



# **UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología

## **GUÍA PARA LA EVALUACIÓN DE SITIOS CON POTENCIAL ENERGÉTICO DE CORRIENTES MARINAS: CASO COZUMEL, QUINTANA ROO, MÉXICO.**

### **TESIS**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**MAESTRA EN CIENCIAS**

**(Oceanografía Física)**

PRESENTA:

**Ing. Luz Adriana Arredondo Godínez**

TUTORES PRINCIPALES:

**Dr. Ismael Mariño Tapia (ENES - Mérida)**

**Dr. Rodolfo Silva Casarín (Instituto de Ingeniería)**

COMITÉ TUTOR:

**Dr. Edgar Gerardo Mendoza Baldwin (Instituto de Ingeniería)**

**Dr. Miguel Ángel Alatorre Mendieta (Instituto de Ciencias del Mar y Limnología)**

**Dr. Antonio Zoilo Márquez García (Universidad Autónoma Metropolitana -  
Iztapalapa)**

Ciudad de México, octubre, 2020



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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



**GUÍA PARA LA EVALUACIÓN DE SITIOS CON POTENCIAL  
ENERGÉTICO DE CORRIENTES MARINAS: CASO COZUMEL,  
QUINTANA ROO, MÉXICO.**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE:

**MAESTRA EN CIENCIAS**

(Oceanografía Física)

PRESENTA:

**Ing. Luz Adriana Arredondo Godínez**

TUTORES PRINCIPALES:

**Dr. Ismael Mariño Tapia (ENES- Mérida)**

**Dr. Rodolfo Silva Casarín (Instituto de Ingeniería)**

COMITÉ TUTOR:

**Dr. Edgar Gerardo Mendoza Baldwin (Instituto de Ingeniería)**

**Dr. Miguel Ángel Alatorre Mendieta (Instituto de Ciencias del Mar y Limnología)**

**Dr. Antonio Zoilo Márquez García (Universidad Autónoma Metropolitana  
Iztapalapa)**

Ciudad de México, octubre, 2020

*“Tras el instante mágico en que mis ojos se abrieron en el mar, ya no fue posible para mi ver, pensar y vivir como antes.”*

Jacques-Yves Cousteau

*A la vida*

*A mi abuela*

*A mis padres*

*A mis hermanas*

## *Agradecimientos académicos*

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México, por todas las oportunidades y las mejores experiencias vividas, pero sobre todo por la excelente educación e íntegra formación que me ha proporcionado a lo largo de toda la vida, Porque es un orgullo pertenecer a ella.

Al Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM, por brindarme el apoyo y las bases necesarias para desarrollar satisfactoriamente mis estudios de maestría.

Al Dr. Ismael Mariño Tapia por permitirme formar parte de su equipo, por la confianza, el apoyo, orientación y oportunidades que me ha brindado durante esta etapa, por el conocimiento compartido y por siempre motivarme a ser mejor persona, continuar aprendiendo y superarme.

Al Dr. Rodolfo Silva Casarín, por su apoyo, orientación y consejo académico durante la realización de este trabajo, por sus enseñanzas, conocimiento y experiencias compartidas en cada oportunidad.

A los miembros de mi comité tutorial: Dr. Edgar Gerardo Mendoza Baldwin, Dr. Miguel Ángel Alatorre Mendieta y Dr. Antonio Zoilo Márquez García, por todos los comentarios y observaciones realizadas para enriquecer este trabajo y por sus consejos y enseñanzas durante todo este proceso.

A los Doctores Gabriel Ruíz y Gabriel Gallegos por su asesoría y apoyo brindado durante el procesamiento de datos.

A los profesores de los programas de posgrado en Ciencias del Mar y Limnología e Ingeniería, porque forman parte esencial para continuar en el camino de la investigación, por todos el conocimiento y apoyo brindados.

A CONACyT por el apoyo económico brindado para el desarrollo de mis estudios de Maestría, a través del Programa Becas CONACyT Nacionales.

Al CEMIE-Océano por financiar este proyecto y por el apoyo otorgado para concluirlo.

A todo el personal científico y marino del B/O "Justo Sierra" durante la campaña CEMIE-1.

## Agradecimientos personales

A *la vida*, por permitirme cumplir un logro más, por las oportunidades y experiencias que me brinda cada momento que me hacen valorar y disfrutar de cada día.

A *Mami Geno*, por ser mi persona favorita, con el corazón y espíritu más grande que pudo existir, por transmitirme tu fortaleza y gran amor, porque me enseñaste que un corazón bonito es la base fundamental de una gran persona. Se que estarías orgullosa de mí.

A *mi madre*, por el amor más grande e incondicional de toda mi vida, por tu gran apoyo, paciencia y comprensión, porque tienes las palabras perfectas para los momentos complicados, gracias por no permitirnos rendirnos nunca y alentarnos a llevar acabo nuestras locuras, a buscar nuevas metas, pero sobre todo a perseguir y cumplir nuestros sueños.

A *mi padre*, por transmitirme siempre tu gran amor al conocimiento y ser la motivación y ejemplo para continuar en este camino de la investigación. Por enseñarme que la recompensa se encuentra en el esfuerzo, y que es mejor ser diferente a los demás, por tus enseñanzas, historias y libros compartidos, pero sobre todo por ser “un loco con estilo”.

A mis hermanas, *Gaby, Renata y Sofia*, por llenar mi vida de amor y alegría, por compartir un sin fin de aventuras y contagiarme de sus locuras, gracias por ser mis más grandes confidentes y cómplices, por ser un ejemplo de valentía y perseverancia, pero sobre todo por su apoyo incondicional. A mi *Sam* por ser un maravilloso regalo y llenar mi corazón de tus risas y travesuras. A *mis cuñados*, por formar parte de esta familia, por su complicidad y apoyo en todo momento. A mis primas *Ixchel y Carli* por su gran amor.

A mis locas favoritas *Maday y Marisol* por todo el apoyo, confianza, viajes y aventuras compartidas, porque el destino nos hizo amigas, pero el paso del tiempo nos transformó en hermanas.

A *Roger, Dany y Edgar*, que más que amigos son mis hermanos, mis confidentes y cómplices, gracias por tantas risas, experiencias y aventuras, por sus consejos, enseñanzas y apoyo para crecer y superarnos juntos.

A mis amigos *Mau, Tay, Alan, Sharif, y Coco*. Por todos los momentos divertidos, consejos, enseñanzas y experiencias compartidas durante el posgrado y la campaña ADECO-17.

A mi familia meridiana *Diana, Emilio, Marce, Clau, Cuauh, Gabo*. Por su amistad, risas, platicas, consejos, viajes, por todo su apoyo y confianza. Y a todo el equipo del LAPCOF por su apoyo constante.

# CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS .....	ii
LISTA DE TABLAS.....	iv
RESUMEN.....	v
ABSTRACT.....	vi
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. Objetivo general .....	7
1.2. Objetivos particulares.....	7
CAPÍTULO 2. CORRIENTES OCEÁNICAS VS CORRIENTES DE MAREA .....	8
CAPÍTULO 3. PARAMETROS A CONSIDERAR PARA EL ESTABLECIMIENTO DE CAMPOS DE HIDROGENERADORES .....	12
3.1. Caracterización de corrientes marinas .....	13
3.2. Batimetría y caracterización del fondo marino.....	16
3.3. Evaluar la cercanía a la red eléctrica nacional o alternativa de almacenamiento.....	18
3.4. Potenciales zonas de exclusión y conflicto de uso .....	19
3.4.1. Localización de las rutas de navegación .....	19
3.4.2. Localización de zonas militares.....	20
3.4.3. Localización de zonas de pesca .....	20
3.4.4. Impacto ambiental.....	20
CAPÍTULO 4. CASO DE ESTUDIO. COZUMEL Q.ROO.....	23
4.1. Área de estudio .....	23
4.2. Caracterización de corrientes marinas .....	24
4.2.1. Adquisición de datos y series de tiempo .....	27
4.2.2. Distribuciones de probabilidad de velocidades .....	31
4.2.3. Evaluación de la Potencia anual acumulada .....	33
4.2.4. Análisis variabilidad de la corriente en Cozumel.....	35
4.2.5. Análisis de la potencia por frecuencias de variabilidad .....	40
4.3. Batimetría del fondo marino del canal de Cozumel .....	46
4.4. Evaluación de conexión a la red eléctrica.....	56
4.5. Zonas de exclusión .....	60
4.5.1. Localización de las rutas de navegación .....	60
4.5.2. Localización de zonas Militares.....	63

4.5.3. Localización de zonas de pesca .....	63
4.6. Impacto Ambiental (Áreas Naturales Protegidas) .....	63
CONCLUSIONES.....	67
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS .....	70
ANEXOS .....	78

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Capacidad instalada de energía renovable en México en 2016, [Reporte de energías limpias, SENER 2016]. .....	2
Figura 2. Generación de energía eléctrica en México, año 2016, [Reporte de energías limpias, SENER 2016].....	3
Figura 3. Formas de energía oceánica. ....	4
Figura 4. Corrientes Geostróficas.....	9
Figura 5. Principales corrientes marinas. ....	10
Figura 6. Esquema de la temperatura en el océano Atlántico, como indicador de las corrientes termohalinas [World Ocean Circulation Experiment WOCE].....	11
Figura 7. Localización del área de estudio. ....	23
Figura 8. Magnitud de la velocidad de flujo y circulación de la corriente de Yucatán (Modificada de L. Carrillo et al. 2019) .....	25
Figura 9. Modelación de la corriente de Cozumel.....	27
Figura 10. Posición de los equipos AQP y ADCP proyecto CANEK. ....	28
Figura 11. Serie de tiempo de la magnitud y dirección a 50 m y 130 m de profundidad.....	29
Figura 12. Serie de tiempo de la magnitud y dirección en la zona costera.....	30
Figura 13. Histogramas de frecuencias de la velocidad de corriente a diferentes celdas de profundidad. 1)50 m, 2) 66 m, 3)114 m, 4) 130 m, 5) Costeros. ....	32
Figura 14. Potencia acumulada anual, por día y por hora en cada intervalo de profundidad.....	34
Figura 15. Espectro de la serie de datos de velocidad de corriente Componentes Norte-Sur, Este-Oeste a 50 m de profundidad.....	36
Figura 16. Espectro de la serie de datos de velocidad de corriente Componentes Norte-Sur, Este-Oeste a 66 m de profundidad.....	36

Figura 17. Espectro de la serie de datos de velocidad de corriente Componentes Norte-Sur, Este-Oeste a 82 m de profundidad.....	37
Figura 18. Espectro de la serie de datos de velocidad de corriente Componentes Norte-Sur, Este-Oeste a 98 m de profundidad.....	37
Figura 19. Espectro de la serie de datos de velocidad de corriente Componentes Norte-Sur, Este-Oeste a 114 m de profundidad.....	38
Figura 20. Espectro de la serie de datos de velocidad de corriente Componentes Norte-Sur, Este-Oeste a 130 m de profundidad.....	38
Figura 21. Espectro de la serie de datos de velocidad de corriente costeros componentes Norte-Sur, Este-Oeste.....	39
Figura 22. Filtro de Fourier para la señal en profundidad de 50 m componente N-S, separando altas y bajas frecuencias a partir de 0.1 cph.....	41
Figura 23. Filtro de Fourier para la señal en datos costeros componente N-S, separando altas y bajas frecuencias a partir de 0.1 cph.....	42
Figura 24. Evaluación de los 10 términos de la velocidad en cada intervalo de profundidad de la componente N-S.....	43
Figura 25. Evaluación de los 10 términos de la velocidad en cada intervalo de profundidad de la componente E-O.....	43
Figura 26. Evaluación de los términos de la velocidad en la componente N-S de los datos costeros con AQP.....	44
Figura 27. Evaluación de los términos de la velocidad en la componente E-O de los datos costeros con AQP.....	45
Figura 28. Secciones batimétricas representativas en costa Oeste de la isla de Cozumel.....	48
Figura 29(a). Batimetría obtenida a partir de datos de la SEMAR. (b)Batimetría Multihaz digitalizada CEMIE-1.....	49
Figura 30. Ubicación de los perfiles perpendiculares al Canal de Cozumel en batimetría SEMAR.....	52
Figura 31. Ubicación de los perfiles perpendiculares al canal de Cozumel en batimetría CEMIE-1.....	53
Figura 32. Mapas de pendientes para batimetría SEMAR y CEMIE-1 en la región del canal de Cozumel.....	55
Figura 33. Regiones del Sistema eléctrico Nacional [CENACE, 2019].....	56

Figura 34. Enlaces entre las 53 Regiones de transmisión del SEN [CENACE, 2019]..	57
Figura 35. Conexiones a la Red eléctrica Nacional en Cozumel [CENACE, 2019].	58
Figura 36. Diagrama con el proyecto línea de transmisión submarina PLAYACAR- CHANKANAAB, [SENER-PRODESEN 2018].	59
Figura 37. Relación de cruceros turísticos y pasajeros que visitan Cozumel anualmente. ....	61
Figura 38. Puertos y rutas marinas entre la isla de Cozumel y el continente, así como de turismo internacional.....	62
Figura 39. Áreas Naturales Protegidas, en verde los arrecifes en la isla de Cozumel y Puerto Morelos y amarillo el Área de protección de flora y fauna.....	65
Figura 40. a) Mapa final de la zona propuesta para la instalación de dispositivos. b) Resultados del Modelo HYCOM de la velocidad de la corriente. ....	66
Figura 41. Prototipos de turbina con rotor axial. ....	82
Figura 42. Prototipos de turbina con rotor de eje vertical. ....	83
Figura 43. Prototipos de Perfil Hidrodinámico oscilante. ....	83
Figura 44. Sistema Efecto Venturi.....	84
Figura 45. Sistema Tidal Kite.....	85
Figura 46. Sistema Tornillo de Arquímedes. ....	85
Figura 47. Sistema de anclaje con pilotes.....	86
Figura 48. Sistema de anclaje con base fija por gravedad. ....	87
Figura 49. Sistema de anclaje con Hydrofoils. ....	87
Figura 50. Sistema de anclajes flexibles. ....	88
Figura 51. Sistema de anclajes rígidos. ....	88
Figura 52. Sistema de anclajes flotantes. ....	89

#### LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Potencia acumulada en intervalos de profundidad.....	33
Tabla 2. Descripción de los 10 términos resultantes de expandir un trinomio al cubo con componentes promedio, de altas y bajas frecuencias.....	40
Tabla 3. Tipos y característica de dispositivos existentes para aprovechamiento energético con corrientes.....	90

## RESUMEN

La necesidad de implementar fuentes de energía alternativas para intentar revertir los efectos adversos del uso de combustibles fósiles ha generado gran interés en los recursos oceánicos considerados una fuente de energía limpia y renovable, entre estos recursos, las corrientes marinas emergen como las opciones más prometedoras para generación de energía oceánica en un futuro inmediato.

En este trabajo se busca establecer los parámetros más importantes a considerar en la toma de decisiones para la selección de sitio donde se puedan aprovechar las corrientes oceánicas en México, así como los distintos niveles de detalle en la información que se requiere recopilar y su adecuada integración, que permita definir, a nivel de primera aproximación si la instalación de dispositivos es factible o no.

El estudio de caso corresponde a la corriente de Yucatán en el Canal de Cozumel, considerada como la corriente oceánica con mayor potencial disponible en el país, donde el análisis de datos realizado a partir de las mediciones de velocidad de corriente durante un periodo de dos años registra corrientes persistentes con dirección N y velocidades promedio de 1 m/s. De acuerdo a la evaluación a diferentes intervalos de profundidad la zona óptima para la instalación de dispositivos, en donde se asegura el mayor aprovechamiento del recurso energético se encuentra a una profundidad de ~66 m con las velocidades máximas registradas (0.8 – 1 m/s) y una persistencia del 45% del tiempo, además de una potencia anual acumulada de 5.15 MW.

Con la integración de todos los parámetros indispensables (caracterización de corrientes marinas, fondo marino, conexión a la red eléctrica, zonas de exclusión) se identifican 3 sitios adecuados para la instalación de dispositivos de generación de energía de corrientes marinas, dos en la costa oeste de la isla cerca del muelle principal y una en la costa este.

## *ABSTRACT*

During the last years, the need to improve alternative energy sources in order to revert the adverse effects of fossil fuels use, has increase the interest in the ocean resources. These has been considered as a clean and renewable source of energy. Particularly, ocean currents emerge as one of the most promising option for the generation of energy in a short-term future.

Considering this, the aim of this work is to establish the most important parameters to consider in the decision-making for the selection of the sites where ocean currents can be used as energy source in Mexico. Also, this work provides knowledge about the required information, how detailed it should be and its appropriate integration. This will allow to have a first approach and to define if the device installation is feasible or not.

The case study was carried out in the Yucatán Current in the Canal de Cozumel region. It has been considered as the highest energy ocean current on the country. The data analysis based on current velocity measurements over a period of two years, records persistent currents with a northward direction and an average speed of 1 m/s. According to different evaluated depth ranges, the optimal zone for device installation is located at ~66 m depth with maximum record velocities (0.8-1 m/s), a persistence of 45% of time and an annual cumulative energy of 5.15 MW. This depth allows to obtain the maximum energy resource.

Once all these essential parameters (ocean currents characterization, seafloor features, electrical grid connection, exclusion zones) were considered, three suitable sites have been identified for the installation of devices for the generation of energy trough ocean currents: two of them located on the west coast of the island (near the main pier), and one on the east coast.

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

La energía eléctrica es un recurso esencial para la mayoría de las actividades de la sociedad moderna, su uso generalmente se relaciona con la calidad de vida. Hoy en día, el constante y acelerado crecimiento de la población mundial está ocasionando el consumo de grandes cantidades de energía con el fin de mantener y mejorar las actividades económicas de la sociedad.

Por otro lado, las industrias extractivas y pesadas que dependen de las fuentes de energía fósiles están amenazados por la reducción en la disponibilidad de dichas reservas, así como por la imperante regulación que implica reducir la producción de CO<sub>2</sub> y otros gases de efecto invernadero, e intentar reducir el calentamiento global, así como la grave e injustificada contaminación la cual impacta severamente a la atmosfera, el agua, los suelos y el medio ambiente en general, provocando alteraciones ecológicas en los ecosistemas del planeta las cuales generan daños graves y en ocasiones irreversibles que podrían ocasionar cambios en la vida como hoy la conocemos. Bajo un esquema de sostenibilidad, una alternativa para intentar revertir estos efectos adversos del uso de hidrocarburos es utilizar fuentes de energía limpias y renovables [Badii et al., 2016].

La conversión de fuentes renovables de energía ha logrado contribuir con un 19% a la generación eléctrica mundial y su tendencia es creciente. Países como China, Estados Unidos, Reino Unido, Canadá y Alemania son líderes en capacidad instalada empleando fuentes renovables [REN21 2014]. Sin embargo, aún es necesario lograr avances significativos que permitan que la energía a partir de estas fuentes sea más competitiva ante la producida con combustibles fósiles tanto en precio a usuario final como en cantidad y calidad a fin de mantener, en lo posible, de las actividades económicas, tecnológicas y científicas. Se vislumbra que la combinación de un uso

eficiente de la energía junto con la migración a fuentes renovables podría ser el camino a una nueva economía limpia y circular.

En México se ha realizado un importante esfuerzo por desarrollar tecnologías y construir plantas para la conversión de la energía de fuentes limpias [SENER 2017].

Actualmente se tiene una capacidad instalada de aproximadamente 12 584 MW en centrales hidráulicas, 768 MW en centrales eólicas, 112 MW en centrales geotérmicas y 56 MW en energía fotovoltaica (Fig.1). Esto significa que, aproximadamente el 25% de la capacidad instalada nacional proviene de fuentes renovables y limpias (Fig. 2) [SENER 2016].

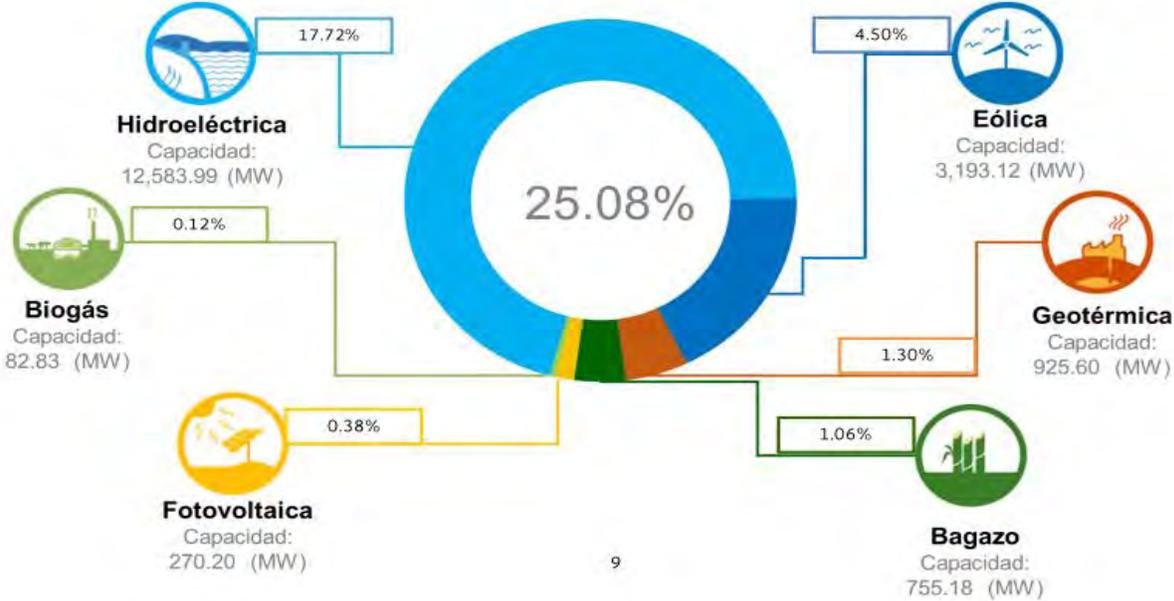


Figura 1. Capacidad instalada de energía renovable en México en 2016, [SENER 2016].

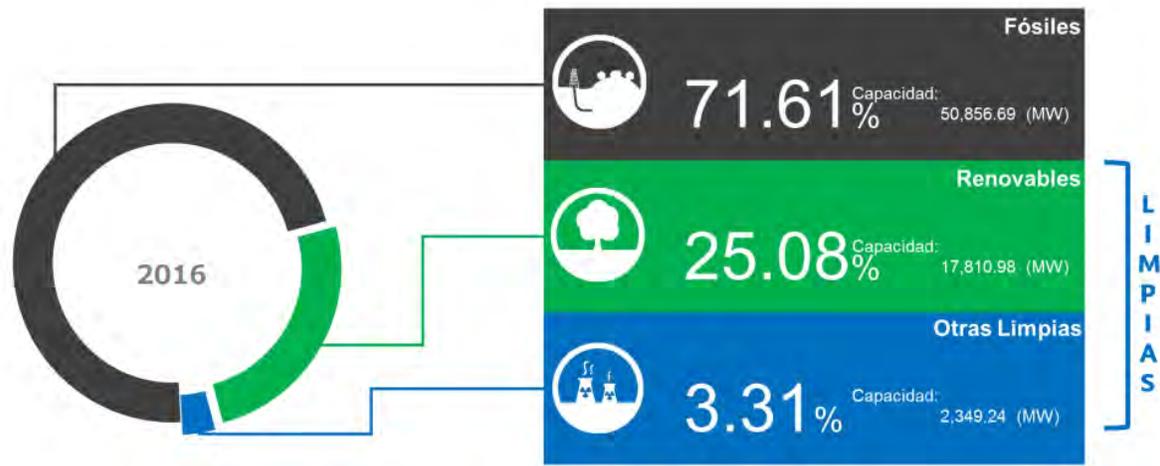


Figura 2. Generación de energía eléctrica en México, año 2016, [SENER 2016].

Se sabe que los mares y océanos ocupan alrededor del 70% de la superficie del planeta y han desempeñado siempre un papel crucial en la historia de la humanidad, sirviendo, entre otras funciones, como vía de descubrimiento, comunicación y comercio, escenario del despliegue militar, fuente de alimento y también de provisión de recursos no vivos preciados, como petróleo, gas y minerales. Sin embargo, por su gran característica colectora de energía solar, representan la mayor reserva de energía renovable que existe en la tierra, ya que la energía química, térmica y mecánica contenida en ellos puede aprovecharse, lo que supone un gran potencial mundial de producción de energía eléctrica.

Principalmente, se cuenta con cinco fuentes energéticas (Fig. 3) que los océanos ofrecen como consecuencia de la transformación de la energía solar, eólica y atracción astronómica que almacenan sus aguas y que pueden ser aprovechadas para la producción de electricidad [Nuñez., 2012; Charlier & Finkl., 2009]:

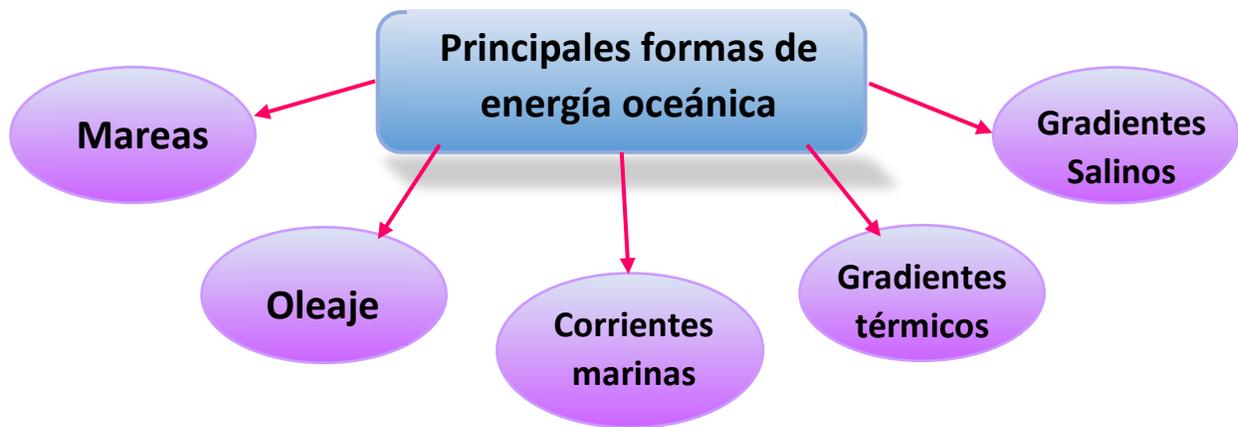


Figura 3. Formas de energía oceánica.

Sin embargo, la distribución de la energía de estas fuentes no está distribuida de manera homogénea en el planeta, lo que implica que cada país y región tienen la necesidad de evaluar su disponibilidad y enfocar sus esfuerzos en aquellas fuentes que ofrezcan una mejor relación costo-beneficio-impactos.

En el caso de la energía contenida en las corrientes marinas, tema de la presente tesis, México cuenta con diversos sitios específicos e importantes en donde se tienen condiciones favorables [Hernández *et al.*, 2019]. Por ejemplo, el Golfo de California (región norte y de las grandes islas) es donde la energía asociada con las mareas astronómicas es más abundante. Aquí se podría aprovechar la diferencia de nivel entre pleamar y bajamar, generando represamientos, o bien directamente aprovechar las corrientes generadas por dicha oscilación. La fisiografía costera puede ayudar a que las velocidades de la corriente presenten aumentos significativos, es el caso de los estrechamientos entre porciones de tierra (e.g. islas) y la zona continental. Las corrientes de marea son las más utilizadas para la extracción de energía en otras partes del mundo, especialmente en Europa. México posee poco potencial relacionado con esta fuente pues gran parte de la costa nacional está sujeta a régimen micromareal (carrera de marea menor a 1 m).

Las corrientes de marea tienen la particularidad de invertir su dirección de acuerdo con la fase de la marea (cada 6 o 12 horas) con la consecuente reducción de velocidad que antecede al cambio. Su principal ventaja es que, son altamente predecibles y mantienen sus caudales conocidos y cuasi constantes según la época del año. Debido a esto, el umbral de incertidumbre y las estrategias de explotación de estas corrientes pueden ser definidos con mayor certeza, en comparación con otras fuentes de energía como el oleaje, cuyo comportamiento es de carácter más estocástico [Fernández., 2005].

Otro tipo de corrientes marinas que pueden tener también un potencial atractivo para la extracción de energía, son las corrientes oceánicas, las cuales presentan direcciones persistentes y pueden ser igualmente intensas. Una desventaja es que su pronóstico (espacial y temporal) mantienen un nivel alto de incertidumbre, y se encuentran en regiones profundas y alejadas de la costa, lo que hace su explotación técnicamente compleja y a un alto costo.

La energía que se puede extraer de las corrientes (de marea u oceánicas) es proporcional al cubo de su velocidad media, la cual depende de manera significativa de las características de rugosidad del fondo y de la batimetría. De ellas se aprovecha la energía cinética del flujo de agua, la cual debe ser suficiente para la generación eléctrica, es decir deben ser capaces de accionar hidrogeneradores. Otra de las principales ventajas del aprovechamiento de las corrientes marinas y de marea sobre otras fuentes, como el viento, es que la densidad del agua de mar tiene en promedio 1,020 kg/m<sup>3</sup> lo que representa un valor de ~900 veces mayor a la del aire, permitiendo extraer mayor cantidad de energía del mar para una misma área ocupada.

A pesar de los recursos de corrientes marinas disponibles, en México, la explotación de esta fuente es nula y es evidente la falta de desarrollo, tanto

en caracterización del recurso como en la tecnología que permita explotarla. Es conveniente señalar que la tecnología de hidrogeneradores marinos aún se encuentra en fases tempranas de desarrollo por ello los costos de inversión y de la energía generada son todavía altos.

La vía para abatir costos tiene dos rutas: i) caracterizar a detalle las zonas con energía disponible y aprovechable en forma de corrientes marinas a fin de permitir una correcta estimación de la energía que se puede ofrecer al mercado y ii) avanzar en el desarrollo de tecnologías que permitan obtener el recurso con buena eficiencia, calidad y estabilidad a fin de producir una industria nacional sustentada en economía de escala. La combinación de estas tareas ha de redundar en una participación importante en el abastecimiento de la demanda eléctrica nacional.

Así, el presente trabajo pretende brindar una guía de los factores que deben tomarse en cuenta para llevar a cabo la tarea de caracterización de zonas donde se puedan aprovechar las corrientes oceánicas en México y definir, a nivel de primera aproximación, si la instalación de dispositivos es factible o no. El estudio de caso corresponde a la corriente de Yucatán en el Canal de Cozumel, considerada como la corriente oceánica con mayor potencial disponible en el país. Es conveniente señalar que el análisis de impacto ambiental asociado al despliegue de campos de generadores hidrocinéticos, queda fuera de los alcances de esta tesis.

### 1.1. Objetivo general

Establecer los parámetros indispensables para determinar si un sitio específico es viable para aprovechar las corrientes oceánicas. Aplicarlos al caso de Cozumel, Quintana Roo.

### 1.2. Objetivos particulares

Se han identificado los siguientes objetivos específicos:

- Caracterizar las corrientes en la zona de Cozumel.
- Caracterizar la batimetría de la zona de estudio.
- Determinar las zonas de exclusión para instalación de dispositivos de aprovechamiento energético (por pesca, navegación, áreas naturales protegidas, zonas militares, etc.).
- Evaluar la cercanía a la red eléctrica nacional o alternativa de almacenamiento.

## *CAPÍTULO 2. CORRIENTES OCEÁNICAS VS CORRIENTES DE MAREA*

Las corrientes en el mar transportan grandes volúmenes de agua y energía, en algunas zonas gobiernan el transporte de larvas, nutrientes, contaminantes, y diversas propiedades (salinidad, temperatura, oxígeno, etc.) de calidad del agua. Las grandes corrientes oceánicas (Corriente del Golfo, Kuroshio, California, Norte y sur ecuatorial, Humboldt, etc.), son un factor determinante en la distribución de la temperatura del planeta, modificando el clima.

Las corrientes en el mar tienen un comportamiento gobernado por los forzamientos que las originan. Las corrientes presentes en las plataformas continentales y regiones costeras, tienen escalas de variabilidad en el orden de horas a días, y están influenciadas por los efectos de fricción de fondo, viento local, mareas (astronómica) y oleaje.

Las corrientes que ocurren en los océanos profundos (corrientes oceánicas), son influenciadas principalmente por los sistemas de viento (e.g. celdas de Hadley) y los cambios en las condiciones termohalinas (circulación termohalina, AMOC) a nivel planetario. Estas corrientes son relativamente constantes (presentan variaciones estacionales), son persistentes (dirección poco variable) y su velocidad puede aumentar dependiendo de la configuración geomorfológica.

Las corrientes oceánicas superficiales, constituyen aproximadamente el 10% del agua de los océanos y se encuentran entre los 0 y 400 m de profundidad, moviéndose en sentido horizontal, principalmente. Esta circulación se genera, principalmente, por efecto de las celdas planetarias de viento (Hadley, Ferrel y Polar) sobre la superficie del mar, y es influenciada por el giro de la tierra (fuerza de Coriolis), la cual desvía las corrientes hacia la derecha en el hemisferio Norte o hacia la izquierda en el hemisferio Sur.

El esfuerzo del viento sobre la superficie del mar, y la expansión térmica generada por la radiación solar, provocan variaciones en el nivel del mar (pendientes). La fuerza de gravedad actúa tratando de erradicar estas pendientes, generando circulación inicialmente de niveles del mar altos hacia niveles bajos. Este movimiento afectado por la fuerza de Coriolis genera lo que se conoce como corriente geostrófica (balance entre gradientes de presión y la fuerza de Coriolis; ver Figura 4).



Figura 4. Corrientes Geostróficas.

La circulación superficial de amplia escala a nivel mundial está en balance geostrófico, y genera los grandes giros subtropicales característicos de los océanos mundiales. La figura 5 muestra un esquema de los patrones superficiales de corrientes más persistentes en el océano del planeta. La corriente oceánica de nuestro interés (corriente de Yucatán) forma parte del giro subtropical del Atlántico que converge con la corriente sur-ecuatorial que se mete al Caribe.

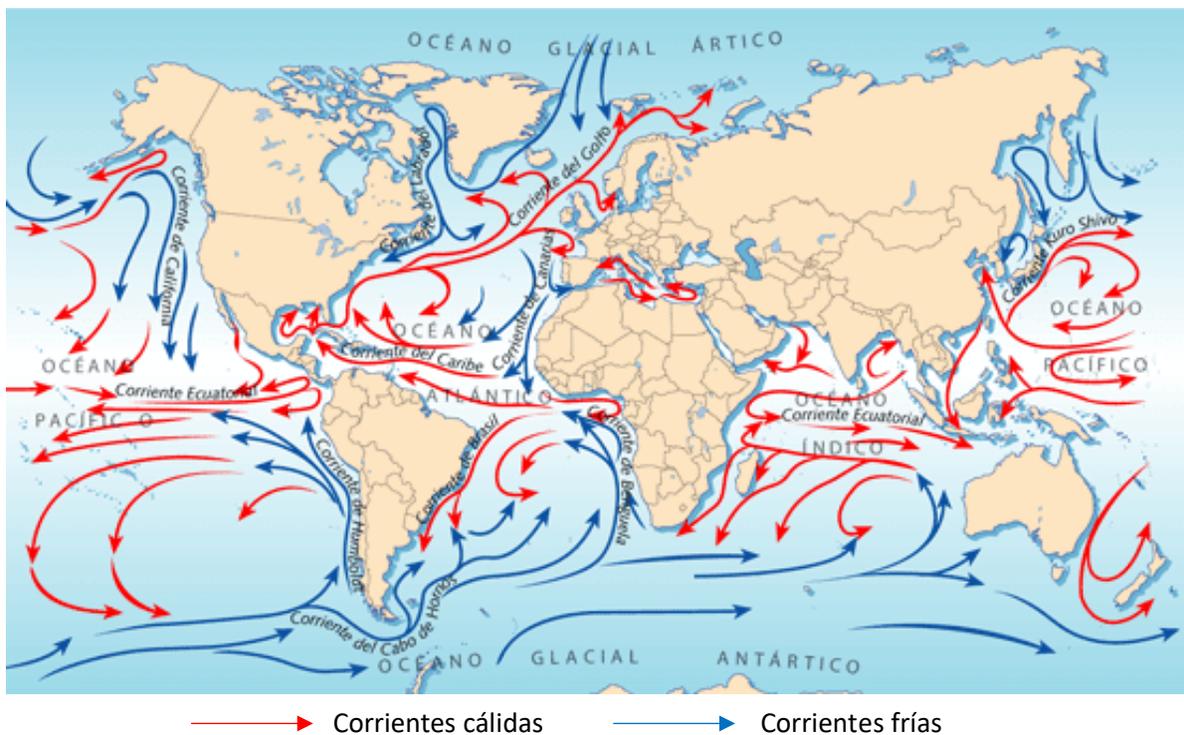


Figura 5. Principales corrientes marinas.

En el esquema de temperatura presentado en la Figura 6 el patrón de corriente es alimentado parcialmente, por el sistema de Circulación Termohalina conocido como la banda transportadora (Conveyor belt – en inglés), o Circulación Meridional de Retorno (en inglés AMOC Atlantic Meridional Overturning Circulation). Esta circulación ocurre de manera longitudinal, es decir, a lo largo de los meridianos, ocasionada por el hundimiento de los vestigios de la Corriente del Golfo en el polo norte, donde al enfriarse y aumentar su salinidad debido a la congelación aumenta su densidad y se hunde hacia las capas más profundas al llegar al polo, para después retornar hacia el sur. Esta masa de agua superficial es inestable por su baja temperatura y alta salinidad, y al hundirse, genera una circulación que alimenta las corrientes de agua profunda, evitando que estas se queden estancadas en el fondo, además de que es continuamente remplazada por el transporte en las capas superficiales procedentes del sur [Negre et al., 2010].

Estas corrientes profundas se desplazan hacia las zonas ecuatoriales y emergen en la zona subpolar (60° N) y polar del sur, donde tienen como función principal generar surgencias y alta productividad.

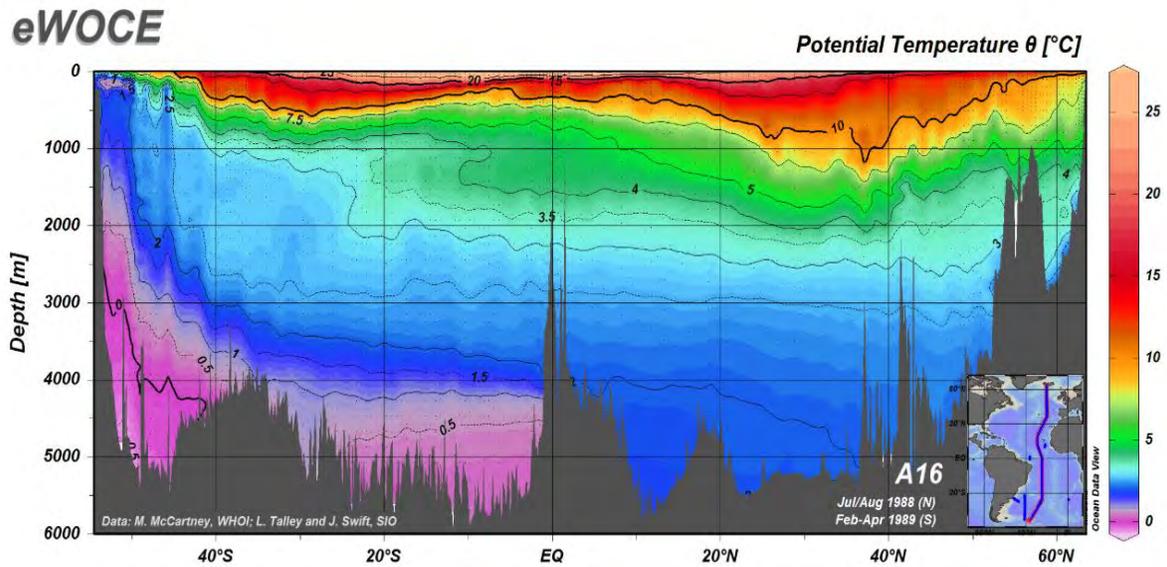


Figura 6. Esquema de la temperatura en el océano Atlántico, como indicador de las corrientes termohalinas [WOCE, 2020].

### CAPÍTULO 3. PARAMETROS A CONSIDERAR PARA EL ESTABLECIMIENTO DE CAMPOS DE HIDROGENERADORES

Para llevar a cabo un estudio sobre las zonas idóneas para la instalación de un dispositivo de generación de energía con corrientes marinas, se necesita considerar una serie de parámetros que permitan determinar el tipo de hidrogenerador adecuado, faciliten su instalación, minimicen los impactos ambientales, y no obstaculicen actividades económicas o sociales existentes. De acuerdo con la revisión de varios trabajos realizados anteriormente [González, 2007; Zubiarte *et al.*, 2009; Torres., 2015; Chang *et al.*, 2015; Cradden *et al.*, 2016; Camilo *et al.*, 2018], el presente trabajo considera los siguientes parámetros:

- 1.- Caracterización de corrientes marinas
  - 2.- Batimetría del fondo marino
  - 3.- Evaluar la facilidad de conectarse a la red eléctrica nacional o definir una alternativa de almacenamiento.
  - 4.- Localización de las rutas de navegación
  - 5.- Localización de zonas militares
  - 6.- Localización de zonas de pesca
  - 7.- Impacto ambiental (Áreas naturales protegidas)
- 
- Zonas de exclusión

Contar con información sobre cada uno de estos parámetros considerados imprescindibles, facilitará la localización de las zonas con mayor potencial para el aprovechamiento real de las corrientes marinas. Una evaluación de esta naturaleza ayudará a definir si el área seleccionada ofrece retos técnicos y/o ambientales que puedan detener los proyectos futuros.

### 3.1. Caracterización de corrientes marinas

En un estudio sobre aprovechamiento energético con corrientes marinas, la caracterización de la velocidad de la corriente es el parámetro fundamental que condicionará la posibilidad de instalar dispositivos para el aprovechamiento energético.

Conocer los flujos de corrientes de la zona permitirá evaluar la disponibilidad del recurso y localizar las zonas de máxima velocidad. Las áreas con estrechamientos (canales de islas o cuerpos de agua costeros) donde se aceleran las velocidades de corriente, son especialmente atractivas. Es importante realizar mediciones para poder tomar en cuenta efectos de otros procesos meteorológicos y oceanográficos (e.g. viento y marea) en las corrientes de la zona.

En general, es preferible que la corriente presente una intensidad alta ( $> 1$  m/s) y que no sea muy fluctuante en cuanto a su dirección [Y.-C. Chang et al., 2015]. Sin embargo, algunas tecnologías pueden ser capaces de adaptarse a distintas propiedades del flujo, lo cual genera una expansión de las posibles zonas óptimas.

Un análisis de las corrientes para su evaluación como posibles fuentes de energía debe involucrar:

- Obtención de series de tiempo de mediciones (años) para realizar análisis estadísticos de la dirección y magnitud, así como comprender su variabilidad (e.g. realizar diagramas de dispersión de las componentes ortogonales: U y V). Es especialmente importante determinar las frecuencias de variabilidad de estas corrientes en los rangos de frecuencia más amplios posibles (subinercial hasta turbulencia).

- Analizar el perfil vertical de velocidades, para identificar la profundidad idónea en la cual el hidrogenerador aproveche el máximo potencial energético de la corriente.

- Realizar, con los datos recabados, un análisis de la probabilidad de excedencia para conocer el porcentaje del tiempo que se tienen distintas magnitudes de corriente y evaluar la factibilidad económica de un potencial proyecto.

-Evaluar, con la ayuda de mediciones y modelos numéricos, la distribución espacial de los promedios, variabilidades de las corrientes, con el fin de ubicar los sitios óptimos para instalar los hidrogeneradores.

Con la información de las mediciones (series de tiempo) y los modelos numéricos se puede calcular directamente la distribución de potencia disponible.

Las corrientes en un sitio generalmente se expresan en términos de dos componentes ortogonales  $U_x(t)$  y  $V_y(t)$ , donde  $U_x$  es la componente este-oeste y  $V_y$  es la componente norte-sur. La magnitud total de la velocidad se puede calcular como la resultante de la suma vectorial de las componentes (aplicando el teorema de Pitágoras).

$$U(t) = \sqrt{U_x^2(t) + V_y^2(t)} \quad (1)$$

Y la dirección del flujo se expresa como

$$U_\theta(t) = \tan^{-1} \left[ \frac{V_y(t)}{U_x(t)} \right] \quad (2)$$

La potencia de energía en una corriente oceánica es proporcional al cubo de la velocidad del flujo, por lo que si la velocidad del flujo se duplica, la potencia aumenta ocho veces. Esta potencia se describe con la ecuación:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^3 \quad (3)$$

Dónde  $\rho$  es la densidad del fluido ( $\sim 1,027 \text{ kg/m}^3$ ) y  $V$  es la velocidad instantánea del flujo (m/s). Las unidades de la potencia son Watts.

Si se relaciona lo anterior con un área específica, la potencia ( $P$ ) a través de un área  $A$  orientada perpendicular al flujo, se calcula como:

$$P = 0.5\rho \int_A V^3 dA \quad (4)$$

Asumiendo que la velocidad es constante en el área, la ecuación se puede simplificar de la siguiente manera:

$$P = 0.5\rho AV^3 \quad (5)$$

Ahora, cuando se quiere conocer la potencia instantánea generada por un convertidor de energía o turbina localizada en una corriente marina real, se necesita incluir además un factor de eficiencia general ( $\eta$ ):

$$P_t = 0.5\rho\eta A_1 V^3 \quad (6)$$

La eficiencia ( $\eta$ ) representa todas las pérdidas asociadas con aspectos hidrodinámicos, mecánicos, eléctricos y las interacciones entre ellos. La eficiencia puede verse afectada por varios factores, los cuales dependen tanto de la tecnología, como de las características del flujo. Por ejemplo, aspectos importantes pueden ser el ángulo de incidencia entre el flujo y el plano del rotor, las fluctuaciones de velocidad inducidas por el oleaje y la intensidad y naturaleza de cualquier fluctuación turbulenta que pudiera estar presente. Esta eficiencia está gobernada por la Ley de Betz que se

aplica a turbinas en general (eólicas, hidrocinéticas e hidráulicas), donde solo 16/27 (el 59%) de la energía cinética en un flujo se puede convertir en energía mecánica, pues el otro 41% de la energía incidente se necesita para asegurar que el flujo se mantenga, ya que si se extrae más energía, el flujo tendría una velocidad nula, lo que impediría que abandonara la turbina y por lo tanto el sistema se bloquearía [A. Cornett., 2008]. En otras palabras, la máxima reducción del flujo por una turbina es de aprox. 2/3 de su velocidad, nunca será reducida al 100%.

Se considera que, en el caso de las turbinas marinas, el diámetro del rotor puede ser mucho más pequeño que el de los aerogeneradores (~ 3 veces menor) para generar la misma energía, ya que la densidad del agua es 850 veces mayor que la del aire [A.S. Bahaj & L.E. Myers., 2003; E. García et al., 2016; Ben Elghali et al., 2007].

Es importante mencionar que, para proyectos reales no es suficiente realizar una evaluación en tiempo anual de una determinada potencia, sino que es necesario realizar series de tiempo diarias o incluso horarias para poder analizar la variabilidad de ésta, tal como se muestra en el siguiente capítulo.

### 3.2. Batimetría y caracterización del fondo marino

La batimetría desempeña un papel muy importante para la circulación oceánica. A gran escala puede influir en la dirección de las principales corrientes oceánicas. Además, a grandes profundidades, separa las masas de agua de cuencas oceánicas adyacentes mediante las dorsales que funcionan como barreras sólidas. A menor escala, la rugosidad del fondo está relacionada con los niveles de la mezcla vertical en la columna de agua, lo que es un factor importante para la combinación de diferentes propiedades que determinan la estratificación del océano e influye en la distribución del calor y la penetración de gases de la atmósfera en las profundidades del océano [Gille & Smith., 2003].

Conocer la morfología del fondo marino es de gran importancia en la evaluación de la factibilidad de un proyecto de generación de electricidad con energía hidrocinética, pues influye en las corrientes marinas, determina qué tipo de estructura y anclaje deben utilizarse, y, por lo tanto, determina también los costos de la instalación y operación (ANEXO 2). Existen retos geotécnicos asociados a las condiciones ambientales del fondo marino presentes en los sitios de instalación de dispositivos, los cuales suelen incluir: dificultades en el diseño e instalación de cimientos, sedimentos gruesos, relieve marino complejo, sustratos duros o expuestos, dificultad para el tendido de cables, estabilidad del fondo, entre otros. Por lo que es de suma importancia que las condiciones del fondo que deben determinarse incluyan una batimetría detallada (determinación del relieve y fisiografía submarina, de preferencia en metros), así como muestras y análisis del tipo de fondo que existe (grosor y composición granulométrica de la capa sedimentaria, características de las rocas y/o arrecifes).

La batimetría puede ser obtenida a partir de métodos acústicos que permiten conocer la morfología del suelo. Estos métodos se basan en la emisión y retro recepción de ecos producidos por el paso de una onda acústica generada por una fuente de sonido artificial (ecosonda). La señal emitida se propaga en el agua hasta alcanzar el fondo donde se refleja y regresa hacia el transductor, siendo registrada. Posteriormente esta señal se transforma en profundidad conociendo el tiempo de viaje de la onda y la velocidad del sonido en el agua.

Actualmente existen cartas náuticas que presentan mapas de isobatas para la mayoría de las áreas costeras, lo que permite tener una idea preliminar del fondo marino. Sin embargo, la información que se obtiene es de baja resolución y resulta inadecuada para proyectar la instalación de hidrogeneradores. Es necesario tener estudios de batimetría con resolución detallada (decenas de metros o menos), y de preferencia con ecosonda multihaz.

Es importante mencionar que en los análisis de velocidad de corrientes mediante modelos numéricos de circulación oceánica los detalles de la batimetría son sensibles, aunque en la actualidad ésta no obstaculiza el desempeño de la mayoría de los modelos, es probable que se manifieste como un requisito crítico en estudios relacionados con la circulación oceánica [Gille & Smith., 2003].

En el ámbito de los costos, uno de los parámetros de mayor peso para es la profundidad y la distancia desde la costa hasta el sitio de interés. Si se pretende llevar la electricidad por cable, se debe considerar un costo aproximado de \$5000.00 USD/km. Adicionalmente, grandes profundidades pueden representar un obstáculo técnico, dificultando la instalación de pilotes, además de que el costo de instalación podría elevarse considerablemente. Para determinar los parámetros de anclaje, las características y comportamiento del suelo como la resistencia, la flexibilidad del fondo, así como las características mecánicas del material son necesarias. Por ejemplo, los suelos conformados por gravas presentan menores cualidades de agarre que los fondos de arena, y los fondos compuestos en su mayoría por rocas necesitan ser taladrados para fijar estructuras.

### 3.3. Evaluar la cercanía a la red eléctrica nacional o alternativa de almacenamiento

Uno de los objetivos finales al instalar uno o varios dispositivos de aprovechamiento energético marino es el de transportar y distribuir la electricidad producida. Es por ello que, la existencia de una red eléctrica en las proximidades es esencial, ya que los costos de transmisión de electricidad aumentan con la distancia y dependen de la cantidad de energía generada, así como de las opciones de transmisión. Los sistemas de CA (Corriente Alterna) son menos favorables que la transmisión de CD (Corriente Directa) debido a que los cables largos de CA submarinos tienen una alta

capacitancia causando pérdidas adicionales de energía. Además, pasando los 150 km de distancia, los costos de CA aumentan significativamente, por lo que 80 km se considera como el punto de transición entre CA y CD, por lo tanto, seleccionar sitios dentro de los 50 y 100 km se considera lo más conveniente [L. Cradden et al., 2016].

Es necesario conocer los detalles técnicos como la existencia de puntos de conexión, el voltaje y la capacidad de inyección. Otro punto importante es la proximidad del recurso al punto de consumo, en algunas zonas existen áreas densamente pobladas, lo que implica una alta demanda de energía por lo que es probable que exista una red sólida de abastecimiento a la que sea más fácil conectarse, sin embargo, en lugares con poca población es necesario tener en cuenta también alternativas de almacenamiento o la creación de microredes que permitan llevar electricidad a poblaciones sin conexión a la red nacional.

#### 3.4. Potenciales zonas de exclusión y conflicto de uso

Existe una amplia variedad de actividades que tienen lugar en los océanos, algunas de éstas evitarán directamente la instalación de dispositivos, mientras que otras podrían llegar a crear un conflicto con la economía local, por lo que es importante que ninguna de ellas sea ignorada.

##### 3.4.1. Localización de las rutas de navegación

Es importante conocer y registrar las rutas de tráfico marítimo ocupadas para evitar interferencia con ellas. Esto permitirá descartar estas zonas para la instalación de turbinas, o reubicar la ruta si fuera posible para evitar conflictos y accidentes durante la instalación y mantenimiento de dispositivos, además de poder resultar un riesgo para el tráfico marino en caso de que pudiera quedar un hidrogenador a la deriva. También es

importante considerar los accesos y distancia a puertos, así como las zonas de anclaje de embarcaciones para garantizar el acceso y funcionamiento normal de los puertos y la seguridad para la navegación [Zubiate et al., 2009]. Además, es recomendable una distancia máxima de viaje de 500 km para cimentación fija, y 200 km para cimientos flotantes [L. Cradden et al., 2016].

#### 3.4.2. Localización de zonas militares

En algunos países la actividad militar marina es de suma importancia, por lo que se consideran áreas de no acceso ya que se realizan maniobras militares de entrenamiento, capacitación, etc, por lo tanto, es importante descartar todas las áreas destinadas a tales efectos. Sin embargo, dependiendo de cada país es posible llegar a una negociación o incluso se puede dar prioridad a la extracción de energía.

#### 3.4.3. Localización de zonas de pesca

Generalmente la mayoría de las zonas costeras han sido exploradas y explotadas por la pesca, sin embargo, existen algunas áreas particulares donde esta actividad se ha desarrollado intensamente. Es de gran importancia definir estas zonas, con el fin de excluir ciertas áreas ya que la pesca se considera un factor importante que contribuye a la seguridad alimentaria, incrementando directamente el suministro de alimentos. Además de que la pesca y la acuicultura ofrecen empleo e ingresos base para la población local.

#### 3.4.4. Impacto ambiental

Este parámetro debería ser uno de los aspectos más importantes para decidir los alcances de proyectos de generación eléctrica por corrientes marinas.

Cuando se quiere instalar un dispositivo de aprovechamiento energético en el océano es esencial realizar un análisis detallado de toda la legislación existente, los ecosistemas marinos a menudo están bajo regímenes de protección especial, por lo que es importante consultar las legislaciones regionales, nacionales y a veces internacionales. La información sobre la presencia de especies bandera y en peligro de extinción (mamíferos marinos, aves marinas y sus rutas de migración) y sus hábitats debe recopilarse si existe. Muchas de las zonas naturales protegidas serán áreas de exclusión donde no es posible llevar a cabo una instalación.

El posible impacto ambiental de un dispositivo dependerá de sus características principales de operación, los materiales de construcción, así como las actividades de armado, mantenimiento y retiro de dispositivos en el océano. Este inventario ambiental tiene que incluir información de las posibles alteraciones en el medio físico (fondo marino), modificaciones hidrodinámicas (corrientes), el medio biótico (interacción de la biota con los dispositivos), efectos químicos y socioeconómicos (repercusiones económicas y sociales) [Mendoza, *et al.*, 2019].

Los principales impactos ambientales de los dispositivos de conversión de energía por corrientes marinas se pueden clasificar de acuerdo con su interacción con el medio ambiente de la siguiente manera:

#### 1.-Hidrodinámica.

a) Superficie de agua: Cambios en la dirección de corrientes, patrones de turbulencia.

b) Columna de agua: alteración de los patrones de transporte de sedimentos y dispersión de calor, modificación en la distribución de nutrientes y contaminantes.

#### 2.- Geomorfología.

a) Fondo Marino: Alteración de las características sedimentarias, y patrones de transporte sedimentario, como del hábitat bentónico.

b) Costa: Alteración de las playas cercanas debido a la erosión o sedimentación por concentración o atenuación de energía.

### 3.- Química.

a) Descargas y emisiones: Cambios en el transporte y distribución de gases, alteración en la disponibilidad y distribución de nutrientes.

### 4.- Biota.

a) Hábitat Marina: Alteración de rutas migratorias, hábitos reproductivos, disponibilidad de alimento y distribución de nutrientes, riesgos de colisión, sensibilidad a el ruido y campos electromagnéticos.

b) Hábitat costero: Modificación de vías de migración, destrucción de áreas de anidación o crianza, cambios en la disponibilidad de alimentos y nutrientes, interrupción de la conectividad del ecosistema.

### 5.- socioeconómico.

a) Pesca: Reducción del área disponible para la pesca o reproducción de especies de consumo humano, daño directo a la macrofauna marina [Mendoza, et al., 2019].

## CAPÍTULO 4. CASO DE ESTUDIO. COZUMEL Q.ROO.

### 4.1. Área de estudio

El área de estudio (Fig. 7) se encuentra dentro de la cuenca del Mar Caribe mexicano, en el borde oriental de la plataforma de Yucatán, entre la zona de Playa del Carmen y la Isla de Cozumel.

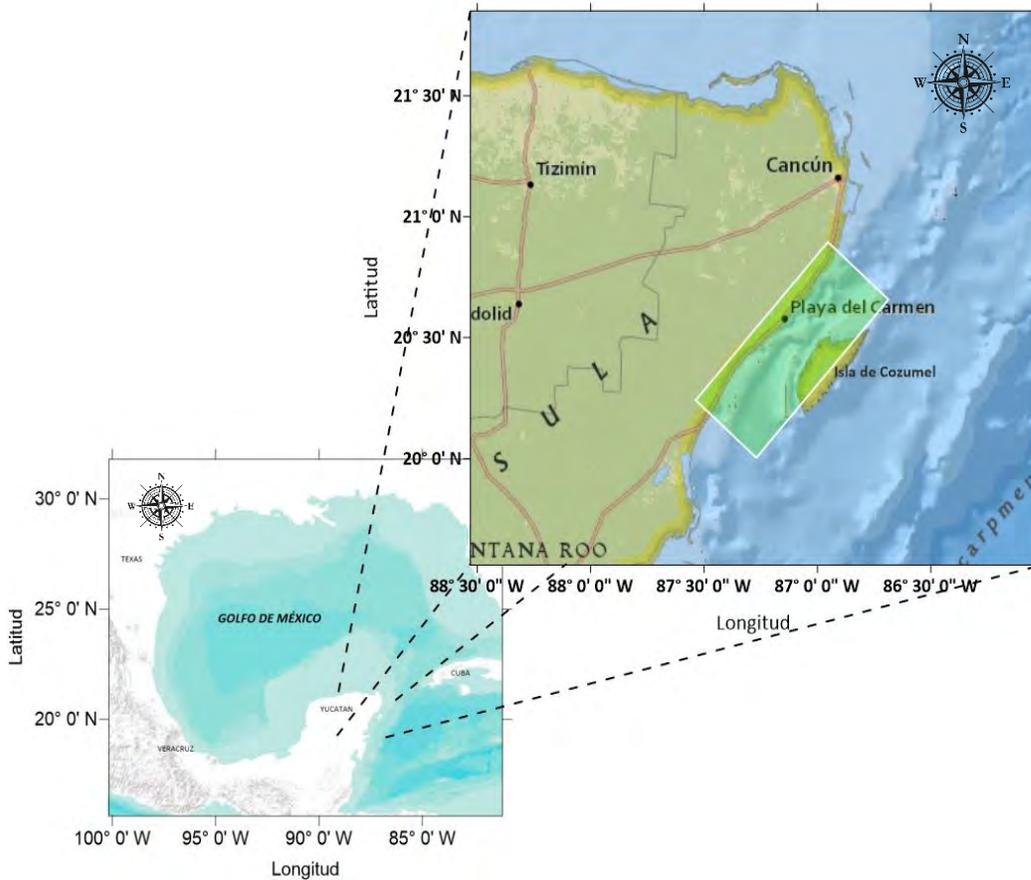


Figura 7. Localización del área de estudio.

La región del canal de Cozumel presenta 50 km de largo y 18 km de ancho. Está limitado al Oeste por la península de Yucatán y al Este por la Isla de Cozumel. La región marina de Cozumel tiene condiciones que promueven la existencia de corrientes intensas, con regiones costeras angostas y someras (20-30 m), una pendiente continental abrupta, y un amplio canal con profundidades entre 400 y 500 m, esta última presenta tirantes de agua

aproximados desde 35 a 50 m. Detalles de la batimetría se explicarán en la sección 4.3.

En el año 2010 la población en la ciudad de Cozumel era de 77,236 habitantes, haciéndola la ciudad más importante de la isla. Su consumo anual de electricidad registrado para el año 2012 fue de 238,510,444 kW con un gasto de alrededor de \$396,722,000 MXN (~20 millones USD) [SENER 2015]. Para el año 2015 la población aumentó a 86,415 habitantes [INEGI 2015], lo que fue acompañado por un incremento en el consumo de energía en ese año llegando a 274,750,000 kW. Este crecimiento en el consumo energético está relacionado con la tasa de crecimiento acelerado de la población, pero principalmente por la industria turística que soporta. La Isla de Cozumel es considerada como uno de los primeros destinos de cruceros turísticos a nivel mundial recibiendo, solo para el año 2017, un total de 1,242 cruceros, y aproximadamente 4 millones de turistas [SEDETUR 2017]. El uso de energía renovable marina podría contribuir a proporcionar un suministro de energía más estable y sostenible para la isla, representando incluso un ejemplo a nivel nacional del uso de energías renovables.

#### 4.2. Caracterización de corrientes marinas

La corriente que domina la región de Cozumel es parte del sistema de corrientes oceánicas de amplia escala y tiene su origen en la corriente de Brasil y la de las Guayanas, que entran al Caribe por el paso entre las islas de las Antillas Menores y Mayores [Morales 2004]. En la región sur del caribe mexicano (Banco Chinchorro), la corriente del Caimán (proveniente del Este del Caribe) choca con la península de Yucatán y redirige su trayectoria hacia el norte, paralela a la costa de Quintana Roo, convirtiéndose en la corriente de Yucatán (ver figura 8, Carrillo *et al.* 2019). Al entrar al Golfo de México por el canal de Yucatán [Wilkinson *et al.* 2009], la corriente de Yucatán da lugar a la corriente de Lazo y posteriormente a la corriente de Florida.

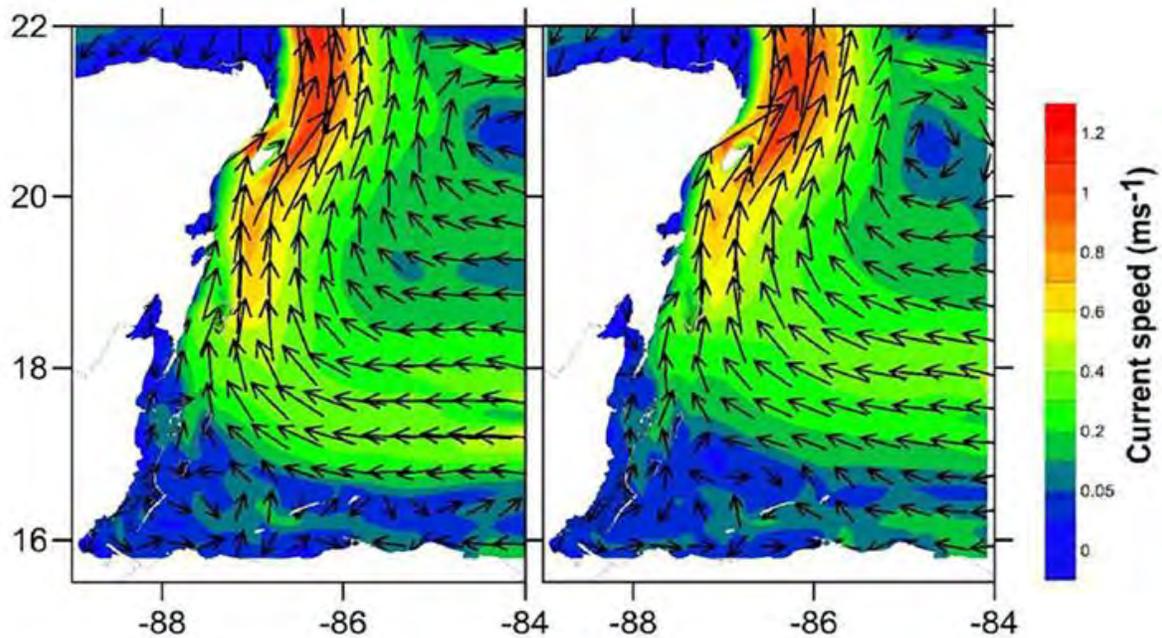


Figura 8. Magnitud de la velocidad de flujo y circulación de la corriente de Yucatán (Modificada de Carrillo et al. 2019)

Las características principales de la corriente de Yucatán eran poco conocidas debido a que las mediciones directas en la zona eran limitadas [Pillsbury 1890, Hansen y Molinari 1979, Maul et al. 1985]. Sin embargo, se han realizado mediciones continuas (anclajes) a lo ancho del canal de Yucatán, las cuales revelaron que el flujo de la corriente proviene desde el sur de la isla de Cozumel atravesando la isla por ambas costas [Carrillo et al. 2015], presentando un núcleo de entre 50 y 100 km de ancho aproximadamente [Badan et al. 2005]. Su transporte promedio es de  $23 \pm 3$  Sv (millones de  $m^3/s$ ), con una velocidad promedio de 1.5 m/s cerca de la superficie la cual disminuye poco a poco hasta los 800 m de profundidad [Candela et al. 2003, Ochoa et al. 2003]. A la altura del canal de Yucatán la dirección de la corriente varía de NE a NW y alcanza una velocidad máxima de 2.5 m/s, pero hacia el sur (Mahahual a Cabo Catoche) su dirección es paralela a la costa (hacia el N), sin inversiones y presenta una temperatura cálida y alta salinidad [Reyes. 2005].

Existe una importante relación entre la corriente de los canales de Cozumel y Yucatán que puede ayudar a entender el comportamiento subsecuente de la corriente de Lazo dentro del golfo de México [Athié *et al.* 2011]. A pesar de las dimensiones pequeñas del canal de Cozumel (18 km de ancho y 400 m de profundidad) el flujo que atraviesa por este canal es de gran importancia debido a que induce una intensificación de la corriente de Yucatán [Cetina *et al.* 2006]. Las observaciones en el canal de Cozumel han determinado que la corriente tiene una velocidad superficial promedio de 1.1 m/s a 30 m de profundidad, y un transporte de 5.1 Sv [Chávez *et al.* 2003], lo que representa alrededor del 20% del transporte observado en el canal de Yucatán. Cetina *et al.* (2006) analizaron observaciones de la corriente a lo largo de la costa mexicana en el Caribe (desde el sur del banco Chinchorro hasta Puerto Morelos, al norte de la isla Cozumel) y las compararon con simulaciones numéricas. Estos autores encontraron que la variabilidad en la región está controlada principalmente por el paso de remolinos, donde su papel principal es regular la intensidad de la corriente de Yucatán.

#### 4.2.1. Adquisición de datos y series de tiempo

La Figura 9 muestra información generada por el CEMIE-Océano a partir del modelo global NEMO con resolución de  $1/12^\circ$ , 85 niveles en la vertical y forzamiento DFSA y DFS5, de 1985 a 2012, donde se muestran los promedios vectoriales en superficie y a 50 m de profundidad; y los valores máximos en los mismos niveles. En dicha figura se puede observar que existe un incremento en la velocidad de la corriente marina que atraviesa el canal de Cozumel con valores de hasta 2 m/s en superficie y de entre 1.2 y 1.4 m/s a 50 m de profundidad. Estos resultados sugieren que las velocidades más intensas se localizan en la región norte de la isla de Cozumel en la zona conocida como Punta (playa) Barracuda, antes que la línea de costa se reoriente hacia isla de la Pasión.

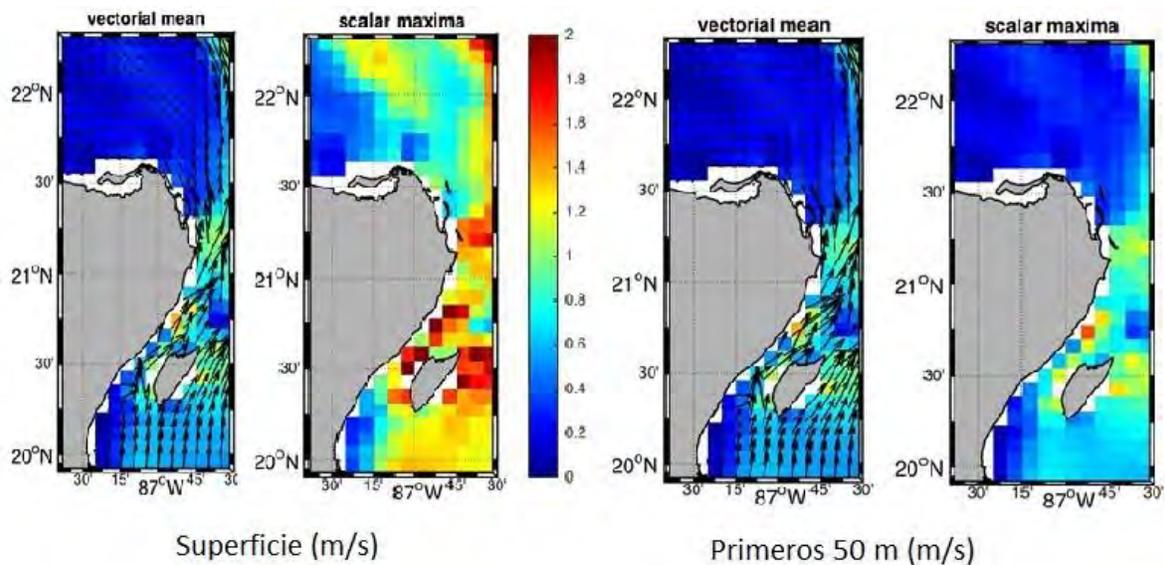


Figura 9. Modelación de la corriente de Cozumel.

Se utilizaron dos conjuntos de datos para llevar a cabo el análisis de velocidad y potencia de la corriente, los primeros fueron proporcionados por el grupo CANEK (Dres. Julio Candela, Julio Sheinbaum y José Ochoa: “Estudio de la circulación y el intercambio a través del Canal de Yucatán”) del Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada (CICESE). Estas mediciones provienen de perfiladores acústicos anclados a

una profundidad de 400 m en el canal de Cozumel desde junio de 2009, hasta mayo del 2011. Las mediciones se realizaron con un Perfilador Acústico de Corriente por Efecto Doppler (ADCP), a una frecuencia de muestreo de media hora.

El segundo grupo de datos fue proporcionado por el Laboratorio de Procesos Costeros y Oceanografía Física de la Facultad de Ciencias de la UNAM-Sisal (Dra. Cecilia Enríquez). Estas mediciones de velocidad de corriente se realizaron en la costa insular del canal de Cozumel, en profundidades de 15 m. Estos datos fueron adquiridos por un equipo AQP (Nortek) en un periodo de 3 meses (diciembre-febrero) de 2016-2017 (ver figura 10). Los datos fueron procesados con ayuda del software MATLAB para obtener las características principales de la corriente en estas dos zonas.

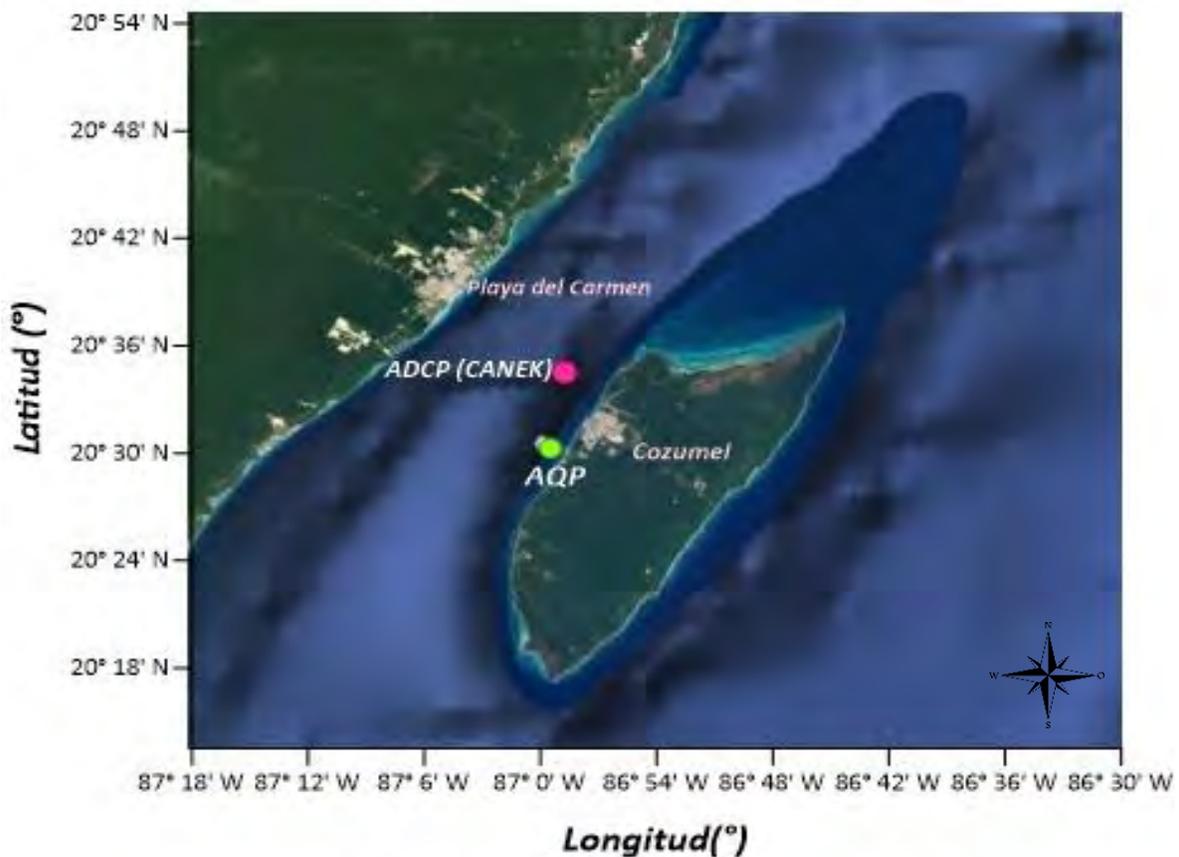


Figura 10. Posición de los equipos AQP y ADCP proyecto CANEK.

- Series de tiempo de velocidad

Con los datos de ADCP y AQP se realizó un análisis de dirección y magnitud de la corriente tanto para las componentes norte – sur (V) y este-oeste (U), con la finalidad de conocer y observar el comportamiento de las mediciones en el transcurso del tiempo (Figuras 11 y 12).

Para los datos profundos se analizaron las primeras 6 celdas que fueron medidas en intervalos de 16 m, desde 50 m hasta 130 m, y se representaron gráficamente las series de tiempo para cada profundidad (perfil vertical) con el fin de visualizar la variabilidad de la corriente durante el periodo de medición. En general, la velocidad de la corriente tiende a ser mayor en profundidades relativamente someras aproximadamente de 66 mm donde alcanza cerca de 2 m/s y tiende a disminuir conforme aumenta la profundidad, ya que a 130 m se puede observar que solo en algunos meses (febrero y octubre), la velocidad presenta valores cercanos o mayores a 1.5 m/s. Por otro lado, se observa que la corriente no presenta cambios significativos en su dirección.

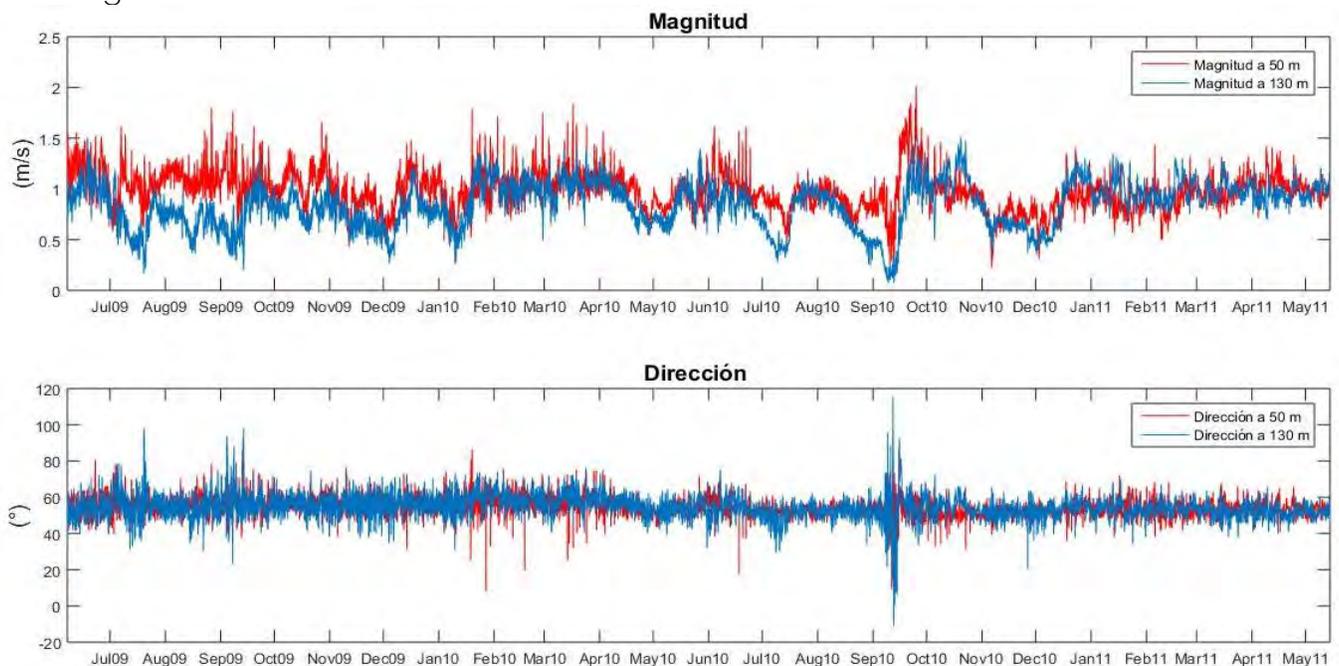


Figura 11. Serie de tiempo de la magnitud y dirección a 50 m y 130 m de profundidad.

En los datos costeros, los intervalos de profundidad son relativamente pequeños, por lo que no se presenta una estructura vertical importante de la corriente. Debido a esto solo se presentan los datos promediados en la vertical de magnitud y dirección.

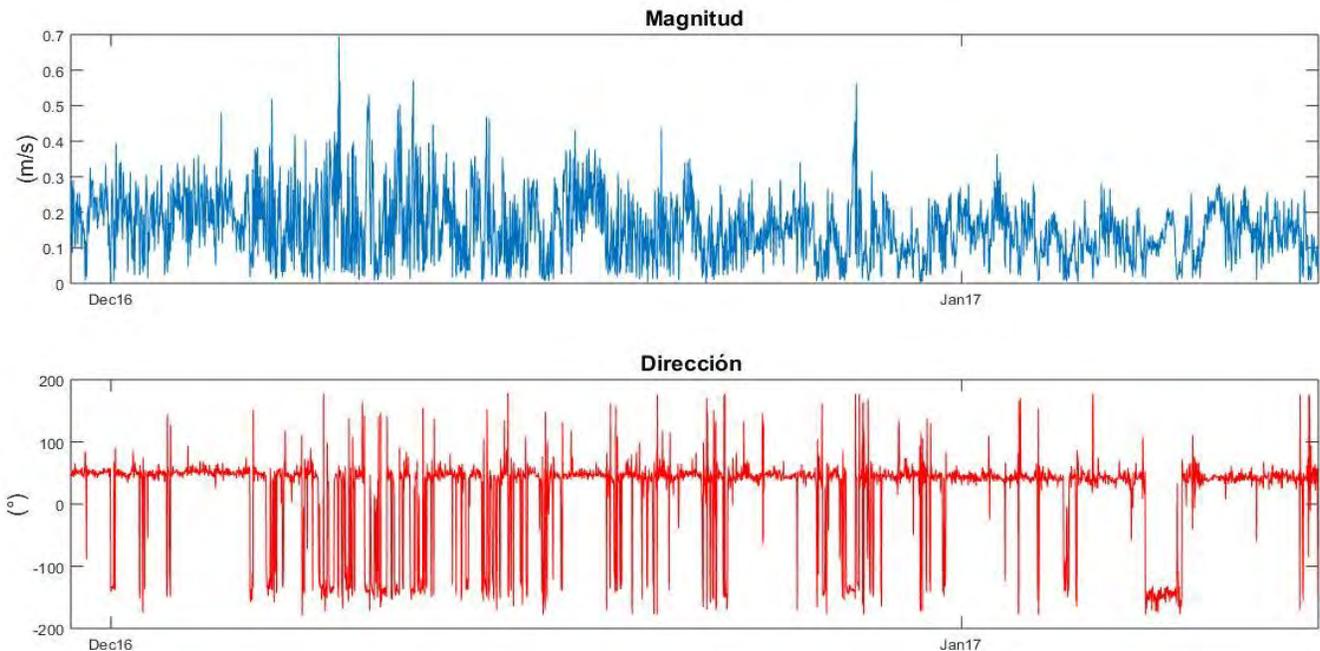


Figura 12. Serie de tiempo de la magnitud y dirección en la zona costera.

En las series de tiempo de los datos costeros se observa una amplia variabilidad en la intensidad de corriente, con magnitudes bajas, en comparación con los datos profundos, pues difícilmente existen valores de **velocidad**  $\geq 0.5$  m/s, y la mayoría de los datos oscilan entre valores de 0.2 y 0.3 m/s. Por otro lado, es evidente que la dirección tiene continuas inversiones, lo que indica influencias fuertes friccionales y de otros procesos (vientos y mareas).

#### 4.2.2. Distribuciones de probabilidad de velocidades

Es también útil describir los rangos de velocidades observadas utilizando distribuciones de probabilidad e histogramas de frecuencia. La figura 13 muestra los histogramas de frecuencia de la velocidad para poder observar el porcentaje de ocurrencia para varios intervalos de velocidad en cada celda de profundidad.

En la figura 13, el primer histograma muestra que en la zona profunda del canal (400 m) la velocidad de la corriente en la celda más superficial (50 m) tiene una moda de entre 0.8 y 1 m/s (~40% de las observaciones), y que las velocidades más intensas (e.g. 1.4 – 1.6 m/s) son escasas (~1% del tiempo). Sin embargo, a 66 m de profundidad, velocidades entre 0.8 y 1 m/s son más comunes (más del 45% del tiempo) y se registran valores de más de 1.6 m/s. Para mayores profundidades, los valores de corriente más observados oscilan entre 0.6 y 0.8 m/s (35 – 40 % del tiempo), y la velocidad más alta registrada con porcentajes observables es de 1.2 - 1.4 m/s. En resumen, la velocidad a grandes profundidades (130 m) es muy pequeña la mayor parte del tiempo, mientras que en profundidades más someras (50 – 60 m), es mucho más común observar velocidades más intensas la mayor parte del tiempo, sobre todo en profundidades cercanas a los 60 m. Por otro lado, el histograma 5 muestra que, en la zona costera de la isla de Cozumel, los valores de velocidad de corriente más observados son muy bajos, oscilando entre un intervalo de 0 y 0.2 m/s (más del 75% del tiempo), y la velocidad más alta registrada con porcentajes observables es de 0.4 – 0.6 m/s. Además, en esta zona también se pueden observar porcentajes de tiempo significativo en donde existen cambios en la dirección de la corriente.

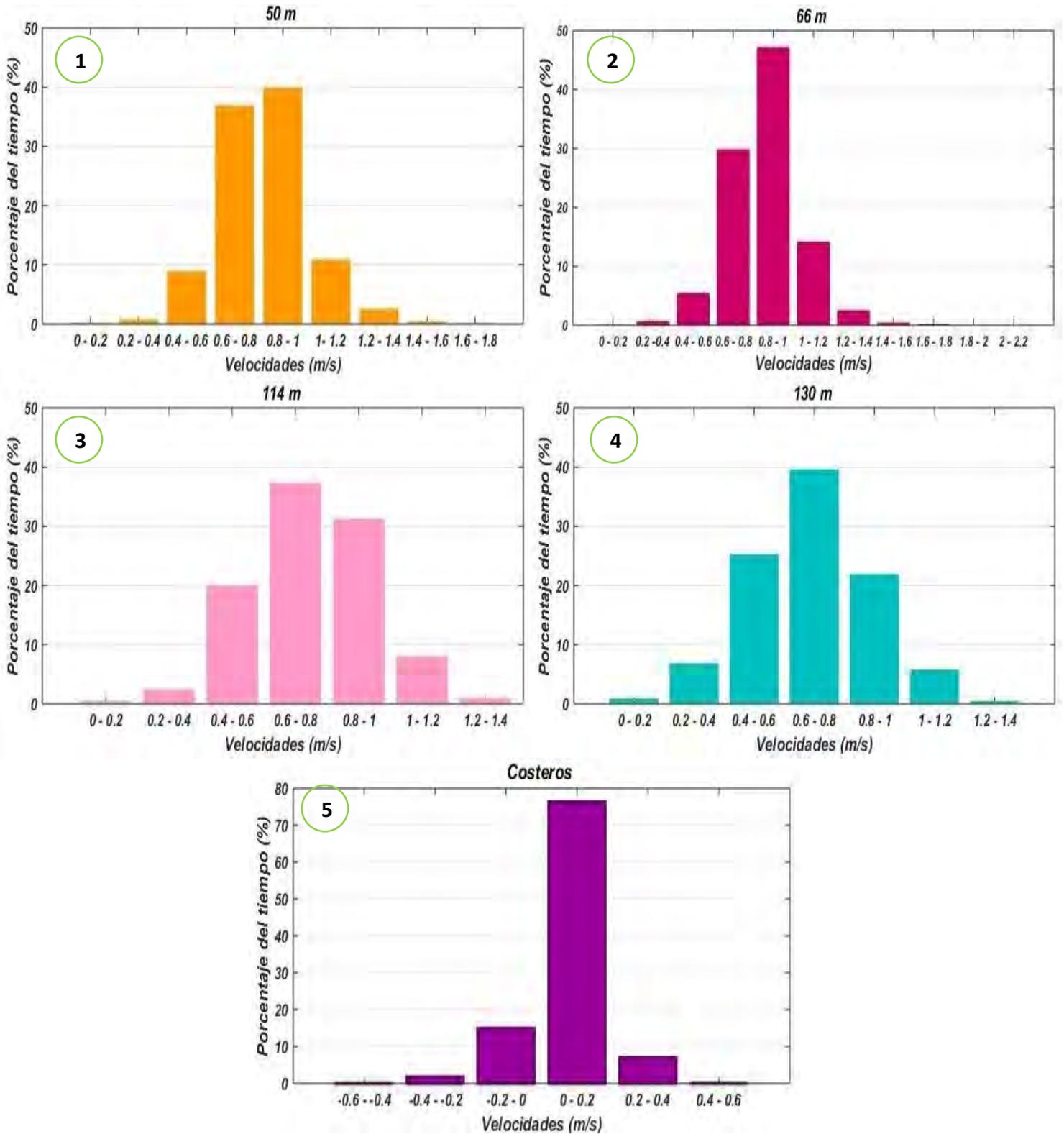


Figura 13. Histogramas de frecuencias de la velocidad de corriente a diferentes celdas de profundidad. 1) 50 m, 2) 66 m, 3) 114 m, 4) 130 m, 5) Costeros.

#### 4.2.3. Evaluación de la Potencia anual acumulada

Con los valores y resultados obtenidos de los datos del ADCP en cuanto a la velocidad de la corriente y la profundidad óptima, se calculó la potencia acumulada total (sin incluir áreas o eficiencias, con la ecuación 3) para conocer cuánta sería la energía que se podría obtener con este recurso. El resultado se presenta en la Tabla 1 y la Figura 14.

Tabla 1. Potencia acumulada en intervalos de profundidad.

Profundidad	Potencia acumulada anual	Potencia por día	Potencia por hora
Costero	30,896 W	84.6453 W	3.5269 W
50 m	$2.0088 \times 10^6$ W	5,503.4 W	229.31 W
66 m	$2.66 \times 10^6$ W	7,285 W	303.54 W
82 m	$2.3484 \times 10^6$ W	6,434 W	268.08 W
98 m	$1.9433 \times 10^6$ W	5,324.1 W	221.84 W
114 m	$1.3994 \times 10^6$ W	3,834.1 W	159.75 W
130 m	$8.8393 \times 10^5$ W	2,421.7 W	100.91 W

Nota: Los valores para los datos someros (15 m) se extrapolaron a un año.

Para calcular el valor de la potencia acumulada anual se realizó la sumatoria de la potencia de toda la serie de tiempo dividida entre el número de días de la serie de tiempo y multiplicado por 365 días.

Analizando los resultados de la estimación de potencia acumulada anual, se obtuvieron valores máximos totales de 2.66 MW a 66 m de profundidad. Sin embargo, estos valores deberán ser multiplicados por los coeficientes de eficiencia (acorde con la tecnología disponible), y por el área de los hidrogeneradores. A grosso modo, si esta energía pudiera ser aprovechada de forma eficiente ( $n \sim 0.4$ ) por turbinas de 5 m de diámetro; se necesitarían en el orden de miles de turbinas para proveer de energía a Cozumel.

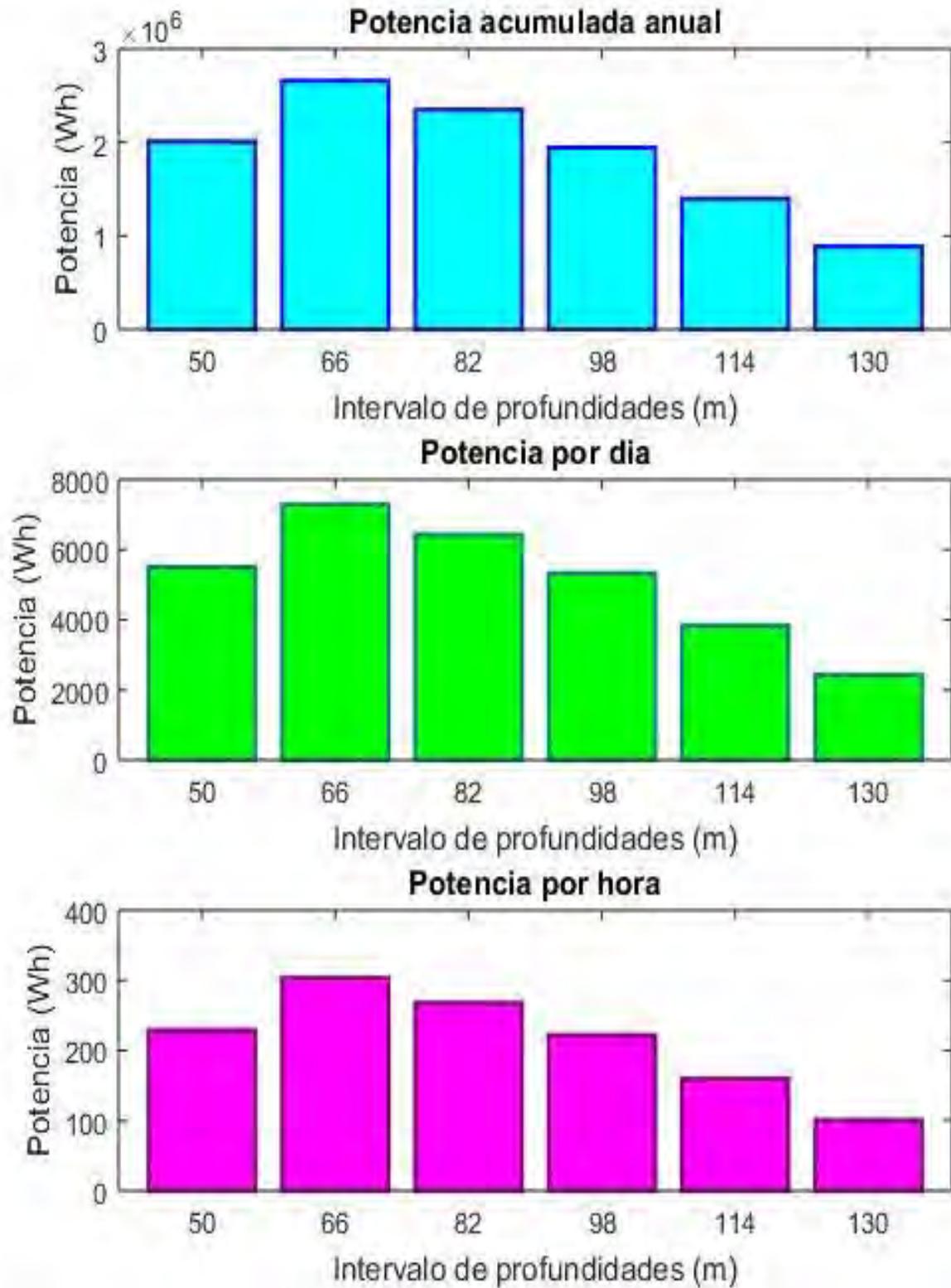


Figura 14. Potencia acumulada anual, por día y por hora en cada intervalo de profundidad

#### 4.2.4. Análisis variabilidad de la corriente en Cozumel

Una de las características principales de las energías renovables es que el recurso (sol, viento, corrientes) presenta variabilidad incontrolable, intrínseca del comportamiento de la naturaleza. En el proceso de generación eléctrica, estas fluctuaciones pueden controlarse (hasta cierto punto) usando estrategias de almacenamiento combinadas con acondicionadores de señales, sin embargo, si la oscilación es tan larga que el rotor pierde inercia, se podría generar un problema de desabasto momentáneo. Por otro lado, las fluctuaciones de la velocidad pueden afectar estructuralmente los hidrogeneradores y generar fatigas, lo cual dependerá de las frecuencias de oscilación de las corrientes y de las características de las turbinas. Este tipo de fallas por fatiga pueden ser un problema importante, por lo que se necesita caracterizar a detalle la amplitud y frecuencias de las fluctuaciones de velocidad.

Para la caracterización se realizó un análisis espectral de la velocidad de corriente utilizando el método del periodograma de Welch. El espectro resultante (Fig. 15-21) permite conocer la distribución de energía en cada banda de frecuencia de las ondas presentes en la señal. Este análisis incluye un cálculo de la confianza estadística del estimado espectral.

Para los datos del anclaje profundo en las 6 diferentes profundidades (Fig. 15-20), se pueden observar picos reducidos correspondientes a mareas diurnas con una frecuencia  $\sim 0.04$  cph y semidiurnas con frecuencias  $\sim 0.08$  cph. Estos picos reducidos son un reflejo de la poca influencia que los procesos de marea tienen en la zona de Cozumel. Para frecuencias  $> 0.1$  cph los espectros tienden a disminuir su densidad espectral a una razón de  $-5/3$  (línea negra), lo cual podría interpretarse como que las corrientes en Cozumel a esas frecuencias presentan una disipación de energía tipo turbulenta, aunque estrictamente hablando no pueden ser clasificados como turbulencia pues no tienen las frecuencias adecuadas ( $O(\text{Hz})$ ). Este comportamiento tipo turbulento es menos marcado hacia zonas más

profundas. En bajas frecuencias (0.001 cph ~ 42 días) no existen picos muy marcados (variaciones periódicas) en las capas superficiales, pero hacia las regiones más profundas los picos de bajas frecuencia están mejor definidos.

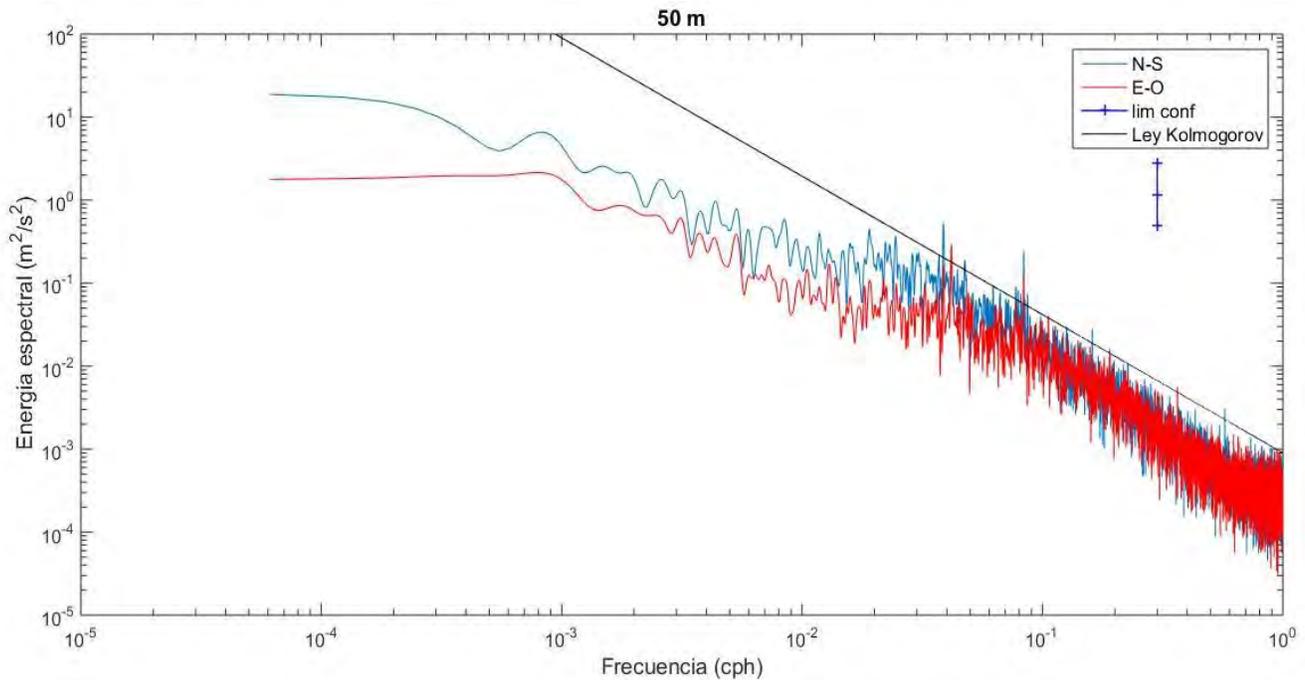


Figura 15. Espectro de la serie de datos de velocidad de corriente Componentes Norte-Sur, Este-Oeste a 50 m de profundidad.

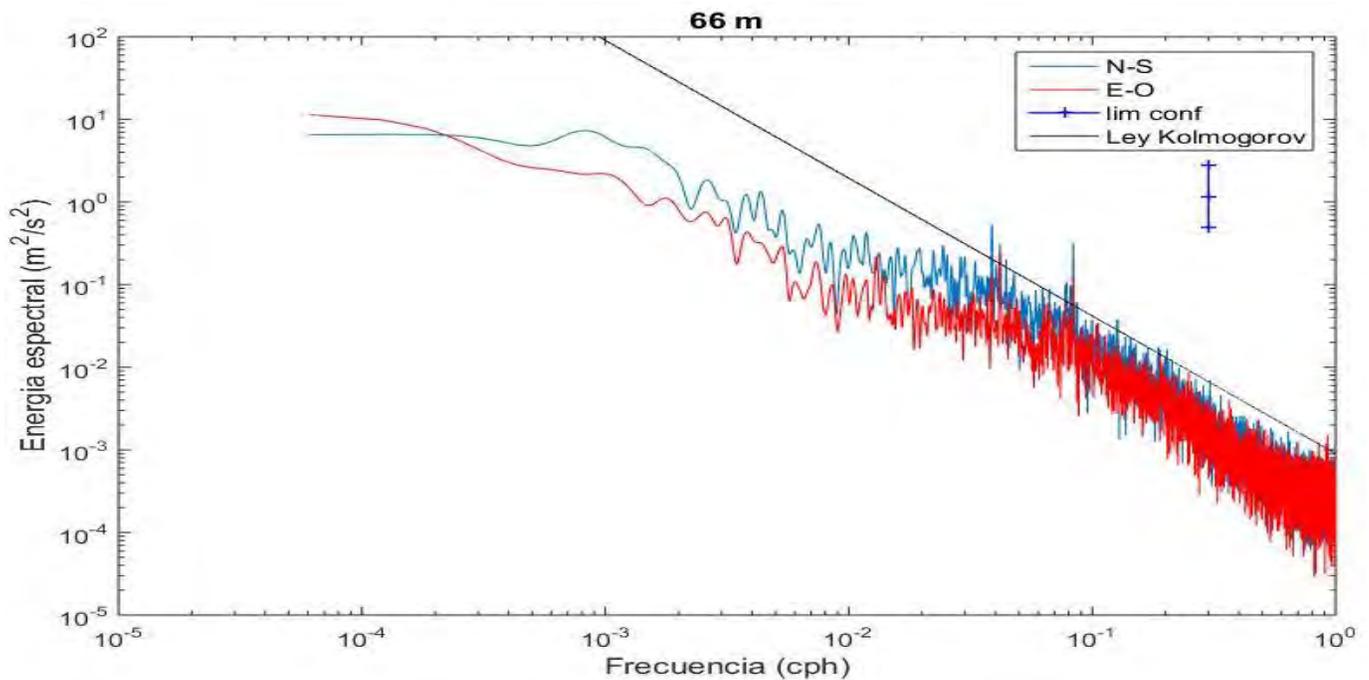


Figura 16. Espectro de la serie de datos de velocidad de corriente Componentes Norte-Sur, Este-Oeste a 66 m de profundidad.

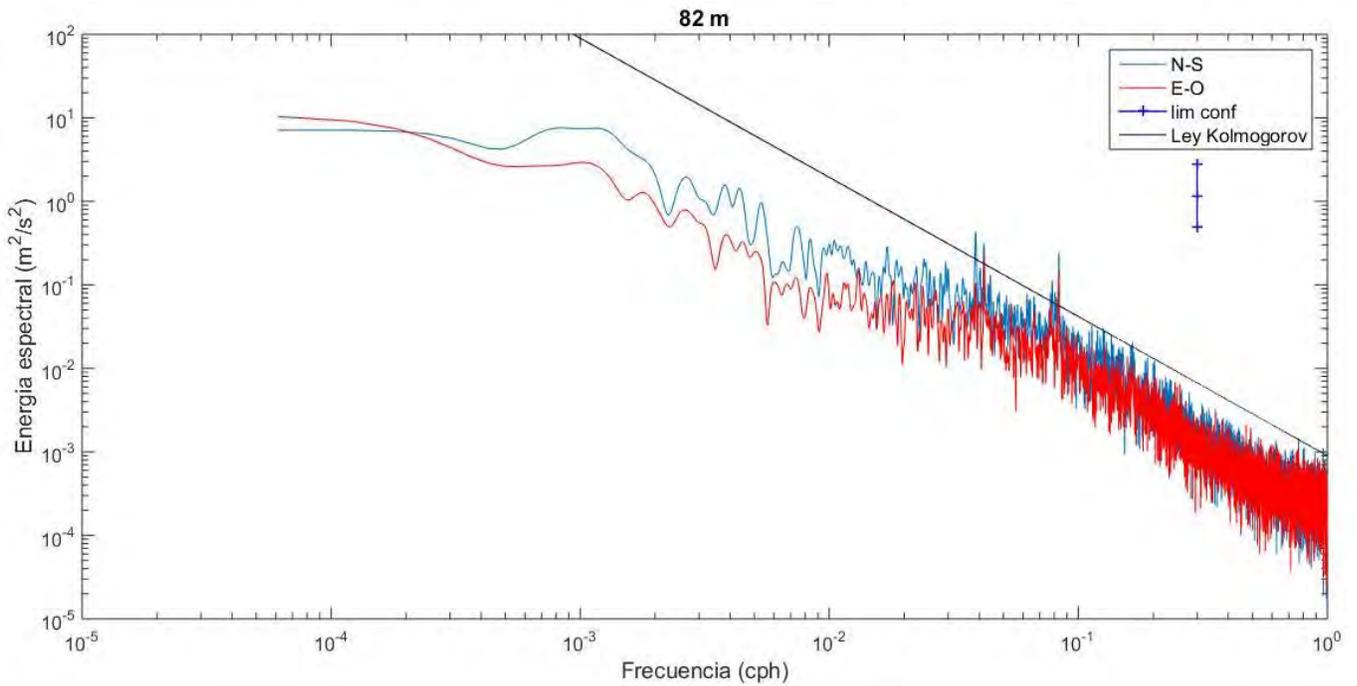


Figura 17. Espectro de la serie de datos de velocidad de corriente Componentes Norte-Sur, Este-Oeste a 82 m de profundidad.

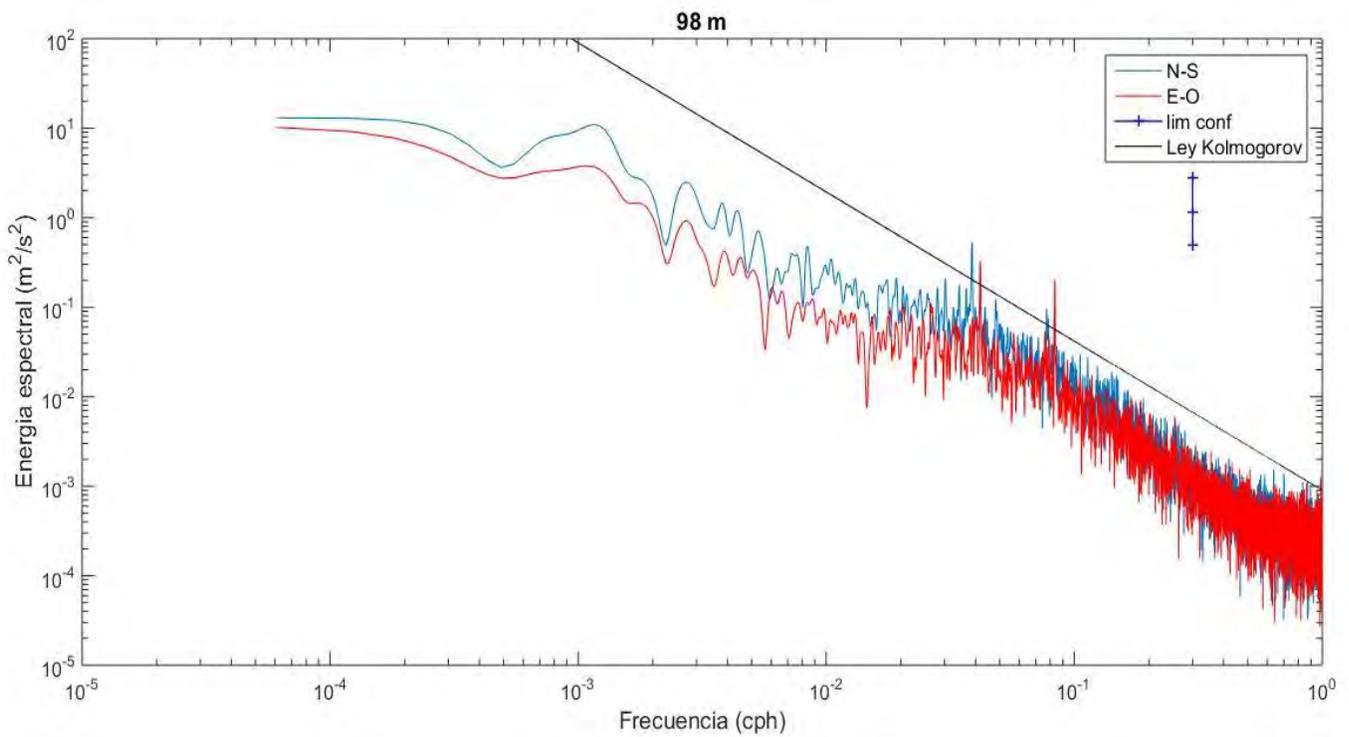


Figura 18. Espectro de la serie de datos de velocidad de corriente Componentes Norte-Sur, Este-Oeste a 98 m de profundidad.

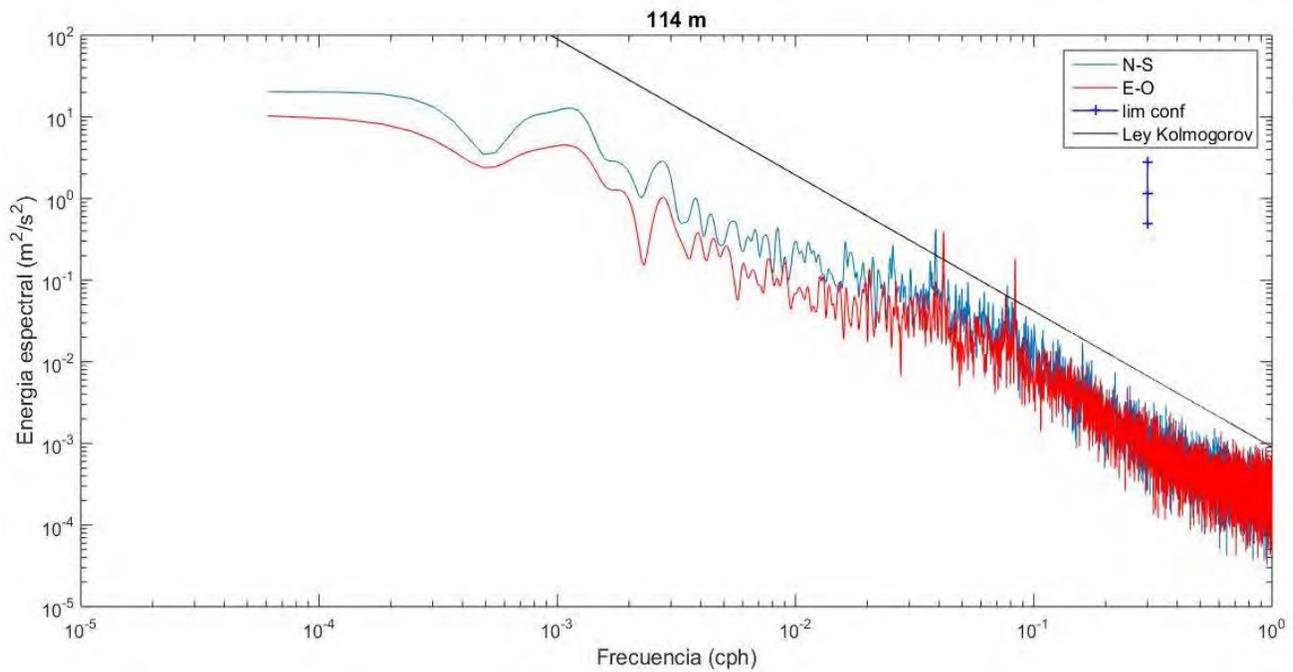


Figura 19. Espectro de la serie de datos de velocidad de corriente Componentes Norte-Sur, Este-Oeste a 114 m de profundidad.

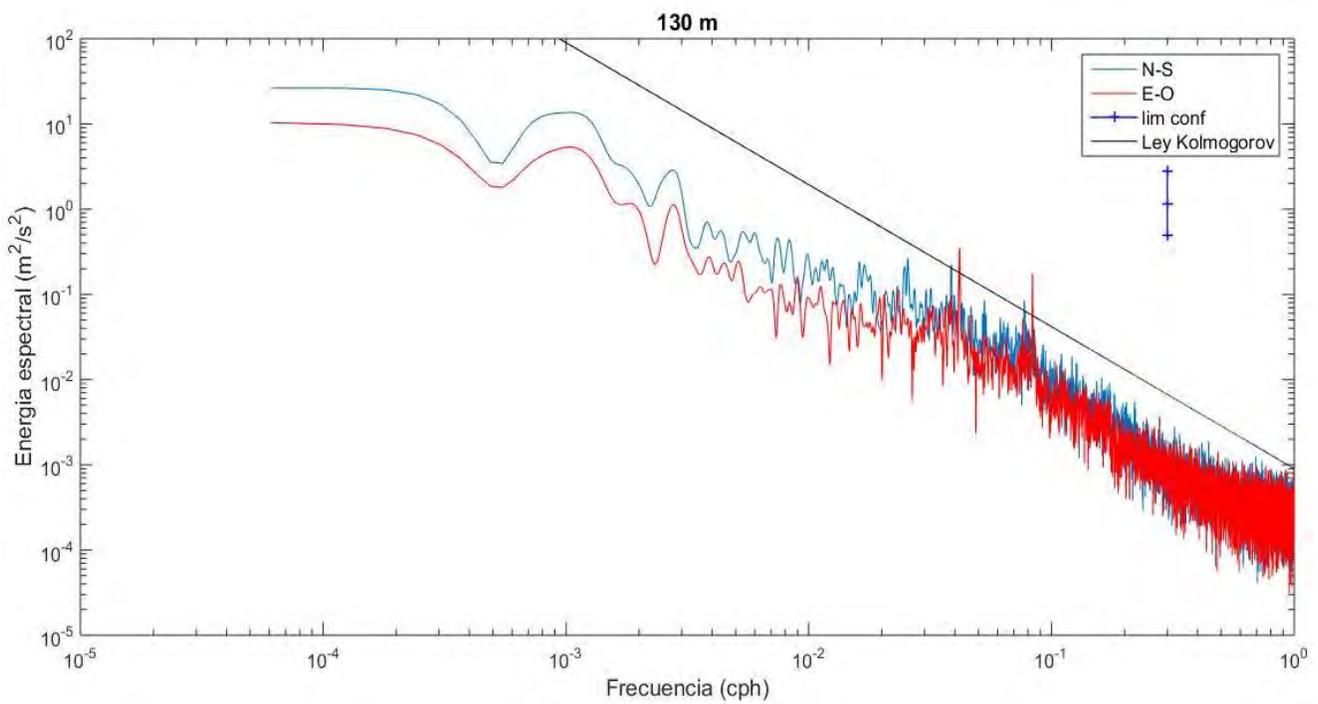


Figura 20. Espectro de la serie de datos de velocidad de corriente Componentes Norte-Sur, Este-Oeste a 130 m de profundidad.

El espectro de los datos costeros (AQP) (Fig. 21) muestra diferencias importantes con los de la región profunda, como por ejemplo una menor influencia del efecto de la marea, pues los picos a 0.04 y 0.08 cph son aún menos perceptibles. Por otro lado, el ajuste a la Ley de Kolmogorov (pendiente  $-5/3$ ) para las frecuencias  $> 0.1$  cph no es tan claro como en la región profunda, lo que sugiere que en la región costera estas frecuencias no disipan energía de forma turbulenta.

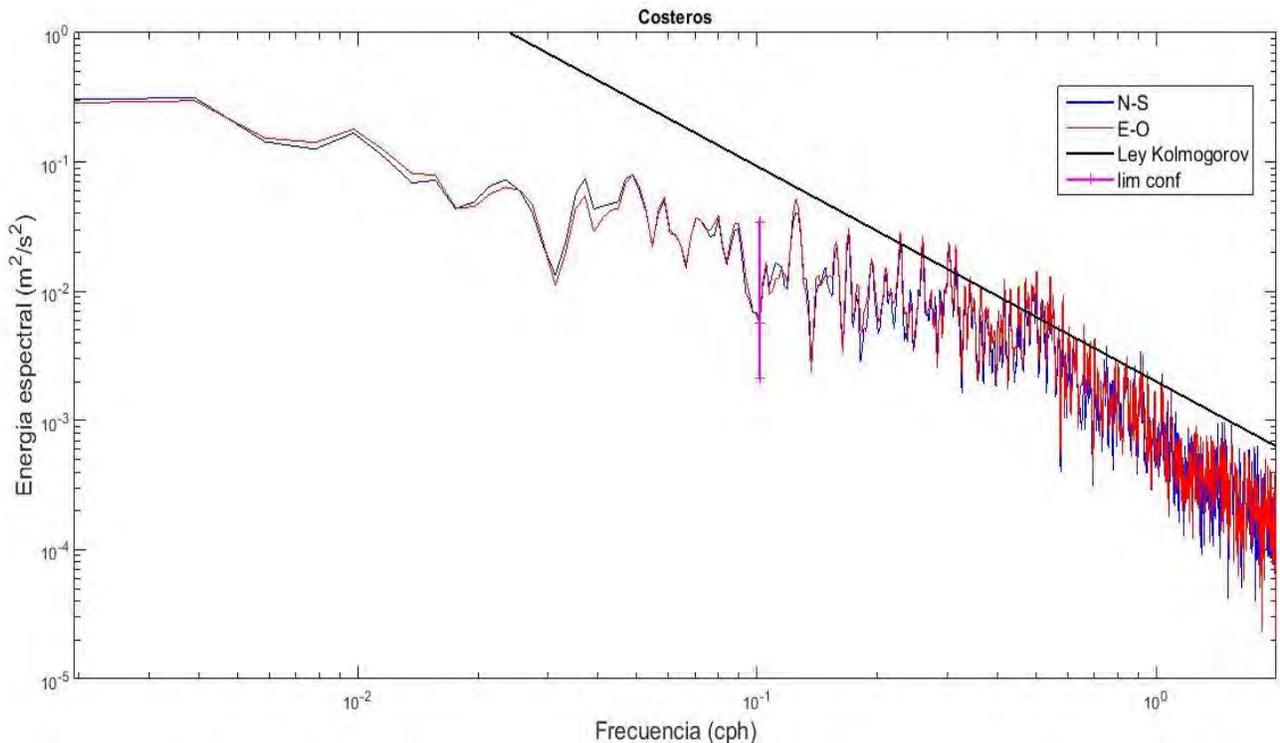


Figura 21. Espectro de la serie de datos de velocidad de corriente costeros componentes Norte-Sur, Este-Oeste.

El análisis espectral del comportamiento de la corriente permite identificar las principales frecuencias de oscilación en la zona, las cuales son importantes conocer y tomar en cuenta dentro de las características de funcionamiento del tipo de turbina a utilizar.

#### 4.2.5. Análisis de la potencia por frecuencias de variabilidad

De acuerdo con lo mencionado anteriormente (ecuación 3), la potencia extraída de una corriente depende directamente de la densidad del fluido, de su velocidad al cubo y de la superficie de la sección atravesada por el fluido en una turbina. Sin embargo, si consideramos que la velocidad total  $V$  puede descomponerse en valores promedio y velocidades a distintas frecuencias de variación (originadas por distintos procesos oceanográficos), la velocidad al cubo debería ser expresada de la siguiente forma:

$$V^3 = (V_{prom} + V_{hf} + V_{lf})^3 \quad (7)$$

Donde  $V_{prom}$  es la velocidad promedio,  $V_{hf}$  la velocidad de alta frecuencia y  $V_{lf}$  la velocidad de baja frecuencia. Si se desarrolla este trinomio al cubo, se obtiene un total de 10 términos, los cuales representan todas las variaciones de la corriente y su interacción:

Tabla 2. Descripción de los 10 términos resultantes de expandir un trinomio al cubo con componentes promedio, de altas y bajas frecuencias.

Término	Descripción matemática	Significado
1	$\bar{V}_{prom}^3$	Velocidad promedio al cubo
2	$\langle \tilde{V}_{hf}^3 \rangle$	Sesgo de la velocidad de alta frecuencia
3	$\langle \tilde{V}_{lf}^3 \rangle$	Sesgo de la velocidad de baja frecuencia
4	$3 \langle \tilde{V}_{hf}^2 \rangle \bar{V}$	Interacción entre la variabilidad de alta frecuencia promedio
5	$3 \langle \tilde{V}_{lf}^2 \rangle \bar{V}$	Interacción entre la variabilidad de baja frecuencia promedio
6	$6 \langle \tilde{V}_{hf} \tilde{V}_{lf} \rangle \bar{V}$	Interacción entre los flujos a todas frecuencias
7	$3 \langle \tilde{V}_{lf}^2 \tilde{V}_{hf} \rangle$	Correlación entre variabilidad de baja frecuencia y las oscilaciones turbulentas
8	$3 \langle \tilde{V}_{hf}^2 \tilde{V}_{lf} \rangle$	Correlación entre variabilidad turbulenta y las oscilaciones de baja frecuencia
9	$3 \langle \tilde{V}_{hf} \rangle \bar{V}^3$	Término proporcional al empuje de la corriente promedio y las oscilaciones de alta frecuencia
10	$3 \langle \tilde{V}_{lf} \rangle \bar{V}^3$	Término proporcional al empuje de la corriente promedio y las oscilaciones de baja frecuencia

Para un hidrogenerador de álabes, la cantidad de potencia proveniente de las velocidades promedio, es la propiedad del flujo más atractiva para la generación de energía. Por otro lado, las velocidades al cuadrado representan fuerzas que pueden causar fatigas ya que estas están vinculadas directamente con la variabilidad de la corriente. La frecuencia de oscilación es muy importante, siendo las frecuencias altas las más dañinas para estos artefactos.

Con la finalidad de aplicar esta metodología a las corrientes de los anclajes de Cozumel, se utilizaron filtros de Fourier para poder separar las frecuencias específicas de interés, los cuales permiten discriminar las frecuencias a partir de las cuales deseamos analizar nuestras series de tiempo.

Para los datos profundos, el análisis de los espectros (Figuras 15 a 21) permitió decidir cómo separar las frecuencias. Se decidió utilizar un valle con frecuencia de 0.1 cph (10 horas), ya que es la frecuencia a la cual el espectro empieza a comportarse con una pendiente de  $-5/3$  (comportamiento de kolmogorov) similar a turbulencia para categorizar las altas y bajas frecuencias. La Figura 22 muestra un ejemplo de la serie de tiempo filtrada para el anclaje profundo en la celda de 50 m.

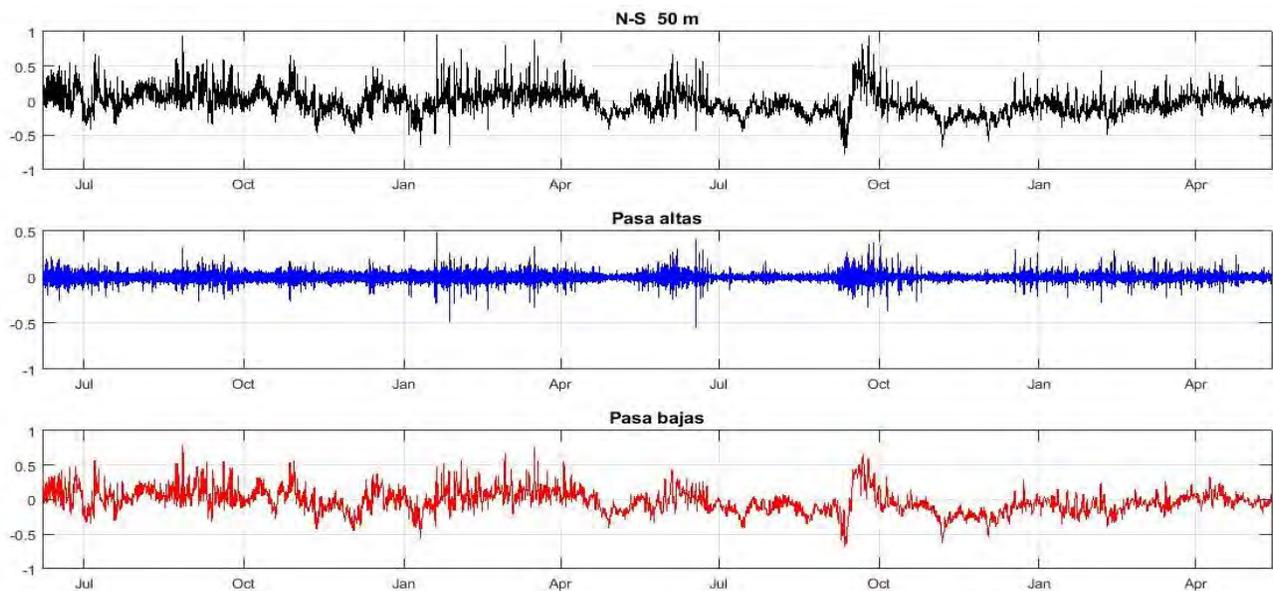


Figura 22. Filtro de Fourier para la señal en profundidad de 50 m componente N-S, separando altas y bajas frecuencias a partir de 0.1 cph.

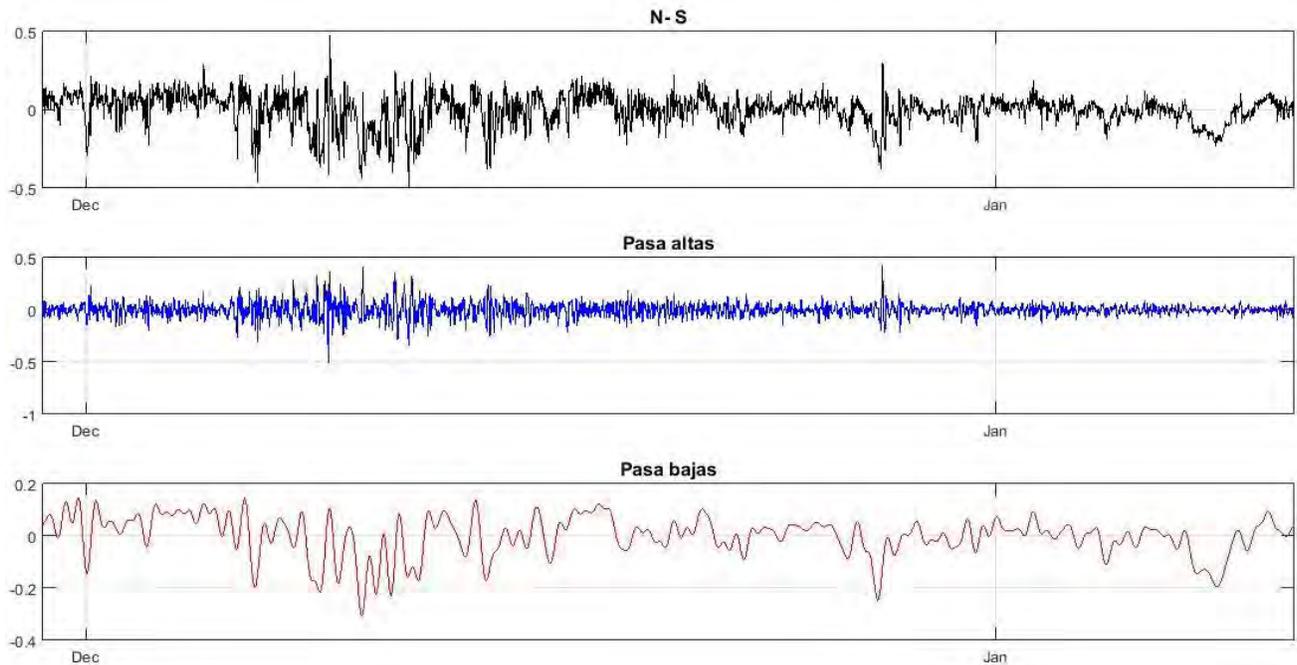


Figura 23. Filtro de Fourier para la señal en datos costeros componente N-S, separando altas y bajas frecuencias a partir de 0.1 cph.

Para lograr una comparación adecuada, los datos AQP costeros se separaron con los mismos criterios que el instrumento del canal. La Figura 23 muestra un ejemplo de las series de tiempo filtradas en la componente N-S.

Los términos de la velocidad calculados para los datos del canal (ADCP) a diferentes intervalos de profundidad, tienen una diferencia considerable con respecto a los datos costeros del AQP.

Los datos del canal (ADCP), tienen el término 1 dominante (valores promedio de la velocidad de corriente) en ambas componentes (N-S, E-O). Es decir, la corriente de Cozumel es muy persistente con poca variabilidad. Curiosamente, las intensidades más grandes se encuentran a una profundidad de 66 m y tiende a disminuir conforme aumenta la profundidad (Fig. 24 y 25).

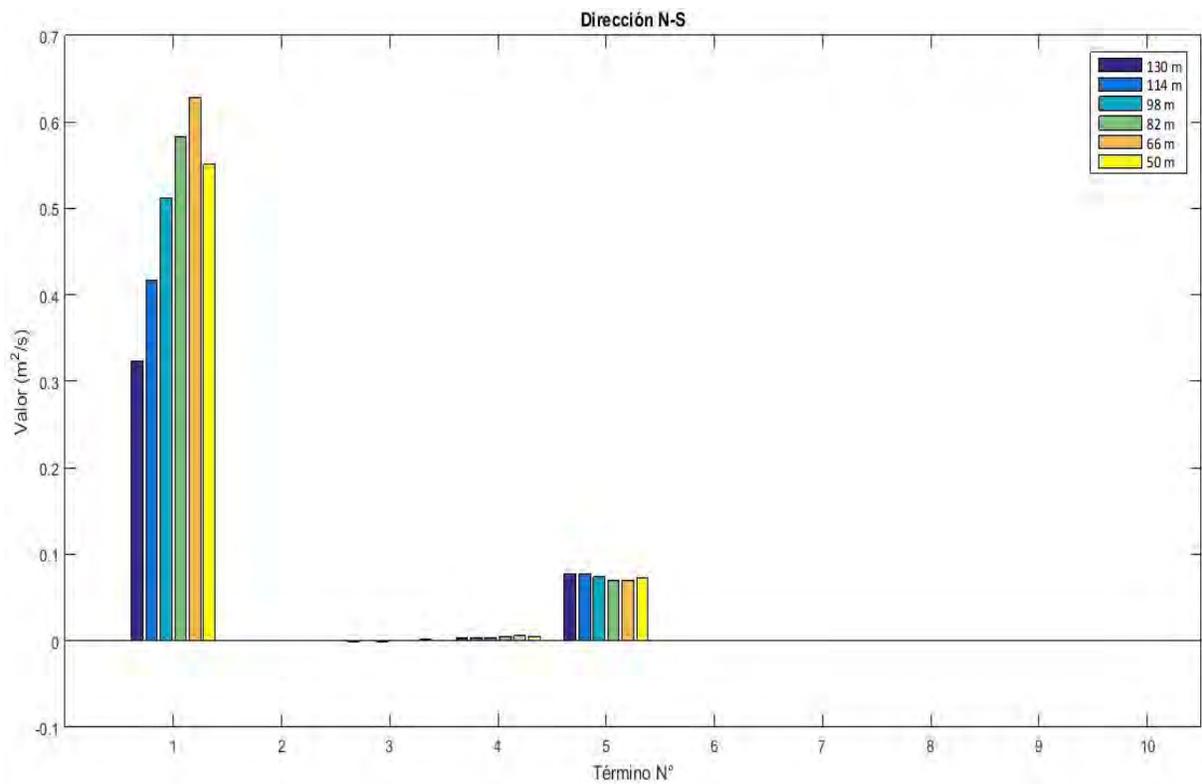


Figura 24. Evaluación de los 10 términos de la velocidad en cada intervalo de profundidad de la componente N-S.

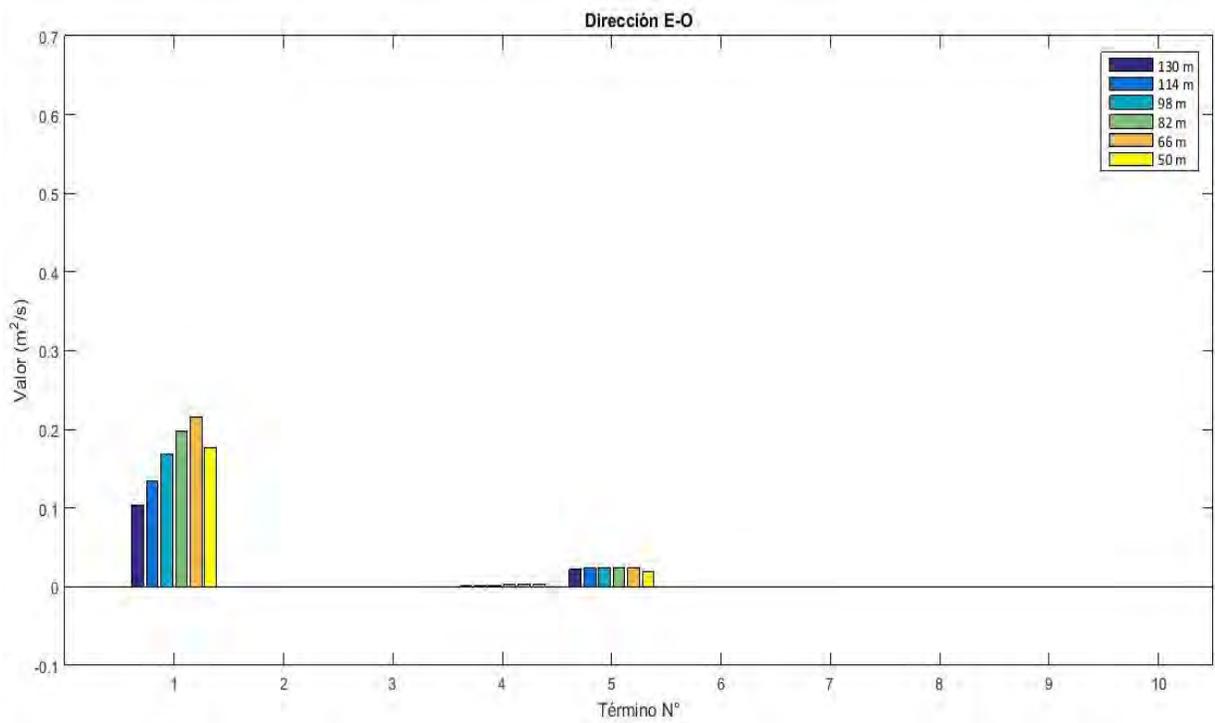


Figura 25. Evaluación de los 10 términos de la velocidad en cada intervalo de profundidad de la componente E-O.

Por otro lado, los valores de los demás términos en todos los intervalos de profundidad son muy bajos o casi nulos, excepto el término 5 (interacción entre las fluctuaciones de baja frecuencia y la velocidad promedio) que tiene valores considerables también. Estas características hacen a la corriente en el canal de una alta calidad para la extracción de energía eléctrica (dominancia de los términos 1 y 5) [Chang et al. 2015].

En el caso de los datos costeros con AQP (Fig. 26 y 27), los resultados fueron completamente diferentes, con una distribución más homogénea de la potencia en los 10 términos. El término 1 o valor promedio de la velocidad de corriente fue menor que los demás términos del análisis, lo que indica que existen muchas variaciones e interacciones entre procesos que podrán hacer la extracción de energía ineficiente.

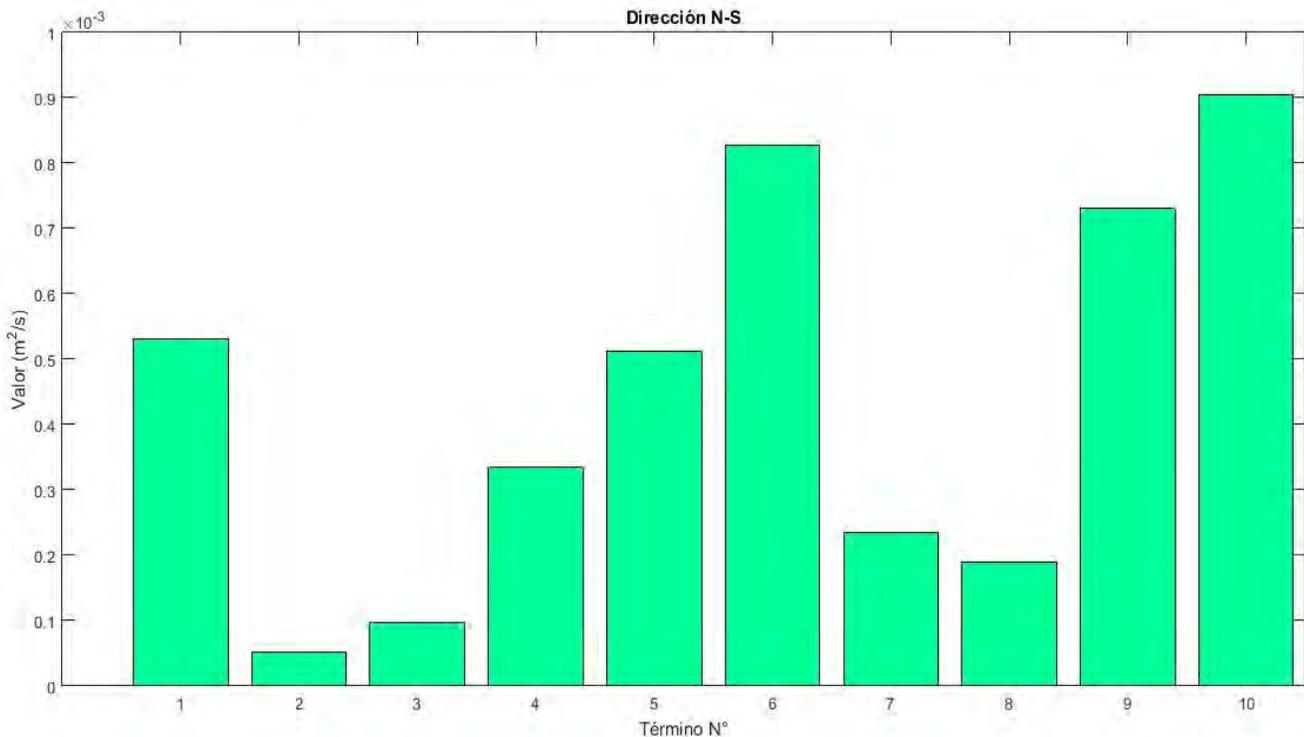


Figura 26. Evaluación de los términos de la velocidad en la componente N-S de los datos costeros con AQP.

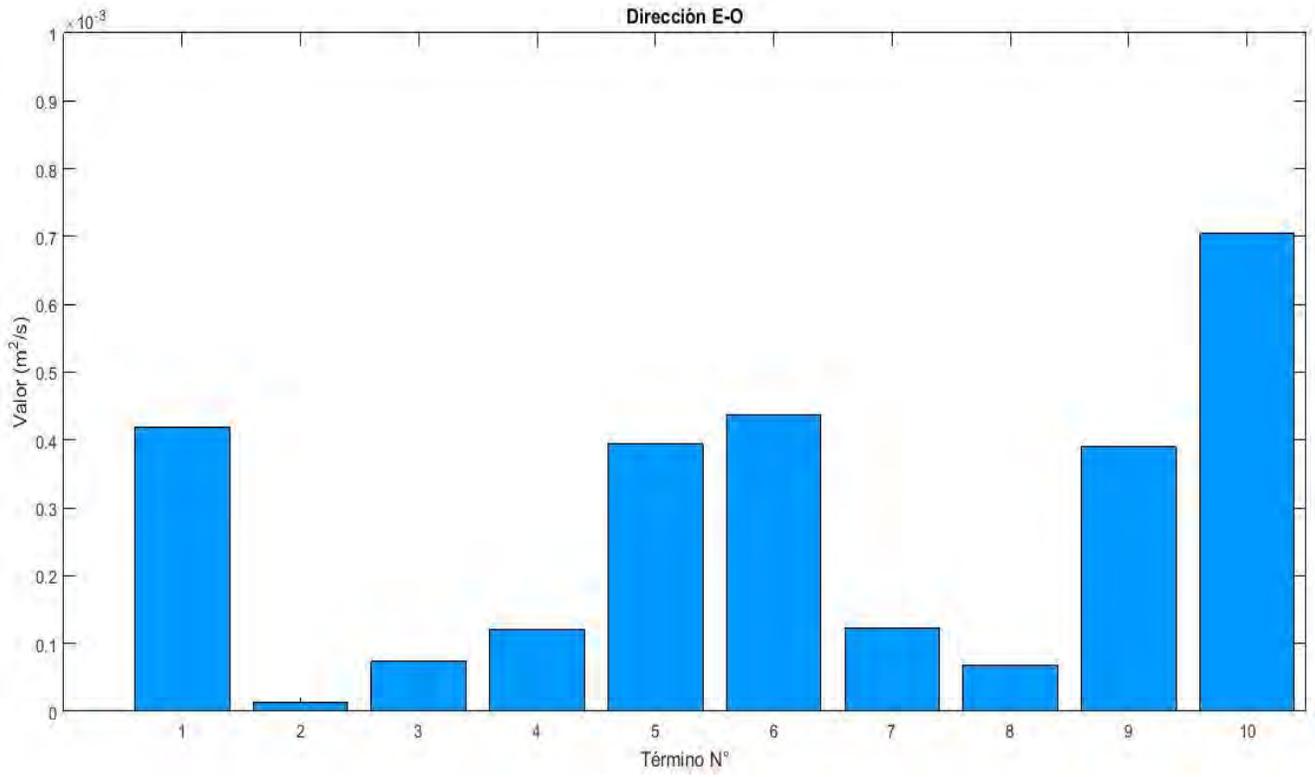


Figura 27. Evaluación de los términos de la velocidad en la componente E-O de los datos costeros con AQP.

#### 4.3. Batimetría del fondo marino del canal de Cozumel

Poseer una batimetría en regiones atractivas para el aprovechamiento energético es de suma importancia en la instalación de dispositivos de energía ya que tanto la profundidad como el tipo de fondo marino (suave o rocoso) determinaran el grado de dificultad en la instalación de ciertos elementos como los amarres o cimientos para los dispositivos, además de que el costo de la instalación dependerá directamente de la distancia desde la costa, hasta donde se alcanza la profundidad requerida.

El Caribe Mexicano se caracteriza por tener sedimentos mixtos, con pocos componentes terrígenos sobre todo en la parte occidental debido a la poca afluencia de sedimentos continentales [Wilkinson *et al.*, 2009]. Sin embargo, la región de estudio se caracteriza por el desarrollo de grandes complejos arrecifales de origen coralino, por lo que los sedimentos marinos son de origen calcáreo originados por procesos biológicos y que se componen mayoritariamente de partículas de origen biogénico compuestos principalmente de fragmentos micro esqueléticos, desechos orgánicos o restos de organismos que son decantados en la columna de agua.

Los sedimentos superficiales alrededor de la isla de Cozumel a profundidades de entre 24 y 25 m se componen de fósiles de caracol y lodos consolidados sin fósiles, también presenta entre 25 y 16 m un estrato con tres horizontes, el inferior con sedimento delgado correspondiente a una capa de marea y restos de arrecifes de parche; en medio con materiales ligeramente sueltos y en proceso de consolidación y el superficial constituido de calizas granulosas, frágiles, color blanquecino (Sascab). Por último, de los 16 m a superficie un estrato formado por fragmentos de coral, ostras, caracoles, algas calcáreas, restos arrecifales en su totalidad [Administración portuaria integral de Quintana Roo S.A. DE C.V. 2011].

La batimetría frente a la isla de Cozumel y el continente se caracteriza por pendientes pronunciadas en dirección hacia el canal de Cozumel, en donde a unos 300 m de la costa, se presenta una profundidad máxima de 20 m, sin embargo a 3 km se pueden alcanzar profundidades de hasta 400 m. Podría ser descrita en 6 secciones importantes y representativas a partir de la costa que es relativamente plana y altamente erosionada la cual se extiende desde la línea de vegetación hasta 1 - 1.5 m bajo el nivel del mar. La primera sección corresponde a una plataforma suavemente inclinada que se extiende a partir de la costa hasta la primera terraza que coincide con el borde del primer arrecife a una profundidad de 4.5, 5 m en la zona sur y 3 m en la parte norte; la segunda sección se considera al arrecife, que corre paralelo a la costa del tipo de borde; la tercera sección es una planicie arenosa que se extiende en una suave pendiente hasta la segunda terraza aproximadamente a 10 m de profundidad en la zona sur y 11 m en la zona norte; la cuarta sección es un arrecife conocido localmente como Paraíso sur y Paraíso norte, estando este último al norte del muelle turístico, se caracterizan por ser estructuras alargadas grandes, que se presentan paralelas a la línea de costa, tiene un ancho promedio de entre 10 y 15 m, con una longitud de 300 m cada una y están separadas entre sí unos 50 m aproximadamente; La quinta sección se considera a una segunda planicie arenosa que se extiende aproximadamente desde los 13 m de profundidad hasta 21 m donde se encuentra una tercera terraza, a partir de ahí y hasta los 27 m se encuentra la sexta sección donde se desarrolla el arrecife de borde de la plataforma, finalizando esta sección continua la zona más profunda alcanzando una profundidad máxima de 400m en el centro del canal de Cozumel (Figura 28) [Administración portuaria integral de Quintana Roo S.A. DE C.V. 2011].

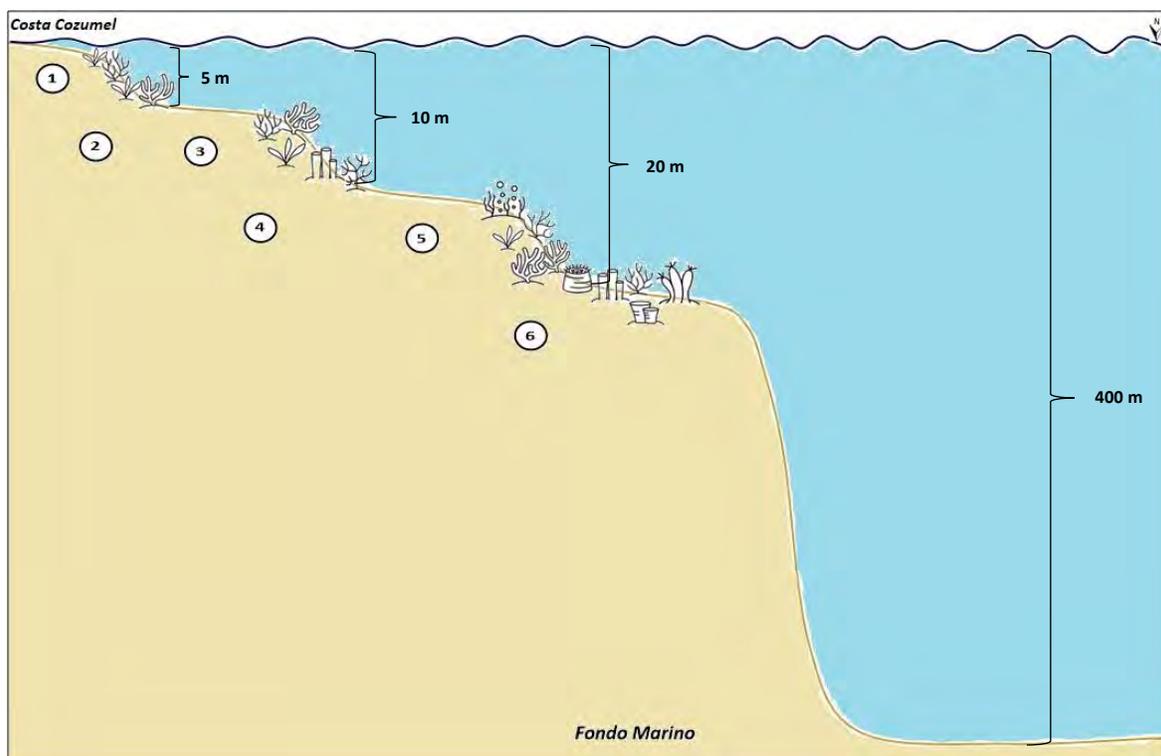


Figura 28. Secciones batimétricas representativas en costa Oeste de la isla de Cozumel.

En el presente trabajo, se utilizaron datos de batimetría de dos distintas fuentes. Los primeros fueron proporcionados por la secretaria de Marina, los cuales se graficaron en un mapa batimétrico, interpolado en el programa SURFER con el método de Kriging. El mapa (Figura 29a) incluye el borde oriental de la península de Yucatán y todo el contorno de la isla de Cozumel, abarcando el área completa del canal de Cozumel. Los valores batimétricos registrados en esta zona se encuentran en un intervalo de profundidades entre 50 m y 450 m en el centro del canal.

La Figura 29b presenta un mapa batimétrico de Cozumel mejorado, obtenido a partir de los datos de SEMAR presentados anteriormente y la digitalización de los datos obtenidos con una ecosonda multihaz EM2040, durante el crucero CEMIE-1.

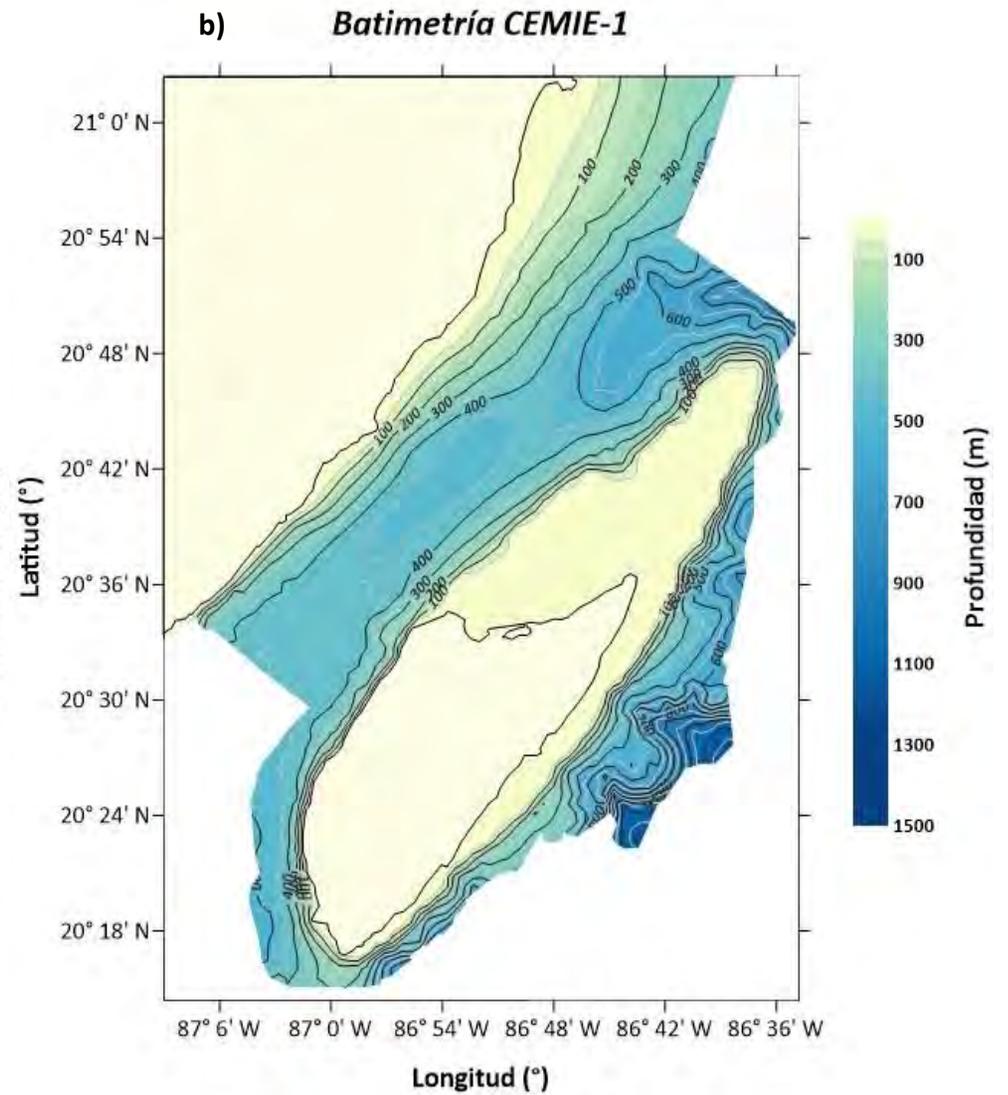
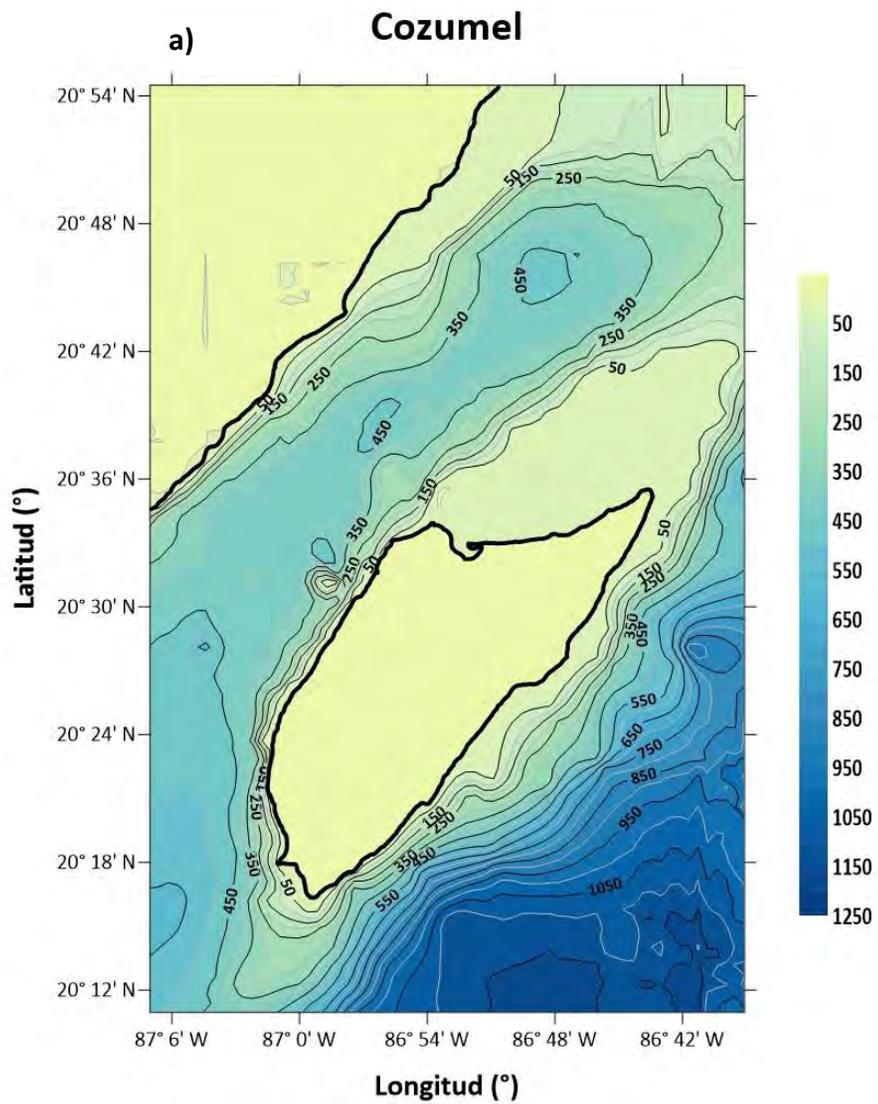


Figura 29(a). Batimetría obtenida a partir de datos de la SEMAR. (b) Batimetría Multihaz digitalizada CEMIE-1.

Los datos batimétricos multihaz fueron recolectados como parte del proyecto "CEMIE Océano" durante la campaña oceanográfica "CEMIE-1", a bordo del B/O Justo Sierra de la UNAM, realizada en abril-mayo 2019. Esta embarcación está dedicada a la investigación científica en los sectores del Golfo de México y Mar Caribe.

El levantamiento batimétrico se realizó alrededor de la isla de Cozumel con la intención de abarcar tanto el canal de Cozumel como el talud continental Este de la isla. Los transectos fueron medidos durante la noche, navegando a una velocidad promedio de 6 nudos a lo largo de las isobatas de 50, 100 y 200 m con la finalidad de incluir desde los 40 m de profundidad en la plataforma continental, hasta los 1000 m en la zona E de la isla. Se empleó una ecosonda multihaz de 200 kHz, modelo EM2040, fabricada por la compañía Simrad Kongsberg, diseñada para abarcar profundidades desde 5 m hasta 300 m para las mediciones sobre la isobata de 50 m. Para los transectos sobre las isobatas más profundas se empleó la ecosonda multihaz para aguas profundas de 30 kHz, modelo EM302, diseñada para profundidades desde 20 m hasta 5000 m.

También se llevaron a cabo 3 transectos perpendiculares al canal de Cozumel, desde la isla hasta la costa del continente, con el objetivo de incluir la longitud completa del canal.

Para obtener una primera aproximación del levantamiento batimétrico y utilizando las herramientas del software SURFER, se georreferenció y digitalizó el mapa de todo el recorrido batimétrico realizado, el cual contenía los valores de profundidad registrado. Posteriormente se llevó a cabo una interpolación utilizando el método Kriging con la finalidad de obtener un modelo digital de terreno suavizado (Figura 29b). Finalmente, del resultado de la interpolación, se blanquearon las zonas alejadas al levantamiento y donde no se presentaba ningún dato real para evitar una interpretación errónea.

Para poder visualizar mejor las pendientes existentes en el terreno submarino, se presentan tres secciones perpendiculares al eje principal del canal en las Figuras 30 y 31. En éstas se observa el comportamiento del fondo con el incremento de la profundidad, para poder identificar la existencia de algún cambio abrupto, así como identificar las pendientes características de ambos lados, tanto de la zona del continente como de la isla de Cozumel. Se presentan estas secciones tanto para los datos de SEMAR, como también para los datos que incluyen la batimetría multihaz de la campaña CEMIE-1.

El análisis de esta información, figuras 30 y 31, muestra que la región más al norte del canal es donde se registra la mayor profundidad y la que presenta las pendientes menos abruptas tanto del lado del continente como del lado de la isla, mientras que en las secciones del sur del canal para ambos casos se observa una pendiente más pronunciada, cercana a los  $90^\circ$  con una extensión de la plataforma continental muy estrecha. Sin embargo, en el perfil 2 de la figura 30, el lado del continente tiene regiones con una plataforma continental un poco más ancha, mientras que en el perfil 2 de la figura 31 se observan pendientes menos abruptas en ambos lados del canal, sin embargo, del lado de la isla la pendiente aumenta con menor velocidad por lo que la plataforma continental tiene una mayor extensión.

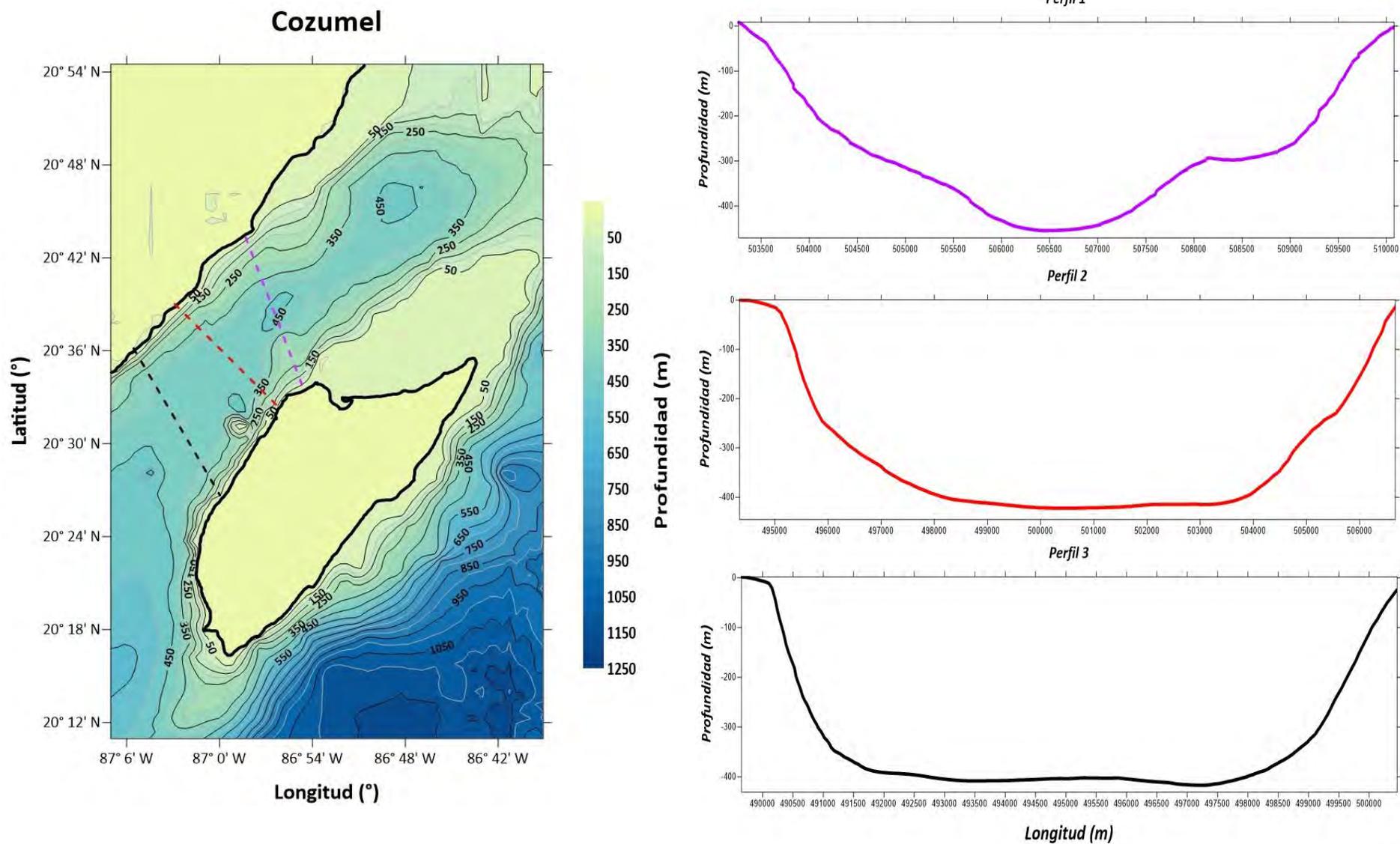


Figura 30. Ubicación de los perfiles perpendiculares al Canal de Cozumel en batimetría SEMAR.

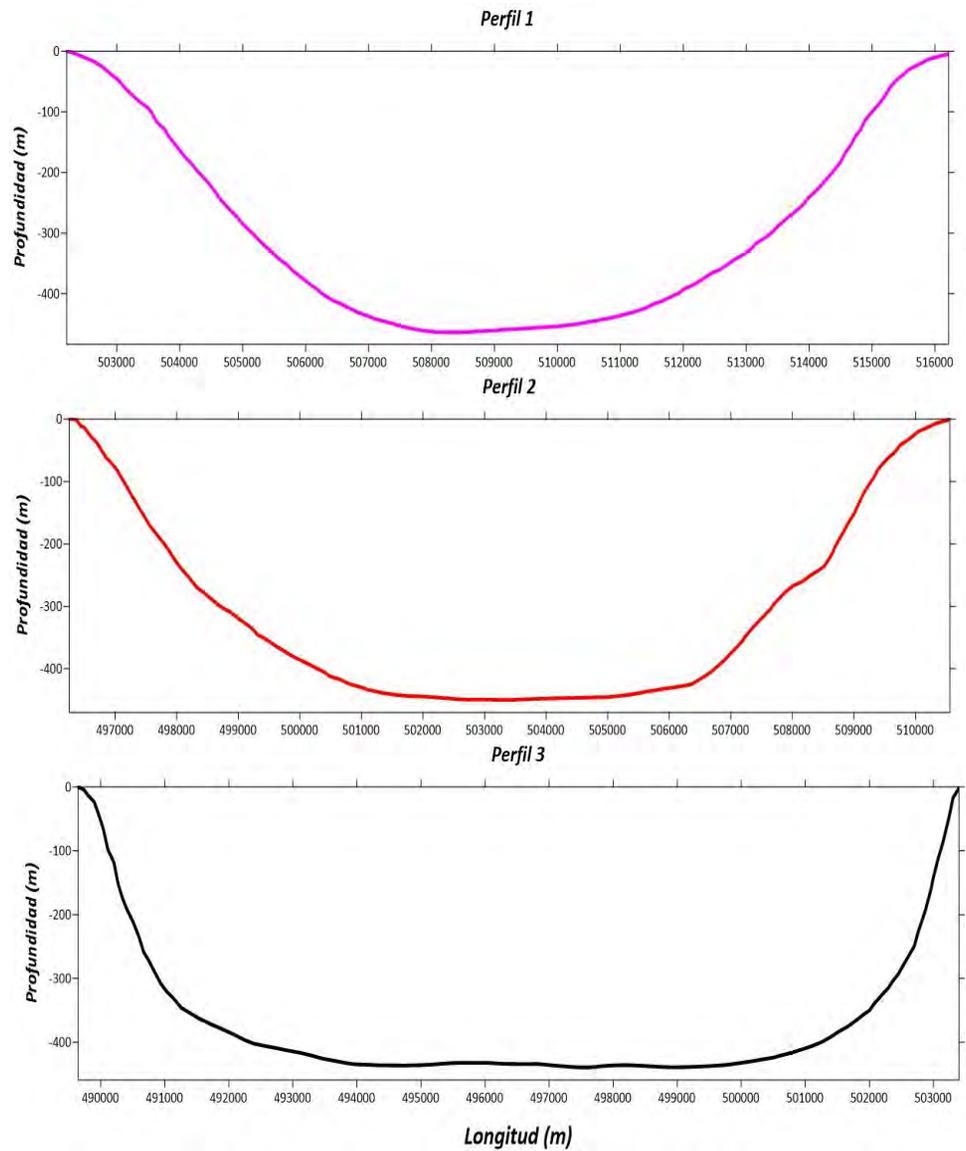
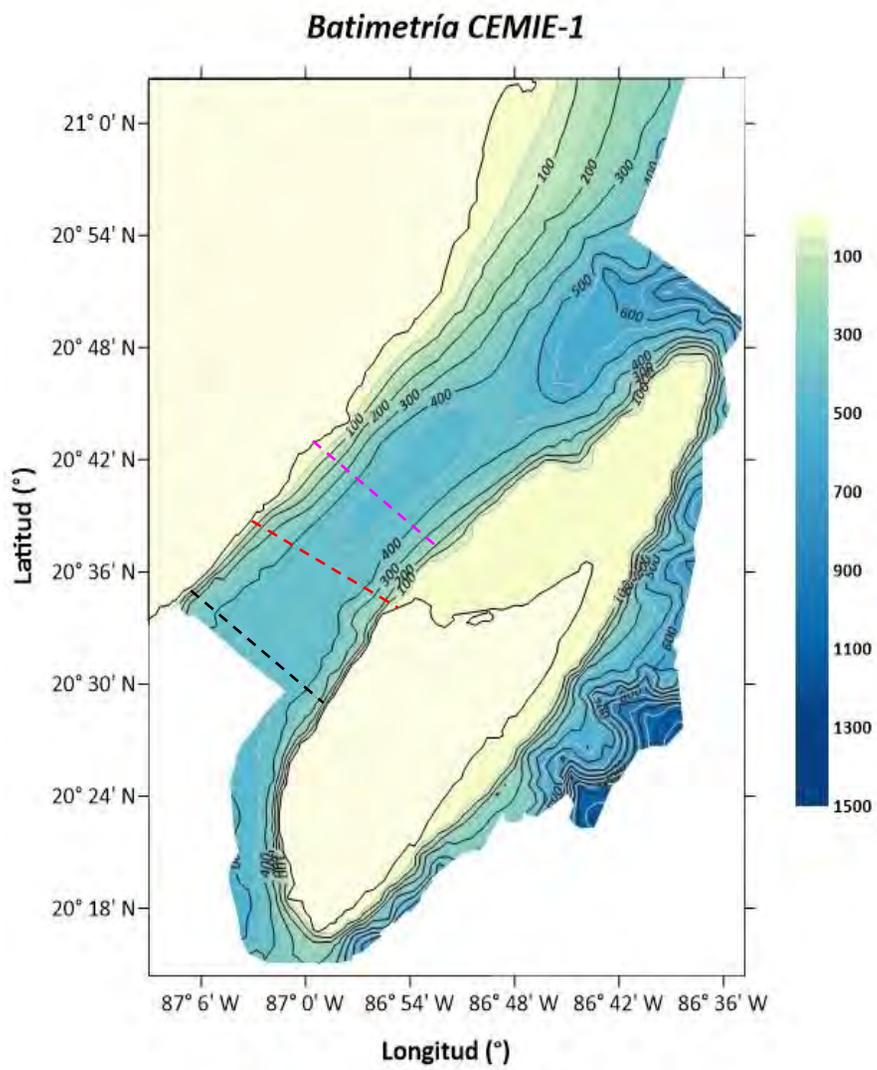


Figura 31. Ubicación de los perfiles perpendiculares al canal de Cozumel en batimetría CEMIE-1.

Se realizó un análisis más detallado de las pendientes del relieve del fondo marino (Figura 32) para poder determinar la inclinación que se presenta alrededor de la isla de Cozumel y de la zona del continente. La escala de colores en la Figura 32 es relativa a los mínimos y máximos registrados en cada zona; siendo los rojos para máximos valores de pendientes (en grados) y los morados para los valores mínimos. Como se muestra en la Figura 32a, las pendientes alrededor de la isla tienden a presentar en su mayoría valores entre 7° y 12° tanto en la costa oriental como en la occidental, sin embargo en la parte suroeste de la isla existen algunas zonas que llegan a presentar pendientes con valores máximos de entre 15 y 17 °; De igual forma para el lado del continente los valores en su mayoría tienden a ser de entre 8° y 9° sobre todo en la parte norte, y presentan valores de inclinación mayores de entre 13° y 15° en la zona frente a playa del Carmen.

En cambio, en la Figura 32b las pendientes alrededor de la isla presentan en su gran mayoría valores entre 12 ° y 16°, solo algunos valores se presentan cercanos a 20° sobre todo en la costa oriental y en algunas zonas específicas se observan valores menores a 8°. Del lado del continente la mayoría de las pendientes presentan valores menores de entre 2° y 8° sobre todo en la zona norte, solo la parte sur de playa del Carmen presenta valores de pendientes mayores que van entre 10° a 14°.

De acuerdo con los análisis para la instalación de dispositivos por medio de bases de gravedad, hydrofoils o anclajes flexibles, el valor máximo permitido en la inclinación de la pendiente es de 10° [Skope. 1988], por lo que en Cozumel existen algunas zonas donde las pendientes son accesibles para la instalación de dispositivos.

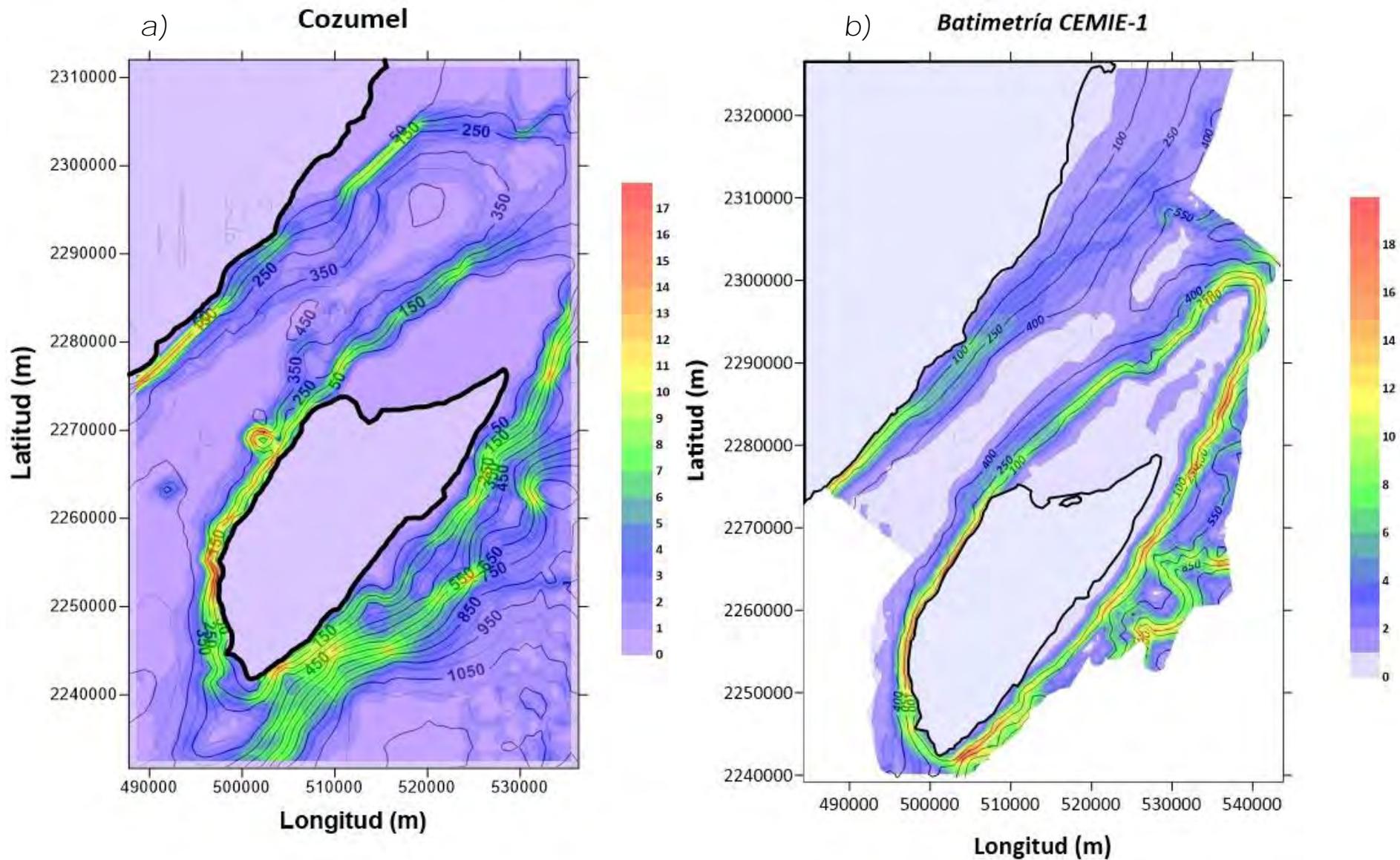


Figura 32. Mapas de pendientes para batimetría SEMAR y CEMIE-1 en la región del canal de Cozumel.

#### 4.4. Evaluación de conexión a la red eléctrica.

En México el Centro Nacional de Control de Energía (CENACE) se encarga de planear la operación del Sistema Eléctrico Nacional (SEN) en condiciones de eficiencia, calidad, confiabilidad, continuidad, seguridad y sustentabilidad, también controla la inclusión de elementos a la red eléctrica Inteligente con el propósito de que se reduzca el costo total de provisión del suministro eléctrico y se eleve la eficiencia, confiabilidad, calidad y seguridad del Sistema Eléctrico Nacional de forma económicamente viable y ambientalmente sustentable; incorporando mecanismos para desarrollar proyectos de infraestructura eléctrica.



Figura 33. Regiones del Sistema eléctrico Nacional [CENACE, 2019].

El estado mexicano mantiene la titularidad del Servicio Público de Transmisión y Distribución, según lo dispuesto en el artículo segundo de la Ley de la industria eléctrica. La Red Nacional de Transmisión (RTN) es un sistema integrado por un conjunto de redes eléctricas que transportan la energía eléctrica producida de las centrales generadoras a las Redes Generales de Distribución (RGD) y a los usuarios en general (Figura 34). Estas redes de transmisión recorren grandes distancias y transportan la energía eléctrica en niveles de tensión desde 69 kW hasta 400 kW y se agrupa en 53 regiones de transmisión: 45 interconectadas por 62 enlaces y 8 que pertenecen a los sistemas aislados de la Península de Baja California [SENER - PRODESEN 2016].



Figura 34. Enlaces entre las 53 Regiones de transmisión del SEN [CENACE, 2019].

El suministro de electricidad del municipio de Cozumel se realiza a través de la conexión con la planta termoeléctrica de generación de Valladolid, Yucatán mediante un acueducto subacuático de dos circuitos radiales en 34.5 kW que parten de la subestación Playa del Carmen, perteneciente a la Zona de distribución Riviera Maya, con una generación límite de 825 MWh, adicional a este suministro eléctrico desde el macizo continental, Cozumel cuenta con generación de electricidad a través de una planta privada con permiso de autogeneración, sin embargo, presenta un factor de planta reducido y únicamente genera energía en horario de punta y sujeta a demanda. También cuenta con una subestación de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) de tipo Turbogás llamada "C.T.G Chankanaab" la cual cuenta con generadores de energía a base de diésel y entra en funcionamiento ante condiciones de emergencia en red completa, así como ante la contingencia de alguno de los cables submarinos (Figura 35).



Figura 35. Conexiones a la Red eléctrica Nacional en Cozumel [CENACE, 2019].

En 2012, el consumo anual de electricidad en Cozumel fue de 238, 510 MWh. Debido a la importancia turística de la Isla y de su constante crecimiento, el consumo energético en 2015 se registró en 274,750 MWh [INEGI 2015], sin embargo, la transmisión de Valladolid presenta demandas superiores al límite de transmisión por lo que consecuentemente existe la necesidad de sincronizar la producción por turbogás, lo que encarece el mercado eléctrico mayorista [PRODESEN 2019-2033].

Por otro lado, es importante garantizar el suministro de energía eléctrica a la isla, por lo que se encuentra en marcha un nuevo proyecto que consiste en la construcción de aproximadamente 25 km-c de cable de potencia en 115 kW: 25 km-c de cable submarino/subterráneo y 2.5 km-c de cable subterráneo (Figura 36) [SENER-PRODESEN 2018].

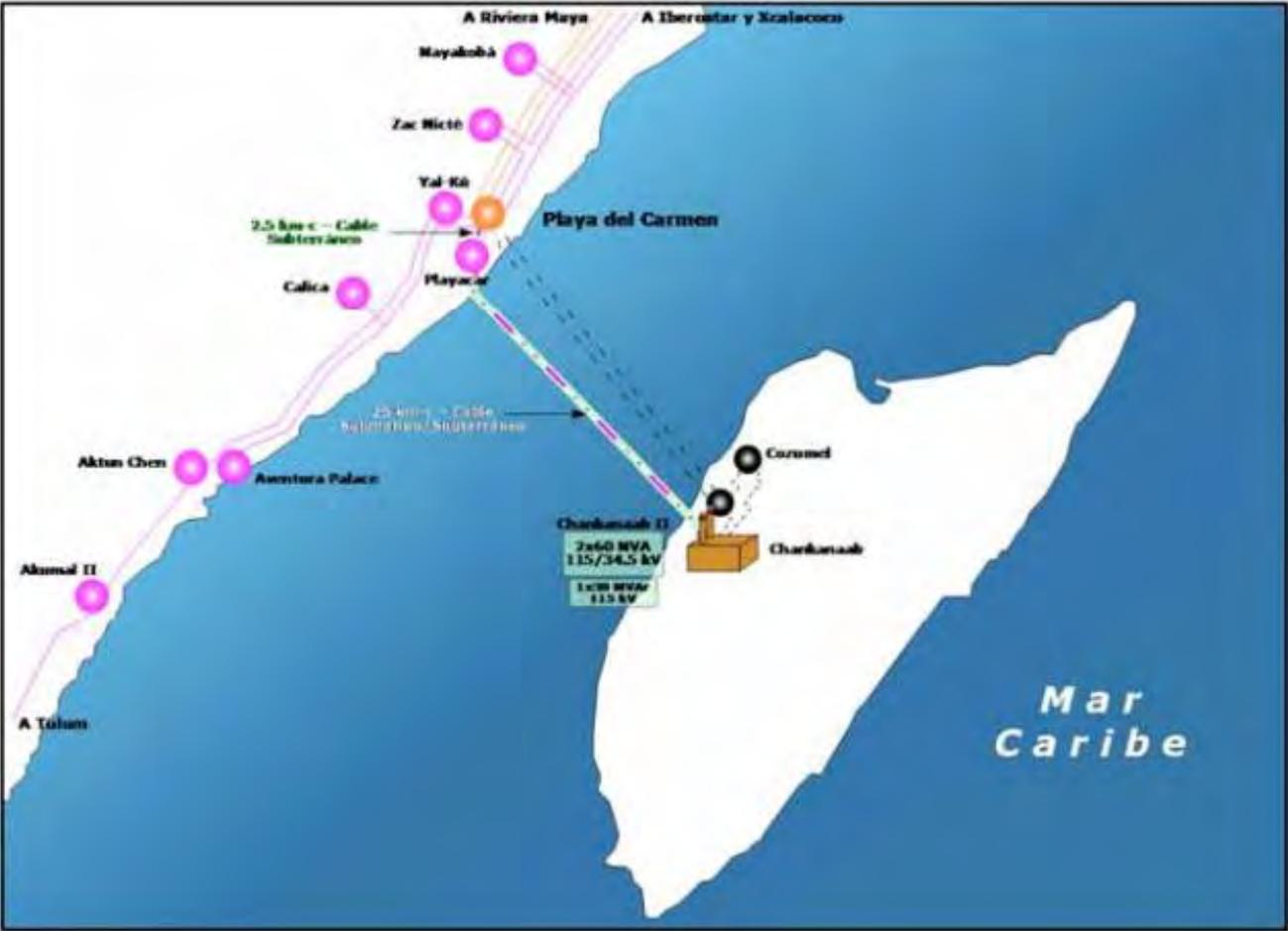


Figura 36. Diagrama con el proyecto línea de transmisión submarina PLAYACAR-CHANKANAAB, [SENER-PRODESEN 2018].

## 4.5. Zonas de exclusión

### 4.5.1. Localización de las rutas de navegación

Dada la condición geográfica de la isla de Cozumel, su principal actividad es el turismo nacional e internacional, por lo que se han desarrollado una gran cantidad de servicios portuarios que permiten el atraque de diversas embarcaciones ya sea de altura, mixto, pesca y cabotaje, así como el movimiento y tráfico de diferentes tipos de carga. Su infraestructura portuaria la integran tres terminales internacionales de cruceros, la marina turística Banco Playa, la terminal de transbordadores y la terminal marítima de San Miguel ubicada en el centro de la ciudad de Cozumel.

También existe un servicio regular de pasajeros Cozumel-Playa del Carmen y viceversa, con viajes redondos diarios que atracan en el Muelle fiscal de la isla, así como un servicio de tenders a los cruceros turísticos que no llegan a atracar en las dos posiciones del muelle turístico.

Existe un servicio de transbordador de vehículos de carga y pasajeros desde Puerto Morelos, que realiza uno o dos viajes diarios, servicio que es de suma importancia ya que abastece a la población, hoteles y comercios de los productos que se requieren.

Varias líneas navieras internacionales de cruceros turísticos visitan Cozumel con frecuencia de entre 10 y 18 cruceros semanales dependiendo la temporada llegando a recibir al año ~1100 cruceros internacionales (Figura 37).

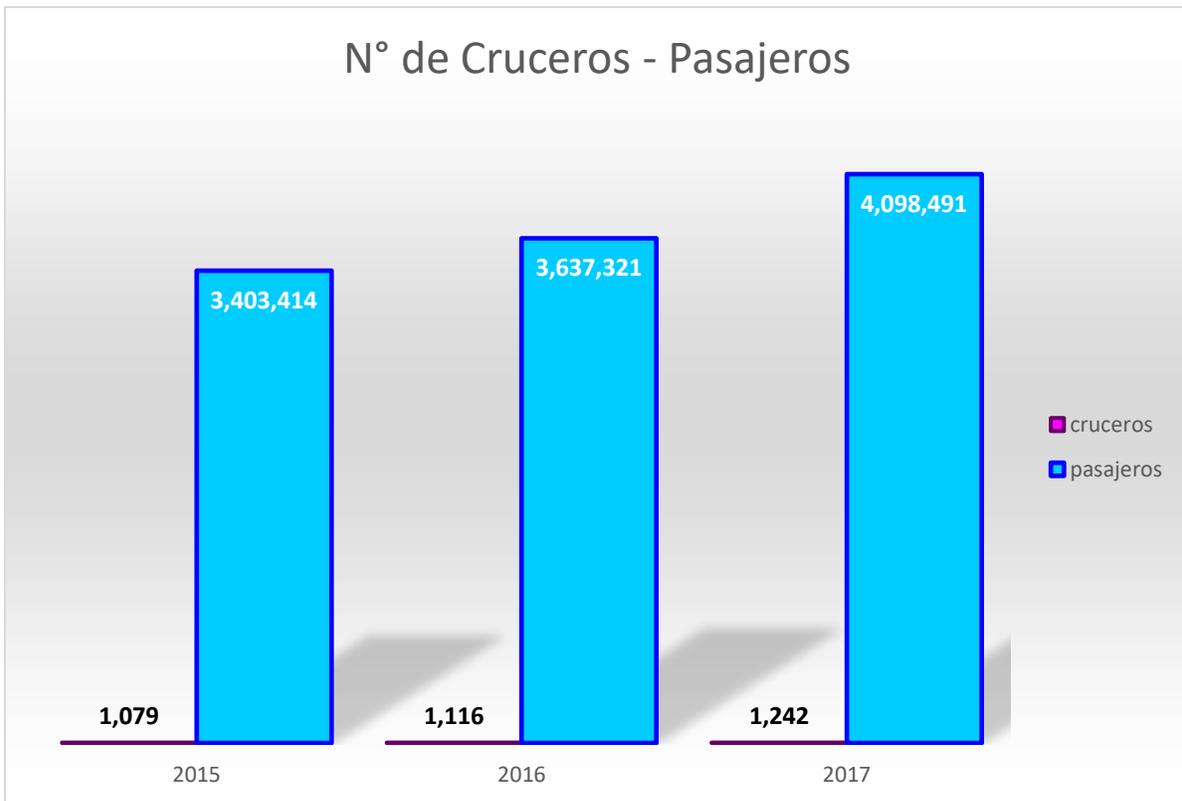


Figura 37. Relación de cruceros turísticos y pasajeros que visitan Cozumel anualmente.

Hasta la fecha no se cuenta con un registro de las rutas marítimas para cruceros internacionales, sin embargo, de acuerdo con la carta náutica de la Isla Cozumel 2010, se tiene una aproximación de las rutas que comúnmente se utilizan (Fig. 38).

## Puertos y Rutas de navegación Cozumel

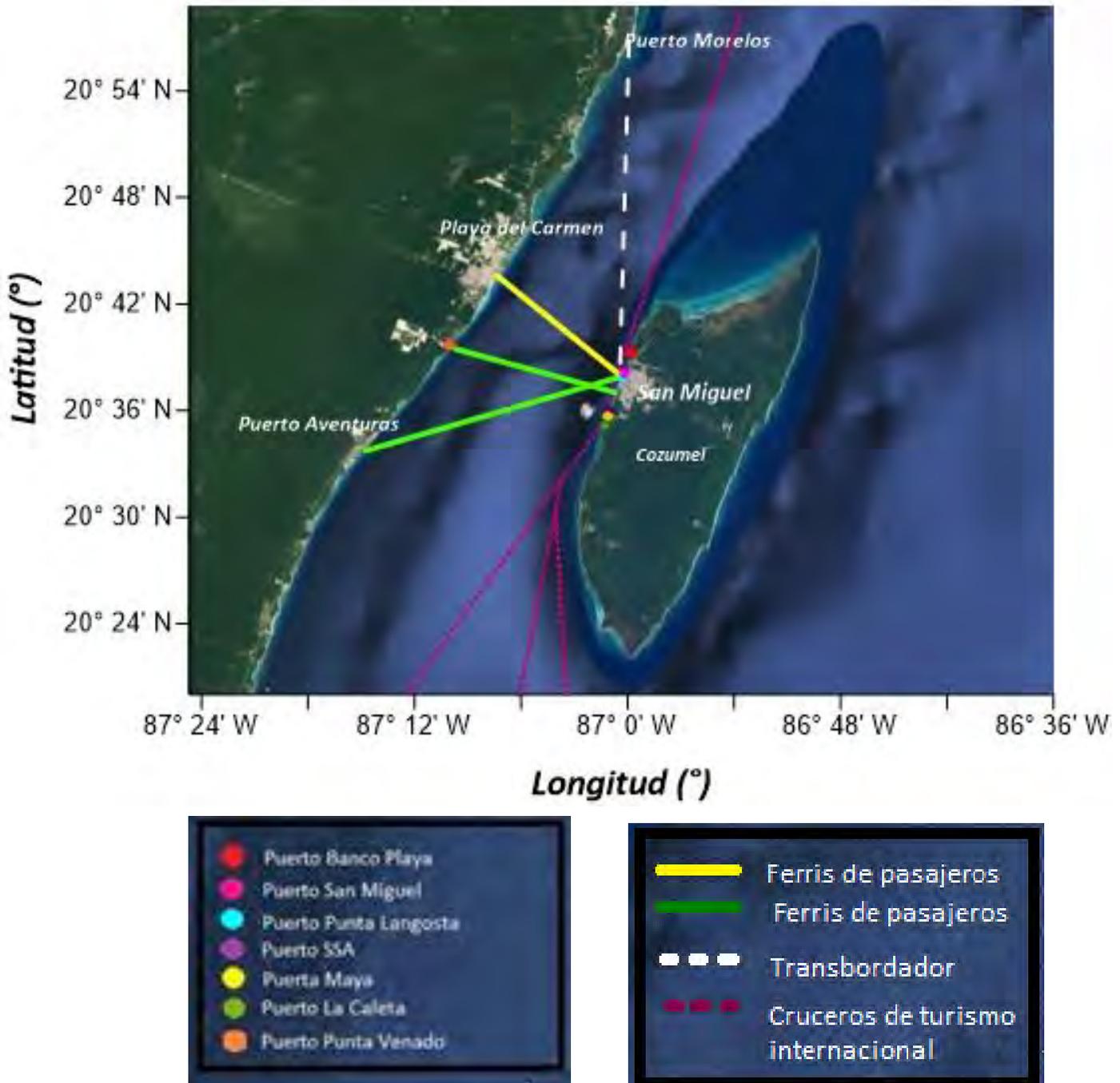


Figura 38. Puertos y rutas marinas entre la isla de Cozumel y el continente, así como de turismo internacional.

#### 4.5.2. Localización de zonas Militares

En la isla de Cozumel no se encuentran registradas áreas destinadas para actividades militares, sin embargo, en el Puerto de Cozumel se encuentra Instalado personal de la Guarnición Militar y la Base Aérea Mexicana Número 4 pertenecientes a SEDENA, así como parte del Sector Naval perteneciente a la Armada de México.

#### 4.5.3. Localización de zonas de pesca

La zona de pesca en Cozumel es un área oceánica de anchura variable contigua al mar territorial sobre la cual el estado ribereño ejerce derechos exclusivos para el aprovechamiento y la conservación de los recursos que allí se encuentran, en la isla la pesca abarca el área del canal de Cozumel y la parte norte y sur de la isla, es decir en los extremos, así también en el área de Boca Paila donde mayormente se practica la pesca deportiva.

Las cordilleras y los arrecifes profundos de Cozumel se encuentran en la región de mayor diversidad de ambientes y riqueza de especies de las regiones marinas de México [Conabio 2007]. Las profundidades de estos oscilan entre 200 y 1500 m, por lo que se consideran sitios importantes para la producción pesquera, el turismo y la pesca deportiva y comercial.

#### 4.6. Impacto Ambiental (Áreas Naturales Protegidas)

Dentro del área de estudio se encuentran registradas 3 zonas naturales protegidas (Figura 39) que representan un hábitat importante, de cuya existencia depende el desarrollo de una gran variedad de especies de vida silvestre tanto terrestre como acuática. En la isla de Cozumel se localizan dos zonas, el "*Parque Nacional Arrecifes de Cozumel*" que es considerado parte de la barrera arrecifal denominada "*Gran cinturón de Arrecifes del Atlántico Occidental*" o "*Gran arrecife Maya*", el cual presenta una superficie total de

11,897.87 ha, y constituye un recurso natural de gran importancia para la economía regional, ya que en él se realizan actividades recreativas, de conservación, aprovechamiento, educación, difusión y monitoreo [CONANP 2018]. En la zona norte se encuentra el “Área de Protección de Flora y Fauna del Norte de la Isla” con una superficie total de 37,829.17 ha, en esta área se encuentran representados arrecifes de coral, pastos marinos, manglares, vegetación halofita de dunas costeras, tasistales-saibales y en menor proporción selva media perennifolia, así como el sistema de humedales y lagunas costeras más grande de la isla [SEMARNAT 2018].

En el lado del continente está el *Parque Nacional de Arrecifes de Puerto Morelos*, decretado el 2 de febrero de 1998 con una superficie total de 9,066 ha, se encuentra a una distancia de 40 km al noroeste de la Isla de Cozumel, y colinda con el parque nacional costa occidental de isla mujeres, punta Cancún y punta Nizuc.

### Áreas Naturales Protegidas Cozumel

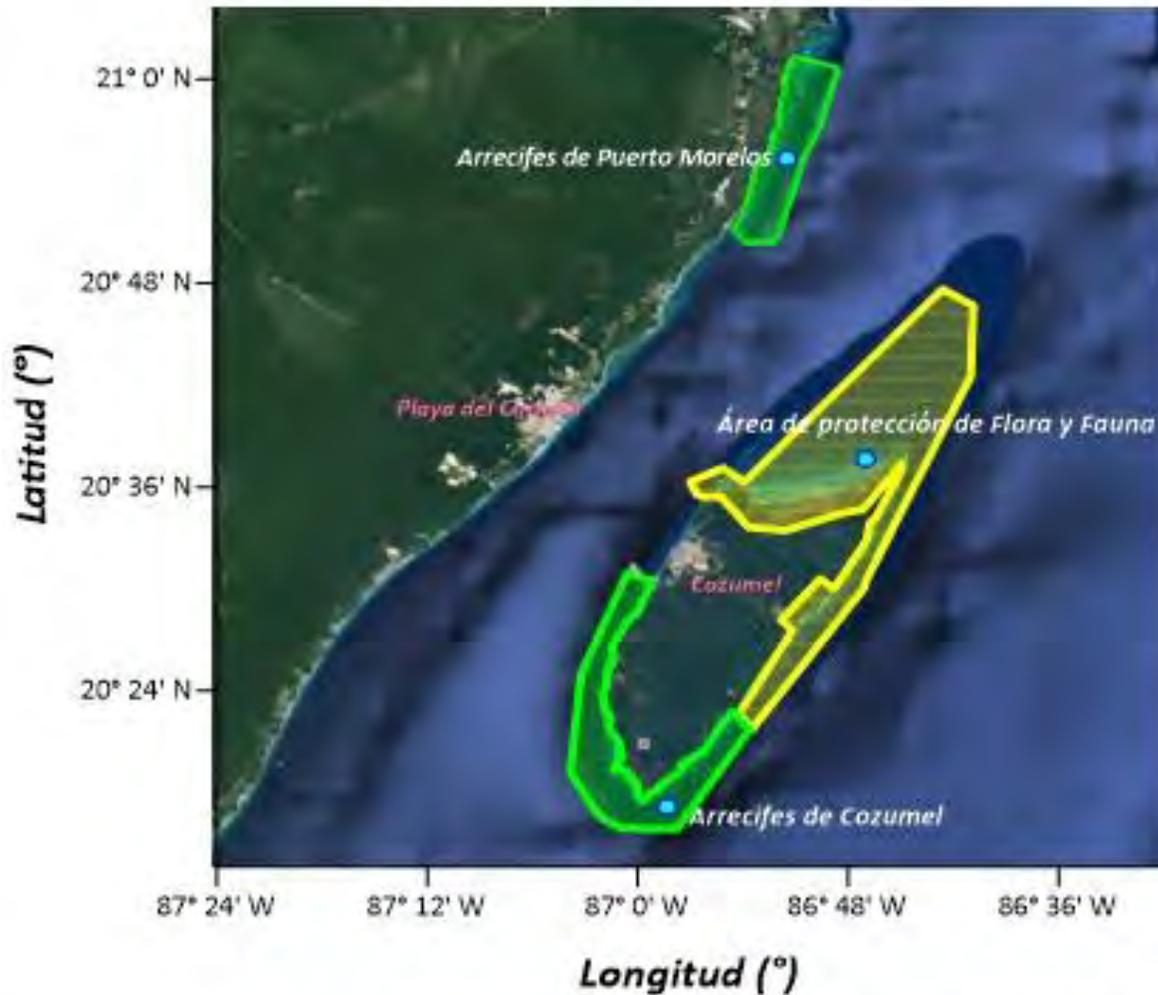
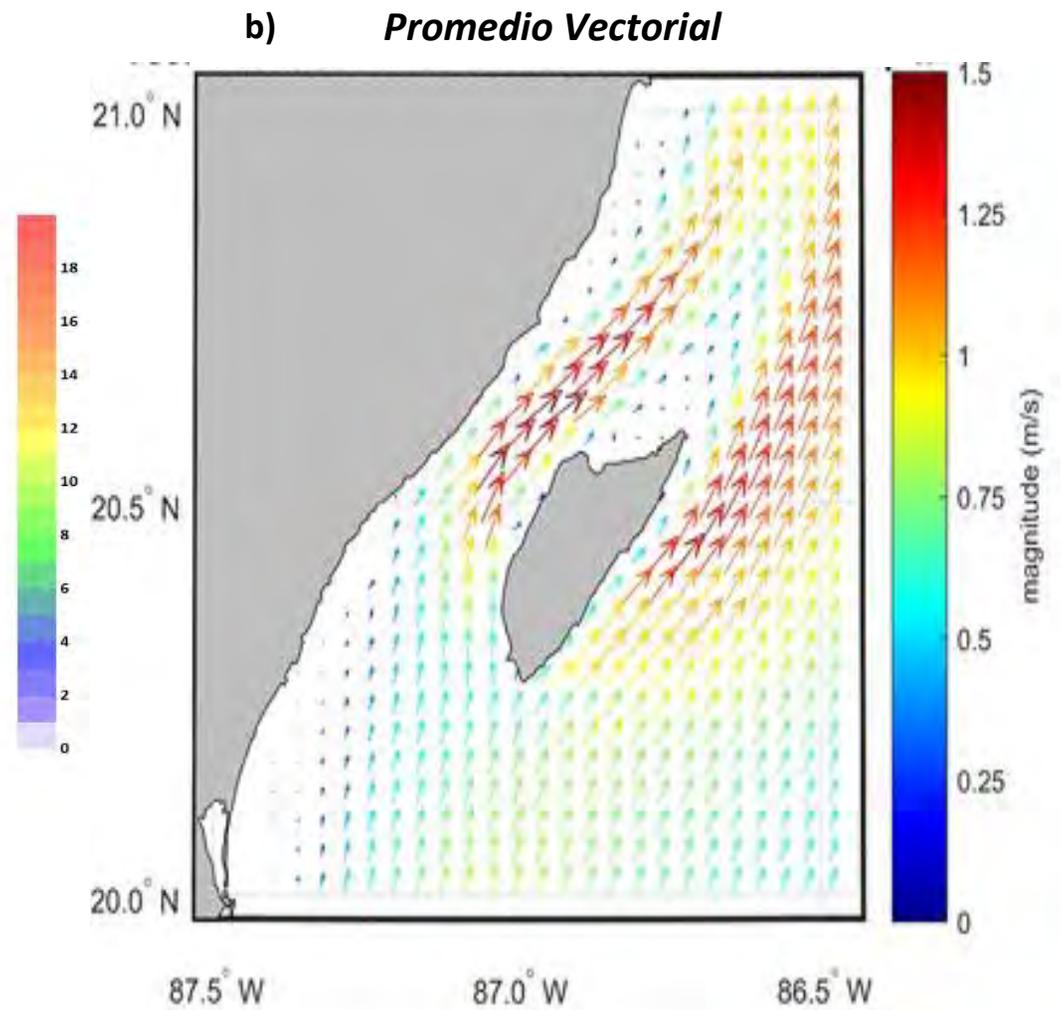
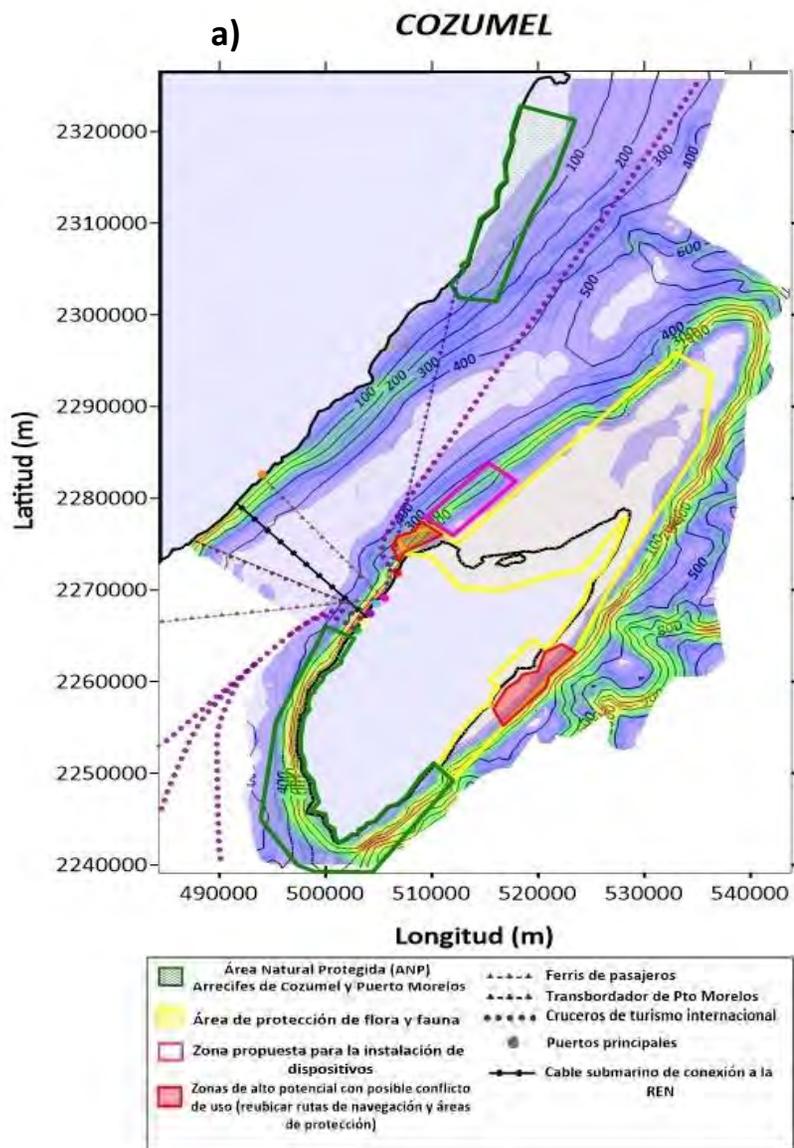


Figura 39. Áreas Naturales Protegidas, en verde los arrecifes en la isla de Cozumel y Puerto Morelos y amarillo el Área de protección de flora y fauna.

Finalmente, siguiendo la metodología y realizando la integración de los resultados se realizó un mapa final (Figura 40a) donde se encuentran ubicadas todas las zonas de exclusión, así como la batimetría, los valores de pendientes y con apoyo de los resultados del modelo HYCOM la velocidad de la corriente (Figura 40b), lo que permite analizar el área de estudio y determinar las zonas de alto potencial para la instalación de dispositivos.



*Modelo HYCOM resolución 1/25; 2009 – 2014. Miguel Ángel Cahuich, Ismael Mariño Tapia et al 2019.*

Figura 40. a) Mapa final de la zona propuesta para la instalación de dispositivos. b) Resultados del Modelo HYCOM de la velocidad de la corriente

## CONCLUSIONES

La evaluación e integración de los parámetros más importantes a considerar para el establecimiento de campos de hidrogeneradores, permitió obtener una visión más amplia sobre las posibles zonas adecuadas para la instalación de dispositivos y para el óptimo aprovechamiento del recurso energético con corrientes marinas.

El análisis de datos realizado a partir de las mediciones de velocidad de corriente en la zona del canal de Cozumel durante un periodo de dos años permitió caracterizar las corrientes de la zona. En su región profunda Cozumel presenta corrientes de dirección muy persistente (al norte 98% del tiempo) y relativamente intensas (promedio de 1 m/s).

La evaluación individual por intervalos de profundidad, así como la evaluación de la potencia en términos de la velocidad permitieron identificar que a una profundidad de ~66 m se encuentra la zona óptima para la instalación de dispositivos, en donde se puede asegurar el mayor aprovechamiento del recurso energético, ya que aquí se presenta la máxima velocidad registrada, con valores de entre 0.8 y 1 m/s y se mantiene aproximadamente más del 45% del tiempo, además es una zona que no muestra fluctuaciones en altas y bajas frecuencias que representen alteraciones en el comportamiento e intensidad de la corriente, así como ser el intervalo de profundidad con el mayor valor de potencia anual acumulada a comparación de los demás intervalos registrando valores de 5.15 MW.

La región somera de Cozumel (mediciones con AQP) permitieron descartar la posibilidad de utilizar zonas cercanas a la costa para la generación masiva, ya que en éstas se presentan condiciones muy cambiantes, destacando entre ellas un porcentaje de tiempo significativo donde existe inversión de la corriente, probablemente debido a cambios de la velocidad

de corrientes, además de que su intensidad promedio es muy baja (0.15 m/s).

Los datos de batimetría revelan que en la zona del canal de Cozumel se identifican pendientes consideradas no tan abruptas hasta antes de llegar al cantil, donde la inclinación predominante se presentó de 8 a 15° alrededor de la isla, factor de suma importancia en el desarrollo de tecnologías eficientes para el funcionamiento de la turbina bajo estas condiciones, así como de posibles formas de anclajes, o la posible adaptación de dispositivos flotantes en esta zona, ya que de acuerdo a estudios existentes para la instalación de dispositivos flotantes por medio de bases de gravedad, *hydrofoils* o anclajes flexibles, el valor máximo aceptado en las pendientes es de 10°. Además, poder obtener datos de batimetría multihaz de alta resolución nos permitió tener un análisis más detallado de la zona, así como poder comparar con resultados anteriores las áreas que presentan pendientes menos pronunciadas para establecer los sitios más adecuados en cuanto a instalación de dispositivos marinos.

En cuanto a las zonas de exclusión y a la integración de todos los parámetros anteriores, se podría mencionar que el área propuesta más adecuada para la instalación de dispositivos o campo de dispositivos de aprovechamiento energético se encuentra en la zona frente a la plataforma norte de la isla de Cozumel (Figura 40), debido a que en la parte sur se desarrollan las formaciones de arrecifes coralinos y se encuentra registrada como Parque Nacional, lo que restringe el área solo a actividades turísticas como buceo, snorkel etc; además cerca del límite o borde de la misma plataforma, se logran aprovechar las pendientes menos abruptas ( $\leq 10^\circ$ ) existentes en esta área, lo que facilitaría la cuestión de los anclajes, por otro lado, en la zona norte existe un área extensa que permite evitar interferir con las rutas de navegación marítima, así como con las áreas nacionales protegidas, las actividades turísticas y la infraestructura principal de la isla, asimismo al no existir zonas de pesca específicas y zonas militares permiten que esta área

resulte más accesible para el despliegue de dispositivos. Por otro lado, esta zona propuesta se encuentra relativamente cercana a la zona de interconexión con la red eléctrica nacional y las corrientes en estas zonas siguen presentando valores relativamente altos en la velocidad de corriente.

También es importante mencionar que se pudieron identificar dos zonas con alto potencial de aprovechamiento (Costa E y O de la isla, Figura 40) ya que cumplen con la mayoría de los requisitos para la instalación de dispositivos, sin embargo, ambas zonas se encuentran dentro del área considerada de protección de flora y fauna, lo que podría generar un posible conflicto debido a la ubicación, así como también una posible reubicación o modificación de rutas de navegación para una de estas zonas (costa O).

Finalmente cabe destacar que realizar este tipo de análisis en las zonas de interés de aprovechamiento energético marino es de suma importancia ya que permite además de conocer y describir el área de una manera más completa, evaluar que tan factible o no es desarrollar proyectos de esta magnitud en ciertas zonas, así como evaluar qué tanto recurso puede ser realmente aprovechado y la relación que este tiene con los costos de planeación e instalación. Sin embargo, no deja de representar una alternativa importante y constante de energía que permite aprovechar un recurso energético propio.

En cuanto a futuras líneas de investigación sería importante realizar mediciones y análisis de la corriente en la costa oriental de la Isla de Cozumel para conocer su comportamiento en esa zona e integrar resultados completos del área. También el desarrollo de dispositivos de mayor profundidad podría ser una siguiente línea de investigación de gran interés, así como la actualización de tipos de anclaje y materiales para condiciones particulares de sitios

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Alcérreca, J.C., Encarnación, J., Ordoñez, S., Callejas-J, M., Gallegos, G., Allmark, M., Mariño, I., Silva, R., O'Doherty, T., Johnstone, C., Carrillo, L., 2019. Energy Yield Assessment from Ocean Currents in the Insular Shelf of Cozumel Island. *J. Mar. Sci. Eng.* 7, 147.
- Athie, G., Candela, J., Sheinbaum, J., Badan, A., Ochoa, J., 2011. *Yucatan Current variability through the Cozumel and Yucatan channels*. *Ciencias marinas*, 37,471-492.
- Athie, G., Sheinbaum, J., Leben, R., Ochoa, J., Candela, J., 2014. *Interannual variability in the Yucatan Channel Flow*. *AGU Geophys. Res. Lett.*
- AQUARET Delivering knowledge and understanding. <http://www.aquaret.com>
- Administración Portuaria Integral de Quintana Roo, S.A. DE C.V. "Marina Cozumel, Quintana Roo", 2011, API-940317-RZA.
- Badan, A., Candela, J., Sheinbaum, J., Ochoa, J., 2005. *Upper-layer circulation in the approaches to the Yucatan Channel. Circulation in the Gulf of Mexico: Observations and Models (Geophysical Monograph series)*. AGU, vol. 161, pp. 57-69.
- Badii, M.H., Guillen, A., Abreu, J. L., 2016. *Energías Renovables y Conservación de Energía. International Journal of Good Conscience*, 11(1)141-155.
- Bahaj, A. S., Myers, L. E., 2003. *Fundamentals applicable to the utilization of marine current turbine for energy production*. *Renew Energy*, 28, 2205-2211.
- Bald, J., Curtin, R., Diaz, E., Fontán, A., Franco, J., Garmendia, J.M., González, M., Iriondo, A., Liria, P., Menchaca, I., Murillas, A., Muxika, I., Prellezo, R., Rodriguez, J.G., Solaun, O., Uriarte, A., Uyarra, M.C., Zorita, I. y C. Camba., 2013. *Guía para la elaboración de los Estudios de impacto Ambiental de Proyectos de Energías Renovables Marinas*. Informe técnico realizado en el marco del proyecto nacional de I+D CENIT – E OCEAN LIDER, Lideres en Energías Renovable Oceánicas. 75 pp.

- Ben Elghali, S. E., Benbouzid, M. E. H., & Charpentier, J. F. 2007. *Marine tidal current electric power generation technology: State of the art and current status*. In Electric Machines & Drives Conference, 2007. IEMDC'07. IEEE International (Vol. 2, pp. 1407-1412). IEEE
- Bezaury-Creel, J.E., E. Escobar-Briones, S. Schill, J. F. Torres, C. Molina-Islas, A. L. García-López, O. Pedrín-Osuna, M.A. Jimenez-Hernández, M. Beck, I. March-Misfut. 2011. *Estudio previo justificativo para el establecimiento del área natural protegida Reserva de la Biosfera Submarina del Caribe Mexicano*. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) - The Nature Conservancy. México D.F. 127 pp.
- Bunge, L., Ochoa, J., Badan, A., Candela, J., Sheinbaum, J., 2002. *Deep flow in the Yucatan Channel and their relation to changes in the Loop Current extension*. Journal of geophysical research, Vol. 107.
- Cahuich, M.A., Mariño, I., Enríquez, C., Candela, J., Sheinbaum, J., Athie, G., Mateos, E., Silva, R., 2019. *Evaluación del Potencial energético de corrientes marinas en el Caribe Mexicano*. CEMIE-Océano.
- Camilo Reynoso, W., & Núñez Ramírez, F. (2018). *Caracterización y modelaje de un parque energético marino para explotar las corrientes oceánicas del Canal de la Mona*. Ciencia, Ingenierías y Aplicaciones, 1(1), 47-60.
- Candela, J., Sheinbaum, J., Ochoa, J., Badan, A., 2002. *The potential vorticity flux through the Yucatan Channel and the Loop Current in the Gulf of Mexico*. Geophys, Res. Lett. 29(22), 2-5.
- Carrillo, L., Johns, E. M., Smith, R. H., Lamkin, J. T., Largier, J. L., 2015. *Pathways and Hydrography in the Mesoamerican Barrier Reef System Part 1: Circulation*. Cont. Shelf Res. 109 /2015) 164 – 176.
- Centro Europeo de Energía Marina <http://www.emec.org.uk>
- Centro Nacional de Control de Energía (CENACE). *Programa de ampliación y modernización de la red nacional de transmisión y redes generales de distribución del mercado eléctrico mayorista*. PRODESEN 2019-2033.

- Cetina, P., Candela, J., Shienbaum, J., Ochoa, J., Badan, A., 2006. *Circulation along the Mexican Caribbean Coast*. J. Geophys. Res. 111 (C8), 1-19.
- Chang, Y-C., Chu, P. C., Tseng, R-S., 2015. *Site selection of ocean power generation from drifter measurements*. Renew Energy, 80, 737-745.
- Charlier, H. R., Finkl, W. C., 2009. *Ocean Energy, Tide and Tidal Power*. Edit. Springer.
- Chávez, G., Candela, J., Ochoa, J., 2003. *Subinertial flows and transports in Cozumel Channel*, J. Geophys, Res, 108(C2), 3037, doi: 10.1029/2002JC001456.
- Comisión Federal de Electricidad (CFE), 2014. *Programa de obras e inversiones del sector Eléctrico*. POISE 2014-2028.
- Comisión Federal de Electricidad (CFE), 2006. *Manifestación de Impacto Ambiental-Modalidad Particular, Proyecto Central Ciclo Combinado Valladolid III (CC Valladolid III)*. México.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas CONANP, 2001. *Estudio previo justificativo para el establecimiento del Área natural protegida, Reserva de la Biosfera Submarina del Caribe*. México, 2001.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, 2007. *Estudio Previo Justificativo para el establecimiento del Área de Protección de Flora y Fauna Isla de Cozumel, Quintana Roo, México*. México, 2007.
- Comisión Natural de Áreas Protegidas CONANP. *Arrecifes de Puerto Morelos, Quintana Roo*.
- Cornett, A., 2008. *Guidance for Assessing Tidal Current Energy Resources*. Report by NRC-CHC for the OES, IA Annex II Task 1.2 Generic and site related tidal data.
- Cradden, L., Kalogeri, C., Martínez Barrios, I., Galanis, G., Ingram, D., Kallos, G., 2016. *Multi-criteria site selection for offshore renewable energy platforms*. Renew Energy, 87, 791-806.
- Eguiarte, A., García, A., Hidalgo, J., 1993. *Oceanografía física de México*.

- Estrada, C., Samperio, J., 2010. *Energías Alternas: Propuesta de investigación y desarrollo tecnológico para México.*
- Fernández, P., 2005. *Libro Energía del mar, Cap. II Corrientes marinas. Departamento de ingeniería eléctrica y energética. Universidad de Cantabria.*
- García, E., Corrercher, A., Quiles, E., Morant, F., 2016. *Recursos y sistemas energéticos renovables del entorno marino y sus requerimientos de control. Revista Iberoamericana de Automática e informática industrial, 13, 141-161.*
- Gille, S. T., Llewellyn Smith, S.G. 2003. *Bathymetry and ocean circulation. Charting the Secret World of th Ocean Floor. The GEBCO Project 1903-2003.*
- González, F., Ochoa, J., Candela, J., Badan, A., Sheinbaum, J., Navarro, J., 2007. *Tidal currents in the Yucatan Channel. Geofísica Internacional, Vol. 46, No 3, pp 199-209.*
- González, J.M., 2007. *El potencial energético útil, de las corrientes marinas en el estrecho de Gibraltar. Esc. Técnica superior de ingenieros navales.*
- Hernández, J., Félix, A., Mendoza, E., Rodríguez, Y., Silva, R., 2019. *On the Marine Energy Resources of Mexico. J. Mar. Sci. Eng, 7, 191.*
- *Informe Rapport 2010. Desarrollo de las energías renovables marinas: condiciones de éxito en las regiones del RTA del Arco Atlántico.*
- *Informe Rapport 2015. Condiciones para la buena realización de la estrategia Atlántica.*
- INEGI. *Censo de Población y Vivienda; Instituto Nacional de Estadística y Geografía: Quintana Roo, México, 2015.*
- Juanes-González, J.M. 2007. *El potencial energético útil de las corrientes marinas en el estrecho de Gibraltar.*
- Kabir, A., Lemongo-Tchamba, I., Fernandez, A., 2015. *An assessment of available ocean current hydrokinetic energy near the North Carolina shore. Renew Energy, 80, 301-307*

- López-González, J., 2011. *Desarrollo de un dispositivo de conversión de energía de las corrientes marinas*.
- López-González, J., Silva-Casarín, R., Mendoza-Baldwin, E.G. 2011. *Aprovechamiento de la energía de las corrientes con el Hidrogenerador IMPULSA*. Tecnología y Ciencias del Agua. Vol. II, No. 4, P. 97-110.
- Marine Renewable Energy Handbook, 2012. Edited by Bernard Multon, Editorial Wiley.
- Martínez, R., Ordonez-Sanchez, S., Allmark, M., Lloyd, C., O'Doherty, T., Germain, G., Gaurier, B., Johnstone, C., 2020. *Analysis of the effects of control strategies and wave climates on the loading and performance of a laboratory scale horizontal axis tidal turbine*. Ocean Engineering, 212, 107713.
- Martínez-López, B., Parés-Sierra, A. *Circulación del Golfo de México inducida por mareas, viento y la corriente de Yucatán*.
- Martínez, S., Carrillo, L., Marinone, S. 2019. *Potential connectivity between marine protected areas in the Mesoamerican Reef for two species of virtual fish larvae: Lutjanus analis and Epinephelus striatus*. Ecol. Indic. 102, 10–20.
- Mendoza, E., Lithgow, D., Flores, P., Felix, A., Simas, T., Silva, R., 2019. *A framework to evaluate the environmental impact of ocean energy device*. Renew Sustain Energy Rev, 112, 440-449.
- Merino, I. M, 1986 *Coastal Circulation in the Mexican Caribbean*. ICMYL
- Morales, J. J., 2004. El joven Mar Caribe. En: C. Carrillo Trueba y N. Hinket (Eds.), Ciencias, 76:34-41 pp.
- Muñoz, J., 2015. *Aprovechamiento de Corrientes Marinas para la Generación de Energía Eléctrica*. Ingeniería Eléctrica
- Negre, C., Zahn, R., Thomas, A.L., Masque, P., Henderson, G.M., Martínez-Mendez, G., Hall, I.R., Mas, J.L., 2010. *Climate change reverses Atlantic Ocean circulation*, Nature, Vol. 468, p. 84–88, ISSN: 0028-0836, EISSN: 1476-4687, DOI 10.1038/nature09508

- Nunes-Useche, F., Barragan, R., Canet, C. *Sedimentación carbonatada, silícica y otros sedimentos químicos en los ambientes marinos profundos. La frontera final: El océano profundo.*
- Núñez-Rivas, L.R., 2012. *El aprovechamiento de las energías renovables marinas como opción tecnológica de futuro.* Economía industrial, No 386.
- Ochoa, J., Candela, J., Badan, A., Sheinbaum, J., 2005. *Ageostrophic fluctuations in Cozumel Channel*, J. Geophys. Res., 110, C02004, doi: 10.1029/2004JC002408.
- Palafox-Muñoz, A., Zizumbo-Villarreal, L. *Distribución territorial y turismo en Cozumel, Estado de Quintana Roo, México.* Gestión Turística 2009, 11, 69–88.
- Posada Vanegas, G., V. Chávez Cerón , J.V. Hernández Fontes, Y. Rodríguez Cueto, G. Cadena Sánchez, A. Félix Delgado, R. González Huerta, E. López Honorato y R. Silva Casarín. 2019. El Futuro de las Energías Marinas en México. p. 255-274. En: Rivera-Arriaga, E., P. Sánchez-Gil, y J. Gutiérrez (eds.). *Tópicos de Agenda para la Sostenibilidad de Costas y Mares Mexicanos.* Universidad Autónoma de Campeche. Red ricomar. 334 p. isbn 978-607-8444-57-1
- Balseiro Pernas, A., 2005. *Turbina Hidrodinámica para corrientes marinas.* OMPI, Patente WO 2005/0616 A1.
- Ramírez, J., 2006. *Corrientes Oceánicas*, Revista 360°, 2.
- Restrepo, L., Zolunga, C., Valencia, A., Rodríguez, J., 2011. *Instrumentación para la medición de salinidad, temperatura y corrientes en océanos.* ACOFI N° 11 pp 35-43.
- Rivera Arriaga, E., I. Azuz-Adeath, L. Alpuche Gual y G. J. Villalobos-Zapata (eds.). *Cambio climático en México: un enfoque costero y marino.* Universidad Autónoma de Campeche, CetyS-Universidad. Gobierno del Estado de Campeche. 944 p.
- Sánchez-Mellado, I. 2015. *Simulación y modelación de las mareas y análisis de su aprovechamiento por una turbina de mar.* Bilbao ISBN 978-84-15914-12-9
- Secretaria de Comunicaciones y Transporte. PRORED. Programa rector de desarrollo costero del estado de Quintana Roo.

- Secretaria de Gobernación (SEGOB), 2009. *Programa especial para el aprovechamiento de Energías Renovables.*
- Secretaria Nacional de Energía (SENER), 2014. *Estrategia Nacional de Energía 2014- 2028.*
- Secretaria Nacional de Energía (SENER), 2016. *Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN) 2016-2030.*
- Secretaria Nacional de Energía (SENER), 2018. *Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN) 2018-2032.*
- Secretaria Nacional de Energía (SENER), 2016. *Reporte de Avance de Energías Limpias Primer semestre 2016.*
- Secretaria Nacional de Energía (SENER), 2017. *Mapa de Ruta Tecnológica en Energía del Océano 2017.*
- Secretaria Nacional de Energía (SENER), 2017. *Balance Nacional de Energía 2017.*
- SENER-World Bank-ESMAP. *Evaluación Rápida del uso de Energía, Cozumel, Quintana Roo, México; Technical Report; Secretaría de Energía (SENER), World Bank, Programa de Asistencia para la Gestión del Sector de Energía (ESMAP): México ,2015.*
- Secretaria de Turismo (SEDETUR). *Indicadores Turísticos 2017.*
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). *Programa de Manejo Área de Protección de Flora y Fauna la porción norte y la franja costera oriental, terrestres y marinas de la Isla de Cozumel 2016.*
- Skop, R. A., 1988. *Mooring Systems: A state of the art review.* Journal of Offshore Mechanics and artic Engineering, Vol.110/365.
- Simanca, J., Ramirez, O., Fernandez, L., Arriaza, L., Rodas, L., Esponda, S., García, R., Albuquerque, O., Garcia, I., 2012. *Variabilidad de las corrientes marinas en el canal de Yucatán; “Lado Cuba”. Contracorriente Cubana, Primera Parte. Serie Oceanológica. No 10.*

- Small, A. A., Cook, G. K., Brown, M. J., 2014. *The geotechnical challenges of tidal turbine projects*. ASME 2014, 33<sup>rd</sup> International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering.
- Torres, L., 2015. *Estudio de las corrientes marinas con la profundidad*. Universidad Politécnica de Cartagena.
- Wilkinson, T., Wiken, E., Bezaury Creel, J., Hourigan, T., Agardy, T., Herrmann, H., Janishevski, L., Madden, C., Morgan, L., Padilla, M., 2009. *Ecorregiones marinas de América del Norte*, Comisión para la Cooperación Ambiental, Montreal, 200 pp.
- Zhang, R., 2010. *Latitudinal dependence of Atlantic meridional overturning circulation (AMOC) variations*, *Geophys. Res. Lett.*, 37, L16703, doi:10.1029/2010GL044474.
- Zubiate, L., Villate, J.L., Torre-Enciso, Y., Soerensen, H.C., Holmes, B., Panagiotopoulos, M., Neumann, F., Rousseau, N., Langston D., 2009. *Methodology for site selection for wave energy projects*. In Proceedings of 8th European Wave and Tidal Energy Conference, (Southampton, UK).

# ANEXOS

## ANEXO 1

### Medición de corrientes por método electromagnético

Con el fin de determinar los movimientos o fenómenos que se presentan en el mar, se han diseñado instrumentos cuyo objetivo es medir la velocidad y dirección de las corrientes marinas, estos han sido llamados correntómetros (Cifuentes 2006). Se pueden dividir en cuatro tipos de correntómetros, con base en el método usado para medir la intensidad de la corriente, existen los electromagnéticos, los mecánicos, los acústicos (perfiladores de corriente por efecto Doppler) y los de deriva (boyas con GPS).

Los correntómetros electromagnéticos basan su funcionamiento en la medición de la fuerza electromotriz que es producida en las masas de agua, cuando una corriente marina atraviesa el campo magnético del planeta, su valor se registra en mili voltios por nudo de corriente, existen correntómetros electromagnéticos usados generalmente en satélites y para mediciones in-situ; Estos últimos tienen aplicaciones comúnmente en la predicción de caudales de ríos por estaciones climáticas, así como la determinación de flujo en canales, la ventaja de estos correntómetros es que no presentan partes en movimiento, por lo tanto eliminan la incertidumbre que genera la fricción y resistencia, además de poderse utilizar en aguas con abundante vegetación y caracterizarse por su fácil uso y transporte.

Para la medición de velocidad, la mayoría cuenta con un sensor compacto, que genera un campo magnético por medio de un electroimán. El electrodo del sensor mide el voltaje generado por el flujo del agua en el campo magnético, el voltaje es proporcional con la velocidad, este principio está basado en la Ley de Faraday. El sensor también puede contar con una celda de presión que determina la profundidad del agua por

medio de la carga hidrostática, lo cual eliminará el paso de medir manualmente la posición del sensor y nivel de agua.

Por otro lado, gracias al uso de las microondas y a la posición estratégica a alturas considerables con respecto a la tierra, los satélites son útiles y eficientes en cuanto a abarcar grandes superficies en el océano. En 1978 se lanzó el satélite Seasat, equipado con el primer radar de apertura sintética (SAR Synthetic Aperture Radar) diseñado para medir la altura del satélite, velocidad y dirección del viento, temperatura del mar y ondas en la superficie marina. Para la medición de las olas y corrientes marinas se utiliza el ATI-SAR (Along-track interferometric synthetic aperture radar) que consiste en dos antenas separadas una distancia determinada y en una misma dirección, las cuales generan lecturas de la superficie marina analizada, de la cual se puede obtener un plano de las olas producidas y utilizando el efecto Doppler se pueden calcular las velocidades de las corrientes existentes [Posada-Restrepo, et al, 2011].

#### Medición de corrientes con rotor Savonius

Este es uno de los métodos directos originales más simples, usados para medir corrientes, se inventó en el año de 1992 con la finalidad de medir la velocidad del viento, sin embargo, han sido utilizados a nivel mundial para medir las corrientes, ya que presentan una gran versatilidad, durabilidad, precisión y su costo es bajo. Su funcionamiento se basa en medir la rapidez de la corriente contando las revoluciones de la hélice o rotor por unidad de tiempo y la dirección de la corriente determinando la orientación de la paleta a intervalos fijos. Las características principales de este instrumento son las **aspas en forma de "S"** por lo que permite percibir las bajas velocidades, además al determinar la dirección de incidencia de la corriente con una paleta vertical, la velocidad y la dirección son independientes entre sí. Por otro lado, su construcción es mucho más simple en comparación con otros rotores. Una de las ventajas es que no puede presentar velocidades mayores a las del fluido, lo que representa mayor

seguridad para los organismos presentes en el ambiente, sin embargo, no son recomendables cuando existen cambios muy bruscos en la dirección de la corriente en intervalos pequeños de tiempo [Posada-Restrepo, et al, 2011]. En la actualidad existen correntómetros en el mercado como los Valeport 308 o los AEM213D de JFE Alec que ya tienen integrados sensores de presión y temperatura.

#### Medición con perfiladores acústicos de corrientes Doppler (ADCP)

Estos correntómetros presentan un arreglo de pequeños sensores piezoeléctricos, los cuales emiten pulsos acústicos a una frecuencia conocida y en diversas direcciones (Lee, 1996). Estos pulsos se dispersan en el océano y el eco que se genera es registrado, permitiendo conocer las velocidades locales por efecto Doppler. Se mide el cambio de frecuencias de cada una de las señales emitidas lo que permite obtener las velocidades relativas a cada nivel de profundidad. La forma más común de instalar estos equipos es anclándolos al fondo marino lo que permite medir la corriente en muchos niveles desde el fondo marino hasta la superficie. Una desventaja que presentan es que requieren de mantenimiento continuo para descargar datos, vaciar memoria y renovar las pilas. Algunos de estos sistemas pueden generar datos en tiempo real si están asociados a sistemas de telemetría y boyas oceanográficas.

#### Medición con Boyas de deriva

Este tipo de mediciones consisten en lanzar un dispositivo o plataforma flotante (boya) diseñada para permanecer a la deriva a una cierta profundidad y es capaz de enviar su posición a un receptor, lo que permite determinar su trayectoria y velocidad. Algunos sistemas pueden integrar diferentes instrumentos (CTD, calidad del agua, ADCPs, etc). Por este motivo los sistemas GPS (Sistema de Posicionamiento Global) son esenciales dentro de una boya, ya que las medidas que se obtienen con ellas tienen que ser

relacionadas con posiciones en el espacio, para que sean datos útiles. En el medio oceánico, la inclusión de telemetría para emitir su posición es ideal. El funcionamiento de cada boya dependerá de su diseño, tamaños y forma de su elemento de arrastre, la mayoría flotan en la superficie, aunque algunas están diseñadas para trabajar sumergidas a diferentes profundidades. Generalmente las boyas sumergidas nos proporcionan datos sobre las corrientes oceánicas profundas, así como también temperatura y salinidad [Posada-Restrepo, et al, 2011].

#### *Tecnologías de turbinas de corrientes marinas.*

Se podrían describir diversos dispositivos que existen en la actualidad, tanto en investigación como en fases de desarrollo iniciales o avanzadas, sin embargo, es importante conocer antes la clasificación de los sistemas y los diferentes tipos de anclajes al fondo marino.

Se han desarrollado muchos experimentos utilizando diversos dispositivos con el fin de poder demostrar la posibilidad de explotación de las formas renovables de energía como lo son las corrientes marinas.

En la actualidad existe una gran variedad de generadores para el aprovechamiento de estas corrientes, la principal característica de estos dispositivos es que basan su funcionamiento en ser posicionados en medio del flujo. Por la gran variedad de diseños existentes, estos dispositivos se pueden agrupar en 5 diferentes tipos:

- *Turbinas con rotores de eje horizontal:* Estas presentan un eje de rotación horizontal o paralelo a la dirección del flujo. El principio de extracción de energía de la corriente es similar al de los aerogeneradores, la corriente hace girar al rotor generando una fuerza debido al movimiento del flujo alrededor de las palas, lo que permite producir electricidad. Por su similitud en la forma y operación con los generadores eólicos, cuya tecnología está más establecida,

se ha intentado trasladar el conocimiento al desarrollo de turbinas marinas. Sin embargo, el éxito ha sido limitado y se continúa trabajando en su adaptación para corrientes marinas [López-González et al., 2011; Núñez-Rivas, 2012].

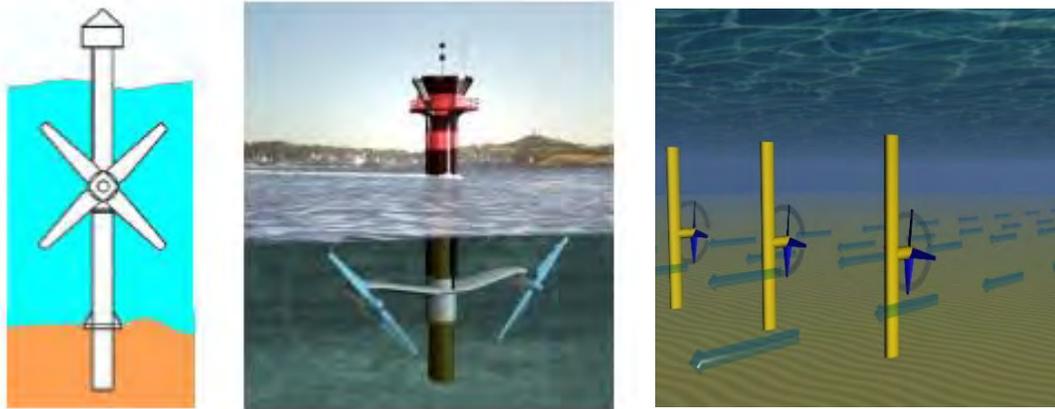


Figura 41. Prototipos de turbina con rotor axial.

- *Turbinas con rotores de eje vertical:* Estas turbinas presentan un eje de rotación vertical o perpendicular a la trayectoria del flujo. Estas turbinas presentan una serie de ventajas al facilitar la ubicación de los generadores sobre la superficie del mar. Además, el sistema puede suspenderse de un único eje central que va conectado al generador eléctrico, con lo cual se reducen los posibles fallos mecánicos, y por otro lado la dirección del flujo de la corriente genera pocas cargas en las palas de la turbina, ya que siempre existe un perfil que se enfrenta a la corriente con un ángulo adecuado. Estas turbinas han sido objeto de menos estudios y aplicaciones, sin embargo, presentan una eficiencia baja pero aceptable ya que su instalación y construcción requieren menos inversiones y esfuerzos [López- González et al., 2011; Núñez-Rivas, 2012].

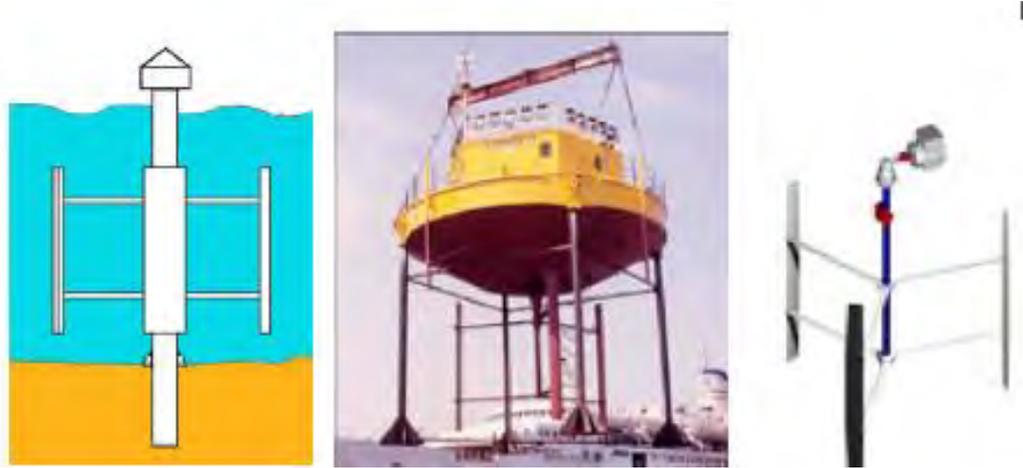


Figura 42. Prototipos de turbina con rotor de eje vertical.

- *Alabe oscilante (Hydrofoil)*: Son alerones que basculan alternativamente impulsados por el flujo, estos presentan una aleta en posición horizontal donde la fuerza de la corriente provoca que el alerón oscile de manera vertical el cual por medio de una palanca acciona un servomotor hidráulico que genera energía eléctrica. Este dispositivo puede ser utilizado en zonas con poca profundidad debido a que el alabe coloca en posición horizontal y no requiere una gran distancia vertical. Por otro lado, esta misma característica genera un menor riesgo en cuanto al impacto con elementos flotantes o embarcaciones, y en cuanto al mantenimiento, instalación y conexión a la red se vuelve más fácil y además los costos son menores.

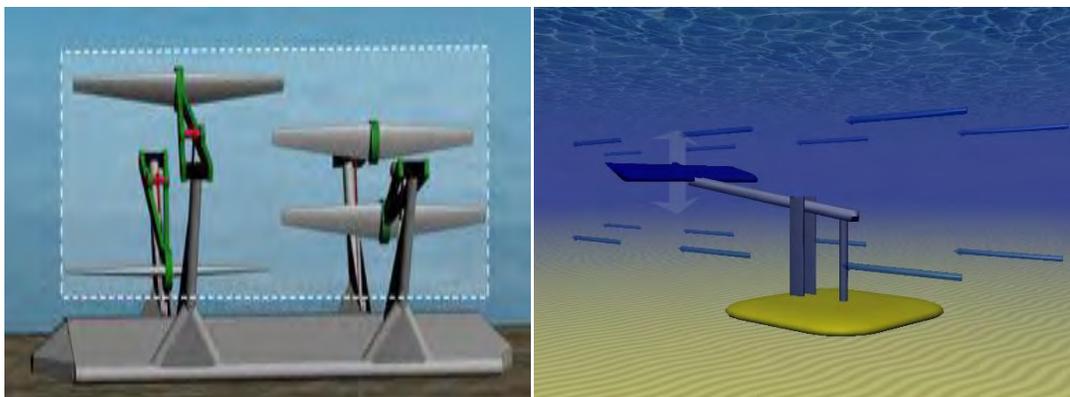


Figura 43. Prototipos de Perfil Hidrodinámico oscilante.

- Sistema de Efecto Venturi: Estos dispositivos consisten en una turbina de eje horizontal donde se permite el paso del agua por un conducto que en el centro se va estrechando, mientras que en los extremos se ensancha, esta diferencia de áreas genera una aceleración del flujo de la corriente por el diferencial de presión que se presenta, el flujo resultante al final del dispositivo puede impulsar la turbina directamente. Por sus características este sistema puede ser utilizado en zonas con poca profundidad, además de que al presentar una simetría en el conducto permite que la turbina trabaje con la misma eficiencia cuando la corriente fluye en ambos sentidos



Figura 44. Sistema Efecto Venturi.

- Cometa de corriente (Tidal Kite): Es un dispositivo que presenta la forma de un alerón y tiene colgada una turbina. Todo el sistema se encuentra anclado al lecho marino lo que le permite estar en suspensión por efecto de la fuerza de la corriente marina, análogo a una cometa en el aire. La cometa oscila en forma de ocho lo que permite aprovechar las aceleraciones que ésta genera durante su descenso en picada obteniendo una mayor rotación de la turbina y por lo tanto una mayor energía. Esto presenta una alta eficiencia a bajas velocidades de flujo ya que al alcanzar grandes velocidades en

el descenso se puede compensar el bajo nivel energético con corrientes de baja velocidad.

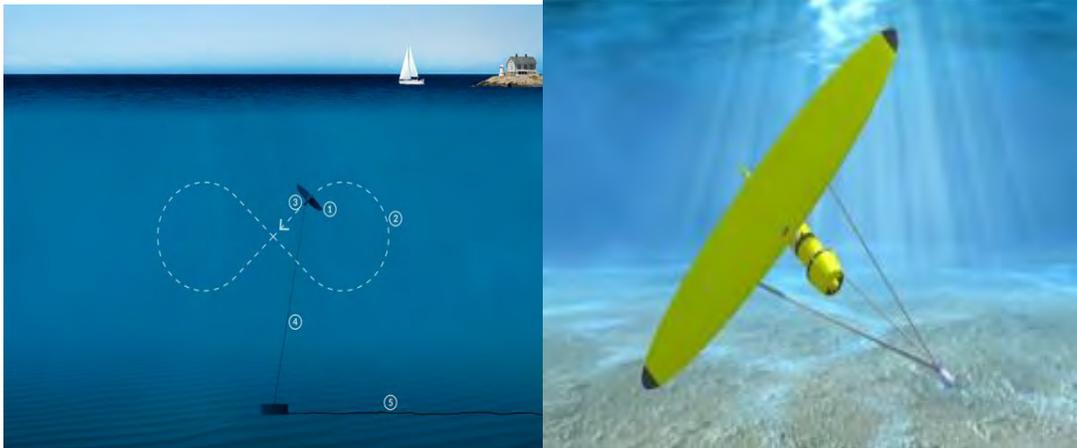


Figura 45. Sistema Tidal Kite.

- *Tornillo de Arquímedes*: Es un sistema de configuración helicoidal de tornillos girando en un eje central anclado al fondo marino, donde el flujo de la corriente que atraviesa el helicoide genera el movimiento de giro de la turbina. Ya que estos tornillos se encuentran en un diseño compacto generan un menor impacto ambiental, además de que presentan menores turbulencias, por lo tanto, el costo en la instalación es menor por ser más fáciles de transportar y menos pesados.

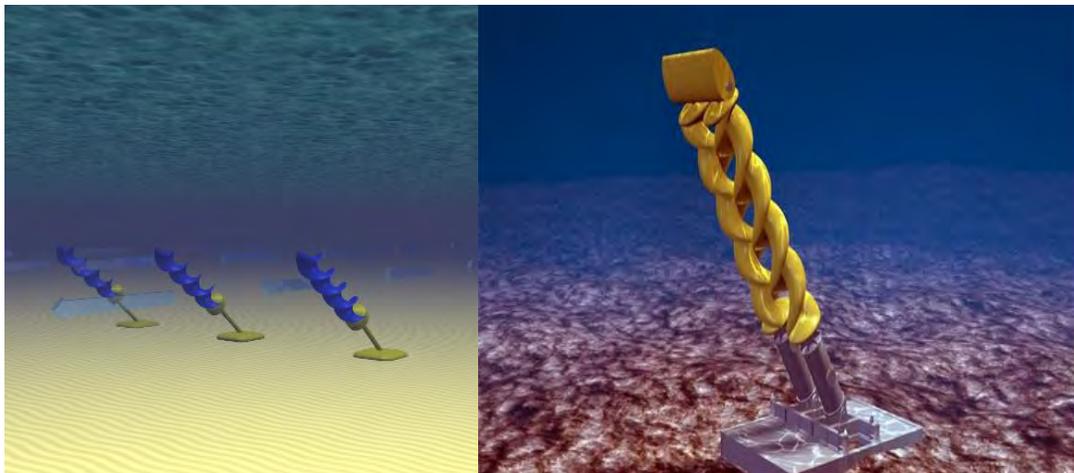


Figura 46. Sistema Tornillo de Arquímedes.

## ANEXO 2

### Tipos de anclajes al fondo marino

Para colocar las turbinas existen diversas tendencias:

#### a) Pilotes:

Estructura que consta de pilotes que son introducidos o clavados en el fondo marino, no son estructuras de fácil instalación ya que es necesario construir los cimientos, y debido a las diferentes propiedades del fondo marino hay ocasiones en donde se deben realizar con profundidades considerables.

Este tipo de anclaje por pilotes está orientado generalmente para turbinas de corrientes marinas de eje horizontal y tiene varias configuraciones en cuanto a su anclaje, por ejemplo, existen los pilotes únicos, pilotes gemelos y los pilotes anclados al fondo mediante tirantes.

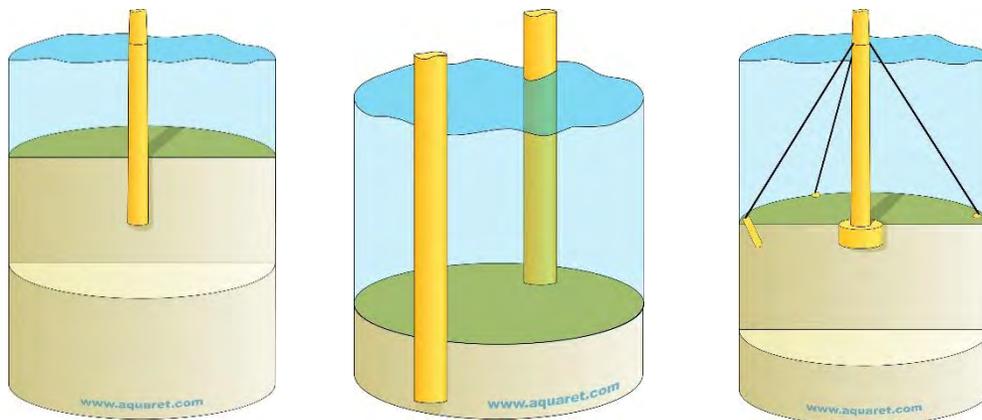


Figura 47. Sistema de anclaje con pilotes.

#### b) Base fijada por gravedad en el fondo marino

Se trata de grandes estructuras o bloques de grandes dimensiones que quedan fijas al fondo marino utilizando el efecto de la gravedad debido a su gran peso. Se le pueden agregar anclajes adicionales que mantengan la base fija al fondo o bien estructuras apoyadas sobre el mismo y ancladas en algunos puntos que eviten volcaduras o desplazamientos laterales de la turbina, en algunos casos se llega a enterrar parte de la base misma.



Figura 48. Sistema de anclaje con base fija por gravedad.

#### c) Hydrofoils en la base

Se trata de una base que funciona con el principio de sustentación de los hydrofoils, donde al pasar la corriente marina por ellos genera una fuerza de sustentación hacia el fondo, de tal forma que se ejerce una fuerza vertical hacia abajo que permite fijar a la estructura en el fondo.

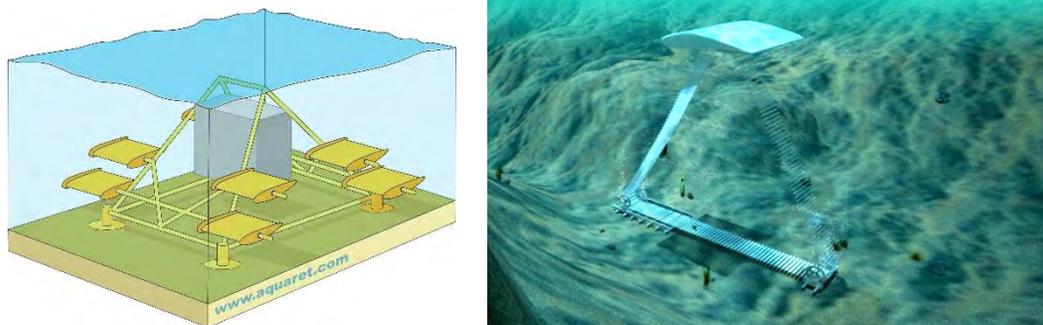


Figura 49. Sistema de anclaje con Hydrofoils.

#### d) Anclajes flexibles

Este tipo de anclajes se pueden dividir en tres diferentes configuraciones:

- *Anclajes flexibles:* Se trata de un sistema donde la turbina está anclada mediante cadenas o cables a una base que se encuentra

fija en el fondo marino, lo que permite al sistema moverse libremente con el flujo de la corriente y adaptarse a los cambios de dirección que esta pudiera tener.

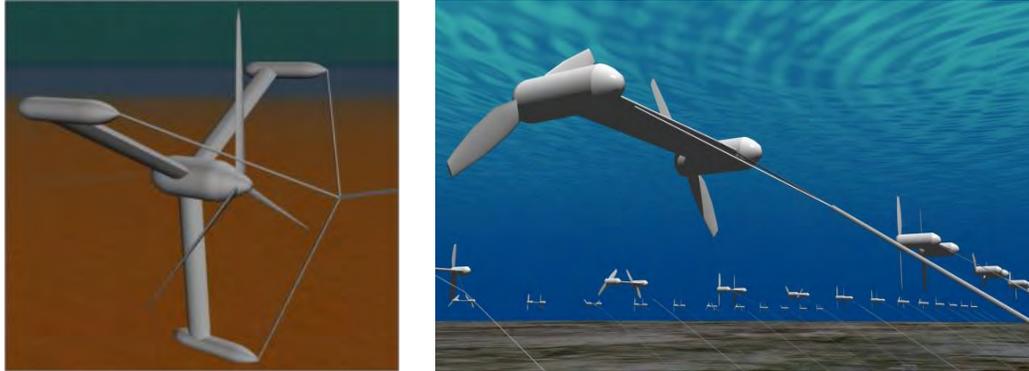


Figura 50. Sistema de anclajes flexibles.

- Anclajes rígidos: Funciona de la misma manera que el anterior, con una base fija anclada al fondo sin embargo este anclaje presenta menos grados de libertad en el movimiento, e incluso puede ser restringido por completo.

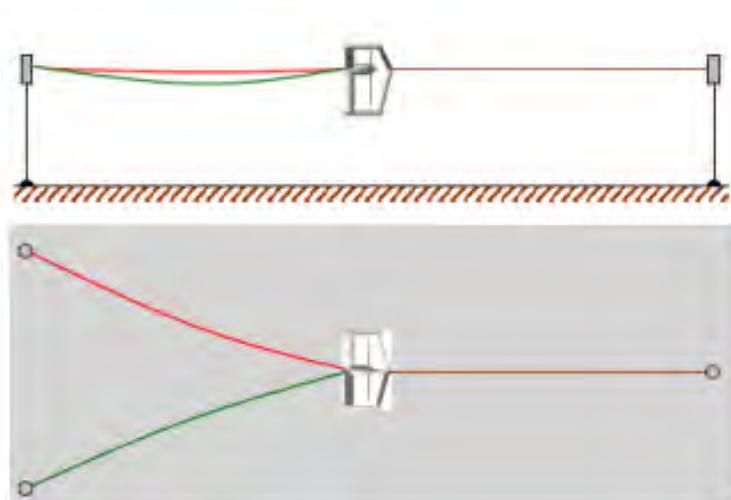


Figura 51. Sistema de anclajes rígidos.

- *Anclajes flotantes:* En este tipo de anclajes la turbina se encuentra flotando en la superficie marina o a profundidades específicas, estos dispositivos se encuentran sujetos mediante cables o cadenas que a la vez están sujetas al fondo marino, lo que le permite a la estructura permanecer flotando en el mismo lugar siempre; Sin embargo este tipo de estructuras se verá influenciado por el movimiento generado por el oleaje, lo que podría afectar su funcionamiento al llegar a oscilar varios metros de altura



Figura 52. Sistema de anclajes flotantes.

### ANEXO 3

#### Ingeniería existente

Como se mencionó anteriormente, en la actualidad existen varios modelos de tecnologías en fase de desarrollo y experimentación para el aprovechamiento de las corrientes marinas, el Centro Europeo de Energía Marina (EMEC) tiene como objetivo principal, proporcionar las condiciones necesarias para la prueba y experimentación de estos dispositivos existentes algunos de ellos registrados en esta organización son:

Tabla 3. Tipos y característica de dispositivos existentes para aprovechamiento energético con corrientes.

	<b>Compañía</b>	<b>País</b>	<b>Dispositivo</b>	<b>Características</b>
1	4sphere	USA	4sphere In-Stream Electric Generator	--
2	Andritz Hydro Hammerfest	Noruega	HS1000	Eje Horizontal Vel: 2.5 m/s Producción: 1 MW
3	Aquantis Ltd	USA	AQ Series	--
4	Aquantis Inc	USA	C-Plane	--
5	Aquamarine Power	UK	Neptune	Eje Horizontal
6	Atlantis Resources Corp	UK	Aquanator	Hydrofoils Vel: 0.77 m/s – 1.5 nudos Producción: 5 kW
7	Atlantis Resources Corp	UK	AR-1500	Eje Horizontal Vel: 3 m/s Producción: 1.5 MW
8	Atlantis Resources Corp	UK	AR-1000	Eje Horizontal Vel: 2.65 m/s Producción: 3,8 KV
9	Atlantisstrom	Alemania	Atlantisstorm	Eje Horizontal
10	Balkee Tide and Wave Electricity	Mauricios	Tidal and Wave Power Electrical Generator (TWPEG)	Eje Horizontal
11	BioPower System Pty Ltd	Australia	bioStream	Otros
12	Blue Energy	Canadá	Blue Energy Ocean Turbine	Eje Verical Vel: 2.65 m/s Producción: 20 KW
13	Bluewater	Holanda	BlueTEC (Bluewater Tidal Energy Converter)	Otros
14	BluStream	Francia	MegaWatForce	--
15	Bosch Rexroth	Alemania	--	Eje Horizontal
16	Bourne Energy	USA	TidalStar	Eje Horizontal
17	Bourne Energy	USA	OceanStar	Eje Horizontal
18	Bourne Energy	USA	CurrentStar	Eje Horizontal
19	Centro Tecnológico SOERMAR	España	PROCODAC	--
20	Cetus Energy	Australia	Cetus Turbine	Eje Horizontal
21	Clean Current Power	Canadá	Clean current Tidal Turbine	Eje Horizontal y Venturi

22	Current Power AB	Suecia	Current Power	Eje Vertical
23	Current2Current	UK	Tidal Turbine	Eje Vertical
24	Deepwater Energy BV	Holanda	Oryon Watermill	Eje Vertical
25	EC-OG	UK	Subsea Power Hub	Eje Vertical
26	EEL Energy	Francia	EEL Energy	Hydrofoils
27	Elemental Energy Technology Limited	Australia	SeaUrchin	Otros
28	Fieldstone Tidal Energy	USA	Fieldstone Tidal Energy	Otros
29	Flex Marine Power Ltd	UK	Swimmer Turbine	--
30	Flumill	Noruega	Flumill Power Tower	Anillo de Arquímedes
31	Free Flow 69	UK	Osprey	Eje Vertical
32	Free Flow Power Corporation	USA	SmarTurbine	Eje Horizontal
33	GCK Technology	USA	Gorlov Turbine	Eje Vertical
34	Greener Works Limit	UK	Relentless Turbine	--
35	Greenheat System Ltd	UK	Gentec Venturi	Otros
36	Guinard Energies SAS	Francia	MagaWattBlue	--
37	Hales Water Turbines Ltd	UK	Hales Turbine	Otros
38	Hydra Tidal AS	Noruega	Morild II	Eje Horizontal Producción: 1 MW
39	Hydro Alternative Energy	USA	OCEANUS	--
40	Hydro Green Energy	USA	Hydrokinetic Turbine	Venturi
41	Hydro-Gen	Francia	Hydro-Gen	Eje Horizontal Vel: 3 m/s Producción: 1 MW
42	Hydrokinetic Laboratory	USA	HyPEG	--
43	Hydromine	UK	The Hydro Mine	--
44	HydroQuest	Francia	Hydroquest Tidal	Eje Vertical
45	Hydrovolts Inc	USA	WF-10-15 Waterfall Turbine	Otros
46	Hydrovolts Inc	USA	C-12 Canal Turbine	Eje Horizontal
47	Hydroventuri	UK	Rochester Venturi	Venturi

48	Hyundai Heavy Industries	Korea	--	--
49	IHC Tidal Energy	Holanda	OceanMill	Eje Vertical
50	InCurrent Turbines Ltd	Canadá	Vortex Power Drive	--
51	Instream Energy Systems	Canadá	Vertical Axis Hydrokinetic Turbines (VAHT)	Eje Vertical
52	Integrated Power Technology Corporation	USA	TURBOFOIL	Hydrofoils
53	Jupiter Hydro Inc	Canadá	--	Anillo de Arquímedes
54	Kawasaki Heavy Industries, Ltd	Japón	Kawasaki	Eje Horizontal Vel: 2.5 m/s Producción: 1 MW
55	Kinetic Energy System	USA	Hydrikinetic Generator, KESC Bowsprit Generator	--
56	Kepler Energy	UK	Kepler Turbine	Otros
57	Leading Edge	US	--	Hydrofoils
58	Lucid Energy Technologies	USA	Gorlov Helical Turbine (GHT)	Eje Vertical
59	Lunar Energy	UK	Rotech Tidal Turbine (LTT)	Venturi
60	Magallanes Renovables	España	Magallanes Project	Eje Horizontal
61	Mako Tidal Turbines	Australia	MAKO Tidal Turbines	Eje Horizontal
62	Marine Current Turbines	UK	SeaGen U	Eje Horizontal Vel: 2.4 m/s Producción: 1,2 MW
63	Marine Current Turbines	UK	SeaGen S	Eje Horizontal Vel: 3 m/s Producción: 1 MW
64	Marine Energy Corporation	USA	Current Catcher	Eje Horizontal
65	Minesto	Suecia	Deep Green	Cometa Kite
66	Modec	Japón	Savonius Keel & Wind Turbine Darrieus (SKWID)	Otros
67	Moorfield Tidal Power Ltd	UK	Tidemark	--
68	Natural Currents	USA	Red Hawk	Otros
69	Nautricity Ltd	UK	CoRMaT	Eje Horizontal
70	New Energy Corporation	Canadá	EnviroGen/EnviroCurrent	Eje Vertical
71	Norwegian Ocean Power	Noruega	H300	Eje Vertical

72	Nova Innovation Ltd	UK	Nova M100	Eje Horizontal
73	Ocean Flow Energy	UK	Evopod	Eje Horizontal Producción: 300 a 600 kW
74	Ocean Renewable Power Company (ORPC)	USA	TidGen Power System	Eje Horizontal
75	Ocean Renewable Power Company (ORPC)	USA	RivGen Power System	Eje Horizontal
76	Ocean Renewable Power Company (ORPC)	USA	OCGen	Eje Horizontal Producción: 32 kW
77	Oceana Energy Company	USA	TIDES	Eje Horizontal
78	Offshore Islands Ltd	USA	Current Catcher	Eje Horizontal
79	Open Ocean Energy Ltd	Irlanda	Tidal Junior Flyer	--
80	OpenHydro	Irlanda	Open-Centre Turbine	Eje Horizontal, Venturi Vel: Producción: 2 MW
81	Overberg Limited	UK	Ovopod	Eje Horizontal
82	QED Naval	Escocia	Subhub	Otros
83	REAC Energy GmbH	Alemania	StreamCube	Eje Vertical
84	Renewable Devices Marine Ltd	UK	Sea Otter	--
85	Renewable Devices Marine Ltd	UK	River Otter	--
86	Renewable Devices Marine Ltd	UK	Capricon 5	Eje Horizontal
87	Renewable Devices Marine Ltd	UK	Capricon 125	Eje Horizontal
88	Repetitive Energy Company	UK	REPEN6	Eje Vertical
89	ResHydro	USA	Hydrofoil Cascade Resonator (HCR)	Hydrofoils
90	SABELLA SAS	Francia	D03	Eje Horizontal
91	SCHOTTEL group	Alemania	STG (SCHOTTEL Tidal Generator)	Eje Horizontal
92	Scotrenewables	UK	SR2000	Eje Horizontal
93	SeaCurrent	Holanda	SeaCurrent TidalKite™	Tidal Kite
94	SeaPower Gen	UK	SPG	--
95	Seapower scrI	Italia	GEM	Tidal Kite
96	SMD Hydrovision	UK	TiDEL	Eje Horizontal Vel: 3 m/s producción: 1.5 MW

97	Straum AS	Noruega	Hydra Tidal	Eje Horizontal
98	Suanders Energy Ltd	UK	Power-Frame	Eje Horizontal
99	Sustainable Marine Energy (SME)	UK	PLAT-O	Eje Horizontal
100	Statkraft	Noruega	Tidevanndkraft	Eje Horizontal producción: 1MW
101	Teamwork Tech	Holanda	Torcado	Eje Horizontal Produccion:50 y 150 KW
102	Tidal Energy Ltd	UK	DeltaStream	Eje Horizontal producción: 1,2 MW
103	Tidal Energy Pty Ltd	Australia	Davidson Hill Venturi (DHV) Turbine	Enclosed tips (Venturi)
104	Tidal Sails AS	Noruega	Tack Reach	Otras
105	TidalStream Limited	UK	Triton 6 (Tidal Turbine Platform System)	Eje Horizontal Producción: 10 MW
106	TidalStream Limited	UK	Triton 3 (Tidal Turbine Platform System)	Eje Horizontal Producción: 10 MW
107	Tidalys	Francia	ELECTRImar 4200	Eje Horizontal
108	Tidalys	Francia	ELECTRImar 1800	Eje Horizontal
109	Tocado Tidal Turbines	Holanda	T2	Eje Horizontal producción: 1.54MW
110	UEK Corporation	USA	Underwater Electric Kite	--
111	University of Edinburgh	UK	Polo	--
112	Verdant Power	USA	Free Flow Kinetic Hydropower System (KHPS)	Eje Horizontal Vel: 3 m/s producción: 1.5 MW
113	Vortex Hydro Energy	USA	VIVACE (Vortex Induced Vibrations Aquatic Clean Energy)	Otras
114	Vortex Power Drive	USA	Vortex Power Drive	--
115	Water Wall Turbine Inc	Canadá	Water Wall Turbine - In-Flow Water Current Technology	Eje Horizontal

## ANEXO 4

Se describen algunas de las propuestas de los estudios y factores más importantes que se necesitan tomar en cuenta cuando se lleva a cabo un análisis de impacto ambiental generado por dispositivos de aprovechamiento energético.

- Medio Físico
  - o Geología y geomorfología

La construcción de estructuras en el medio marino puede llegar a modificar algunos de los procesos que dan lugar a la orografía del fondo marino, como es la variación en el nivel del mar, las corrientes marinas, la meteorología, el clima marítimo, el transporte de sedimentos, etc, es decir podrían afectar en general la morfología y a los sedimentos, por lo que los estudios geológicos y geomorfológicos pueden ser relevantes además de permitir conocer la naturaleza y magnitud de eventos pasados y conocer posibles indicadores de escenarios geomorfológicos en el futuro.

- o Hidrodinámica

La presencia de tecnologías de aprovechamiento de energía marina puede presentar efectos negativos sobre el oleaje y las corrientes, ya que se producen interacciones directas oleaje-estructura en algunos casos, así como modificar la dinámica sedimentaria, por lo que se necesitan estudios periódicos que permitan observar el comportamiento cercano a los anclajes de dispositivos

- Medio Biótico
  - o Comunidades bentónicas (comunidades que habitan en el fondo de los ecosistemas acuáticos)

La instalación de estos dispositivos de aprovechamiento de energía marina implica en algún caso la cimentación, anclajes y cables submarinos, por lo que podría generar afectaciones sobre el medio biótico, por lo que se debe

realizar una caracterización bentónica de la zona de instalación y áreas cercanas.

Durante la fase de instalación la turbidez del agua por remoción de sedimento podría afectar a las comunidades algales como consecuencia de la disminución de la luz que llega al fondo, por lo que podría llegar a afectar las comunidades de micro invertebrados bentónicos. Para la fase de funcionamiento la estructura en algunos casos podría ofrecer una superficie de sustrato duro artificial favoreciendo la fijación de algas y fauna sésil como esponjas, cnidarios, briozoos y poliquetos, generando un nuevo hábitat.

- o Ictiofauna (Especies de peces que viven en una determinada región)

La instalación de anclajes y en general de dispositivos marinos puede dar lugar a la generación de ruidos y vibraciones que espanten a las comunidades de peces situadas en la zona, ya que cierta frecuencia de sonido puede originar daños en el sistema auditivo de algunas especies en un radio de 100 m [Nedwell & Howell., 2004].

Los efectos más comunes sobre la ictiofauna durante la fase de instalación son: efectos físicos, stress y cambios fisiológicos, efectos en la capacidad auditiva, daños estructurales y celulares, efectos visuales y desorientación, así como efectos en los comportamientos.

- o Mamíferos marinos

Con los mamíferos marinos se presenta casi las mismas afectaciones que con la ictiofauna, pero se asocia más con los niveles de ruido y las vibraciones ya que pueden ocasionar cambios en el comportamiento de cetáceos e incluso un descenso en la disponibilidad del alimento lo que provoca que emigren a otras zonas, así como posibles colisiones con los dispositivos.