el cambio en la dirección del oleaje. Este cambio genera que el tren de olas focalice hacia la costa de Playa Zicatela y Bahía Principal. El oleaje refractado hacia la Bahía Principal provoca la convergencia de los trenes de ola, lo que conlleva una concentración de energía y, por consiguiente, un incremento en la altura y pendiente del oleaje.

La comunidad local, motivada por la importancia de la playa como destino de surf de clase mundial, está impulsando estudios sobre la batimetría, las corrientes y el transporte de sedimentos en la zona. Esto, con el objetivo de informar a surfistas,

legisladores e ingenieros acerca del funcionamiento de este sistema de rompiente, así como los factores que pueden afectarlo negativamente.

Por último, utilizando la relación de dispersión, se obtuvo un mapa que representa las longitudes de onda en función de la profundidad.

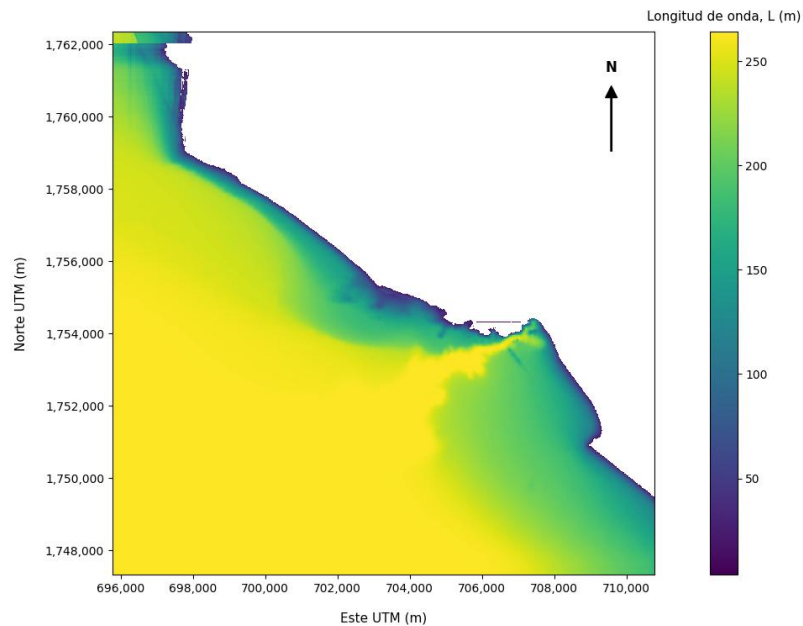


Figura 31. Mapa de longitudes de onda obtenido con Python 3.

El espectro cuenta con una variación entre 0 y 250 m, aproximadamente. Se obtiene que, de acuerdo con el rango de colores utilizado, dentro de la zona en color amarillo se encuentran aguas profundas, en color verdoso la zona de transición y en color azul la zona de aguas someras.

Se observa una disminución significativa en la longitud de onda conforme el oleaje se aproxima a la línea de costa. Este efecto está directamente relacionado con el someramiento del oleaje, pues la disminución en la longitud es un efecto generado por el aperaltamiento de los trenes de ola.

5.1.4. Modelación hidrodinámica con MWAPON

A partir de las gráficas de probabilidad conjunta que se generaron anteriormente, fue posible determinar las condiciones de oleaje más susceptibles de ocurrir. En ellas, se aprecian las variaciones en el comportamiento del oleaje bajo los cambios en los parámetros.

A partir de la Figura 25, correspondiente a la probabilidad conjunta altura de ola y periodo de ola en la temporada ciclónica, se determina como caso más probable aquel con 1,375 m de altura de ola y 13,25 segundos de periodo. Asimismo, a partir de la Figura 26, se establece como condición más probable aquella con 1,375 metros de altura de ola y direcciones provenientes de los 195°.

Inicialmente se generaron veinte condiciones para analizar el comportamiento del oleaje. Los datos introducidos al software se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 4. Lista de casos a ejecutar en MWAPON.

N.º caso	Dirección (°)	Altura (m)	Periodo (s)
1	197,5	1,375	13,25
2	197,5	1,125	12,125
3	187,5	1,375	13,25
4	187,5	1,125	12,125
5	207,5	1,375	13,25
6	207,5	1,125	12,125
7	197,5	1,375	7,50
8	197,5	1,375	10,50
9	197,5	1,375	12,00
10	197,5	1,375	14,50
11	197,5	1,375	12,75
12	197,5	1,375	13,00
13	197,5	1,375	13,50
14	197,5	1,375	13,75
15	182,5	1,375	13,25
16	192,5	1,375	13,25
17	205,5	1,375	13,25
18	212,5	1,375	13,25
19	217,5	1,375	13,25

20	222,5	1,375	13,25
----	-------	-------	-------

En el análisis individual de las gráficas destaca el caso 16, puesto que bajo estas condiciones se aprecian mayores alturas de ola y en mayor medida la reflexión de los trenes de ola. Además, las condiciones se asocian con las características de oleaje más probables obtenidas mediante las gráficas de probabilidad conjunta.

La gráfica generada en Surfer se muestra en la siguiente figura:

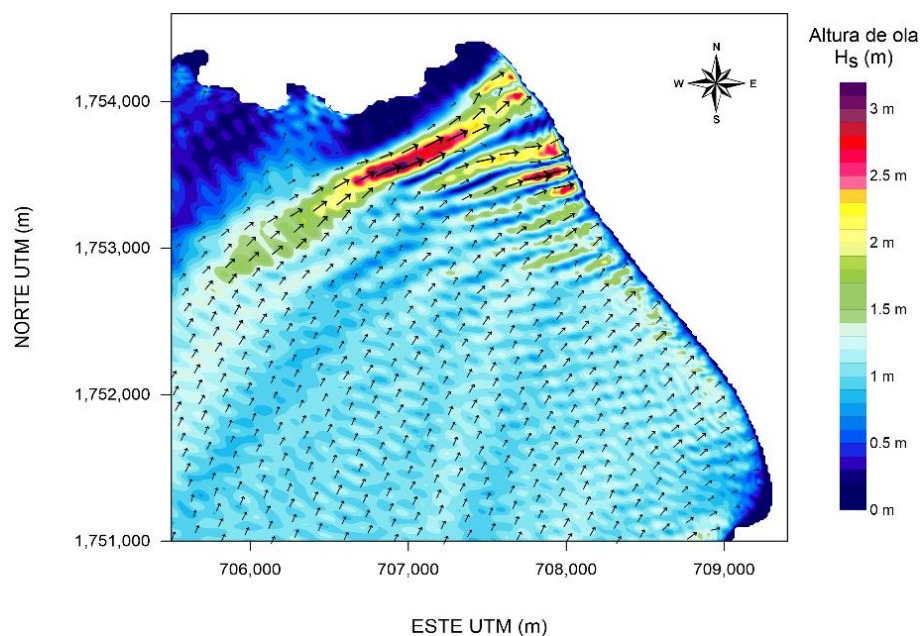


Figura 32. Mapa de altura de ola correspondiente a las características del caso 16.

Las condiciones simuladas anteriormente muestran de manera notoria los efectos de la transformación del oleaje, presentándose alturas de ola de hasta 3,2 m, así como su aumento en las zonas cercanas a la costa de la zona norte de Playa Zicatela, previo al rompimiento.

Las flechas dentro del mapa muestran la dirección de propagación del oleaje. Se puede observar la refracción y la concentración del oleaje cuando se encuentra próximo al cañón submarino.

A partir de las condiciones anteriores, se definieron una mayor cantidad de escenarios considerando variaciones en la dirección de procedencia, la altura de ola y el periodo del oleaje, esta vez con alturas de ola alrededor de 1 m. En total, se ejecutaron 18 casos adicionales en el software conforme a la lista que se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 5. Lista de casos adicionales para simulación.

N.º caso	Dirección (°)	Altura (m)	Periodo (s)
1	200,0	1,00	13,25
2	197,5	1,00	13,25
3	195,0	1,00	13,25
4	190,0	1,00	13,25
5	187,5	1,00	13,25
6	185,0	1,00	13,25
7	192,5	1,75	13,25
8	192,5	1,50	13,25
9	192,5	1,25	13,25
10	192,5	0,75	13,25
11	192,5	0,50	13,25
12	192,5	0,25	13,25
13	192,5	1,00	14,00
14	192,5	1,00	13,75
15	192,5	1,00	13,50
16	192,5	1,00	13,00
17	192,5	1,00	12,75
18	192,5	1,00	12,50

5.1.4.1. Transformaciones del oleaje inducidas por el cañón submarino

Anteriormente se estableció que la presencia del cañón submarino afectaba la propagación y la transformación del oleaje. No obstante, es de interés visualizar de manera gráfica las respectivas variaciones, así como obtener aproximadamente los

puntos donde los cambios se presentan en mayor magnitud. Asimismo, es de interés evaluar y analizar la sensibilidad de los parámetros involucrados, como el periodo, dirección de propagación y altura de ola.

5.1.4.1.1. Caso más energético

A partir de los resultados de las simulaciones con las variaciones anteriormente establecidas, se determinó el caso donde las condiciones introducidas mostraron el oleaje con mayor altura de ola. La Figura 33 corresponde a las características asociadas al caso 16 de la Tabla 5.

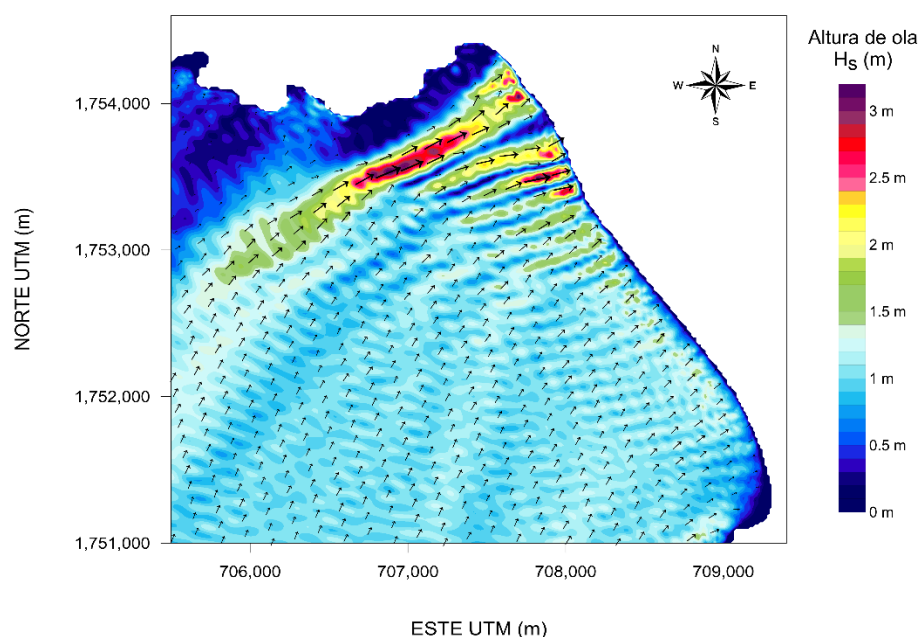


Figura 33. Mapa de altura de ola correspondiente a las características del caso 16 de la Tabla 5.

El análisis de la figura muestra que el oleaje generado alcanza alturas de hasta 3,3 metros. Se observa notablemente la reflexión de los trenes de ola, así como la refracción y la concentración del oleaje debido a la presencia del cañón submarino.

5.1.4.1.2. Caso disminuyendo la reflexión

Nuevamente se utilizó el caso correspondiente al caso 16 con las características mostradas en la Tabla 5. En esta nueva simulación se realizó la modificación de la batimetría, especialmente en profundidades cercanas a la costa de Bahía Principal.

Los cambios generados consisten en modificaciones en las profundidades menores a 5 metros, estableciendo una única profundidad de 5 metros. El cambio tuvo como objetivo eliminar las variaciones batimétricas que se encuentran en la zona somera, de esta manera se aísla su influencia sobre la transformación del oleaje y se puede observar su comportamiento y la sensibilidad al cambio. El mapa resultante se muestra en la Figura 34.

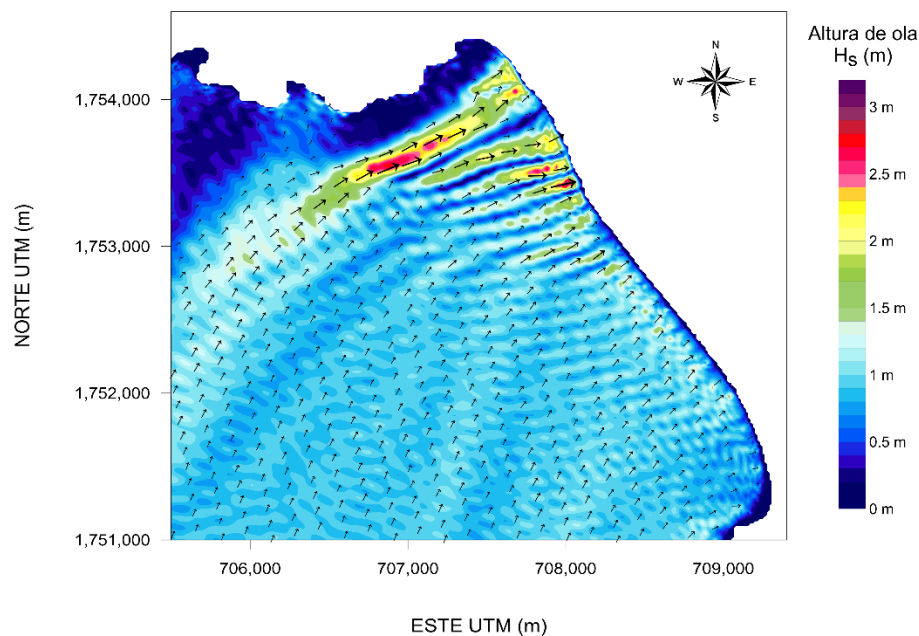


Figura 34. Oleaje con modificación en la batimetría.

La Figura 34 muestra que la altura y la concentración del oleaje disminuyeron, alcanzando alturas máximas de hasta 3 m en la zona del cañón submarino. En mayor

proporción se encuentran alturas de ola de hasta 2,7 m. También disminuyó el aumento en las alturas de ola en la costa norte de Playa Zicatela.

5.1.4.2. Superficie libre, altura de ola y energía

La ejecución del modelo en MWAPON generó un archivo perteneciente a la superficie libre estableciendo las condiciones de referencia asociadas a las características del caso 16 de la Tabla 5, con el cual se determinó el siguiente mapa:

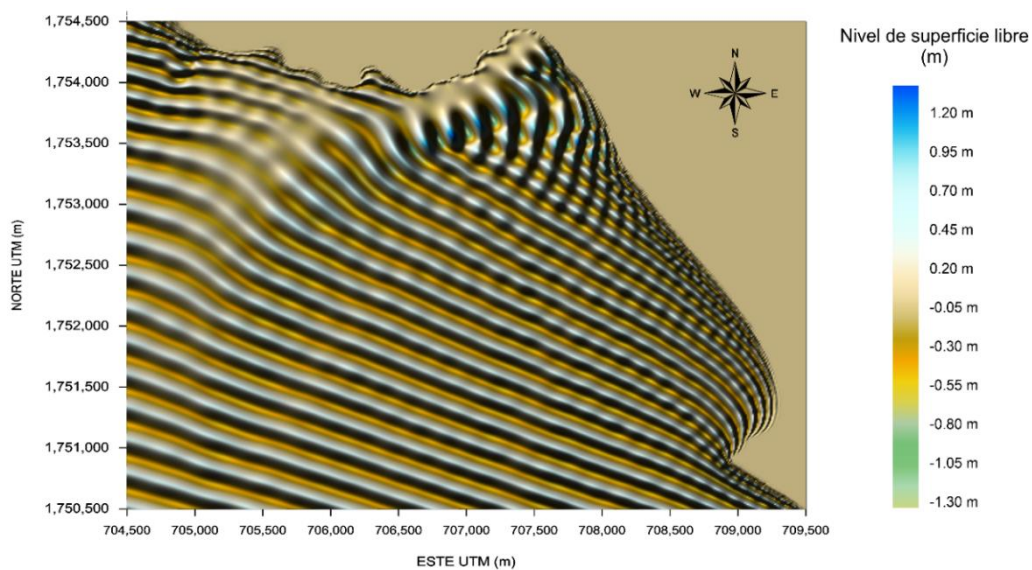


Figura 35. Superficie libre. Caso 16 con batimetría modificada.

La Figura 35 muestra a los trenes de ola propagándose desde la región suroeste, y comienzan a refractarse cuando se posicionan por encima del cañón submarino; así como ocurre la difracción del oleaje en la zona sur de Playa Zicatela debido a la presencia de una punta rocosa.

Por otro lado, ocurre un cambio de dirección en la propagación del oleaje en la zona norte de Playa Zicatela y cercana a Bahía Principal. La siguiente figura muestra un acercamiento a la zona de interés.

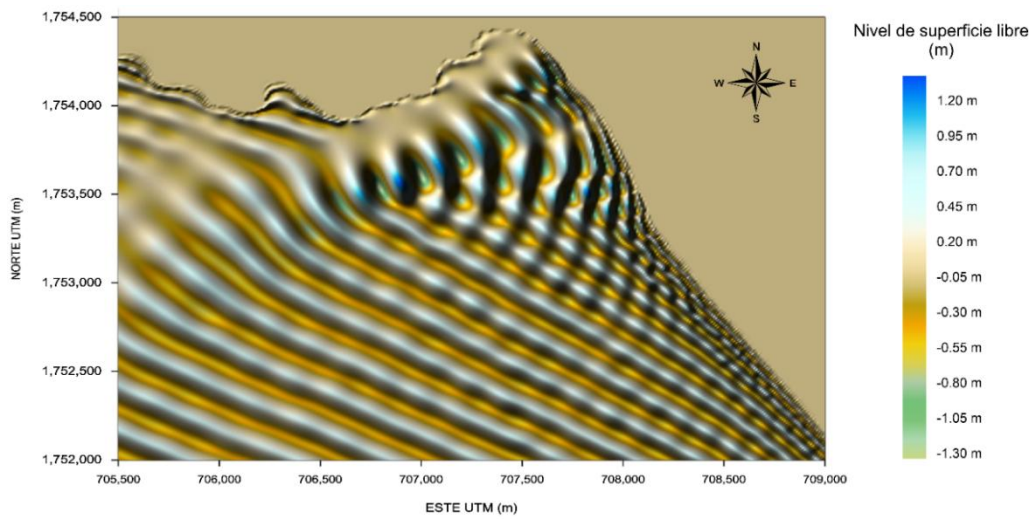


Figura 36. Superficie libre con acercamiento a Bahía Principal.

Dentro de esta zona, se puede apreciar el cambio en la dirección del oleaje, que inicialmente podría atribuirse a efectos de refracción, donde los trenes de ola provenientes de la zona suroeste cambian de dirección hacia el este. Adicionalmente, el inicio del cambio de dirección de los trenes de ola se encuentra situado sobre el cañón submarino.

Para describir y observar de mejor manera la refracción del oleaje, se establecerán cuatro zonas denominadas como Zona A, Zona B, Zona C y Zona D, en las ubicaciones mostradas en la Figura 37. La zona A corresponde a la propagación del oleaje previo al cañón submarino; la zona B se ubica sobre el cañón submarino; la zona C se localiza previo a la salida del cañón, y la zona D se sitúa a un costado del cañón.

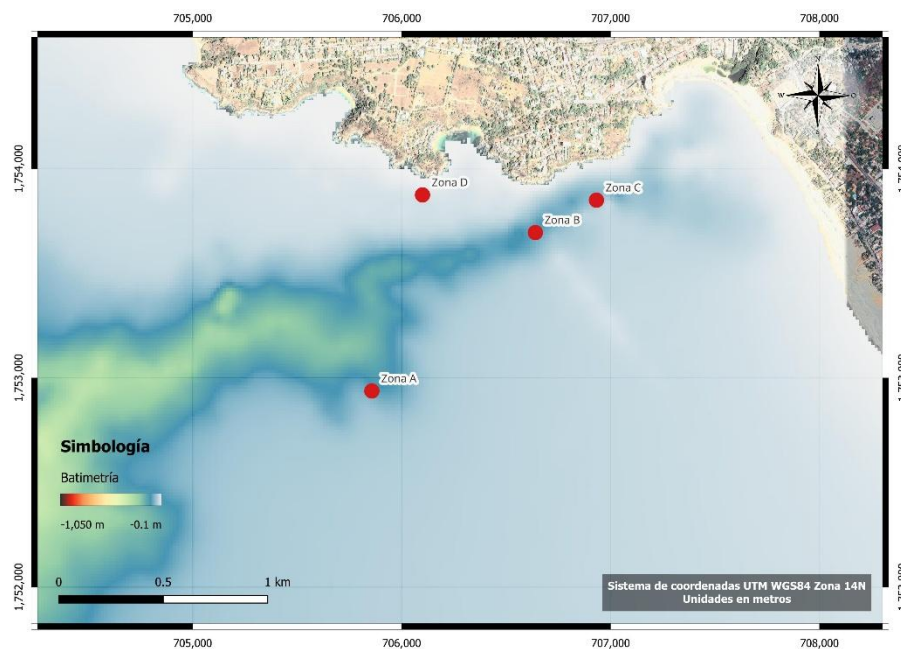


Figura 37. Zonas A, B, C y D correspondientes al análisis espacial de la dirección de oleaje.

Las figuras siguientes presentan los acercamientos a las zonas previamente mencionadas. El tamaño de las flechas de propagación es directamente proporcional a la altura de la ola, por lo que será posible visualizar la variación espacial de las alturas. Con motivo de mejorar la interpretación de la ubicación con respecto al cañón submarino, los mapas se mostrarán con la batimetría.

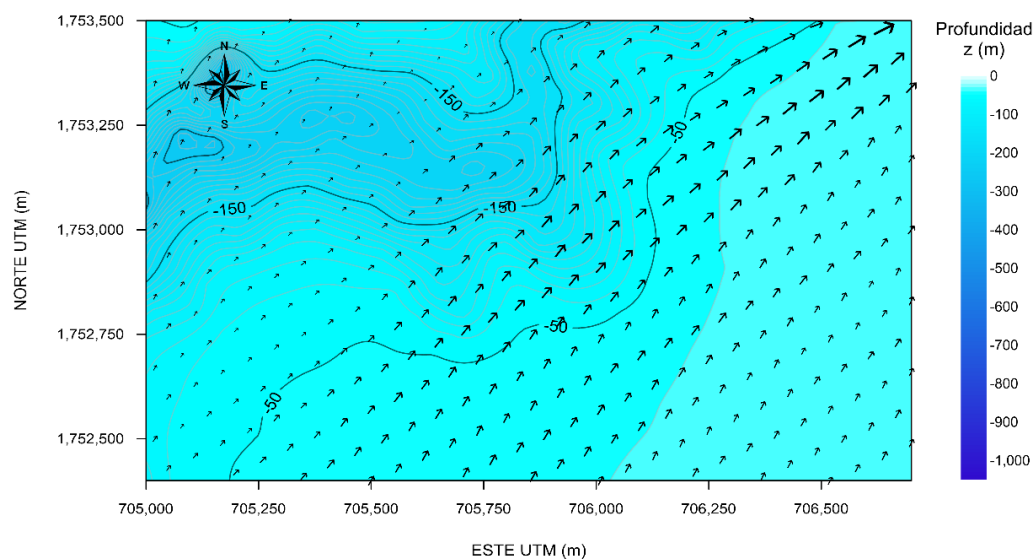


Figura 38. Dirección de propagación del oleaje en la zona A.

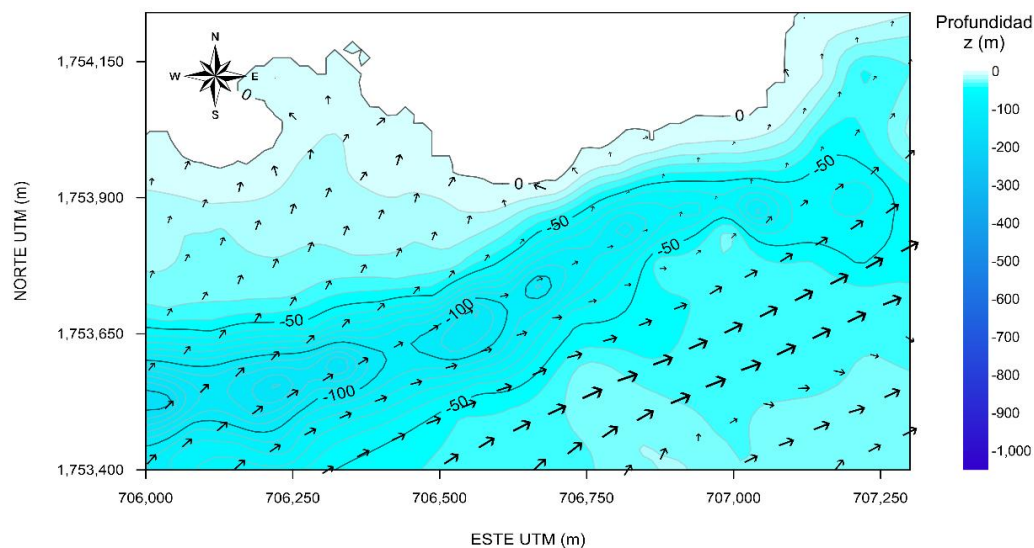


Figura 39. Dirección de propagación del oleaje en la zona B.

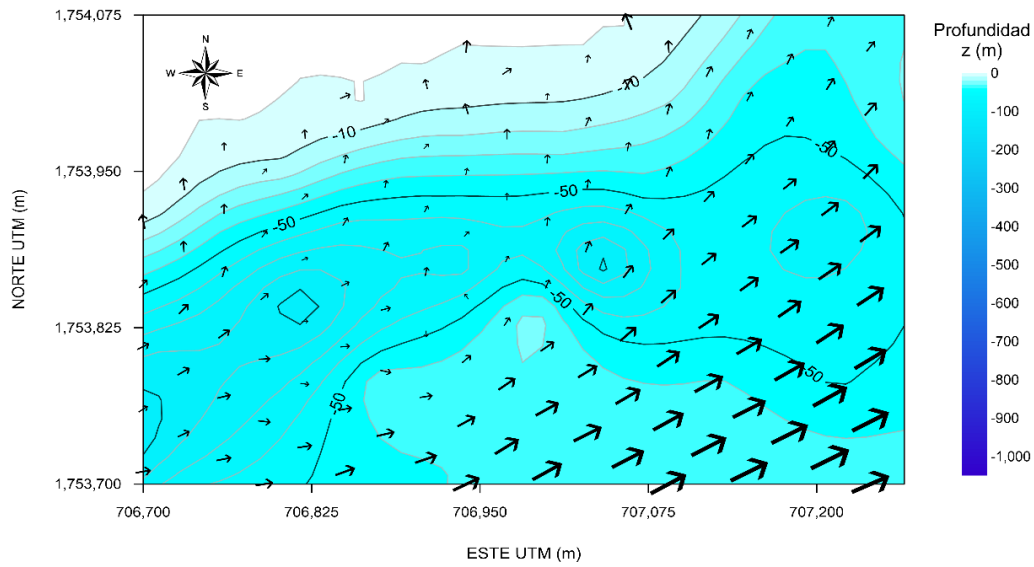


Figura 40. Dirección de propagación del oleaje en la zona C.

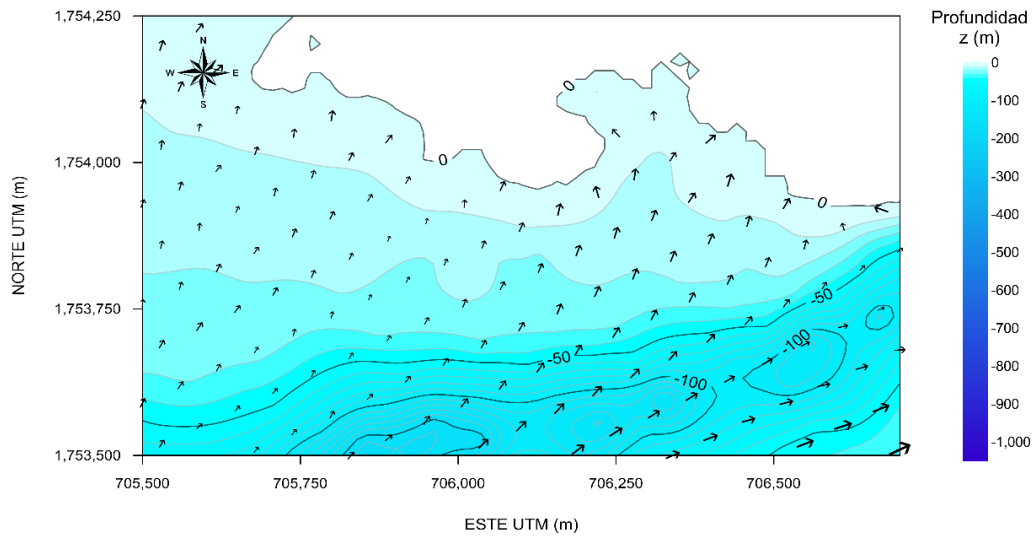


Figura 41. Dirección de propagación del oleaje en la zona D.

La zona A muestra la dirección del oleaje cuando empieza a refractarse. Los trenes de ola comienzan a cambiar de dirección a medida que se van acercando a la zona del cañón submarino. La zona B muestra el oleaje completamente redireccionado hacia Playa Zicatela como consecuencia de la refracción previa, así como también se muestran ligeras variaciones direccionales de los trenes que se propagan por encima del cañón submarino.

En cuanto a la zona C, las flechas de dirección ubicadas sobre el cañón submarino se presentan en tamaños pequeños, indicando que dentro de esta zona el oleaje no se propaga con alturas de gran magnitud. No obstante, a un costado del cañón se resaltan alturas de ola mayores.

Finalmente, dentro de la zona D los trenes de ola se refractan nuevamente, con dirección a la zona norte, efecto derivado de la disminución en la profundidad del fondo marino, provocando que se propaguen de manera paralela a las líneas batimétricas.

Por otro lado, cercano a la costa de Playa Zicatela, se muestran en la Figura 42 las zonas que presentan cambios significativos en las alturas de ola con respecto a la línea batimétrica de 5 metros. Las zonas están delimitadas como Zona 1, Zona 2 y Zona 3, en colores verde, rojo y azul, respectivamente, además de la línea batimétrica en color rosa.

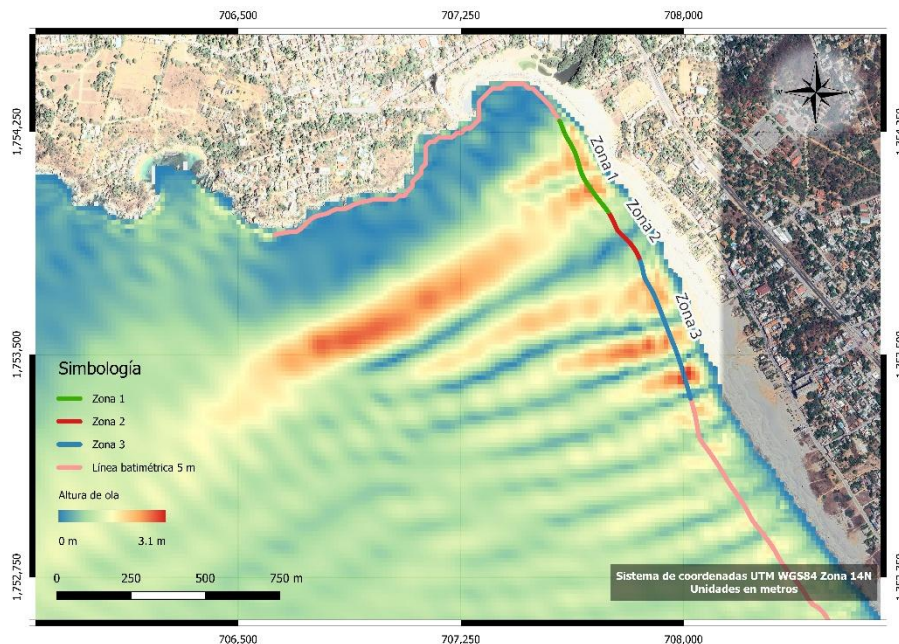


Figura 42. Zonas 1, 2 y 3 correspondientes al análisis de la distribución espacial de la altura de ola en Playa Zicatela.

La Zona 1 se muestra como la segunda sección de mayores alturas de ola con respecto a la línea batimétrica, en cambio, en la Zona 2 se presenta un descenso en la altura de manera drástica. En el caso de la Zona 3, la altura de ola nuevamente aumenta hasta aproximadamente 3.3 metros. La gráfica con las zonas delimitadas se muestra en la Figura 43, en el que el final de rango de la línea batimétrica corresponde al término de Playa Zicatela.

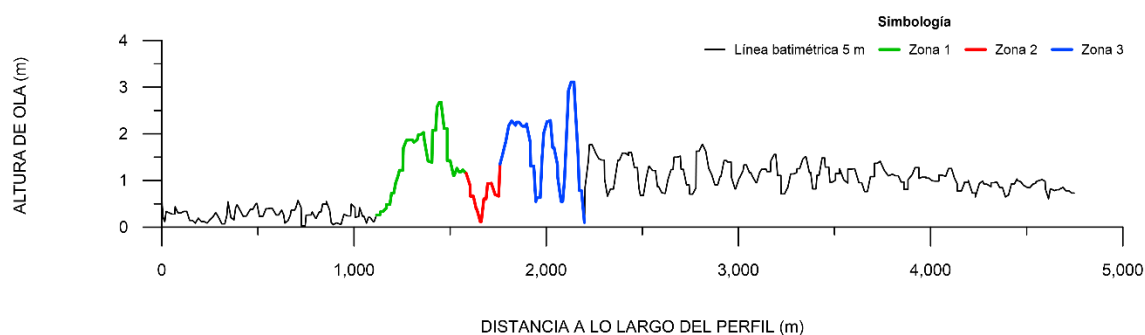


Figura 43. Variación longitudinal de altura de ola correspondiente a la línea batimétrica de 5 m.

Se puede observar que los trenes de ola que llegan a Bahía Principal son de baja altura, como se muestra en la figura anterior dentro de las distancias 750 a 1.100 metros; en la zona superior de Playa Zicatela llega el oleaje de mayor altura correspondiente a la zona 1 y 3; posterior a este rango, las alturas de ola comienzan a descender gradualmente.

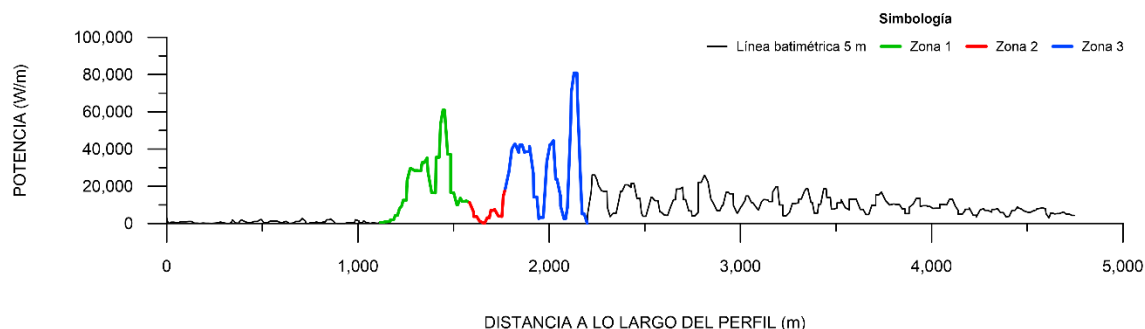


Figura 44. Variación longitudinal del flujo de energía correspondiente a la línea batimétrica de 5 m.

Asimismo, la Figura 44 muestra variación del flujo de energía, resaltando los intervalos correspondientes a las zonas 1, 2 y 3. El flujo de energía es congruente con los aumentos y disminuciones de las alturas de ola.

Finalmente, se mostrará la comparación en la variación longitudinal correspondiente al perfil del cañón submarino y un eje adicional paralelo. El objetivo es determinar la influencia del cañón sobre el oleaje, tanto para la altura de ola como para el flujo de energía.

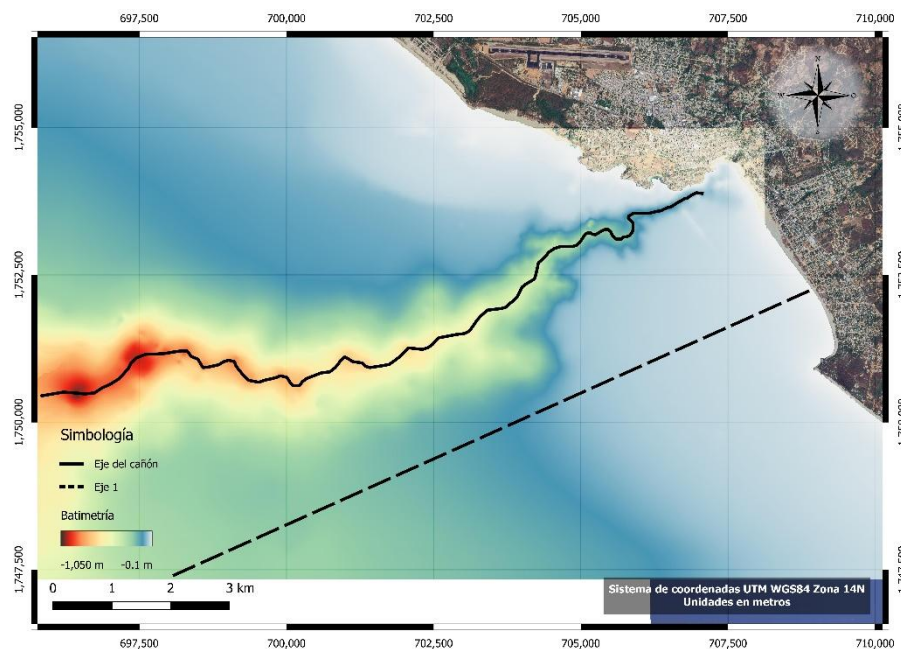


Figura 45. Localización del eje del cañón y el Eje 1 adicional.

Las gráficas correspondientes al flujo de energía y altura de ola se muestran a continuación.

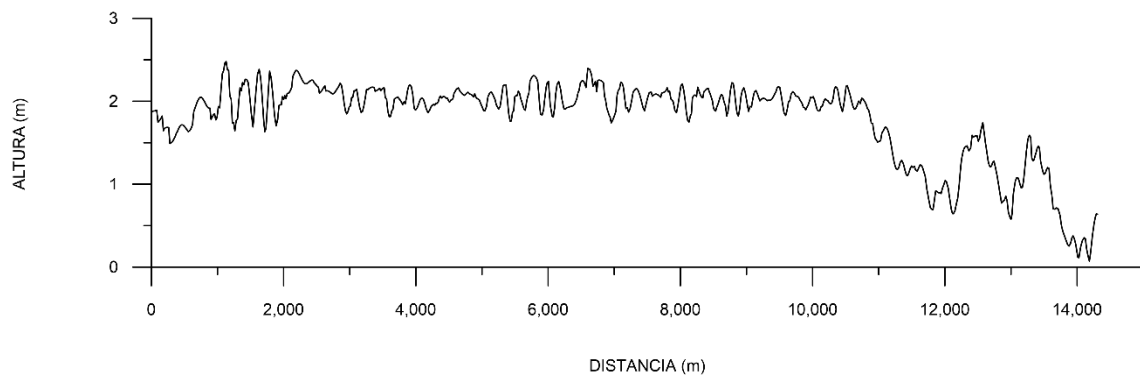


Figura 46. Altura de ola correspondiente al eje del cañón submarino.

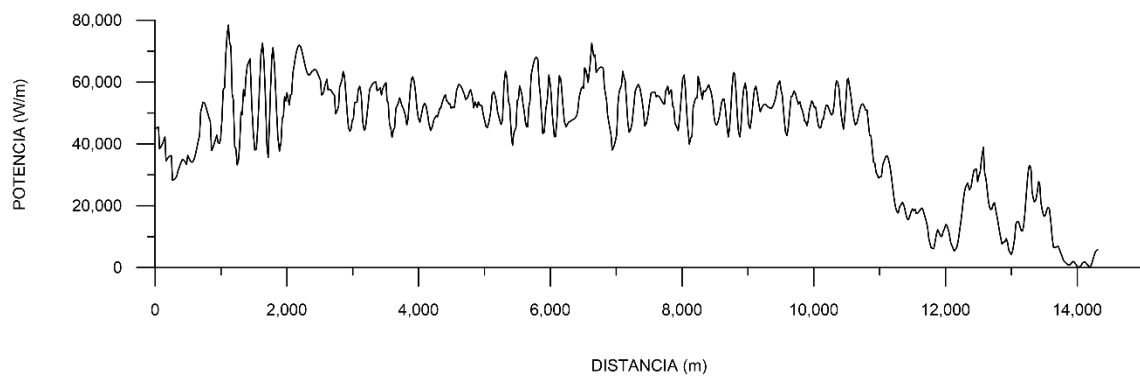


Figura 47. Flujo de energía correspondiente al eje del cañón submarino.

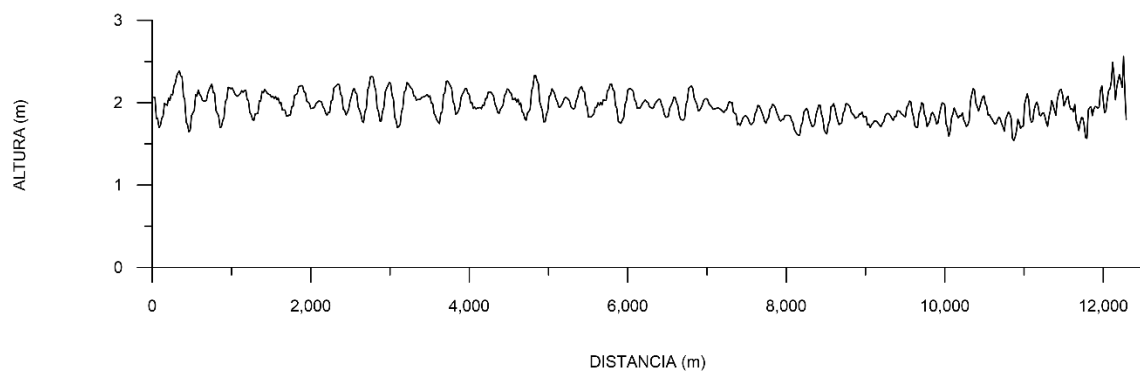


Figura 48. Altura de ola correspondiente al Eje 1.

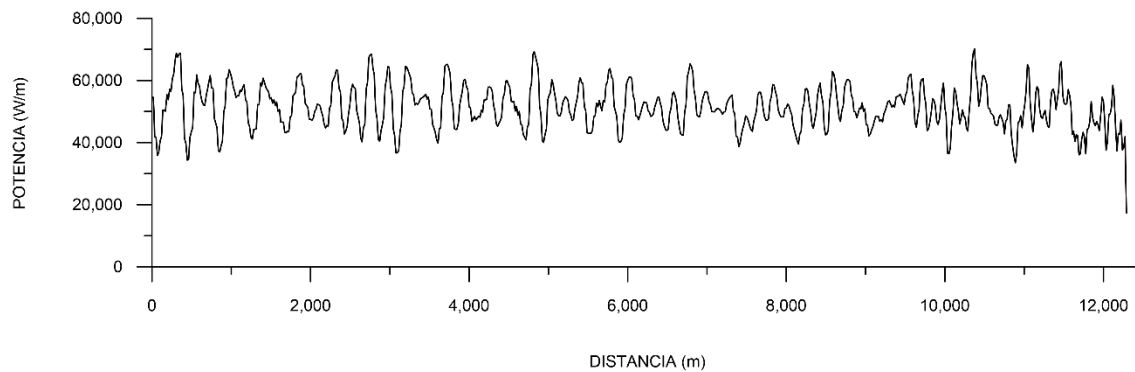


Figura 49. Flujo de energía correspondiente al Eje 1.

Nuevamente se aprecia que las alturas de ola y el flujo de energía presentan un patrón de comportamiento similar. Se destaca el descenso drástico en las alturas de ola y el flujo de energía correspondiente a la zona cercana a la salida del cañón. En cuanto al perfil paralelo, las condiciones de altura de ola y flujo de energía se mantienen con oscilaciones continuas a lo largo del trayecto, destacando únicamente el aumento en la altura de ola y el descenso en el flujo de energía al final del eje, perteneciente al tramo con cercanía a la costa.

5.1.4.3. Corrientes inducidas por el oleaje

Los resultados de simulación incluyen las direcciones de las corrientes inducidas por el oleaje. A diferencia del oleaje, las corrientes son originadas por la transferencia de energía de las olas hacia la columna de agua, por lo que las direcciones de las corrientes no son similares a la dirección del oleaje en determinados puntos.

En el análisis se determinó que se generan corrientes de retorno, o *rip currents*, en la zona de Playa Zicatela. La Figura 50 muestra la distribución de las corrientes sobre la costa.

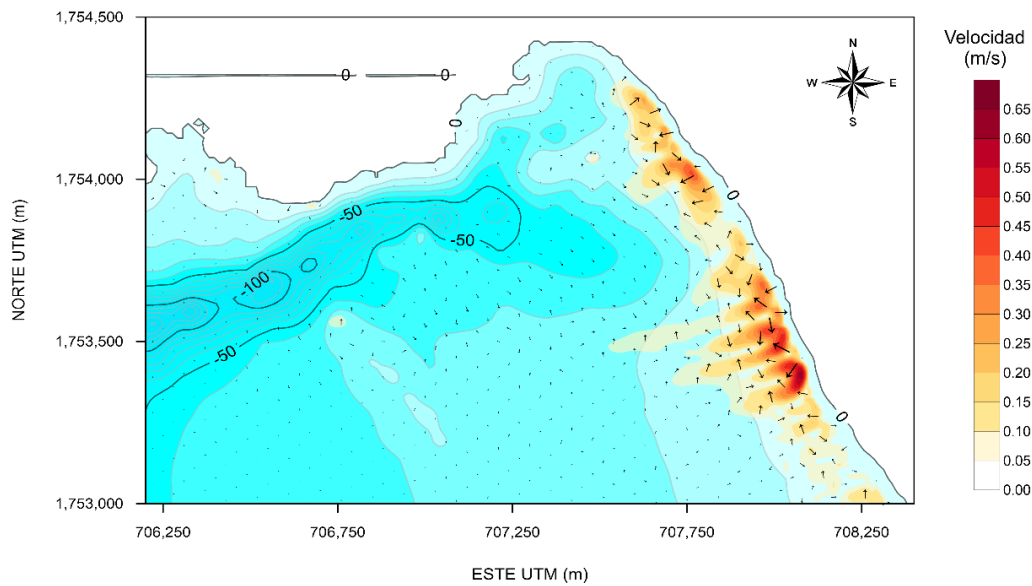


Figura 50. Corrientes inducidas por el oleaje.

Las corrientes se presentan a lo largo de Playa Zicatela, con importantes puntos que destacan por concentrar mayores niveles de velocidad. Las corrientes de retorno se concentran en la zona centro de la playa. De igual manera, la ubicación de las altas velocidades de las corrientes corresponde a las zonas donde se presenta el oleaje de gran altura cercana a la costa. En el caso de la Figura 50, las mayores velocidades se presentan en el área correspondiente a la Zona 3, de la Figura 42. Por otro lado, en la zona norte, a un costado de Bahía Principal, no ocurre el mismo efecto.

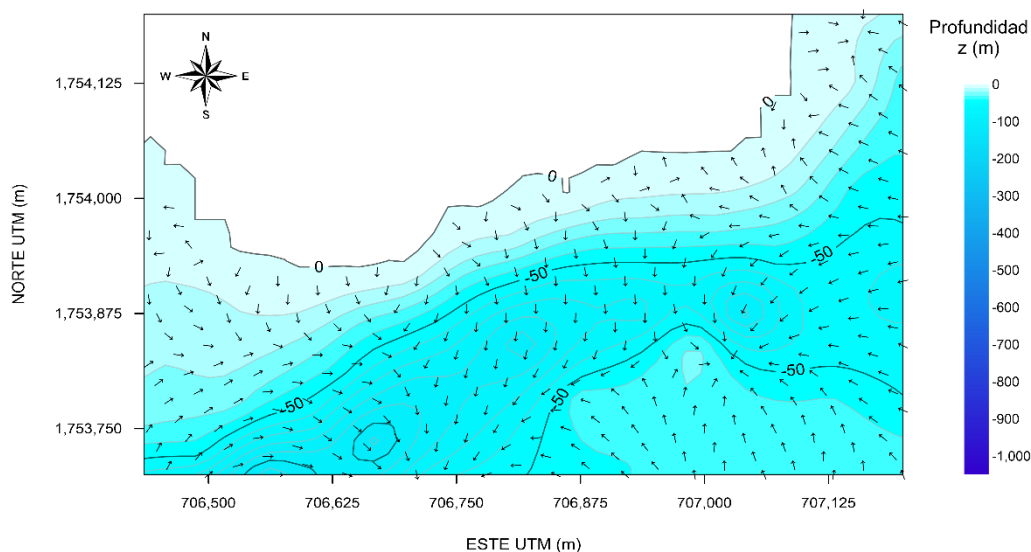


Figura 51. Corrientes en la zona cercana a Bahía Principal.

La zona litoral que se muestra en la Figura 51 presenta corrientes con direcciones mayormente en sentido opuesto a la costa, lo que se traduce en corrientes de retorno existentes a lo largo de la costa. Además, el flujo de las corrientes continúa su recorrido aun estando dentro de la zona del cañón submarino. El efecto de proporcionalidad del tamaño de las flechas de dirección con base en la velocidad de las corrientes fue desactivado para mejorar la visualización.

Para terminar el análisis de las corrientes inducidas, se muestra la Figura 52. Existe un punto ubicado en las proximidades de la coordenada 706,720 m E, 1,753,675 m N, que destaca por la concentración de las direcciones de las corrientes submarinas.

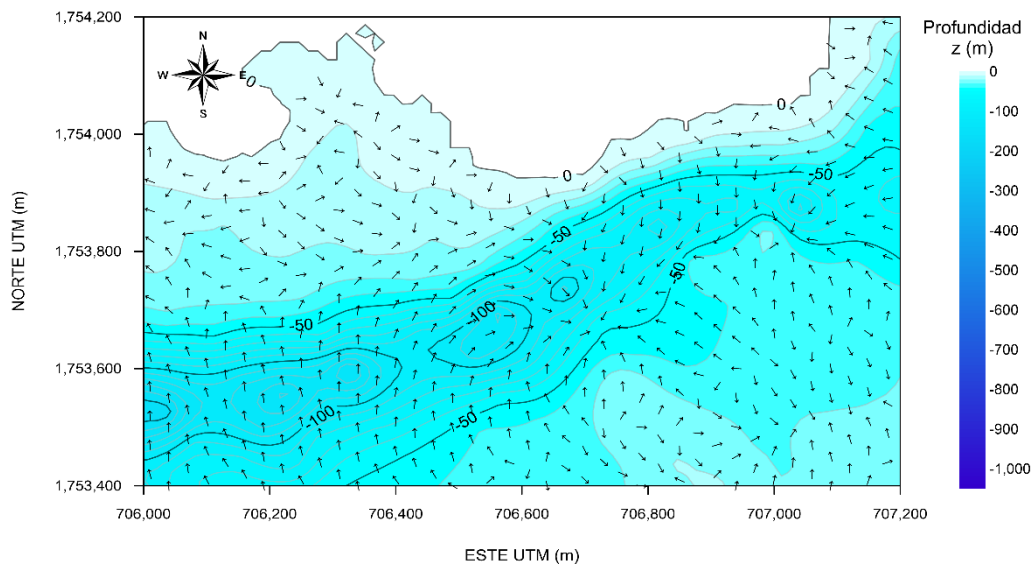


Figura 52. Zona de concentración de las corrientes submarinas.

El mismo efecto ocurre cerca de la coordenada 707,020 m E, 1,753,800 m N; sin embargo, solamente se analizará el primer punto mencionado, pues guarda relación con el oleaje reflejado mostrado en la Figura 36.

5.2. Caracterización de sitios de surf similares

Una vez que se conocen a detalle las características batimétricas de las zonas, así como la obtención del registro de oleaje, se muestran a continuación las rosas de oleaje y periodo para Hossegor, Nazaré y Half Moon Bay, respectivamente. Las gráficas servirán de apoyo para conocer la distribución direccional del oleaje y la frecuencia de ocurrencia asociada a distintos rangos de altura de ola y periodo.

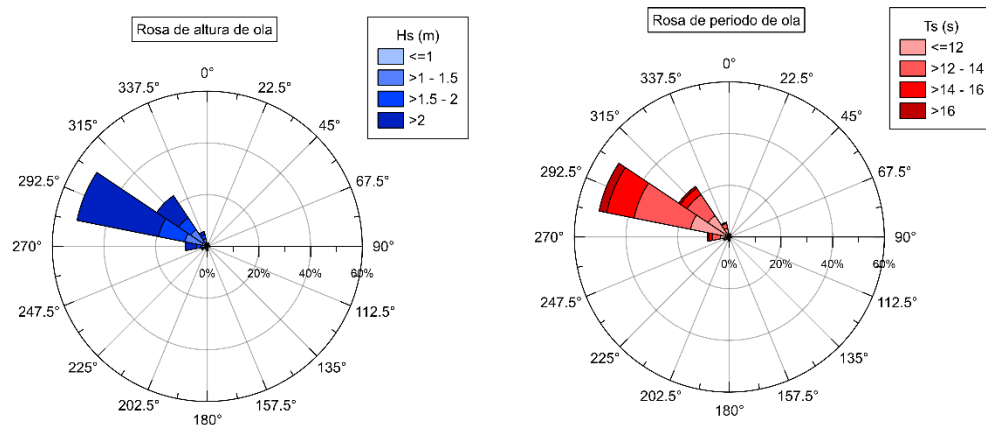


Figura 53. Rosa de altura de ola y rosa de periodo de ola para Hossegor, Francia. Temporada de oleaje.

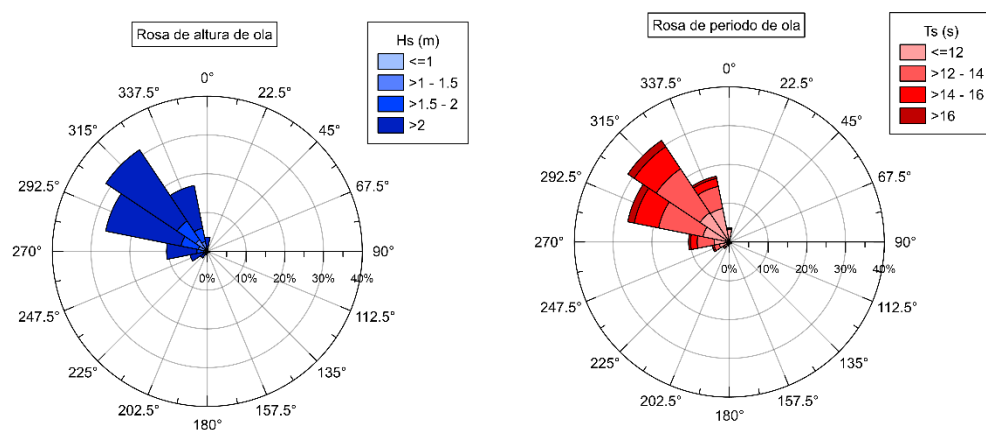


Figura 54. Rosa de altura de ola y rosa de periodo de ola para Nazaré, Portugal. Temporada de oleaje.

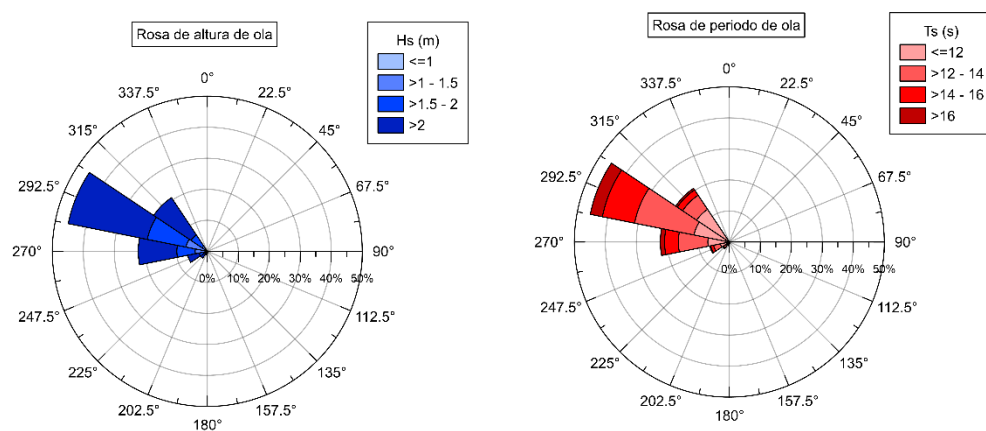


Figura 55. Rosa de altura de ola y rosa de periodo de ola para Half Moon Bay, EE. UU. Temporada de oleaje.

En los tres casos anteriores se nota una dominancia direccional del oleaje correspondiente al oeste-noroeste, sin embargo, existen diferencias en cuanto a la distribución de la energía del oleaje.

Empezando con la región de Hossegor, se presentan olas consistentes en alturas de ola con distribución similar y en las zonas provenientes, siendo este de los $292,5^\circ$. Los periodos que predominan en su mayoría son aquellos comprendidos entre los 12 y los 14 segundos, lo que indica un oleaje energético.

En el caso de Nazaré, las gráficas muestran un aumento en la ocurrencia de oleaje con alturas mayores a los 2 metros y periodos similares que superan los 12 segundos, mostrando un oleaje energético similar a Hossegor. No obstante, este sitio presenta una distribución angular más amplia en cuanto a las direcciones provenientes del oleaje. La presencia del cañón submarino cercano interactuará posteriormente con los trenes de ola, induciendo procesos de refracción que modificarán la dirección de propagación y concentrarán el oleaje hacia la costa.

Finalmente, en el caso de Half Moon Bay se presenta un comportamiento similar a Hossegor. Existe una dominancia direccional del oleaje proveniente de los $292,5^\circ$, aunque con una mayor presencia de oleaje con alturas de superiores a los 2 metros. De igual manera se cuenta con oleaje energético, con una distribución significativa de trenes de ola que presentan periodos por encima de los 12 segundos.

6. Discusión

Los parámetros estadísticos correspondientes a la altura de ola significativa y altura de ola cuadrática media describen las características del oleaje de manera representativa. Por un lado, la altura de ola significativa muestra un ponderado del tercio de olas de mayor tamaño, mientras que la altura cuadrática media proporciona un valor que está relacionado con la energía del oleaje, siendo la energía proporcional al cuadrado de la altura de ola.

El periodo de ola presenta, en primera instancia, valores descendientes a medida que se limita el conjunto de datos evaluado, lo que implica una disminución en el transporte de energía. Asimismo, los valores del periodo y las condiciones de generación sugieren oleaje de mar de fondo originado por tormentas, lo cual es consistente con el periodo de análisis seleccionado.

El oleaje que llega a la costa de Zicatela presenta una dirección de propagación constante en todo el año. La dirección de propagación media de los $202,5^\circ$ presenta una alta frecuencia, así como también el periodo perteneciente al rango 12 a 14 segundos, como se muestra en la Figura 23, perteneciente a la rosa de altura y periodo de ola elaborada a partir del registro completo de datos. Este planteamiento puede ser verificado con las gráficas de probabilidad de ocurrencia, donde se puede observar la persistencia de los rangos de dirección y periodo.

La batimetría de la zona evidencia un cañón submarino localizado a 1,6 kilómetros de la costa, aproximadamente. El análisis y la simulación numérica que se realizó se limitó a 14 km de extensión del cañón; no obstante, es importante señalar que la extensión y profundidad del cañón incrementa varios kilómetros mar adentro. El límite de extensión se estableció debido a que la fricción de fondo continúa sin interactuar con el oleaje en profundidades mar adentro, por lo que un aumento en la zona de simulación no presentaría efectos derivados de la batimetría. Por el contrario, una

disminución en la zona de simulación no incluiría los efectos de refracción conforme se propagan los trenes de ola cerca del cañón submarino.

Con relación a la pendiente asociada, cuenta con una pendiente media del 5,06%, lo que representa un aumento gradual en el fondo marino; sin embargo, la gráfica del perfil batimétrico muestra variaciones pronunciadas en la pendiente en ciertos tramos. Un análisis realizado por zonas muestra que la pendiente llega a tener inclinaciones altas, alrededor del 17%.

El estudio también contó con el análisis de las longitudes de onda. El cálculo se realizó para un valor de periodo igual a 13,25 segundos, el cual también se obtuvo a partir de la gráfica de probabilidad conjunta. El comportamiento de la longitud de onda es constante a lo largo del cañón hasta llegar a la zona de la costa. Las longitudes de onda se presentan con valores cercanos a los 250 metros. Esta característica permite que el oleaje ingrese a la costa con grandes cantidades de energía, lo que beneficia a los procesos de transformación del oleaje, principalmente la refracción, reflexión y someramiento.

Sumado a ello, la fricción de fondo no actúa en gran medida. La zona de propagación del oleaje es lo suficientemente profunda para que la pérdida de energía por fricción ocurra hasta zonas notablemente cercanas a la costa.

El caso 16 establecido en la Tabla 4, además de ser el más probable de ocurrir, generó el oleaje más energético en la mayor parte de la zona de estudio, por lo que se decidió utilizar estas condiciones como punto de partida para analizar los casos adicionales asociados a la Tabla 5.

Los casos adicionales cuentan con la particularidad de ser simulados sobre batimetría modificada en el área de Bahía Principal. Lo anterior se debe al intento de reproducir el proceso de aporte de sedimentos en la zona derivado de la colocación de la escollera ubicada a pocos metros del área. Anteriormente, se estableció que el aporte

de sedimentos desencadenó un incremento en el ancho de la zona costera, acompañado de una disminución notable en su pendiente. Los casos adicionales de simulación nacen de la necesidad de conocer el comportamiento del oleaje bajo estas nuevas condiciones, que, lamentablemente, continúan desarrollándose.

Las simulaciones revelan una disminución en la altura máxima de ola, no solo en la zona cercana a Bahía Principal, sino de forma general en la zona costera. Además de la disminución en las alturas de ola, también se muestra una disminución de zonas de propagación de oleaje, lo cual afecta la zona costera de Playa Zicatela.

Podemos establecer que la acumulación de arena ha logrado disminuir las alturas máximas de olas, así como también reducir la capacidad del oleaje de poder ser reflejado y desarrollarse a lo largo de la zona costera. Con esto, se muestra la sensibilidad que la propagación del oleaje posee a los efectos derivados de la aportación de sedimentos y la disminución de la pendiente costera en una zona relativamente pequeña.

La reflexión del oleaje puede ser visualizada en la Figura 36, donde el oleaje reflejado forma un abanico en la zona norte. El abanico comienza a originarse cuando el oleaje reflejado interactúa con el oleaje incidente. La zona de formación se localiza en la zona norte, a un costado de Bahía Principal, donde el nivel de superficie libre se mantiene constante.

La propagación del oleaje se observa en las figuras asociadas a las zonas establecidas en la Figura 37. La propagación mantiene su dirección inicial sin verse afectada por algún factor externo en la zona A. Una vez que entra en la zona B, correspondiente al cañón submarino, el oleaje se refracta, modificando su dirección. En esta zona es importante resaltar la concentración del oleaje, que se propaga por fuera del cañón, cuando anteriormente se estableció que su presencia concentraba el oleaje en su interior.

Las zonas C y D muestran el oleaje nuevamente refractándose hacia la costa, esta vez producto de la disminución progresiva de la profundidad conforme se aproxima al litoral, que a su vez dan origen a corrientes de retorno. Estas corrientes inducen un oleaje que se ve desplazado por fuera de la zona del cañón.

En cuanto a la zona costera de Playa Zicatela, los picos de altura de ola mostrados en la Figura 43 revelan que el oleaje es incrementado hasta 3 veces, ya que en los parámetros de entrada de simulación se estableció una altura inicial de 1 m. Dentro de esta área, también es posible visualizar la delimitación de las zonas de propagación de oleaje alto seguido de una zona donde el oleaje no presenta grandes alturas. Este comportamiento se muestra cíclico, disminuyendo en intensidad conforme se aleja de Bahía Principal. El mismo fenómeno se presenta en el análisis de la energía del oleaje, el cual muestra máximos de hasta 80.000 W/m.

Por otro lado, una evaluación del comportamiento del oleaje dentro y fuera de la zona del cañón distingue las variaciones en la transformación del oleaje asociadas a la presencia del cañón submarino. El comportamiento se muestra con mayor variabilidad en el oleaje propagado por encima del cañón; sin embargo, la principal diferencia se encuentra en la cabeza de este, donde ocurre una disminución pronunciada en la altura de ola. La altura mínima registrada coincide con el inicio del abanico, del cual se hizo mención anteriormente. El descenso de la altura de ola no se relaciona a la pérdida de energía por fricción de fondo, sino al desplazamiento del oleaje, que se desarrolla por fuera de la zona del cañón submarino debido a la reflexión y las corrientes de retorno originadas cerca de Bahía Principal.

Por el contrario, el eje de comparación muestra el comportamiento de la altura con variabilidad constante, sin ascensos ni descensos drásticos. El comportamiento puede verificarse en la Figura 46 y la Figura 48.

Finalmente, las corrientes de retorno se desarrollan con mayor intensidad a lo largo de la costa de Playa Zicatela. Las mayores velocidades se registran en la zona 3, correspondiente a la zona de mayores alturas de ola, seguidas por las observadas en la zona 2.

El origen de las corrientes de retorno está asociado a la reflexión del oleaje de la zona norte. Si bien es cierto que el oleaje permanece en la misma posición antes y después de realizar la modificación a la batimetría, es importante mencionar que la velocidad de las corrientes de retorno disminuye, así como disminuyen las alturas de ola.

7. Conclusiones y trabajo futuro

7.1. Conclusiones

El presente estudio permitió conocer el comportamiento y la transformación del oleaje perteneciente a la costa de Zicatela. La modelación numérica aplicada a la simulación de oleaje tomando datos de clima marítimo y batimetría de la zona logró una aproximación a las condiciones reales de manera significativa.

Se determinó que el clima del oleaje está dominado por oleaje de mar de fondo, originado principalmente por tormentas. La propagación dominante en un rango de dirección, un rango de periodo y un rango de altura de ola benefician a la zona costera, puesto que los procesos de transformación de oleaje actúan de manera repetitiva sobre una misma trayectoria a lo largo del tiempo. Esto favorece la concentración de energía, así como también mejora la calidad de rompientes en una zona que se destaca por la práctica de surf.

La batimetría desempeña un papel importante para la transformación del oleaje. Se evidenció que el cañón submarino controla en gran medida los procesos de transformación, a la vez que mejora la concentración del oleaje y su energía asociada. Al mismo tiempo, se reveló la importancia de la costa norte, cercana a Bahía Principal, en la reflexión del oleaje, lo cual permite el desarrollo de grandes alturas de ola, al igual que se destacó el impacto notable que genera la modificación batimétrica de la zona costera. El desarrollo del oleaje se muestra sensible a los cambios que puedan presentarse en la batimetría y la capacidad de reflexión de la costa cercana a Bahía Principal.

El oleaje también es influenciado por las corrientes de retorno en la zona norte, razón por la cual se forma el abanico de olas reflejadas desplazando el oleaje que se propaga hacia Playa Zicatela. Las velocidades más elevadas se encuentran cercanas a la costa

de Playa Zicatela, su velocidad alta puede derivar en riesgos de accidentes hacia turistas que se encuentren desarrollando actividades recreativas o deportivas.

La combinación de los efectos generados como consecuencia de la construcción de la estructura genera procesos de erosión y acreción en la zona costera de Zicatela. Estudios previos muestran que la acreción predominó sobre la erosión, lo que disminuye la capacidad de reflexión del oleaje, el cual es necesario para la formación de olas con la calidad requerida para la práctica del surf.

Con la eliminación de las variaciones batimétricas se demostró la disminución significativa de la altura máxima del oleaje, pasando de alturas de 3,3 m a 2,7 m, una reducción de 60 cm, y una disminución en las zonas de rompientes en Playa Zicatela. Con esto, podemos establecer que se han reducido las propiedades reflectivas de la zona costera norte, importante para el desarrollo de oleaje con la calidad necesaria para la práctica del deporte.

El análisis para la protección de Playa Zicatela y Bahía Principal requiere de recursos y estudios con mayor nivel de detalle que sobrepasan el alcance de la presente tesis. Con el estudio realizado, se ilustra el impacto de la construcción de infraestructura costera en la dinámica litoral.

Las obras de ingeniería que se planeen desarrollar en zonas costeras deben realizarse tras una evaluación detallada de los impactos ambientales y cambios morfológicos que pueden desencadenar.

El reconocimiento de Zicatela como un destino de surf relevante posiciona al sitio como un lugar al que debe brindarse mayores recursos y apoyos para su manejo, protección y conservación. La inclusión de Zicatela y sitios con condiciones similares en el país en planes de protección y manejo costero proporcionará a los lugares no solo la preservación de su oleaje atractivo, sino también les brindará la conservación

y mantenimiento en temas ambientales y económicos que son de importancia para la población local.

7.2. Futuras líneas de investigación

El presente trabajo resalta y contrasta los efectos derivados de la alteración morfológica de la zona costera, basada en la recopilación de datos de reanálisis y batimetría a partir de una base de datos actualizada anualmente. Es posible hacer simulaciones con mayor nivel de precisión utilizando datos de oleaje y datos batimétricos tomados en campo, obteniendo así una versión más actualizada y confiable de los resultados de simulación numérica.

Por otro lado, realizar el mismo proceso de simulación haciendo uso de datos de oleaje recopilados mediante instrumentos de medición colocados en zonas más estratégicas en el sitio de análisis permitirá comparar los resultados de simulación que fueron diseñados a partir de datos provenientes de fuentes externas con aquellos obtenidos en sitio. Esta comparación permitirá fortalecer la validación del modelo y de los resultados mostrados en la presente tesis.

Por su parte, los mapas que muestran la velocidad de las corrientes de retorno podrán ser elaborados con mayor nivel de precisión, mostrando las zonas que presenten mayor velocidad, y que, por ende, se asocien a mayores riesgos de accidentes hacia turistas y deportistas. Asimismo, debido a que la zona norte se encuentra dominada parcialmente por corrientes de retorno a lo largo de la costa, será posible determinar si la magnitud representa peligro para las personas que ingresen al mar en esa zona.

En cuanto a la energía que se presenta en la zona costera, se ha revisado que se recibe una cantidad considerable de energía, siendo este de 80.000 W/m. Puede estudiarse la viabilidad de la elaboración de un dispositivo capaz de captar la energía del oleaje y almacenarla y posteriormente ser aprovechada, siendo capaz de alimentar, por

ejemplo, dispositivos de monitoreo continuo de las características del oleaje de la zona.

Finalmente, y a través de la validación de resultados, será posible anticipar los cambios en la dinámica del oleaje que se deriven de la modificación morfológica de la zona litoral. Esto permitirá identificar oportunamente aquellos cambios que puedan representar un riesgo para la zona de rompientes y contribuir al desarrollo de estrategias para su prevención y manejo.

8. Referencias

Abalone (2014). What Lies Beneath: the Waves, Reef and Marine Life of Maverick's. Brian N. Tissot. <https://briantissot.com/2014/12/21/what-lies-beneath-the-waves-reef-and-marine-life-of-mavericks/>

Acevedo-Granados, I. V., Márquez-García, A. Z., & Armstrong-Altrin, J. S., (2025), Evaluación histórica de los procesos de erosión y acreción en las playas de Puerto Escondido, Oaxaca: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 77(2), A280225. <https://doi.org/10.18268/BSGM2025v77n2a280225>

Arroyo, M., Seingier, G., Passalacqua, G., & Gallegos, D. S. (2023). Surf Conservation Index: Mapping priority zones for surf protected areas in Mexico. *Shore and Beach*, 91, 49-59.

Arteaga, A. (2016). *Promoción del turismo deportivo sustentable como factor de atracción al mercado internacional del surf: Estudio de caso: Playa Zicatela, México* (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México.

BBC News. (2013). *Garrett McNamara surfs "highest ever" wave off Portugal*. <https://www.bbc.com/news/world-europe-21257762#panel2>

Bezaury-Creel, J.E., E. Escobar-Briones, S. Schill, J. F. Torres, C. Molina-Islas, A. L. García-López, O. Pedrín-Osuna, M.A. Jimenez-Hernández, M. Beck, I. March-Misfut, (2011). Estudio previo justificativo para el establecimiento del área natural protegida Reserva de la Biosfera Submarina del Pacífico Transicional Mexicano y Centroamericano. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) - The Nature Conservancy.

Britannica Editors (2018). fetch. Encyclopedia Britannica. <https://www.britannica.com/science/fetch>

Brocheray, S., M. Cremer, S. Zaragosi, S. Schmidt, F. Eynaud, L. Rossignol, & H. Gillet, (2014). 2000 years of frequent turbidite activity in the Capbreton Canyon (Bay of Biscay). *Marine Geology*, 347, 136-152. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2013.11.009>

Bryan, K. R., Power, H. E., Jackson, D. W. T., & Short, A. D. (2020). *Wave behaviour outside the surf zone*. En *Sandy beach morphodynamics* (pp. 61–86). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102927-5.00004-7>

Carmo, J. S. A. (2022). Dominant processes that amplify the swell towards the coast: the Nazaré Canyon and the giant waves. *Research, Society and Development*, 11(11), e578111133804-e578111133804.

Chamberlain, P. G., & Porter, D. (1995). The modified mild-slope equation. *Journal of Fluid Mechanics*, 291, 393–407. doi:10.1017/S0022112095002758

Chávez, V. (2011). *Determinación experimental del inicio de arrastre de arenas del estado de Quintana Roo, México* (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México.

Copernicus Climate Change Service. (s.f.). *Climate reanalysis*. <https://climate.copernicus.eu/climate-reanalysis>

Cruz Juárez, V. M. (2025). *Adecuación de un modelo hidrodinámico para grandes dominios* (Tesis de maestría). Universidad Nacional Autónoma de México

Dirección General Adjunta de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología. (s. f.). *Puerto Escondido, Oaxaca. Secretaría de Marina*. <https://digaohm.semar.gob.mx/cuestionarios/cnarioPtoescondido.pdf>

Francis, J. R. (2024). *The Ultimate Guide to Nazare Surf*. Surf Atlas. <https://thesurfatlas.com/surfing-portugal/nazare-surf/>

Galloway, J., Collins, M., & Moran, A. (1989). Onshore/offshore wind influence on breaking waves: An empirical study. *Coastal Engineering*, 13(4), 305-323. [https://doi.org/10.1016/0378-3839\(89\)90039-2](https://doi.org/10.1016/0378-3839(89)90039-2)

Gaughan, M. K. (1973). Breaking waves: a review of theory and measurements.

GEBCO. (s. f.). *Gridded bathymetry data*. <https://www.gebco.net/data-products/gridded-bathymetry-data>

Haber, H. (2009). Focusing properties of spherical and parabolic mirrors. *Santa Cruz Institute for Particle Physics*, 2-3.

Henriquez, M. (2004). “Artificial surf reefs.” M.Sc. thesis, Delft Univ. of Technology, Delft, The Netherlands.

Horton, D. F. (1948). Shore Effects of Coastal Structures. *The Military Engineer*, 40(275), 402-405.

Hoffman, A. (2025). *Best surf Spots in Mexico: Ultimate Guide to top waves*. Red Bull. <https://www.redbull.com/us-en/best-surf-spots-in-mexico>

Huidobro, J. G. (2009). *Diseño de rompeolas bajo un concepto de riesgo* (Tesis de maestría). Universidad Nacional Autónoma de México

Inn, N. W. (s. f.). *Surfing Mavericks: Ride the Legendary Waves in Half Moon Bay*. Nantucket Whale Inn. <https://www.nantucketwhaleinn.com/blog/surfing-mavericks-half-moon-bays-legendary-waves.html>

Kirby, J. T. (1986). A general wave equation for waves over rippled beds. *Journal of Fluid Mechanics*, 162, 171–186. doi:10.1017/S0022112086001994

Lamarche, G., Millar, D., Spoelstra, G., & Picard, K. (2025). *Launching GEBCO’s Vision to bring knowledge about our planet’s seabed to everyone* (No. OOS2025-298). Copernicus Meetings.

Lastras, G., Arzola, R., Masson, D., Wynn, R., Huvenne, V., Hühnerbach, V., & Canals, M. (2008). Geomorphology and sedimentary features in the Central Portuguese submarine canyons, Western Iberian margin. *Geomorphology*, 103(3), 310-329. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.06.013>

Lazarow, N. (2007). The value of coastal recreational resources: a case study approach to examine the value of recreational surfing to specific locales. *Journal Of Coastal Research*, 50(sp1). <https://doi.org/10.2112/jcr-si50-003.1>

Martínez, E. (2004). *Modelo lineal elíptico de transformación del oleaje* [Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México]. Universidad Nacional Autónoma de México.

Martínez, R., Ordériz, I., Mendoza, E. & Silva, R. (2013). WAPO and COCO models. Quick Guide. Engineering Institute, National University of Mexico.

Martins, K., Blenkinsopp, C. E., Almar, R., & Zang, J. (2017). The influence of swash-based reflection on surf zone hydrodynamics: a wave-by-wave approach. *Coastal Engineering*, 122, 27-43. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2017.01.006>

Massel, S. R. (1993). Extended refraction-diffraction equation for surface waves. *Coastal Engineering*, 19(1-2), 97-126. [https://doi.org/10.1016/0378-3839\(93\)90020-9](https://doi.org/10.1016/0378-3839(93)90020-9)

Mendoza Baldwin, E. G. (2006). *Modelo unificado de propagación de oleaje e hidrodinámica no lineal* (Tesis de doctorado). Universidad Nacional Autónoma de México.

Mustapa, M., Yaakob, O., Ahmed, Y. M., Rheem, C., Koh, K., & Adnan, F. A. (2017). Wave energy device and breakwater integration: A review. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 77, 43-58. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.110>

National Oceanic and Atmospheric Administration. (s. f.). *Introducción a la marejada ciclónica*. National Oceanic and Atmospheric Administration. https://www.nhc.noaa.gov/surge/marejadaCiclonica_intro.pdf

NazareWaves. (s.f.). *Nazaré Big Waves News - Nazaré Big Waves Surf - Portugal*. nazarewaves.com

nmásmedia. (2025). *Zicatela: lo que está matando la ola más icónica de México* [Video]. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=_B4TOVVmZEY

Portuguese Hydrographic Institute. (2022). <https://www.surfertoday.com/surfing/the-mechanics-of-the-nazare-canyon-wave>

Rafferty, J. (2025a). *How and Why are the Waves in Hossegor so Damn Good? — Southwest Surf House*. Southwest Surf House. <https://www.swsurfhouse.com/blog/2018/2/7/why-are-the-waves-in-hossegor-so-good-hint-theres-something-hiding-underwater>

Rafferty, J. (2025b). *The Science (and Magic) Behind Hossegor's Waves — Southwest Surf House*. Southwest Surf House. <https://www.swsurfhouse.com/blog/2025/hossegor-wave-magic>

Salinas, L. A. (2025). *Análisis sedimentológico y geomorfológico de playas en Puerto Escondido, Oaxaca, México* [Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México]. <https://hdl.handle.net/20.500.14330/TES01000871322>

Save The Waves Coalition (2026). *Puerto Escondido, México, designado como la 14ª Reserva Mundial de Surf*. Save The Waves. <https://www.savethewaves.org/es/puerto-escondido-mexico-dedicated-as-the-14th-world-surfing-reserve/>

Scarfe, B. E. (2008). *Oceanographic considerations for the management and protection of surfing breaks* (Doctoral dissertation, The University of Waikato).

Scarfe, B. E., Elwany, M. H. S., Mead, S. T., & Black, K. P. (2003). The science of surfing waves and surfing breaks-a review.

Shuchman, R. A., Leshkevich, G., Sayers, M. J., Johengen, T. H., Brooks, C. N., & Pozdnyakov, D. (2013). An algorithm to retrieve chlorophyll, dissolved organic carbon, and suspended minerals from Great Lakes satellite data. *Journal of Great Lakes Research*, 39, 14-33.

Silva, R. (2010). Manual del usuario y documento de referencia del programa MWAPO4. Instituto de Ingeniería UNAM. México.

Silva, R., Baquerizo, A., Losada, M.A. & Mendoza, E. (2010). Hydrodynamics of a headland-bay beach – nearshore current circulation. *Coastal Engineering*, 57, 160-17

Silva, R., Borthwick, A. G., & Taylor, R. E. (2005). Numerical implementation of the harmonic modified mild-slope equation. *Coastal Engineering*, 52(5), 391-407. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2004.12.009>

Soto, A. L. R., & Brena, R. G. G. (2008). Turismo y Economía en el Estado de Oaxaca. *TURYDES Turismo y Desarrollo Local Sostenible*, 1(3).

Sundar, V., & Sannasiraj, S. A. (2018). Coastal Engineering. En *Advanced series on ocean engineering*. <https://doi.org/10.1142/11148>

Surfline. (2026). *Half Moon Bay Travel & Surf Guide*. <https://www.surfline.com/travel/united-states/california/san-mateo-county/half-moon-bay-surfing-and-beaches/5354943>

Ultimate France. (2024). *Surfing in Hossegor • Ultimate France*. <https://www.ultimatefrance.com/surfing/south-west-france/hossegor#:~:text=Wave%20size:%201.5%20to%206.0,Long:%2043.666755%>

2C%20%2D1.440622.&text=Hossegor's%20big%20wave%20spot%2C%20La,swell%20gets%20over%203%20m.

Valencia, L. A. (2023). Una aproximación a los impactos del turismo de surf en Puerto Escondido, México. *Turismo y Sociedad*, XXXII, 251-270. DOI: <https://doi.org/10.18601/01207555.n32.10>

Vercammen, M. L. (2013). Sound concentration caused by curved surfaces. *Proceedings Of Meetings On Acoustics*, 015053. <https://doi.org/10.1121/1.4800250>

Walker, J. R. (1974). "Recreational surf parameters." Technical Rep. 30, James K. K. Look Laboratory of Oceanographic Engineering, University of Hawaii, Manoa, HI.

Walpole, R. E., Myers, R. H., Myers, S. L., & Ye, K. (2012). *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias* (9.ª ed.). Pearson Educación.

Warren, J. (2022). *Mechanics: Puerto Escondido, Mexico. Surfline.* <https://www.surfline.com/surf-news/mechanics-puerto-escondido-mexican-pipeline-biggest-surf-barrel/83402>

Wave-Coast Interactions | manoa.hawaii.edu/ExploringOurFluidEarth. (s. f.). <https://manoa.hawaii.edu/exploringourfluidearth/physical/coastal-interactions/wave-coast-interaction>