

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ACATLÁN.



EVALUACIÓN DE LA FUNCIÓN HIDRODINÁMICA DE UNA
RÉPLICA DE ARRECIFE DE CORAL.

TESIS QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL.

PRESENTA:
YESENIA MORGADO PELÁEZ

TUTOR:
DR. EDGAR GERARDO MENDOZA BALDWIN, INSTITUTO DE
INGENIERÍA.

SANTA CRUZ ACATLÁN, ESTADO DE MÉXICO 2018.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Agradecimientos

Agradezco a Dios por permitirme tener una familia, y ponerme a las personas indicadas para que el camino de la vida sea más sencillo.

Gracias a mi querida madre Estela y mi querido padre Víctor por el apoyo incondicional que siempre me han brindado.

A mis hermanas por sus consejos y palabras de aliento durante mi trayecto. A mi sobrina que me ha vuelto a recordar que la vida es simple y que no hay que dejar de disfrutarla.

A mis abuelos que siempre procuran de mí a pesar de todo.

A mis primos y tíos que en la distancia siempre se mantienen al pendiente de mí y me impulsan para crecer.

A ti que estuviste presente brindando apoyo y complicidad.

A mis grandes amigos que a pesar del tiempo siempre se han mantenido fieles en mi vida y me motivan a ser una mejor persona. A los nuevos amigos hechos durante esta aventura que sin ellos no hubiera sido lo mismo.

Al Dr. Edgar Mendoza Baldwin por creer en mí y darme la oportunidad de estar en su equipo de trabajo.

Al Dr. Raúl Pineda Olmedo por su apoyo, tiempo y buenos consejos.

A todas las personas dentro del Laboratorio de Costas y Puertos del Instituto de ingeniería que me brindaron la confianza de formar parte de ellos. Gracias por aportar tiempo, ideas y conocimiento para que esto fuera posible.

Gracias a la UNAM por permitirme ser parte de esta valiosa familia.

ÍNDICE.

RESUMEN.....	13
I. INTRODUCCIÓN.....	15
1.2 MOTIVACIÓN.....	15
1.3 OBJETIVO GENERAL.....	16
1.4 ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO.....	16
II. ARRECIFES DE CORAL Y PROTECCIÓN DE PLAYAS.....	17
2.1 ¿QUÉ SON LOS ARRECIFES DE CORAL?	17
2.2 TIPOS DE ARRECIFES.....	18
2.3 ¿QUÉ SON LOS CORALES?.....	21
2.4 DISTRIBUCIÓN DE ESPECIES DE CORAL EN MÉXICO.....	23
2.5 ATENUACIÓN DE LA ENERGÍA DE OLEAJE POR CORALES.....	41
III. GENERALIDADES DE ANÁLISIS HIDRODINÁMICO.....	49
3.1 TEORÍA DE ONDAS.....	49
3.1.1 OLAS	49
3.1.2 OLEAJE.....	50
3.2 DESCRIPCIÓN ESTADÍSTICA DEL OLEAJE.....	52
3.3 ANÁLISIS TEMPORAL Y ESPECTRAL DE SERIES DE TIEMPO.....	55
3.3.1 ANÁLISIS TEMPORAL.....	55
3.3.2 ANÁLISIS ESPECTRODIGITAL DE SERIES TEMPORALES.....	66
3.4 TEORÍA DE GENERACIÓN DE OLEAJE EN LABORATORIO.....	72
3.4.1 ECUACIONES DE GOBIERNO Y CONDICIONES DE CONTORNO.....	72
3.5 DINÁMICA DE LOS ARRECIFES ARTIFICIALES.....	73
3.5.1 ARRECIFES ARTIFICIALES.....	73
3.5.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS DIQUES.....	74
3.5.3 DIQUES SUMERGIDOS.....	76
3.5.4 FENÓMENOS QUE INTERVIENEN EN LA PROPAGACIÓN DEL OLEAJE.....	77
3.6 RUGOSIDAD DEL LECHO MARINO.....	87
3.6.1 ¿CÓMO LOS ARRECIFES PROTEGEN LA COSTA?	87
3.6.2 FORMA DEL PERFIL DE ARRECIFE.....	88
3.6.3 RUGOSIDAD DE LOS ARRECIFES PARA MEJORAR LA DISIPACIÓN DE LA ENERGÍA DE LAS OLAS.....	90

3.7	DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO EXPERIMENTAL.....	91
3.7.1	INSTALACIONES.	91
3.7.1.1	CANAL DE OLEAJE.	91
3.7.2	EQUIPO DE MEDICIÓN.	92
3.7.2.1	SENSORES DE NIVEL.....	92
3.7.3	MODELO.....	95
3.7.3.1	CORALES EN 3D.....	95
3.7.3.2	PIEZAS DE CONCRETO.	97
3.7.4	METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.	98
3.7.4.1	VARIACIÓN DEL NIVEL DE AGUA EN REPOSO.....	98
3.7.4.2	PERIODO.....	98
3.7.4.3	CONDICION DE OLEAJE.....	98
3.7.4.4	TIPOLOGÍA DE LA ESTRUCTURA.	99
3.7.4.5	DESCRIPCIÓN DE LOS EXPERIMENTOS.	101
3.7.4.6	OBSERVACIONES.....	107
IV.	RESULTADOS.	109
4.1	DECAIMIENTO DE OLEAJE.	109
4.2	ESTIMACIÓN DE LA RUGOSIDAD.	118
V.	CONCLUSIONES.....	119
	BIBLIOGRAFÍA.....	121

ÍNDICE DE FIGURAS.

FIGURA 1. ESQUEMA DE UN ARRECIFE HIPOTÉTICO.....	18
FIGURA 2. ARRECIFE COSTERO - NUSA PENIDA (INDONESIA).....	19
FIGURA 3. IMAGEN POR SATÉLITE DE UNA PARTE DE LA GRAN BARRERA DE CORAL. FOTO POR CORTESÍA DE LA NASA. AUSTRALIA.	20
FIGURA 4. ATOLÓN.	21
FIGURA 5. ESQUEMA CON LOS PÓLIPOS DE UN CORAL (CORTESÍA DE SERGIO GONZÁLEZ FERRER) ²	22
FIGURA 6. MILLEPORA DICHOTOMA. ES UNA ESPECIE DE LA CLASE HIDROZOA. (CORAL DE FUEGO).....	22
FIGURA 7. DIPLORIA LABYRINTHIFORMIS, ES UNA ESPECIE DE LA CLASE ANTHOZOA Y DEL ORDEN SCLERACTINIA	23
FIGURA 8. GRUPOS PRINCIPALES DE CORALES Y NOMBRES COMUNES (*FORMAS HERMATÍPICAS).....	23
FIGURA 9. MAPA DE LA COSTA DEL PACÍFICO MEXICANO, SEÑALANDO LAS ZONAS CORALINAS MÁS IMPORTANTES DE LA REGIÓN.....	39
FIGURA 10. DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA DE LOS CORALES HERMATÍPICOS DEL PACÍFICO MEXICANO. LA CLAVE DE LAS ZONAS SE PRESENTA EN LA FIGURA 9. TAXA COLONIZADORES DEL INDOPACÍFICO. ¹⁴	41
FIGURA 11. DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DEL PERFIL PERPENDICULAR A LA COSTA DE LAS SECCIONES MEDIAS DE CANCÚN Y PUERTO MORELOS, A PARTIR DE MEDICIONES TOPOGRÁFICAS Y DATOS BATIMÉTRICOS. EL NIVEL MEDIO DEL MAR (NMM) SE ENCUENTRA REFERIDO A 0 M (TOMADO DE RUIZ DE ALEGRÍA-ARZABURU ET AL., 2013).....	42
FIGURA 12. IMAGEN SATELITAL DE LA CIUDAD DE CANCÚN, LA ISLA DE BARRERA Y LOS CUERPOS LAGUNARES (BRYANT, 2015) ¹⁹	43
FIGURA 13. PUNTA CANCÚN EN 1967 Y 2005 (TOMADO DE SILVA ET AL., 2006) ¹⁹	43
FIGURA 14. ZONAS RESPECTO AL GRADO DE EROSIÓN PROVOCADO POR EL HURACÁN WILMA. ¹⁹	45
FIGURA 15. ANTES Y DESPUÉS DEL HURACÁN WILMA (TOMADO DE SILVA ET AL., 2006). ¹⁹	46
FIGURA 16. ALTURA DE OLA SIGNIFICANTE EN PUERTO MORELOS Y CANCÚN DURANTE EL HURACÁN WILMA, EN 2005. ROJO, EN LA PARTE EXTERNA DEL ARRECIFE DE PUERTO MORELOS (CICSE); AMARILLO, EN CANCÚN (SILVA, R.) Y AZUL, EN LA PARTE INTERNA DE LA LAGUNA DE PUERTO MORELOS (TOMADA DE BLANCHON ET AL., 2010) ¹⁹	47
FIGURA 17. EFECTOS DEL HURACÁN WILMA. LAS IMÁGENES SUPERIORES CORRESPONDEN A CANCÚN; LAS IMÁGENES INFERIORES A PUERTO MORELOS (TOMADA DE MARIÑO ET AL. 2014) ¹⁹	47
FIGURA 18. CARACTERÍSTICAS DE LAS ONDAS.....	50
FIGURA 19. OLEAJE LOCAL O SEA	52
FIGURA 20. OLEAJE DISTANTE O SWELL.....	52
FIGURA 21. PARÁMETROS QUE DEFINEN EL OLEAJE.....	55
FIGURA 22. MAREA SEMIDIURNA ²³	58
FIGURA 23. EJEMPLO DE UNA SEÑAL DE OLEAJE SIN CORRECCIÓN DEL NIVEL MEDIO ²³	58
FIGURA 24. SEÑAL CORREGIDA FIG.23 ²³	58
FIGURA 25. DISCRETIZACIÓN DE LA ALTURA DE OLA UTILIZANDO EL MÉTODO DE PASOS ASCENDENTES ²³	59
FIGURA 26. DEFINICIÓN DE OLAS CON EL MÉTODO DE PASOS DESCENDENTES ²³	60
FIGURA 27. DEFINICIÓN DE OLAS POR EL MÉTODO DE DISTANCIAS ENTRE CRESTAS ²³	60
FIGURA 28. SEPARACIÓN DE OLAS POR MEDIO DEL MÉTODO DE VALLES ²³	61
FIGURA 29. UBICACIÓN DE UN APARATO DE MEDICIÓN EN LA COSTA. ²³	63
FIGURA 30. EJEMPLO DE UN REGISTRO DE OLEAJE CON AGRUPAMIENTO.....	64
FIGURA 31. DEFINICIÓN DE LOS PAQUETES DE OLAS ²³	64
FIGURA 32. DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL ANÁLISIS TEMPORAL DE SEÑALES DE OLEAJE SIN CONSIDERAR LA EVOLUCIÓN DEL AGRUPAMIENTO DEL OLEAJE ²³	65
FIGURA 33. ESPECTRO DE ENERGÍA.....	69
FIGURA 34. DEFINICIÓN DEL CANAL EN DOS DIMENSIONES.....	72

FIGURA 35. REPRESENTACIÓN DE ESFUERZOS EN UN DIQUE.	74
FIGURA 36. POSIBLES FALLAS DE LOS DIQUES.	75
FIGURA 37. PARTES DE UN DIQUE.	75
FIGURA 38. TIPOLOGÍAS BÁSICAS DE LOS DIQUES.	76
FIGURA 39. TRANSFORMACIÓN DEL OLAJE AL PROPAGARSE PROGRESIVAMENTE SOBRE AGUAS SOMERAS CERCANAS A LA COSTA.	77
FIGURA 40. REFRACCIÓN.	78
FIGURA 41. REFRACCIÓN EN UNA PLAYA.	78
FIGURA 42. REFRACCIÓN DE UNA BAHÍA.	79
FIGURA 43. REFRACCIÓN CAMBIO EN LAS CRESTAS DE OLA.	79
FIGURA 44. DIFRACCIÓN.	80
FIGURA 45. DIFRACCIÓN EN UNA ESTRUCTURA.	81
FIGURA 46. DIFRACCIÓN A TRAVÉS DE UNA BOCANADA.	81
FIGURA 47. DIFRACCIÓN A TRAVÉS DE UNA BOCANADA.	82
FIGURA 48. ESQUEMA DE DEFINICIÓN DEL OLAJE REFLEJADO SOBRE UNA PARED VERTICAL.	83
FIGURA 49. REFLEXIÓN.	83
FIGURA 50. TIPOS DE ROTURA.	86
FIGURA 51. EFECTOS ESQUEMÁTICOS DEL PERFIL BATIMÉTRICO DE LOS ARRECIFES DE CORAL EN LA ATENUACIÓN DE LA ONDA EN LA PLAYA.	89
FIGURA 52. EFECTOS ESQUEMÁTICOS DE LA BATIMETRÍA 2D SOBRE LA ATENUACIÓN DE LAS OLAS EN LA PLAYA. ESTE ES UN TRAMO DE COSTA EN QUINTANA ROO, MÉXICO. LAS FLECHAS REPRESENTAN LA DIRECCIÓN PRINCIPAL DEL ENFOQUE DE ONDA ²⁷	90
FIGURA 53. (A) ESTIMACIONES DE RUGOSIDAD (EN M) OBTENIDAS A PARTIR DE LAS MEDICIONES BATIMÉTRICAS DE PEQUEÑA ESCALA FILTRADAS COMO 4σ . (B) BATIMETRÍA FILTRADA DE LOS EFECTOS DE ONDA MEDIDOS CON UNA ECOSONDA DE HAZ ÚNICO Y GPS DIFERENCIAL. (C) BATIMETRÍA A MAYOR ESCALA DEL TRANSECTO PRESENTADO EN (B), OBTENIDO CON CLASIFICACIÓN SUPERVISADA DE DATOS SATELITALES (FUENTE: CONABIO). ²⁷	91
FIGURA 54 . CANAL DE OLAJE DEL INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM.	92
FIGURA 55. DATALOGGER.	93
FIGURA 56. SENSORES DE NIVEL.	93
FIGURA 57. COLOCACIÓN DE SENSORES DE NIVEL EN EL CANAL.	94
FIGURA 58. RÉPLICA DE CORAL TIPO 1.	95
FIGURA 59. RÉPLICA DE CORAL TIPO 2.	96
FIGURA 60. RÉPLICA DE CORAL TIPO 3.	96
FIGURA 61. DIMENSIONES DEL DIQUE TIPO 1.	99
FIGURA 62 ESTRUCTURA TIPO 1. VISTA PERFIL.	99
FIGURA 63 ESTRUCTURA TIPO 1. VISTA EN PLANTA.	99
FIGURA 64. DIMENSIONES DEL DIQUE TIPO 2.	100
FIGURA 65 GEOMETRÍA TIPO 2 VISTA PERFIL.	100
FIGURA 66. GEOMETRÍA TIPO 2 VISTA PLANTA.	100
FIGURA 67. POSICIÓN DE LA ESTRUCTURA.	101
FIGURA 68. PERFIL DE PLAYA TIPO A. Y TIPO B. VISTA DE PERFIL.	102
FIGURA 69. PERFIL DE PLAYA TIPO B.	103
FIGURA 70. PERFIL DE PLAYA TIPO A.	103
FIGURA 71. POSICIÓN DE LOS DIQUES EN LA PARTE BAJA DEL PERFIL DE ARENA.	104
FIGURA 72. INTERFAZ DEL PROGRAMA AWASYS6.	105
FIGURA 73. EN LA IZQUIERDA SE MUESTRA LA IMAGEN DE LAS ALTURAS DEL CORAL EN DISTINTOS PUNTOS, QUE SIRVE PARA EL CÁLCULO DE LA RUGOSIDAD. EN LA DERECHA ESTÁ EL CORTE REAL DE DONDE SE TOMARON LAS ALTURAS DE LA IMAGEN IZQUIERDA.	106

FIGURA 74. COEFICIENTES DE ENERGÍA.....	110
FIGURA 75. COEFICIENTES DE ENERGÍA.....	113
FIGURA 76. COEFICIENTES DE ENERGÍA.....	116
FIGURA 77. VALORES DE RUGOSIDAD.....	118

ÍNDICE DE TABLAS.

TABLA 1. ESPECIES DE CORALES EN MÉXICO ¹⁰	24
TABLA 2. DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA DE GÉNEROS DE SCLERACTINIA PRESENTES EN MÉXICO: A= ATLÁNTICO, P-E- PACIFICO ESTE, I= INDOPACÍFICO. ¹⁰	37
TABLA 3. METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS TEMPORAL DEL OLEAJE. ²³	56
TABLA 4. METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS ESPECTRAL DEL OLEAJE. ²³	67
TABLA 5. CAPAS DE UN DIQUE.....	76
TABLA 6. VALORES DEL NÚMERO DE IRIBARREN PARA LOS DIFERENTES TIPOS DE ROTURA SEGÚN BATTJES (1974)	87
TABLA 7. DISTANCIA DE SENSORES ANTES DE LOS DIQUES.	94
TABLA 8. CÁLCULO DE LAS DISTANCIAS CON RESPECTO AL PERIODO.	95
TABLA 9. CARACTERÍSTICAS DEL CONCRETO.	97
TABLA 10. CARACTERÍSTICAS DEL OLEAJE	98
TABLA 11. DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS	101
TABLA 12. COEFICIENTES DE ENERGÍA EN DIFERENTES CONDICIONES DEL OLEAJE.	112
TABLA 13. COEFICIENTES DE ENERGÍA EN DIFERENTES CONDICIONES DEL OLEAJE.	115
TABLA 14. COEFICIENTES DE ENERGÍA EN DIFERENTES CONDICIONES DEL OLEAJE.	117

RESUMEN.

El presente trabajo fue desarrollado dentro del Instituto de Ingeniería UNAM en el área de Ingeniería de costas y puertos. Es un modelo físico a escala de una estructura marina con la finalidad de brindar protección a la costa. La estructura propuesta es un dique de forma semejante a un arrecife de coral. Las piezas de coral para el dique son un modelo propiedad del equipo de ingeniería de costas y puertos de la UNAM, este tipo de piezas para diques fue diseñado y sometido al análisis hidrodinámico del oleaje por primera vez dentro del laboratorio de costas y puertos del Instituto de Ingeniería UNAM. La finalidad de las pruebas es conocer cómo se comporta la estructura ante diferentes parámetros del oleaje, para determinar si es adecuada o no. Los coeficientes que se calcularon a partir de la señal de oleaje resultado de las pruebas son los siguientes: coeficiente de la energía transmitida, reflejada y disipada. Dentro del trabajo se ha calculado la rugosidad por tipo de pieza de coral con la finalidad de conocer la influencia que tiene la rugosidad de la estructura en el comportamiento del oleaje.

I. INTRODUCCIÓN

Los cambios en los niveles del mar en todo el mundo son visibles, causando impactos sobre los índices de erosión costera. Además, las recientes catástrofes (huracanes, tsunamis y tifones) causaron daños masivos más allá de la interrupción de los procesos productivos de la sociedad. Es evidente que la planificación y la ejecución correcta de las obras de protección costera se están convirtiendo en algo cada vez más importante para las comunidades, las ciudades y la infraestructura costera en todo el mundo.

Se destacan como soluciones para la protección costera: La reconstrucción de dunas, espigones, rompeolas, muros pantalla y los sistemas de protección de los márgenes. La solución apropiada se seleccionará teniendo en cuenta las características de la región costera estudiada, junto con las soluciones pertinentes. También es importante minimizar los efectos adversos causados por la ejecución de las construcciones costeras; sin que las consecuencias más amplias de la intervención puedan perjudicar los beneficios locales.

Dentro de los elementos para reducir la energía del oleaje que además interfieren en menor medida con el aspecto visual de la zona de interés, se encuentran los diques sumergidos. La finalidad de este tipo de estructuras es controlar la energía del oleaje incidente, de tal forma que permita la estabilización de la playa evitando la erosión de la misma. Este funcionamiento tiene el potencial de revertir los procesos erosivos en las playas a un costo razonable y minimizando los impactos negativos en la zona. A lo largo de la historia, los resultados obtenidos con este tipo de diques han sido diversos, desde notables éxitos hasta reconocidos fracasos.

1.2 MOTIVACIÓN.

La finalidad de la construcción de diques es la de brindar protección y abrigo a la zona costera, más allá de proporcionar seguridad a la zona productiva y económica de la costa tienen la finalidad de evitar el deterioro del litoral y protegerlo ante fenómenos naturales extremos.

Los diques sumergidos son diseñados y construidos con la intención de controlar la energía del oleaje. La disminución de la energía se da principalmente por rotura, reflexión, fricción con el fondo marino y fricción con la parte expuesta del dique. La disminución sucede cuando la ola impacta con el dique y rompe, provocando disipación y reflexión del oleaje. La fracción de la energía que llega a la playa es la que pasa a través de la estructura o por encima de la misma lo cual, en conjunto, se denomina transmisión.

Los diques sumergidos son una alternativa interesante debido a que el impacto visual es mínimo, y sus beneficios son múltiples. Permiten la renovación de las aguas en la zona protegida a la vez que los costos comparados con obras de gran envergadura se reducen significativamente debido a que la cantidad de material para su construcción es menor, principalmente para la parte de la corona.

Los diques sumergidos funcionan como un filtro de olas, es decir, cuando se tiene un francobordo considerable algunas olas consiguen pasar sobre el dique sin perder energía o haciéndolo de manera

despreciable; mientras que las olas con mayor altura rompen en la estructura perdiendo gran parte de la energía.

En el diseño de las estructuras sumergidas deben considerarse dos tipos de parámetros: los relacionados con el oleaje y los geométricos, aunque en muchas de las metodologías de diseño sólo se consideran estos últimos (Lozada-Benavente, 2004).

En la literatura especializada respecto al diseño de diques sumergidos, no existe una descripción única entre la interacción estructura y oleaje que permita conocer qué porcentaje de energía es reflejada, transmitida o disipada. Esto se puede determinar a partir del coeficiente de transmisión, K_t , si el cálculo involucra parámetros geométricos del dique. La transferencia de energía entre el oleaje y la estructura involucra un amplio número de procesos, de ahí que las formulaciones que se han desarrollado para estimar las solicitaciones hidrodinámicas en las estructuras sumergidas se basan en la experimentación y análisis de parámetros como: altura y ancho de coronación del dique, pendiente del talud, material y rango de mareas de la zona

1.3 OBJETIVO GENERAL.

El objetivo principal de este trabajo es realizar el análisis de parámetros hidrodinámicos para determinar las fracciones de energía transmitida, disipada, y reflejada por la estructura con la finalidad de poder evaluar si la estructura está funcionando de manera adecuada o no. Además se pretende calcular la rugosidad por pieza para observar cómo influye en la modificación del oleaje.

1.4 ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO.

El presente trabajo está formado por 5 capítulos los cuales se describen a continuación:

- Capítulo 1. Está formado por la introducción, motivación del trabajo, el objetivo general y la organización del mismo. Dentro de todas estas secciones se da la idea principal del por qué se ha desarrollado el presente trabajo.
- Capítulo 2. Contiene una descripción de qué son los arrecifes de coral y los corales, los tipos de arrecifes que existen y la clasificación de los corales. Además incluye la distribución de especies de corales en México y la influencia que estos tienen en la atenuación de la energía del oleaje.
- Capítulo 3. Este capítulo contiene varias secciones de las cuales las secciones 3.1 a la 3.6 son teóricas y la última 3.7 es experimental. En las primeras secciones se habla de la teoría de ondas, la descripción estadística del oleaje, se describen dos métodos estadísticos (análisis temporal y análisis espectral) para calcular los parámetros del oleaje (H , T , L , etc. de las olas), se incluyen la parte de dinámica de los arrecifes artificiales (descripción y comportamiento de los diques) y contiene como la rugosidad del fondo marino afecta el comportamiento del oleaje y explica la forma de calcularla. La sección 3.7 es la parte experimental, en ella se explica el modelo físico utilizado, describe el equipo y la metodología empleada para el experimento.
- Capítulo 4. Es la parte donde se da a conocer los resultados de las pruebas con la descripción de los mismos.
- Capítulo 5. Es la conclusión del trabajo donde se hace un análisis de todo el trabajo y se da a conocer lo más relevante del mismo.

II. ARRECIFES DE CORAL Y PROTECCIÓN DE PLAYAS.

2.1 ¿QUÉ SON LOS ARRECIFES DE CORAL?

La composición de un arrecife es un tanto compleja, sin embargo, la unión de distintos elementos marinos por más pequeños que sean es la pieza fundamental para dar vida a estos ecosistemas. Un elemento clave en la formación de la mayoría de los arrecifes son los corales, aunque, existen casos en que no es el elemento principal. Un ejemplo de ello son algunos arrecifes del Océano Pacífico ya que aquí el elemento predominante son las “algas calcáreas costrosas de consistencia pétreas (pertenecientes a las algas rojas o rodofíceas). Las algas pétreas también están presentes en los arrecifes del Caribe pero más que estructural presentan una función cementante o de cobertura protectora de la roca” (Alcolado 2004). En este trabajo se analizan los arrecifes de coral relevantes para los objetivos del mismo.

Existe gran variedad de definiciones respecto a los arrecifes de coral de acuerdo con Alcolado, son estructuras geológicas sólidas y masivas del relieve submarino, de origen biológico y de variadas formas, que se desarrollan sobre algunos fondos de áreas tropicales y subtropicales. Son creados por organismos que viven fijos al fondo y que tienen la habilidad de formar esqueletos pétreos de carbonato de calcio. Estos organismos son principalmente los llamados corales duros o pétreos, de ahí el nombre de arrecife coralino (2004:3).

Otra definición es la que se hace en Greenpeace México la cual indica que los arrecifes de coral son colonias formadas por pequeños animales llamados pólipos. Dentro del tejido del pólipo hay una población de algas que viven en asociación simbiótica¹ con el coral: el pólipo provee de protección a las algas y éstas, a su vez, proveen de alimento y oxígeno al coral. A través de miles de años, los esqueletos de carbonato de calcio de estos animales se convierten en formaciones duras pero quebradizas, de diversos colores y de muchas formas (1998:1).

¹ Simbiosis. Cualquier asociación que sus miembros se benefician unos de otros.

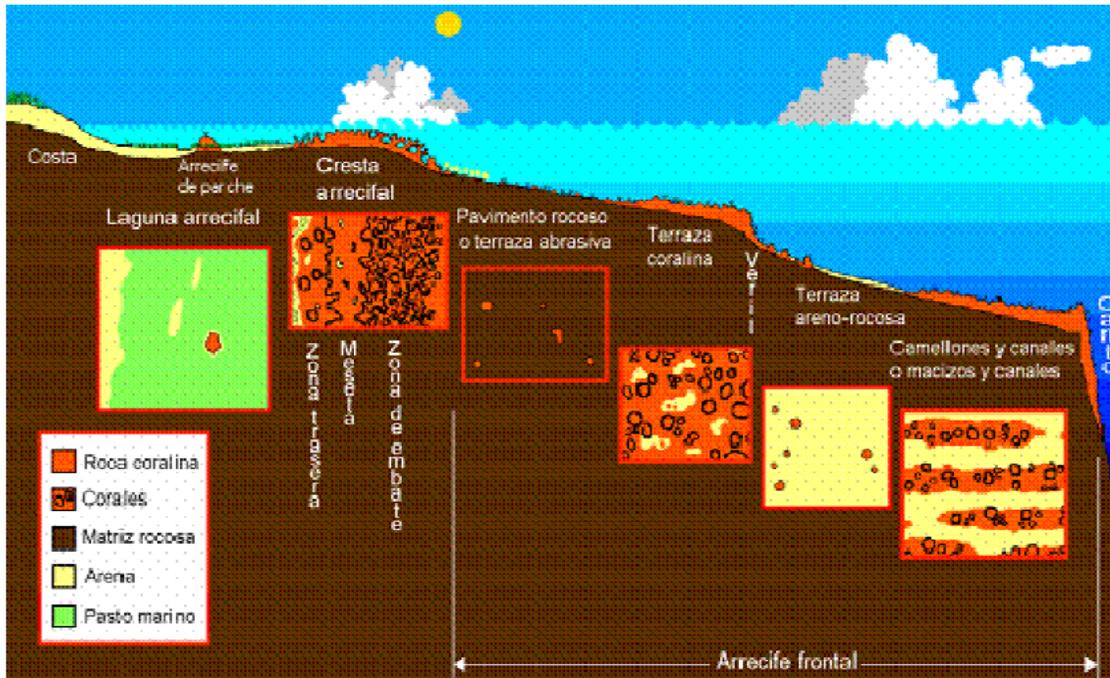


Figura 1. ESQUEMA DE UN ARRECIFE HIPOTÉTICO².

2.2 TIPOS DE ARRECIFES.

Hay una enorme variedad de arrecifes de coral pero para entender cómo se da la distribución de los mismos se debe tomar en cuenta que los responsables de formar la estructura básica de ellos son los corales. Una vez comprendido esto cabe señalar que no todos los corales pueden formar arrecifes. Las especies capaces de hacerlo no se distinguen de otras por las diferencias estructurales, más bien, es la presencia de “algas unicelulares endozóicas simbiotes conocidas como zooxantelas, en su tejido gastrodérmico” (Wells 1957, Goreau 1959)³ las que marcan la diferencia entre los corales formadores de arrecifes o hermatípicos de aquellos que no lo son o ahermatípicos.

“La relación simbiótica alga-coral, además de conferirle características autótrofas⁴ al coral, le permite depositar el carbonato de calcio de sus esqueletos de una forma más rápida que los corales ahermatípicos, de tal forma que los corales formadores de arrecifes crecen más rápido que los otros y sus esqueletos son de “ladrillos” en la construcción de la estructura del arrecife. Cabría esperar que en cualquier lugar donde existieran corales hermatípicos se formarían arrecifes, pero esto no sucede así, y se debe a que existen una serie de factores ecológicos. Principalmente de temperatura, intensidad luminosa, profundidad, tasa de sedimentación, tipo de sustrato, salinidad, movimiento del agua y sólidos en suspensión, que actúan sobre estos organismos y limitan la formación y distribución de los arrecifes coralinos” (Carricart-Ganivet y Horta-Puga 1993).

“A escala mundial los arrecifes diferencian dos grandes regiones arrecifales: la indopacífica y la del atlántico” (Schuhmacher 1978)³; “la primera es la más extensa y se encuentra dividida en ocho

² Alcolado 2004

³ Citado en (Carricart-Ganivet y Horta-Puga 1993)

⁴ Autótrofo. [organismo] Que elabora su propia materia orgánica a partir de sustancias inorgánicas, de las que se nutre.

provincias: 1) el mar rojo, 2) Indico occidental, 3) Indico oriental, 4) Mediterráneo australoasiático, 5) La Gran Barrera de Coral, 6) Pacífico occidental, 7) Pacífico central y 8) Pacífico oriental. La región atlántica, menos extensa, se divide en las provincias arrecifales: 1) Bermudas, 2) Caribe y 3) Brasil” (Carricart-Ganivet y Horta-Puga 1993).

“Según su origen, configuración y situación con respecto a tierra firme los arrecifes se diferencian en arrecifes costeros, arrecifes de barrera, arrecifes plataforma y atolones” (Schuhmacher 1978)³.

Arrecifes costeros o bordeantes.

Este tipo de arrecifes “crecen en aguas someras, bordeando una costa, muy cerca de ella o separados por un estrecho brazo de agua de poca profundidad” (Carricart-Ganivet y Horta-Puga 1993).



Figura 2. ARRECIFE COSTERO - NUSA PENIDA (INDONESIA)⁵.

Arrecifes de barrera o barreras de arrecifes.

Los arrecifes de barrera “se disponen paralelamente a una costa, pero están más alejados de ella, separados por un canal llegan a tener, en algunos casos, hasta 100 m de profundidad, son mayores y se disponen de manera continua a lo largo de distancias más prolongadas” (Carricart-Ganivet y Horta-Puga 1993).

⁵https://www.flickr.com/photos/banco_imagenes_geologicas/5022241609/lightbox/



Figura 3. IMAGEN POR SATÉLITE DE UNA PARTE DE LA GRAN BARRERA DE CORAL. FOTO POR CORTESÍA DE LA NASA. AUSTRALIA⁶.

Arrecifes plataforma.

“Presentan la parte superior plana y alargada, debido a la acción conjunta de vientos y corrientes locales predominantes” (Carricart-Ganivet y Horta-Puga 1993).

Atolones.

“Son anillos de islas de coral; rodean una laguna central profunda, generalmente se encuentra en mar abierto y están asociados a conos volcánicos” (Carricart-Ganivet y Horta-Puga 1993). “Estas estructuras se originan a partir del crecimiento de corales alrededor de una isla volcánica a medida que ésta se va hundiendo muy lentamente a escala temporal geológica. Al final del hundimiento queda un anillo de arrecife con una laguna central poco profunda” (Alcolado 2004)

⁶https://es.wikipedia.org/wiki/Gran_Barrera_de_Coral



Figura 4. ATOLÓN⁷.

2.3 ¿QUÉ SON LOS CORALES?

Debido a la importancia que tienen los corales pétreos como grupo clave en la formación de los arrecifes coralinos se hará la definición de este tipo de corales. “Los corales pétreos son animales predominantemente coloniales, del grupo de los Celenterados o Cnidarios, que producen un esqueleto pétreo calcáreo (de aragonito) debajo de su tejido vivo, y que están constituidos por numerosos pólipos carnosos fusionados entre sí. Cada pólipo es una unidad individual que desempeña las funciones vitales con cierta coordinación con el resto de los pólipos de la colonia. Cada uno atrapa el alimento con una corona de tentáculos que rodea su boca y lo asimilado se reparte dentro de toda la colonia a través de canales que los conectan entre sí. Los tentáculos y unos filamentos internos están armados de bacterias de "células disparadoras"(nematocistos) que poseen microscópicos dardos venenosos atados por largos filamentos como si fueran arpones balleneros. Estos últimos paralizan y atrapan a las pequeñas presas que sirven de alimento al coral. La excreción se realiza por la misma boca, y la respiración tiene lugar por difusión del oxígeno y del anhídrido carbónico a través de las membranas celulares y tejidos. Existen dos tipos de corales duros, los escleractinios o "madréporas" y los hidrocorales o "corales de fuego". Estos últimos, tremendamente urticantes, queman como el fuego. Como dato muy curioso, los corales pueden vivir decenas de años, incluso siglos. Algunos se han atrevido a estimar que pueden vivir más de mil años” (Alcolado 2004).

⁷<https://www.taringa.net/posts/imagenes/2974158/Fotografias-de-Atolones-No-sabes-que-son-entra.html>

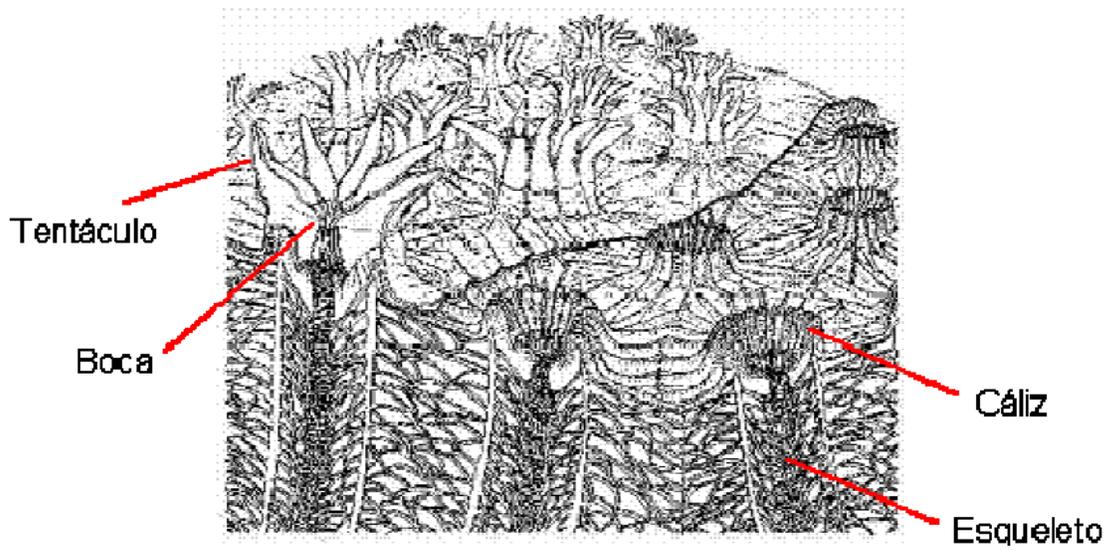


Figura 5. ESQUEMA CON LOS PÓLIPOS DE UN CORAL (CORTESÍA DE SERGIO GONZÁLEZ FERRER)²



Figura 6. *Millepora dichotoma*. Es una especie de la Clase Hidrozoa. (Coral de fuego)⁸

⁸<https://es.wikipedia.org/wiki/Millepora>



Figura 7. *Diploria labyrinthiformis*, es una especie de la clase Anthozoa y del orden Scleractinia⁹

2.4 DISTRIBUCIÓN DE ESPECIES DE CORAL EN MÉXICO.

La distribución de coral se da desde las zonas costeras hasta las grandes profundidades en forma de sustratos duros (Fig. 8).

Figura 8. Grupos principales de corales y nombres comunes (*formas hermatípicas)¹⁰

Clase	Subclase	Orden	Nombre Común.
Hydrozoa		Milleporina*	Corales de Fuego
		Stylasterina	Corales Violeta
Anthozoa	Alcyonaria u	Alcyonacea	Corales Blandos
	Octocorallia	Gorgonacea	Corales Cráneos (incl. Coral Rojo)
		Helioporacea*	Corales Azules
		Stolonifera	Coral Órgano (Tubipora)
	Zoantharia	Scleractinia*	Corales Verdaderos,
			Madreporarios
	Ceriantiphataria	Anthipataria	Corales Negros

Encontrar un trabajo de recopilación que contenga todas las especies de corales pétreos de la República Mexicana puede ser un tanto complejo. Sin embargo, el trabajo de Horta-Puga y Carricart-Ganivet es una lista bastante completa y actualizada de los corales pétreos del orden *Milleporina*, *Stylasterina* y *Scleractinia*. “Conforme a las clasificaciones de Wells (1956) para *Scleractinia*, Boschman (1956) para *Milleporina* y Cairns (1983) para *Scleractinia*. Las

⁹<https://es.wikipedia.org/wiki/Scleractinia>

¹⁰ (Horta-Puga y Carricart-Ganivet 1993)

localidades donde se han registrado a cada especie siguiendo un orden por estado y luego por localidad. Las especies marcadas con un asterisco son hermatípicas. La presencia del signo “?” significa que existe duda a la posición sistemática o la localización geográfica de la especie, SAV=Sistema Arrecifal Veracruzano, ubicado frente a Veracruz y Antón Lizardo, Ver. El uso de sinonimias se restringe, exclusivamente, a aquellas especies que han sido registradas con otro nombre en nuestro país, y se acompaña de la cita donde se encuentra la explicación nomenclatorial aceptada por los autores (1993:67)

Tabla 1. Especies de corales en México ¹⁰

<p>Phylum Cnidaria Hatscheck 1888 Classis Hydrozoa Owen 1843 Ordo Milleporina Hickson 1901 Familia Milleporidae Fleming 1828 <i>Millepora akieormis</i> Linnaeus 1758* Sin.: <i>Millepora complanata</i> Scatterday 1974 (fide Zlatarski y Martínez 1982:409) <i>Millepora squarrosa</i> Scatterday 1974 (fide Zlatarsky y Martínez 1982:409). Quintana Roo: Cozumel (Fenner 1988); isla Contoy (Reyes et al. 1989); Majahual (Carricart-Ganivet y Horta-Puga 1990); Sian Ka'an (Jordán 1990). Veracruz; isla Lobos (Rigby y McIntire 1966; Chávez et al. 1970); SAV (Kuhlmann 1975; Tunnell 1988), golfo de México (Román et al 1989).</p>
<p>Ordo Stylasterina Hickson & England 1905 Familia Stylasteridae Gray 1847 Subfamilia Errininae Hickson 1912 <i>Errina altispina</i> Cairns 1986 Quintana Roo; banco Arrowsmith (Cairns 1986). Subfamilia Distichoporinae Stechow 1921 <i>Distichopora rosalingae</i> Cairns 1986 Quintana Roo: banco Rosalinda y banco Arrowsmith (Cairns 1986) <i>Distichopora yucatanensis</i> Cairns 1986 Quintana Roo: Cozumel (Broch 1942); banco Arrowsmith (Carins 1986). Subfamilia Stylasterinae Gray 1847 <i>Stylaster californicus</i> (Verrill 1866) Sin.: <i>Allopora californica</i> Cairns 1983:429. ? Golfo de California Verril 1870 in Durham 1947). <i>Stylaster complanatus</i> Pourtales 1867 Quintana Roo: banco Arrowsmith (Cairns1986); Cozumel (Broch 1936). <i>Stylaster duchassaingi</i> Pourtales 1867 Quintana Roo: banco Rosalinda, banco Arrowsmith (Cairns 1986). <i>Stylaster erubescens</i> Pourtales 1868 Quintana Roo: banco Arrowsmith (Cairns 1986). <i>Stylaster inornatus</i> Cairns 1986 Quintana Roo: banco Arrowsmith (Cairns, 1986). <i>Stylaster laevigatus</i> Cairns 1986.</p>

Quintana Roo: banco Arrowsmith (Cairns 1986).

Stylaster roseus (Palla 1766).

Quintana Roo: Cozumel (Fenner 1988); Sian Ka'an (Jordán 1990), Veracruz SAV (Tunnell 1988; Horta-Puga y Carricart-Ganivet (1990), golfo de México (Román et al. 1989).

Crypthelia glossopoma Cairns 1986.

Canal de Yucatán (Cairns 1986).

Classis Anthozoa Ehrenberg 1834

Subclassis Zoantharia Haeckel 1896

Ordo Scleractinia Bourne 1900

Subordo Astrocoeniina Vaughan & Wells 1943

Familia Astrocoeniidae Koby 1980

Stephanocoenia intersepta Milne Edwards & Haime 1848*

Sin.: *Stephanocoenia michelinii* Zlatarski y Martínez 1982:132.

Quintana Roo: costa norte (Castañares y Soto 1982; Jordán 1979); Cozumel (Fenner 1988); Sian Ka'an (Jordán 1979); Veracruz, SAV (Horta-Puga y Carricart-Ganivet 1985); Kuhlmann 1975; Tunnell 1988), golfo de México (Román et al. 1989).

Familia Thamnasteridae Vaughan & Wells 1943

Psammocora brighann Vaughan 1907*

Baja California Sur: canal de San Lorenzo (Durham y Barnard 1952).

Psammocora wallow (Verrill 1866)*

Baja California Sur: isla San Francisco (Squires 1959); La Paz (Verrill 1866), Nayarit islas Marisa (Squires 1959).

Familia Pocilloporidae Gray 1842

Madracis dacactis (Lyman 1859)

Quintana Roo: costa norte (Jordán 1979; Castañares y Soto 1982); Cozumel (Fenner 1988); isla Contoy (Reyes et al. 1989); Majahual (Carricart-Ganivet y Horta-Puga 1990); Sian Ka'an (Jordán 1990); Veracruz: isla Lobos (Rigby y MacIntire 1966); SAV (Villalobos 1971; Kuhlmann 1975; Horta-Puga y Carricart-Ganivet 1985; Tunnell 1988), golfo de México (Román et al 1989).

Madracis myriaster (Milne Edwards & Haime 1849)

Caribe mexicano (Cairns 1979).

Madracis pharensis (Heller 1868)

Quintana Roo: Cozumel (Fenner 1988).

Madracis mirabilis (Duehassaing & Michelotti 1860)*

Quintana Roo: costa norte (Jordán 1979); Cozumel (Fenner 1988); Majahual (Carricart-Ganivet y Horta-Puga 1990); Sian Ka'an (Jordán 1990).

Pocillopora damicornis (Linnaeus 1758)*

Baja California Sur, Los Frailes, bahía Pulmo, isla Cerralvo, isla Espíritu Santo, isla Ballena (Squires 1959). Oaxaca; Huatulco (Durham y Barnard 1952). Pacífico mexicano (Román et al 1989).

Pocillopora elegans Dana 1846*

Sin.: *Pocillopora capitata* Squires 1959:409 Squires 1959; *Pocillopora robusta* Squires

1959:409.

Baja California Norte: canal de San Lorenzo, Baja California Sur: bahía los Frailes, bahía Pulmo. Isla Cerralvo, isla Espíritu Santo, isla Ballena, isla Partida, isla San Francisco, Nayarit: islas Marías (Squires 1959).

Pocillopora meandrina Dana 1846*

Baja California Sur bahía Los Frailes, bahía Pulmo, isla Espíritu Santo, isla Partida; Nayarit: islas Marías (Squires 1959), isla Clipperton (Hertlein y Emerson 1957).

Pocillopora pabnata Palmer 1928*

Oaxaca; puerto Ángel (Palmer, 1928).

Pocillopora verrucosa Dana 1846*

Sin.: *Pocillopora porosa* Squires 1959:410. Baja California Norte: canal de San Lorenzo. Baja California Sur: isla Isabel, bahía Pulmo, isla Cerralvo, canal de San Lorenzo, isla Espíritu Santo, isla Partida (Squires 1959); La Paz (Verrill 1869). Nayarit: islas Marías (Squires 1959), isla Clipperton (Hertlein y Emerson 1957).

Familia Acroporidae Verrill 1902

Acropora cervicornis (Lamarck 1816)*

Quintana Roo: costa norte (Jordán 1979; Castañares y Soto 1982); Cozumel (Fenner 1988); isla Contoy (Reyes et al 1989); Sian Ka'an (Jordán 1990). Veracruz: La Blanquilla (Moore 1958); isla Lobos (Rigby y McIntire 1966); SAV (Heilprin 1890; Villalobos 1971; Horta-Puga y Carricart-Ganivet 1985; Tunnell 1988). Yucatán: Arrecife Alacrán (Koenicker et al 1959). Golfo de México (Román et al. 1989).

Acropora palmata (Lamarck 1816)*

Quintana Roo: costa norte (Jordán 1979; Castañares y Soto 1982); Cozumel (Fenner 1988); isla Contoy (Reyes et al. 1989); Majahual (Carricart-Ganivet y Horta-Puga 1990); Sian Ka'an (Jordán 1990). Veracruz: La Blanquilla (Moore, 1958); isla Lobos (Rigby y McIntire 1966; Chávez, et al. 1970); SAV (Heilprin 1890; Villalobos 1971; Kuhlmann, 1975; Horta-Puga y Carricart-Ganivet 1985; Tunnell 1988). Yucatán: arrecife Alacrán (Koenicker et al. 1959). Golfo de México (Román et al 1989).

Acropora prolifera (Lamarck 1816)*

Quintana Roo: costa norte (Jordán 1979; Castañares y Soto 1982); Sian Ka'an (Jordán 1990). Veracruz: isla Lobos (Chávez et al. 1970); SAV (Kuhlmann 1975; Tunnell 1988), Golfo de México (Román et al 1989).

Montipora fragosa Verrill 1870*

Baja California Sur: ?La Paz (Verrill, 1868-1870).

Subordo Fungiina Verrill 1865

Superfamilia Agariicae Gray 1847

Familia Agariciidae Gray 1847

Agaricia agaricites (Linnaeus 1758)*

Quintana Roo: Costa norte (Jordán 1979; Castañares y Soto 1982); Cozumel (Fenner 1988); isla Contoy (Reyes et al. 1989); Majahual (Carricart-Ganivet y Horta-Puga 1990); Sian Ka'an (Jordán 1990). Veracruz: SAV (Villalobos 1971; Kuhlmann 1975; Horta-Puga y Carricart-Ganivet 1985; Tunnell 1988); Yucatán: Arrecife Alacrán (Kornicker et al. 1959). Golfo de México (Román et al 1989).

Agarricia fragilis Dana 1848 *

Quintana Roo: Costa norte (Jordán 1979); Sian Ka'an (Jordán 1979); Sian Ka'an (Jordán 1990). Veracruz: SAV (Horta-Puga y Carricart-Ganivet 1985; Tunnell 1988). Golfo de México (Román et al.1989).

Agaricia tenuifolia (Dana 1846)*

Quintana Roo: Costa norte (Jordán 1979; Castañares y Soto 1982); Majahual (Carricart-Ganivet y Horta Puga 1990)

Agaricia undata (Ellis & Solander 1786)*

Quintana Roo: costa norte (Jordán 1979).

Leptoseria cucullata (Ellis & Solander 1786)*

Sin.: Helioseria cucullata Dinesen 1980 (fide Cairns, 1982:81).

Quintana Roo: costa norte (Jordán 1979; Castañares y Soto 1982); Cozumel (Fenner 1988); Majahual (Carricart-Ganivet y Horta-Puga 1990); Sian Ka'an (Jordán 1990). Veracruz: SAV (Villalobos 1971; Horta-Puga y Carricart-Ganivet 1985; Tunnell 1988). Golfo de México (Román et al. 1989).

Pavona clivosa Verrill 1869*

Baja California Sur: bahía Pulmo, isla Cerralvo, isla San Francisco (Squires 1959).

Pavona cf. explanulata (Lamarck 1816)*

Isla Clipperton (Durham y Banard, 1952).

Pavona gigantea Verrill 1869*

Baja California Sur bahía Pulmo, isla Cerralvo, isla San Francisco, isla de Carmen (Squires 1959); puerto Escondido, isla del Carmen. Oaxaca: bahía Escondida (Durham 1947). Isla Clipperton (Durham y Barnard 1952)

Familia Siderastreae Vaughan & Wells 1943

Siderastrea radians (Pallas 1766)*

Sin.: Siderastrea *siderea* Zlatarski y Martínez 1982:297-300.

Quintana Roo: costa norte (Jordán 1979; Castañares y Soto 1982); Cozumel (Fenner 1988); isla Contoy (Reyes et al 1989); Sian Ka'an (Jordán 1990). Veracruz: La Blanquilla (Moore, 1958); isla Lobos (Rigby y McIntire 1966; Chávez et al 1970); SAV (Heilprin 1890; Villalobos 1971; Kuthlmann 1975; Horta-Puga y Carricart-Ganivet 1985; Tunnell 1988). Yucatán: arrecife Alacrán (Kornicker et al 1959). Golfo de México (Román et al. 1989).

Superfamilia Fungiidae Dana 1846

Familia Fungiidae Dana 1846

Clycloseris elegans (Verrill 1870)*

Baja California Norte: canal de San Lorenzo (Durham y Barnard, 1952). Baja California Sur: isla Espíritu Santo, isla San Diego (Squires 1959); La Paz (Verrill 1868-1870), Nayarit: islas Marías (Squires, 1959).

Clycloseris mexicana Durham 1947*

Baja California Norte: canal de San Lorenzo (Durham y Barnard 1952). Baja California Sur: bahía Agua Verde, isla Carmen, isla San Diego, bahía San Evaristo (Durham 1947); puerto Escondido (Durham y Barnard 1952); isla Espíritu Santo, isla San Diego, isla Partida, isla Carmen, isla Coronados Nayarit: islas Marías (Squires 1959).

Fungiacyathus pusillus: (Pourtales 1868)

Quintana Roo: banco Arrowsmith (Cairns 1979).

Fungiacyathus symmetricus(Pourtales 1871)

Caribe mexicano (Cairns 1979).

Superfamilia Poriticae Gray 1842

Familia Poritidae Gray 1842

Porites astreoides Lamarck 1816*

Quintana Roo: costa norte (Jordán 1979; Castañares y Soto 1982); Cozumel (Fenner 1988); isla Contoy (Reyes et al. 1989); Majahual (Carricart-Ganivet y Horta-Puga 1990). Veracruz: isla Lobos (Chávez et al. 1970); SAV (Heilprin 1890; Villalobos 1971; Kuhlmann 1975; Horta-Puga y Carricart-Ganivet 1985; Turnnell 1988). Yucatán: arrecife Alacrán (Kornicker et al. 1959). Golfo de México (Román et al. 1989).

Ponies baueri Squires 1959*

Nayarit: Islas Marias (Squires 1959).

Porites branneri Rathbun 1888*

Quintana Roo: costa norte (Jordán 1979); Cozumel (Fenner 1988). Veracruz: ?isla Lobos (Rigby y McIntire 1966); SAV (Horta-Puga y Carricart-Ganivet 1985). Golfo de México (Román et al. 1989).

Porites californica Verrill 1870*

Sin.: *Porites nodulosa* Squires 1959: 420. *Porites porusa* Durham 1947: 21. *Porites sverdrupi* Squires 1959:420-421.

Baja California Norte: isla Ángel de la Guarda (Durham 1947); bahía de Gonzaga. Baja California Sur: bahía Agua Verde, Puerto Escondido, punta Pulpito, bahía Los Frailes, bahía Pulmo, bahía Magdalena, isla Magdalena, isla Cerralvo, isla Espíritu Santo, isla Partida, isla San Francisco, isla San José, isla San Diego, isla Monserrat, isla Carmen, isla Coronado, isla Santa Inez, isla San Marcos (Squires 1959); La Paz (Verrill 1868-1870). Nayarit: islas Marías. Sonora: isla San Esteban (Squires 1959). Golfo de California (Durham y Barnard 1952; Brusca 1973).

Poriles panamensis Verrill 1867*

Nayarit islas Marías (Squires 1959). Oaxaca: puerto Ángel (Palmer 1928).

Porties pontes (Pallas 1766)*

Sin.: *Ponies divaricata* Cairns 1982: 283; Zlalarski y Martínez 1982: 314-318. *Porites furcata* Cairns 1982: 283; Zlatarski y Martínez 1982: 314-318.

Quintana Roo: costa norte (Jordán 1979; Castañares y Soto 1982); Cozumel (Fenner 1988); isla Contoy (Reyes et al. 1989); Majahual (Carricart-Ganivet y Horta-Puga 1990); ?Sian Ka'an (Jordán 1990). Veracruz: La Blanquilla (Moore 1958); isla Lobos (Rigby y McIntire 1966; Chávez et al. 1970); SAV (Heilprin 1890; Villalobos, 1971; Kuhlmann 1975; Tunnel 1988). Yucatán: arrecife Alacrán (Kornicker et al. 1959). Golfo de México (Román et al. 1989).

Subordo Faviina Vaughan & Wells 1943

Superfamilia Faviicae Gregory 1900

Familia Faviidae Gregory 1900

Subfamilia Faviinae Gregory 1900

Favia conferta Verrill 1868*

Quintana Roo: isla Contoy (Reyes et al.1989). Veracruz: SAV (Nuevo registro).

Favia fragum Verrill (Esper 1788)*

Quintana Roo: costa norte (Jordán1979; Castañares y Soto 1982); Cozumel (Frenner 1988); isla Contoy (Reyes et al. 1989); Sian Ka'an (Jordán 1990). Veracruz: ? SAV

(Villalobos 1971), Yucatán: arrecife Alacrán (Kornicker et al. 1959). Golfo de México (Román et al. 1989).

Favia gravida Verrill 1968*

Quintana Roo: isla Contoy (Reyes et al. 1989).

Diploria clivosa (Ellis & Solander 1786)*

Quintana Roo: costa norte (Jordán 1979; Castañares y Soto 1982); Cozumel (Fenner 1988); isla Contoy (Reyes et al. 1989); Sian Ka'an (Jordán 1990). Veracruz: La Blanquilla (Moore 1958); isla Lobos (Rigby y McIntire 1966; Chávez et al. 1970); SAV (Heilprin 1890; Villalobos 1971; Kuhlmann, 1975; Horta-Puga y Carricart-Ganivet 1985; Tunnello 1988). Yucatán: arrecife Alacrán (Kornicker et al. 1959). Golfo de México (Román et al. 1989).

Diploria labyrinthiformis (Linnaeus 1758)*

Quintana Roo: costa norte (Jordán 1979; Castañares y Soto 1982); Cozumel (Fenner 1988); isla Contoy (Reyes et al. 1989); Sian Ka'an (Jordán 1990). Veracruz: ? La Blanquilla (Moore 1958); ? isla Lobos (Rigby y McIntire 1966); SAV (Heilprin 1890; Villalobos 1971; Kuhlmann, 1975; Horta-Puga y Carricart-Ganivet 1985; Tunnell 1988). Yucatán: arrecife Alacrán (Kornicker et al. 1959). Golfo de México (Román et al. 1989).

Diploria strigosa (Dana 1848)*

Quintana Roo: costa norte (Jordán 1979; Castañares y Soto 1982); Cozumel (Fenner 1988); isla Contoy (Reyes et al. 1989); Sian Ka'an (Jordán 1990). Veracruz: La Blanquilla (Moore 1958); isla Lobos (Rigby y McIntire 1966; Chávez et al. 1970); SAV (Heilprin 1890; Villalobos 1971; Kuhlmann, 1975; Horta-Puga y Carricart-Ganivet 1985; Tunnell 1988). Yucatán: Arrecife Alacrán (Kornicker et al. 1959). Golfo de México (Román et al. 1989).

Manicina areolata (Linnaeus 1758)*

Quintana Roo: costa norte (Jordán 1979; Castañares y Soto 1982); Cozumel (Fenner 1988); isla Contoy (Reyes et al. 1989); Sian Ka'an (Jordán 1990). Veracruz: isla Lobos (Chávez et al. 1970); SAV (Villalobos 1971; Horta-Puga y Carricart-Ganivet 1985; Tunnell 1988). Yucatán: Arrecife Alacrán (Kornicker et al. 1959). Golfo de México (Román et al. 1989).

? *Colpophyllia breviserialis* Milne-Edwards y Haime*

Quintana Roo: costa norte (Castañares y Soto 1982).

Colpophyllia natans (Houttuyn 1772)*

Sin.: *Colpophyllia amaranthus* Cairns 1982: 287.

Quintana Roo: costa norte (Jordán 1979; Castañares y Soto 1982); Cozumel (Fenner 1988); Isla Contoy (Reyes et al. 1989); Sian Ka'an (Jordán 1990). Veracruz: La Blanquilla (Moore 1958); isla Lobos (Chávez et al. 1970); SAV (Villalobos 1971; Kuhlmann, 1975; Horta-Puga y Carricart-Ganivet 1985; Tunnell 1988). Yucatán: arrecife Alacrán (Kornicker et al. 1959). Golfo de México (Román et al. 1989).

Subfamilia Montastreinae Vaughan & Wells 1943.

Cladocora arbuscula (Lesueur 1821)*

Quintana Roo: isla Contoy (Reyes et al. 1989); Sian Ka'an (Jordán 1990).

Montastrea annularis (Ellis & Solander 1976)*

Quintana Roo: costa norte (Jordán 1979; Castañares y Soto 1982); Cozumel (Fenner 1988); isla Contoy (Reyes et al. 1989); Sian Ka'an (Jordán 1990). Veracruz: La Blanquilla (Moore 1958); isla Lobos (Rigby y McIntire 1966; Chávez et al. 1970); SAV (Heilprin 1890; Villalobos

1971; Kuhlmann, 1975; Horta-Puga y Carricart-Ganivet 1985; Tunnell 1988). Yucatán: arrecife Alacrán (Kornicker et al. 1959). Golfo de México (Román et al. 1989).

Montastrea cavernosa (Linnaeus 1767)*

Quintana Roo: costa norte (Jordán 1979; Castañares y Soto 1982); Cozumel (Fenner 1988); isla Contoy (Reyes et al. 1989); Sian Ka'an (Jordán 1990). Veracruz: La Blanquilla (Moore 1958); Isla Lobos (Rigby y McIntire 1966; Chávez et al. 1970); SAV (Heilprin 1890; Villalobos 1971; Kuhlmann, 1975; Horta-Puga y Carricart-Ganivet 1985; Tunnell 1988). Yucatán: arrecife Alacrán (Kornicker et al. 1959). Golfo de México (Román et al. 1989).

Solenastrea bournoni Milne Edwards & Haime 1849*.

Quintana Roo: costa norte (Castañares y Soto 1982); isla Contoy (Reyes et al. 1989).

Solenastrea hyodes (Dana 1846)*

Quintana Roo: costa norte (Jordán 1979); isla Contoy (Reyes et al. 1989).

Familia Rhizangiidae d'Orbigny 1851.

? *Astrangia brasiliensis* Vaughan 1906.

Veracruz: La Blanquilla (Moore 1958).

Astrangia browni Palmer 1928.

Oaxaca: Puerto Ángel (Palmer 1928).

Astrangia californica Durham & Barnard 1952.

Baja California: bahía San Luis Gonzaga (Durham y Barnard 1952). Guerrero: Acapulco.

Oaxaca: Tehuantepec (Durham 1947). Sonora: Guaymas (Verrill 1868-1870),

Astrangia costata Verrill 1870.

Golfo de California (Squires 1959).

Astrangia dentata Verrill 1870.

Baja California Sur: La Paz. Guerrero: Acapulco (Verrill 1868-1870).

Astrangia equatorialis Durham & Barnard 1952.

Jalisco: Cabo Corrientes, Guerrero o Oaxaca? (Squires, 1959).

Astrangia haimeii Verrill 1866.

Sin.: *Astrangia caboensis*, *A. conceptionensis*, *A. concinna*, *A. coronadosensis*, *A. cortezi*, *A. hancocki*, *A. lajollaensis*, *A. pedersenii*, *A. santelmoensis* y *A. sanfeli-pensis* Squires 1959:415-418.

Baja California Norte: bahía San Felipe (Durham y Barnard 1952); isla Ángel de la Guarda (Durham y Barnard 1952; Squires 1959). Baja California Sur: La Paz (Verrill 1868-70); Canal Cerralvo, isla San Marcos e isla Coronados, San José del Cabo, bahía Concepción, Puerto Escondido (Durham 1947); bahía Concepción (Durham and Barnard, 1952); isla Santa Margarita, isla Espíritu Santo, isla San José, isla Carmen, isla Coronados, isla San Marcos, Puerto Escondido (Squires, 1959). Guerrero: Acapulco (Verrill 1868-1870). Jalisco: Tenacatita, Cabo Corrientes (Durham y Barnard 1952). Sonora: Guaymas (Verrill, 1868-70); Punta Cholla (Durham 1947); isla Tiburón, isla San Esteban (Squires 1959).

Astrangia oaxacensis Palmer 1928.

Oaxaca: Puerto Ángel (Palmer, 1928).

Astrangia solitaria (Lesueur 1817).

Veracruz: SAV (? Villalobos, 1971; Horta-Puga y Carricart-Ganivet 1985; Tunnell 1988).

Astrangia tangolaerisis Durham 1947.

Oaxaca: bahía Tangola (Durham 1947).

Colangia inmersa Pourtales 1871.
 Quintana Roo: Cozumel (Fenner 1988).
Colangia sp.
 Quintana Roo: Cozumel (Fenner 1988).
Oelangia bradleyi Verrill 1866.
 Jalisco: bahía Tenacatita (Durham y Barnard 1952).
Phyllangia americana Milne Edwards y Haime 1849.
 Veracruz: Tecolutla, Veracruz (Nuevo registro).
 ? *Phyllangia dispersa* Verrill 1864.
 Baja California Sur: isla San José, isla Carmen (Squires 1959).

Familia Oculinidae Gray 1847.
 Subfamilia Oculinidae Gray 1847
Oculina diffusa Lamarck 1816*
 Quintana Roo: isla Contoy (Reyes et al. 1989). Veracruz: ? Isla Lobos (Rigby y McIntire 1966). SAV (Villalobos 1971; Horta-Puga y Carricart-Ganivet 1985; Tunnell 1988). Golfo de México (Román et al. 1989).
Oculina ualenciennesi Milne Edwards & Heinle, 1848*
 Quintana Roo: isla Contoy (Reyes et al. 1989). Veracruz: SAV (Tunnell, 1988). Golfo de México (Román et al. 1989).
Madrepora carolina (Pourtales 1871).
 Caribe mexicano (Cairns 1979).
Madrepora oculata Linnaeus 1758.
 Oeste del golfo de México (Cairns 1978); banco de Campeche, Caribe mexicano (Cairns 1979).

Familia Meandrinidae Gray 1847.
Meandrina meandrites (Linnaeus 1758)*
 Quintana Roo: costa norte (Jordán 1979; Castañares y Soto 1982); Cozumel (Fenner 1988); Majahual (Carricart-Ganivet y Horta-Puga 1990); Sian Ka'an (Jordán 1990). Veracruz: ? isla Lobos (Rigby y McIntire 1966). Golfo de México (Román et al. 1989).
 Subfamilia Dichocoeniinae Vaughan & Wells 1943
Dichocoenia stokesi Milne Edwards & Haime 1848*
 Sin.: *Dichocoenia stellaris* Cairns 1982:292.
 Quintana Roo: costa norte (Jordán 1979; Castañares y Soto 1982); Cozumel (Fenner 1988); isla Contoy (Reyes et al. 1989); Sian Ka'an (Jordán 1990). Veracruz: SAV (Tunnell, 1988). Golfo de México (Román et al. 1989).
Dendrogyra cylindrus Ehrenberg 1834*
 Quintana Roo: costa norte (Jordán 1979; Castañares y Soto 1982); Cozumel (Fenner 1988); Sian Ka'an (Jordán 1990).

Familia Mussiidae Ortmann 1890
Isophyllastrea rigida (Dana 1846)*
 Quintana Roo: costa norte (Jordán 1979; Castañares y Soto 1982); Cozumel [como *Isophyllia rigida* (Fenner 1988); isla Contoy (Reyes et al. 1989); Sian Ka'an (Jordán 1990).

Isophyllia sinuosa (Ellis & Solander 1786)*

Sin.: *Isophyllia multiflora* Cairns 1982: 294.

Quintana Roo: costa norte (Jordán 1979; Castañares y Soto 1982); Cozumel (Fenner 1988); isla Contoy (Reyes et al. 1989); Sian Ka'an (Jordán 1990). Veracruz: ? SAV (Villalobos, 1971).

Mycetophyllia aliciae Wells, 1973*

Quintana Roo: costa norte (Jordán 1979; Castañares y Soto 1982); Cozumel (Fenner 1988); Sian Ka'an (Jordán 1990). Golfo de México (Román et al. 1989).

Mycetophyllia danana Milne Edwards & Haime, 1849*

Quintana Roo: costa norte (Jordán 1979; Castañares y Soto 1982); Cozumel (Fenner 1988); Sian Ka'an (Jordán 1990). Veracruz: SAV (Nuevo registro). Golfo de México (Román et al. 1989).

Mycetophyllia ferox Wells 1973*

Quintana Roo: costa norte (Jordán 1979; Castañares y Soto 1982); Cozumel (Fenner 1988); Sian Ka'an (Jordán 1990). Golfo de México (Román et al. 1989).

Mycetophyllia lamarckiana Milne Edwards & Haime 1848*

Quintana Roo: costa norte (Jordán 1979; Castañares y Solo 1982); Cozumel (Fenner 1988); isla Contoy (Reyes et al. 1989); Majahual (Carricart-Ganivet y Horta-Puga 1990); Sian Ka'an (Jordán 1990). Veracruz: La Blanquilla (Moore 1958); isla Lobos (Chávez et al. 1970); SAV (Tunnel! 1988). Yucatán: Arrecife Alacrán (Kornicker et al. 1959). Golfo de México (Román et al. 1989).

Mussa angulosa Pallas 1766*

Quintana Roo: costa norte (Jordán 1979; Castañares y Soto 1982); Cozumel (Fenner 1988); isla Contoy (Reyes et al. 1989); Sian Ka'an (Jordán 1990). Veracruz: La Blanquilla (Moore 1958); isla Lobos (Rigby y McIntire 1966); SAV (Villalobos 1971; Kuhlmann 1975; Horta-Puga y Carricart-Ganivet 1985; Tunnell (1988). Yucatán: arrecife Alacrán (Kornicker et al. 1959). Golfo de México (Román et al. 1989).? *Mussismilia harttii* Verrill 1868) Veracruz: SAV (Tunnel! 1988).

Scolymia lacera (Pallas 1766)*

Sin.: *Scolymia cubensis* Zlatarski y Martínez 1982:158.

Quintana Roo: costa norte (Jordán 1979); Cozumel (Fenner 1988); Sian Ka'an (Jordán 1990). Veracruz: SAV (Tunnel 1988). Golfo de México (Román et al. 1989).

Subordo Caryophyllina Vaughan & Wells 1943

Superfamilia Caryophylliinae Gray 1847

Familia Caryophyllidae Gray 1847

Subfamilia Caryophylliinae Gray 1847

Bathycyathus consagensis Durham & Barnard 1952

Baja California Norte: isla Ángel de la Guarda (Squires, 1959). Baja California Sur: Roca Consag, isla Willard, bahía Magdalena (Durham y Barnard 1952).

Caryophyllia ambrosia Alcock 1898

Oeste del golfo de México, banco de Campeche (Cairns 1978). Caribe mexicano (Cairns 1979).

Caryophyllia berteriana Duchassaing 1850

Banco de Campeche (Cairns 1978). Caribe mexicana (Cairns 1979).

Caryophyllia comufornnis Pourtales
Caribe mexicano (Cairns 1979).

Caryophyllia parvula Cairns 1979
Quintana Roo: banco Arrowsmith (Cairns 1979).

Caryophyllia polygona Pourtales 1878
Banco de Campeche (Cairns 1978; Cairns 1979).

Ceratotrochus franciscana Durham & Barnard 1952
Baja California Sur: isla San Francisco (Durham y Barnard 1952); isla San Diego (Squires 1959).

Coenocyathus bowersi Vaughan 1906
Baja California Sur Puerto Escondido, isla Partida (Durham 1947); isla San Diego (Squires, 1959).

Concentrotheca laevigata Pourtales 1871.
Quintana Roo: banco Arrowsmith (Cairns 1979).

Cyathoceras of cornu Moseley 1881
Quintana Roo: banco Arrowsmith. Caribe mexicano (Cairns 1979).

Deltocyathus calcar Pourtales 1874
Banco de Campeche (Cairns 1978). Caribe mexicano (Cairns 1979).

Deltocyathus eccentricus Cairns 1979
Oeste del Golfo de México, Banco de Campeche, Caribe mexicana (Cairns 1979).

Deltocyathus italicus (Michelotti 1838).
Oeste del Golfo de México (Cairns 1978). Caribe mexicana [como *D. cf italicus* (Cairns 1979)].

Heterocyathus aequicostatus Milne Edwards & Haime 1848
Baja California Norte: isla Ángel de la Guarda. Jalisco: bahía Banderas (Durham y Barnard 1952).

Labyrinthocyathus langi Cairns 1979
Quintana Roo: banco Arrowsmith (Cairns 1979).

Paracyathus humilis Verrill 1870
Isla Clarión (Durham y Barnard, 1952).

Paracyathus pulchellus (Philippi 1842)
Quintana Roo: Cozumel (Fenner 1988). Banco de Campeche (Cairns 1978). Caribe mexicano (Cairns 1979).

Paracyathus tiburonensis Durham 1947
Baja California Norte: isla Ángel de la Guarda. Baja California Sur: isla San Diego, isla Carmen (Squires 1959). Sonora: Isla Tiburón (Durham y Barnard 1952).

Paracyathus stearnsii Verrill 1869
Baja California: canal Dewey (Durham y Barnard 1952).

Stephanocyathus coronatus Pourtales 1867
Banco de Campeche (Cairns 1978). Caribe mexicano (Cairns 1979).

Stephanocyathus diadema Moseley 1876
Banco de Campeche (Cairns 1978). Caribe mexicana (Cairns 1979).

Stephanocyathus paliferus Cairns 1977
Banco de Campeche (Cairns 1978). Caribe mexicano (Cairns 1979).

Tethocyathus recurvatus Pourtales 1878)
 Quintana Roo: Cozumel (Cairns 1979).
Tethocyathus variabilis Cairns 1979
 Quintana Roo: banco Arrowsmith (Cairns 1979).
Trochocyathus fasciatus Cairns 1979
 Quintana Roo: banco Arrowsmith (Cairns 1979).
Trochocyathus rawsonii Pourtales 1874
 Banco de Campeche (Cairns 1978; Cairns 1979).
 Subfamilia Turbinoliinae Milne Edwards & Haime 1848
Peponocyathus stimpsonii Pourtales 1871)
 Banco de Campeche (Cairns 1978; Cairns 1979).
Sphenotrochus hancocki Durham & Barnard 1952
 Baja California Sur Cabeza Ballena (Durham y Barnard 1952).
 Subfamilia Desmophyllinae Vaughan & Wells 1943
Thalamophyllia riisei Duchassaing & Michelotti 1860)
 Quintana Roo: Cozumel (Fenner 1988). Caribe mexicano (Cairns 1979).
 Subfamilia Parasmilliinae Vaughan & Wells 1943
Anomocora fecunda Pourtales 1871)
 Banco de Campeche (Cairns 1978). Caribe mexicana (Cairns 1979).
Asterosmilia prolifera (Pourtales 1871)
 Banco de Campeche (Cairns 1978; Cairns 1979).
Coenosmilia arbuscula Pourtales 1874
 Banco de Campeche (Cairns 1978); Caribe mexicano (Cairns 1979).
Phacelocyathus flos Pourtales 1878)
 Quintana Roo: Cozumel (Fenner 1988).
Rhizosmilia maculata
 Quintana Roo: Cozumel (Fenner 1988).
 Subfamilia Eusmiliinae Milne Edwards y Haime 1857
Eusmilia fastigiata (Pallas 1766)*
 Quintana Roo: costa norte (Castañares y Soto 1982); Cozumel (Fenner 1988); Sian Ka'an (Jordán 1990). Veracruz: SAV (Kuhlmann, 1975). Yucatán: arrecife Alacrán (Kornicker et al. 1959).

Superfamilia Flabellicae Bourne 1905

Familia Flabellidae Bourne 1905
Flabellum fragile Cairns 1977
 Banco de Campeche (Cairns 1978; Cairns 1979).
Flabellum moseleyi Pourtales 1880
 Caribe mexicano (Cairns 1979).
Gardineria paradoxa Pourtales 1868)
 Quintana Roo: banco Arrowsmith (Cairns 1979).
Javonia cailleti Duchassaing & Michelotti 1864)
 Banco de Campeche (Cairns 1978). Caribe mexicana (Cairns 1979).
Polymices fragilis Pourtales 1868)
 Sin.: *Rhizotrochus fragilis* Cairns 1979: 158-160.

Banco de Campeche (Cairns 1978). Caribe mexicano (Cairns 1979).

Familia Guyniidae Hickson 1910

Guynia annulata Duncan 1872

Banco de Campeche (Cairns 1978. Cairns 1979).

Schizocyathus fissilis Pourtales 1874.

Caribe mexicano (Cairns 1979).

Stenocyathus vermiformis Pourtales 1868)

Quintana Roo: banco Arrowsmith (Cairns 1979).

Subordo Dendrophylliina Vaughan & Welts 1943

Familia Dendrophyllidae Gray 1847

Balanophyllia bayeri Cairns 1979

Quintana Roo: Cozumel (Cairns 1979).

Balanophyllia cedrosensis Durham 1947

Baja California Norte: isla Cedros, costa oeste de Baja California (Durham 1947).

Balanophyllia cyathoides (Pourtales 1871)

Quintana Roo: banco Arrowsmith (Cairns 1979).

Balanophyllia elegans Verrill

Baja California Norte (Durham 1947).

Balanophyllia palifera Pourtal

Quintana Roo: banco Arrowsmith (Cairns 1979).

Balanophyllia tiburonensis Durham 1947

Baja California Sur: isla San José (Squires 1959). Sonora. Isla Tiburón (Durham 1947).

Balanophyllia sp. Quintana Roo Cozumel (Fenner 1988).

Dendrophyllia californica

Costa oeste central de Baja California (Durham 1947).

Dendrophyllia cartezi Durham y Barnard 1952

Baja California Norte: isla Ángel de la Guarda. Baja California Sur: isla Partida (Durham y Barnard 1952). Sonora: Wit Tibunn (Squires 1959).

Dendrophyllia gaditana Duncan 1873)

Quintana Roo: banco Arrowsmith (Cairns 1979).

Endopachys vaughani Durham 1947

Baja California Sur, boca del golfo de California (Durham 1947). Punta Cabeza Ballena (Durham y Barnard 1952). Isla San José, isla San Diego, isla Carmen, isla Coronados (Squires, 1959).

Rhizosammia manuelensis Chevalier 1996

Quintana Roo: banco Arrowsmith (Cairns 1979).

Tubastrea aurea(Quoy & Gamard 1833)*

Sin.: *Tubastrea tenuila* mellosa Squires 1959: 427.

Baja California Sur: isla Partida, isla Danzante, isla San Marcos, Roca San Marcial (Squires 1959); La Paz (Verrill 1868-70, 1869). Guerrero: Acapulco (Durham 1947).

Se ha registrado un total de 152 especies de corales pétreos en México. De ellos 139 corresponden a Scleractinia, 97 para las aguas del Atlántico y 42 al Pacífico, no encontrándose ninguna especie en común en ambos litorales: dos especies que están registradas en el Atlántico: *Cladocera arbuscula* y *Madrepora oculata*, también han sido registradas en el Pacífico, pero no en nuestro país (Duhram 1947, Durham y Barnard 1952)¹¹; La especie *Tubastrea aurea* de acuerdo con Wells y Lang 1973 está registrada en el Pacífico y también se ha encontrado en el Atlántico pero no en México¹¹.

En cuanto a géneros se refiere, hay 69, 56 en el Atlántico y 19 para el Pacífico, 6 de ellos (*Astrangia*, *Balanophyllia*, *Dendrophyllia*, *Paracyathus*, *Forties* y *Phyllangia*) se presentan en ambos casos. Varios géneros tienen especies en ambos océanos, aunque hasta el momento no se han registrado en nuestras costas (Tabla 2), esto debido a: (1) falta de muestreos y/o (2) condiciones ecológicas inadecuadas (Horta-Puga y Carricart-Ganivet 1993).

La clasificación a nivel familia encontrada es en total de 17; 15 en el Atlántico, 9 en el Pacífico y 7 en ambos litorales (*Pocilloporidae*, *Acroporidae*, *Agariicidae*, *Poritidae*, *Rhizangfidae*, *Caryophyllidae* y *Dendrophyllidae*), para nuestro país. Respecto a corales hermatípicos, se registra un total de 63 especies (incluyendo Scleractinia y Milleporina), 46 para el Atlántico y 17 para el Pacífico” (Carricart-Ganivet y Horta-Puga 1993).

Existen diferencias fundamentales respecto al origen de las especies arrecifales; mientras que las especies atlánticas se consideran un relicto¹² de la fauna coralina del terciario¹³ medio del mar de *Tethys*, las especies pacíficas están asociadas a los corales modernos del Indopacífico occidental. De hecho solo 2 géneros hermatípicos se encuentran en ambos océanos *Porites* y *Millepora* (Cortés 1986)¹¹ aunque el último no ha sido registrado en las costas mexicanas del Pacífico, y *Tubastrea aurea*, que también se presenta en ambos litorales, pero no reportada en las costas atlánticas mexicanas. Además, otra razón de las diferencias entre el número de especies hermatípicas en ambos litorales, es que en el Atlántico existen arrecifes de coral bien desarrollados y estudiados, y en el Pacífico, el grado de desarrollo de las comunidades arrecifales es muy inferior y la región está poco estudiada” (Horta-Puga y Carricart-Ganivet 1993).

¹¹ Citado en (Horta-Puga y Carricart-Ganivet 1993)

¹²Relicto: organismo que en otro tiempo fue abundante en una gran área, y que ahora está solo en pequeñas áreas.

¹³ Era terciaria o Terciario también conocida como era cenozoica: inició hace unos 66 millones de años y se extiende hasta la actualidad.

Tabla 2. Distribución geográfica de géneros de Scleractinia presentes en México: A= Atlántico, P-E- Pacífico Este, I= Indopacífico.¹⁰

<i>Stephanocoenia</i>	A, P-E	<i>Botkcyatitus</i>	A, P-E, I
<i>Psammocora</i>	P-E, I	<i>Caryophyllia</i>	A, P-E, I
<i>Madracis</i>	A, P-E, I	<i>Ceratotrochus</i>	A, P-E, I
<i>Pocillopora</i>	P-E, I.	<i>Coenocyathus</i>	A, P-E,
<i>Acropora</i>	A, P-E, I	<i>Concentrotheca</i>	A
<i>Montipom</i>	P-E, I	<i>Cyathoceras</i>	A
<i>Agaricia</i>	A, ?P-E	<i>Dehotwarns</i>	A, P-E, I
<i>Leptoseris</i>	A, P-E, I	<i>Heterocyathus</i>	P-E, I
<i>Pavona</i>	P-E, I	<i>Labyrinthocyatithus</i>	A
<i>Paracyathus</i>	A, P-E, I	<i>Siderastrea</i>	A, I
<i>Ocloseris</i>	P-E, I	<i>Stephanocyathus</i>	A, P-E
<i>Fungiacyaihus</i>	A	<i>Tethocyathus</i>	A
<i>Ponies</i>	A, P-E, I	<i>Trochocyathus</i>	A
<i>Favia</i>	A, I	<i>Pepanocyathus</i>	A, P-E, I
<i>Diploria</i>	A	<i>Sphenotrochus</i>	P-E
<i>Manicina</i>	A	<i>Thalamophyllia</i>	A
<i>Colpophyllia</i>	A	<i>Anomocora</i>	A, ?I
<i>Cladocora</i>	A, P-E, I	<i>Asterosrnilia</i>	A
<i>Montastrea</i>	A	<i>Coenosmilia</i>	A
<i>Solenastrea</i>	A, P-E	<i>Phacelocyathus</i>	A
<i>Astrangia</i>	A, P-E, I	<i>Rhizosmilia</i>	A
<i>Colangia</i>	A	<i>Eusmilia</i>	A
<i>Oulangia</i>	P-E, I	<i>Flabellum</i>	A, P-E, I
<i>Phyllangia</i>	A, P-E	<i>Gardineria</i>	A
<i>Oculina</i>	A, P-E, I	<i>'amnia</i>	A
<i>Madrepora</i>	A, P-E, I	<i>Polynices</i>	A
<i>Meandrina</i>	A	<i>Guynia</i>	A, P-E, I
<i>Dichocoenia</i>	A	<i>Schizocyathus</i>	A
<i>Dendrogyra</i>	A	<i>Sienacyathus</i>	A
<i>Isophyllastrea</i>	A	<i>Balanophylha</i>	A, P-E, I
<i>Isophyllia</i>	A	<i>Dendrophyllia</i>	A, P-E, I
<i>Mycetophyllia</i>	A	<i>Endopachys</i>	P-E, I
<i>Mussa</i>	A	<i>Rhizopscrmnia</i>	A
<i>Mussismilia</i>	A	<i>Tubastrea</i>	A, P-E, I
<i>Scolymia</i>	A		

En el orden de *Stylasterina*, “se registraron 12 especies, pertenecientes a 4 géneros”¹¹. No se encontraron especies en común entre los dos litorales, sólo el género *Stylaster* presente en ambas regiones, aunque se duda si el género *Stylaster californicus* se encontró en el golfo de California, debido a que Boschman (1957) asumió que es un ejemplar de la costa de California en los Estados

Unidos.¹¹ Por otro lado a lo que se refiere a Milleporina, la especie *Malocornis* se encuentra registrada en las costas del país, pero no el Pacífico.

El estudio de la fauna coralina de ambientes someros está mucho mejor conocido que el de las especies de aguas profundas, donde existe una brecha importante respecto al conocimiento de las especies, con base en esto se podría decir que se espera que el número de especies en el país aumente, quizás al doble de las conocidas actualmente, con esto se deja ver que se requiere realizar campañas oceanográficas para llegar a conocer plenamente la diversidad coralina.

Las especies Endémicas¹⁴ son 19 en el país, aunque existe la posibilidad de que se encuentren en otras regiones debido a: “(1) la capacidad de dispersión de las especies coralinas o (2) la falta de estudios más extensos sobre este grupo. Las especies marcadas con un asterisco, son habitantes de aguas someras”¹⁰

- 1) *Stylasterina*: Especies restringidas a la localidad tipo: *Errina altispina*, *Stylaster inornatus*, *S.laevigatus*, *Crypthelia glossopoma*. Especies restringidas al Caribe mexicano: *Distichopora rosalingae*, *D. yucatanensis*.¹⁰
- 2) *Scieractinia*: Especies restringidas a la localidad tipo: *Pocillopora palmata**, *Montipora fragosa**, *Astrangia browni**, *A. californica**, *S.oaxacaensis** y *Oulangia bradleyi*.¹⁰
- 3) Península de Baja California (ambas costas): *Bathycyathus consagensis*. Golfo de California: *Ceratotrochus franciscana*, *Paracyathus tiburonensis* y *Dendrophyllia cortezi*.
- 4) Islas Mariás, Nay.: *Porites baueri**.¹⁰
- 5) Especies que abarcan el Pacífico Mexicano: *Astrangiaconferta**.¹⁰

Otro estudio más reciente respecto a corales hermatípicos realizado en la zona del Pacífico Mexicano es el de Reyes-Bonilla y López Pérez 1998, el cual se enfoca en la taxonomía¹⁵ y distribución geográfica de las especies. Las investigaciones previas indicaban que los corales estaban restringidos especialmente a la región del Golfo de California, aunque se sabía de su existencia en Nayarit, Jalisco, Michoacán, Guerrero, Oaxaca y las islas Revillagigedo (Durham Barnard, 1952; Brand et al., 1958; Greenfield et al., 1970; Salcedo-Martínez et al., 1988)¹⁶. De manera general, se coincidía en afirmar que en la costa mexicana había pocas especies (menos de 15) y que no existían arrecifes verdaderos (Anónimo, 1988)¹⁷. Sin embargo, estudios más recientes y detallados, conducidos luego en las mismas áreas, mostraron que se había subestimado de manera importante el número de formaciones coralinas, la riqueza de especies y la complejidad de esos sistemas biológicos (Brusca y Thomson, 1975; Reyes-Bonilla, 1993)¹⁷. “Por ello, se ha hecho patente la necesidad de volver a evaluar la importancia de estas comunidades en el contexto del Pacífico Mexicano” (Reyes Bonilla y López Pérez 1998).

Reyes y López realizaron un estudio, cuyo objetivo principal fue el de presentar el listado completo de las especies de corales hermatípicos en el Pacífico mexicano (1998).

Los datos sobre la distribución geográfica de las especies de corales hermatípicos del Pacífico mexicano se obtuvieron de tres fuentes principales: trabajo de campo, revisión de la literatura y consultas con especialistas. En el primer caso, se conjuntó la información generada en visitas a más

¹⁴ Especie endémica: que de forma natural sólo habitan en un lugar.

¹⁵ Taxonomía: Ciencia que trata de los principios, métodos y fines de la clasificación, generalmente científica.

¹⁶ Citado en (Reyes Bonilla y López Pérez 1998)

de 30 zonas coralinas de la región (Fig. 9), llevadas a cabo entre 1986 y1996. (Reyes Bonilla y López Pérez 1998).

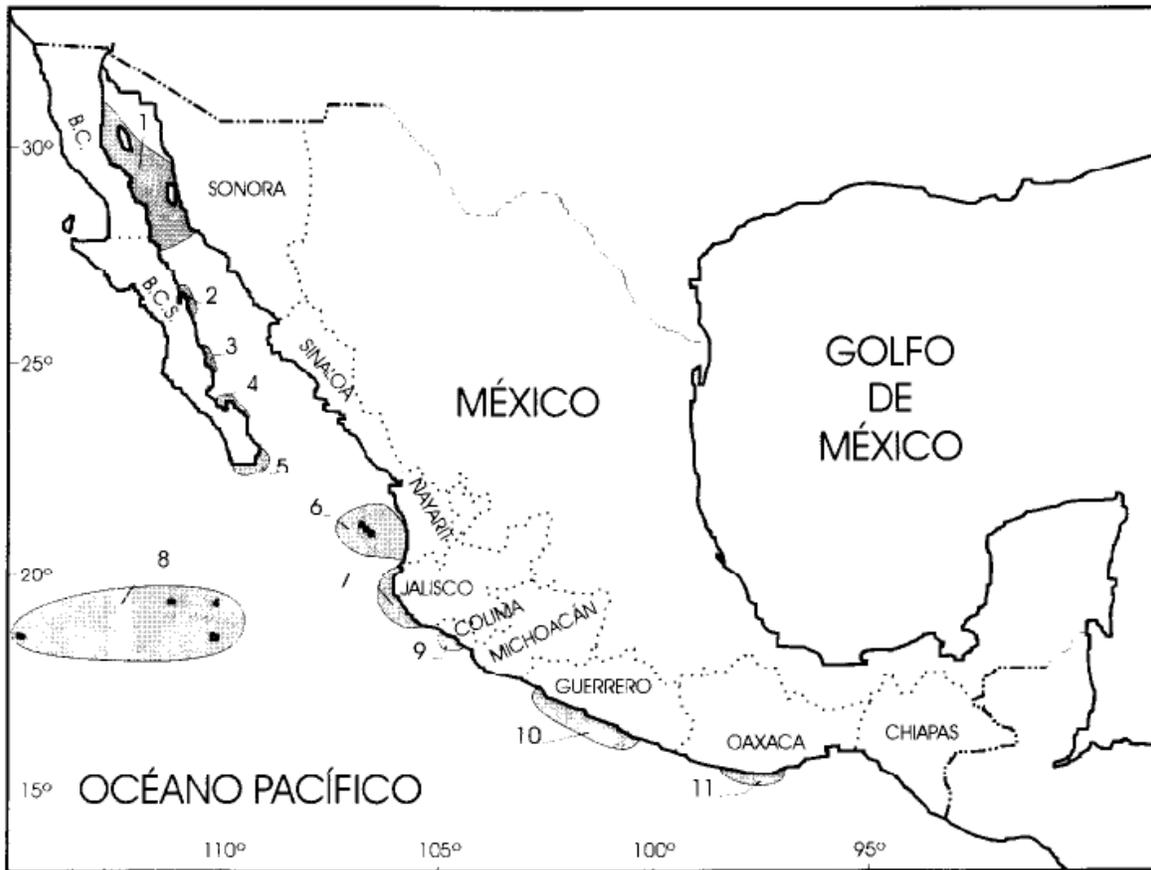


Figura 9. Mapa de la costa del Pacífico Mexicano, señalando las zonas coralinas más importantes de la región.¹⁷

Clave: 1. Norte a centro del Golfo de California (30" a 27"N); 2. Bahía Concepción a Isla Coronados (26"N); 3. Isla del Carmen, Loreto y Bahía Agua Verde (25"N); 4. Isla San José, La Paz e Isla Cerralvo (24"N); 5. Cabo Pulmo a Cabo San Lucas (23"N); 6. Isla Jaltemba a Punta Mita; Isla Isabel a islas Marías (20"N); 7. Bahía de Banderas a Bahía de Tenacatita (19"N); 8. Islas Revillagigedo (18"N); 9. Manzanillo (18"N); 10. Zihuatanejo a Acapulco (18" a 16"N); 11. Puerto Escondido a Huatulco (16" a 15"N).

Posteriormente, se hizo una revisión exhaustiva de los datos publicados al respecto, realizándose una previa depuración y arreglo de la información, ya que en la literatura aparecen varios nombres que en la actualidad se consideran como taxonómicamente inválidos. Para homogeneizar la nomenclatura, se tomaron como base las clasificaciones de Wells (1983), Bonilla-Reyes (1983) y Bonilla-Reyes (1992). Además, se hicieron consultas a especialistas de varias instituciones de México, Estados Unidos y Australia, con el fin de depurar y completar los listados locales de las especies y para precisar más detalladamente sus distribuciones geográficas en México (Reyes Bonilla y López Pérez 1998).

¹⁷ (Reyes Bonilla y López Pérez 1998)

El número de especies de corales hermatípicos en el Pacífico mexicano encontradas de acuerdo con Reyes-Bonilla y López Pérez (1998) fueron 23, 6 especies más que en el trabajo de Horta-Puga y Carricart-Ganivet (1993). Estas 23 especies del pacifico mexicano pertenecen a “seis géneros; la mayoría de los taxa habitan tanto en el Pacífico americano como en el Indopacífico (fig.10). La zona de las islas Revillagigedo y Nayarit son las que presentaron la mayor riqueza de especies en el área de estudio 18 y 12 taxa, respectivamente. Se detectaron dos especies endémicas (*Porites sverdrupi* Durham, 1947 y *P. baueri* Squires, 1959) ambas habitando el Golfo de California o zonas aledañas. Además de ellas, otras ocho (todas colonizadoras del Indopacífico) muestran distribuciones restringidas, es decir, sólo han sido observadas en una o dos localidades de la costa mexicana (Fig.9), particularmente en las islas Revillagigedo o Oaxaca”¹⁷.

A nivel regional de acuerdo con Guzmán y Cortés, 1993; Veron, 1995; López-Pérez, 1996 la zona de Costa Rica y Panamá era reconocida como la de mayor riqueza específica coralina en el Pacífico oriental, al presentar 23 y 21 especies, respectivamente.¹⁶ Los resultados de dicho trabajo mostraron que el número total de especies en México es tan alto como el de aquellos países. No obstante, la diferencia en el área de plataforma entre ambos sitios (siendo mucho mayor la de México) remarca la conclusión de Glynn y Wellington, 1983; Cortés, 1997; Glynn, 1997 en el sentido de que en América Central se presentan las condiciones más adecuadas para el desarrollo coralino, dentro del Pacífico oriental.¹⁶

Especies	Zona											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
<i>Pocillopora capitata</i> Verrill, 1864			X	X	X	X	X	X	X	X	X	
<i>P. damicornis</i> (Linnaeus, 1758) (*)			X	X	X	X	X	X	X	X	X	
<i>P. eydouxi</i> Milne Edwards y Haime, 1860 (*)								X				X
<i>P. meandrina</i> Dana, 1846 (*)			X	X	X	X	X	X				X
<i>P. verrucosa</i> (Ellis y Solander, 1786) (*)		X	X	X	X	X		X	X			X
<i>Porites australiensis</i> Vaughan, 1918 (*)								X				
<i>P. baueri</i> Squires, 1959						X						
<i>P. lichen</i> Dana, 1846 (*)								X				
<i>P. lobata</i> Dana, 1846 (*)						X	X	X	X			
<i>P. lutea</i> Milne Edwards y Haime, 1860 (*)								X				
<i>P. panamensis</i> Verrill, 1866	X	X	X	X	X	X		X			X	X
<i>P. sverdrupi</i> Durham, 1947	X	X	X									
<i>Psammocora brighami</i> Vaughan, 1907 (*)				X	X							
<i>P. stellata</i> (Verrill, 1868) (*)				X	X	X		X				
<i>P. superficialis</i> Gardiner, 1898 (*)						X	X	X				
<i>Pavona clavus</i> (Dana, 1846) (*)				X	X		X	X	X			X
<i>P. gigantea</i> Verrill, 1869		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
<i>P. maldivensis</i> (Gardiner, 1905) (*)								X				
<i>P. minuta</i> Wells, 1954 (*)								X				
<i>P. varians</i> Verrill, 1864 (*)								X				X
<i>Gardineroseris planulata</i> Dana, 1846 (*)												X
<i>Fungia curvata</i> Hoeksema, 1989 (*)			X	X	X	X		X				
<i>F. distorta</i> Michelin, 1842 (*)			X	X	X	X						
Total	2	4	9	11	11	12	7	18	6	4	10	

Figura 10. Distribución geográfica de los corales hermatípicos del Pacífico Mexicano. La clave de las zonas se presenta en la figura 9. Taxa colonizadores del Indopacífico.¹⁴

2.5 ATENUACIÓN DE LA ENERGÍA DE OLEAJE POR CORALES.

Existe una amplia documentación sobre la función protectora del arrecife de coral, tan solo en el estudio de Ferrario et al. (2014) se encontraron 255 artículos que vinculan los arrecifes con la atenuación del oleaje.¹⁸ A raíz del huracán Wilma en las costas de Quintana Roo en el Caribe mexicano, varios investigadores se encargaron de estudiar la zona debido a los cambios que este evento provocó. El estudio se realizó en la zona de Cancún y puerto Morelos debido a que el huracán

¹⁸ Citado en (Secaira, Fernando y Acevedo 2017)

tocó tierra el 22 de octubre de 2005 en dicho lugar. El meteoro avanzó lentamente por el territorio y regresó al mar 24 horas después, lo que provocó cambios importantes y contrastantes respectivamente en cada sitio. Mientras que por un lado provocó una erosión considerable 12 km de playa de Cancún a un nivel tan crítico que fue necesario realizar trabajos de recuperación, por el otro lado en Puerto Morelos se presentó un incremento en los anchos de playa de hasta 30 m. La diferencia entre ambos sitios es que Cancún es un sistema de playas expuesto, y por el otro lado Puerto Morelos es un lugar protegido por un arrecife de borde como se muestra en la Fig. 11. Además la dirección de la trayectoria del huracán contribuyó a dicha respuesta de las costas.

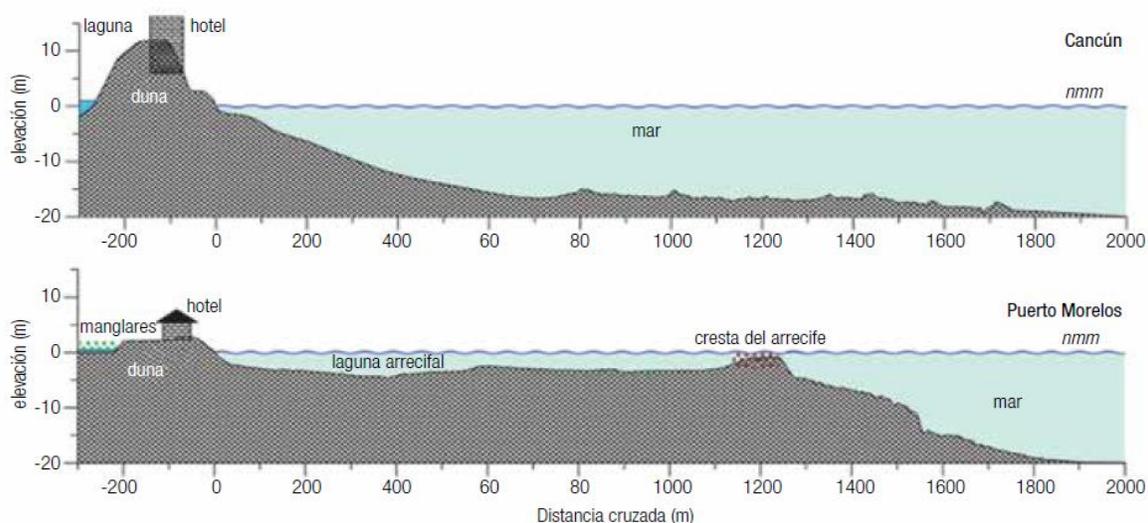


Figura 11. Diagrama esquemático del perfil perpendicular a la costa de las secciones medias de Cancún y Puerto Morelos, a partir de mediciones topográficas y datos batimétricos. El nivel medio del mar (nmm) se encuentra referido a 0 m (tomado de Ruiz de Alegria-Arzaburu et al., 2013)¹⁹.

Las diferencias morfológicas entre cada sitio son: “Cancún es un sistema de isla de barrera con playa abierta, formada por sedimentos carbonatados (tamaño promedio de grano, 0.4 mm) y delimitada por dos puntas rocosas: Punta Cancún y Punta Nizuc (Fig. 12). El complejo lagunar de Nichupté está formado por cuerpos pequeños, separados parcialmente por acumulaciones rocosas y pantanos de manglar. Es importante destacar que antes del desarrollo turístico la playa era amplia, con anchos de 100 a 400 m (Fig.13) y era protegida por una duna de aproximadamente 12 m de altura sobre el nivel medio del mar (nmm)”¹⁹. La laguna contaba con dos conexiones permanentes al Caribe: al norte, con el oeste de Punta Cancún, y al sur, con el oeste de Punta Nizuc; además, contaba con aberturas temporales en la cara frontal de la playa que facilitaban el recambio de agua incluso el balance hídrico la laguna y el mar (Silva et al., 2006)¹⁸.

¹⁹ (Secaira, Fernando y Acevedo 2017)



Figura 12. Imagen satelital de la ciudad de Cancún, la isla de barrera y los cuerpos lagunares (Bryant, 2015)¹⁹.



Figura 13. Punta Cancún en 1967 y 2005 (tomado de Silva et al., 2006)¹⁹.

Al igual que en Cancún, el sistema de playas de Puerto Morelos está compuesto por sedimentos carbonatados (tamaño grano 0.2 mm); sin embargo, se encuentra protegido por un arrecife de borde que se extiende por 27 km (Coronado et al., 2007)¹⁸. La playa es estable, cuenta con anchos de 85 a 90 m y preserva su duna cerca de 4 m sobre el nivel medio mar (Ruiz de Alegría-Arzaburu et al., 2013)¹⁸. La laguna arrecifal somera (3 a 4 m de profundidad) se encuentra conectada al mar abierto mediante dos entradas en el norte y un canal de navegación en el sur. Los sedimentos se encuentran consolidados por pastos marinos y la zona del arrecife se caracteriza por la presencia de bancos de coral someros expuestos a la acción del oleaje (Coronado et al., 2007)¹⁸.

La marea en ambas zonas es semidiurna y tiene un rango entre 0.32 y 0.07 m (media de 0.17 m). La mayor parte del tiempo (condiciones típicas) las olas se acercan de este/sureste y en los meses de

invierno ocurren episodios de oleaje proveniente del norte. El 90% de olas incidentes tiene alturas significativas (H_s) de 0.5 a 1.5 m, con período medio (T_m) de 4 a 6 s. Los llamados “Nortes” generan olas más energéticas, con H_s de 2 a 3 m y mayores períodos $T_m \sim 6$ a 8 s (Ruiz de Alegría-Arzaburu et al., 2013)¹⁸. De mayo a octubre son comunes los huracanes que llegan a generar olas de H_s de 6 a 15 m y períodos de 8 a 12 s (Mariño-Tapia et al., 2014)¹⁸.

La zona donde se encuentran Cancún y Puerto Morelos es una de las más energéticas del Golfo de México y del Caribe debido a las tormentas tropicales (Silva et al., 2012)¹⁸. Entre 1948 y 2007 se han presentado 47 huracanes, de los cuales 6 han superado alturas de ola significativa (H_s) de 10 m: Allen (1980), Gilberto (1988), Roxanne (1995), Isidoro (2002), Emily (2005) y Wilma (2005). El huracán Wilma ha sido uno de los más destructores y provocó la mayor pérdida económica en México. Además, ostenta ser uno de los huracanes con la menor presión registrada (822 mbar) y el crecimiento más rápido, con velocidades de viento de 111.2 km/h a 277.8 km/h en 24 h (Pasch et al., 2014)¹⁸. El huracán afectó las costas de Cancún entre el 20 y 23 de octubre de 2005. Tocó tierra el 22 de octubre entre Cancún y Puerto Morelos; debido a una alta presión al norte de Wilma, el huracán avanzó lentamente y regresó al mar 24 h después al sur del Golfo de México. El paso lento sobre la zona probablemente fue una de las circunstancias que provocó la fuerte erosión de playas en Cancún (Silva et al., 2012)¹⁸.

Los efectos en la morfología de las playas de Cancún fueron medidos gracias a la realización de dos trabajos de campo: el primero, en agosto de 2005 después del huracán Emily y el segundo, tres días después de Wilma (Silva et al., 2006)¹⁸. La erosión fue generalizada en los 12 km de las playas de Cancún, sin embargo, se observaron respuestas diferenciales en cuatro zonas según el estudio de Silva et al., 2006¹⁸ (figura 14):

- La primera sección en la parte sur hacia Punta Nizuc mostró una considerable acreción de entre 10 y 15 m.
- La sección 2 mostró una seria erosión. En abril de 2005 la playa contaba con anchos de 28 m; después de Wilma la playa desapareció totalmente dejando expuesta la cama rocosa, y a varios edificios con daños estructurales (figura 15).
- La sección 3 también fue erosionada, pero en menor proporción que las secciones 2 y 4. Cabe destacar que esta zona comienza justo en playa Delfines y es la única sección de aproximadamente 1 km que cuenta con duna. La erosión fue cercana a 1 m de altura junto a las edificaciones, pero el ancho de playa fue poco modificado y fue la que mostró mayor estabilidad.
- La sección 4, en el extremo norte, mostró la mayor erosión, la playa desapareció y la cama rocosa quedó expuesta; el nivel de erosión continuó por 3.5 km hacia el norte, disminuyendo gradualmente. En cuanto a Puerto Morelos, se tienen mediciones in situ de la atenuación del oleaje por el arrecife de coral, el cual disipó más de 90% de la energía (figura 16) (Blanchon et al., 2010)¹⁸. Lamentablemente, no se realizaron perfiles de playa como en Cancún, pero fue posible supervisar los cambios comparando fotografías in situ y satelitales (QuickBird)¹⁸ antes y después de Wilma, específicamente en los meses de abril y octubre de 2005. En este caso, se observó una acreción de hasta 30 metros en el ancho de playas. Las imágenes satelitales muestran que la duna fue erosionada en varias secciones aun y cuando tenía vegetación, lo cual probablemente contribuyó a la acreción de playas (figura 17, Mariño et al., 2014)¹⁸. Los efectos fueron inusuales por lo que se utilizaron

modelos numéricos para explicar lo ocurrido (Ruiz de Alegría-Arzaburu et al., 2013; Mariño-Tapia et al., 2014)¹⁸.

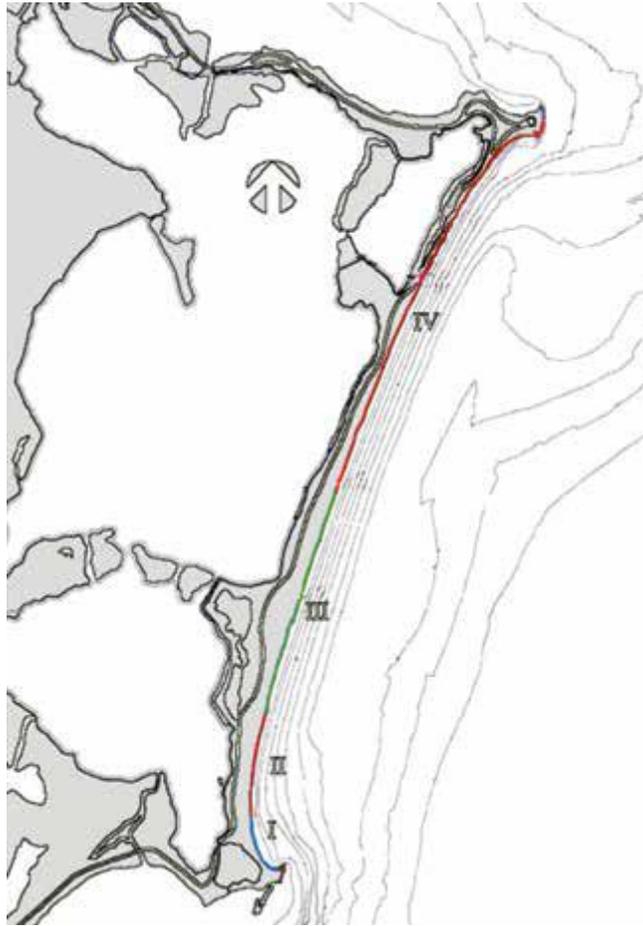


Figura 14. Zonas respecto al grado de erosión provocado por el huracán Wilma.¹⁹



Figura 15. Antes y después del Huracán Wilma (tomado de Silva et al., 2006).¹⁹

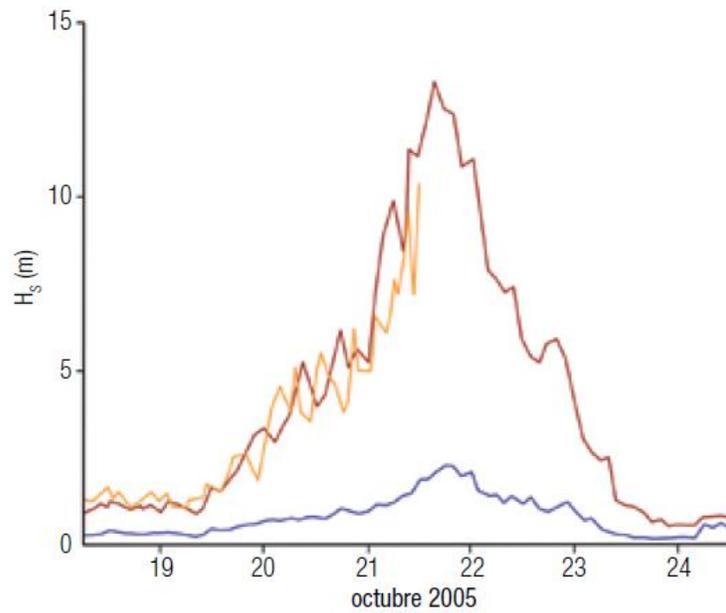


Figura 16. Altura de ola significativa en Puerto Morelos y Cancún durante el huracán Wilma, en 2005. Rojo, en la parte externa del arrecife de Puerto Morelos (CICESE); amarillo, en Cancún (Silva, R.) y azul, en la parte interna de la laguna de Puerto Morelos (tomada de Blanchon et al., 2010)¹⁹.



Figura 17. Efectos del huracán Wilma. Las imágenes superiores corresponden a Cancún; las imágenes inferiores a Puerto Morelos (tomada de Mariño et al. 2014)¹⁹.

El arrecife provee protección no sólo en condiciones de tormenta, sino también en condiciones de calma, es decir, con el oleaje típico de la zona. Para corroborarlo, en Cancún y Puerto Morelos se analizaron perfiles de playa cada 3 o 4 meses, entre septiembre de 2007 y junio de 2009. Los resultados mostraron que la playa protegida por el arrecife de borde en Puerto Morelos es menos dinámica que la playa expuesta en Cancún. Para las mismas condiciones de oleaje, Puerto Morelos mostró en la mayor parte de sus playas los cambios de altura de menos de 0.5 m, mientras que en Cancún fueron de hasta 2 m (Ruiz de Alegría-Arzaburu et al., 2013)¹⁸, es decir, que hay zonas de Cancún con cuatro veces más transporte de arena que Puerto Morelos.

Se implementó el modelo de oleaje SWAN²⁰ para determinar la dinámica de las dos zonas. El modelo fue calibrado con mediciones de instrumentos anclados dentro y fuera de la laguna de Puerto Morelos. El resultado muestra que el arrecife de Puerto Morelos puede disipar el 65 y 40 % de la energía del oleaje ($H_s = 3$ m, $T = 7$ segundos) proveniente del noreste y del este, respectivamente; mientras la morfología de Cancún disipa entre 25 y 15 %. Por lo tanto, el arrecife tiene la capacidad de reducir entre 40 y 35 % más de la energía del oleaje proveyendo mayor protección. Otro escenario que se probó fue la degradación del coral, para lo cual se simularon tres casos: 1) un arrecife con 1 m más de altura; 2) un arrecife degradado, con 1 m de altura menos y 3) con 2 m de altura menos. En el caso 1 se obtuvo una reducción de 10 % de la energía del oleaje, semejante a las condiciones actuales del arrecife. En los casos 2 y 3 se obtuvo un aumento de la energía del oleaje de 10 y 20 % respectivamente (Secaira, Fernando y Acevedo 2017).

²⁰ SWAN (Simulating Waves Nearshore) es un modelo de propagación de oleaje espectral que simula la energía contenida en las ondas en su propagación desde superficies oceánicas hasta zonas costeras (López Ruiz 2013-2014)

III. GENERALIDADES DE ANÁLISIS HIDRODINÁMICO.

3.1 TEORÍA DE ONDAS

Para mucha gente quizá para la mayoría, la palabra “onda” trae a la mente una descripción de un océano, con las olas barriendo la playa, procedentes del mar abierto. Si se ha examinado y pensado sobre este fenómeno puede que se obtenga la apreciación de que a pesar de toda su grandeza contiene un elemento de contradicción. Al ver las crestas cabalgando, se adquiere un cierto sentido de asalto masivo del agua sobre la tierra, y verdaderamente las *ondas* pueden hacer un gran daño, lo que equivale a decir que son portadoras de energía, pero a pesar de todo, cuando las ondas u olas han roto y vuelto hacia atrás, el agua está prácticamente en el mismo sitio respecto a la playa que estaba antes. La avalancha hacia delante no significa un movimiento físico del agua. Las olas largas del mar abierto se mueven rápidamente y van muy lejos. Las olas que alcanzan la costa de California tienen sus orígenes en las tormentas del pacífico Sur a una distancia superior a los 15 000 km y han recorrido esta distancia a una velocidad de 60 km por hora o más aún. Evidentemente el mar no se ha movido de este modo espectacular; simplemente han jugado el papel del agente mediante el cual se trasmite un cierto efecto. Y aquí tenemos la característica esencial de lo que se denomina *movimiento ondulatorio*. Se transmite una propiedad de un lugar a otro por medio de un medio, pero el medio en sí mismo no se transporta. Todos los medios materiales, sólidos, líquidos y gases, pueden transportar energía e información por medio de ondas. Aunque las olas u ondas en el agua son del tipo más familiar de ondas, están también entre las más complicadas para analizar en función de los procesos subyacentes. (French 1974).

Dicho todo lo anterior se puede concluir las siguientes definiciones. Una *onda* es una perturbación de alguna propiedad de un medio (densidad, presión, campo electromagnético, etc.). La onda transporta energía. El *movimiento ondulatorio* es la propagación de una onda por un medio material o en el vacío. Sin que exista la transferencia de materia, ya sea por ondas mecánicas o electromagnéticas.

3.1.1 OLAS

Las olas oceánicas son generalmente un fenómeno eólico, o sea, que se forman y mueven en dependencia de la intensidad del viento, aunque también existen las olas de marea o mar de fondo generadas por terremotos o grandes movimientos telúricos en el océano.

Las ondas oceánicas son perturbaciones del medio (el océano) generadas por una fuerza, a su vez las ondas transportan energía a lo largo de la superficie del agua. Las fuerzas que generan a la onda u ola pueden ser de diferente naturaleza: viento, perturbaciones meteorológicas, sismos, atracción de cuerpos celestes, entre otros.

La forma más sencilla de representar una ola es asemejándola a una onda sinusoidal, la cual tiene las siguientes características: la parte más alta que puede alcanzar una onda se define como cresta y la parte más baja como valle. La longitud de onda L , es la distancia horizontal entre dos crestas adyacentes; la altura de onda H es la distancia vertical entre el máximo de la cresta y el fondo del valle (Fig. 18).

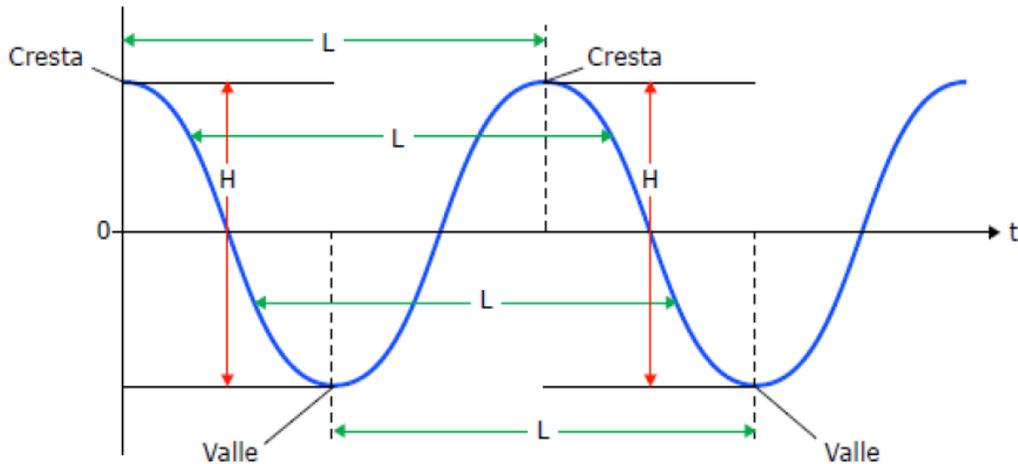


Figura 18. Características de las ondas.²¹

El tiempo necesario para que dos crestas consecutivas pasen por el mismo punto se define como periodo de onda, T , mientras que su inverso $1/T$ será la frecuencia. La celeridad (c) es la velocidad a la que viaja una onda y estará dada por la relación entre la longitud y el periodo (L/T), la mitad de la altura de la onda será la amplitud. En el caso de una ola representada por una onda, la distancia vertical entre el fondo y la elevación media de la superficie del agua es la profundidad de ola, h .

3.1.2 OLEAJE.

A través de la historia humana se han hecho varios esfuerzos para comprender cómo se genera y transforma el oleaje. En la etapa de oro del Renacimiento, en el siglo XV, no hubo grandes progresos documentados sobre el estudio de la generación y transformación del oleaje. Durante el periodo definido entre los siglos XVI y XIX, las contribuciones más importantes se dieron en el plano teórico, ejemplo de ello son las teorías de Airy (1845) y Stokes (1847). El primer estudio de predicción de oleaje fue desarrollado por Sverdrup y Munk (1947) durante la Segunda Guerra Mundial, aunque sus resultados no estuvieron disponibles hasta 1947.

El oleaje es un fenómeno que está determinado por la acción de las fuerzas de la naturaleza en cualquier superficie libre de agua, las cuales condicionan el tipo de ola que será inducida. La más obvia de estas fuerzas es la acción del viento sobre la superficie del mar.

CLASIFICACIÓN DEL OLEAJE.

Existen al menos tres formas de clasificar las ondas oceánicas que ocurren en el mar, las cuales corresponden a la profundidad relativa (aguas profundas o aguas someras), la fuerza principal que lo genera (fuerzas meteorológicas: viento, etc.; terremotos; fuerzas astronómicas: mareas) o el periodo de onda.

Existe una región donde la energía del viento es transferida hacia la superficie del mar la cual en ingeniería oceanográfica se llama área de generación (fetch). Fuera de la zona de generación el oleaje

²¹ (Castillo Rodríguez y Rodríguez Hernández 2016)

es propagado en distintas direcciones aunque la dirección dominante es la del viento. Las olas pueden tener diversas características dependiendo de las fuerzas que influyen en su generación.

De acuerdo con la zona de generación se clasifican dos tipos de oleaje, dentro de los cuales existen un sinnúmero de estados intermedios. Su denominación se da por las palabras inglesas, *sea* y *swell* traducidas al español como *oleaje local* y *oleaje distante*.

OLEAJE LOCAL O SEA.

Su formación ocurre en la zona de generación en alta mar, raramente se aprecian crestas de cierta longitud y es difícil observar periodos bien definidos. Tiene ciertas características que lo definen.

- Gran irregularidad, debido a que la superficie libre del agua es impredecible, no tiene periodicidad.
- Las olas no tienen simetría en su cresta y valle.
- Gran peralte de las olas. Las olas presentan una altura relativamente grande para su longitud de onda.

OLEAJE DISTANTE O SWELL.

Cuando el oleaje se propaga y abandona la zona de generación ocurren tres fenómenos (Losada y Giménez-Curto, 1978)²²:

- Pierden energía, las olas viajan a expensas de su propia energía (decaimiento).
- El oleaje sufre una doble dispersión. Una angular, en la que las olas se dispersan en todas direcciones, y otra radial, debida a que la velocidad es función directa del periodo, por lo que las olas más largas viajan más rápido que las más cortas. Se produce un filtrado de olas.
- Fenómeno de soldadura, según el cual las ondas de periodos cercanos se fusionan en largas crestas de onda, lo cual origina que la superficie caótica se simplifique. Al envejecer el oleaje y especialmente cuando abandona el área de generación va tendiendo a un oleaje de tipo *swell*.

Este tipo de oleaje se puede observar sobre la plataforma costera, especialmente en profundidades reducidas, donde los fenómenos descritos anteriormente se añaden el de la refracción, que hace que las olas tiendan a progresar en forma paralela a las líneas batimétricas. Así, el oleaje que se acerca a la costa es más regular, forma frentes de cresta muy grandes y las diferencias entre periodos y longitudes de onda son mínimas, surge una periodicidad, las direcciones no son tan dispersas, y se presentan ciertas direcciones predominantes. Todo esto proporciona un cierto orden al fenómeno.

²² Citado en (Silva Casarín, Análisis y descripción estadística del oleaje 2005)



Figura 19. Oleaje local o sea



Figura 20. Oleaje distante o swell.

3.2 DESCRIPCIÓN ESTADÍSTICA DEL OLAJE.

Desde hace mucho tiempo, se ha intentado estudiar al oleaje desde diferentes vertientes; no obstante, éste no puede ser representado por un modelo tan sencillo como es el de la onda, dado que el fenómeno no se repite en el espacio ni en el tiempo y cuando se observa una altura de ola en un punto dado del mar, no se puede precisar cuál será la altura de ola siguiente en ese punto. Considerando la gran variabilidad del oleaje real, la forma más razonable de caracterizarlo es a través de los métodos estadísticos, tratando al oleaje como un fenómeno aleatorio (Silva 2005).

HIPÓTESIS BÁSICAS.

- El oleaje como un proceso estocástico

Por lo general las *olas en el mar son irregulares*, esto quiere decir que no tienen periodicidad respecto al tiempo dicho esto el oleaje se define como un *proceso aleatorio*. En términos prácticos el oleaje se considera como un conjunto de ondas viajando en diferentes direcciones θ_i , amplitudes a_i , frecuencias σ_i , y fases ε_i , considerando lo anterior puede ser estudiado como una *superposición lineal de ondas amónicas simples*, es decir que el perfil de la superficie libre $\eta_i(x, y, t)$ descrito como:

$$n_i(x, y, t) = \sum_i a_i \cos \left[\frac{\sigma_i^2}{g} (x \cos \theta_i + y \sin \theta_i) - \sigma_i t + \varepsilon_i \right] \quad (3.1)$$

Donde:

a amplitud

σ frecuencia angular ($2\pi/T$)

T periodo de la onda

θ angulo de incidencia con respecto al eje X

ε fase

x, y posición de la onda

t tiempo

Debido a que el oleaje es un fenómeno aleatorio, bajo este punto de vista, su estudio debe realizarse haciendo uso del análisis estadístico. *El oleaje debe ser considerado como un proceso estocástico, es decir, resultado de un experimento, en el cual no es un número sino una función.* El análisis del oleaje se da a partir de un función muestra resultado de una observación o medición la cual la denotan como $n_k(t)$ la cual es una variable aleatoria.

Si se observa la superficie del mar en un instante determinado, t_i , es claro que $n(t_i)$ es una variable aleatoria. Considerando el conjunto n instantes, t_1, t_2, \dots, t_n , se puede decir que $n(t_1, t_2, \dots, t_n)$ es una variable enedimensional.

Si para cualquier n instantes t_1, t_2, \dots, t_n $\eta(t)$ puede considerarse definido como la función de distribución:

$$F_{t_1, t_2, \dots, t_n}(x_1, x_2, \dots, x_n) = \text{Prob}[n(t_1) \leq x_1, n(t_2) \leq x_2 \dots n(t_n) \leq x_n] \quad (3.2)$$

Si se considera que todas las distribuciones para la ec. 3.2 son normales (gaussianas) el proceso queda restringido a los dos primeros momentos (La media $\mu_n(k)$ y la función de auto correlación $R_{nn}(k)$) de la teoría de correlación. A pesar de restringir el proceso al uso de los dos primeros momentos, éste sigue siendo inabordable, por lo que se hace necesario admitir dos importantes hipótesis estadísticas: *estacionariedad y ergodicidad.*

- **El oleaje como un proceso estacionario.**

Un fenómeno físico se puede considerar estacionario si las características externas que influyen en él permanecen constantes durante cierto periodo de tiempo, es decir, un tiempo durante el cual y debido a la inercia del fenómeno existe un cierto equilibrio entre las fuerzas generadoras y las fuerzas restauradoras que intervienen, lo que mantiene su manifestación aproximadamente estacionaria. Este periodo de tiempo es conocido como estado de mar.

Si todas las funciones de distribución que definen al proceso $n(t)$ permanecen constantes durante un intervalo cualquiera de tiempo t el proceso es estacionario, el cual se expresa de la siguiente manera:

$$F_{t_1+\tau, t_2+\tau, \dots, t_n+\tau}(x_1, x_2, \dots, x_n) = F_{t_1, t_2, \dots, t_n}(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (3.3)$$

Para cualquier $n, \tau, t_1, t_2, \dots, t_n$.

Admitida la estacionariedad del oleaje, el valor medio es una constante definida por:

$$\mu(k) = \mu \quad (3.4)$$

Y su función de correlación depende de $\tau = t + \tau$

$$R_{nn}(k) = R_{nn} \quad (3.5)$$

- **El oleaje como un proceso ergódico.**

Si un proceso aleatorio $n(t)$ es estacionario y $\mu_n(k)$ y $R_{nn}(k)$ no difieren cuando se calculan sobre diferentes muestras, se dice que el proceso es ergódico. El teorema de ergodicidad es aplicable a la mayor parte de los procesos estacionarios.

Dicho lo anterior cuando un proceso es estacionario, una muestra de él representa el comportamiento general. Para el caso de oleaje: un estado de mar puede ser representado por una muestra, debido a que si el estado de mar dura 1 hora, bastan 15 minutos de medición para caracterizarlo, considerando que se comportará igual en el tiempo no medido.

ESTADO DE MAR.

Un estado de mar se define como aquella situación o periodo de tiempo, en que debido a la inercia del fenómeno, se considera que existe un cierto equilibrio entre las fuerzas generadoras y las fuerzas restauradoras que intervienen, lo cual produce que su manifestación permanezca aproximadamente en estado estacionario.

El oleaje se considera formado por dos tipos de variaciones:

- *Variación de periodo corto*, donde la variación es rápida del orden de segundos, durante los cuales el fenómeno se considera estacionario.
- *Variación de periodo largo*, la variación es lenta del orden de horas, donde el estado de mar evoluciona.

En la práctica cuando se registran variaciones de la superficie libre, se debe fijar un periodo de medición lo suficientemente corto donde se admita la hipótesis de estacionariedad, y otro lo suficientemente largo con la finalidad de que cuando se analice la muestra se tenga un número representativo de olas. Todo esto con la finalidad de obtener muestras representativas.

Dichos periodos de los que se habla se suelen fijar en intervalos de 10 a 20 minutos por cada hora (o más). Los parámetros estadísticos obtenidos de la muestra se extienden a toda la hora del intervalo, donde se admite que la duración del estado de mar es de esa hora (o más).

3.3 ANÁLISIS TEMPORAL Y ESPECTRAL DE SERIES DE TIEMPO.

Por serie de tiempo nos referimos a datos estadísticos que se recopilan, observan o registran en intervalos de tiempo regulares (diario, semanal, semestral, anual, entre otros).

3.3.1 ANÁLISIS TEMPORAL

Respetando el orden cronológico en el que ha evolucionado el uso de las diferentes metodologías para el análisis y caracterización de estados de mar, esta sección se dedica al análisis de señales en el dominio del tiempo, mientras que en la siguiente sección se destinara al análisis de las señales en el dominio de la frecuencia.

LA MUESTRA.

Normalmente, la muestra que se utiliza para realizar la descripción estadística de un estado de mar es un registro de oleaje medido por un aparato, usualmente un sensor de presión, ubicado en algún punto del mar, los registros tienen un aspecto similar al de la fig. 21, los parámetros fundamentales que definen al oleaje son la altura de ola H , y su periodo asociado T .

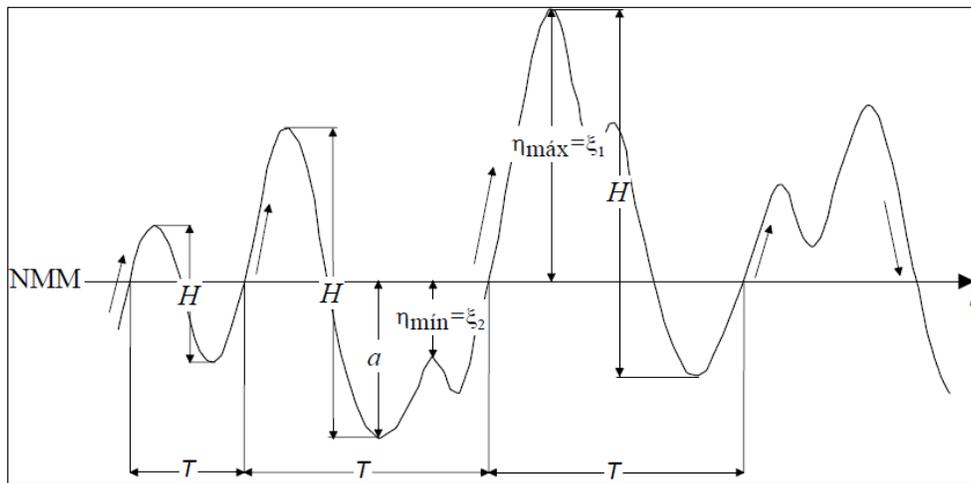


Figura 21. Parámetros que definen el oleaje²³.

En primer término se considera el análisis estadístico de la muestra, con lo que se calculan, para el caso de las alturas y periodos de ola, los parámetros estadísticos que se indican a continuación:

Número de sucesos	N
Media	$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i$
Media cuadrática	$X_m^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i^2$
Media de los N/n valores mayores	$X_{1/n}$

²³ (Silva Casarín, Análisis y descripción estadística del oleaje 2005)

Casos particulares

$X_{1/3}$ valor significativo o $X_{1/10}$ valor un décimo

Valor máximo del parámetro de la muestra $X_{máx}$

Antes de llevar a cabo la evaluación de los parámetros descritos, es necesario realizar algunas operaciones matemáticas que ayuden a evitar errores en el cálculo y que además no alteren la información estadística contenida en la muestra. La metodología se describe en la tabla 3. Y en los apartados siguientes se detalla cada uno de los pasos.

Tabla 3. Metodología para el análisis temporal del oleaje.²³

A. Corrección del nivel medio	Media Lineal Parabólica
B. Discretización de la señal (separa H y T)	<ul style="list-style-type: none"> • Método de pasos ascendentes por cero • Método de pasos descendentes por cero • Método de crestas • Método de valles
C. Estimación de cruces	
D. Evaluación de parámetros y velocidades orbitales	
E. Determinación de la dirección del oleaje	▪ Método gráfico con las velocidades

A. Corrección del nivel medio.

Por lo general, los registros de oleaje contienen la influencia de ondas largas (mareas, etc.), que en algunos casos llegan a tener importante influencia en el nivel medio del registro. Por esta razón, es necesario realizar la corrección del nivel medio y evitar una distorsión en el análisis estadístico.

El procedimiento es el siguiente: se calcula el valor medio que puede ser de orden cero o promedio aritmético, de primer orden o una recta, o de segundo orden o una parábola. En los dos últimos casos los coeficientes de la recta o de la parábola se pueden obtener aplicando la técnica de mínimos cuadrados. Una vez calculado el valor medio se resta del valor original de cada uno de los datos, tal que:

$$n_{i_corregida} = n_{i_original} - \bar{n}_i \quad (3.6)$$

ECUACIONES PARA EVALUAR EL NIVEL MEDIO.

- *Media aritmética.* Consiste en obtener la media aritmética de la superficie libre para todo el registro, para posteriormente restarla a cada dato; así el valor medio se obtiene como:

$$\bar{n}_n = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N n_n \quad (3.7)$$

Siendo N el número de puntos de la muestra.

Este criterio es adecuado cuando los efectos de ondas largas no tienen gran influencia sobre el registro de oleaje.

- *Corrección lineal.* A través de la técnica de ajuste por mínimo cuadrados se obtiene una expresión que representa una variación lineal del nivel medio, la cual se utiliza posteriormente para eliminar el efecto de ondas de más largo periodo. La ecuación para realizar esta corrección es:

$$\bar{n}_n = A_0 + A_1 n \quad : \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (3.8)$$

Donde:

$$A_0 = \frac{N_2 Y_0 - N_1 Y_1}{N_0 N_2 - N_1^2}, \quad A_1 = \frac{N_0 Y_1 - N_1 Y_0}{N_0 N_2 - N_1^2} \quad (3.9)$$

$$N_r = \sum_{n=1}^N n^r, \quad Y_r = \sum_{n=1}^N n^r n_n \quad (3.10)$$

Este tipo de corrección es adecuado si se tiene un registro de oleaje superpuesto a una onda de marea semidiurna y dicho registro tiene una duración mucho menor que el periodo de la marea, y si se encuentra en la franja de ascenso, zona I de la fig. 22.

- *Corrección parabólica.* Utilizando la técnica de mínimos cuadrados, la ecuación para realizar una corrección tipo parabólico es:

$$\bar{n}_n = B_0 + B_1 n + B_2 n^2 \quad : \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (3.11)$$

Donde:

$$B_0 = \frac{1}{\Delta} [Y_0(N_2 N_4 - N_3^2) + Y_1(N_2 N_3 - N_1 N_4) + Y_2(N_1 N_3 - N_2^2)]$$

$$B_1 = \frac{1}{\Delta} [Y_0(N_2 N_3 - N_1 N_4) + Y_1(N_0 N_4 - N_2^2) + Y_2(N_1 N_2 - N_0 N_3)]$$

$$B_2 = \frac{1}{\Delta} [Y_0(N_1 N_3 - N_2^2) + Y_1(N_1 N_2 - N_0 N_3) + Y_2(N_0 N_2 - N_1^2)]$$

$$\Delta = N_0 N_2 N_4 + 2 N_1 N_2 N_3 - N_2^3 - N_0 N_3^2 - N_1^2 N_4 \quad (3.12)$$

Este tipo de corrección se emplea en los casos en los que, además de que la carrera de marea es importante, la muestra de oleaje que se desea analizar tiene una influencia que se puede ajustar a una parábola. Si se tiene un registro de oleaje ubicado en la zona 2 de la fig. 22.

Si en un registro se observa la influencia de variaciones de periodo largo, del orden de minutos, para la determinación correcta del nivel medio se deberá aplicar un filtro espectral. Si no se conoce bien

el mecanismo que genera dicha variación, a priori resulta más conveniente utilizar una corrección de tipo parabólico.

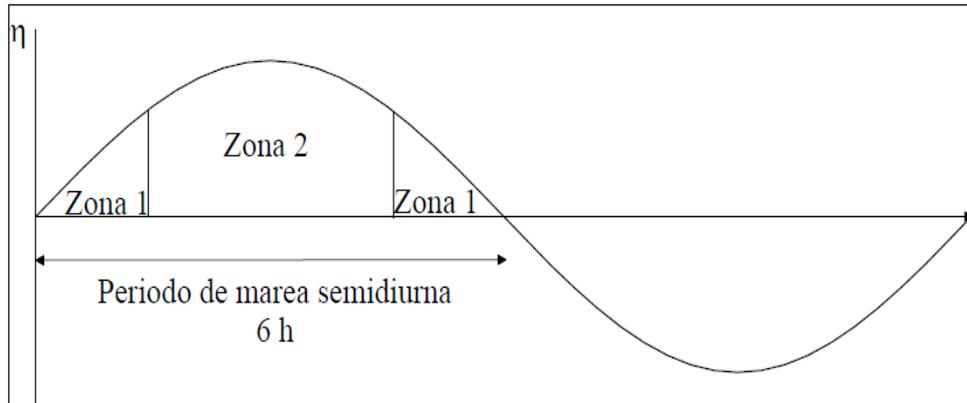


Figura 22. Marea semidiurna²³.

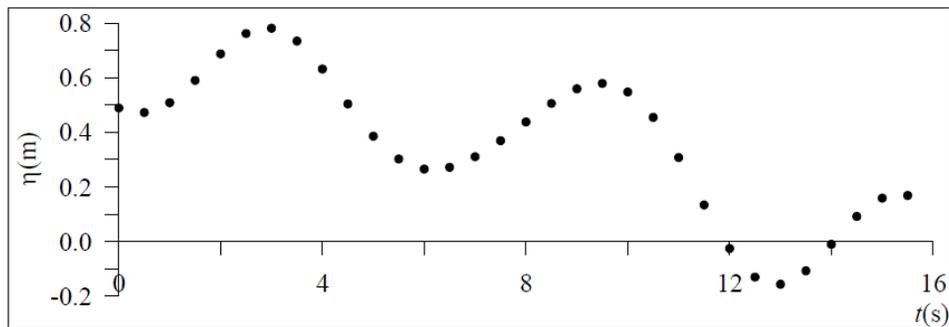


Figura 23. Ejemplo de una señal de oleaje sin corrección del nivel medio²³.

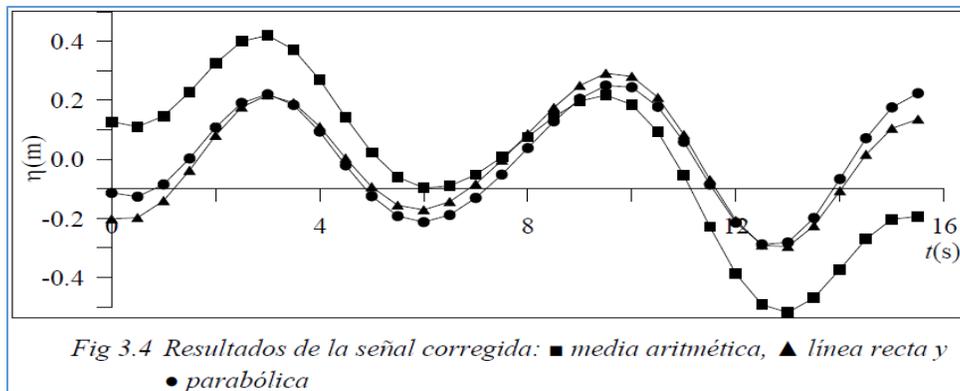


Figura 24. Señal corregida fig.23²³.

B. CARACTERIZACIÓN DE LA SEÑAL.

Una vez que se ha corregido el nivel medio, se debe caracterizar la señal, esto es, calcular las alturas y los periodos de ola individuales. Para este propósito existen diversos métodos, que se enuncian a continuación:

- Método de pasos ascendentes por cero

Para la implementación de este método se determinan los pasos ascendentes a través del siguiente criterio:

$$n_i \cdot n_{i+1} < 0 \quad y \quad n_{i+1} > 0 \quad (3.13)$$

Donde n_i representa el íesimo dato de la elevación de la superficie después de la corrección del nivel medio. El tiempo en el cual cruza el nivel medio se determina por medio de una interpolación lineal entre el tiempo de muestreo de n_i y n_{i+1} . La diferencia temporal de este punto al siguiente paso ascendente define el periodo.

La condición para definir un máximo en el perfil es

$$n_{i-1} < n_i \quad y \quad n_i > n_{i+1} \quad (3.14)$$

Con el fin de eliminar el problema de subestimación del máximo real entre dos puntos discretos, deben ser estimados el tiempo y la elevación máxima después de ajustar la curva parabólica en función de tres puntos n_{i-1} , n_i y n_{i+1} . La ecuación para el ajuste parabólico se puede expresar como

$$n_{m\acute{a}x} = C - \frac{B^2}{4A}, \quad y \quad t_{m\acute{a}x} = t_i - \frac{\Delta_t B}{2A} \quad (3.15)$$

Donde

$$A = \frac{1}{2}(n_{i-1} - 2n_i + n_{i+1}), \quad B = \frac{1}{2}(n_{i+1} - n_{i-1}), \quad C = n_i \quad (3.16)$$

Para determinar la altura de ola, el punto más alto sobre la elevación de la superficie libre debe ser encontrado dentro del intervalo entre dos pasos ascendentes. Una vez que se identificó este punto, se denota como n_i y entonces $n_{m\acute{a}x}$ es estimada por medio de las ecs. 2.15 y 2.16. El punto más bajo o valle de la elevación, $n_{m\acute{i}n}$, es calculado por medio de un proceso similar, y la altura de ola es calculada como la resta del valor máximo menos el mínimo, $n_{m\acute{a}x}$ y $n_{m\acute{i}n}$.

En la fig. 25 se presenta el procedimiento de forma gráfica.

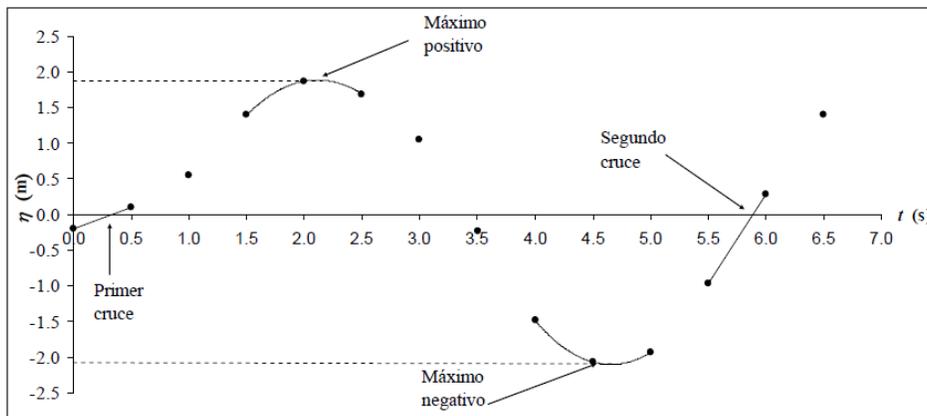


Figura 25. Discretización de la altura de ola utilizando el método de pasos ascendentes²³.

- Método de pasos descendentes por cero

Este método es análogo al de pasos ascendentes por cero, la única diferencia estriba en que ahora las olas se definen en el cambio de signo de positivo a negativo, como se puede ver en la fig. 26.

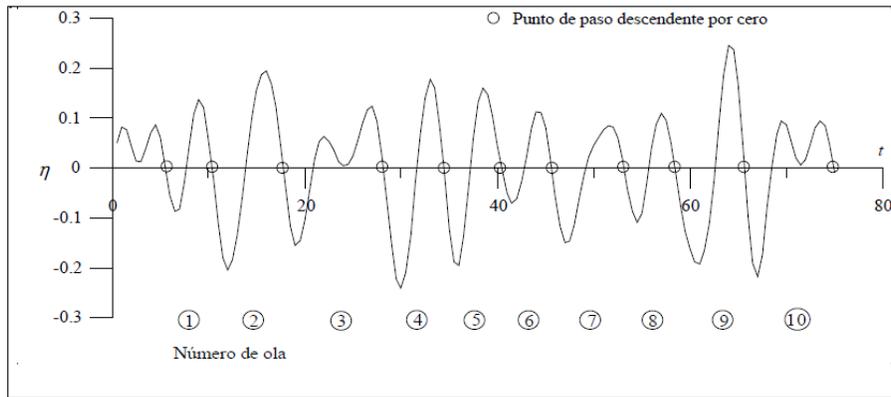


Figura 26. Definición de olas con el método de pasos descendentes²³.

El criterio para definir cada ola es el siguiente:

$$n_i \cdot n_{i+1} < 0 \text{ y } n_{i-1} > 0 \quad (3.17)$$

- Método de distancia entre crestas

Debido a la asimetría natural que se presenta en el oleaje, es decir, a que no se tiene el mismo número de puntos del lado positivo que del negativo, el IAHR (1989) recomendó que una altura de ola se debe definir a partir de la distancia entre cresta y cresta de la serie, tal como se muestra en la fig. 27.

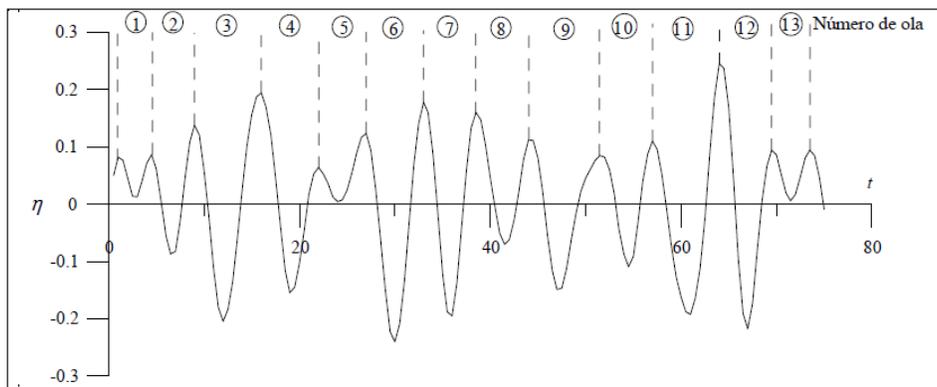


Figura 27. Definición de olas por el método de distancias entre crestas²³.

Como resultado de este procedimiento, si se compara con el método de pasos ascendentes o descendentes por cero, se contabilizan un mayor número de olas. Sin embargo, tiene el inconveniente de agregar a la estadística olas pequeñas que suelen distorsionar los resultados.

- Método de distancia entre valles

Este método es análogo al de la distancia entre crestas, la diferencia estriba en encontrar los mínimos para separar las olas, como se muestra en la fig. 28.

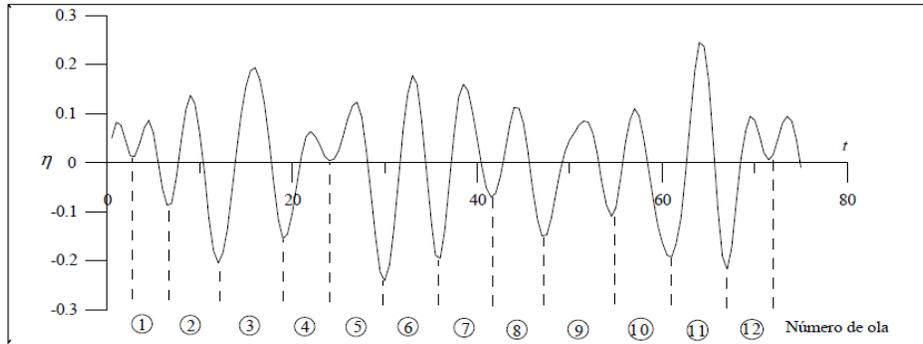


Figura 28. Separación de olas por medio del método de valles²³.

DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DEL OLEAJE.

Los parámetros estadísticos más importantes para definir un estado de mar a partir de una serie de tiempo son:

La variación del nivel medio del mar:

$$\bar{n}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N n_i \quad (3.18)$$

Donde:

n_i Elevación de la superficie libre del mar en el tiempo t_i .

N número de eventos o muestras.

La variación de la media cuadrática (la varianza) de superficie del agua, n_{rms}^2 :

$$n_{rms}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N n_i^2 \quad (3.19)$$

La altura media y el periodo medio:

$$\bar{H} = \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} H_i \quad (3.20)$$

$$\bar{T} = \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} T_i \quad (3.21)$$

Donde:

N_0 : Número de olas individuales de todo el grupo

H_i : Altura de ola

T_i : Periodo de ola

La altura cuadrática media, H_{rms} , queda definida por:

$$H_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} H_i^2} \quad (3.22)$$

La falta de oblicuidad o asimetría es evaluada a través de la siguiente expresión:

$$Swk = \frac{1}{N_0 n_{rms}^3} \sum_{i=1}^N n_i^3 \quad (3.23)$$

Para evaluar otros parámetros relevantes, como los estadísticos de orden, significativo, un décimo, etc., primero se ordenan, en función de la altura de ola, de mayor a menor los valores correspondientes de altura-periodo de ola (H, T), de manera que, por ejemplo:

- La altura de ola un medio, $H_{1/2}$, es el promedio del 50 % de las olas más altas
- la altura un tercio o significativo, $H_s = H_{1/3}$, está definida como la media aritmética del 33 % de las alturas de ola más altas.
- la altura de ola un décimo, $H_{1/10}$, es el promedio del 10 % de las olas más altas
- la altura de ola un centésimo, $H_{1/100}$, es el promedio del 1 % de las olas más altas
- la altura de ola un milésimo, $H_{1/1000}$, es el promedio del 0.1 % de las olas más altas, etcétera.

Mientras que, para el caso de los periodos:

- el periodo de ola *un medio*, $T_{1/2}$, es el promedio de los periodos asociados al 50 % de las olas más altas de un registro.
- el periodo de ola *un tercio o significativo*, $T_{1/3} = T_s$, es el promedio de los periodos asociados al 33 % de las olas más altas de un registro.
- el periodo de ola *un décimo*, $T_{1/10}$, es el promedio de los periodos asociados al 10 % de las olas más altas de un registro.
- el periodo de ola *un centésimo*, $T_{1/100}$, es el promedio de los periodos asociados al 1 % de las olas más altas de un registro.
- el periodo de ola *un milésimo*, $T_{1/1000}$, es el promedio de los periodos asociados al 0.1 % de las olas más altas de un registro, etcétera.

En ocasiones, para evaluar las estadísticas de los periodos de ola se aplica el mismo criterio que para las alturas de ola. Sin embargo, en ingeniería y sobretodo en el proceso de diseño o caracterización, lo más conveniente es asociar las alturas con los periodos de ola.

D. DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE LAS VELOCIDADES ORBITALES.

Es común que cuando los equipos de medición proporcionan datos de corriente se determine el valor máximo y la media para ambas componentes. A partir de las siguientes expresiones, se puede evaluar el valor medio:

$$\bar{U}_x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_{x_i} \quad (3.24)$$

$$\overline{U}_y = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_{y_i} \quad (3.25)$$

E. DETERMINACIÓN DE LA DIRECCIÓN DEL OLAJE.

En la naturaleza, normalmente el oleaje no se propaga en una dirección específica, por el contrario, se distribuye a lo largo de varias direcciones, dependiendo de factores como la intensidad del viento, que el oleaje se encuentre en el área de generación o no, efectos de refracción, difracción, reflexión, por citar algunos de los más importantes. Para mediciones de oleaje cerca de la costa, fuera del área de generación, la dirección del oleaje tiende a asemejarse a la dirección del viento; sin embargo, para determinarla a través de las mediciones temporales, se utilizan los datos de velocidades orbitales asociadas al oleaje. La metodología para lograr esto se basa principalmente en utilizar los registros de U_x y U_y , junto con el dato de brújula para determinar la orientación del sistema de referencia del equipo.

En la fig. 29, se muestra un esquema tipo de la ubicación de un aparato de medición cerca de la costa, y se puede observar que los ejes que conforman el sistema de referencia del aparato están rotados con respecto al norte, este ángulo es el dato que normalmente se almacena en la brújula y se emplea para obtener la dirección del oleaje respecto al norte.

A continuación se presenta la metodología recomendada para determinar la dirección del oleaje a partir de datos temporales de velocidad:

1. Obtener las velocidades orbitales, U_x y U_y
2. Estimar los valores medios por registro
3. Dibujar ambas velocidades en el sistema de referencia del aparato XY
4. Rotar el sistema de referencia XY los grados que indica la brújula en el aparato
5. Determinar el sentido del oleaje de acuerdo con la posición de la costa.

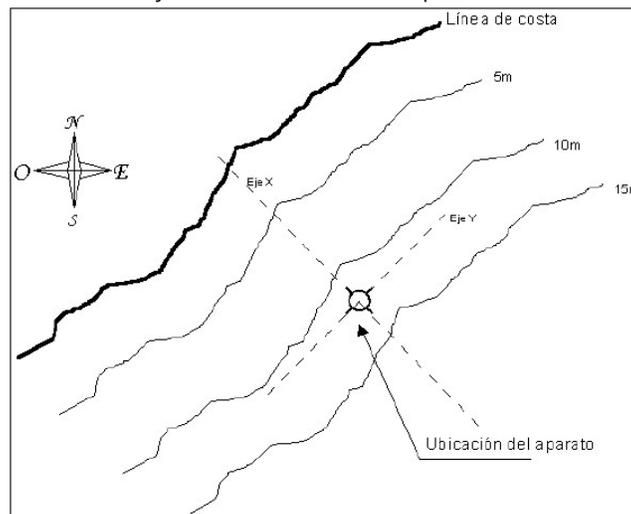


Figura 29. Ubicación de un aparato de medición en la costa.²³

AGRUPAMIENTO DEL OLAJE

Estudios recientes han comprobado que la caracterización de un estado de mar puede ser más adecuada si se analizan factores como el agrupamiento de las olas en un registro de oleaje, pues a pesar de su naturaleza aleatoria, se sabe que las olas de mayor magnitud no se dan de forma individual sino que tienden a aparecer en grupos o paquetes de olas que poseen mayor energía. Como ejemplo, la fig. 30 muestra un perfil de oleaje que exhibe dicho agrupamiento.

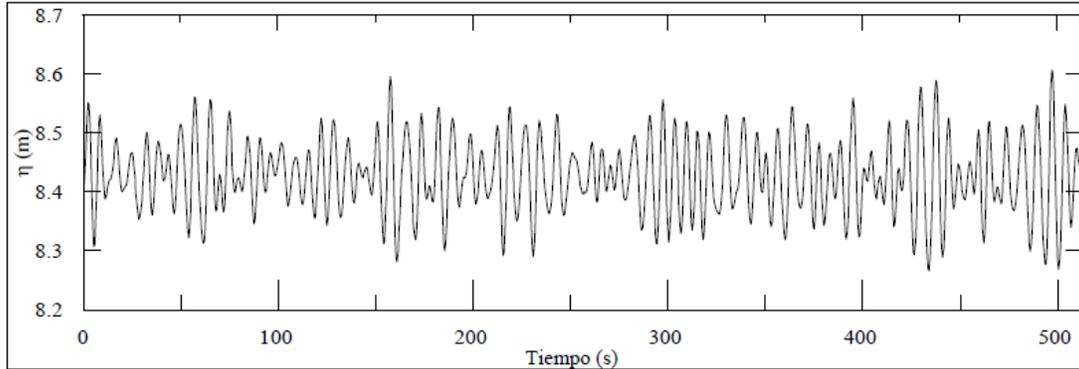


Figura 30. Ejemplo de un registro de oleaje con agrupamiento.

En 1987, Johnson et al (1978) mostraron que dicho fenómeno es muy relevante, pues se sabe que tiene influencia en:

- El número de olas necesarias para generar resonancia en las estructuras o para voltear embarcaciones.
- La estabilidad de las piezas del manto de rompeolas y estructuras de protección costera.

Además, algunos autores, como Goda (2000)²², han hecho notar que un agrupamiento bien desarrollado de un campo de oleaje está regularmente asociado a la presencia de ondas de periodo largo. El agrupamiento del oleaje puede ser cuantitativamente descrito si se agrupan conjuntos de olas que exceden un cierto valor umbral de altura de ola, H_c . A la sucesión de estas alturas de ola se les denomina paquetes de alturas de ola de magnitud importante y el número de olas que constituyen el conjunto se conoce como longitud del conjunto.

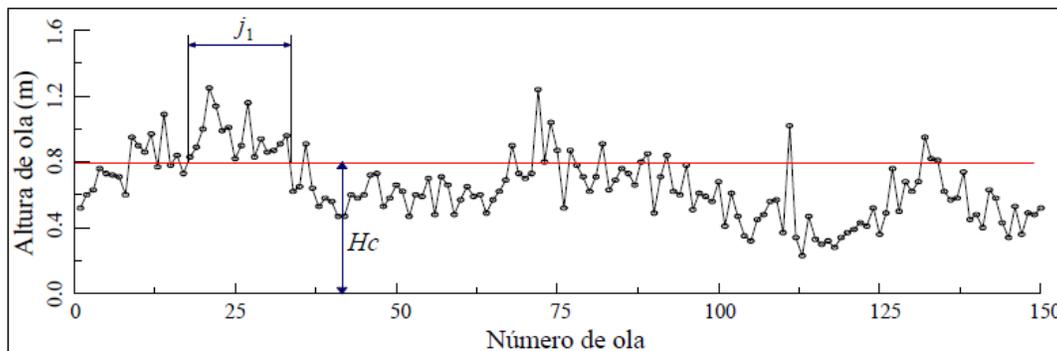


Figura 31. Definición de los paquetes de olas²³.

La fig. 31 es un esquema que define gráficamente un conjunto de olas, su longitud, j_1 , y el valor umbral que los define. Como se observa, los paquetes se delimitan de forma muy parecida a como se define el periodo por medio del método de pasos ascendentes por cero.

A manera de resumen, en la fig. 32 se presenta un diagrama de flujo para llevar a cabo la metodología necesaria para realizar el análisis temporal del oleaje.

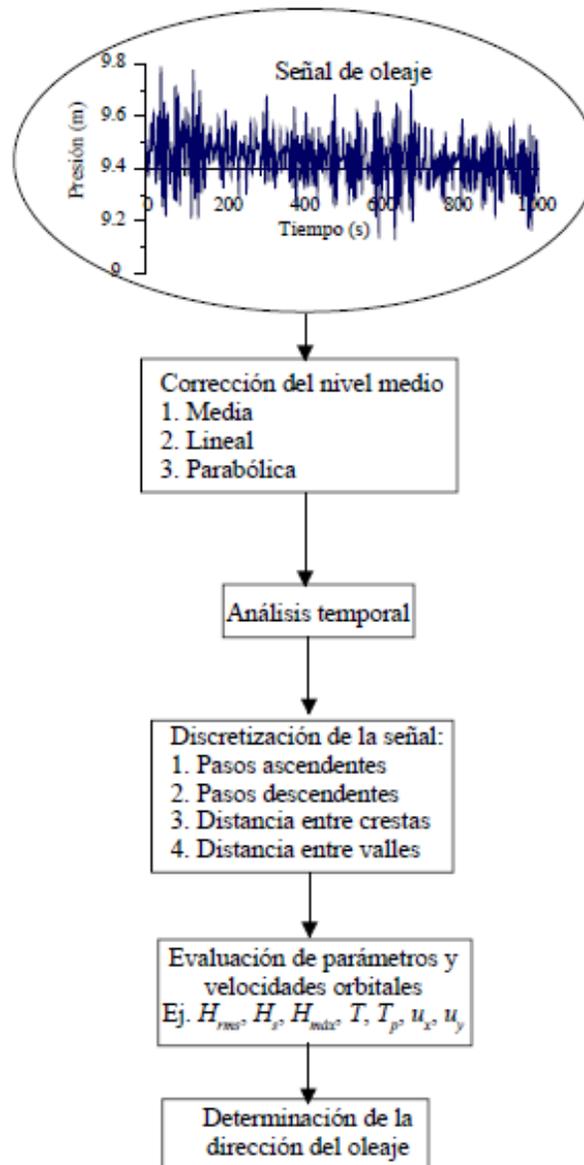


Figura 32. Diagrama de flujo para el análisis temporal de señales de oleaje sin considerar la evolución del agrupamiento del oleaje²³.

3.3.2 ANÁLISIS ESPECTRODIGITAL DE SERIES TEMPORALES.

Este modelo matemático del oleaje supone que una señal de superficie libre del mar es resultado de la suma de un gran número de ondas sinusoidales, cuyas amplitudes vienen dadas por:

$$a_i^2 = 2S(f_i)\Delta f_i \quad (3.25)$$

Donde $S(f_i)$ es la densidad espectral de energía, y a_i es la amplitud de una onda cualquiera.

Si se asume válida la aplicación de la teoría lineal de Airy (1845), es posible afirmar que la energía contenida en la banda de frecuencia Δf está asociada a una onda, obtenida por unidad de superficie, que se define como:

$$\frac{1}{8}\rho g H^2 = \frac{1}{2}\rho g a^2 = \frac{1}{2}\gamma a^2 \quad (3.26)$$

Donde: γ representa el peso específico del agua de mar.

Al sustituir la ec 3.25 en la 3.26, la energía por unidad de superficie contenida en la banda de frecuencias Δf_i se expresa:

$$\frac{1}{2}\gamma[2S(f_i)\Delta f_i] \quad (3.27)$$

Con lo que la energía total del oleaje por unidad de superficie será:

$$\frac{1}{2}\gamma \left[\sum_i 2S(f_i)\Delta f_i \right] \quad (3.28)$$

Si se representa la sumatoria como una integral, la energía total del oleaje por unidad de superficie es expresada por:

$$Energía = \gamma \int_0^{\infty} S(\omega)d\omega \quad (3.29)$$

Para realizar un análisis espectral adecuado es conveniente que los registros contengan al menos 100 olas y que el intervalo de muestreo sea de una décima a una vigésima parte del periodo significativo. Una vez seleccionado el intervalo de muestreo, Δt , la frecuencia máxima, conocida como frecuencia de Nyquist, para la cual el espectro es estimado se determina por la expresión:

$$f_c = \frac{1}{2\Delta t} \quad (3.30)$$

El análisis de Fourier consiste en encontrar las ondas sinusoidales (amplitud y frecuencia) que componen un registro de oleaje. La amplitud es proporcional a la energía contenida en cada onda sinusoidal simple.

En la tabla 4 se presenta la metodología para realizar un análisis del oleaje bajo esta perspectiva.

Tabla 4. Metodología para el análisis espectral del oleaje.²³

A. Corrección del nivel medio	<ul style="list-style-type: none"> • Media • Ec lineal • Ec parabólica • Filtro espectral
B. Aplicación de una función ventana	<ul style="list-style-type: none"> • Ventana tipo trapezoide • Ventana tipo coseno
C. Estimación de las componentes de Fourier	
D. Cálculo del espectro de energía	
E. Suavizado del espectro de energía	
F. Parámetros espectrales	
G. Estimación de la dirección del oleaje	<ul style="list-style-type: none"> • Espectro direccional

A. Corrección del nivel medio.

De la misma forma que con el análisis temporal, se debe llevar a cabo una corrección del nivel medio, ya que si este no es corregido se introducirá en el espectro una distorsión denominada efecto de solapamiento o aliasing. Si no existe influencia de ondas largas, en principio la corrección se puede hacer con las mismas consideraciones expuestas en la sección 2.4.1 Cuando se tiene un efecto de marea importante en el sitio, es necesario implementar una corrección espectral del nivel medio, es decir eliminar o filtrar la energía contenida en las frecuencias propias de la marea o en su caso de ondas largas, normalmente menores de 0.02 Hz.

B. Aplicación de una función ventana.

Cuando se realiza el análisis armónico de Fourier a una señal, se asume implícitamente que la muestra es periódica, en otras palabras que dicha señal se repite desde $-\infty$ hasta $+\infty$. Para evitar las discontinuidades que se pudieran presentar al unir los extremos de la señal, es común que antes de hacer el análisis armónico de un perfil de ondas se realice una corrección a los datos que la conforman. Dicha operación es conocida como la aplicación de una función ventana y se expresa como:

$$n(t_*) \rightarrow b(t_*)n(t_*), \text{ tal que } t_* = 1, 2, \dots, N.$$

Donde $b(t)$, se conoce como profundidad de peso, la cual se debe multiplicar por toda la muestra a fin de reducir las oscilaciones en los extremos de la serie. Las ventanas más utilizadas son la trapezoidal y la cosenoidal, las cuales se expresan de la siguiente forma:

a) Ventana tipo trapezoide

$$b_1(t_*) = \begin{cases} \frac{t_*}{l} & : 0 \leq t_* \leq l \\ 1 & : l \leq t_* \leq N-1 \\ \frac{N-t_*}{l} & : N-l < t_* \leq N \end{cases} \quad (3.31)$$

b) Ventana tipo coseno

$$b_2(t_*) = \begin{cases} \frac{1}{2} \left[1 - \cos\left(\frac{\pi t_*}{l}\right) \right] & : 0 < t_* < l \\ 1 & : l \leq t_* \leq N-1 \\ \frac{1}{2} \left[1 - \cos\left(\frac{\pi(N-t_*)}{l}\right) \right] & : N-1 < t_* \leq N \end{cases} \quad (3.32)$$

Donde normalmente se acepta que $l = 0.1N$.

C. Estimación de las componentes de Fourier.

Señal de oleaje como la suma de muchas componentes, $\eta(t)$ es una función periódica del tiempo, t , con duración T_r , puede expresarse:

$$n(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos \frac{2\pi n t}{T_r} + b_n \operatorname{sen} \frac{2\pi n t}{T_r} \right) \quad (3.33)$$

Donde a_0 expresa el valor del nivel medio, a_n y b_n son los coeficientes de Fourier, $a_n \neq b_n$.

Señal de oleaje en forma continua:

$$n(t) = \int_{-\infty}^{\infty} F(\sigma) e^{i\sigma t} d\sigma = 2 \int_0^{\infty} F(\sigma) e^{i\sigma t} d\sigma \quad (3.34)$$

Donde $F(\sigma)$ es la transformada compleja de Fourier de $\eta(t)$.

$$F(\sigma) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} n(t) e^{i\sigma t} dt \quad (3.35)$$

Es frecuente encontrar en la literatura que la transformada de Fourier, ec. 3.35, esté expresada en función de la frecuencia, f , en lugar de la frecuencia angular, σ (donde $\sigma = 2\pi f$), de la siguiente forma:

$$F(f) = \int_{-\infty}^{\infty} n(t) e^{i\sigma t} dt \quad (3.36)$$

En la práctica, los datos producto de mediciones están siempre registrados de forma discreta y tienen una longitud finita, por lo que es más conveniente expresar las ecs. 3.34 y 3.35 de esa forma. En particular, la ec. 3.35, puede ser representada, para el caso de tener datos con un espaciamiento regular, de forma discreta:

$$F(\sigma) = \frac{1}{N} \frac{1}{2\pi} \sum_{n=0}^{N-1} n_n e^{-i\sigma_j n \Delta t} \quad j = 0, 1, 2 \dots N/2 \quad (3.37)$$

O considerando la ec. 3.36.

$$F(f_j) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} n_n e^{-i2\pi f_j n \Delta t} \quad j = 0, 1, 2 \dots N/2 \quad (3.38)$$

Donde N es el número total de datos de la señal por analizar y Δ_t es el intervalo de muestreo.

La frecuencia angular σ_j , y la frecuencia f_j , se pueden evaluar a través de la siguiente relación:

$$\sigma_j = 2\pi f_j = \frac{2\pi j}{T} = \frac{2\pi j}{N\Delta t} = 2\pi j \Delta f \quad (3.39)$$

Una forma muy sencilla de calcular los coeficientes de Fourier, una vez corregido el nivel medio, es como sigue:

Inicie con un valor de $j = 0$

Evalúe $f_j = j\Delta f$

Calcule $F(f_j)$

Incremente j en 1

Vuelva al paso 2 hasta que $j = N/2$

Dado que las componentes de Fourier son simétricas, $F(f_j) = F(-f_j)$, no es necesario calcular las componentes para las frecuencias negativas.

D. Cálculo del espectro de energía.

La función de densidad espectral $S(f_j)$, se calcula a través de la transformada rápida de Fourier de la serie de datos de superficie libre $\eta(t)$, y se define a partir de las siguientes expresiones:

$$S(f_j) = \frac{1}{2\Delta f} |2F(f_j)|^2 \quad j = 0, 1, 2, \dots, N/2 \quad (3.40)$$

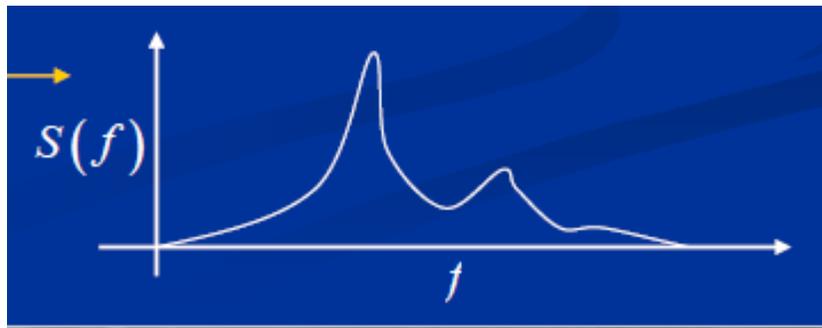


Figura 33. Espectro de energía.²⁴

E. Suavizado del espectro.

Los valores espectrales estimados fluctúan entorno a los valores del espectro real. Para atenuar estas oscilaciones es posible suavizar el espectro con una función de peso.

Los filtros o funciones de peso más comunes son:

²⁴ (Silva Casarín, Análisis y descripción del régimen medio del oleaje s.f.)

- Filtro rectangular

Es el método más simple para llevar a cabo este procedimiento y está dado por la expresión:

$$W_1(f_j) = \frac{1}{m}; \quad -\left[\frac{(m-1)}{2}\right] \leq j \leq \left[\frac{m}{2}\right] \quad (3.36)$$

Donde:

m: representa el número de valores espectrales no suavizados que se utilizaron para el promedio.

- Filtro triangular

$$W_2(f_j) = \frac{1}{W^2} \left\{ 1 - \frac{|j|}{\left[\frac{(m-1/2)}{2}\right]} \right\}; \quad -\left[\frac{(m-1)}{2}\right] \leq j \leq \left[\frac{m}{2}\right] \quad (3.37)$$

- Filtro parabólico.

$$W_3(f_j) = \frac{1}{W^3} \left\{ 1 - \left(\frac{j}{\left[\frac{(m-1)}{2}\right]} \right)^2 \right\}; \quad -\left[\frac{(m-1)}{2}\right] \leq j \leq \left[\frac{m}{2}\right] \quad (3.38)$$

Donde:

W2 y W3 son constantes de normalización

F. Parámetros espectrales.

Todos los parámetros espectrales se calculan a partir de sus diferentes momentos. El momento de orden n respecto al origen se define mediante la siguiente expresión:

$$m_n = \int_0^{\infty} f^n S(f) df \quad (3.39)$$

Donde: $S(f)$ es la función densidad espectral y f es la frecuencia.

Cartwright y Longuet-Higgins (1956)²² proponen un parámetro para describir la anchura espectral.

$$\varepsilon = \left[1 - \frac{m_2^2}{m_0 m_4} \right]^{1/2} \quad (3.40)$$

Si el espectro es de banda angosta ε tiende a 0; por el contrario, si el espectro es de banda ancha ε tiende a 1.

Debido a que la estimación del momento de cuarto orden es muy sensible a los valores que se tienen en las altas frecuencias, para espectros que definen un estado de mar este parámetro no es representativo ya que puede inducir a fuertes errores. Para Longuet-Higgins (1983)²² propuso otro parámetro de anchura espectral, el cual depende de los momentos de orden inferior.

$$V = \left[\frac{m_0 m_2}{m_1} - 1 \right]^{1/2} \quad (3.41)$$

Otro parámetro que define la forma del espectro es el de agudeza de pico Q_p propuesto por Goda (1970):

$$Q_p = \frac{2}{m_0^2} \int_0^\infty f(S(f))^2 df \quad (3.42)$$

Parámetros estadísticos obtenidos del espectro.

- Período medio

$$T_{01} = \frac{m_0}{m_1} T_{02} = \sqrt{\frac{m_0}{m_1}}$$

- Variación cuadrática media de la superficie.

$$n_{rms} = \sqrt{m_0}$$

- Altura de ola cuadrática media.

$$H_{rms} = \sqrt{8m_0}$$

- Altura de ola de momento de orden cero

$$H_{m_0} = 4.004 \sqrt{m_0}$$

G. Espectro direccional

El oleaje real no viaja en una sola dirección. El análisis direccional consiste en conocer la dirección en que viaja cada componente frecuencial del espectro. El oleaje puede representarse por:

$$n(x, y, t) = \sum_{n=1}^N a_n \cos[k_n(x \cos \theta_n + y \sin \theta_n) - \sigma_n^t + \phi_n] \quad (3.43)$$

a_n : Amplitud

σ_n : Frecuencia angular

k_n : Número de onda

θ_n : Dirección

ϕ_n : Fase

- Espectro dirección

Se hace una división del tipo:

$$S(f, \theta) = S(f)D(f, \theta)$$

Donde:

$S(f)$ Espectro de energía

$D(f, \theta)$ Distribución direccional de la energía.

3.4 TEORÍA DE GENERACIÓN DE OLAJE EN LABORATORIO.

El uso de modelos físicos en la ingeniería costera se vería seriamente limitado si no se hubiera podido crear oleaje en modelos a pequeña escala que exhibieran muchas de las características de las olas en la naturaleza. Aunque el viento se puede utilizar en un pequeño tanque o canal para generar olas a diferentes escalas, el tanque debe de ser cerrado y de longitud suficiente para que el viento genere la condición deseada.

Las primeras máquinas generadoras de olas, generaban olas uniformes moviendo la pala de generación en un movimiento sinusoidal con una amplitud y período de oscilación dado. Aunque se trataba de una aproximación muy simplificada de las olas del mundo real, estas sencillas olas ajustaban razonablemente bien a la teoría de las ondas lineales, los investigadores pioneros utilizaron esta capacidad de laboratorio para hacer unos grandes avances en la ingeniería costera. Pronto los motores impulsores de las palas de generación fueron reemplazados por servo-sistemas hidráulicos que dieron más control sobre la pala de generación. Este avance permitió la simulación bidimensional de oleaje irregular y sinusoidal y olas solitarias en canales de oleaje.

3.4.1 ECUACIONES DE GOBIERNO Y CONDICIONES DE CONTORNO.

Una teoría general para la generación de onda mecánica fue presentada por Havelock (1929), y esta es generalmente considerada como el fundamento de la teoría de generación de oleaje. Investigaciones teóricas y aspectos prácticos de generadores de tipo pistón y tipo aleta fueron descritos por Biesel y Suquet (1954).

El movimiento de un fluido no viscoso, irrotacional de un canal de oleaje se describe por la ecuación de Laplace en dos dimensiones junto con las condiciones de contorno adecuadas. En el plano cartesiano bidimensional, sistema representado en la figura 34., la ecuación de Laplace en términos del potencial de velocidad es:

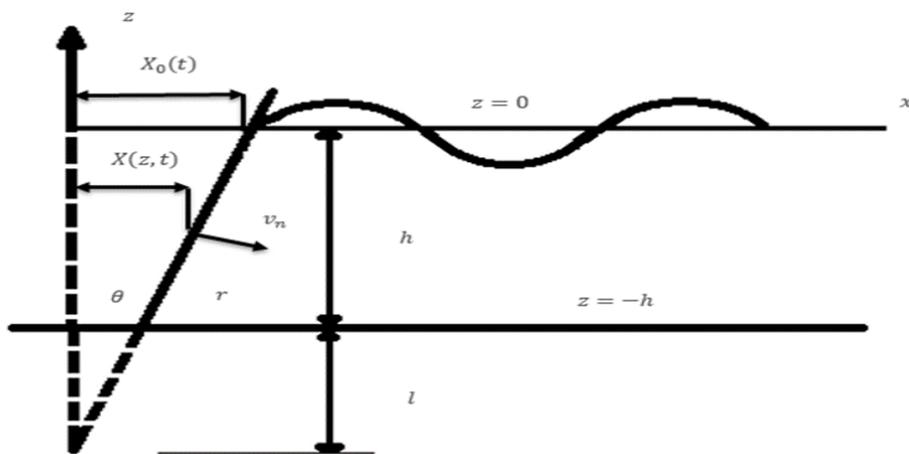


Figura 34. Definición del canal en dos dimensiones.

Ecuación de Laplace (en el dominio de líquidos).

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (3.44)$$

Condición de fondo (en $z = -h$).

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad (3.45)$$

Condición cinemática de superficie libre (en $z = \eta$).

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \phi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{\partial \phi}{\partial x} = 0 \quad (3.46)$$

Condición dinámica de superficie libre (al $z = \eta$).

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} \right)^2 \right] + g\eta = 0 \quad (3.47)$$

Condición en la pala de generación (en $x = X(z, t)$).

$$\frac{\partial y}{\partial x} = \left(1 + \frac{z}{h+l} \right) \frac{\partial X_0(t)}{\partial t} \quad (3.48)$$

Cuando $l = 0$, la ecuación 3.48 representa la condición de contorno para una pala de generación tipo aleta con bisagras en la parte inferior del canal de oleaje; y cuando $l \rightarrow \infty$, la ecuación representa la condición límite para una pala de generación tipo pistón.

Cuando $x \rightarrow \infty$ la solución a la generación de oleaje debe convertirse en la de una onda progresiva que se mueve en la dirección positiva x .

El problema de la generación de oleaje dado por las ecuaciones. 3.44, 3.45, 3.46, 3.47 y 3.48 puede resolverse utilizando técnicas de perturbación estándar. Esto da lugar a conjuntos de ecuaciones para diferentes órdenes del parámetro de perturbación. Lo primero es asumir el potencial de velocidad, superficie libre, ángulo de pala de generación, y el fondo horizontal puede ser representado por series de potencias.

3.5 DINÁMICA DE LOS ARRECIFES ARTIFICIALES.

3.5.1 ARRECIFES ARTIFICIALES.

Los arrecifes artificiales son estructuras permeables paralelas a la costa, coronadas por debajo del nivel medio del mar. Pueden ser construidas para que trabajen individualmente o en serie.

La estructura, diseño y materiales de un arrecife artificial suelen depender del objetivo final. Los elementos para construir arrecifes artificiales pueden dividirse en:

1. Elementos de desecho.
2. Geocontenedores.
3. Roca o elementos de concreto simple.

Para su construcción deben considerarse los siguientes aspectos: el costo es moderado y, en ocasiones, se requiere mantenimiento de la línea de playa; dependiendo de su ubicación en ocasiones pueden permitir la disminución o incluso la total supresión de la tendencia erosiva de una playa no sólo evitando la pérdida de arena sino la recuperación de la misma.

Si están bien diseñadas generan una zona de abrigo adecuada; debido a su sumergencia relativa, pueden ser peligrosas para la navegación y en condiciones de tormenta y marea de tormenta asociada, su efectividad disminuye considerablemente.

3.5.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS DIQUES.

Los diques pueden ser de piezas sueltas o rompeolas y de gran variedad de materiales.

Función: Proveer una zona de resguardo para las actividades marítimo costeras.

Acción principal: Disipar energía por rotura, fricción con el manto y al interior, transmisión de energía a través y sobre el dique.

Acción secundaria: Reflejar la energía del oleaje de vuelta al mar.

CLASIFICACIÓN DE ESFUERZOS

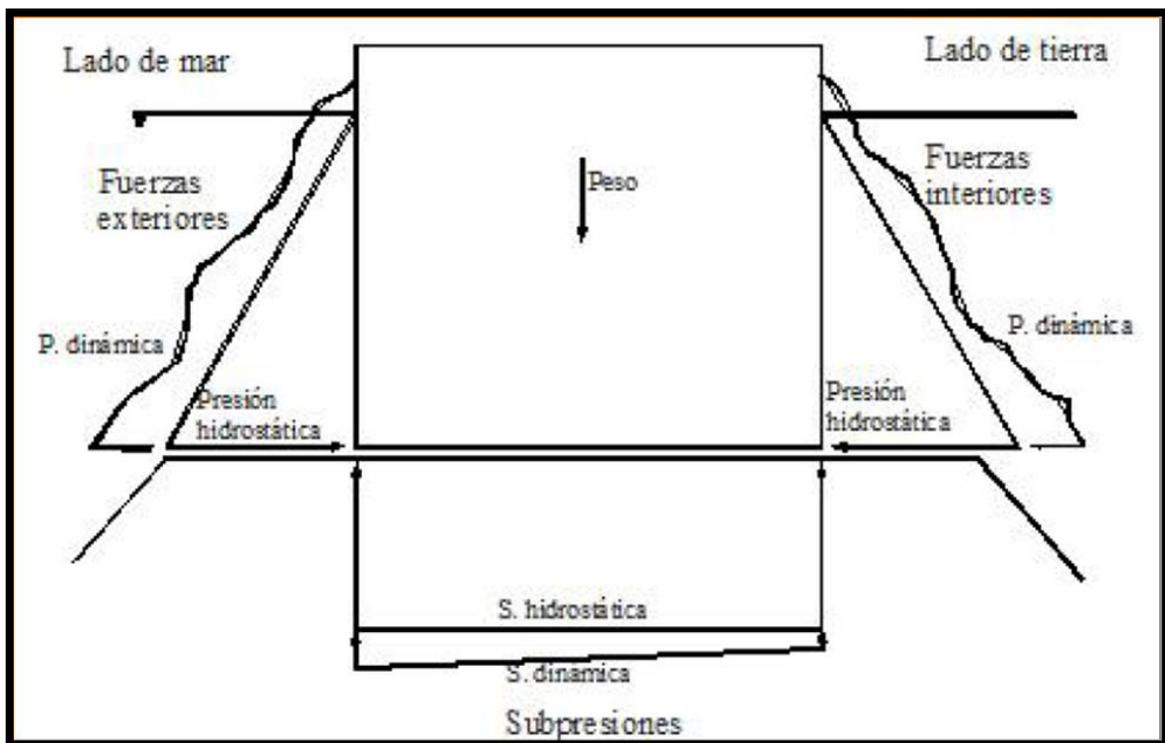


Figura 35. Representación de esfuerzos en un dique.

MODOS DE FALLA.

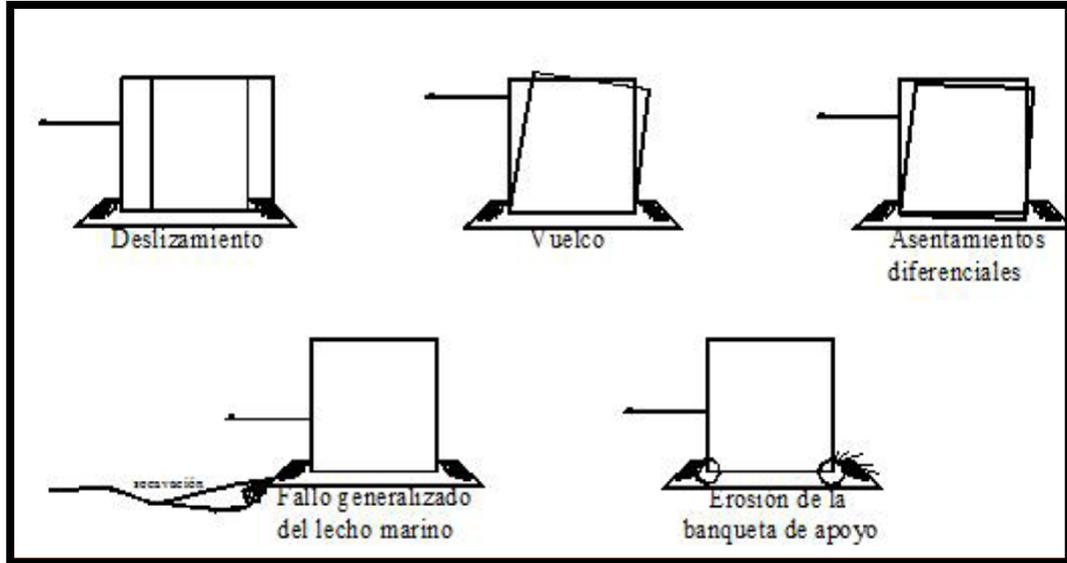


Figura 36. Posibles fallas de los diques.

FUNCIONES DE LAS CAPAS DEL DIQUE.

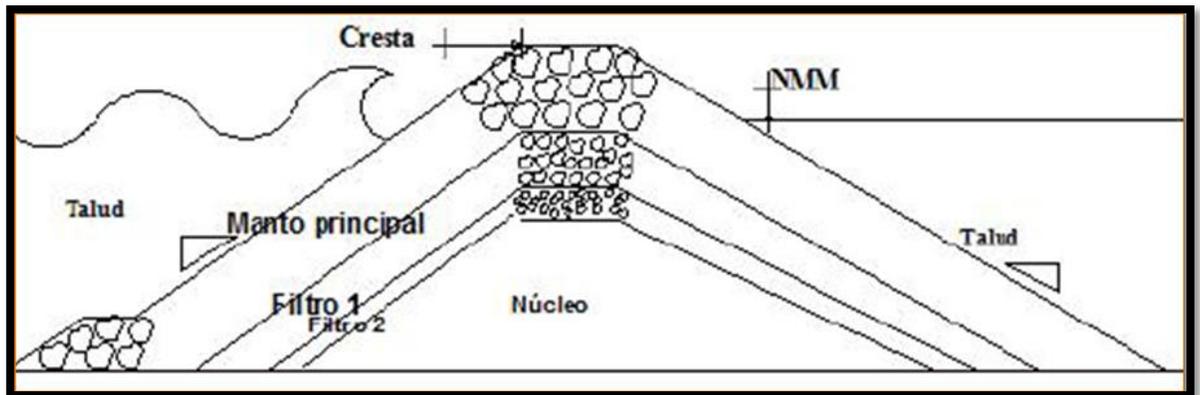


Figura 37. Partes de un dique.

Tabla 5, Capas de un dique.

Manto principal	-Resistir las cargas hidrodinámicas -Disipar la energía del oleaje -Reducir el nivel del ascenso y la socavación -Ofrecer un ambiente estético y de recreación
Capa secundaria	-Proteger el material interior del arrastre -Resistir el deslizamiento del manto -Regular la porosidad
Núcleo	-Regular la transmisión -Resistir el arrastre del material

CARACTERÍSTICAS PARA LA TIPOLOGÍA DE LOS DIQUES.

- Monocapa y multicapa.
- No rebasable, rebasable y sumergido.
- Vertical, mixto, con espaldón, berma, otros perfiles.

TIPOLOGÍAS BÁSICAS.

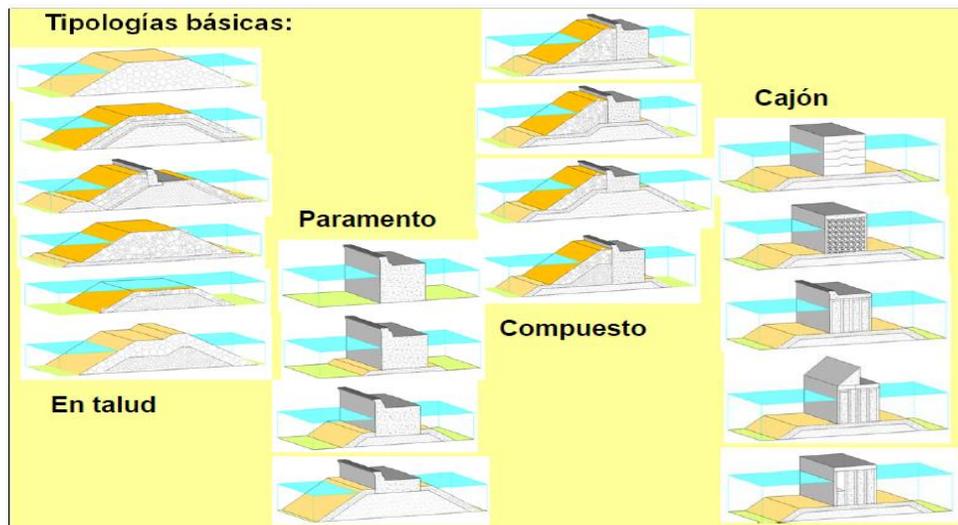


Figura 38. Tipologías básicas de los diques.

3.5.3 DIQUES SUMERGIDOS.

Los diques sumergidos y rebasables son aquellos que se diseñan de forma que parte importante de la energía del oleaje se transmite a través o por encima de ellos. El mecanismo de transmisión más importante es el rebase sobre la coronación, aunque la transmisión a través del dique también puede ser significativa. La razón de ser de este tipo de diques obedece a aspectos visuales, ya que son estructuras que permanecen por debajo del nivel medio del mar y por tanto, su nivel de impacto visual es propiamente nulo.

CONSIDERACIONES DE DISEÑO:

1. Proponer una tipología para el dique.
2. Revisar con los métodos apropiados dependiendo el tipo de dique.

3.5.4 FENÓMENOS QUE INTERVIENEN EN LA PROPAGACIÓN DEL OLEAJE.

Los procesos físicos que ocurren dentro de la propagación del oleaje son innumerables, sin embargo dentro de los más importantes para fines ingenieriles se encuentran los siguientes:

- En general: refracción, difracción, someramiento y reflexión.
- En aguas someras: interacción no lineal entre componentes, Rotura, Run-up, Run-down, Set-up, Set-down.

SOMERAMIENTO (shoaling).

Variación de la altura de ola al variar la profundidad por conservación del flujo de energía:

Básicamente es una transformación de la altura de la ola (la forma de la superficie libre) debido a los cambios en la celeridad (L/T) de grupo con la disminución de la profundidad. Al variar la altura y la longitud, también varía el peralte del oleaje (H/L), disminuyendo temporalmente a un valor ligeramente menor que su valor en aguas profundas cuando se propaga en aguas intermedias, para aumentar bruscamente al llegar a aguas someras pues H aumenta y L disminuye (ángulo crítico de estabilidad). La altura del oleaje está limitada físicamente por la profundidad. La ola se hace inestable y rompe (no aumenta hasta el infinito).

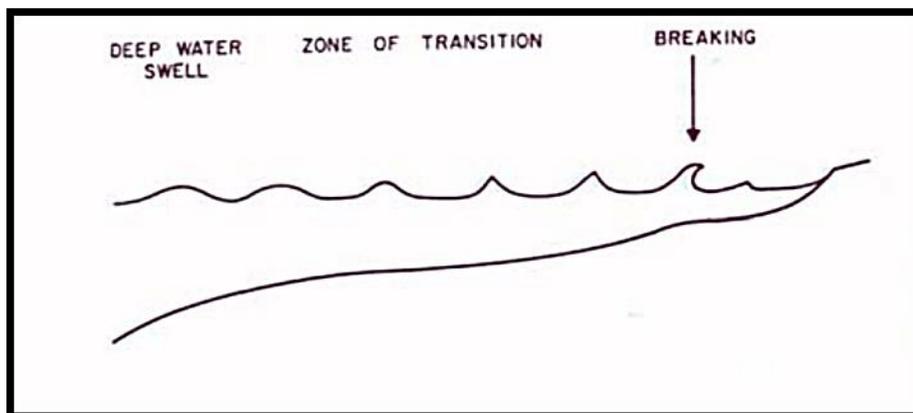


Figura 39. Transformación del oleaje al propagarse progresivamente sobre aguas someras cercanas a la costa

REFRACCIÓN.

La velocidad de fase, así como la longitud de onda depende de la profundidad sobre la que se propaga el oleaje (shoaling). Al entrar en aguas intermedias, hay un cambio en la dirección de propagación con la disminución de la profundidad las crestas tienden a ponerse paralelas a los contornos del fondo (la parte del frente de onda que está en una zona de menor calado se propaga hacia adelante a una velocidad más pequeña que la parte que está a una profundidad mayor). Hay, por lo tanto, un gradiente en la celeridad de la ola a lo largo de la línea de cresta y las crestas tenderán a rotar alineándose a los contornos.

La refracción, que depende de la relación h/L implicará una modificación en la dirección de la ola. Se trata pues de un proceso cinemático de transformación de la ola:

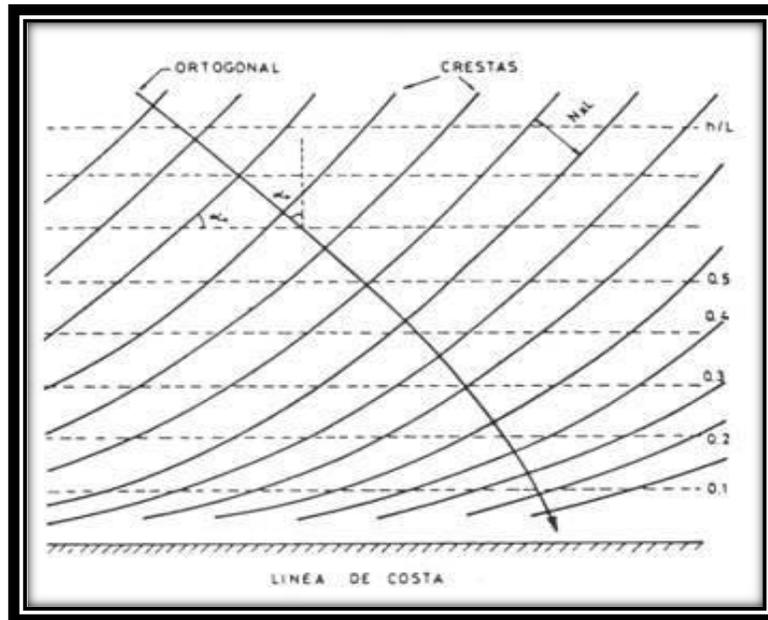


Figura 40. Refracción.



Figura 41. Refracción en una playa.



Figura 42. Refracción de una bahía.

La refracción, junto con el proceso de someramiento, determina la altura de la ola a una profundidad determinada para un grupo dado de condiciones de oleaje, es decir, altura, dirección y dirección de propagación en aguas profundas. Por lo tanto, tiene una influencia importante en las alturas de ola y por lo tanto, de la distribución de energía a lo largo de la costa. El cambio en la dirección de las diferentes partes de la cresta de la ola resulta en una convergencia o divergencia de la energía del oleaje y afecta materialmente las fuerzas ejercidas por el oleaje sobre la costa. Tiene una contribución importante en la remodelación del fondo marino, por sus efectos de erosión o depositación de sedimentos.

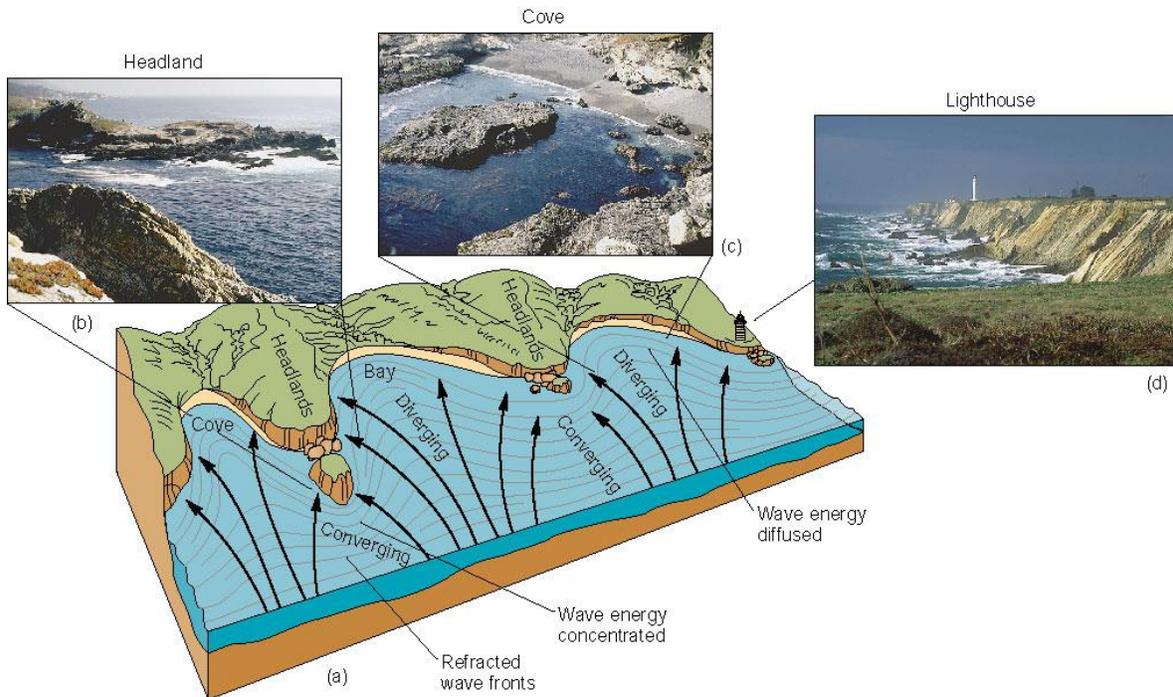


Figura 43. Refracción cambio en las crestas de ola.

DIFRACCIÓN.

Es el proceso de transferencia lateral de energía sobre las crestas del oleaje. Ocurre cuando la altura de ola en un punto es superior a los valores adyacentes dentro de la misma cresta. El proceso se entiende como una cesión lateral de energía debida al obstáculo que provoca un giro en la trayectoria de los frentes de onda.

En caso de que el oleaje se encuentre con algún obstáculo, (isla, rompeolas, etc.), se generará una zona de "sombra" o abrigo protegida de la acción del oleaje. El proceso de difracción puede provocar que parte de la energía del oleaje que no haya encontrado la interferencia se meta en la zona protegida. Las ondas que se forman tras el objeto como consecuencia de la cesión de energía son ondas difractadas.

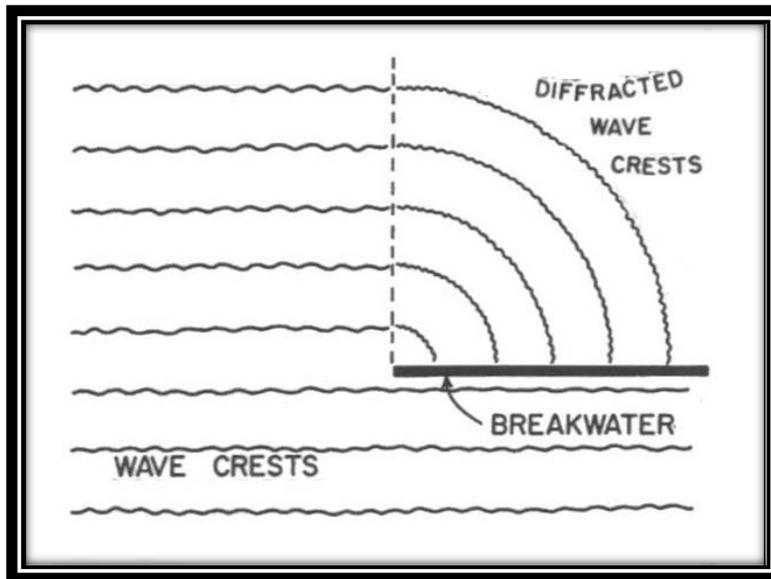


Figura 44. Difracción.

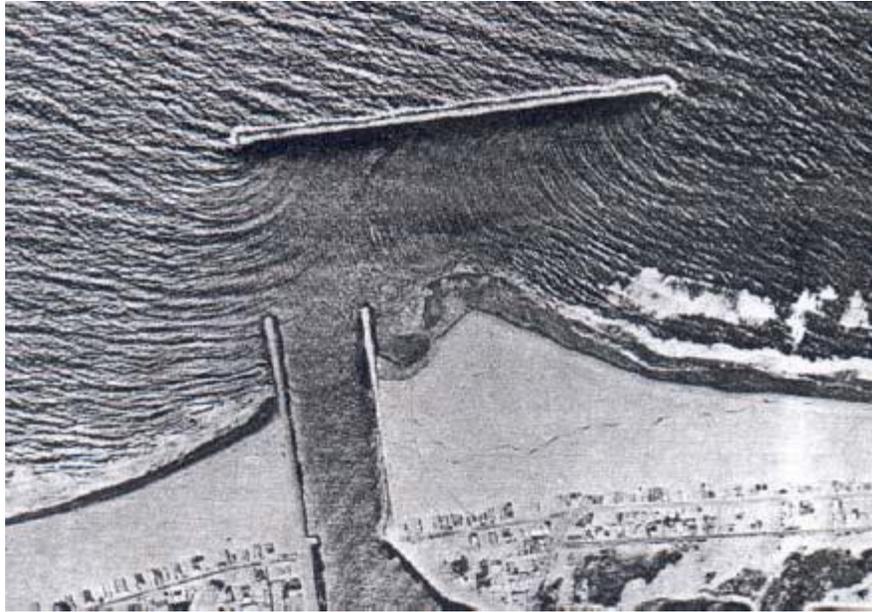


Figura 45. Difracción en una estructura.

- Difracción en una estructura.

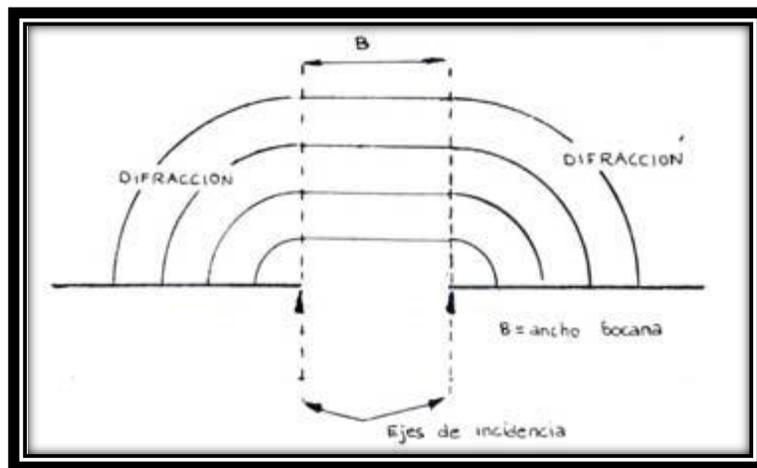


Figura 46. Difracción a través de una bocanada.

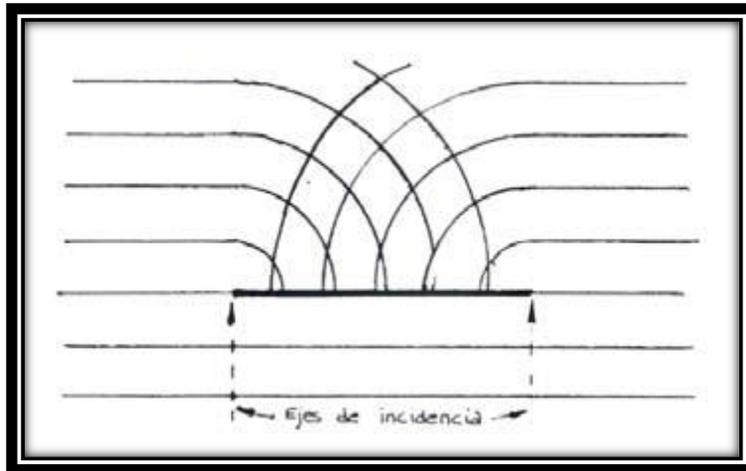


Figura 47. Difracción a través de una bocanada.

REFLEXIÓN.

Cambio brusco en la dirección de propagación debido a la presencia de un obstáculo en la propagación. Proceso por el cual parte de la energía no disipada de un determinado tren de olas genera otro tren en sentido contrario al incidir sobre un obstáculo. La energía reflejada por el oleaje es función directamente de las propiedades de la estructura que provoca el cambio de dirección, la pérdida de energía puede ser mínima si se considera un elemento totalmente impermeable, en otros casos puede haber mayor disipación de energía si el elemento es permeable.

Causas que provocan la reflexión:

- Obstáculos emergidos.
 - Naturales o artificiales.
- Pendientes elevadas.
 - Estructuras de protección costera e incluso playas naturales.
- Cambios bruscos de calado.
- Depende de características de la superficie (rugosidad, permeabilidad y pendiente) y del peralte de las olas.

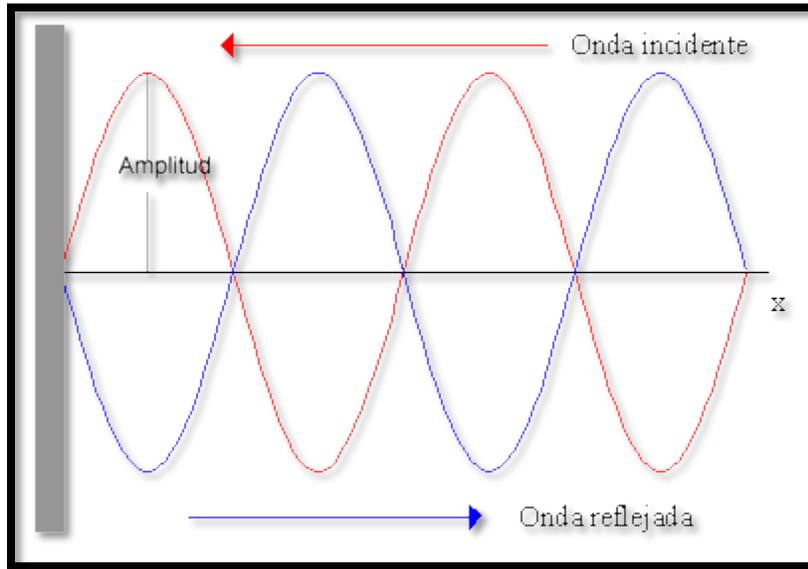


Figura 48. Esquema de Definición del Oleaje Reflejado sobre una pared vertical.

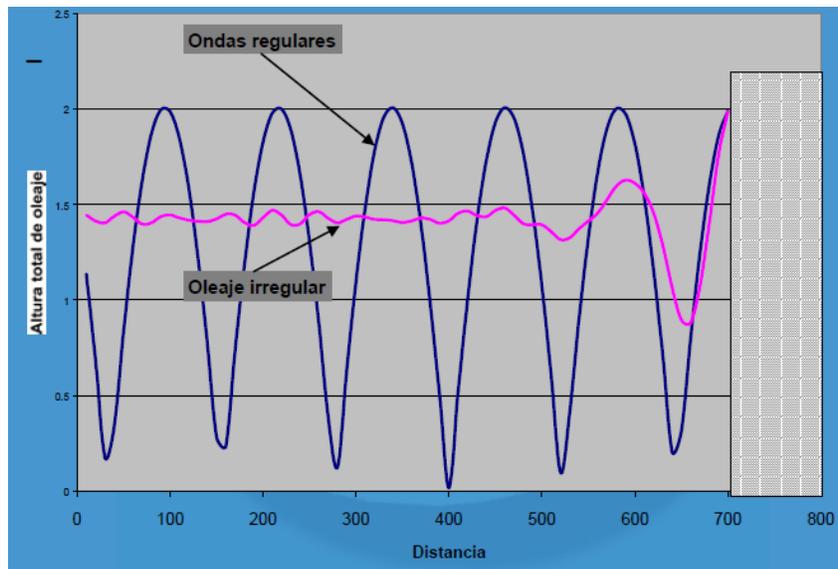


Figura 49. Reflexión.

La reflexión se define mediante un coeficiente complejo:

$$R = |R| * e^{-i\varepsilon} \quad (3.49)$$

Donde:

$|R| = \sqrt{R_R^2 + R_I^2}$ Es el módulo del coeficiente de reflexión.

$\varepsilon = \arctan (R_I / R_R)$ Es el argumento del coeficiente complejo.

Donde RI es la amplitud de la ola incidente y RR la amplitud de la onda reflejada.

Cuando el oleaje se encuentra con una estructura y parte de la energía es reflejada, la altura de ola reflejada se suma con el tren de olas incidente, modificando la altura de las olas totales. Así, para poder cuantificar correctamente la altura de ola reflejada, la altura de ola incidente, y con ello el coeficiente de reflexión, se debe realizar una separación de la señal de oleaje. Por ello se usó el método de Mansard y Funke (1980), el cual es un método basado en los mínimos cuadrados, utilizando datos de tres sensores de nivel.

TRANSMISIÓN.

Cuando se construye una estructura de protección, puede existir cierta agitación en la zona abrigada. Dicha agitación puede ser causada por las olas que rebasan la estructura o por las ondas que son transmitidas a través de esta. Al fenómeno por el que parte de la energía de las ondas pasas a través de la estructura se le conoce como transmisión. Para estructuras emergidas, la transmisión del oleaje dependerá principalmente de la porosidad y anchura de la estructura, pues entre mayor sea ésta existirán mayores espacios por donde el oleaje podrá viajar de un lado a otro, mientras que a menor porosidad el oleaje tenderá a ser disipado por medio de la fricción del material de la estructura. Por otro lado, para estructuras sumergidas los niveles de transmisión del oleaje serán mayores, y la transmisión dependerá principalmente de la distancia existente entre la superficie libre del agua y la cresta de la estructura (francobordo); así, cuanto menor sea el francobordo (menor distancia entre la cresta del dique y la superficie libre del agua) la transmisión del oleaje será menor, y viceversa: cuanto mayor sea el francobordo, la transmisión del oleaje aumentará.

La transmisión del oleaje se caracteriza por medio de un coeficiente que se determina como el cociente de la altura de ola transmitida entre la altura de ola incidente, tal que:

$$K_T = \frac{H_{Transmitida}}{H_{Incidente}} \quad (3.50)$$

DISIPACIÓN.

Antes de la zona de rompientes, la disipación debida a la fricción en el fondo es el proceso principal de atenuación energética. La disipación de energía ocurre principalmente en aguas poco profundas e induce una reducción de la altura de ola. Los efectos de fricción varían con el tipo de material en el fondo, así como de las características del oleaje, profundidad relativa y distancia de recorrido del oleaje, entre otros.

Cuando las olas se propagan a través de una zona relativamente amplia y poco profunda, su energía se disipa de forma importante. La disipación puede ser causada por el incremento de fricción en el fondo, la infiltración en los intersticios de estructuras porosas o fondos arenosos, el movimiento de fondos marinos cohesivos y por la resistencia inducida por la vegetación. Los mecanismos de disipación pueden provocar una disminución en la altura de las olas mayor que la estimada con métodos convencionales para fondos impermeables o arenosos. Los métodos disponibles se basan en el análisis de los parámetros que tienen una amplia gama de valores y puede ser de difícil estimación de manera fiable. El enfoque general para cuantificar la disipación puede implicar el uso de datos empíricos, posiblemente recogidos en el lugar de estudio o disponibles en un sitio similar. En la mayoría de situaciones, la cantidad de disipación será pequeña y el esfuerzo necesario para

analizar los procesos de disipación puede ser grande. A partir de la zona de rompientes, los efectos turbulentos dominan el proceso de disipación de energía y los efectos de fricción y percolación son menos importantes. La caracterización del proceso de rotura se aborda en la próxima sección.

La disipación se determina:

$$D^2 = 1 - R^2 - T^2 \quad (3.51)$$

ROTURA.

La rotura o rompiente de una onda de gravedad ocurre cuando la estructura del movimiento oscilatorio pierde la capacidad de mantenerse estable. Las causas principales de la rotura son la celeridad y el peraltamiento que ocurre cuando el oleaje se propaga en aguas someras. Durante la rotura una ola deja de serlo y pierde la mayor parte de la energía con que viajaba.

La rotura tipo spilling.

- Se origina con olas con peralte relativamente alto propagándose sobre playas con poca pendiente.
- La cresta se derrama hacia abajo por la pendiente frontal de la ola.
- Muy poco de su momentum es reflejado hacia el mar.

La rotura tipo plunging.

- Ocurre cuando olas con un peralte medio se propagan sobre playas inclinadas.
- La cara frontal de la ola va curvándose hacia el frente hasta que finalmente se precipita, zambulléndose como una masa de agua intacta.
- El proceso de este tipo de rotura produce una gran turbulencia y una gran entrada de aire. La reducción de la altura de la ola durante la rotura se produce rápida y drásticamente.
- Las olas reformadas son usualmente de menos de una tercera parte de la altura de la ola en rotura y suelen romper de nuevo muy cerca de la línea de orilla.
- Poco del momentum de dicha ola es reflejado hacia el mar.

La rotura tipo surging

- Ocurre con olas con poco peralte propagándose en playas con pendientes altas.
- La zona de surf usualmente es muy estrecha y cerca de la mitad o más del momentum de las olas es reflejado hacia el mar.
- Este tipo de rotura, comienza de forma similar a la tipo plunging, aumentando la verticalidad de la cara frontal de la ola, pero antes de doblarse hacia el frente, la base de la ola sube súbitamente por la cara de la playa y la cresta se colapsa y desaparece.

– Galvin (1968) identificó la rompiente **collapsing**, un cuarto tipo que es intermedia entre la rompiente tipo plunging y surging.

TIPOS DE ROTURA.

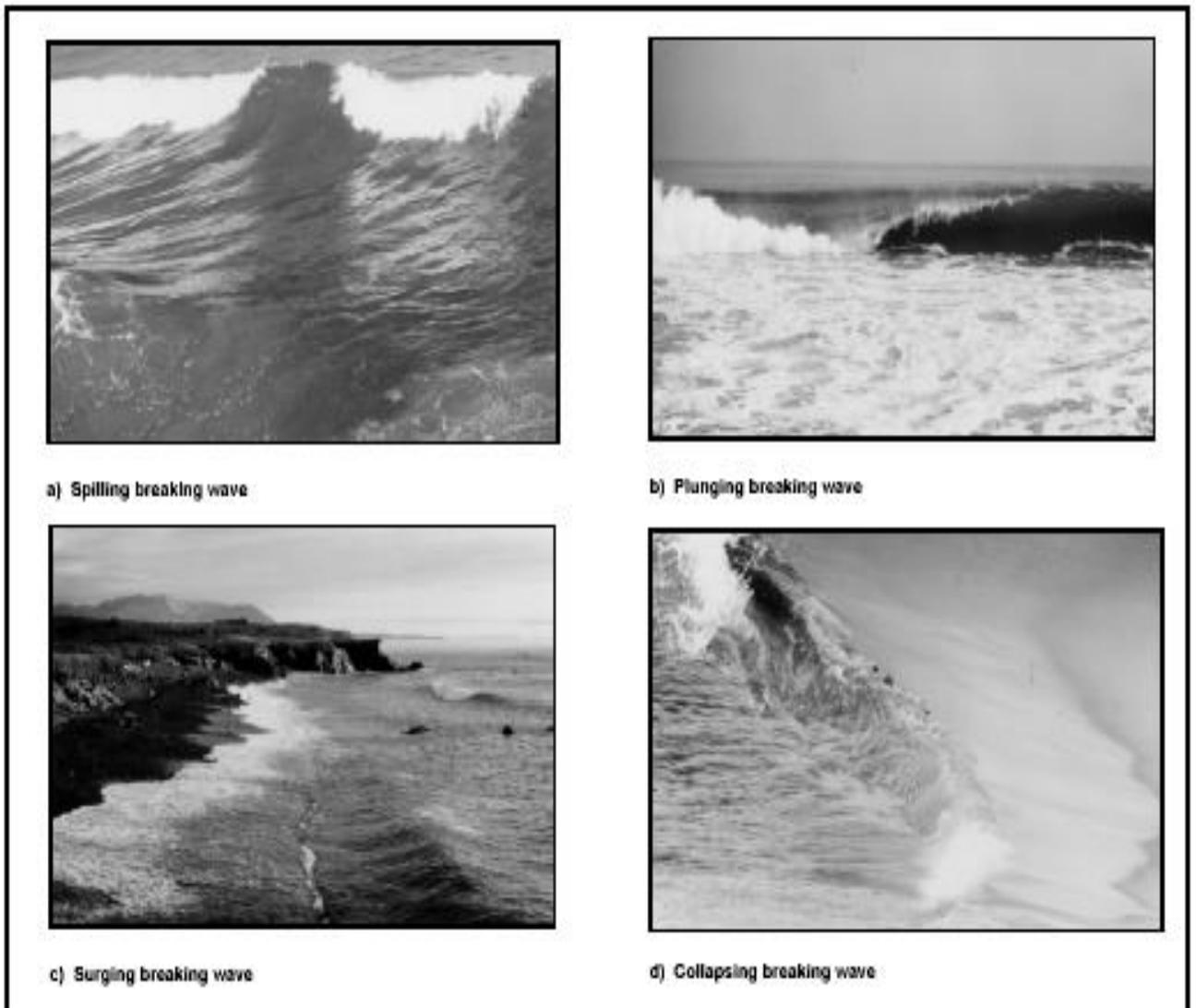


Figura 50. Tipos de rotura.

NÚMERO DE IRIBARREN. Es una medida de cómo interactúan el oleaje y un talud o estructura.

También es utilizado para categorizar la forma en que las ondas rompen por fondo.

$$I_r = \frac{\tan \beta}{\sqrt{\frac{H_0}{L_0}}} \quad (3.52)$$

Donde:

L_0 : es la longitud de onda en aguas profundas $\left(\frac{gT^2}{2\pi}\right)$

g: aceleración debida a la gravedad.

T: periodo de la onda.

β : Ángulo de inclinación.

H_0 : Es la altura de la ola en aguas profundas.

Dependiendo el número de Iribarren, se puede conocer el tipo de rotura como se muestra a continuación en la Tabla 6.

Tabla 6. Valores del número de Iribarren para los diferentes tipos de rotura según Battjes (1974)

Tipo de rotura	Número de Iribarren
Descrestamiento (spilling)	$I_r < 1.0$
Voluta (plunging)	$1.0 < I_r < 2.6$
Colapso (collapsing)	$2.6 < I_r < 3.1$
Oscilación (surfing)	$3.1 < I_r < 4.0$
No hay rotura	$4.0 < I_r$

3.6 RUGOSIDAD DEL LECHO MARINO.

3.6.1 ¿CÓMO LOS ARRECIFES PROTEGEN LA COSTA?

Las pérdidas económicas producto de inundaciones y ciclones tropicales está incrementando alrededor del mundo (UNISDR, 2011)²⁵. Debido a ello las inversiones para mitigar el peligro costero y comprender la adaptación climática, se están haciendo para estructuras de defensa artificial tal como diques (Ferrario et al., 2014)²⁵. Sin embargo, hay un cuerpo de evidencia creciente que sugiere que las soluciones basadas en la naturaleza puede ser eficaces para la reducción del riesgo (Barbier et al. 2008; Temmerman et al., 2013)²⁵, pero, la evidencia esta menos desarrollada para los arrecifes de coral (Ferrario et al., 2014)²⁵.

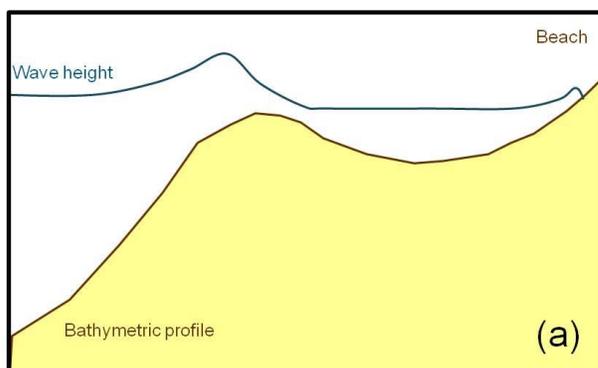
²⁵Citado en (Mariño Tapia y Acevedo Martínez s.f.)

En muchas costas tropicales, los arrecifes de coral brindan el importante servicio ambiental de protección costera debido a su capacidad de atenuación de las olas. (Young et al., 1989; Hardy et al., 1996; Massel and Gourlay, 2000; Lowe et al., 2005; Sheremet et al., 2011) ²⁵. Utilizando la información de 27 publicaciones que cubrieron los arrecifes de los océanos Atlántico, Pacífico e Índico Ferrario et al. (2014) ²⁵, se encontró una reducción en la energía de las olas > 80% en la mayoría de los casos. Sin embargo para promover la restauración de arrecifes de coral como un medio de defensa natural para la erosión e inundación costera, el reto debe comenzar en comprender cómo los arrecifes protegen la costa.

3.6.2 FORMA DEL PERFIL DE ARRECIFE.

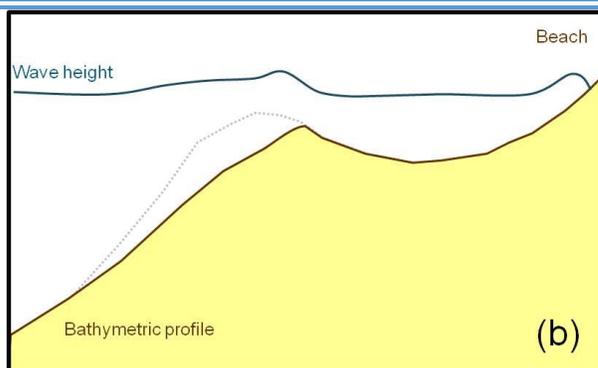
El primer elemento de protección que proporcionan los arrecifes es su forma batimétrica a gran escala (Mariño Tapia y Acevedo Martínez s.f.). La formación de arrecifes de corales se da en ambientes poco profundos debido a que los corales necesitan la luz solar para su desarrollo. Los arrecifes tienen una batimetría muy característica que consiste en una pendiente abrupta, una cresta de arrecife (la sección más superficial del arrecife) y arrecife plano / laguna de batimetría superficial cerca del continente.

La forma batimétrica a gran escala de los arrecifes altera las características de la ola haciéndolas "bajísimas" (crecen en altura), y finalmente se rompen, disipando su energía. Las crestas de arrecifes poco profundos con pisos de arrecife extendidos lograrán la mayor reducción en la energía de las olas, lo que generará una disminución de la altura de las olas en la playa (Figura 51a). Cuanto más profunda (y más angosta) sea la cresta del arrecife, la mayor cantidad de energía llega a la playa (Figura 51b y c). En condiciones de tormenta, esto significa que la playa es más susceptible a la erosión. La disipación de la altura de las olas a través de estos procesos ocurrirá incluso si la superficie del fondo es lisa.



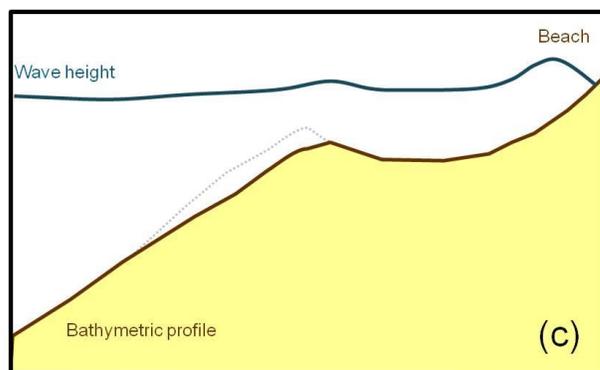
Protección alta de playa

- El perfil de arrecife promueve someramiento
- Las olas disipan su energía considerablemente mediante la rotura.
- La Energía de las olas que llega a la playa se reduce considerablemente.
- Las playas son propensas a ser estables



Protección media playa

- Una cresta del arrecife más profundo genera menos someramiento.
- Disipación rompiendo sólo las olas más grandes.
- La Energía de las olas que llega a la playa se incrementa.
- Las playas son más dinámicas, pero aún protegidas.



Protección esporádica de las playas

- La cresta del arrecife profundo apenas afecta a las ondas
- Rara vez rompen las olas en la cresta del arrecife
- Las Playas son más dinámicas y propensas a la erosión, especialmente durante las tormentas.

Figura 51. Efectos esquemáticos del perfil batimétrico de los arrecifes de coral en la atenuación de la onda en la playa²⁶.

• FORMA EN PLANTA DE ARRECIFES: EFECTOS 2D EN PLAYAS.

Es obvio señalar que las características del arrecife a lo largo de la costa podrían tener una fuerte variabilidad espacial. No es tan obvio entender el grado de protección que proporciona la forma del plano 2D de un arrecife. Algunos tramos de la costa estarán más (o mejor) protegidos que los tramos donde hay una discontinuidad en la cresta del arrecife, o donde su profundidad cambia considerablemente. Además, la distancia entre la cresta del arrecife y la playa es un factor importante. Si la distancia es demasiado grande, habrá suficiente alcance para que las olas locales vuelvan a crecer y generen cierto grado de erosión. De manera similar, si el arrecife está demasiado cerca de la costa no habrá espacio para que la disipación de ola se produzca de manera eficiente, especialmente en condiciones energéticas cuando la energía de infragravedad puede verse exacerbada y producir erosión, inundación y daños a la infraestructura, como se observa en Hernani, Filipinas. Durante el paso del tifón Haiyan (Roeber y Bricker 2015) ²⁵.

La Figura 52 muestra un tramo de costa en el Caribe mexicano, desde Punta Nizuc, Cancún, hasta Puerto Morelos. La batimetría, estimada a través de la clasificación supervisada de imágenes satelitales y mediciones in situ, muestra claramente las posiciones donde existen las crestas del arrecife y las discontinuidades de la barrera del arrecife. Asociado con cada cresta de arrecife hay una característica similar a un tómbolo en la costa, una evidencia de la protección a largo plazo que proporcionan los arrecifes a este sitio. Los tramos de costa donde existen discontinuidades en la cresta del arrecife, son propensos a la erosión (flechas rojas) y playas inestables. (Mariño Tapia y Acevedo Martínez s.f.).

²⁶ (Mariño Tapia y Acevedo Martínez s.f.)

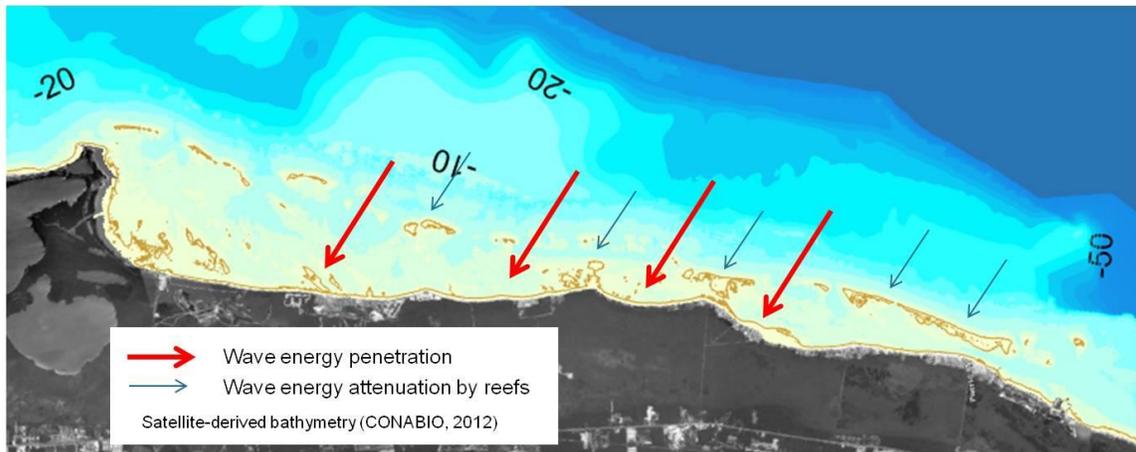


Figura 52. Efectos esquemáticos de la batimetría 2D sobre la atenuación de las olas en la playa. Este es un tramo de costa en Quintana Roo, México. Las flechas representan la dirección principal del enfoque de onda²⁷

3.6.3 RUGOSIDAD DE LOS ARRECIFES PARA MEJORAR LA DISIPACIÓN DE LA ENERGÍA DE LAS OLAS.

La forma del perfil del arrecife (Figura 52) y su distribución de vista en planta son las formas más obvias en que los arrecifes protegen la costa, así como ser obstáculos para la acción de las olas. Desde un punto de vista rudimentario, podría argumentarse que esta capacidad es similar a la proporcionada por una estructura artificial. Sin embargo, hay dos argumentos fuertes en contra de esta afirmación. El primero es que el tamaño de un arrecife de coral es demasiado grande para ser construido artificialmente a costos factibles. El segundo argumento más sólido es que los arrecifes de coral son estructuras vivas, y por lo tanto tienen la capacidad de crecimiento, auto mantenimiento y autorregulación. Además, la alta rugosidad de los arrecifes de coral sanos crea altas tasas de disipación del flujo de energía de las ondas de fricción (Young, 1989; Lowe et al., 2005; Franklin et al., 2013)²⁵. La importancia de la fricción para la disipación de energía parece depender de las condiciones de onda incidente. Bajo olas pequeñas (condiciones normales), la fricción representa el 80% de la disipación de energía, pero bajo grandes olas (tormentas extremas), la rotura domina la disipación del flujo de energía (Lowe et al., 2005; Rogers et al. 2015)²⁵ también encontraron que las tasas de disipación de oleaje de la fricción del fondo son, en promedio, mayores que las tasas de disipación debido a la rotura en Palmyra Atoll en el Pacífico Central. El efecto de la rugosidad en la disipación de energía de las olas es un tema de investigación actual que necesita una mayor corroboración con las mediciones in situ (Rogers et al., 2015)²⁵.

Para lograr una evaluación adecuada de los servicios de protección proporcionados por el arrecife es necesario analizar la cantidad de energía de las olas que deja pasar la barrera del arrecife. El primer paso es obtener una batimetría con la mejor resolución posible. La resolución a escala de centímetro al menos sobre la cresta del arrecife sería necesaria para estimar correctamente la rugosidad del arrecife. Los desarrollos recientes en las estimaciones de rugosidad usan parámetros tales como 4σ , donde σ = desviación estándar de la batimetría en escala cm para aproximar la rugosidad de Nikuradse (Lowe et al., 2005; Rogers et al., 2015)²⁵. Las evaluaciones de la rugosidad del arrecife son necesarias para estimar sus efectos sobre la disipación de las olas, y también como una indicación indirecta de la integridad del arrecife. Se podría utilizar varios métodos para obtener batimetría. LIDAR podría ser la mejor opción para lograr la resolución batimétrica necesaria, pero depende en

gran medida de la capacidad financiera y las condiciones ambientales apropiadas. Si LIDAR no es factible, las buenas opciones para obtener los datos apropiados son: ecosintonización multihaz, clasificación supervisada de imágenes satelitales o sondeo de haz único. Si la resolución espacial de la batimetría no permite la estimación de la rugosidad del arrecife, se deben utilizar métodos alternativos para lograr esto. En la Figura 53. Se presenta un ejemplo de datos lo suficientemente precisos para estimar la rugosidad obtenida con un sistema ecosonda / DGPS.

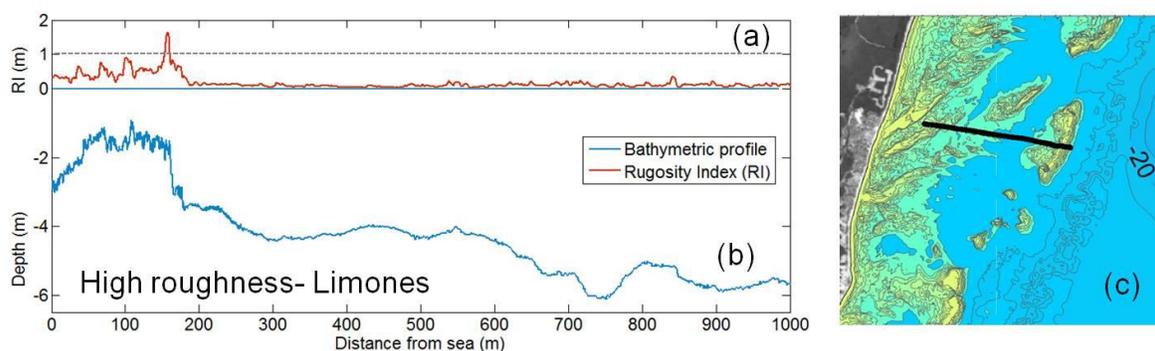


Figura 53. (a) Estimaciones de rugosidad (en m) obtenidas a partir de las mediciones batimétricas de pequeña escala filtradas como 4σ . (b) Batimetría filtrada de los efectos de onda medidos con una ecosonda de haz único y GPS diferencial. (c) Batimetría a mayor escala del transecto presentado en (b), obtenido con clasificación supervisada de datos satelitales (fuente: CONABIO).²⁷

3.7 DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO EXPERIMENTAL.

3.7.1 INSTALACIONES.

3.7.1.1 CANAL DE OLEAJE.

El canal de oleaje tiene una longitud de 37 m, un ancho de 80 cm y una profundidad de 120 cm. Está construido, en uno de sus costados y en el fondo, con lámina de acero inoxidable, mientras que el otro costado está compuesto por paneles de vidrio con un espesor de 20 mm y marcos de acero en los extremos del canal. Lleno a su máxima capacidad, el canal requiere cerca de 24,000 litros de agua y en condiciones normales de operación 15,000 litros. Esta gran cantidad de agua es recirculada y almacenada en una cisterna con lo cual se evita su desperdicio. Para llevar el agua de la cisterna al canal se utilizan tres bombas de dos caballos de fuerza, cada una llena el canal a razón de un centímetro de profundidad por minuto.

El canal cuenta con un sistema de generación de oleaje que es capaz de producir oleaje regular y oleaje irregular con espectros pre-cargados o con el que el usuario defina. El generador es de tipo pistón y consiste en una placa de acero conocida como pala o paleta de generación sostenida por un riel, que permite un movimiento hacia adelante y atrás; este elemento está sostenido por una estructura que se encuentra fija al piso del laboratorio la cual cumple la función de mantener estable el mecanismo de generación de oleaje.



Figura 54 . Canal de oleaje del Instituto de Ingeniería UNAM.

3.7.2 EQUIPO DE MEDICIÓN.

3.7.2.1 SENSORES DE NIVEL.

Los sensores de nivel generan una pequeña corriente y usan el agua como conductor para cerrar un circuito, midiendo así la caída en voltaje causada por la resistencia de la solución. La resistividad cambia de manera proporcional a la posición de la superficie del agua. Se determina una curva de calibración y con esa curva se determina la elevación real de la superficie del agua en cualquier instante.



Figura 55. Datalogger.



Figura 56. Sensores de nivel.

Para las pruebas se instalaron 11 sensores de nivel a lo largo del canal de oleaje, los cuales son conectados al sistema SPARTAN (Fig. 55). Este a su vez conectado al ordenador donde se registran y guardan los datos obtenidos por los sensores.

Los sensores fueron puestos en grupos de dos sensores atrás del dique, tres sensores antes del dique y un sensor cercano a la pala de acuerdo a la fig. 57. El cálculo de la distancia entre el grupo de tres sensores (antes del dique) se describirá en la Tabla 8.

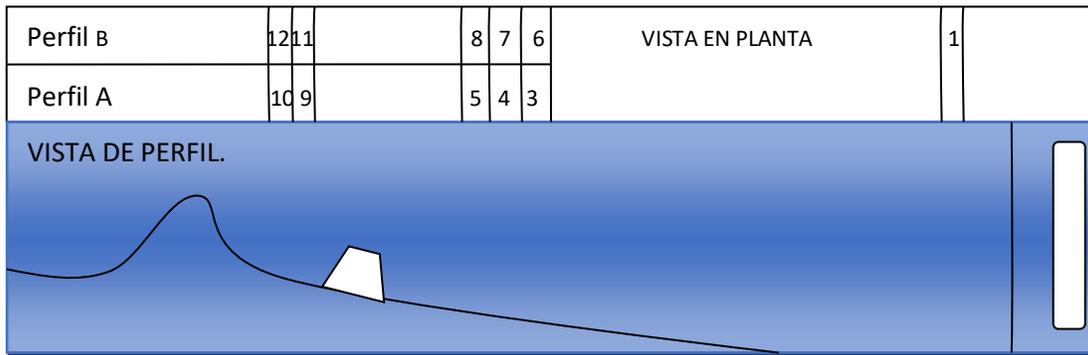


Figura 57. Colocación de sensores de nivel en el canal.

Tabla 7. Distancia de sensores antes de los diques.

Periodo T (s)	Distancia (cm)	
	Entre sensor 3 y 4.	Entre sensor 3 y 5.
0.894 y 1.118	15	47

La distancia entre sensores 3 y 4 Perfil A es la misma que sensores 6 y 7 del perfil B. Lo mismo para la distancia entre sensores 3 y 5 perfil A y 6 y 8 perfil B.

Primero se necesita conocer la longitud de onda, para lo cual es necesario usar la ecuación de dispersión.

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \quad (3.53)$$

La distancia entre sensores de nivel en cada prueba debe estar dentro del intervalo $\pi 10 \leq k\Delta x \leq 9\pi$
 Donde: $k = \frac{2\pi}{L}$. Las distancias obtenidas para cada periodo se muestran en la Tabla 7.

Tabla 8. Cálculo de las distancias con respecto al periodo.

T	L (m)	K (1/m)	Δ MIN	Δ MAX
0.89	1.25	5.04	0.06	0.56
1.12	1.95	3.22	0.10	0.88
0.89	1.25	5.04	0.06	0.56
1.12	1.95	3.22	0.10	0.88
1.12	1.95	3.22	0.10	0.88

3.7.3 MODELO.

3.7.3.1 CORALES EN 3D

Se imprimieron réplicas de coral con tres formas diferentes. La impresión fue realizada dentro del laboratorio de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería de la UNAM. Para la impresión se utilizó impresora 3D de la marca UlltiMaker y plástico para impresora 3d tipo PLA fig. 58.

PLA. Este termoplástico, también se conoce como “ácido láctico” o “poliácido láctico” con nombre químico (ácido 2-hidroxiopropanoico). La materia prima destacable del PLA es el maíz (material ecológico).

La pieza de la fig. 58 tiene las siguientes características: La Cresta de coral mide 6 cm de alto mientras que la base del coral tiene 3 cm de altura.

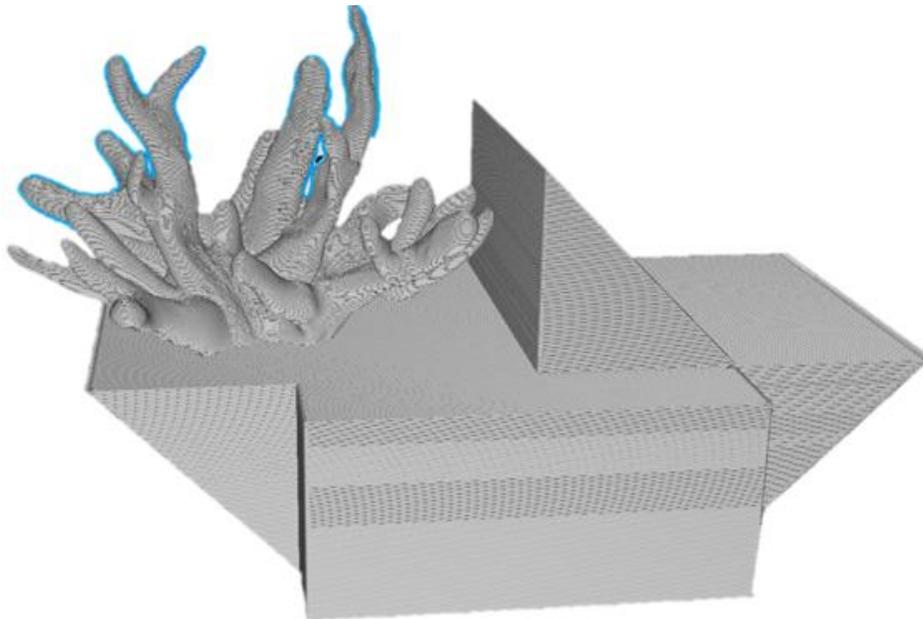


Figura 58. Réplica de coral tipo 1.

La pieza de la fig. 59 tiene una forma diferente pero con las misma alturas para la cresta y base que la fig. 58.

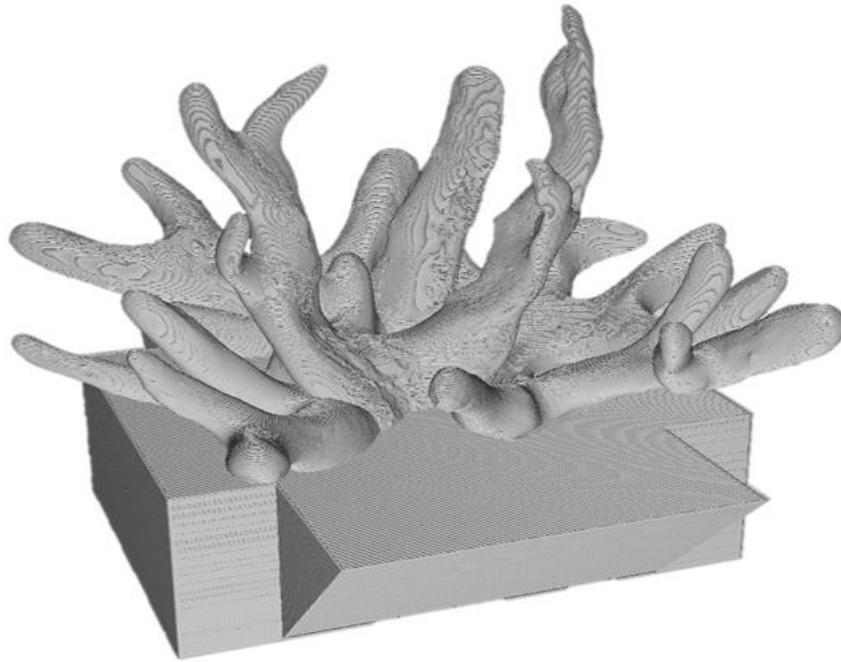


Figura 59. Réplica de coral tipo 2.

La pieza de la fig. 60 tiene aparentemente la misma forma que la fig. 59. La posición de la cresta cambia al igual que las medidas. Para la cresta de esta pieza se tiene una altura de 4 cm y la altura de la base es de 3 cm misma altura que las piezas anteriores.

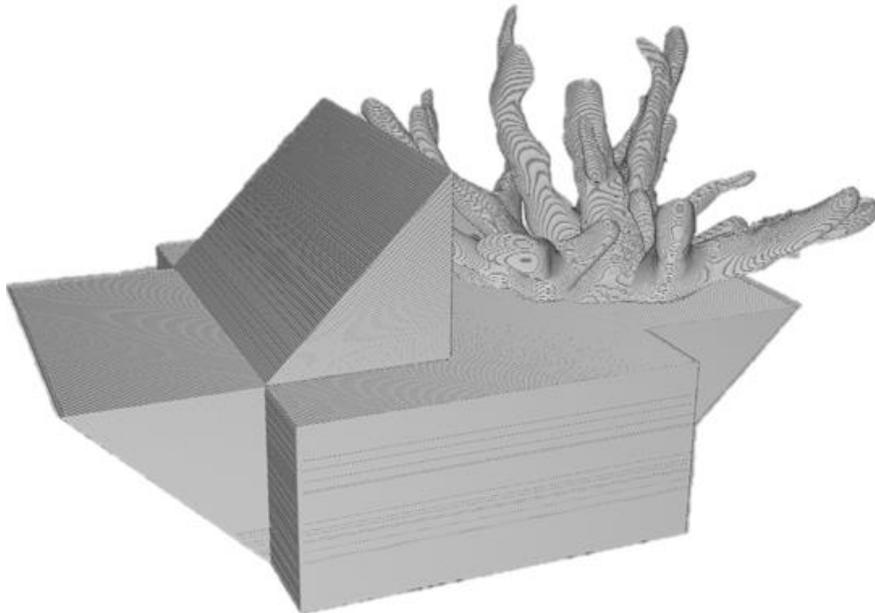
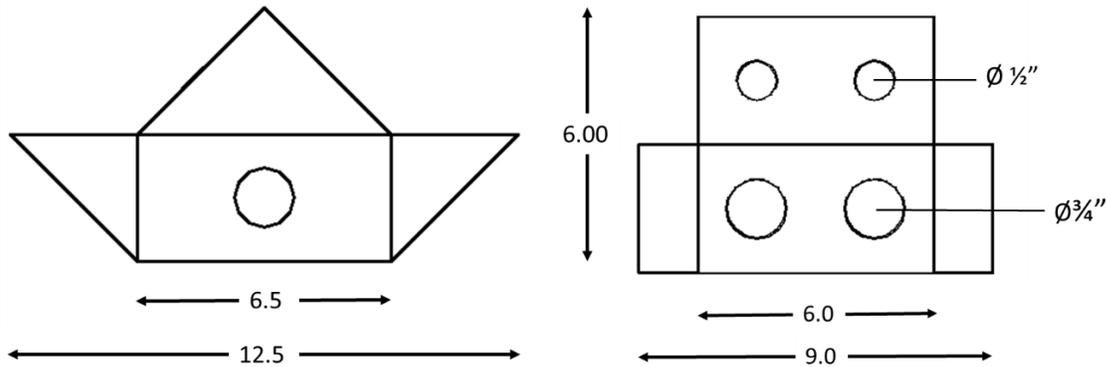


Figura 60. Réplica de coral tipo 3.

3.7.3.2 PIEZAS DE CONCRETO.

Las dimensiones de la pieza son 9.0 cm de largo, 6.5 cm de ancho en la base menor, 12.5 cm de ancho en total; 6.00 cm de alto, dividido en 3 cm la base rectangular y 3 cm de cresta, los orificios inferiores y superiores tienen un diámetro de $\frac{3}{4}$ y $\frac{1}{2}$ de pulgada, respectivamente.



Fabricación.

Las piezas fueron fabricadas dentro del laboratorio de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería de la UNAM. Se fabricó una cimbra la cual pudiera ser utilizada repetidas veces sin deformarse, por esta razón se optó por emplear la madera.

Cimbra

Se crearon bloques de madera en los cuales en la parte interna tenía el corte con la forma de la pieza, los ángulos y los orificios, el molde se hizo en dos secciones el inferior que sostenía la base de la pieza y el superior que mantenía la cresta de la pieza. Los bloques se crearon con cortes de la madera en diferentes secciones, se construyeron 15 cimbras para la construcción de las piezas.

Características del concreto.

Se tomó como base la dosificación propuesta para concretos de resistencia de 300 kg/cm^2 , con la siguiente relación de materiales:

Tabla 9. Características del concreto.

Material	Volumen para 15 pzas
Cemento	1.266 kg
Agua	0.570 kg
Arena	2.436 kg
Fibra	0.020 kg
Limadura de Hierro	2.400 kg

Las piezas se colaban en las 15 cimbras, se dejaban fraguar por una semana, se retiraba la cimbra y se colocaban en cubetas de plástico con agua durante otra semana para que continuaran con el fraguado, este ciclo se repitió hasta terminar de construir las piezas necesarias para la construcción del rompeolas modular.

3.7.4 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.

Los modelos físicos pueden definirse como la máxima representación de un problema dado, utilizan tecnología de instrumentos de medición y generadores de fenómenos a escala. Con las mediciones obtenidas se logra alcanzar resultados muy similares a lo que pasaría con el prototipo real, además de poder comprender tanto la funcionalidad, estabilidad y economía de los fenómenos (Dalrymple, 1984).

3.7.4.1 VARIACIÓN DEL NIVEL DE AGUA EN REPOSO.

Las variaciones del nivel medio del mar pueden provocar un cambio importante en el funcionamiento de la estructura y del perfil de playa, esto como consecuencia del cambio de la sumergencia relativa; así, por ejemplo, cuando la sumergencia aumenta, la protección que ofrece un dique sumergido disminuye. El resultado de este fenómeno para el comportamiento de la estructura, es que el dique sumergido disipa menos energía, ya que un menor número de olas rompen y la capacidad de movimiento de los áridos es mayor.

3.7.4.2 PERIODO

La longitud de ola es función del periodo de la onda y de la profundidad local. Bajo la presencia de periodos largos, la longitud del oleaje se modifica más rápidamente que cuando se tienen periodos de onda cortos. Si el peralte de la ola, H/L , supera un umbral determinado se presentará una disipación asociada a los efectos de turbulencia que se generan durante el proceso de rotura. Una de las funciones que se busca cumplir con los diques arrecifes es la de abrigo a la playa, la cual se logra a través de la inducción de la rotura de los oleajes más energéticos sobre los diques.

3.7.4.3 CONDICION DE OLEAJE

Previo a la realización de modelos físicos en el laboratorio se definen los parámetros del oleaje que definen el tipo de oleaje que se desea analizar en el prototipo a escala.

Considerando lo mencionado en la sección anterior las pruebas se realizaron con ciertas variaciones en el nivel del agua (h), en la altura (H_s) y periodo (T_s) de ola. Además de la profundidad a la que se colocó la estructura, ver tabla 11.

Tabla 10. Características del oleaje

H_s (cm)	T_s (s)	h (cm)	Régimen de oleaje	Profundidad (cm)
5	0.894	45	RM	30 y 15
5	1.118	45		
10	0.894	45	TBI	
10	1.118	45		
10	1.118	48	TAI	

Donde:

RM: Régimen medio.

TBI: Tormenta de baja intensidad.

TAI: Tormenta de alta intensidad.

3.7.4.4 TIPOLOGÍA DE LA ESTRUCTURA.

El primer paso para llevar a cabo el diseño de una estructura marítima es la propuesta de una geometría, considerando que puede cumplir con un tipo de trabajo hidrodinámico y mecánico deseado. Si se tiene la posibilidad de realizar un prototipo a escala de la propuesta y realizar pruebas de laboratorio sería lo ideal para entender mejor el comportamiento que pudiera tener al estar sometido ante cierto tipo de fenómenos extremos.

La geometría propuesta para el dique fue la siguiente:

Tipo 1. Se colocó una fila de estructura de concreto y 2 filas de corales corte en perfil.

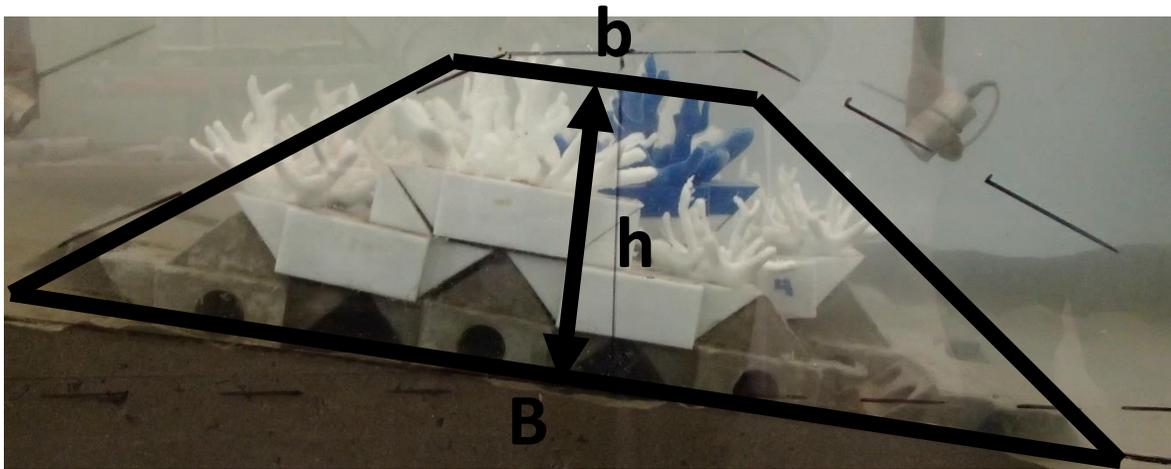


Figura 61. Dimensiones del dique tipo 1.

Donde:

$B = 48 \text{ cm}$

$b = 15 \text{ cm}$

$h = 12.5 \text{ cm}$

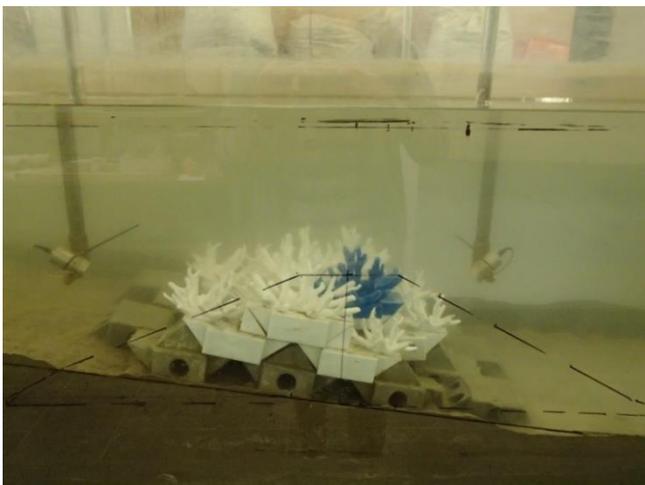


Figura 62 Estructura tipo 1. Vista perfil



Figura 63 Estructura tipo 1. Vista en planta.

Tipo 2. Se colocó una cama de cubos de 2 cm 30 cubo de largo, 4 filas de estructuras de concreto y 2 filas de corales. Corte de perfil

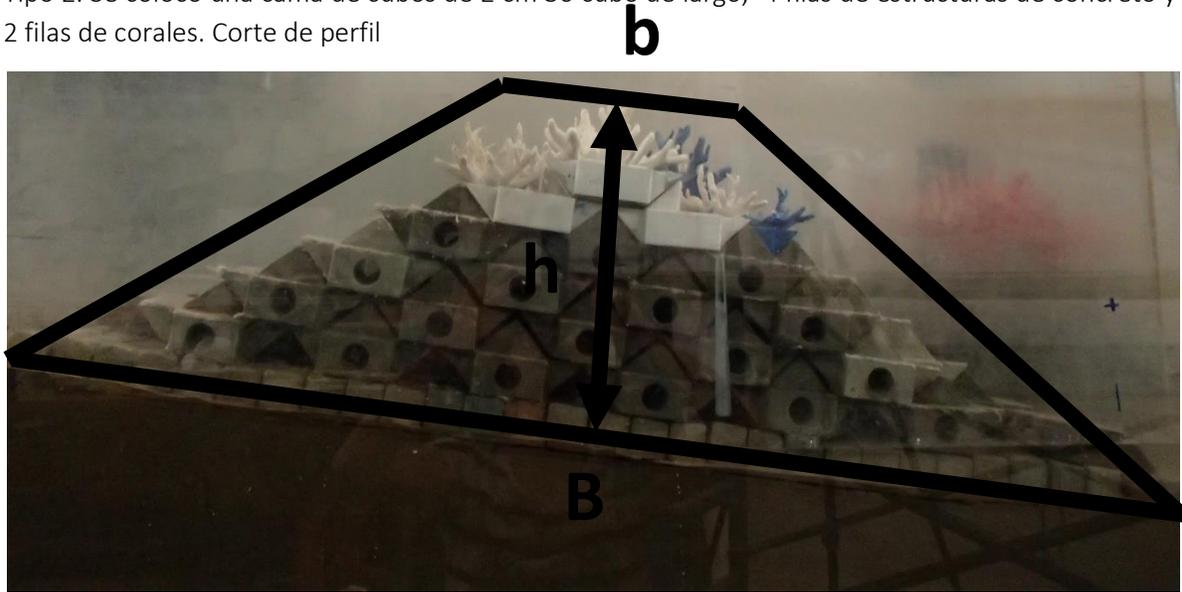


Figura 64. Dimensiones del dique tipo 2.

Donde:

$B = 60 \text{ cm}$

$b = 25 \text{ cm}$

$h = 30 \text{ cm}$



Figura 65 Geometría tipo 2 vista perfil.

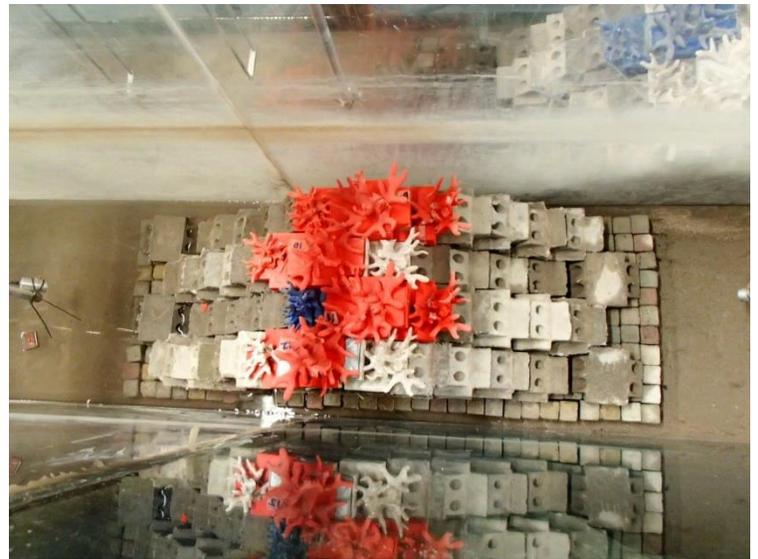


Figura 66. Geometría tipo 2 vista planta.

3.7.4.5 DESCRIPCIÓN DE LOS EXPERIMENTOS.

Se realizaron 13 pruebas cada una con las siguientes características (Tabla 10).

Tabla 11. Descripción de las pruebas.

Prueba.	Hs(cm)	Ts(s)	h (cm) Nivel del agua.	Profundidad a la que se colocó (P)	Tipo de geometría
1	5	0.894	45	30	1
2	5	1.118			
3	10	0.894			
4	10	1.118			
5	10	1.118			
6	5	0.894	48	33	
7	5	1.118	45	15	
8	10	0.894			
9	10	1.118			
10	10	1.118	48	18	
11	5	0.894	45	30	2
12	10	1.118			
13	10	1.118			

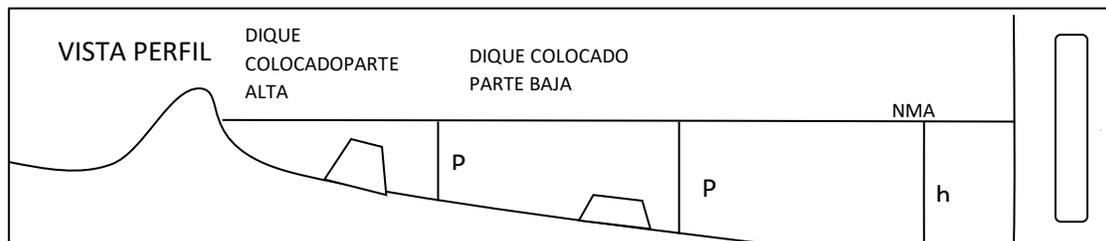


Figura 67. Posición de la estructura.

Para realizar las pruebas se construyeron dos tipos de perfil de playa dentro del canal de olas. La forma de los perfiles fue similar pero las pendientes fueron distintas fig.68, fig.69 y fig.70.



Figura 68. Perfil de playa Tipo A. y Tipo B. Vista de perfil.



Figura 69. Perfil de playa tipo B

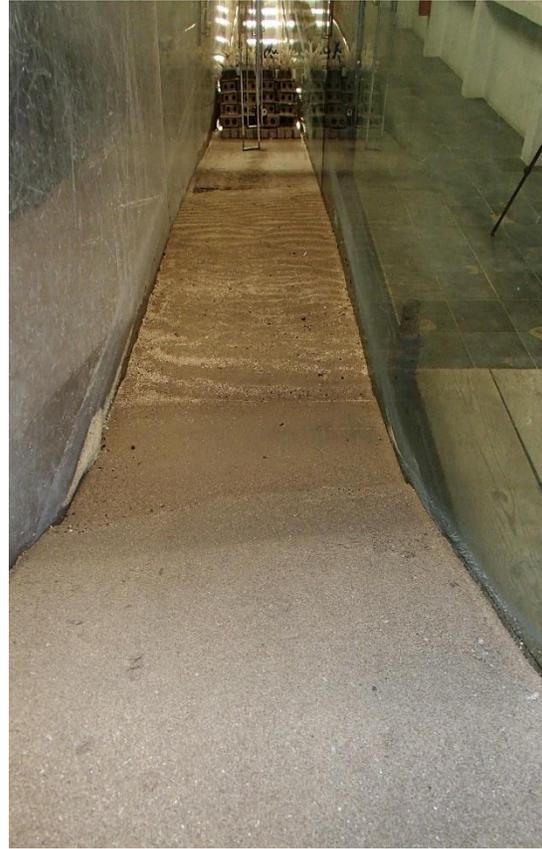


Figura 70. Perfil de playa tipo A

Una vez contruidos los perfiles se acomodaron las piezas de concreto y de coral de acuerdo al tipo correspondiente además de colocarlas en la parte adecuada del perfil de playa para que tuvieran la profundidad requerida.

Los diques de las pruebas 1 a 5 y 11 a 13 se colocaron en la parte baja del perfil cumpliendo con las características de la tabla 10 para cada prueba (Fig.67).



Figura 71. Posición de los diques en la parte baja del perfil de arena.

Por otra parte, los diques de las pruebas del 6 a 10 se colocaron en la parte alta del perfil cercano a la duna de la playa. Esto con la finalidad de colocarlos a la profundidad requerida de acuerdo con la Tabla 10.

El siguiente paso fue colocar sensores de nivel descritos en la sección 3.7.2.1 respetando las distancias calculadas para su posición. Una vez colocados todos los sensores se procede a la calibración de los mismos, esto se realiza desde el programa SPARTAN y sus monitores.

El sensor 1 se utilizó como testigo para conocer si las olas enviadas eran las correctas. Los sensores 3, 4, y 5 del perfil A, fueron colocados antes del dique igual que los sensores 6, 7 y 8 perfil B todos tiene la intención de medir la energía incidente y reflejada por la estructura. Los sensores 9 y 10 del perfil A, fueron colocados detrás del dique al igual que los sensores 11 y 12 del perfil B. para conocer la energía transmitida por el dique.

GENERACIÓN DE OLEAJE EN EL LABORATORIO.

La generación de olas se produce gracias al sistema de generación antes mencionado y con ayuda del programa AwaSys6 (Fig.72), es posible especificar las características hidrodinámicas deseadas (periodo, altura, tipo de oleaje etc.), además de calibrar el sistema dependiendo del nivel de agua utilizado al momento de cada prueba. También este software permite especificar la generación de diversos estados del mar, en el caso de este trabajo se utilizó oleaje irregular de espectro Jonswap. Las pruebas duraron un tiempo de 45 minutos de oleaje y registro, dentro de este tiempo se tomaron videos y fotografías con cámara digital para analizar mejor los resultados.

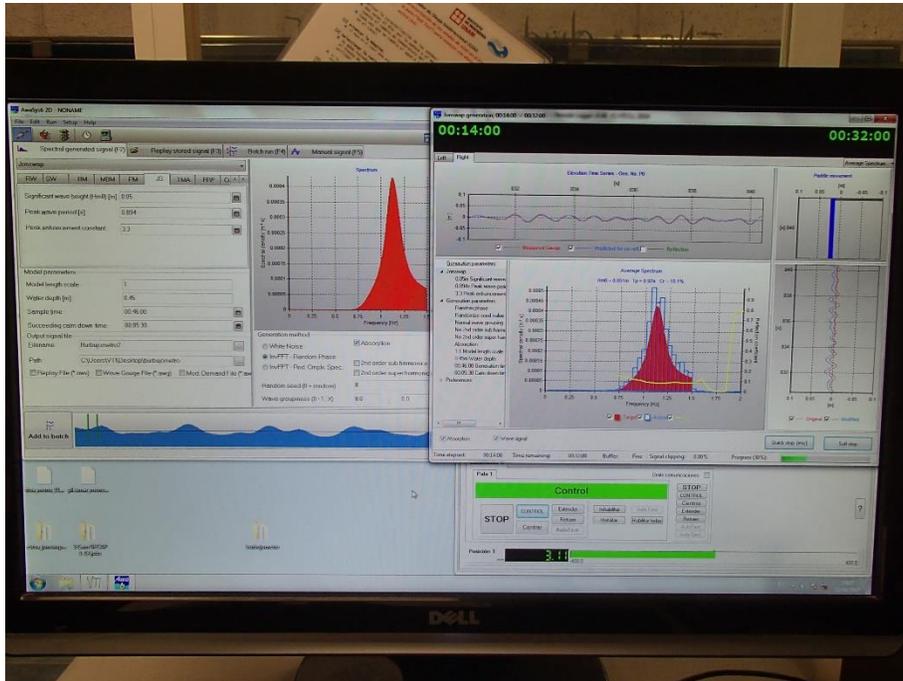


Figura 72. Interfaz del programa AwaSys6.

ANÁLISIS DE LOS SENSORES DE NIVEL.

El sistema de medición de alta precisión de nombre SPARTAN de la firma imc, se utilizó para llevar a cabo los registros de los sensores de nivel y los de presión. La adquisición de los datos recabados por el SPARTAN se realizó a través del software de operación y configuración imc STUDIO, el cual permite capturar, procesar y visualizar las señales analógicas y digitales.

El procesamiento de los datos obtenidos, fue realizado con la ayuda del software imc FAMOS (Fast Analysis and Monitoring of Signals), el cual es un programa de la misma firma para el análisis y evaluación de los resultados de las mediciones. Con dicho programa fue posible generar, a partir del sistema de ondas, los datos en hojas de cálculo para su mejor manejo.

Los resultados generados por el imc FAMOS, en formato txt, fueron corregidos siguiendo la metodología para el análisis temporal a través de un programa hecho en Matlab por el grupo de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería de la UNAM. La corrección del nivel medio utilizado fue la media aritmética. Con este programa se calcularon las alturas cuadráticas medias (Hrms) para todos los sensores.

El segundo programa REFLAB que requiere una configuración previa para la ubicación de los sensores de nivel, como se mencionó en la parte de los sensores de nivel, el grupo de 3 sensores que se colocan antes del dique deben tener una separación entre ellos conocida y calculada como en se explica en la sección 3.7.2.1.

Los sensores que se analizaron fueron los 3 sensores colocados antes de la estructuras 3, 4, 5, para dique del perfil A y 6, 7, 8 para el dique del perfil B con ello se puede estimar la energía que el dique refleja (R), además de obtener la altura cuadrática media de la onda incidente (Hrmsi) que registra el grupo de tres sensores.

Teniendo las alturas registradas para cada sensor, y utilizando la altura Hrms de los sensores 9 y 10 o también conocida como como altura de ola transmitida (HT) por ser los sensores que miden en la parte de atrás del dique, y teniendo el dato de la altura cuadrática media incidente (Hrmsi) que arrojó el programa REFLAB para los sensores de la parte de adelante del dique, se obtuvo la energía transmitida con la ecuación 3.50.

Para conocer la energía disipada para cada prueba se realizó el cálculo con la ecuación 3.50.

CALCULO DE LA RUGOSIDAD.

Se realizó un corte del perfil donde se localizan los tres tipos de piezas diferentes, con la finalidad de calcular la altura (fig. 73) de distintos puntos hasta donde llegaban los picos de las piezas de coral por la distancia respecto a la base de la estructura vista en corte, esto, para poder calcular la rugosidad por pieza de coral. Con estas alturas y conocida la profundidad donde se colocó la estructura se pueden calcular las profundidades a la que está cada uno de esos puntos, semejando así la batimetría que se calcula en el mar y con ello poder calcular la rugosidad como se mencionó en la sección 3.6 que es 4σ , donde σ = desviación estándar de la batimetría.

Considerando que la forma del dique es la misma, la colocación de las piezas y la forma de los tres tipos de piezas se repiten respectivamente. Sólo cambiaría la posición donde fue colocado el dique (fig.67) (Parte superior pegado a la duna o parte inferior del perfil de playa), y la profundidad del agua que metimos (45 cm o 48 cm), la rugosidad en teoría sería la misma para todas las piezas sin importar la profundidad a la que se colocan, más bien importaría la forma de las piezas (batimetría en el mar). Es por ello que sólo se tomó una medida para todos los perfiles de las pruebas.

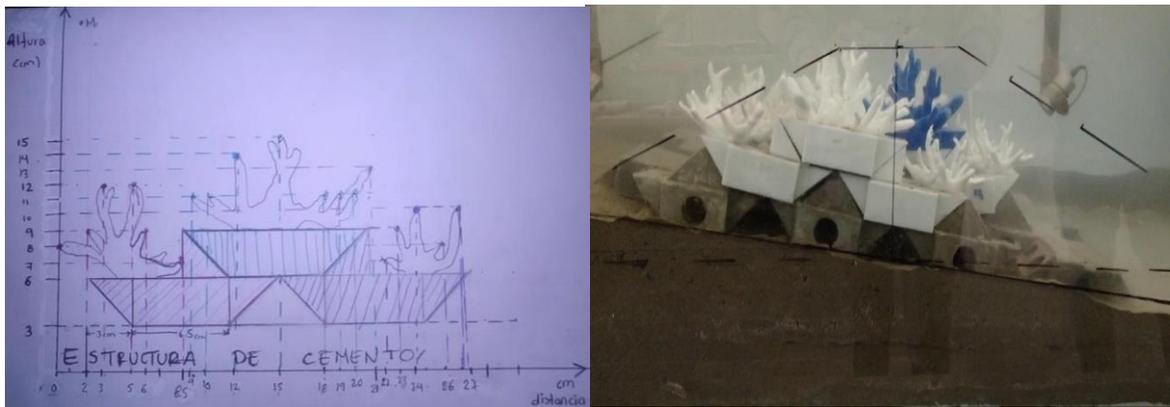


Figura 73. En la izquierda se muestra la imagen de las alturas del coral en distintos puntos, que sirve para el cálculo de la rugosidad. En la derecha está el corte real de donde se tomaron las alturas de la imagen izquierda.

3.7.4.6 OBSERVACIONES.

- Cuando el dique fue colocado en la parte alta del perfil de arena la calibración de los sensores de la parte de atrás del dique fue un tanto complicada ya que la profundidad era mínima y no lograba cubrir lo suficiente el sensor para tener una calibración igual al resto de los sensores. Por ello se redujo la escala de calibración para ajustarla al tirante de agua con el que se contaba y lograr la calibración correcta.
- A pesar de calcular el parámetro estadístico (Hrms) de todos los sensores sólo se empleó el resultado de los sensores 1 para calcular el coeficiente de reflexión. Y el resultado de los sensores 9 y 11 para calcular el coeficiente de transmisión con reflexión y sin reflexión.
- La estructura tipo 1 fue hecha con piezas embonadas de modo que se iba colocando pieza por pieza hasta formar el dique completo.
- En el caso de la estructura tipo 2 se colocó una cama de 330 cubos de 2 cm por lado. De modo que tuviera una longitud de 60 cm equivalente a 30 cubos por 22 cm de ancho equivalente a 11 cubos. Los cubos fueron colocados uno por uno para tener una superficie plana y poder colocar encima las piezas de cemento una por una para que embonaran correctamente. Posteriormente se colocaron las piezas de coral una por una para que embonaran bien.
- Para el cálculo de la rugosidad sólo se tomaron medidas para una pieza de coral por cada tipo (sec. 3.7.3.). Considerando que la forma de las piezas de coral por tipo es la misma entonces la impresión por pieza del mismo tipo se repite, siendo válido el punto mencionado anteriormente, la dispersión en los datos de los puntos calculados para la batimetría estimada en la pieza siempre sería la misma debido a que esta es función de la forma del fondo marino. Aunque la profundidad o el lugar cambien, la dispersión (σ = desviación estándar de la batimetría) de los puntos tomados siempre serían la misma porque la estructura siempre es igual. Es por eso que la rugosidad en teoría es la misma para todas las piezas de un mismo tipo.

IV. RESULTADOS.

4.1 DECAIMIENTO DE OLEAJE.

- PRUEBAS 1-5. Estructuras tipo 1 (Fig.61) y colocadas en la parte baja del perfil de arena (Fig.67)

Figura 74. Coeficientes de energía.

Perfil A								
Prueba	1							
	sensores	Hrms1	Hrms2	Hrms_i	T	Hrms2/Hrms1	R %	D
Sensores colocados adelante del dique	1	3.7466		2.80411	1.11	0.83	64.92	#¡NUM!
	3							
	4							
	5							
sensor colocado atrás del dique	9		3.1010					
Prueba	2							
	sensores	Hrms1	Hrms2	Hrms_i	T	Hrms2/Hrms1	R %	D
Sensores colocados adelante del dique	1	3.8640		2.12993	1.38	0.76	75.81	#¡NUM!
	3							
	4							
	5							
sensor colocado atrás del dique	9		2.9326					
Prueba	3							
	sensores	Hrms1	Hrms2	Hrms_i	T	Hrms2/Hrms1	R %	D
Sensores colocados adelante del dique	1	4.8936		2.39986	1.75	0.86	71.68	#¡NUM!
	3							
	4							
	5							
sensor colocado atrás del dique	9		4.1917					
Prueba	4							
	sensores	Hrms1	Hrms2	Hrms_i	T	Hrms2/Hrms1	R %	D
Sensores colocados adelante del dique	1	6.9154		3.90925	1.21	0.68	75.40	#¡NUM!
	3							
	4							
	5							
sensor colocado atrás del dique	9		4.7184					
Prueba	5							
	sensores	Hrms1	Hrms2	Hrms_i	T	Hrms2/Hrms1	R %	D
Sensores colocados adelante del dique	1	5.3889		2.72911	2.36	1.19	78.83	#¡NUM!
	3							
	4							
	5							
sensor colocado atrás del dique	9		6.4381					

Perfil B								
Prueba	1							
	sensores	Hrms1	Hrms2	Hrms_i	T	Hrms2/Hrms1	R %	D
Sensores colocados adelante del dique	1	3.7466		3.59058	1.40	1.34	77.24	#jNUM!
	6							
	7							
	8							
sensor colocado atrás del dique	11		5.0260					
Prueba	2							
	sensores	Hrms1	Hrms2	Hrms_i	T	Hrms2/Hrms1	R %	D
Sensores colocados adelante del dique	1	3.8640		2.59541	1.55	1.04	77.48	#jNUM!
	6							
	7							
	8							
sensor colocado atrás del dique	11		4.0204					
Prueba	3							
	sensores	Hrms1	Hrms2	Hrms_i	T	Hrms2/Hrms1	R %	D
Sensores colocados adelante del dique	1	4.8936		2.47639	1.22	0.62	71.77	#jNUM!
	6							
	7							
	8							
sensor colocado atrás del dique	11		3.0285					
Prueba	4							
	sensores	Hrms1	Hrms2	Hrms_i	T	Hrms2/Hrms1	R %	D
Sensores colocados adelante del dique	1	6.9154		5.0966	1.28	0.94	75.87	#jNUM!
	6							
	7							
	8							
sensor colocado atrás del dique	11		6.5288					
Prueba	5							
	sensores	Hrms1	Hrms2	Hrms_i	T	Hrms2/Hrms1	R %	D
Sensores colocados adelante del dique	1	5.3889		2.74628	1.40	0.71	77.60	#jNUM!
	6							
	7							
	8							
sensor colocado atrás del dique	11		3.8515					

Tabla 12. Coeficientes de energía en diferentes condiciones del oleaje.

Estructuras tipo 1 (Fig.61). Colocadas en la parte baja del perfil (Fig.67)								
Pruebas	Régimen medio (ver Tabla 10)							
	Perfil A				Perfil B			
	Aguas someras			Aguas profundas	Aguas someras			Aguas profundas
	Transmisión	Reflexión	Disipación	Transmisión	Transmisión	Reflexión	Disipación	Transmisión
1	1.11 (olas peraltadas)	64.92 %	Nula (no se puede estimar por la cantidad de olas peraltadas que no rompen)	0.83	1.40	77.24	Nula	1.34
2	1.38	75.81 %	Nula	0.76	1.55	77.48 %	Nula	1.04
Pruebas	Tormenta de baja intensidad (ver Tabla 10)							
	Perfil A				Perfil B			
	Aguas someras			Aguas profundas	Aguas someras			Aguas profundas
	Transmisión	Reflexión	Disipación	Transmisión	Transmisión	Reflexión	Disipación	Transmisión
3	1.75 (olas peraltadas)	71.68 %	Nula	0.86	1.22	71.77 %	Nula	0.62
4	1.21	75.40 %	Nula	0.68	1.28	75.87 %	Nula	0.94
Pruebas	Tormenta de alta intensidad (ver Tabla 10)							
	Perfil A				Perfil B			
	Aguas someras			Aguas profundas	Aguas someras			Aguas profundas
	Transmisión	Reflexión	Disipación	Transmisión	Transmisión	Reflexión	Disipación	Transmisión
5	2.36 (olas peraltadas)	78.83 %	Nula	1.19	1.40	77.60 %	Nula	0.71

El comportamiento de las estructuras refleja lo siguiente:

El coeficiente de transmisión muestra valores altos en la parte de aguas someras lo que indica que la altura del dique es, aparentemente, muy baja comparada con la altura de ola (diferentes situaciones del régimen del oleaje), por lo cual permite el paso de las olas sin causar modificaciones en ella. Dicho esto y junto con el coeficiente de disipación indican que la energía en esa zona no está siendo disipada. Sin embargo, la estructura está trabajando por reflexión de acuerdo con el coeficiente calculado. Para la parte de aguas profundas el coeficiente de transmisión muestra un valor menor lo cual indica que un porcentaje de la energía está siendo disipada.

- PRUEBAS 6-10. Estructura tipo 1 (Fig.61) y colocadas en la parte alta del perfil de arena (Fig.67).

Figura 75. Coeficientes de energía.

Perfil A								
Prueba	6							
	sensores	Hrms1	Hrms2	Hrms_i	T	Hrms2/Hrms1	R %	D
Sensores colocados adelante del dique	1	2.7074		1.70755	0.73	0.46	55.05	0.40
	3							
	4							
	5							
sensor colocado atrás del dique	9		1.2521					
Prueba	7							
	sensores	Hrms1	Hrms2	Hrms_i	T	Hrms2/Hrms1	R %	D
Sensores colocados adelante del dique	1	3.4739		2.16095	5.97	3.72	82.07	#¡NUM!
	3							
	4							
	5							
sensor colocado atrás del dique	9		12.9060					
Prueba	8							
	sensores	Hrms1	Hrms2	Hrms_i	T	Hrms2/Hrms1	R %	D
Sensores colocados adelante del dique	1	5.2504		2.53674	0.59	0.29	69.76	0.40
	3							
	4							
	5							
sensor colocado atrás del dique	9		1.5034					
Prueba	9							
	sensores	Hrms1	Hrms2	Hrms_i	T	Hrms2/Hrms1	R %	D
Sensores colocados adelante del dique	1	6.7488		3.68043	5.71	3.12	79.78	#¡NUM!
	3							
	4							
	5							
sensor colocado atrás del dique	9		21.0303					
Prueba	10							
	sensores	Hrms1	Hrms2	Hrms_i	T	Hrms2/Hrms1	R %	D
Sensores colocados adelante del dique	1	5.1475		3.83274	0.54	0.41	81.22	0.21
	3							
	4							
	5							
sensor colocado atrás del dique	9		2.0853					

Perfil B								
Prueba	6							
	sensores	Hrms1	Hrms2	Hrms_i	T	Hrms2/Hrms1	R %	D
Sensores colocados adelante del dique	1	2.7074		2.06091	0.75	0.57	64.03	0.18
	6							
	7							
	8							
sensor colocado atrás del dique	11		1.5374					
Prueba	7							
	sensores	Hrms1	Hrms2	Hrms_i	T	Hrms2/Hrms1	R %	D
Sensores colocados adelante del dique	1	3.4739		1.80273	4.07	2.11	85.41	#¡NUM!
	6							
	7							
	8							
sensor colocado atrás del dique	11		7.3443					
Prueba	8							
	sensores	Hrms1	Hrms2	Hrms_i	T	Hrms2/Hrms1	R %	D
Sensores colocados adelante del dique	1	5.2504		3.28323	0.65	0.41	70.24	0.29
	6							
	7							
	8							
sensor colocado atrás del dique	11		2.1295					
Prueba	9							
	sensores	Hrms1	Hrms2	Hrms_i	T	Hrms2/Hrms1	R %	D
Sensores colocados adelante del dique	1	6.7488		3.80508	3.47	1.96	77.17	#¡NUM!
	6							
	7							
	8							
sensor colocado atrás del dique	11		13.2065					
Prueba	10							
	sensores	Hrms1	Hrms2	Hrms_i	T	Hrms2/Hrms1	R %	D
Sensores colocados adelante del dique	1	5.1475		3.15445	0.85	0.52	78.45	#¡NUM!
	6							
	7							
	8							
sensor colocado atrás del dique	11		2.6749					

Tabla 13. Coeficientes de energía en diferentes condiciones del oleaje.

Estructuras tipo 1 (Fig.61). Colocadas en la parte alta del perfil (Fig.67)								
Pruebas	Régimen medio (ver Tabla 10)							
	Perfil A				Perfil B			
	Aguas someras			Aguas profundas	Aguas someras			Aguas profundas
	Transmisión	Reflexión	Disipación	Transmisión	Transmisión	Reflexión	Disipación	Transmisión
6	0.73	55.05 %	0.40	0.46	0.75	64.03	0.18	0.57
7	5.97 (olas peraltadas)	82.07%	Nula (no se puede estimar por la cantidad de olas peraltadas que no rompen)	3.72	4.07	85.41 %	Nula	2.11
Pruebas	Tormenta de baja intensidad (ver Tabla 10)							
	Perfil A				Perfil B			
	Aguas someras			Aguas profundas	Aguas someras			Aguas profundas
	Transmisión	Reflexión	Disipación	Transmisión	Transmisión	Reflexión	Disipación	Transmisión
8	0.59	69.76 %	0.40	0.29	0.65	70.24 %	0.29	0.41
9	5.71	79.78	Nula	3.12	3.47	77.17 %	Nula	1.96
Pruebas	Tormenta de alta intensidad (ver Tabla 10)							
	Perfil A				Perfil B			
	Aguas someras			Aguas profundas	Aguas someras			Aguas profundas
	Transmisión	Reflexión	Disipación	Transmisión	Transmisión	Reflexión	Disipación	Transmisión
10	0.54	81.22 %	0.21	0.41	0.85	78.45	Nula	0.52

El comportamiento de las estructuras refleja lo siguiente:

El coeficiente de transmisión muestra valores menores de 1 en la parte de aguas someras lo que indica que la altura de ola (diferentes situaciones del régimen del oleaje) está siendo modificada por el dique, lo cual y junto con el coeficiente de disipación indican que la energía en esa zona está disipada. De acuerdo con el coeficiente de reflexión calculado se muestra que parte de la energía está siendo disipada. Para la parte de aguas profundas el coeficiente de transmisión muestra un valor menor a 1 lo cual indica que un porcentaje de la energía está siendo disipada.

- PRUEBAS 11-13. Estructura tipo 2 (Fig.64) y colocadas en la parte baja del perfil de arena (Fig.67).

Figura 76. Coeficientes de energía

Perfil A								
Prueba	11							
	sensores	Hrms1	Hrms2	Hrms_i	T	Hrms2/Hrms1	R %	D
Sensores colocados adelante del dique	1	3.3178		2.14602	0.29	0.19	52.15	0.80
	3							
	4							
	5							
sensor colocado atrás del dique	9		0.6223					
Prueba	12							
	sensores	Hrms1	Hrms2	Hrms_i	T	Hrms2/Hrms1	R %	D
Sensores colocados adelante del dique	1	5.6532		2.61864	0.38	0.18	76.23	0.52
	3							
	4							
	5							
sensor colocado atrás del dique	9		0.9949					
Prueba	13							
	sensores	Hrms1	Hrms2	Hrms_i	T	Hrms2/Hrms1	R %	D
Sensores colocados adelante del dique	1	7.0340		3.718	0.24	0.12	75.13	0.62
	3							
	4							
	5							
sensor colocado atrás del dique	9		0.8779					

Perfil B								
Prueba	11							
	sensores	Hrms1	Hrms2	Hrms_i	T	Hrms2/Hrms1	R %	D
Sensores colocados adelante del dique	1	3.3178		2.10617	0.43	0.27	74.00	0.52
	6							
	7							
	8							
sensor colocado atrás del dique	11		0.9015					
Prueba	12							
	sensores	Hrms1	Hrms2	Hrms_i	T	Hrms2/Hrms1	R %	D
Sensores colocados adelante del dique	1	5.6532		3.07502	0.29	0.16	81.83	0.49
	6							
	7							
	8							
sensor colocado atrás del dique	11		0.9015					
Prueba	13							
	sensores	Hrms1	Hrms2	Hrms_i	T	Hrms2/Hrms1	R %	D
Sensores colocados adelante del dique	1	7.0340		3.5476	0.39	0.20	81.06	0.44
	6							
	7							
	8							
sensor colocado atrás del dique	11		1.3799					

Tabla 14. Coeficientes de energía en diferentes condiciones del oleaje.

Estructuras tipo 2 (Fig.64). Colocadas en la parte baja del perfil (Fig.67)								
Pruebas	Régimen medio (ver Tabla 10)							
	Perfil A				Perfil B			
	Aguas someras			Aguas profundas	Aguas someras			Aguas profundas
	Transmisión	Reflexión	Disipación	Transmisión	Transmisión	Reflexión	Disipación	Transmisión
11	0.29	52.15 %	0.80	0.19	0.43	74 %	0.52	0.27
Pruebas	Tormenta de baja intensidad (ver Tabla 10)							
	Perfil A				Perfil B			
	Aguas someras			Aguas profundas	Aguas someras			Aguas profundas
	Transmisión	Reflexión	Disipación	Transmisión	Transmisión	Reflexión	Disipación	Transmisión
12	0.38	76.23	0.52	0.18	0.29	81.83 %	0.49	0.16
Pruebas	Tormenta de alta intensidad (ver Tabla 10)							
	Perfil A				Perfil B			
	Aguas someras			Aguas profundas	Aguas someras			Aguas profundas
	Transmisión	Reflexión	Disipación	Transmisión	Transmisión	Reflexión	Disipación	Transmisión
13	0.24	75.13 %	0.62	0.12	0.39	81.06 %	0.44	0.20

El comportamiento de las estructuras refleja lo siguiente:

El coeficiente de transmisión muestra valores menores de 1 en la parte de aguas someras lo que indica que la altura de ola (diferentes situaciones del régimen del oleaje) está siendo modificada, lo cual y junto con el coeficiente de disipación indican que la energía en esa zona está disipada. De acuerdo con el coeficiente de reflexión calculado se muestra que parte de la energía está siendo disipada. Para la parte de aguas profundas el coeficiente de transmisión muestra un valor menor a 1 lo cual indica que un porcentaje de la energía está siendo disipada.

4.2 ESTIMACIÓN DE LA RUGOSIDAD.

Los valores de la rugosidad resultaron similares para cada tipo de pieza y para todas las pruebas debido a las justificaciones que se dan en la sección 3.7.4.5 parte del cálculo de la rugosidad. Y la justificación dada en la sección 3.7.4. A continuación se presentan los resultados de los cálculos de rugosidad.

Figura 77. Valores de rugosidad.

Prueba	1,2,3,4	5	6,7,8,9	10
a(cm)	15	15	15	15
h(cm)	30	33	15	18

σ	Desviación estandar
----------	---------------------

	Altura piezas del dique			Pruebas: 1,2,3,4		Prueba 5		Pruebas 6,7,8,9			Prueba 10			
	distancia	altura	profundidad	σ	Rugosidad (4σ)	profundidad	σ	Rugosidad (4σ)	profundidad	σ	Rugosidad (4σ)	profundidad	σ	Rugosidad (4σ)
corale entre duna y dique	0	8	-22	1.67	6.69	-25	1.67	6.69	-7	1.67	6.69	-10	1.67	6.69
	2	9	-21			-24			-6			-9		
	3	12	-18			-21			-3			-6		
	5	12	-18			-21			-3			-6		
	8.5	9	-21			-24			-6			-9		
coral de en medio	9	11	-19	1.54	6.14	-22	1.54	6.14	-4	1.54	6.14	-7	1.54	6.14
	10	11	-19			-22			-4			-7		
	12	14	-16			-19			-1			-4		
	15	15	-15			-18			0			-3		
	18	11	-19			-22			-4			-7		
	19	11	-19			-22			-4			-7		
	20	11	-19			-22			-4			-7		
21	13	-17	-20	-2	-5									
coral de en frente	22	7	-23	1.17	4.66	-26	1.17	4.66	-8	1.17	4.66	-11	1.17	4.66
	23	9	-21			-24			-6			-9		
	24	10	-20			-23			-5			-8		
	26	8	-22			-25			-7			-10		
	27	10	-20			-23			-5			-8		

V. CONCLUSIONES.

Los arrecifes de coral son pieza importante para la protección costera ya que en los lugares donde se están presentes se ha demostrado que después de fenómenos naturales la atenuación de la energía es considerable en comparación con zonas donde no los hay. El resultado obvio es que evitan la erosión de la playa. El presente trabajo se desarrolló pensando los beneficios que los arrecifes de coral pueden otorgar a la costa. Con base en el desarrollo de una réplica de arrecife de coral y con los resultados mostrados se puede ver que para las pruebas 6 a la 13 ante los distintos regímenes de oleaje (RM, TBI Y TAI) y cuando el dique fue colocado en la parte alta del perfil de arena (fig. 67) y la estructura era tipo 1 (fig. 61); al igual que para los diques colocados en la parte baja del perfil de arena (fig. 67) y la estructura tipo 2 (fig. 64) se encontró buen desempeño en la disipación de la energía al igual que en términos de reflexión y transmisión del oleaje tanto en aguas someras como aguas profundas. Las estructuras de las pruebas 1 a la 5 y colocadas en la parte baja del perfil de arena (fig. 67) y dique tipo 1 (fig. 61) mostraron un comportamiento pobre en disipación de energía para aguas someras, mientras que para aguas profundas existe un porcentaje de disipación bajo. Para reflexión de oleaje el comportamiento fue bueno para estas pruebas. Haciendo una comparación general del comportamiento de la estructura, se puede decir que en las pruebas 1 a la 5 existió un proceso de peraltamiento de las olas que induce valores del coeficiente de transmisión mayor a 1, lo cual se traduce en un incremento de la energía potencial. Es por ello que, quitando los casos en que la estructura no induce rotura, se concluye que la estructura es adecuada para aplicaciones de protección de la costa.

En la parte de rugosidad con base en los resultados se tienen tres valores de rugosidad uno para cada tipo de pieza que se fabricó. Los resultados fueron iguales para todas las piezas impresas del mismo tipo esto en teoría y en base a las justificaciones hechas en la sección 3.7.4.5 y la sección 3.7.4.6 Cuando se realizó el cálculo.

BIBLIOGRAFÍA

- Cáceres Euse, Alejandro. «MODELAMIENTO DE OLEAJE A ESCALA DE LABORATORIO.» *Tesis presenta como requisito para optar al título de: Magister en Ingeniería de los Recursos Hidráulicos*, 2014: 56.
- Alcolado, Pedro M. *Manual De Capacitación para El Monitoreo Voluntario de Alerta Temprana En Arrecifes Coralinos*. La Habana: Ministerio de ciencia, Tecnología y Medio Ambiente: Creaciones graficas, 2004.
- Baldwin Mendoza, Edgar. «DISEÑO DE ESTRUCTURAS ESTRUCTURAS.» *APUNTES DE LA CLASE*, 2011.
- Carricart-Ganivet, JP, y G Horta-Puga. «Arrecifes de Coral en México.» *In: Salazar- Vallejo SI, González ne (eds). Biodiversidad Marina y Costera de México. Comisión Nacional para la Biodiversidad y Centro de Investigaciones de Quintana Roo, México.*, 1993: 80-90.
- Castillo Rodríguez, Manuel Arturo, y Gustavo Rodríguez Hernández. «Influencia de los parámetros de B/L y Fb/H en el comportamiento Hidrodinámico de un Arrecife Artificial.» *Instituto de ingeniería UNAM*, 2016: 109.
- «ecoosfera.» *ecoosfera*. 30 de 07 de 2017. <http://ecoosfera.com/2017/07/arrecifes-artificiales-paliativo-para-la-zona-costera-y-los-ecosistemas-marinos/> (último acceso: 2018).
- French, A.P. *Vibraciones y ondas*. Massachusetts institute of tecnology: reverté, s.a., 1974.
- Greenpeace, México. «Arrecifes coralinos de México.» 1998.
- Horta-Puga, Guillermo, y Juan P Carricart-Ganivet. «Corales Pétreos Recientes (Milleporina, Stylasterina Y Scleractinia) de México.» *In Biodiversidad marina y Costera de México. S.I. Salazar-Vallejo y N.E. González (eds). Com. Nal. Biodiversidad y CIQRO, México.* , 1993: 66-80.
- López Ruiz, Alejandro. «Propagación de oleaje con SWAN.» *Ingeniería de Costas*, 2013-2014.
- «MANUAL DE DISEÑO DE OBRAS CIVILES – CFE.» 2014.
- Mariño Tapia, PhD., Ismael, y MSc., Cesar Acevedo Martínez. «GUIDE TO RESTORE COASTAL PROTECION SERVICES PROVIDED BY CORAL REEFS.» *Coastal Processes and Physical Oceanography Laboratory*, s.f.: 47.
- «Oleaje. Propagación.» *UPC. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUNYA*, s.f.
- Reyes Bonilla, Héctor, y Andrés López Pérez. «Biogeografía de los corales pétreos (scleractinia) del pacífico de México.» *Ciencias Marinas* 24 (Junio 1998): 202-227.
- Secaira, Fernando, y Cesar Acevedo. «Importancia de los arrecifes y dunas en la protección de la costa.» *Serie técnica. El papel de los sistemas naturales en la dinámica costera en el caribe mexicano y el impacto de las actividades humanas en su condición actual. The Nature Conservancy, México.*, 2017: 46.
- Silva Casarín, Rodolfo. *Análisis y descripción del regimen medio del oleaje*. Apuntes de Grupo de ingeniería de costas y puertos, Ciudad de Mexico: Instituto de ingeniería UNAM, s.f.
- . *Análisis y descripción estadística del oleaje*. México,: Instituto de ingeniería, Ciudad Universitaria, CP 04510, México, DF., 200