



**Universidad Nacional Autónoma de México**

**Instituto en Ciencias del Mar y Limnología**

**EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE  
CONVERSIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE EN  
EL MAR CARIBE MEXICANO.**

**T E S I S**

**Que para optar por el grado de:**

**MAESTRO EN CIENCIAS DEL MAR  
(ESPECIALIDAD EN OCEANOGRAFÍA FÍSICA)**

**P r e s e n t a :**

**JUAN FRANCISCO BÁRCENAS GRANIEL**

**Director de tesis:**

**DR. MIGUEL ÁNGEL ALATORRE MENDIETA, INSTITUTO DE CIENCIAS DEL  
MAR Y LIMNOLOGÍA.**

**Miembros del Comité tutor:**

**DEL INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA:**

**M. EN C. FRANCISCO GERARDO RUIZ RENTERÍA y  
DR. MARTÍN MERINO IBARRA.**

**DEL INSTITUTO DE INGENIERÍAS:**

**DR. RODOLFO SILVA CASARÍN,  
M. EN I. HÉCTOR MIGUEL AVIÑA JIMÉNEZ.**

**México D.F.**

**MAYO 2014**



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.



*Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología*

Universidad Nacional Autónoma de México

**EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE  
CONVERSIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE EN  
EL MAR CARIBE MEXICANO.**

**T E S I S**

Que para optar por el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS DEL MAR  
(ESPECIALIDAD EN OCEANOGRAFÍA FÍSICA)**

**P r e s e n t a :**

**JUAN FRANCISCO BÁRCENAS GRANIEL**

**Director de tesis: DR. MIGUEL ÁNGEL ALATORRE MENDIETA.**

**Miembros del comité tutor:**

**M. EN C. FRANCISCO GERARDO RUIZ RENTERÍA.  
DR. RODOLFO SILVA CASARÍN.  
DR. MARTÍN MERINO IBARRA.  
M. EN I. HÉCTOR MIGUEL AVIÑA JIMÉNEZ.**

**México D.F.**

**MAYO 2014**

**DEDICATORIA:**

A mi amada esposa Concepción (con s) y a mis amados hijos; Clío y Daniel, motores de mi vida en la Mar y en la vida.

**AGRADECIMIENTOS:**

Agradezco en primera instancia a mis tutores M. en C. Francisco Gerardo Ruiz Rentería y al Dr. Miguel Ángel Alatorre Mendieta, con quienes empecé a formular mi trabajo de investigación y que además creyeron en lo que hacía. Agradezco así mismo a M. en C. Edgar Escalante Mancera en su disposición a resolución de dudas y uso de software.

Agradezco a mis tutores el Dr. Merino que con su enfoque integrador e incisivo permitió que mi trabajo brille de mucha mejor manera. También al Dr. Rodolfo que con su libro de oleaje y a sus comentarios encontré respuestas a muchas dudas sobre complejo tema. Agradezco al M. en I. Héctor Miguel Aviña Jiménez por sus acertados comentarios y apoyo a mi trabajo.

Agradezco los Doctores Paulo Salles y Adrian Pedrozo por su voto de confianza a mi trabajo y por sus comentarios.

Agradezco a la Dra. Vilaclara toda su disposición a que yo diera lo mejor de mí en el posgrado, estando atenta a mi avance en las materias, el inglés y la tesis. Así mismo a Diana, Lupita, Chantal y Gabriela, que con su disposición y amable trato todo ha sido sencillo en lo concerniente a tareas administrativas.

Agradezco al M. en C. Fernando Negrete Soto, por su invaluable curso de buceo que me permitió regresar a estar en un contacto más profundo con el Océano.

Agradezco a la Tripulación del PUMA y al PUMA por la experiencia sin igual de ser parte de un Crucero Oceanográfico, la comida, la convivencia el Océano en su máxima extensión y profundidad.

Agradezco a la UNAM a través del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología en CU y de la Unidad Académica de Sistemas Arrecifales Puerto Morelos, a todo el personal y compañeros estudiantes que directa e indirectamente aportaron de forma tangible e intangible sus acciones a mi labor como estudiante del posgrado, del cual me siento orgulloso y además portador de los saberes del Mar (no todos), GRACIAS.

Un agradecimiento especial a la Dra. Ann Grant por su revisión del resumen en inglés, muchas gracias.

Nunca dejaré de agradecer a mis Padres Francisco y Emi su ayuda entregada, su apoyo en el momento oportuno.

## **RESUMEN.**

El tema energético a nivel global tiene el primer grado de importancia en el desarrollo de los países, sin embargo en el último siglo el consumo de energéticos provenientes principalmente de los hidrocarburos ha impactado globalmente al medio ambiente, por ello la tendencia actual es tener seguridad energética con el mínimo impacto ambiental por medio de las fuentes energéticas renovables o alternativas más eficientes. En ese contexto, y para respaldar que México cuenta con variadas y suficientes fuentes de energías renovables, el objetivo principal de este trabajo fue evaluar el potencial de los recursos energéticos oceánicos renovables del Caribe Mexicano para la producción de energía eléctrica. Para ello, realicé una pre selección de las tecnologías viables para el Caribe Mexicano dividida en las categorías de: oleaje, gradiente térmico, gradiente salino, mareas, corrientes de marea y corrientes marinas. Posteriormente realicé el inventario del potencial del Caribe Mexicano con base en procedimientos de cuantificación de las energías marinas seleccionadas y específicamente el potencial energético para las áreas que demuestren tener posibilidades técnicas y ambientales. La parte central de la metodología la basé en la recopilación, selección y análisis de datos históricos de las variables oceanográficas esenciales, así como la adecuación de los diferentes procedimientos de cuantificación pre existentes de acuerdo a la cantidad, calidad y disponibilidad de datos. El resultado fue que en algunas zonas del Caribe Mexicano sí existe potencial energético disponible a ser aprovechado y que el potencial técnicamente disponible para el aprovechamiento de las olas es del orden de 450 MWe y 2700 GWh-año, el del gradiente térmico de 2000 MWe y 17500 GWh-año, el del gradiente salino de 30 MWe y 380 GWe, y el de las corrientes marinas 300 MWe y 1800 GWh-año. En conclusión, este tipo de estudio debería efectuarse para todo el Mar Territorial de México con miras a tener un Inventario Nacional que cristalice en el Atlas de Energías Renovables Oceánicas de México. Este sería uno de los instrumentos cruciales para guiar el preciso incremento de la inversión nacional en investigación y desarrollo de tecnología autóctona para el aprovechamiento de nuestros recursos energéticos renovables oceánicos.

## **ABSTRACT.**

The global energy issue is of prime concern in developing countries; the consumption during the last century of energy derived mainly from hydrocarbons has adversely affected the environment worldwide. Hence, the current trend is to have energy security with minimal environmental impact through use of renewable energy sources and more efficient alternatives. To help ensure that Mexico has diverse and sufficient renewable energy sources, this study evaluated the potential of the renewable energy resources of the Mexican Caribbean for the production of electricity. This entailed pre-selection of technologies viable for the Mexican Caribbean in the following categories: waves, thermal gradient, salinity gradient, tides, tidal streams and ocean currents. Later I realized the potential inventory of the Mexican Caribbean of the potential energy of these marine energy sources was quantified, specifically for areas that demonstrate technical and environmental possibilities. The method was centered on the collection, selection and analysis of historical data on the oceanographic variables that are essential in the quantification of energy resources in each category, and on assessment of the suitability of the various pre-existing quantification procedures according to the quantity, quality and availability of the data. The results indicate that in some areas of the Caribbean there is energy potential to be exploited: for waves the technically available potential is about 450 MWe and 2700 GWh-yr, for thermal gradient 2000 MWe and 17500 GWh-yr, for saline gradient 43 MWe and 380 GWh-yr, and for ocean currents 300 MWe and 1800 GWh-yr. This type of study should be carried out for all the Territorial Waters of Mexico in order to have a National Inventory that becomes the Marine Renewable Energy Atlas of Mexico. This should encourage the authorities to invest more in research and development of indigenous technology for harnessing our marine renewable energy resources.

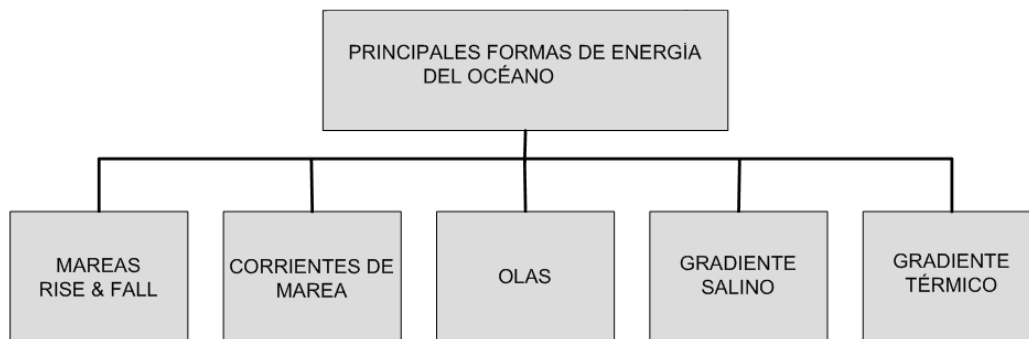
<b>CONTENIDO.</b>	<b>Pagina.</b>
i. Dedicatorias.	i
ii. Resumen y abstract.	ii
I. INTRODUCCIÓN.	1
II. ZONA DE ESTUDIO: EL MAR CARIBE DE MEXICO.	4
III. METODOLOGÍA Y ESTRATEGIAS.	5
<b>1. POTENCIAL ENERGÉTICO POR OLAS.</b>	<b>9</b>
1.1. Antecedentes.	9
1.2 Procedimiento.	10
1.3 Delimitación de la zona undimotriz.	11
1.4 Trabajos previos sobre oleaje en la zona.	12
1.5 Análisis de datos disponibles de la NDBC.	14
1.6 Descripción gráfica de los datos.	17
1.7 Obtención de la potencia promedio mensual.	21
1.8 Influencia del fondo marino.	26
1.9 Resultados potencial energético por olas.	26
<b>2. POTENCIAL ENERGÉTICO POR GRADIENTE TÉRMICO.</b>	<b>28</b>
2.1 Antecedentes.	28
2.2 Procedimiento.	29
2.3 Batimetría.	30
2.4 El volumen del Mar Caribe de México.	30
2.5 Características físicas y termofísicas de las masas de agua.	31
2.6 Perfiles de temperatura de referencia en el Mar Caribe.	31
2.7 Datos del NODC de perfiles de temperatura.	32
2.8 Análisis de datos NODC de temperatura en función de la profundidad.	33
2.9 Variación estacional del gradiente de temperatura, datos NODC.	37
2.10 Estimación del potencial energético del gradiente térmico.	38
2.10.1 Potencial teórico máximo.	39
2.10.2 Potencial teórico máximo de la mezcla.	40
2.10.3 Potencial teórico bruto disponible.	43
2.10.4 Potencial técnicamente disponible.	43
2.11 Resultados potencial energético por gradiente térmico.	44
2.11.1 Potencial Energético del Mar Caribe de México.	44
1.1.1 Lugares potenciales OTEC a distancia menor a 10km.	44
<b>3. POTENCIAL ENERGÉTICO DEL GRADIENTE SALINO.</b>	<b>47</b>
3.1 Antecedentes.	47
3.2 Procedimiento.	48
3.3 Esguerramiento superficial al Río Hondo de sus subcuencas.	50
3.4 Cálculo del flujo volumétrico por estimación de diferentes métodos.	50
3.4.1 Procedimiento aritmético.	52
3.4.2 Ecuación de Strahler (1964).	52
3.4.3 Ecuación de continuidad.	53
3.4.4 Ecuación de Davis (1938).	53
3.4.5 Correlación de Einsele (1969).	53
3.4.6 Método de Creager o de la envolvente.	54
3.4.7 El método Racional.	55
3.4.8 Método Racional SIATL.	55
3.5 Sumario de Resultados de variables Río Hondo.	57
3.6 Evaluación del potencial energético del gradiente salino.	58
3.7 Resultados potencial energético del gradiente salino.	59
<b>4. POTENCIAL ENERGÉTICO POR CORRIENTES MARINAS.</b>	<b>62</b>
4.1 Antecedentes.	62
4.2 Procedimiento.	63
4.3 Estimación del potencial energético.	63
4.3.1 Bases de datos.	63

4.4 Las corrientes marinas de referencia $\leq 1.0\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ .	66
4.4.1 Corriente de Florida y <i>Gulf Stream</i> .	66
4.4.2 Corriente del Estrecho de Gibraltar.	67
4.4.3 Corriente de Kuroshio.	68
4.4.4 La corriente del Canal de Yucatán.	68
4.5 Resultados potencial energético por corrientes marinas.	69
4.6 Estimación de la potencia disponible y técnicamente extraíble.	70
4.6.1 Potencial energético del Canal de Cozumel.	70
4.6.2 Potencial energético del Canal de Yucatán.	70
<b>5.POTENCIAL MAREAS; FLUJO Y REFLUJO.</b>	71
5.1 Antecedentes.	71
5.2 Resultados potencial mareas; flujo y reflujo.	73
<b>6.ENERGÍA OCEÁNICA RENOVABLE E HIDROCARBUROS; ESFUERZOS EN MÉXICO.</b>	75
6.1 Antecedentes.	75
6.2 Hecho en México.	76
6.2.1 Sistema de Información Geográfica para Energías Renovables en México.	76
6.2.2 Integración de Bases de datos oceanográficos.	76
6.2.3 Atlas Climático Digital de México (ACDM).	76
6.2.4 Proyecto IMPULSA, UNAM.	77
6.2.5 Proyecto CONACYT sectorial: Evaluación de Recursos Energéticos Renovables y uso eficiente del recurso para el desarrollo sustentable de la península de Baja California y Quintana Roo.	77
6.2.6 Proyecto CONACYT sectorial: Determinación del potencial energético del oleaje en la costa de la Península de Baja California.	77
6.2.7 Estudios en México sobre los recursos energéticos renovables del océano reportado en Artículos y/o internet.	77
6.2.8 Desarrollo de tecnología México.	78
6.3 Resultados de esfuerzos en México.	78
<b>7 DISCUSIÓN.</b>	79
<b>8 CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO.</b>	84
<b>IV. LITERATURA CITADA.</b>	86
<b>V. SIMBOLOGÍA Y UNIDADES MÉTRICAS DE LAS VARIABLES.</b>	91
<b>VI.ACRÓNIMOS USADOS.</b>	92
<b>VII. ABREVIACIONES USADAS.</b>	93
<b>VIII. LISTA DE FIGURAS.</b>	93
<b>IX.LISTA DE TABLAS.</b>	95
<b>X. ANEXOS.</b>	96

## I. INTRODUCCIÓN.

En este documento sistematiza y analiza la información existente de los recursos energéticos oceánicos en la Región del Caribe de México, que dio como resultado una evaluación del potencial de energía renovable en oleaje, corrientes, gradiente térmico y gradiente salino.

Actualmente y de acuerdo a la IEA-OES 2011, diversos países alrededor del planeta destinan recursos económicos para investigación y desarrollo de tecnologías de aprovechamiento de las fuentes de energías alternativas y renovables, así como de la evaluación de esos recursos. Desde el año 1974 la Agencia Internacional de Energía -Sistemas de Energía Oceánica (IEA-OES) que es un organismo autónomo establecido en 1974 en el seno de la Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) regula estas actividades. Con respecto a los dispositivos de aprovechamiento de la energía del Océano se clasifican en cinco categorías (figura I.1). En esta clasificación la IEA-OES no se contempla producción de biomasa, eólica offshore, solar foto térmica offshore. Otra tecnología que aun no aparece dentro de estas categorías son las que convierten las corrientes marinas en potencia eléctrica, sin embargo ya existen investigaciones al respecto.



**Figura I.1 Potencial energético estimado de las principales formas de energía del océano. Fuente (IEA-OES, 2011)<sup>1</sup>**

Richard Smalley (2003), comenta que la problemática energética global en cuanto a su suministro tienen el primer lugar de prioridad de los problemas globales que la humanidad enfrentará los próximos 50 años y le sigue la problemática del agua, los alimentos y en cuarto lugar el medio ambiente. Y desde hace cien años hemos recurrido principalmente a los hidrocarburos lo cual ha impactado al medio ambiente. Es por ello que el tema energético está ligado al medio ambiente, por lo cual una de las medidas de los planes internacionales es la utilización de más fuentes de energía renovables.

En México estas directivas internacionales se expresan en la Estrategia Nacional de Cambio Climático, Visión 10-20-40 en donde se lee que México tendrá una participación mínima en la implementación a gran escala de sistemas de energías renovables. El punto aquí es que el Sector Energético de México tiene dos finalidades, por una parte proveer parcialmente energía al país y por otra tener ingresos por la venta bruta de los hidrocarburos. En el documento Estrategia Nacional de Energía visión año 2025 (SENER 2011) El primer objetivo de ocho, es revertir la declinación de la producción de crudo y mantener la de gas natural, considerándose una actividad de vital importancia para el país, por el impacto en los ingresos fiscales del país y en el suministro interno de energéticos.

<sup>1</sup> No se contempla producción de biomasa, eólica offshore, solar foto térmica offshore.



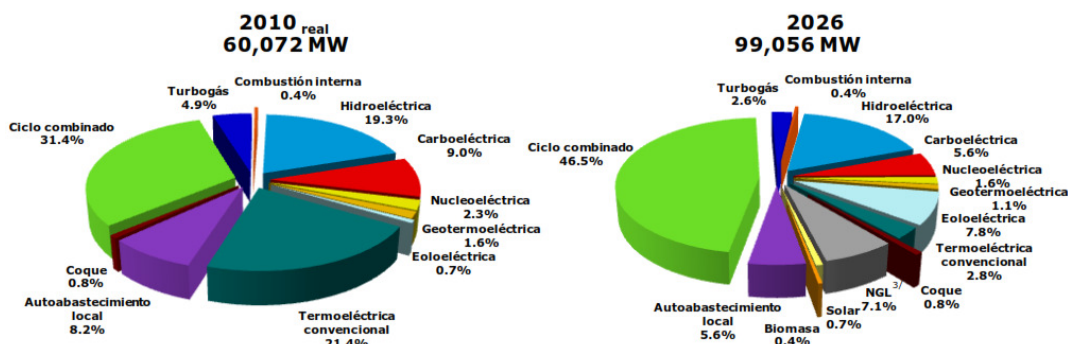


Figura I.2 Participación de tecnologías en la capacidad de generación sector eléctrico mexicano para el año 2010 y el proyectado al 2026. Fuente: Figura modificada de POISE, CFE (2013).

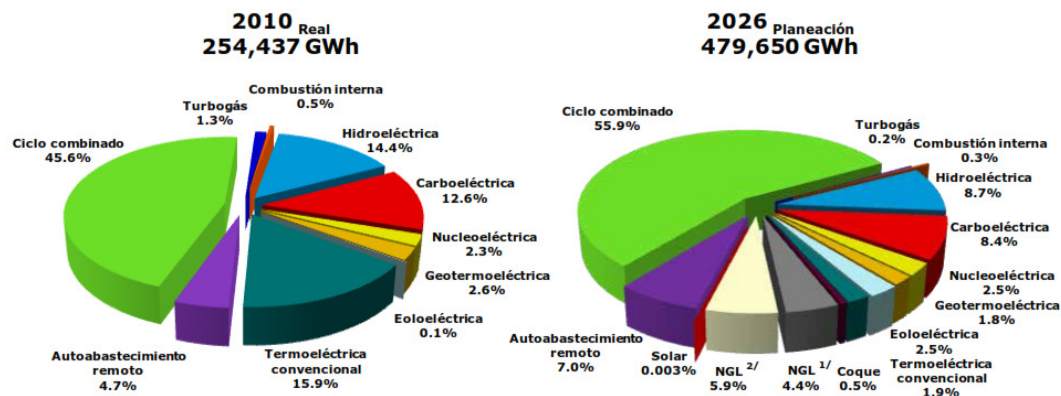


Figura I.3 Generación bruta real para el sistema eléctrico mexicano para el año 2010 y el planeado al 2026. Fuente: Figura modificada de POISE, CFE (2013).

Si bien México ha hecho un esfuerzo en pro de las energías alternativas (nuclear, grandes hidroeléctricas y renovables), estas en su conjunto aportarán a la producción para el año 2026 una participación planeada de 15.5%, pero el gas natural tendrá un 56% Figura I.2 y I.3 (POISE, CFE 2013). Otro documento que permite vislumbrar el futuro energético de México es la Prospectiva del sector Eléctrico 2010-2025 y cito; actualmente en México, el 73.3 % de la capacidad instalada corresponde a tecnologías que utilizan combustibles fósiles, como gas natural (39%), combustóleo (25%), carbón y diesel. Y el 26.7 % corresponde a fuentes alternativas, de las cuales 22% son hidroeléctrica y el 4.7% se divide entre las fuentes renovables y la nuclear. La meta al año 2025 es de contar con una capacidad instalada de energías *limpias* que permita generar el 35% de la energía eléctrica en México. El término *limpias* se refiere a sistemas convencionales más eficientes pero que siguen funcionando con hidrocarburos.

Para la costa del Caribe de México de acuerdo a la información del Sistema Eléctrico Nacional la demanda máxima de energía eléctrica para Cancún, Cozumel-Playa del Carmen-Riviera Maya y Chetumal fue de 396, 221 y 89 MWe respectivamente, con un total de demanda máxima de 676 MWe para toda la costa del Caribe de México. El abastecimiento de esta energía eléctrica proviene de sistemas de ciclo combinado, termoelectrica convencional, grandes hidroeléctricas y turbo gas para las horas pico (POISE, CFE 2013).

Este trabajo, también es un llamado a nuestras Autoridades a exhortarlos a que se invierta en la exploración de fuentes de energía oceánica renovable y al apoyo de la generación de tecnología nacional para explotarla. El objeto de estudio de este trabajo es la energía oceánica que tiene posibilidades de ser explotada a través de tecnología marina pero en específico para el Caribe de México. Y, aunque en México es una energía poco conocida, existen algunos particulares, estudiantes y académicos interesados en este tema, ya existe información suficiente como referencia. En México a esta energía se le conoce en la jerga popular como *energía maremotriz*,

término que al parecer la gente le ha dado de su conocimiento de una de las energías más famosas al menos en México que es la *energía mareomotriz* o de las mareas.

La estructura básica de este trabajo consiste en cinco capítulos sobre el potencial energético renovable del Caribe de México, en las categorías de oleaje, gradiente térmico, gradiente salino, corrientes marinas y mareas. El sexto capítulo analiza los esfuerzos que se han llevado a cabo en México sobre el tema, los avances hasta el presente enfocándose en la investigación y desarrollo de ciencia y tecnología en México sobre aprovechamiento de las energías marinas, en el contexto Energético-Académico Nacional y Mundial. Posteriormente los dos capítulos restantes son la discusión y las conclusiones. Los primeros cinco capítulos contienen su propio procedimiento de evaluación del recurso energético, por lo cual son independientes uno del otro, lo único que tienen en común es el área de estudio.

El Capítulo 6 que pareciera un apéndice del objetivo principal de este trabajo, en realidad es un recordatorio a tantos trabajos importantes que se han hecho y siguen en su forma embrionaria en muchos casos y en otras como prototipos. Salvo algunos casos se han puesto en marcha en la vida real o productiva que es donde deberían estar. Esto es, pasar de teoría a la verdadera práctica y que impacte a los sectores productivos a través usufructo de tecnología propia. México debe participar mucho más en la generación de ciencia y tecnología de aprovechamiento y conversión de energía renovable (Y de otras tecnologías) aprovechando el gran potencial de recursos humanos y energéticos del país. Para ello debemos saber con que contamos y con cuanto contamos, algo que se ha hecho muy bien con las reservas de petróleo, pues existe el interés por obvias razones expuestas en párrafos anteriores. Pero ahora hay que llevarlo a cabo para energías renovables marinas aunque el interés para este caso sea el hecho de solo suministrar energía para nuestras actividades como sociedad pero también con un bajo costo ambiental.

Por lo tanto, se plantea un objetivo general y cuatro objetivos particulares que guiaron la investigación que es evaluar el potencial de los recursos energéticos renovables del Caribe Mexicano para la producción de energía eléctrica.

- Selección de las energías marinas técnicamente viables de ser utilizadas para aprovechamiento de energía eléctrica.
- Cálculo del potencial bruto de las energías marinas seleccionadas.
- Cálculo del potencial energético para las áreas que demuestren tener posibilidades técnicas y ambientales.
- Ubicar los lugares geográficos en donde existe potencial energético.

De acuerdo a lo anterior y al estado del arte, el aprovechamiento de estas fuentes de energía marinas están ya suministrando comercialmente energía renovable competitiva, por lo cual México, que cuenta con recursos renovables oceánicos debe participar en su exploración y explotación a través de la inversión en investigación de ciencia y tecnologías adecuadas a las características del Caribe de México por otra parte el inventario de los recursos energéticos renovables en los mares de México es inexistente. De acuerdo a lo expuesto planteo una única hipótesis de que el Caribe de México cuenta con recursos energéticos renovables técnicamente aprovechables en gradiente térmico, gradiente salino, corrientes marinas y olas. Y que se está a tiempo para iniciar a formalizar la información existente en un inventario de energías del océano, para iniciar con la parte del Caribe Mexicano.

## II. ZONA DE ESTUDIO: EL MAR CARIBE DE MEXICO.

Está delimitada por el polígono que comprende la Zona Económica Exclusiva de México en el Caribe (Figura II.1) y por la línea que pasa sobre el trazo imaginario que une a la Península de Guanacabibes Cuba con Cabo Catoche (en rojo), sumando un área aproximada de 98 000 km<sup>2</sup> calculada con el medidor de áreas del Mapa Digital de México (INEGI 2011). En cuanto a la costa cuenta con 825 km incluyendo la isla Cozumel

En esta zona, México tiene derechos económicos sobre la Zona Económica Exclusiva que es la faja marítima situada fuera del mar territorial y adyacente a este, de una anchura máxima de 200 millas náuticas, en el cual el país tiene derechos de exploración y explotación, gozan de libertades de navegación y sobrevuelo y otros como: investigación científica marina, tendido de cables y tuberías submarinas, entre otros. (Cifuentes Lemus, J. L. *Et al* 1990). Lo anterior es muy importante ya que si se desea probar tecnología marina de aprovechamiento energético, existe certeza jurídica para hacerlo de acuerdo a los reglamentos correspondientes. Aunque esto queda sujeto a que el área de prueba no se encuentre en un área natural protegida o el derecho de vía de cableado submarino, tubería de agua dulce, telecomunicaciones o rutas comerciales marítimas importantes.

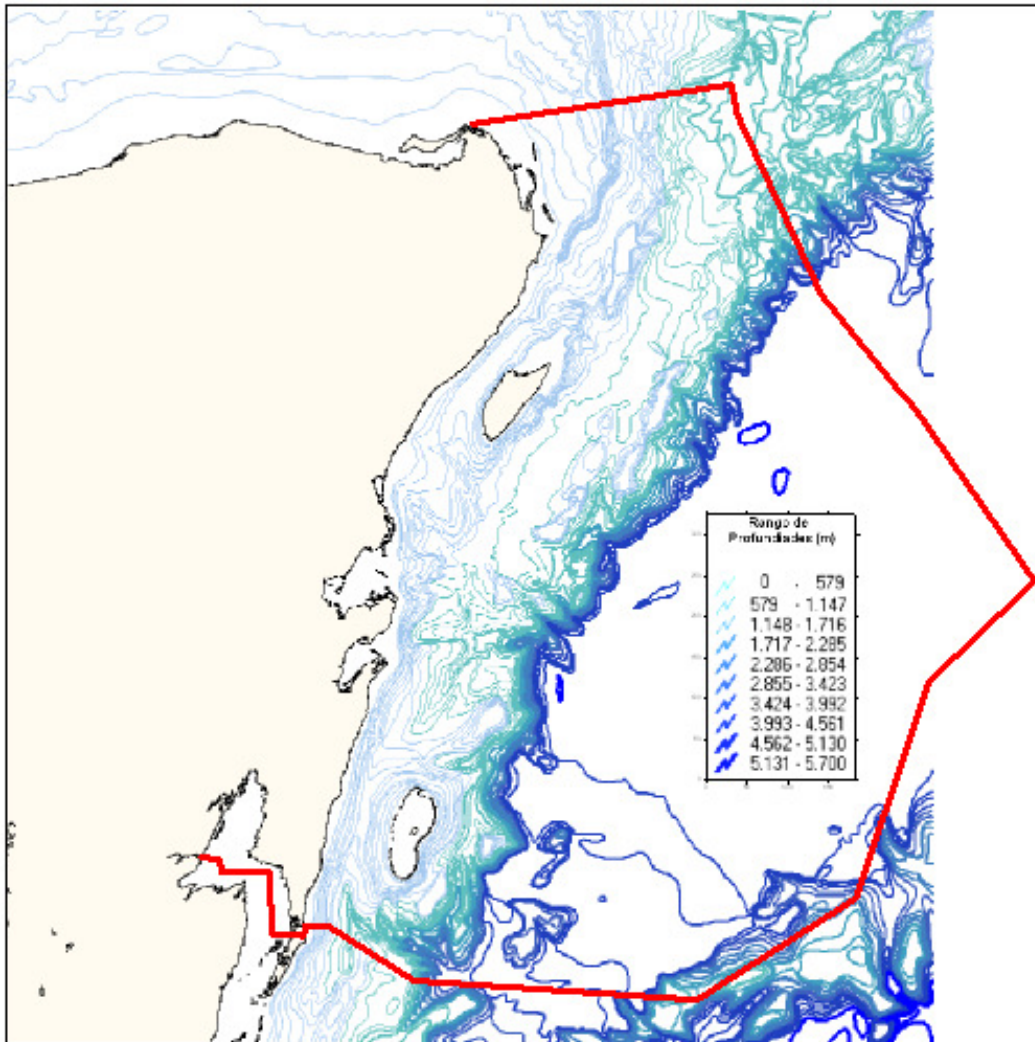


Figura II.1. Área de estudio delimitada por la costa y la línea negra, que comprende en su totalidad la Zona Económica Exclusiva del Caribe y parte de la subprovincia V de banco de Campeche. Las líneas en tonalidades azul son las isobatas (Carta realizada con Hoja 1-06, en formato digital, INEGI 2011).

### III. METODOLOGÍA Y ESTRATEGIAS.

Para hacer la evaluación de un recurso energético es necesaria información pertinente a cada categoría evaluada y dado que la información que se encuentra disponible no está generada específicamente para aprovechamiento energético, existen lagunas de información tanto temporalmente como espacial por la inmensidad del océano. De tal forma que la cantidad de datos disponibles y su calidad para cada categoría, reguló el procedimiento para la evaluación del recurso energético renovable.

**Bases de datos.** Principalmente de variables oceanográficas, mediciones directas de temperatura del agua de mar a diferentes profundidades, densidad, salinidad, velocidad de las corrientes, altura significativa de la ola, periodo, altura de marea etc. La base de datos de más fácil acceso, incluso con algoritmos de selección espacio temporal y por instrumento y con control de calidad fueron los de la National Oceanic Atmospheric Administration (NOAA 2013). Esta base de datos es extensa en las categorías de gradiente térmico, oleaje y batimetría, en sus diferentes centros de información; National Oceanographic Data Center (NODC 2013), National Data Buoy Center (NDBC 2013) y el National Geophysical Data Center (NGDC 2013). Para los datos de corrientes marinas se recurrió a los artículos generados por el Centro de Investigación CICESE<sup>2</sup>, principalmente trabajos emanados del proyecto Canek, así como comunicación vía correo electrónico con algunos investigadores del mismo proyecto. Otras bases de datos fueron la El Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM, Google earth- INEGI, Colegio de la Frontera Sur, y Secretaría de Marina.

**Procedimientos de cuantificación de los recursos energéticos.** Teniendo los datos necesarios para desarrollar el procedimiento de cálculo del potencial energético por categoría en el Mar Caribe mexicano, se estimó el potencial bruto de las energías marinas seleccionadas en el área de estudio por medio de las ecuaciones de transformación de la energía inherentes a cada categoría. Posteriormente se enfocó la evaluación a las áreas que demuestren tener posibilidades, de esta forma obtuve un inventario de energías renovables del Océano aplicables a producción de energía eléctrica. Estos procedimientos de cuantificación de recursos energéticos oceánicos con fines de producción de energía renovable, se han ido desarrollando de acuerdo al avance de cada categoría y algunas ya están estandarizadas de forma internacional.

Una limitante para aplicar los procedimientos mencionados en el párrafo anterior, es que hacen uso de datos específicos para hacer estas cuantificaciones, por lo que en el presente trabajo se recurrió a diversas modificaciones de los procedimientos o de plano se propuso una forma alternativa de cuantificación de los recursos energéticos. Los procedimientos estandarizados los han desarrollado algunos países, los cuales ya tienen su Atlas de Energía del Océano completo o de forma parcial, principalmente conformado por inventarios de sus recursos energéticos renovables del Océano. Actualmente existen solo tres estudios públicos en la WEB que ostentan el nombre de inventario o Atlas de energía oceánica de aun país o región y son<sup>3</sup>:

- Atlas of UK Marine Renewable Resources. (Atlas of UK Marine Renewable Energy Resources 2008)
- Inventory of Canadian Marine Renewable Energy Resources (Canadian Hydraulics Centre 2006)
- North American ocean energy status (North American Ocean Energy Status (2007))

En términos generales este tipo de estudios se dividen en:

- Batimetría.
- Potencial asociado a la amplitud de las mareas o rise and fall (R&F).

---

<sup>2</sup> El Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, fue creado en 1973 por el gobierno federal como parte de la iniciativa para descentralizar las actividades científicas y modernizar el país. El CICESE pertenece al sistema de centros públicos de investigación del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y a lo largo de más de tres décadas es uno de los principales centros científicos de México.

<sup>3</sup> No se contempla producción de biomasa, eólica offshore, solar foto térmica offshore.

- Potencial asociado a las corrientes de marea o tidal in stream energy conversion (TISEC)
- Potencial del gradiente térmico o ocean thermal Energy conversion (OTEC).
- Flujo promedio mensual de la energía del oleaje o wave Energy Conversion (WEC).
- Potencial asociado a energía eólica off shore.

**Tabla III.1 Sumario de parámetros técnicos del estado del arte de cada categoría y los parámetros obtenidos para el área de estudio.**

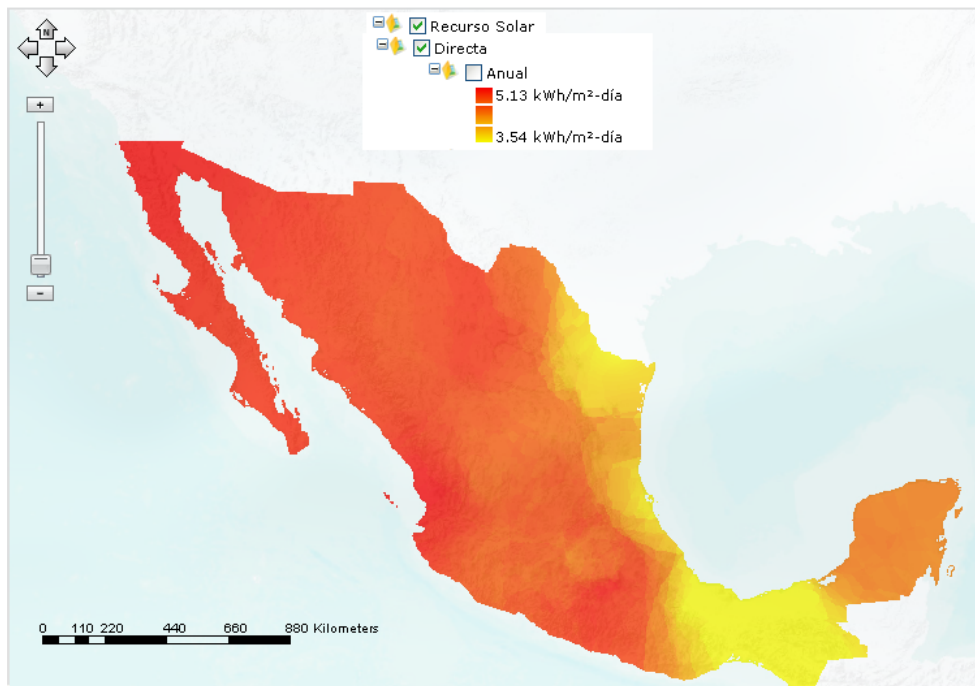
Comparativa de parámetros técnicos de cada categoría de conversión energética con los parámetros del Mar Caribe de México						
Tecnología	Parámetro	Unidades	Estado del arte	Caribe de México	Posibilidad técnica Caribe México si/no/posible	Referencias Caribe de México
			Cantidad	Cantidad		
R&F- mareomotriz	Rango promedio de marea	m	6.1	0.185	no	SEMAR 2013
	Rango promedio mínimo de marea	m	3.9	0.046		
	Rango promedio máximo de marea	m	11	0.317		
	Relación Potencia-área turbina generador a 5 m·s <sup>-1</sup>	MW <sub>e</sub> ·m <sup>-2</sup>	0.445	na	IEA-OES 2003	
	Planta de mayor capacidad instalada (Sihwa Corea del Sur 2011; h <sub>prom</sub> =5.6 m)	MW <sub>e</sub>	254	na		
	Segunda planta mayor capacidad (La Rance Francia 1966; h <sub>prom</sub> =8.5 m)	Mw <sub>e</sub>	240	na		
Corrientes de marea-tide stream-corrientes marinas	Velocidad promedio de corrientes a profundidades no mayor a 40 metros	m·s <sup>-1</sup>	2.8	≈1.5	Posible en algunas zonas del Caribe de México; Canal de Cozumel de acuerdo a vox populi	Badán a. et al (2005)
	Velocidad máxima promedio de corrientes a profundidades no mayor a 40 metros	m·s <sup>-1</sup>	3.3	≈1		
	Velocidad mínima promedio de corrientes a profundidades no mayor a 40 metros	m·s <sup>-1</sup>	2.5	≈0.5		
	Área para generar 1 MW <sub>e</sub> a 2.5 m·s <sup>-1</sup>	m <sup>2</sup>	300	na		
	Relación de concentración en área tobera-área turbina	Adim.	2	Na		IEA-OES 2003
Olas- Undimotriz	Profundidad promedio de operación no continentales	m	30	na	Si, pero trabajando al límite inferior de diseño de los dispositivos actuales de altura de ola y periodo de energía	IEA OES 2003
	Profundidad mínima de operación no continentales	m	25	na		
	Profundidad máxima de operación no continentales	m	50	na		
	Densidad energética red interconectada (Pelamis Wave Power Ltd)	MW·km <sup>-2</sup>	30	na		
	Rango de altura significativa (Hs) de operación.	m	0.75 - 7.25	1.4- 1.9		
	Rango de periodo de energía (T <sub>e</sub> ) de operación son de 5.5s a 15.5s.	s	5.5 - 15.5	5- 5.8		
	El rango de operación de los dispositivos estudiados es de 5 a más de 60 kW/m.	kW·m <sup>-1</sup>	5 a 60	na		
Gradiente térmico-maremotermica-OTEC	El gradiente térmico promedio es de $\Delta T_{ideal} = (T_{superficie} - T_{fondo})$	°C	24	23	Si	Gallegos A. y Czitrom S. (1997)
	El gradiente térmico mínimo utilizado	°C	13.5	21.9		NIOT (2011)
	Consumo agua de fondo a 2°C por cada 1MW-OTEC-CC;	m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup>	2	na		Vega L. (1999)
	Consumo agua superficial a 24°C por cada 1MW, OTEC-CC	m <sup>3</sup> ·s <sup>-2</sup>	4	na		
	Rango de profundidad de extracción agua fría	m	500-1000	700		
	Distancia máxima de la costa de la fuente de agua fría L. Vega (1999)	km	10	10		
Gradiente salino-Energía azul	Flujo de agua por 1 MW, a 35 ups con eficiencia total de 0.5	m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup>	1	1.7	Posible.	Skilhagen, S. E. <i>Et al</i> (2008)
	Rango de conversión de las membranas	W·m <sup>-2</sup>	4 a 6	na		Álvarez Legorreta (2007)
	Gradiente salino promedio	ups	35	19.1		Skilhagen, S. E. <i>Et al</i> (2008)
	Altura alcanzada de columna de agua hidrostática teórica	m	243	136		

**Referentes tecnológicos energía oceánica renovable.** La cuantificación de los recursos energéticos en cada categoría permitió obtener los parámetros promedio del Mar Caribe de México, que comparé con los parámetros de operación de los dispositivos que aprovechan esos recursos energéticos. En la tabla III.1 muestro un sumario de parámetros técnicos comparados, así como un primer diagnóstico preliminar de la posibilidad técnica de aplicar las tecnologías existentes de cada tecnología, pero en el Caribe de México. En este primer diagnóstico preliminar queda excluido el aprovechamiento de energético de las Mareas, tanto por su altura y por su velocidad de corriente. En cuanto a oleaje los parámetros están dentro del rango de diseño de las tecnologías actuales, pero en el límite inferior. En cuanto a gradiente salino en la actualidad solo existe una planta prototipo que está en pruebas, y sería muy apresurado dar algún dictamen, pero en cuanto a si técnicamente funcionaría un sistema de estos es posible. El gradiente térmico es el que más consistencia tiene en el cumplimiento de los parámetros técnicos. En cuanto a corrientes marinas técnicamente sería posible pero solo en algunos puntos específicos cercanos a la costa.

**Referentes tecnológicos energía continental renovable.**

En la contraparte de energías renovables continentales y de acuerdo a los valores del Instituto de Investigaciones Eléctricas a través del servicio del Sistema de Información Geográfica para las Energías Renovables en México (SIGER 2012), y tomando como referencia el estado de Quintana Roo. Actualmente existen sistemas eólicos y solares instalados en los lugares donde la red eléctrica no llega, tal como zonas costeras alejadas de los centros poblacionales y también zonas agrícolas. En las ciudades es cada vez más común el uso de calentadores solares de agua, tanto para servicio doméstico como para calentamiento de agua de albercas y procesos en hotelería. Como dato a ser revisado una de las energías más usadas es la solar directa en el secado de indumentaria y alimentos. Utilizando la información del SIGER estimé de forma muy general el potencial energético para solar directa y eólica, para tener un referente en continente.

**Energía solar directa.** De acuerdo al SIGER 2012 el potencial energético unitario de energías solar directa promedio es de 5.0 kWh/m<sup>2</sup>-día. (Figura III.2) El área total del Estado de Quintana Roo es de 50212 km<sup>2</sup>, es decir la cantidad de energía al día que incide en toda esa superficie es de 900 PJ.



**Figura III.2 Mapa solar de radiación directa en horas pico. Fuente: Imagen editada con información del SIGER 2012.**

Asumiendo un aprovechamiento fotovoltaico (FV), interconectado a la red eléctrica sin almacenaje, con una eficiencia del panel FV del 10%, con estos datos al día se obtendrían 0.5kWh/m<sup>2</sup>-día. Con este valor para generar 1 MW<sub>e</sub> se requeriría de ≈2000 m<sup>2</sup> de paneles FV, superficie equivalente a 4.5 canchas de futbol soccer. El equivalente sería un campo FV de 1.4 km<sup>2</sup> para igualar la potencia instalada actual.

**Energía eólica.** De igual forma con datos del SIGER, la energía eólica bruta unitaria estimada que pasa en costa del Caribe de México es de 301 a 400 W·m<sup>-2</sup> en la mitad norte del litoral y de 201 a 300 W·m<sup>-2</sup> para un estimado de ≈6000 MW, (Figura III.3) considerando un potencia promedio anual de 250 W·m<sup>-2</sup> para la mitad sur y 350 W·m<sup>-2</sup> para la mitad norte, a 50 metros de altura con un área de cobertura desde los 25 hasta a los 75 metros del suelo y además 400 km de frente de costa, es decir sin contornos. Actualmente existe un proyecto para la Isla de Cozumel para instalar 253 MWe en un área de 61 Km<sup>2</sup> que representa el 12% de la superficie de la isla. De acuerdo a este proyecto se estarían instalando 4 MWe por cada kilómetro cuadrado de superficie. (Power Group México 2012).

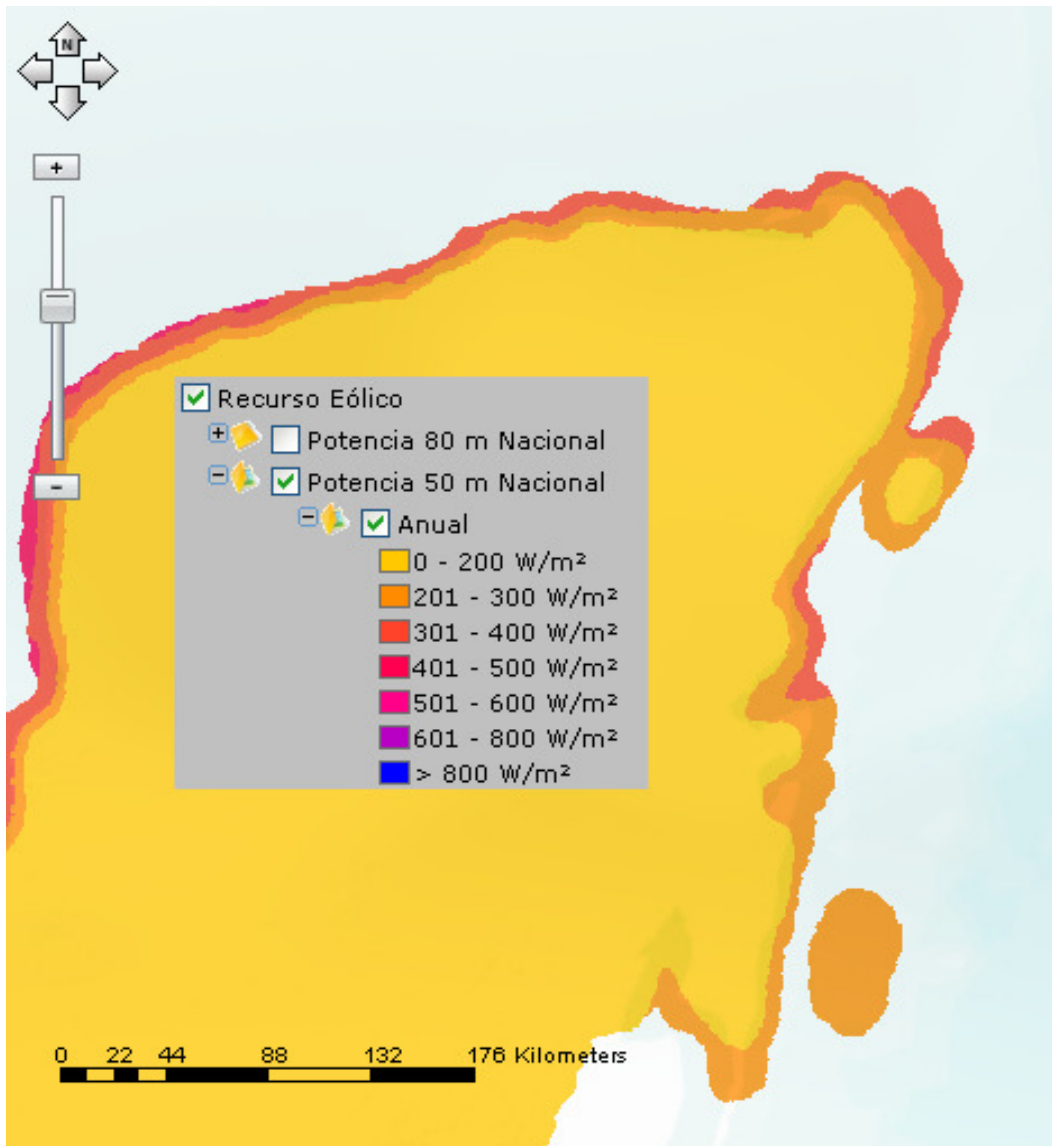


Figura III.3 Mapa recurso eólico promedio anual. Fuente: Imagen editada con información del SIGER 2012.

## 1. POTENCIAL ENERGÉTICO POR OLAS.

### 1.1 Antecedentes.

Con respecto a las costas del Mar Caribe de México actualmente ya existen valores del promedio anual de potencia por metro de ola, que se menciona en Thorpe T. W. (1999) e IEA OES (2003) que oscilan entre  $5-10 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-1}$ , este valor es general para el Mar Caribe y solo permite prever a grandes rasgos que el Mar Caribe no tendría un gran potencial energético en oleaje con respecto a otras costas con valores de hasta  $100 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-1}$  como en Reino Unido, en donde actualmente se están desarrollando tecnologías de aprovechamiento. De acuerdo las mismas fuentes el lugar de México que más promete son las costas de baja California Norte con un valor de 30 a  $60 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-1}$ .

El primer convertidor de energía undimotriz se patentó en Francia en 1799, por un padre e hijo de apellido Girard (Clément *et al.* 2002). Otros intentos con la idea de convertir la energía del océano, como bombeo de agua y producción de electricidad se llevaron a cabo en San Francisco y Santa Cruz California desde la década de 1870. Por ejemplo, William y Edward Armstrong construyeron un dispositivo mecánico accionado por olas que bombeó agua de mar para evitar las polvaredas de sus calles (1898). La inspiración para este proyecto fue el experimento fallido de producir electricidad con la acción de las olas (1895-1896) en Capitola cerca de Santa Cruz por el inventor llamado Gerlach, así como de otros dispositivos construidos hasta entonces. Los hermanos Armstrong concluyeron que la mayoría de los motores de olas construidos en esa década fallaron por dos razones: los motores fueron colocados generalmente en el océano abierto, donde, con el tiempo, fueron destruidos por la fuerza misma que estaban tratando de aprovechar, y dos la mayoría de los motores tenían demasiadas partes móviles y eran demasiado complejos. El dispositivo que construyeron (Figura 1.1) inició con perforación de un agujero de cinco metros de diámetro y cinco de profundidad en la roca, luego tallaron un túnel que conecta con el mar de modo que con cada ola, agua de mar podría surgir dentro y parcialmente llenar el espacio. Colocaron una camisa de metal un pistón flotante de 200 kilogramos en su interior. El pistón flotante subía y bajaba con la acción de las olas del océano. Por medio de válvulas y tubos el agua de mar era forzada a llenar un tanque de almacenamiento al parecer funcionó por otros doce años (Sentinel S.C. 1898). Sin embargo, el verdadero desarrollo de esta tecnología comienza hasta el último cuarto del siglo XX, al presente se supera el millar de patentes registradas (Oficina Española de Patentes y Marcas 2008)



Figura 1.1. Wave Motor de los Hermanos Armstrong, en Santa Cruz California USA, año 1898. Fotografía de Sandy Lydon 2001 (Sentinel S. C. 1898).



En México el primer estudio registrado fue hecho por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) en el año 1974 con el Estudio de Factibilidad de un método para el aprovechamiento de la energía contenida en el oleaje para la generación de energía eléctrica (Saldivar Urquiza G. y Medina Ríos A. Actualmente está un sistema de saneamiento de lagunas costeras se está poniendo en práctica en un proyecto Cuba-UNAM denominado REALco, utilizada en bombeo de agua de mar a cuerpos de agua interiores por medio de la energía del oleaje o llamado Dispositivo Amplificador y Rectificador del Oleaje patente UNAM obtenida por el ICMYL (Alatorre Mendieta Miguel A. 2003). Otro desarrollo en proceso son los convertidores de energía del oleaje, DesCEO del Departamento de Oceanografía Física, laboratorio de Energía Alterna, Renovable y Sostenible, LEARS. (CICESE 2012).

A nivel comercial el último avance en la técnica para México es que Mareomotrices de Energías Renovables, S.A. de C.V., inició el 2 de junio del 2012 los trabajos de la Planta piloto para generación de energía Undimotriz (Oleaje) de 3 MW., en Rosarito, Baja California para la Comisión Federal de Electricidad. La planta se ubica frente a las costas de la Central Termoeléctrica Presidente Juárez, a casi 20 kilómetros al suroeste de Tijuana. Las compañías Mareomotrices de Energías Renovables, Integragas Telcorz y Grupo Nuhe (MARERSA 2012).

### 1.2 Procedimiento.

Como se vio anteriormente actualmente existe en la bibliografía un promedio anual de potencia por metro de ola para la región del Mar Caribe entre  $5-10\text{kW}\cdot\text{m}^{-1}$ . Para tener un valor con mayor grado de aproximación, recurrí a trabajos de investigación regionales para el Caribe Mexicano para tener un precedente de análisis de oleaje como altura significativa, periodo, propagación y las variaciones estacionales. Posteriormente para tener más información trabajé con la base de datos de la National Buoy Data Center (NDBC 2013) más cercana al área de estudio, obteniendo los promedios mensuales de las diferentes variables de la tabla 1.1 y escogí un procedimiento de análisis de acuerdo al formato de adquisición de los datos.

**Tabla 1.1. Datos necesarios para el cálculo del potencial de olas.**

Nº	Variable	Unidades
1	Área con profundidades entre 0 y 50m. a lo largo de la costa	km <sup>2</sup>
2	Ola significativa promedio mes	m
3	Periodo de energía promedio mes	s
4	Propagación media del oleaje por Hs y T	m/s
5	Horas anuales por Hs y T	h

Una consideración importante en la metodología propuesta, es la batimetría, ya que la aplicación de los dispositivos de aprovechamiento de la energía de las olas con tecnologías actuales requiere ser instalada a cierta profundidad, y se dividen en; a) superficiales flotantes y anclados, b) basados en tierra, c) intermedio entre el fondo y la superficie y d) anclados al fondo. La razón es que con la profundidad decrece la amplitud del movimiento orbital de la ola por lo que a una profundidad de un medio de la longitud de onda el movimiento orbital es menos del 5% del de la superficie. Este decrecimiento es exponencial y se debe considerar para la delimitación del área o zona undimotriz, es decir la profundidad de operación de las tecnologías ancladas al fondo o ancladas y que permanecen a cierta profundidad. Por otra parte se debe considerar en el caso del Caribe, las barreras arreciales que podrían interferir con el oleaje disipando parte de la energía de la ola, como se ha demostrado en algunos estudios en la zona. Otra consideración importante son las Áreas Naturales Protegidas o ANP'S, y las Áreas de Importancia para la Conservación de las Aves (AICAS) en estas zonas existen restricciones en instalación de infraestructura que interfiera con los ecosistemas marinos (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad CONABIO 2011).

### 1.3 Delimitación de la zona undimotriz.

Uno de los puntos más importantes para calcular el potencial energético de conversión de las olas es la batimetría a las profundidades de operación para cada tecnología. Los dispositivos que actualmente están operando funcionan a diversas profundidades de 15 hasta los 40 metros como máximo, otros son flotantes y los hay basados en tierra, estos últimos instalados en una escollera natural o artificial en la línea de costa. Para esta resolución de batimetría se requieren cartas náuticas costeras, que obtuve a través de la NOAA y su *Grid Extract* de la National Geophysical Data Center (Amante C. 2009) en su base de datos ETOPO1 con 1 minuto de arco (30.94m), donde se pueden obtener batimetrías oceánica a partir de numerosos conjuntos de datos mundiales y regionales. Con el *grid Extract* se obtuvo una batimetría general con las isobatas de 0 a 50 metros de profundidad que se muestra en la figura 1.2, donde el área con la profundidad referida está en color gris. Para tener mayor resolución se fraccionó la costa en cinco secciones (Anexo 1).

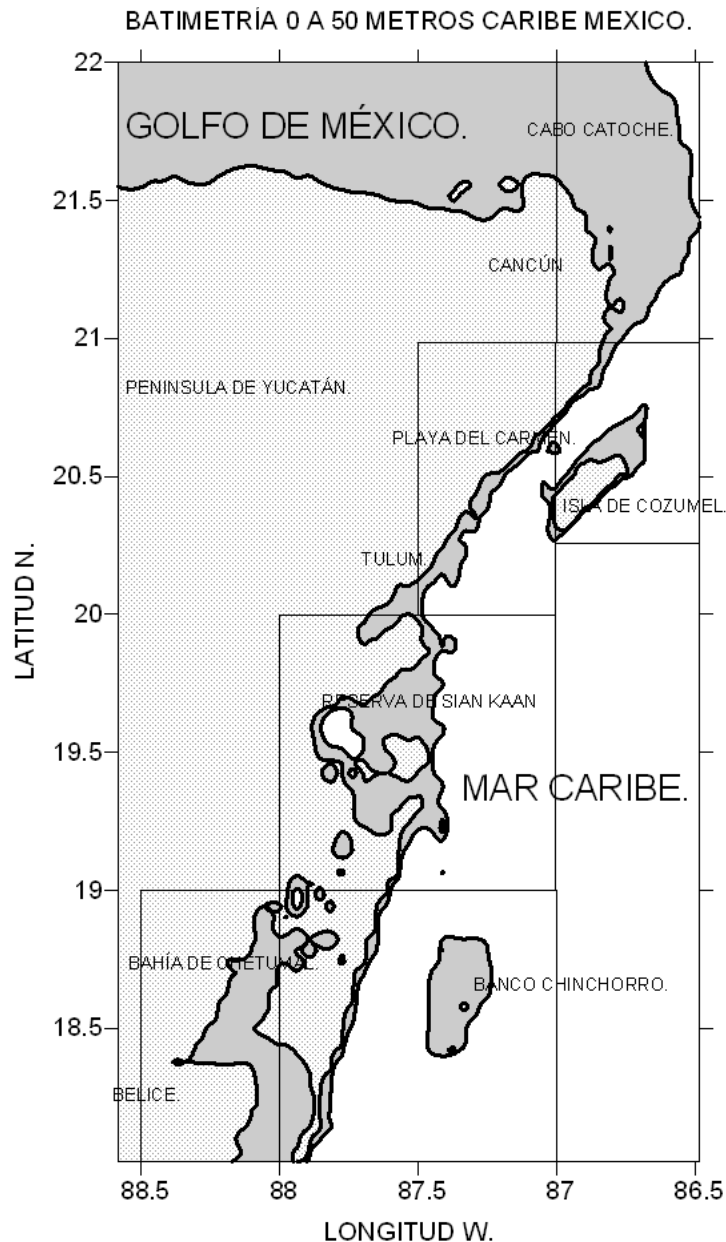


Figura 1.2. Batimetría del Mar Caribe isobatas de 0 a 50 metros de profundidad en gris en 5 cuadrantes. Elaboración propia con datos de NGDC 2013.

En síntesis se realizó una medición con el Mapa Digital de México Versión 5 (INEGI 2011), de la línea de costa del Caribe de México, con un estimado de 825 km incluyendo la Isla Cozumel, solo 250 km de esta línea está expuesto al oleaje franco y no pertenece a una ANP o una AICA (Tabla 1.2 y figuras 1.3 y 1.4). Lo restante de la costa pertenece a la Bahía de Chetumal donde el oleaje es escaso y la profundidad no rebasa los 10 metros.

**Tabla 1.2. ANP'S y AICA'S Caribe de México.**

AICA'S	ANP'S
Yum Balam	Yum Balam,
Isla Contoy,	Isla Contoy,
Sian Ka'an,	Arrecife de Puerto Morelos,
Humedales Costeros del N. de la Pen. De Yuc.	Uaymil,
Corredor Central Vallarta Punta Laguna,	Banco Chinchorro,
Corredor Calakmul Sian Ka'an,	Tulum
Uyuml C'eh, A. C.,	Otoch Ma'ax Yetel Kooh,
Isla Cozumel,	Sian Ka'an,
Sur de Quintana Roo,	Costa Occ. de I. Mujeres, Pta Cancún y Pta Nizuc

Fuente: CONABIO 2013.

#### **1.4 Trabajos previos sobre oleaje en la zona.**

Sobre análisis estadístico del oleaje, la zona más estudiada es la parte norte del litoral del Caribe mexicano, con trabajos frente a Cancún, Puerto Morelos, Playa del Carmen y Akumal. También existe una boya oceanográfica de la National Data Buoy Center (NDBC 2013) que en su página de internet despliega los gráficos históricos y actuales de la estadística del oleaje como la altura significativa, periodo, desviación estándar y máximos y mínimos. También se pueden solicitar bases de datos de los años 2005 a la fecha y se descarga en formato de texto.

Gaja Ferrer, Santiago (2007), reporta para Playa del Carmen a través de mediciones *in situ* de oleaje a 10 metros de profundidad, en los periodos comprendidos de abril a junio y de agosto a octubre del año 2005 y febrero a abril del 2006. Con los datos recopilados realizó estadística del oleaje obteniendo a través de histogramas de frecuencia que el intervalo de altura significativa fue de los 0.3 a 0.4 metros con poco más de 25 % de los datos. Reporta también que el porcentaje de ocurrencia disminuye de los 0.7 a los 1.4 metros y que el 85% de las olas son menores a 1.4 metros. Los periodos asociados son de 5 a 6 segundos representando el 40% de los datos y otro porcentaje del 30% para periodos asociados de entre 6 a 7 segundos, es decir 70% de las olas son de periodos menores o iguales a los 7 segundos. Menciona también que en las mediciones no se registraron periodos iguales o mayores a 11 segundos. En cuanto a las direcciones predominantes el 75% de las olas provienen de los 240° a 270° acimutales, el resto de las direcciones están entre 270° y 330° de azimut; indicando oleaje proveniente del sur (Figura 1.5).

Así mismo Gaja Ferrer, Santiago (2007), reporta que para Akumal a través de mediciones *in situ* de oleaje a 16 metros de profundidad, en los periodos comprendidos de abril a junio y de agosto a octubre del año 2005. La altura significativa con mayor porcentaje de ocurrencia fue de 0.3 a 0.4 metros con el 18% de los datos. Las olas mayores a 2 metros representan poco menos de 5% de la muestra quedando el 95% de los datos debajo de este valor de altura significativa. Con respecto a los periodos asociados el 70% está en el rango de 6 a 7 segundos. La rosa de oleaje indica oleaje proveniente en aproximadamente el 90% del registro desde los 270° a 330° acimutales. Menciona también que la distribución de los datos de dirección la media y la mediana representan un valor cercano a los 300°, que demuestra el efecto de sombreado de la isla de Cozumel para las olas que vienen del este y del noreste, siendo registradas solo las que provienen del sureste (Figura 1.5).



Figura 1.3. Línea de costa Cabo Catoche a Tulum. En rojo costa expuesta al oleaje franco después de la barrera de arrecifes, en verde efecto de sombreado de oleaje y en líneas blancas las ANP's (1) Yum Balám, (2) Isla Contoy, (3) Costa occidental de Isla Mujeres, punta Cancún y Punta Nizuc, (4) Arrecifes de Puerto Morelos y Arrecifes de Cozumel. Fuente: Google earth CONAMP 2013.

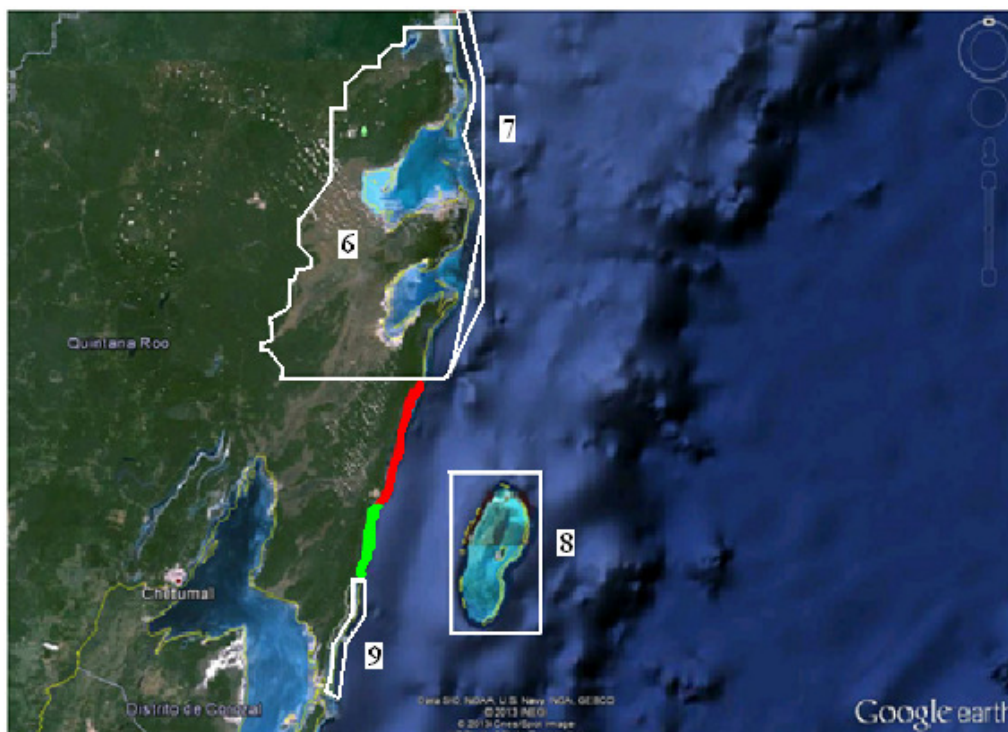
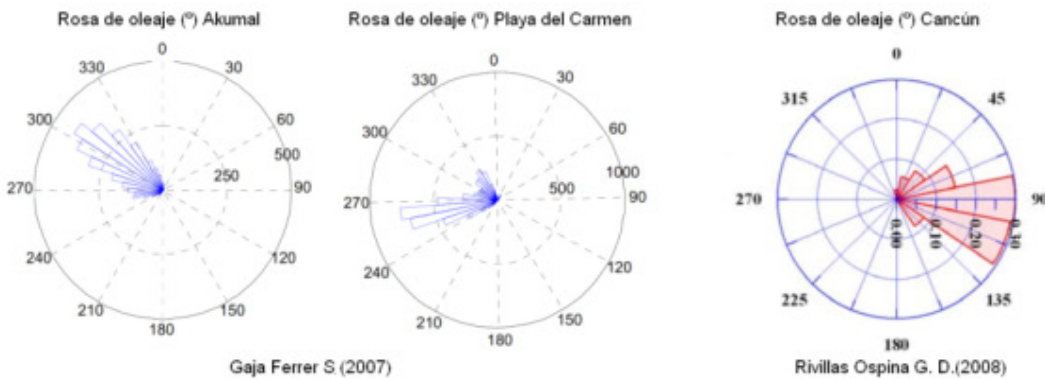


Figura 1.4. Línea de costa Tulum- Xcalac. En rojo expuesta al oleaje franco después de la barrera de arrecifes, en verde efecto de posible sombreado de oleaje y en líneas blancas las ANP's; (6) Sian Ka'an, (7) Arrecifes de Sian Ka'an, (8) Banco Chinchorro y (9) arrecifes de Xcalac. Fuente: Google earth y CONANP 2013.

Rivillas Ospina G. D. (2008) en su trabajo Re-análisis de oleaje para México: 1948-2007 utilizó un modelo espectral de oleaje híbrido con malla de cálculo de 871 celdas (de 0.5° X 0.5°), una de las cuales está frente a Cancún centrada en la longitud 86.5° W y latitud 21°N. La profundidad es de 700 metros. En esta celda se caracterizó el oleaje a largo plazo, resultando que por medio de un análisis de probabilidad de excedencia de altura de ola significativa anual de 1000 olas, una ola será de 5 metros de altura, 10 de casi 3, 100 de 1.5 y las restantes inferiores a 1.5 metros de altura. De igual forma para 1000 olas, una tendrá un periodo medio de 11 segundos, diez de 10, cien de 8 y el 90% de las olas tendrá periodos medios  $\approx$  de 5 segundos. En cuanto a la propagación hacia la costa varía desde el norte hasta en este-sureste para todas las épocas del año. En los resultados de probabilidad conjunta anual de ola significativa y dirección de propagación el 90% de las veces son olas de alrededor de 1 metro de altura y que vienen desde 100° con respecto al norte. Es decir que proceden mayormente del este (Figura 1.5).

Pérez Peña, Abril Ichel (2013), en su trabajo Estimación del clima marítimo y la energía del oleaje disponible en las costas mexicanas y que se le han filtrado las tormentas, reporta para la misma zona de Cozumel que la potencia anual que se podría considerar constante, no excede los  $2 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-1}$  durante todo el año, valor que se define en este trabajo como aprovechable. Lo anterior basado en un análisis de la variabilidad temporal del periodo interanual de 1949 hasta el año 2007. Menciona también que en verano el umbral garantizado puede alcanzar los  $4 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-1}$ . En términos generales reporta mayor potencia disponible en el verano y menor en otoño con un valor poco inferior a los  $2 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-1}$  y en los meses de invierno se cuenta con una cantidad de energía aceptable con un promedio de  $3 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-1}$ . Concluye que México, es un país que por sus características oceanográficas, en condiciones filtradas de tormentas, no tiene el potencial para generar energía suficiente que satisfaga las necesidades de una población. Pero argumenta que si se consideran eventos extremos, podría haber potenciales favorables y que esto depende de la frecuencia e intensidades con la que se presenten estos eventos.



**Figura 1.5. Rosas de oleaje, para Akumal, Playa del Carmen y Cancún. Tomado de Gaja Ferrer (2007) y Rivillas Ospina G. D. (2008).**

### 1.5 Análisis de datos disponibles de la NDBC.

Las bases de datos de la NDBC están disponibles en su página de internet y son gratuitos. La boyas de interés se encuentra a 222 km de distancia desde la costa ESE de la Isla de Cozumel, llamada; Station 42056 (LLNR 110) - Yucatán Basin -120 NM ESE of Cozumel, MX. Latitud 19.802 N, longitud 84.857 W (19°48'6" N 84°51'24" W), profundidad del lecho marino en esas coordenadas de 4684 m (Figura 1.6).



Figura 1.6. La estación 42056 y su ubicación en el Mar Caribe a 222 km de distancia desde la costa ESE de la Isla de Cozumel. Fuente: NDBC 2013.

Para acceder a ellos solo hay que buscar la estación o boya y solicitar al servidor de su página web los datos históricos disponibles. Para tal caso obtuve solo los datos desde el año 2005 a 2012 que son la totalidad de los años disponibles con un total de datos de 49334. El año 2010 no lo incluí ya que los datos de todo el año eran marcadamente erróneos. Los datos reportados por la NDBC es la *densidad espectral de energía de la ola*  $S(f)$ , dada en  $m^2 \cdot Hz^{-1}$ , para cada una de las 47 frecuencias desde 0.02 Hz a 0.485 Hz, correspondiente a los periodos de 50 a 2 segundos. El formato es; año, día, hora densidad espectral promedio por cada frecuencia de cada hora. Para obtener la potencia por metro lineal de ola ( $P_w$ ) primero se deben obtener los parámetros espectrales (Ecuaciones 1 a 16) y son los momentos espectrales (Silva Casarín R. 2005):

$$m_0 = \Delta f \sum_{i=1}^N S_{(f_i)} \quad (1)$$

$$m_1 = \Delta f \sum_{i=1}^N f_i \cdot S_{(f_i)} \quad (2)$$

$$m_2 = \Delta f \sum_{i=1}^N f_i^2 \cdot S_{(f_i)} \quad (3)$$

$$m_3 = \Delta f \sum_{i=1}^N f_i^3 \cdot S_{(f_i)} \quad (4)$$

$$m_4 = \Delta f \sum_{i=1}^N f_i^4 \cdot S_{(f_i)} \quad (5)$$

Donde,  $m_0$ ,  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$ , y  $m_4$  son los momentos espectrales y tienen las siguientes unidades respectivamente ( $m^2$ ,  $m^2 \cdot Hz$ ,  $m^2 \cdot Hz^2$ ,  $m^2 \cdot Hz^3$  y  $m^2 \cdot Hz^4$ ) y;  $\Delta f$  = Es el incremento de frecuencia (Hz);  $S_{(f_i)}$  = Es la función densidad espectral ( $m^2 \cdot Hz^{-1}$ );  $N$  = número de rangos de frecuencia;  $f_i$  = frecuencia  $i$ -ésima (Hz). La *Anchura espectral*  $\varepsilon$ , está dada por dos autores Cartwright y Lounguet- Higgins (1956) en la ecuación 6 y *Anchura espectral de momentos de orden inferior*  $\nu$  de Lounguet- Higgins (1983) en la ecuación 7.

$$\varepsilon = \left[ 1 - \frac{m_2^2}{m_0 \cdot m_4} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

$$\nu = \left[ \frac{m_0 \cdot m_2}{m_1^2} - 1 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

Si el espectro es de banda angosta  $\varepsilon$  tiende a 0 y banda ancha tiende a 1: El oleaje tipo *swell* presenta condiciones de oleaje regular, se define por un oleaje de banda estrecha, y debido a eso los valores son cercanos a 0. En la naturaleza el *swell* presenta valores  $\varepsilon \approx 0.4 \sim 0.5$ . Por otro lado, el oleaje tipo sea es muy irregular, de banda ancha y en la naturaleza presenta valores  $\varepsilon \approx 0.8$ . Es de esperar que los oleajes *swell* se caractericen por un periodo pico (inverso de la frecuencia pico) más alto que los periodos típicos del oleaje sea. En tal caso se debería esperar que como más grande sea el periodo menor sea el valor de épsilon (Silva Casarín R. 2005). Para estimar el Periodo medio hay dos ecuaciones en (s):

$$T_{01} = \frac{m_0}{m_1} \quad (8)$$

$$T_{02} = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \quad (9)$$

Variación cuadrática media de la superficie libre (m):

$$\eta_{rms} = \sqrt{m_0} \quad (10)$$

Altura de ola cuadrática media (m):

$$H_{rms} = \sqrt{8 \cdot m_0} \quad (11)$$

Altura de ola de orden cero o Altura significante ( $H_s$ )  $H_s = H_{m_0}$ .

$$H_{m_0} = 4.004 \sqrt{m_0} \quad (12)$$

Agudeza del pico (Adimensional) (de Goda 1985 en Silva Casarín R. 2005):

$$Q_p = \frac{2}{m_0^2} \int_0^\infty f(S_{(f_i)})^2 \cdot df \quad (13)$$

Donde  $df = \Delta f = 0.01$  Hz.

Periodo pico (s)

$$T_p = 1.4 \cdot T_{01} \quad (14)$$

Periodo de energía (s)

$$T_e = 1.2 \cdot T_{01} \quad (15)$$

Potencia por metro de frente de ola ( $W \cdot m^{-1}$ ) es decir el flujo de energía de la ola, que describe el promedio de flujo de energía que pasa en un metro de ancho perpendicular a la superficie y perpendicular a la dirección de propagación y se extiende hasta el fondo del mar (Silva Casarín R. 2005). Donde, densidad relativa del agua  $\rho = 1000$  kg/m<sup>3</sup>,  $H_s$  en metros (m) y  $T_e$  en segundos (s),  $g = 9.8$  m/s<sup>2</sup>.

$$P_w = \frac{\rho \cdot g^2}{64\pi} \cdot H_s^2 \cdot T_e \quad (16)$$

### 1.6 Descripción gráfica de los datos.

Con la intención de examinar los valores de los parámetros espectrales, se recurrió a la visualización de cada dato disponible a lo largo del periodo de años mencionado, obteniéndose gráficos tanto en el tiempo como en la frecuencia. Se obtuvieron las gráficas de los diferentes parámetros, principalmente referidos o con respecto a la potencia del oleaje (Ec. 16). La primera gráfica (Figura 1.7) me sirvió para visualizar el modo de oleaje del mar con más posibilidades de encontrar en la zona, ya el tipo *sea* o local (patrón de oleaje irregular) o *swell* de fondo (patrón de oleaje regular), para lo cual se utiliza el parámetro de anchura espectral ( $\epsilon$ ) y agudeza del pico ( $Q_p$ ). La anchura espectral explica en que rango de frecuencias se desplaza el oleaje y entre menos frecuencias sean la anchura espectral tiende a cero. Para el caso hipotético de una única frecuencia  $\epsilon$  tiende a 0, si el número de frecuencias aumenta  $\epsilon$  tiende a 1, en términos prácticos un mar tipo *sea* tiene valores cercanos a 1 y uno tipo *swell* tiene valores cercanos a cero.

El parámetro de Goda de 1985 (Silva Casarín Rodolfo 2005) menciona que  $Q_p$  es cercano a 2 cuando las olas son generadas por viento, la anchura del pico espectral se puede utilizar como una medida de la irregularidad del estado de la mar.  $Q_p = 1$  corresponde  $\epsilon = 1$ , donde  $Q_p$  al ser más grande indica un espectro estrecho, es decir donde  $\epsilon$  tiende a 0. En situaciones normales  $Q_p$  está en el rango de 1.5–5. El parámetro de  $\epsilon$  no se recomienda por ser muy sensible a los momentos de orden superior  $m_2$ ,  $m_3$  y principalmente a  $m_4$  (Ecuaciones 3,4 y 5) es por ello que se utiliza más el parámetro de Goda pues utiliza el momento cero (Ec. 1) y la densidad espectral  $S(f)$  (Ec. 13).

Los resultados obtenidos de acuerdo a los valores arrojados de la ecuación 6, graficado en la figura 1.7 es que para todos los meses es un mar que tiende más a *sea*, con valores de  $\epsilon > 0.3$  y no mayores a 0.9, aunque en sí es un mar tipo *bimodal* de acuerdo a los criterios de la Guide wave analysis and forecasting (Secretariat of the World Meteorological Organization 1998). Con la ecuación de Goda (Ec. 13) se generó la figura 1.8 y se visualiza que el oleaje generado por viento está alrededor de 2 y hasta valores máximos de  $Q_p < 5.5$  y mínimos de  $Q_p > 1$

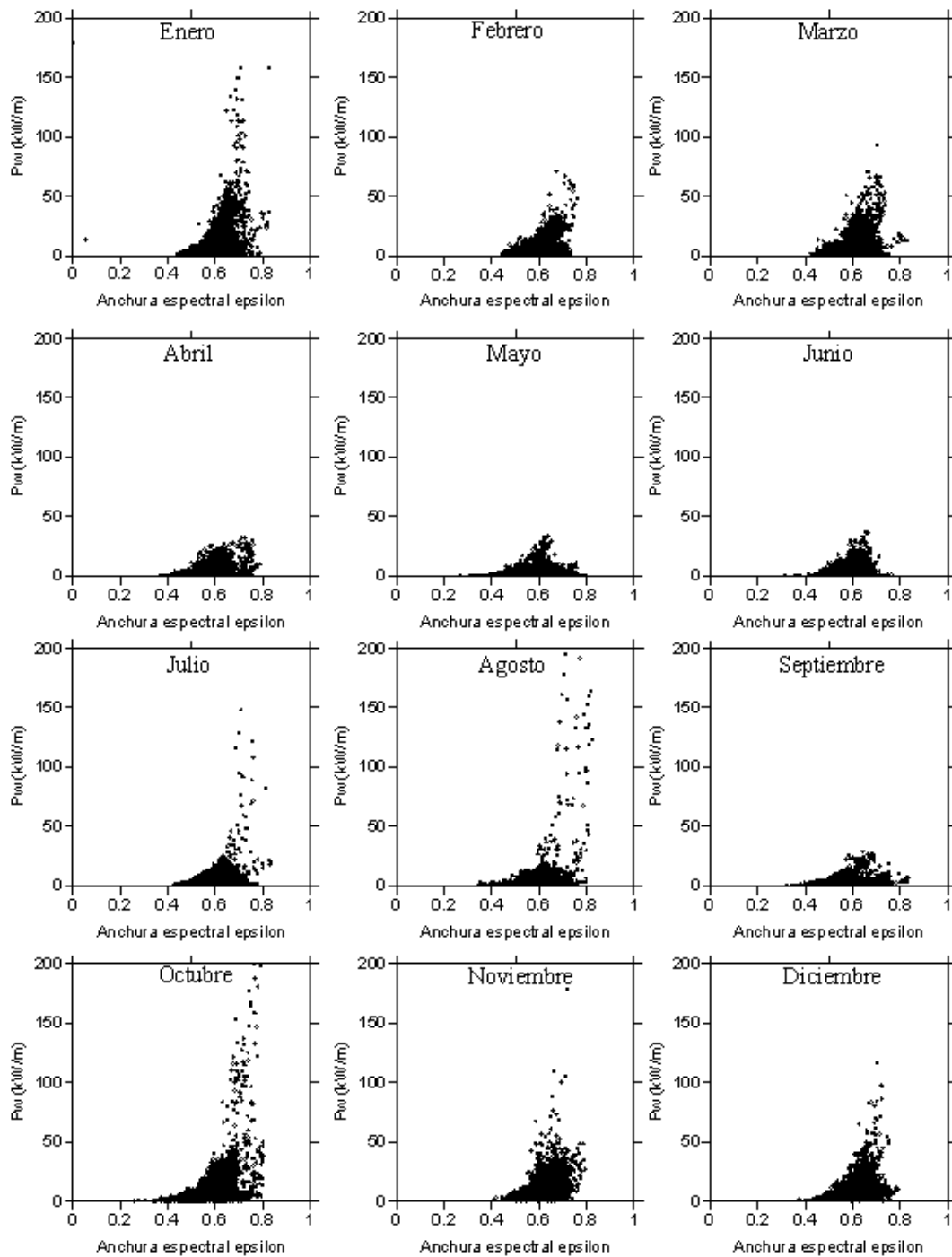
El periodo de energía de la figura 1.9 (Ec. 15) se aprecia que los datos empiezan a ser importantes a los 5 segundos y el grueso de los puntos se tiene de 5 a 9 segundos. Existen también periodos de energía principalmente de tormenta que van de los 9 y hasta casi 16 segundos. La altura significativa se distribuye a lo largo del año principalmente de 0.5 hasta 3.75 metros, siendo las olas con más posibilidades de aparecer.

En el gráfico 1.10 se aprecia la distribución de la potencia del oleaje y su altura significativa asociada, en donde la mayor cantidad de los datos se encuentra por debajo de 3.74 metros de altura significativa.

Con la finalidad de visualizar cuales son los meses más energéticos se graficó en función de la frecuencia y se generó el espectro promedio del mes representado en la figura 1.11, hay que considerar que al ser un promedio mensual de cada densidad de energía por frecuencia se lleva a cabo un suavizado del espectro. Se observa que octubre que es el mes con mayor energía promedio se debe principalmente al aporte de las bajas frecuencias con una combinación bimodal de frecuencias pico de 0.08 Hz y 0.13 Hz.

La descripción de la potencia del oleaje local en función de su altura significativa y su frecuencia (Figura 1.12) indica que hay dos zonas delimitadas por el promedio de  $H_s$ ; donde  $H_s$  está en el rango de 0 a 2.5 metros con espectro que va desde 0 a 0.26Hz que es un mar sin tormentas y otra zona donde  $H_s > 2.5m$  y hasta los 4 metros con un espectro de frecuencias mayores a cero y menores a 0.4 Hz, en un mar con tormenta donde el espectro de frecuencia es más ancho con una combinación de bajas frecuencias del oleaje de fondo o *swell* y oleaje local o *sea*. Se aprecia una zona de transición entre los 2 y 2.5 metros por debajo de los 0.9Hz y hasta los 0.3Hz.





**Figura 1.7. Distribución de la potencia del oleaje y anchura espectral  $\epsilon$ , con la ecuación de Cartwright y Lounguet- Higgins (1956) que incluye todos los datos de la boya Station 42056, para el periodo 2005-2012. Fuente: Elaboración propia, con datos de la NDBC 2013.**

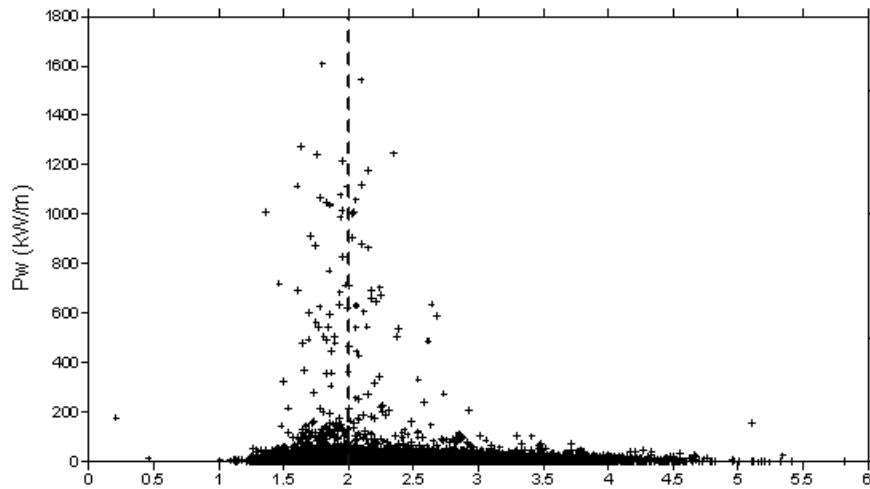


Figura 1.8. Distribución de la potencia del oleaje y agudeza del pico de acuerdo a la ecuación de Goda (1985) de todos los datos de la boya Station 42056, para el periodo 2005-2012. Fuente: Elaboración propia, con datos de la NDBC 2013.

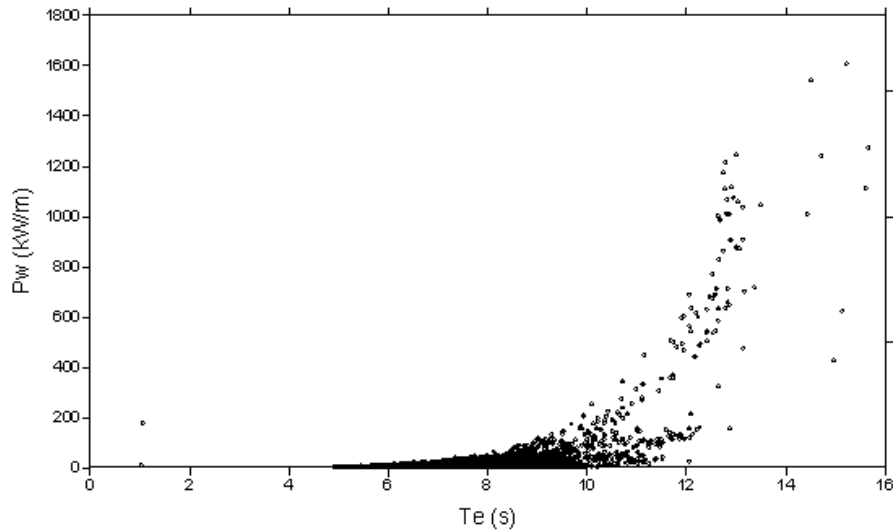


Figura 1.9. Distribución de la potencia del oleaje en función del periodo de energía de todos los datos de la boya Station 42056, para el periodo 2005-2012. Fuente: Elaboración propia, con datos de la NDBC 2013.

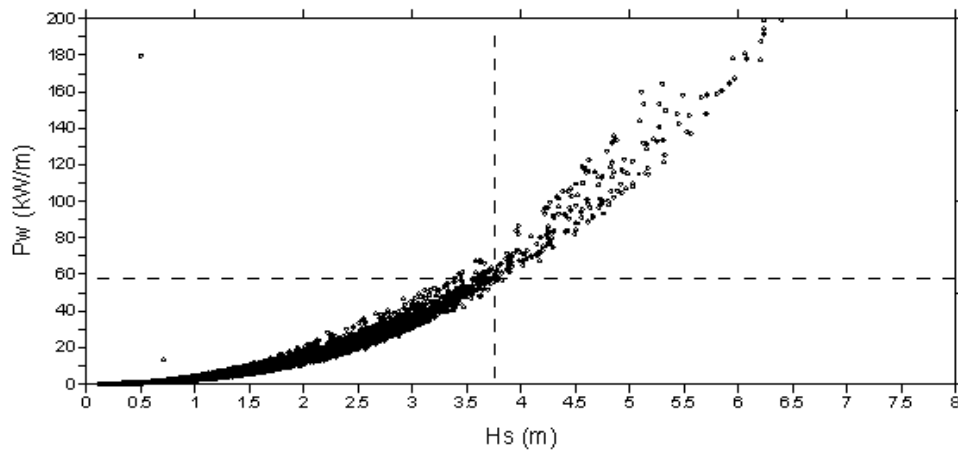
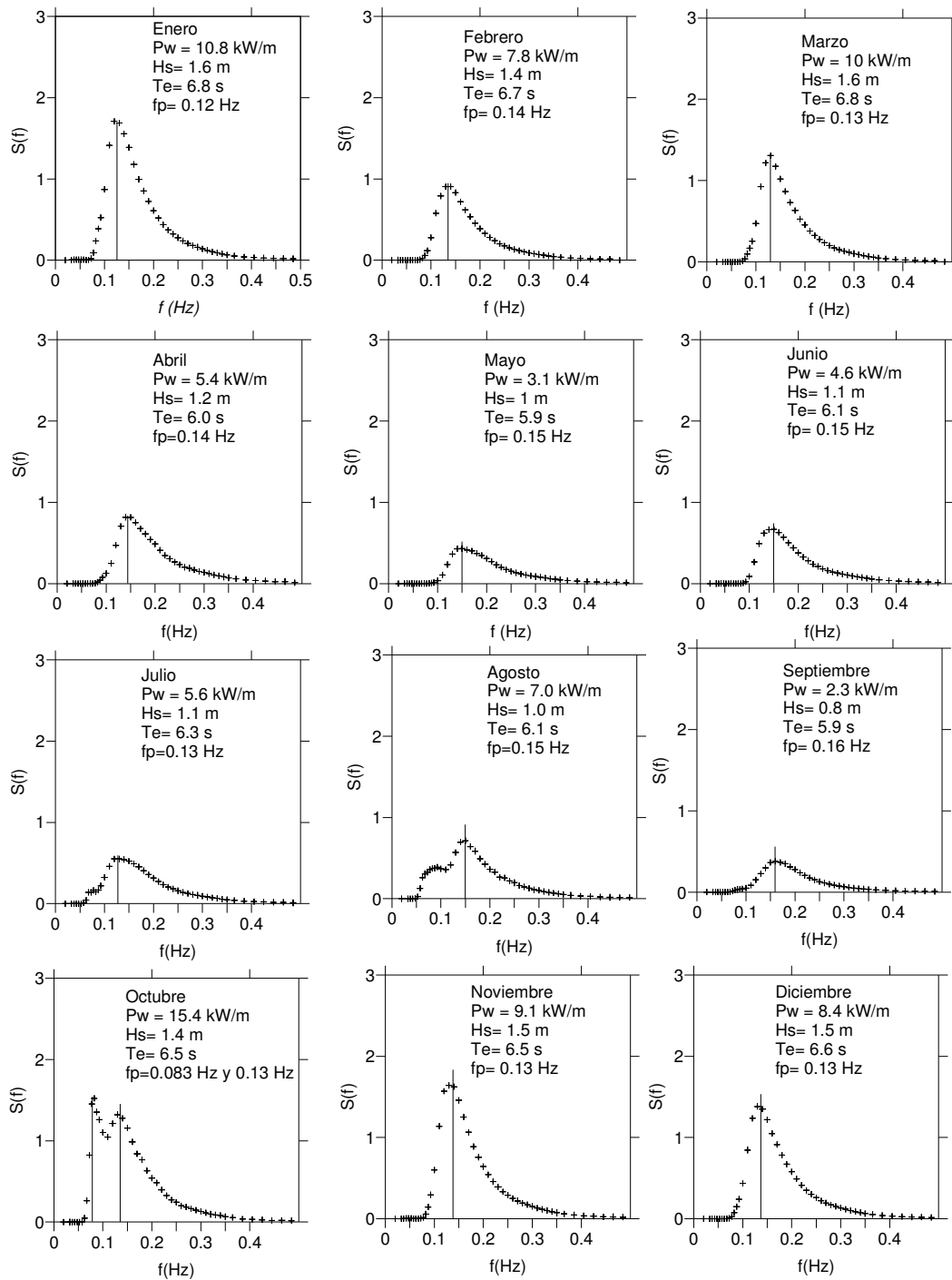
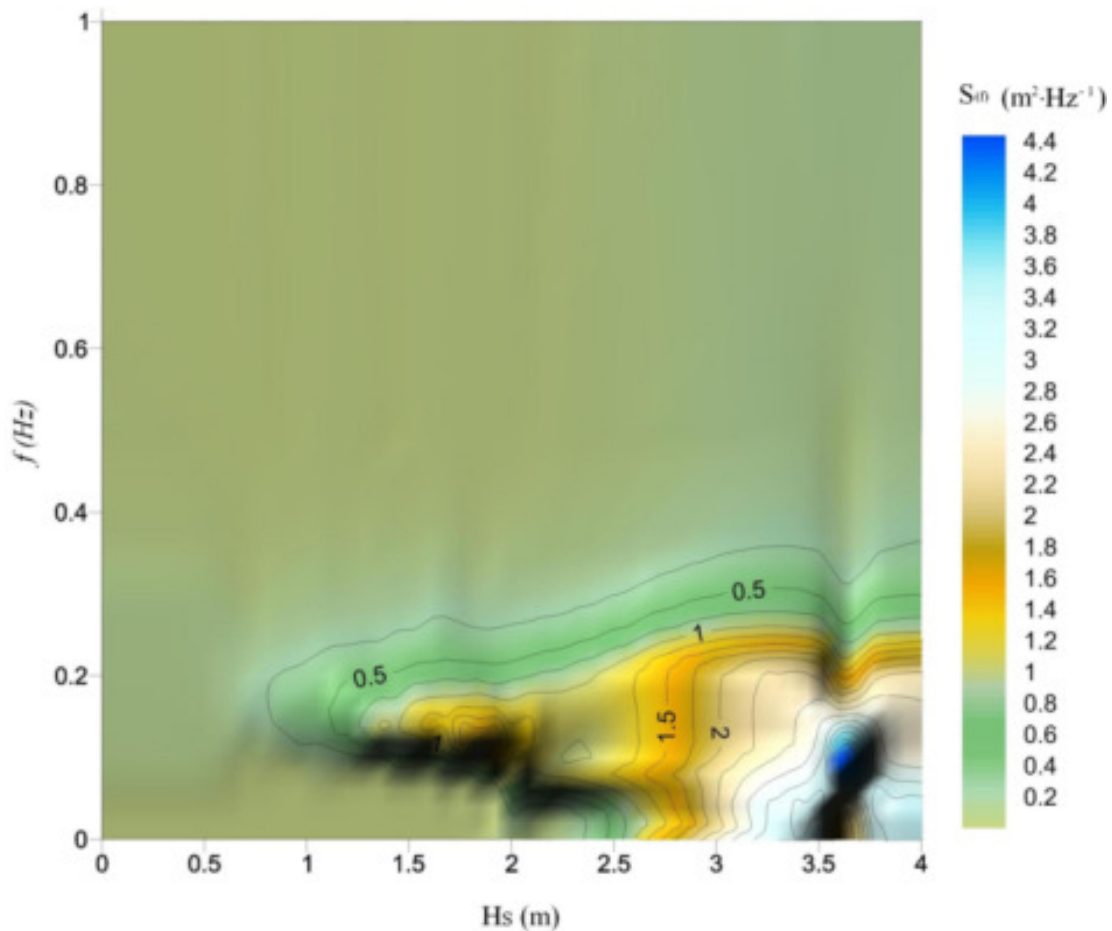


Figura 1.10. Distribución de la potencia del oleaje y su altura significativa asociada estación 42056 para el periodo 2005-2012. Fuente: Elaboración propia, con datos de la NDBC 2013.



**Figura 1.11. Espectros mensuales promedio 42056 para el periodo 2005-2012. Fuente: Elaboración propia, con datos de la NDBC 2013.**



**Figura 1.12. Descripción del oleaje para la zona de la estación 42056 a 222 km de distancia desde la costa ESE de la Isla de Cozumel periodo de mediciones años 2005-2012. Fuente: Elaboración propia, con datos de la NDBC 2013.**

### 1.7 Obtención de la potencia promedio mensual.

El principal objetivo de este capítulo es obtener la potencia por metro lineal de ola, por lo cual se siguió el procedimiento descrito a continuación y aplicando las ecuaciones de la 2 a la 17.

Procedimiento:

1. El primer paso fue separar por meses las 49334 series de datos en el dominio de la frecuencia que reporta la NDBC como unidad básica de muestreo, para el periodo de datos mayo de 2005 a diciembre de 2012, excluyendo el año de 2010 por tener datos incoherentes. En general todos los meses cuentan con un promedio de series de datos de 4500 (Tabla 1.3).
2. Separados en meses, calculé los *momentos espectrales* para cada serie de datos, es decir para cada hora de cada mes, de cada año con las ecuaciones 2 a 6.
3. A partir de los resultados de los momentos espectrales, calculé la *altura significativa*  $H_s = H_{m0}$  de cada hora, de cada mes de cada año a partir de la ecuación 13.
4. Procedí de igual forma con el *periodo medio*  $T_{01}$  y  $T_{02}$ , con las ecuaciones 9 y 10.
5. El *periodo pico*  $T_p$ . Este valor es aproximadamente 1.4 veces el promedio  $T_{01}$  o  $T_{02}$ .
6. El periodo de energía  $T_e$  de la ecuación 16 es un valor obtenido a través de los estudios de energía de las olas, este parámetro depende fuertemente de las olas de bajas frecuencias del espectro y largos periodos.
7. Para obtener el promedio de la potencia por metro de frente de ola ( $\text{kW}\cdot\text{m}^{-1}$ ) promedié las potencias de cada hora de cada mes que están en la tabla 1.3.

La variabilidad de los promedios mensuales de la potencia del oleaje  $P_w$ , tiene un rango mayor en octubre, agosto y julio y varía menos los meses de septiembre, mayo, junio y abril. La variabilidad de  $H_s$  varía más en julio, noviembre y septiembre y es más regular en enero, febrero y diciembre (Tabla 1.3). Presento algunos resultados de los promedios mensuales de potencia del oleaje ( $P_w$ ), altura significativa  $H_s$  y periodo de energía  $T_e$  (Figura 1.13). Como resultado principal el promedio anual de la potencia del oleaje es  $7.47 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-1}$ .

**Tabla 1.3. Estadísticos de altura de ola significativa y de potencia del oleaje ( $P_w$ ) de datos procesados.**

Mes	Potencia del oleaje $P_w$ ( $\text{kW}/\text{m}$ )					Altura significativa $H_s$ (m)				
	Número de datos $n$	$P_w$ Promedio.	$s$	$P_w$ Máximo	$P_w$ Mínimo	Número de datos $n$	$H_s$ Promedio	$s$	$H_s$ Máximo	$H_s$ Mínimo
E	4773	10.77	13.40	158.2	0.55	4773	1.57	0.71	5.49	0.46
F	2729	7.80	7.08	70.9	0.59	2729	1.44	0.52	4.14	0.47
M	2500	9.96	9.91	93.2	0.30	2500	1.57	0.64	4.21	0.32
A	2930	5.43	5.11	32.2	0.11	2930	1.22	0.52	2.74	0.20
M	4164	3.14	3.33	33.8	0.04	4164	0.96	0.40	3.09	0.11
J	4236	4.64	4.23	37.1	0.20	4236	1.14	0.46	3.07	0.27
J	4370	5.60	29.84	1047.1	0.23	4370	1.10	0.59	12.7	0.26
A	4382	6.98	56.74	1607.1	0.11	4382	0.98	0.81	14.9	0.21
S	4888	2.32	2.91	28.9	0.11	4888	0.80	0.38	2.90	0.20
O	5097	15.45	76.42	1246.7	0.09	5097	1.41	1.23	14.2	0.19
N	4372	9.13	11.30	275.7	0.22	4372	1.52	0.61	7.35	0.31
D	4893	8.414	8.2	116.0	0.29	4893	1.47	0.57	4.85	0.33

Notas:  $s$  = desviación estándar.

La variabilidad se debe principalmente al paso de tormentas y huracanes por lo que se deben tomar en cuenta a la hora de analizar los valores de la desviación estándar. Un breve recuento de los huracanes que pasaron por la zona de acuerdo al National Hurricane Center de la NOAA son: Emily (Jul 2005), Stan (Oct 2005), Wilma (Oct 2005), Deán (ago 2007), Dolly (Jul 2008), Ida (Nov 2009), Rina (Oct 2011), y Ernesto (Ago 2012). Es decir, la Península de Yucatán está expuesta a un promedio de más de 20 ciclones tropicales para el periodo 1851 a 2000, equivalente a tener un ciclón cada 7.5 años (CENAPRED 2013).

La cantidad de energía calculada que aportan los eventos extremos tomando como criterio oleaje mayor a  $100 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-1}$  y para los 91 meses de datos, es del 15.23 %, que representan tan solo 181 horas de eventos extremos (Tabla 1.4). Mientras que en el 90% del tiempo la energía está en el rango de 0 a  $14.5 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-1}$  y representa tan solo el 50.24% del acumulado de energía. En cuanto al rango de 0 a  $10 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-1}$  representa el 83.4% del tiempo y el 39.3% del acumulado de energía. El rango de 0 a  $5 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-1}$  representa el 65.4% con un acumulado de energía del 21.74 %. Todos estos rangos para los 91 meses de datos (Tabla 1.5).

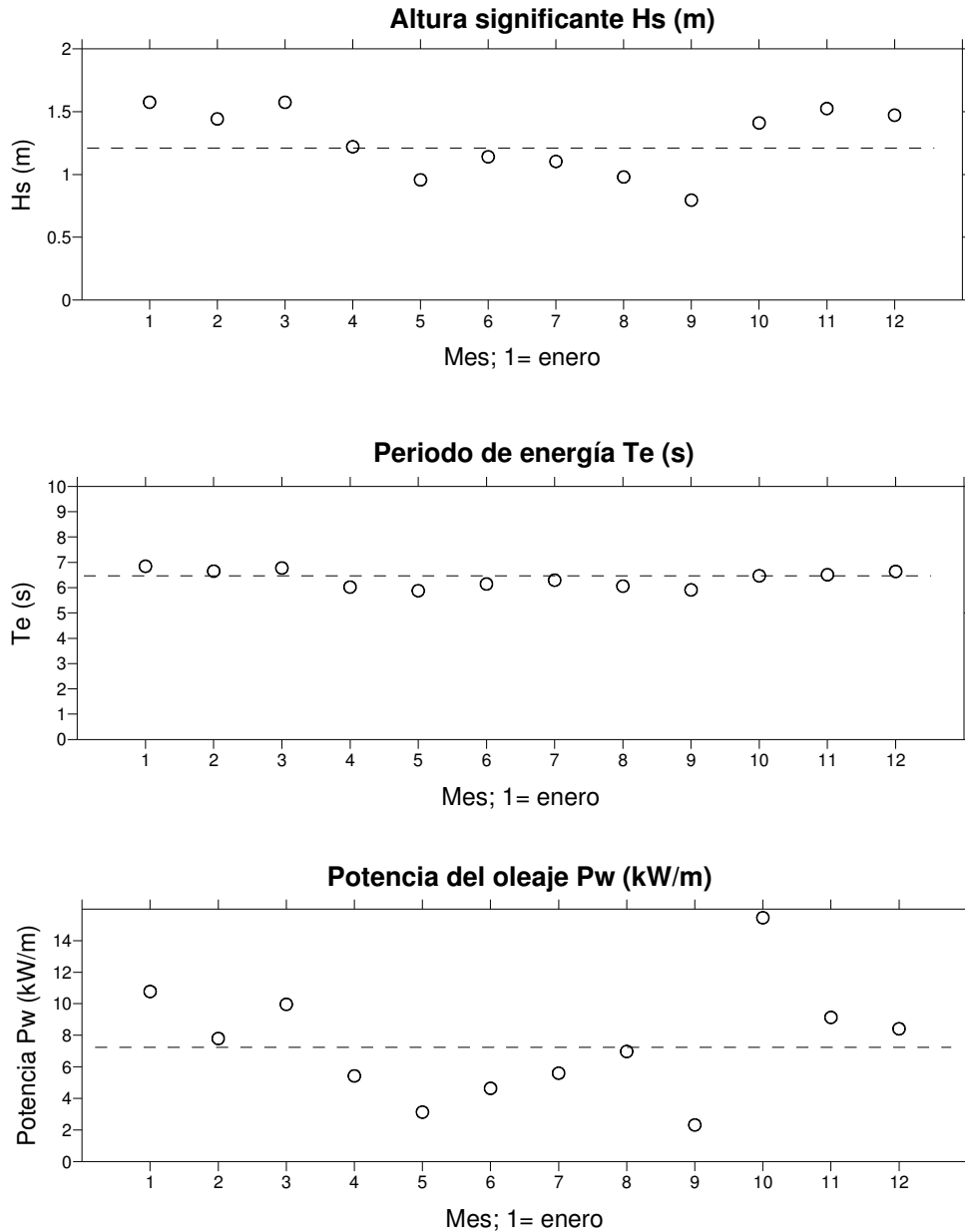
**Tabla 1.4. Horas de eventos extremos y su porcentaje de producción de energía  $<100 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-1}$ .**

[Rango $P_w$ ) $\text{kW}\cdot\text{m}^{-1}$	Horas	% horas	Acumulado % horas	Producción kWh	Acumulado producción kWh	% producción.	Acumulado % producción	
100	200	94	0.19	99.82	12401.55	326070.60	3.33	85
200	500	31	0.06	99.89	10414.50	350985.42	2.79	88
500	1000	37	0.07	99.96	24914.82	372958.80	6.68	94
1000	1600	19	0.04	100.00	21973.37	372958.80	5.89	100

Nota:  $P_w$  = Potencia del oleaje.

**Tabla 1.5. Producción de energía en el rango de Pw 0 a 14 kW·m<sup>-1</sup>.**

[Rango Pw) kW·m <sup>-1</sup>		Horas	% horas	Acum % horas	Producción kWh	Acum Producción kWh	% prod.	Acum % prod
0	0.5	1757	3.6	3.6	597.4	597.4	0.16	0.16
0.5	1	3943	8.0	11.6	2948.6	3546.1	0.79	0.95
1	1.5	3968	8.0	19.6	4971.3	8517.4	1.33	2.28
1.5	2	3654	7.4	27.0	6394.1	14911.4	1.72	4.00
2	2.5	3754	7.6	34.6	8442.3	23353.8	2.26	6.26
2.5	3	3391	6.9	41.5	9308.7	32662.4	2.50	8.76
3	3.5	3036	6.2	47.6	9859.8	42522.2	2.64	11.41
3.5	4	2724	5.5	53.2	10206.4	52728.5	2.74	14.14
4	4.5	2282	4.6	57.8	9680.8	62409.3	2.60	16.74
4.5	5	1998	4.0	61.8	9487.0	71896.4	2.54	19.28
5	5.5	1740	3.5	65.4	9122.6	81019.0	2.45	21.73
5.5	6	1511	3.1	68.4	8679.0	89698.0	2.33	24.06
6	6.5	1289	2.6	71.0	8047.3	97745.3	2.16	26.22
6.5	7	1210	2.5	73.5	8164.6	105909.9	2.19	28.41
7	7.5	1062	2.2	75.6	7693.9	113603.7	2.06	30.47
7.5	8	977	2.0	77.6	7572.1	121175.8	2.03	32.50
8	8.5	813	1.6	79.3	6697.4	127873.2	1.80	34.30
8.5	9	722	1.5	80.7	6313.1	134186.3	1.69	35.99
9	9.5	684	1.4	82.1	6325.5	140511.8	1.70	37.69
9.5	10	616	1.2	83.4	6005.8	146517.6	1.61	39.30
10	10.5	539	1.1	84.5	5519.8	152037.4	1.48	40.78
10.5	11	483	1.0	85.4	5193.3	157230.8	1.39	42.17
11	11.5	448	0.9	86.3	5040.9	162271.7	1.35	43.53
11.5	12	382	0.8	87.1	4486.7	166758.4	1.20	44.73
12	12.5	353	0.7	87.8	4320.0	171078.4	1.16	45.89
12.5	13	328	0.7	88.5	4184.3	175262.6	1.12	47.01
13	13.5	320	0.6	89.1	4240.5	179503.2	1.14	48.15
13.5	14	277	0.6	89.7	3809.5	183312.6	1.02	49.17
14	14.5	280	0.6	90.3	3985.3	187298.0	1.07	50.24



**Figura 1.13. Potencia, periodo de energía y altura significativa promedio mensual y anual del oleaje para el periodo 2005 a 2012. Con la base de datos de la estación 42056 (LLNR 110) – Yucatán Basin-120NM ESE De la Isla de Cozumel; ubicación (19°48'6"N 84°51'24"W). Fuente: Elaboración propia, con datos de la NDBC 2013.**

Otro procedimiento práctico de promediar la energía del oleaje es por medio de la contabilidad de la energía que fluye a través de cada metro de frente de ola, el valor contabilizado se divide entre el número de horas o segundos según la unidad de medida. Para este caso en particular el número de horas de mediciones dadas por la NDBC son 49334, que se puede corroborar en la tabla 1.3. Apoyándome en las gráficas de las figura 1.14 y 1.15 obtuve los promedios anuales de potencia del oleaje con dos unidades de energía, los  $\text{GW}\cdot\text{m}^{-1}$  y los  $\text{MWh}\cdot\text{m}^{-1}$ , para tales casos el promedio anual por metro de ola es  $7.57\text{kW}\cdot\text{m}^{-1}$ . En estos gráficos se observan los diferentes eventos de huracán cercanos a la boya, siendo Wilma el más energético por la magnitud del huracán y por su cercanía a la boya. La figura 1.15 tiene una escala hasta los  $200\text{kW}\cdot\text{m}^{-1}$  de la potencia del oleaje a diferencia de la figura 1.14 que tienen el máximo valor registrado de potencia del oleaje para el Huracán Dean.

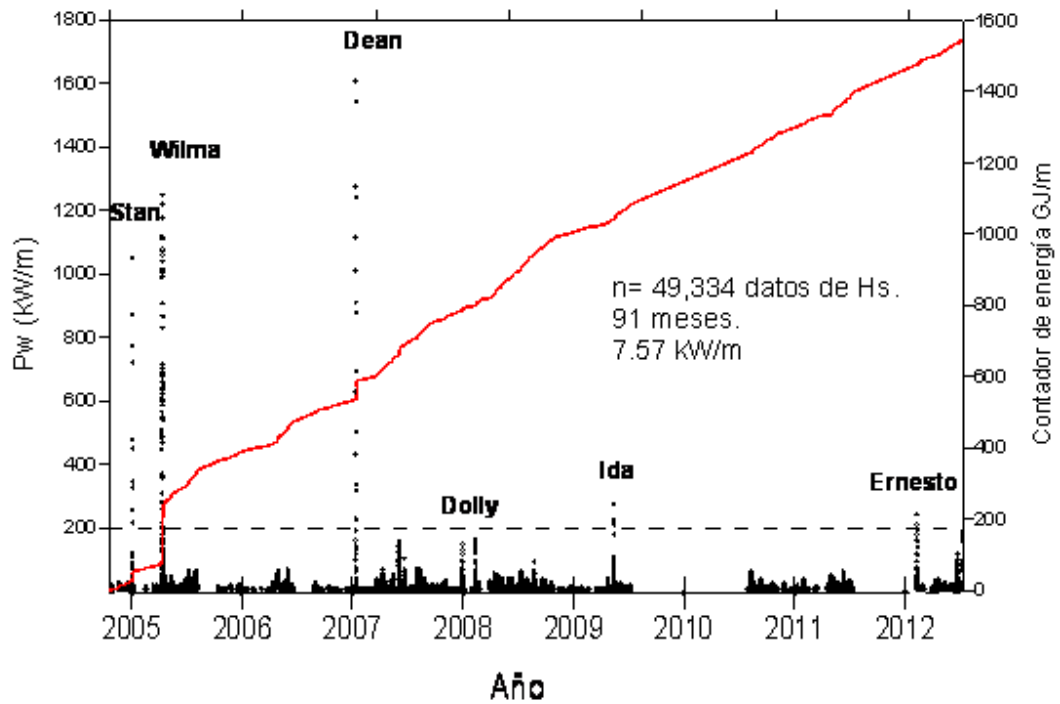


Figura 1.14. Dispersión de las potencias del oleaje (puntos negros) y los nombres de los huracanes que los originaron. La línea continua es el acumulado de la energía del oleaje que pasó por la boya de la NDBC en el periodo 2005-2012. La línea cortada a los 200 kW/m indica el 88 % del acumulado de energía está en ese rango. Fuente: Elaboración propia con la base de datos de la estación 42056 (LLNR 110) - Yucatán Basin-120NM ESE De la Isla de Cozumel; ubicación (19°48'6" N 84°51'24" W).

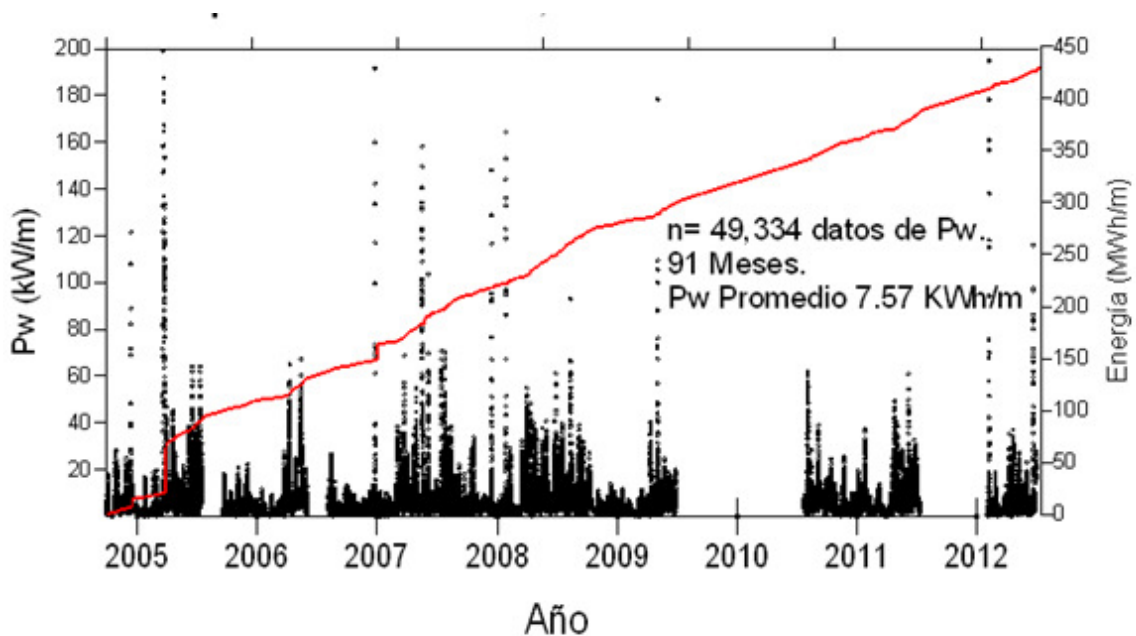


Figura 1.15. Acercamiento de la dispersión de las potencias del oleaje (puntos negros). La línea continua es el acumulado de la energía del oleaje que pasó por la boya de la NDBC en el periodo 2005-2012 en kWh/m. Fuente: Elaboración propia con la base de datos de la estación 42056 (LLNR 110) - Yucatán Basin - 120 NM ESE De la Isla de Cozumel; ubicación (19°48'6" N 84°51'24" W).



### 1.8 Influencia del fondo marino.

Los resultados obtenidos de la potencia del oleaje deben venir acompañado de los periodos de energía y las longitudes de onda asociados, con la finalidad de obtener valores mínimos de profundidad a la que los dispositivos undimotrices deban ser instalados para *sentir* la ola ya en el lecho o flotantes intermedios. Cuando se propaga la onda el agua es perturbada tanto superficialmente como a cierta profundidad, por debajo de una profundidad igual a la mitad de una longitud de onda ( $\lambda/2$ ) de la onda, los desplazamientos de las partículas de agua en aguas profundas están por 4 por ciento de las de la superficie. En la práctica es común tener una transición en  $z = \lambda/4$ . En aguas profundas, los desplazamientos a esta profundidad son aproximadamente 20 por ciento de los de la superficie. La deformación apreciable en superficie solo se apreciará cuando el lecho se encuentre a  $\lambda/4$  y de igual forma su velocidad es muy cercana a la velocidad en aguas profundas. Los siguientes términos se utilizan para caracterizar la relación entre la profundidad ( $h$ ) y longitud de onda ( $\lambda$ ) (World Meteorological Organization 1998):

- El agua profunda  $z > \lambda / 4$ ;
- Transición profundidad  $z/25 < z < \lambda / 4$ ;
- Agua Superficial  $h < z / 25$ .

Vining, J. (2005) menciona que para transferir la energía de la ola es necesario conocer cómo se transfiere en función de la profundidad por medio de la ecuación 17. Esta propiedad es válida para las ondas en el agua con profundidades mayores que  $\lambda/2$ . La ecuación muestra la relación entre la profundidad y la energía disponible a la profundidad  $z$ .

$$E_{(z)} = E \cdot e^{-\frac{2 \cdot \pi \cdot z}{\lambda}} \quad (17)$$

Donde:

$E_{(h)}$  = energía de la ola en función de la profundidad ( $J \cdot m^{-1}$ )

$E$  = energía a 0m de profundidad.

$z$  = profundidad (m)

En términos prácticos a una profundidad de  $\lambda/2$ , la energía de la ola es el 4% con respecto al de la superficie. Se muestra la influencia de la profundidad en la potencia de la ola para cada mes. Estos diagramas apoyan lo mencionado por Pérez Peña, A.I. (2013) que menciona que si se van a instalar dispositivos en el fondo marino debieran ser a no más de 20 metros de profundidad para aprovechar el del 25 al 30 % de la energía de la ola, pero esto puede ser contraproducente en las tormentas en donde las olas de mayor longitud de onda podrían socavar y dañar los equipos anclados al fondo. Esto reduce el área undimotriz de 0 a 20 metros de profundidad.

### 1.9 Resultados.

En términos generales para los promedios interanuales las tecnologías actuales podrían utilizarse en las costas del Caribe Mexicano pero trabajarían en su límite inferior de producción de energía, considerando una eficiencia mínima de conversión del 25 %, se aprovecharía en términos generales 1.87 kW por cada metro captado de ola. Y tendrían que ser tecnología en superficie o basados en tierra.

Los resultados obtenidos a través de los datos de oleaje del NODC son; promedio anual de la potencia por metro de frente de ola ( $P_w$ ) de  $7.57 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-1}$ , altura significativa ( $H_s$ ) de 1.265 metros, periodo de energía ( $T_e$ ) de 6.6 segundos. Los resultados que obtuve con base en los datos de la NDBC se presentan en conjunto con los dados por otros autores y que en general se aprecia una buena consistencia en los valores obtenidos (Figura 1.16).

La altura significativa ( $H_s$ ) y el periodo de energía ( $T_e$ ) ambos valores están dentro de los valores de operación de los dispositivos de aprovechamiento energético de las olas, que son de 0.75 m a 7.25 m. y los periodos de energía ( $T_e$ ) de operación son de 5.5 s a 15.5 s. Estos rangos de operación de los dispositivos estudiados son diseñados para trabajar con oleaje de 5 a más de

60 kW·m<sup>-1</sup>. Lo que indica que aunque se podrían operar dispositivos de olas con las tecnologías actuales, estos trabajarían al mínimo de su producción. Esto también indica que sería posible adecuar dispositivos a condiciones del oleaje local.

El frente de costa para el Caribe de México es de 400 km, considerando que el oleaje sea uniforme en todo este frente y en mar abierto sin obstáculos la potencia del oleaje sería de 3000 MW. Consideramos un 15% de aprovechamiento de los dispositivos entonces el promedio anual de potencia en toda la costa sería de 450 MW. La producción anual de energía a un factor de planta del 70% sería de 2700 GWh-año.

En síntesis el Caribe de México contando con un aproximado de 250 km de costas en México libres de Áreas Naturales Protegidas o de Aves tendría un potencial bruto estimado de 1892 MW, y si consideramos un 15% de aprovechamiento 280 MW, con una producción de 1700 GWh-año.

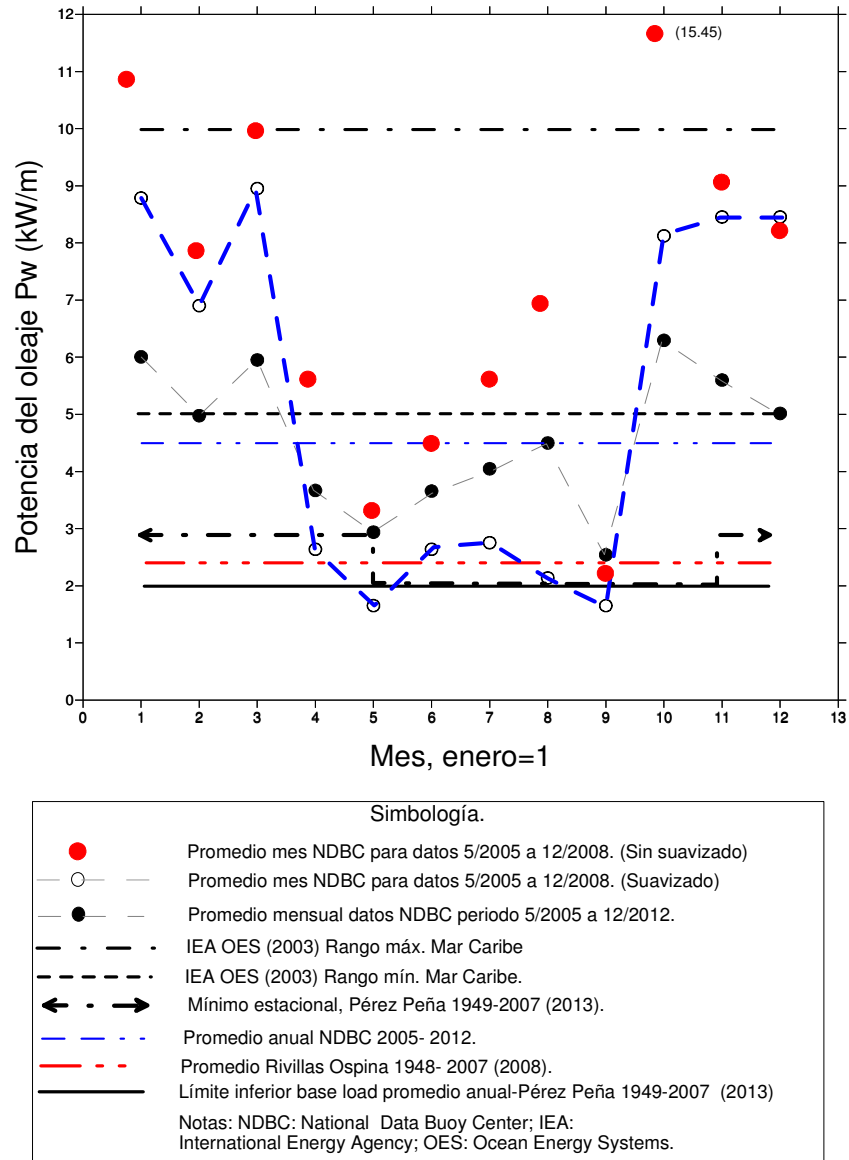


Figura 1.16. Resultados de los valores de potencia por metro de ola, diversas fuentes Tabla en anexo 4. Fuente: Elaboración propia.

## 2 POTENCIAL ENERGÉTICO POR GRADIENTE TÉRMICO.

### 2.1 Antecedentes.

La primera demostración a escala real del uso del gradiente térmico del océano fue hecha en la Bahía de Matanzas en Cuba a 630 kilómetros de la Isla de Cozumel, por George Claude un ingeniero Francés, alumno de Arsene D'Arsonval padre de la tecnología que conocemos como OTEC. La planta operó exitosamente comprobando técnicamente la operación de un sistema OTEC. El estado actual de esta planta experimental se puede aun observar las excavaciones hechas en la roca para poner los cambiadores de calor, las bombas y los tubos, se observan también las columnas que dieron soporte a una construcción de al menos 12 metros de altura (Figura 2.1). No se observa ya ninguna parte de metal grande con excepción de pernos y anclajes oxidados. La ubicación de este lugar es 23.110645° de latitud norte y -81.532150° de longitud oeste. En el lugar se les conoce como las piscinas de Mr. Claude (Figura 2.2) y cerca de ahí se encuentra una termoelectrica a un kilómetro de distancia

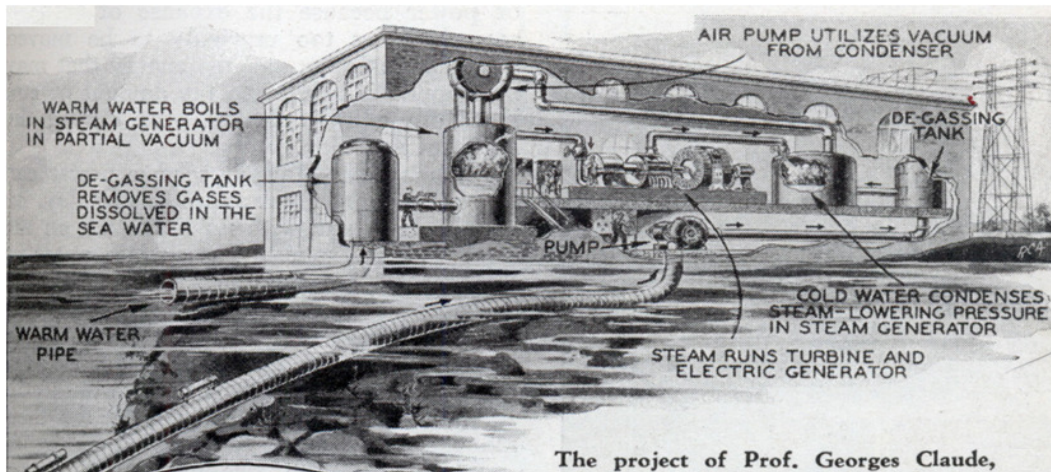


Figura 2.1 Planta OTEC de ciclo abierto desarrollada por George Claude y Boucherot en Matanzas Cuba en 1930. Fuente: Planas Juan Manuel (1930).

En México y específicamente en el Caribe la primera investigación sobre OTEC fue desarrollada por Alfred Löhnberg en el año de 1960 quien escribió un volumen de 40 páginas titulado *Energía térmica del mar Banco Chinchorro, Quintana Roo*. Este libro se encuentra resguardado en la Base de datos de la Biblioteca del Archivo Histórico del Agua (AHA). Esta publicación fue impresa en México<sup>4</sup>, y es un estudio de factibilidad para una planta OTEC.

<sup>4</sup> Este autor escribió también *Electrical Prospecting for Water* junto con A. Loewenstein en el año de 1936, libro con 12 páginas.

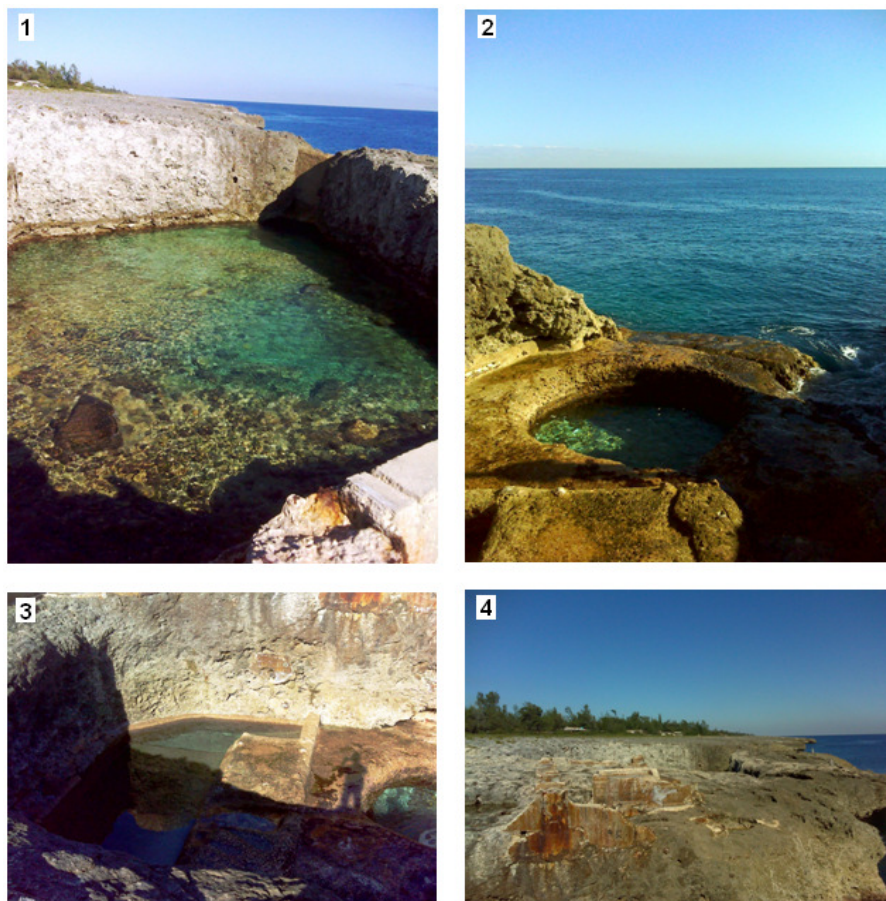


Figura 2.2. Estado actual de las instalaciones OTEC de 1930 en Matanzas Cuba (1), Excavación mayor posiblemente donde estaba el condensador (2) y (3) evaporador; (4) bases de columnas para la construcción (ver figura 2.1), (Fuente: Fotografía propia)

## 2.2 Procedimiento.

Con fundamento en la ecuación de energía interna (Ec. 18), Abrahaham H. O. *et al* (1989) simplificada para este estudio, y nutrida con los datos de la Tabla 2.1, se investigó el gradiente térmico estacional a profundidades de entre 700 y 1000 metros de profundidad y localizaciones no más lejanas a 10 km de la costa, aunque no se descarta que pudiera ser más lejos. Una de las limitantes fue la cantidad de datos disponibles en el área de estudio y para las profundidades requeridas, por lo que el número de mediciones de temperatura por cada profundidad quedó supeditado al número de estaciones oceanográficas disponibles.

Tabla 2.1. Variables necesarias para el cálculo del potencial de OTEC.

Nº	Variable	Unidades
1	Área de estudio	km <sup>2</sup>
2	Volumen de océano estudiado	km <sup>3</sup>
3	Volúmenes relativos de las masas de agua del Caribe.	%
4	Propiedades físicas y termofísicas del agua de mar; densidad, calor específico y capacidad calorífica.	kg·m <sup>3</sup> ; J·(kg·°C) <sup>-1</sup> J·(m <sup>3</sup> ·°C) <sup>-1</sup>
5	Perfiles de temperatura promedio mensual 0-700 m, en la ZEE Caribe de México (Datos de la National Oceanographic Data Center)	°C

Actualmente los últimos estudios fueron realizados por Aviña Jiménez M. H. (2007) donde indica que la zona idónea para una planta OTEC por sus características térmicas y batimétricas en el Caribe de México es en la costa de la isla de Cozumel en las coordenadas 18°15'N; 87°47' hasta 20°24'N; 86°37'W. Justificando que el gradiente térmico se encuentra a no más de 10 kilómetros de la costa y cerca del centro de consumo que sería la ciudad de Cozumel y Playa del Carmen. También menciona para las costas mexicanas las plantas OTEC basadas en tierra y de ciclo abierto serían más convenientes, por tener como producto secundario agua desalinizada, y por la incidencia frecuente de Huracanes respectivamente. En la figura 2.3, se muestran las dos ubicaciones sugeridas por el autor.



Figura 2.3. Lugares propuestos para plantas OTEC en la Isla de Cozumel. Figura tomada de Aviña Jiménez M. H. 2007.

### 2.3 Batimetría.

Actualmente en México se puede consultar la batimetría en formato de Datos Vectoriales de la Carta Batimétrica Internacional del Mar Caribe y Golfo de México (INEGI-IBCCA 2000), Hoja 1-06, en formato digital (Ver figura II.1.). Esta superficie del relieve submarino de las regiones Mar Caribe está a escala 1:1000,000, proyección cartográfica normal de mercator y que utiliza el sistema geodésico de referencia WGS-84. La batimetría se divide en tres zonas diferenciadas por sus rangos de profundidades que son en de 0 a 700 metros (Zona somera); de 700 m a 2000m (zona intermedia) y de 2000 a la zona más profunda de 4968 metros (zona profunda). La plataforma continental se extiende alrededor de los 100 a 120 kilómetros a partir de la costa, localizándose la zona más profunda en la parte oriental de la ZEE.

### 2.4 El volumen del Mar Caribe de México.

El volumen de estudio está delimitado en su superficie por la ZEE y en su profundidad por la batimetría (Ver figura II.1.) y se estimó obteniendo las profundidades promedio de las tres zonas anteriormente mencionadas dando promedios de 4480, 2754 y 816 metros para la zona profunda, intermedia y somera respectivamente. El volumen estimado fue de 274000km<sup>3</sup>. De este volumen los estratos de masa de agua de interés para los sistemas OTEC son los gradientes térmicos máximos, conseguidos normalmente con la temperatura del agua de superficie y el agua profunda entre los 700 y 1000 metros. En la tabla 2.6 se muestran el volumen total estimado de la zona de estudio, los volúmenes parciales de cada masa de agua, obtenidos con base en su porcentaje relativo.

## 2.5 Características físicas y termofísicas de las masas de agua Mar Caribe.

Las masas de agua del Caribe actualmente identificadas de acuerdo a Gallegos A. y Czitrom S. (1997) son:

- ASSAN; Agua Subsuperficial del Atlántico Norte, rango de temperaturas de 21 a 23 °C, salinidad 36.6 a 37ups, entre 50 a 250 metros de profundidad, con volumen relativo del 5 %.
- ACAN; El Agua Central del Atlántico Noroccidental, rango de temperaturas de 7 a 20 °C, salinidad de 35 a 36.7 ups y profundidades de 250 a 750 metros, con un volumen relativo de 12%.
- AIA; El Agua intermedia del Antártico, rango de temperaturas de 2 a 6°C, salinidad de 33.8 a 34.8 y profundidades entre los 750 a 950 metros, con un volumen relativo de 6%.
- APAN; El agua Profunda del Atlántico Norte, con temperaturas de 1.5 a 4 °C, salinidades de 34.8 a 35 ups, y profundidades desde los 950 metros hasta el fondo marino, esta masa de agua es la más abundante con un volumen relativo del 73%.
- AM; La zona de mezcla, se considera con un volumen relativo del 4%, con un rango de temperaturas y salinidades con componente estacional debido a los efectos de intercambio de masa y energía.

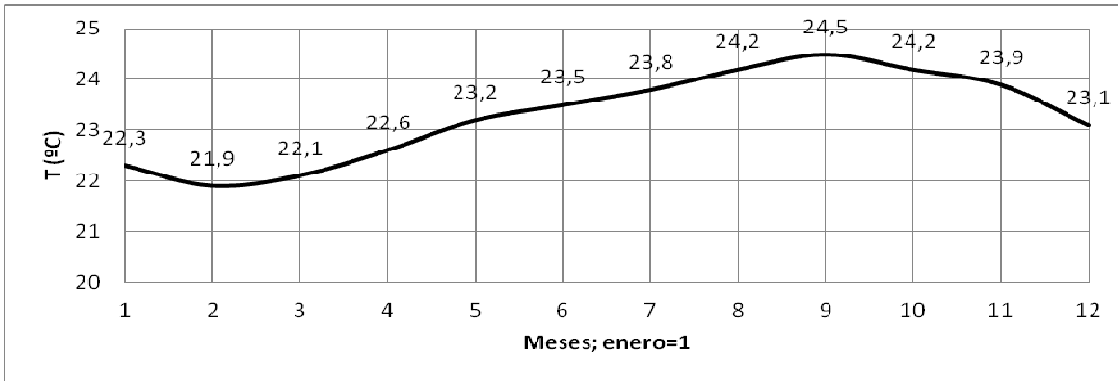
Las propiedades termofísicas del agua de mar contemplan el calor específico de la superficie  $c_p = 4000 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$  y para el agua de fondo  $c_p = 3925 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$ . La densidad *in situ*  $\rho$  ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) es en la superficie es  $\rho = 1023,78998 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  a 26 °C, 36 ups y 1 atmósfera, y para el fondo a 800 metros, 36 ups, la  $\rho = 1032,86701 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , UNESCO (1983). Adicionalmente el producto de la densidad y el calor específico indican la capacidad térmica de la parcela de agua por cada grado centígrado cedido o absorbido, que es igual a  $\approx 4\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$ .

## 2.6 Perfiles de temperatura de referencia en el Mar Caribe.

El parámetro clave para la evaluación de los recursos energéticos renovables es la temperatura del mar a diferentes profundidades, y es el parámetro que se requiere modelar con cierto grado de certidumbre tanto estacionalmente como por su profundidad con respecto al nivel medio del mar. Por lo tanto el parámetro clave va a ser cada uno de los promedios de temperatura mensual a las profundidades estándar y que será representativo de toda el área de estudio. El marco de referencia utilizado fue la base de datos de la National Oceanographic Data Center, mediciones de temperatura de XBT y CTD. La unidad básica de muestreo estadístico son los lances (*cast* en Ingles) de XBT y las hidrocalas del CTD. Un lance de XBT es independiente de la Estación Oceanográfica y esta codificado por un número de acceso.

Una primera aproximación de este parámetro clave la realicé con la información de Gallegos A. y Czitrom S. (1997) de la temperatura superficial promedio para el Caribe en general y las temperaturas de las masas de agua obtuve el cambio promedio mensual del gradiente de temperatura (Figura 2.4) siendo un gradiente mayor a 21°C a lo largo de todo el año, teniendo un mínimo de 21.9 °C en el mes de febrero y un máximo en septiembre a 24.5°C. El rango de variación o amplitud entre la máxima temperatura y la mínima temperatura promedio anual es de 2.6°C. Esta componente estacional dejan de ser importantes a los 100 metros donde el rango de variación anual es menor a 0.5°C.

De acuerdo a la figura 2.4, el periodo de la onda del gradiente de temperatura para el Caribe es de doce meses teniendo su mínimo a mitad de febrero y su máximo a la mitad de septiembre, siendo este semiperiodo de 7 meses para la elevación de la temperatura superficial del mar Caribe desde el mínimo al máximo y el segundo semiperiodo de 5 meses donde la temperatura superficial del mar decrece más rápidamente.



**Figura 2.4. Gradiente de temperatura promedio entre 0 y 1000 metros de profundidad. Fuente: Gallegos A. y Czitrom S. (1997).**

### 2.7 Datos del NODC de perfiles de temperatura.

Para tener datos más específicos de la zona de estudio solicité información al World Ocean Database 2009 (WOD) del National Oceanographic Data Center (NODC 2013) de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA 2013). Los criterios de selección de datos fueron los siguientes:

1. Instrumento; batitermógrafo desechable (XBT) y CTD.
2. Mediciones a profundidades estándar<sup>5</sup>.
3. Lances de iguales y mayores a 700 metros de profundidad.
4. Localización temporal del Periodo de años desde 1980 a 2010.
5. Localización espacial de los lances comprendida en el polígono entre las latitudes Norte 22.0° a 17.5° y las longitudes -88.5° a -84.5 Oeste. Anexos A.2.1 y A 2.2)

En total fueron 1425 lances de XBT en el polígono mencionado anteriormente, de estos lances solo 292 hicieron mediciones mayores a 700 metros de profundidad. Con el CTD el número de lances fue de 76 de los cuales solo 12 cumplieron con el criterio anterior (Tabla 2.2).

**Tabla 2.2. Lances de XBT y CTD, periodo 1980- 2010.**

Número de lances por instrumento.												
Instrumento	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
<b>XBT</b>	34	29	16	13	73	13	16	12	9	16	50	12
<b>CTD</b>	1	0	2	0	3	1	3	0	0	1	0	2
<b>Total</b>	<b>35</b>	<b>29</b>	<b>18</b>	<b>13</b>	<b>76</b>	<b>14</b>	<b>19</b>	<b>12</b>	<b>9</b>	<b>17</b>	<b>50</b>	<b>14</b>

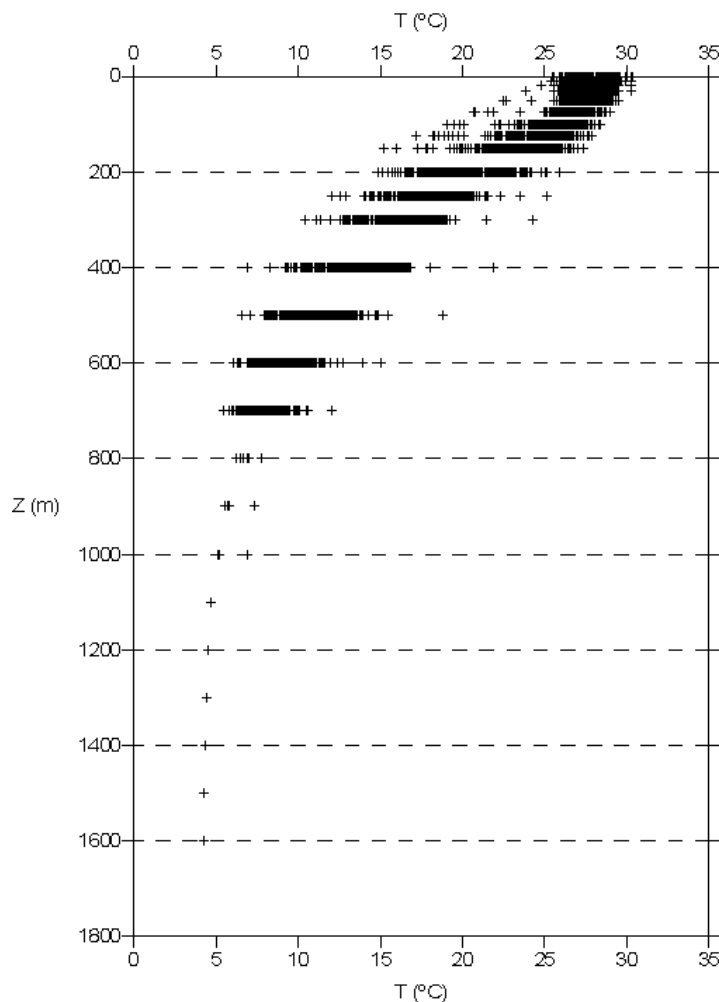
**Fuente: Elaboración propia con datos del NODC 2013.**

El tratamiento de datos apuntó a obtener los estadísticos por cada profundidad estándar, así como medir la confiabilidad de los promedios de temperatura por cada mes. Por otra parte se obtuvieron dos tipos de gráficas; los perfiles de temperatura promedio mensual con respecto a la profundidad y los perfiles de temperatura promedio mensual con respecto al tiempo.

<sup>5</sup> Las profundidades estándar son 0, 10, 20,30, 50, 75, 100, 125, 150, 175, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1100 hasta nivel 40 o 9000 metros de profundidad.

## 2.8 Análisis de datos NODC de temperatura en función de la profundidad.

Después de seleccionar los datos de acuerdo a los criterios antes mencionados se realizó una gráfica de dispersión de temperaturas con respecto a la profundidad (Figura 2.5). Se observó que existe una variación estacional que menciona Gallegos A. y Czitrom S. (1997), pero además cada mes existe un número diferente de lances de XBT y CTD (Tabla 2.3) por lo que algunos meses tienen más datos y existe una desproporción que podría verse afectada la dispersión en los meses con menos lances. Por ejemplo el mes con mayor número de lances es mayo y le sigue noviembre, siendo los meses con menor número de lances septiembre, diciembre y agosto. Por ello se realizó un diseño estadístico de la temperatura a las profundidades estándar que sean representativas del la ZEE de México del Caribe y puesto que el número de datos es limitado se realizaron promedios mensuales en las profundidades de 0 a 700 metros ya que los datos de más de 700 metros para la zona de estudio son muy pocos como se aprecia en la figura 2.5.

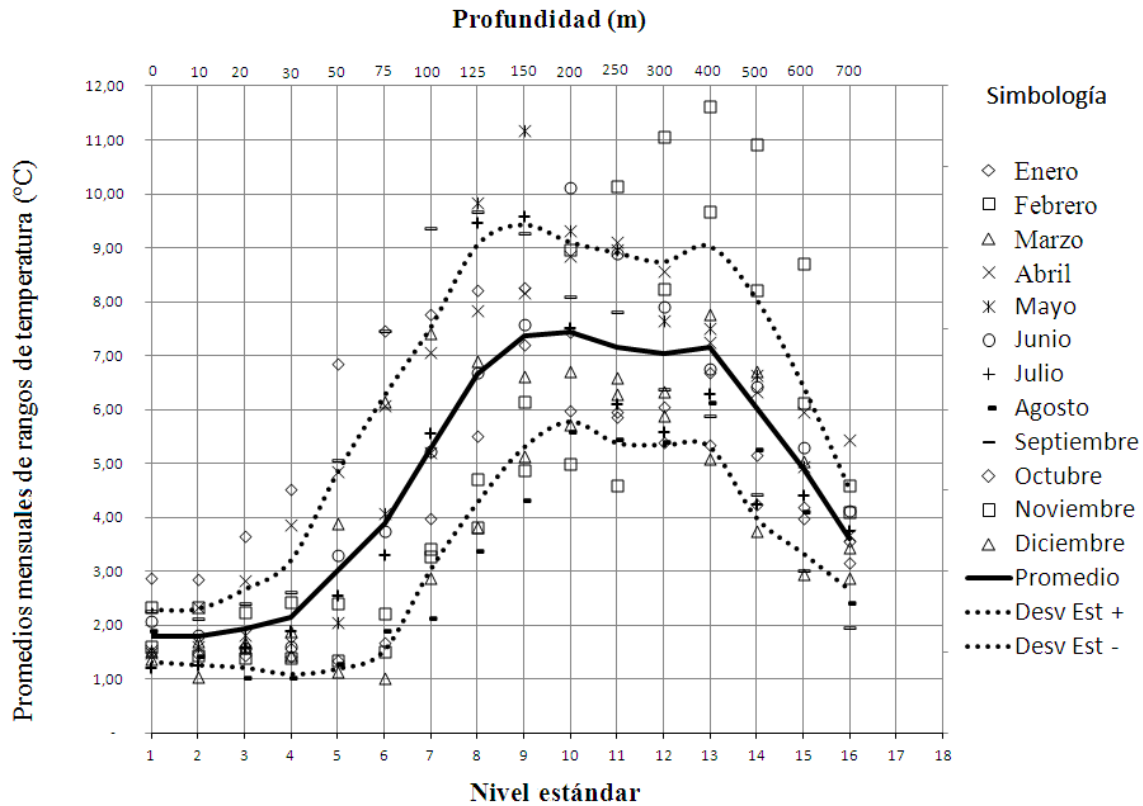


**Figura 2.5. Dispersión de temperaturas con respecto a la profundidad de 292 lances de Batitermógrafo desechable XBT+ 12 lances de CTD. Fuente: Elaboración propia con datos del NODC 2013.**

También se observa (Figura 2.6) que en cada nivel hay un rango diferente de temperaturas, este rango sería el rango anual y el mayor rango anual con respecto a la profundidad está registrado a los 500 metros, con un valor de 15°C. El rango mínimo anual es el de la superficie (Z= 0 m) Con 4.88 °C. La tendencia de los rangos de temperatura con respecto a la profundidad es que a partir de



los 400 metros el rango disminuya hasta ser inferior a 1 °C a partir de los 1000 metros de profundidad. En la figura 2.6 se observa la variación del promedio del rango por cada mes del año y a cada nivel de profundidad estándar siendo muy claro que en la superficie y a partir de los 900 metros de profundidad el promedio del rango es menor que entre 50 a 800 metros.



**Figura 2.6. Promedio y desviación estándar de los rangos de temperatura en cada profundidad.**  
**Fuente: Elaboración propia con datos del NODC 2013.**

Lo anterior repercute en que al no tener la misma cantidad de datos para cada mes la confiabilidad o nivel de confianza, del promedio, es menor y por ello el límite de error aceptado o discrepancia máxima admitida entre el promedio de la muestra y el promedio real que no conocemos debe aumentar. Este valor está relacionado con la desviación estándar que es un valor de dispersión de la muestra, y entre mayor sea indica que se requiere una mayor cantidad de datos para tener valores confiables. La desviación estándar es la medida de la dispersión de los valores respecto a la media ó dicho de otra forma es el valor promedio de las desviaciones con respecto al promedio en este caso del promedio de la temperatura a la profundidad  $Z_i$ .

El factor 1.96 asegura que el valor calculado está dentro de los límites de error en el 95% de los casos o datos presentados  $(1-\alpha)$ , donde  $\alpha$  es el error aleatorio o nivel de significación, esto es, una medida de las posibilidades de fallar en la estimación mediante tal intervalo. El nivel de confianza y la amplitud del intervalo varían conjuntamente, de forma que un intervalo más amplio tendrá más posibilidades de acierto, mientras que para un intervalo más pequeño, que ofrece una estimación más precisa, aumentan sus posibilidades de error. Para las siguientes ecuaciones:  $s$  es la desviación estándar;  $n$  es el número de datos de la muestra;  $\delta$  es la discrepancia o error con respecto a la media,  $\bar{x}$  es el promedio de la magnitud muestra;  $X_i$  es el  $i$ ésimo valor de la magnitud (Méndez Ramírez *et al* 2006).

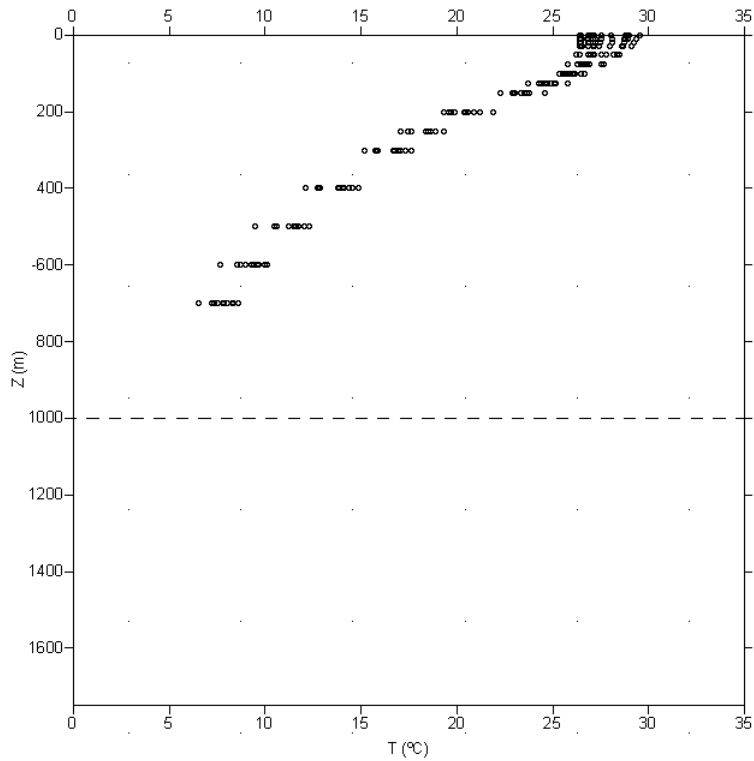
**Tabla 2.3. Estadísticos generales de los datos analizados.**

Z	n° datos	Discrepancia máxima Admitida $\delta$	Tamaño mínimo de muestra n	Promedio	desv std	Rango	Intervalo de confianza
m		%		°C	°C		±°C
0	293	1,2	284	27,46	0,94	4,88	0,11
-10	293	1,2	293	27,43	0,92	4,90	0,10
-20	293	5	62	27,40	0,90	5,52	0,10
-30	293	5	62	27,36	0,90	6,49	0,10
-50	293	5	63	27,15	0,91	7,04	0,10
-75	293	5	68	26,67	0,94	8,33	0,11
-100	293	5	114	25,89	1,22	9,36	0,14
-125	293	5	209	24,77	1,65	10,70	0,19
-150	293	5	290	23,33	1,94	12,13	0,22
-200	293	5	296	20,35	1,96	11,02	0,22
-250	293	5	253	18,15	1,82	13,12	0,21
-300	293	5	271	16,44	1,88	13,84	0,22
-400	293	5	320	13,61	2,04	15,02	0,23
-500	293	5	226	11,14	1,71	12,25	0,20
-600	293	5	145	9,15	1,37	9,00	0,16
-700	293	5	85	7,69	1,05	6,58	0,12

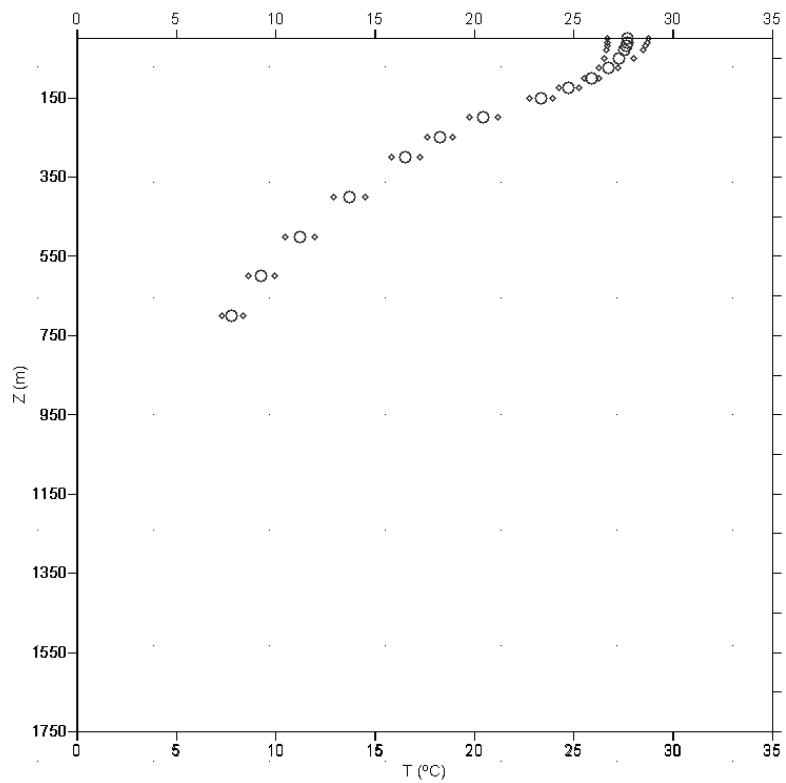
**Fuente: elaboración propia con datos del NODC 2013.**

El Límite de error en la tabla 2.3 se aprecia que la desviación estándar es mayor de los 100 a 500 metros de profundidad, que es donde se aprecian la mayor variabilidad de rangos de temperatura, desviación estándar y tamaños de muestra mínimo mayores. Con el análisis de estos estadísticos se observó que las profundidades de 0 y 10 metros el error esperado con respecto al promedio real es de 1.2% y que los demás promedios de temperatura por las demás profundidades el límite de error esperado es del 5%, equivalente a un error de  $\pm 1^\circ\text{C}$  (Tabla 2.3). Además de la dispersión de la figura 2.5 obtuve los promedios mensuales y el anual (Anexo A. 2.3), ambas gráficas representadas en la figura 2.7 y 2.8.

En la figura 2.7 se presentan los promedios de temperatura para cada profundidad definiendo así que la variabilidad de la temperatura varía a lo largo del año de 2 a 3° C. Esto contrasta con los promedios de los rangos los cuales indican que a los niveles antes mencionados hay intrusiones de agua con cambios fuertes de temperatura, siendo así los niveles más dinámicos. La figura 2.8 es la representación gráfica de el perfil de temperaturas anual y su desviación estándar por cada profundidad. Se aprecia una mayor dispersión en la superficie y una menor al aumentar la profundidad.



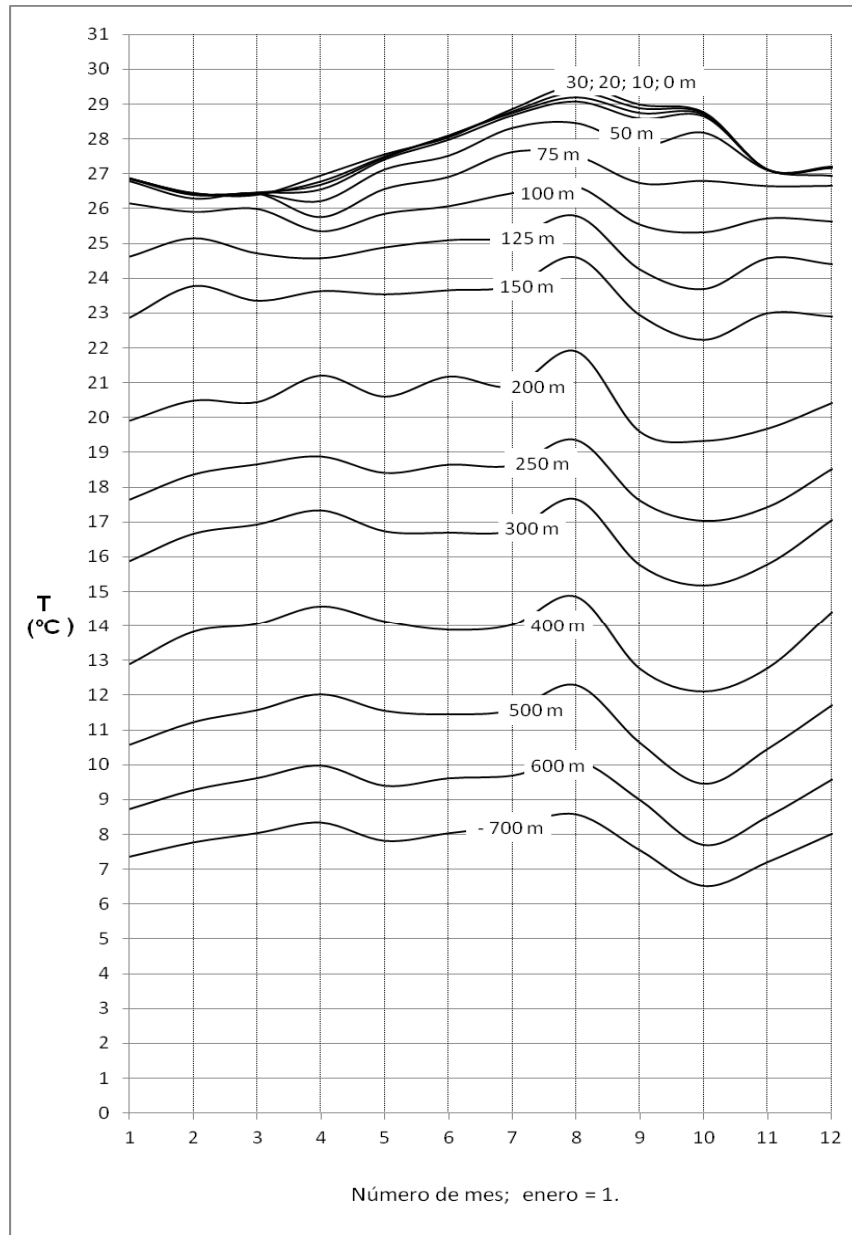
**Figura 2.7. Promedios mensuales de temperaturas con respecto a la profundidad. Fuente: Elaboración propia con datos del NODC 2013.**



**Figura 2.8. Promedio anual de las temperaturas a profundidades estándar (círculos) La desviación estándar se aprecia en rombos. Fuente: Elaboración propia con datos del NODC 2013.**

## 2.9 Variación estacional del gradiente de temperatura, datos NODC.

Con los promedios mensuales de temperatura a las profundidades estándar se realizó la gráfica de la Figura 2.9, esto con la finalidad de tener el gradiente de temperatura para el cálculo del potencial térmico entre la parcela de agua superficial con la de 700 metros, teniendo un mínimo en el mes de marzo (18.38 °C) y un máximo en octubre (22.21 °C), representado en la figura 2.10.



**Figura 2.9 Variación promedio mensual de la temperatura a profundidades estándar, en base a 293 perfiles de temperatura con XBT en el Mar Caribe mexicano de los años 1980 a 2010. Elaboración propia con datos del NODC 2013.**

En el gráfico de la figura 2.10 se aprecia que aun a 700 metros de profundidad la mitad del año se encuentra en el gradiente adecuado para una planta OTEC que es de 20 °C. De acuerdo a las escasas mediciones de más de 700 metros se deduce que a 1000 metros la temperatura rondará los 4 °C, (Figura 2.4) algo que ya plantea Gallegos A. y Czitrom S. (1997).

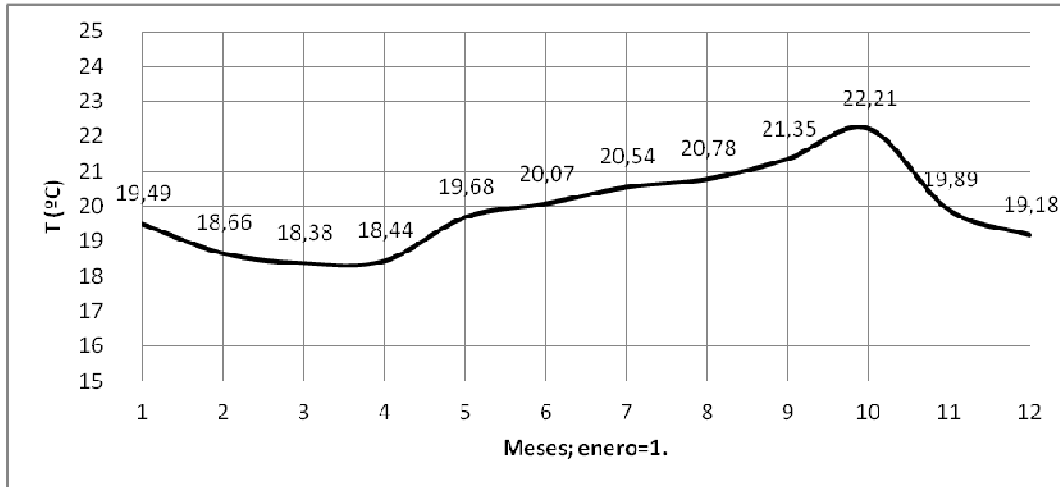


Figura 2.10. Gradientes de temperatura promedio mensual de temperatura entre 10 y 700 metros de profundidad. Fuente: Elaboración propia con datos del NODC 2012.

### 2.10 Estimación del potencial energético del gradiente térmico.

La energía térmica potencial del Caribe de México se estimó utilizando el gradiente térmico obtenido con los datos del NODC. La estimación tuvo dos propósitos:

1. Por una parte el potencial térmico teórico máximo en todo el volumen de estudio.
2. Potencial térmico técnicamente factible.

En el primer caso se utiliza la ecuación de energía interna de acuerdo a Abrahham H. O. *et al* (1989) simplificada (Ec. 18). Donde:  $\rho$  es la densidad relativa;  $C_p$  es el calor específico;  $T$  es la variación de la temperatura y  $dx$ ,  $dy$  y  $dz$  son las dimensiones de un volumen de control y  $C$  es la capacidad térmica (Ec. 19).

$$E_I = \iiint \rho \cdot c_p \cdot T \cdot dx \cdot dy \cdot dz \quad (18)$$

$$C = \rho \cdot c_p \quad (19)$$

Para el segundo caso que es el que persigue el presente trabajo se estima utilizando los parámetros de Avery y Wu (1994) que incluye capacidad instalada de las plantas, el espaciamiento entre plantas para no tener interferencia y una distancia no mayor de la costa de 10km. Para simplificar los cálculos las condiciones para este cálculo son las siguientes:

1. El  $C_p$  se considera constante a  $4000 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ .
2. Para simplificar el cálculo la densidad será  $\rho = 1028 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  el promedio de los dos valores.
3. El cálculo serán promedios mensuales.
4. El transporte superficial y de fondo se desprecia, pues de acuerdo a Ochoa *et al*, (2003), el promedio total de transporte que pasa por el Canal de Yucatán, es de  $22.8 \text{ Sv}$ ,  $\pm 1$  ( $1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1} = 0.023 \text{ km}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ) con una desviación estándar de  $3.3 \text{ Sv}$ , que comparado con el volumen de estudio de aproximadamente  $274000 \text{ km}^3$  representa  $\approx 2000 \text{ km}^3\cdot\text{día}^{-1}$   $0.7\%$  del volumen total.
5. Los rangos que contendrán los volúmenes de intercambio térmico potencial serán de 750, 950 metros de agua de fondo y 0 a 50 metros en la superficie.
6. El primer cálculo de potencial energético se hará para toda el área de estudio.
7. Un segundo cálculo se hará para las zonas que estén a máximo 10 kilómetros de la costa y se eliminarán áreas potenciales si estas son parques marinos o áreas naturales protegidas.

### 2.10.1 Potencial teórico máximo.

Este potencial está dado bajo la condición de cálculo al mezclar teóricamente las masas de agua AM y AIA, utilizando el gradiente de temperatura y transferir calor con la temperatura alta de la superficie del mar y la temperatura baja de la masa de agua de las profundidades (Tabla 2.4). Utilizando la información de Gallegos A. y Czitrom S. (1997) en la tabla 2.6 se describen los cálculos efectuados para estimar la temperatura de mezcla de las diferentes masas de agua del Caribe. Puesto que se tienen sus temperaturas promedio, su volumen relativo y las propiedades termofísicas se efectuó en base a los principios termodinámicos:

**Tabla 2.4. Combinaciones de mezcla de las masas de agua del Caribe.**

Matriz de pares de mezclas de masas de agua.					
Mezcla	AM	ASSAN	ACAN	AIA	APAN
AM	$m_1$	$m_1+m_2$	$m_1+m_3$	$m_1+m_4$	$m_1+m_5$
ASSAN	$m_2+m_1$	$m_2$	$m_2+m_3$	$m_2+m_4$	$m_2+m_5$
ACAN	$m_3+m_1$	$m_3+m_2$	$m_3$	$m_3+m_4$	$m_3+m_5$
AIA	$m_4+m_1$	$m_4+m_2$	$m_4+m_3$	$m_4$	$m_4+m_5$
APAN	$m_5+m_1$	$m_5+m_2$	$m_5+m_3$	$m_5+m_4$	$m_5$

$$Q_1 = -Q_2 \quad (20)$$

$$Q_1 = m_1 \cdot c_p \cdot (T_{f_{1-2}} - T_1) \quad (21)$$

$$Q_2 = m_2 \cdot c_p \cdot (T_{f_{1-2}} - T_2) \quad (22)$$

$$m_1 \cdot c_p \cdot (T_{f_{1-2}} - T_1) = -m_2 \cdot c_p \cdot (T_{f_{1-2}} - T_2) \quad (23)$$

Donde  $T_2 > T_{n-2}$  y  $T_1 < T_{n-2}$  y  $T_{n-2}$  es la temperatura final al mezclarse ambas masas de agua. La transferencia de calor neto ( $Q$ ) cedido por la masa  $m_2$  de agua de mayor temperatura  $T$  va a ser la misma cantidad de calor ganado por la otra masa  $m_1$ , al final en el equilibrio térmico quedará la mezcla ( $m_1+m_2$ ) a una temperatura final de mezcla  $T_{f_{1-2}}$ . Al resolver el sistema de ecuaciones para estimar la temperatura final de mezcla (Ec. 20, a 23) y la transferencia de calor  $Q_{1-2}$  y  $Q_{2-1}$ , (Ec. 24,) queda de la siguiente forma:

$$T_{f_{1-2}} = \frac{m_1 \cdot T_1 + m_2 \cdot T_2}{m_1 + m_2} \quad (24)$$

$$Q_{1-2} = m_1 \cdot c_p (T_{f_{1-2}} - T_1) \quad (25)$$

$$Q_{2-1} = m_2 \cdot c_p (T_{f_{1-2}} - T_2) \quad (26)$$

Para obtener más información de la termodinámica de las masas de agua se replicó la misma operación para las diferentes combinaciones de mezclas de masas de agua obteniéndose las temperaturas finales mostradas en la matriz de la tabla 2.5. La mezcla de masas de agua de importancia para OTEC son AIA y AM, representadas en amarillo (Tabla 2.4). En la tabla 2.6 utilizando el procedimiento potencial teórico máximo se obtuvo la transferencia de calor que acepta o cede cada masa de agua de acuerdo al gradiente de temperatura entre ellas, resultando que para la mezcla de interés OTEC que es el agua de superficie (AM) y la AIA se intercambiarían 625EJ y su temperatura final sería de 13.3 °C. A esta temperatura la densidad de la mezcla de acuerdo al algoritmo para la obtención de la densidad relativa del agua (UNESCO/SCOR/ICES/IAPSO 1983) sería de 1025.957 kg·m<sup>-3</sup>, formando una nueva masa de

agua que pudiera hundirse hasta 360 metros, si esta se esparciera en superficie, por lo cual siempre se manda de retorno a una profundidad idónea donde no afecte los procesos biológicos que de acuerdo a Vega Luis .A. (1999) es por debajo de la zona fótica.

### 2.10.2 Potencial teórico máximo de la mezcla de masas de agua.

En el proceso de transferencia de calor en donde existen más de dos masas del mismo material pero a diferente temperatura y considerando despreciable el cambio de calor específico debido a la temperatura la siguiente expresión tiene validez (Ec. 27 y 28).

$$T_{f_{1-n}} = \frac{m_1 \cdot T_1 + m_2 \cdot T_2 + \dots + m_n \cdot T_n}{m_1 + m_2 + \dots + m_n} \quad (27)$$

$$Q_n = m_n \cdot c_p (T_{f_{1-n}} - T_n) \quad (28)$$

Para el caso de las masas de agua del Caribe el Potencial teórico máximo disponible de la mezcla de;  $(m_1 + m_2 + m_3 + m_4 + m_5)$ . La combinación total de las mezclas de agua también proporcionó la temperatura final en un mar mezclado completamente, utilizando la misma Ley Cero pero para las cinco masas de agua, quedando como sigue (Ec. 29):

$$T_{f_{mt}} = \frac{m_1 \cdot T_1 + m_2 \cdot T_2 + m_3 \cdot T_3 + m_4 \cdot T_4 + m_5 \cdot T_5}{m_1 + m_2 + m_3 + m_4 + m_5} \quad (29)$$

De acuerdo a los resultados de resolver la ecuación 29, La temperatura teórica de la mezcla de las masas de agua del Caribe de México llegaría a los 6.06 °C. Y la transferencia neta de calor sería del orden de 2846 EJ transferida de las masas de agua AM, ASSAN Y ACAN, y en la tabla 2.8 que resume los resultados del grupo de ecuaciones 30 a 34:

$$Q_1 = m_1 \cdot c_p [T_{f_{mt}} - T_1] \quad (30)$$

$$Q_2 = m_2 \cdot c_p [T_{f_{mt}} - T_2] \quad (31)$$

$$Q_3 = m_3 \cdot c_p [T_{f_{mt}} - T_3] \quad (32)$$

$$Q_4 = m_4 \cdot c_p [T_{f_{mt}} - T_4] \quad (33)$$

$$Q_5 = m_5 \cdot c_p [T_{f_{mt}} - T_5] \quad (34)$$

**Tabla 2.5. Cálculo del Potencial teórico máximo disponible.**

<b>Temperatura final teórica de mezcla de dos masas de agua (T<sub>f</sub>). En °C.</b>																
Masa de agua		Z	T	T <sub>prom.</sub>	Volumen relativo	Volumen total	Volumen parcial	Densidad	Masa	Cp	Temperatura final teórica de mezcla entre dos masas T <sub>f</sub>					
		m	°C	°C	%	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	kg·m <sup>-3</sup>	kg	J·(kg°C) <sup>-1</sup>	°C	AM	ASSAN	ACAN	AIA	APAN
<b>AM</b>	m <sub>1</sub>	0-50	25.9-28.5	27,2	4	2,74E+14	1,096E+13	1023,8	1,122E+16	4000	<b>AM</b>	27,20	24,31	16,93	13,28	4,02
<b>ASSAN</b>	m <sub>2</sub>	50-250	21-23	22	5	2,74E+14	1,37E+13	1023,8	1,403E+16	4000	<b>ASSAN</b>	24,31	22,00	16,00	12,18	3,98
<b>ACAN</b>	m <sub>3</sub>	250-750	7 a 20	13,5	12	2,74E+14	3,288E+13	1023,8	3,366E+16	4000	<b>ACAN</b>	16,93	16,00	13,50	10,33	4,27
<b>AIA</b>	m <sub>4</sub>	750-950	2 a 6	4,00	6	2,74E+14	1,644E+13	1023,8	1,683E+16	4000	<b>AIA</b>	13,28	12,18	10,33	4,00	2,84
<b>APAN</b>	m <sub>5</sub>	950-fondo	1.5 a 4	2,75	73	2,74E+14	2,0002E+14	1023,8	2,048E+17	4000	<b>APAN</b>	4,02	3,98	4,27	2,84	2,75

**Tabla 2.6. Cálculos teóricos de la transferencia de calor entre las diferentes masas de agua.**

Gradiente de temperatura entre las masas de agua.							Transferencia de calor entre pares de masas de agua mezcladas					
T <sub>f</sub> - T <sub>i</sub> = ΔT (°C)							Cambio en la energía interna teórica total entre dos masas de agua; (+) ganancia; (-) pérdida de Q (EJ).					
°C	AM	ASSAN	ACAN	AIA	APAN	ΣΔT (°C)	EJ	AM	ASSAN	ACAN	AIA	APAN
<b>AM</b>	0,0	-2,9	-10,3	-13,9	-23,2	-50,3	<b>AM</b>	0	-130	-461	-625	-1040
<b>ASSAN</b>	2,3	0,0	-6,0	-9,8	-18,0	-31,5	<b>ASSAN</b>	130	0	-337	-551	-1011
<b>ACAN</b>	3,4	2,5	0,0	-3,2	-9,2	-6,5	<b>ACAN</b>	461	337	0	-426	-1243
<b>AIA</b>	9,3	8,2	6,3	0,0	-1,2	22,6	<b>AIA</b>	625	551	426	0	-78
<b>APAN</b>	1,3	1,2	1,5	0,1	0,0	4,1	<b>APAN</b>	1040	1011	1243	78	0
<b>ΣΔT (°C)</b>	16,3	9,0	-8,4	-26,8	-51,6	0,0	<b>ΣQ</b>	2256	1769	872	-1524	0



**Tabla 2.8. Balance general de transferencia de calor**

Transferencia total de masas de agua												
Masa de agua		z	T	$T_{prom. = T_i}$	Volumen relativo	Q	$T_R$	$T_i$	$T_R - T_i = \Delta T$	$\Sigma Q$	Transporte de calor	
		m	°C	°C	%	EJ	(°C)	(°C)	(°C)	EJ	%	
AM	$m_1$	0-50	25.9-28.5	27.2	4	$Q_1$	6.06	27.20	-21.14	-949	0	-33.3%
ASSAN	$m_2$	50-250	21-23	22	5	$Q_2$	6.06	22.00	-15.94	-895		-31.4%
ACAN	$m_3$	250-750	7 a 20	13.5	12	$Q_3$	6.06	13.50	-7.44	-1002		-35.2%
AIA	$m_4$	750-950	2 a 6	4.00	6	$Q_4$	6.06	4.00	2.06	138		4.9%
APAN	$m_5$	950-fondo	1.5 a 4	2.75	73	$Q_5$	6.06	2.75	3.31	2708		95.1%

### 2.10.3 Potencial teórico bruto disponible.

Este potencial considera los parámetros de Vega L.A. (2010) para el caso particular de una Planta OTEC de 1 MWe que utiliza  $2\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$  de agua de fondo y  $4\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$  de agua superficial a 5 y 25 °C respectivamente y con una eficiencia total del sistema OTEC del 4%, de esta forma requerimos una parte en volumen de agua fría y dos de agua superficial (AM), la cual es la limitante ya que su volumen relativo es del 4% comparado al 6% del agua fría (AIA). Esto indica que si se utilizara toda AM ( $1,1 \times 10^{13} \text{ m}^3$ ) se utilizaría 1/3 de AIA ( $1,6 \times 10^{13} \text{ m}^3$ ). Con esta mezcla la expresión tiene validez solo con el parámetro de Vega L.A. (2010) Se desprende de la ecuación 35 un caso hipotético sin restricciones técnicas ni financieras.

$$MWe = \frac{V_{AM} (m^3)}{4 \frac{m^3}{MWe}} = \frac{1.1 \times 10^{13} (m^3)}{4 \left( \frac{m^3}{MWe} \right)} = 2.75 \times 10^{12} \cdot MWe \quad (35)$$

$$\text{Potencia} \cdot \text{térmica} = \frac{MWe}{\eta} = \frac{2.75 \times 10^{12} \cdot MWe}{0.04} = 68.75 \times 10^{12} \cdot MWe \quad (36)$$

Si  $2.75 \times 10^{12} \text{ W}_e$  es el 4 %, entonces la energía obtenida de la masa AM es del orden de 68.75 EWt, (Ec. 36) donde el subíndice t es térmico que AM estaría aportando a la planta OTEC hipotética. Éste índice es un margen hipotético con respecto a las limitantes técnicas de la tecnología OTEC, tanto por su eficiencia de la conversión termoeléctrica ( $\eta$ ), así como por el recurso de agua superficial, como de fondo al gradiente térmico ( $\Delta T$ ) de 20°C.

### 2.10.4 Potencial técnicamente disponible.

El área OTEC es el área señalada en la figura 2.12 con las isobatas rosadas que se encuentran dentro de un área aproximada<sup>6</sup> de 10000 km<sup>2</sup> y que representa el 10% del área total de la ZEE seleccionada. Este potencial contempla que las zonas de extracción de agua profunda no excedan los 10 km de distancia de la costa y que para las costas del Caribe de México son cinco los lugares potenciales para utilizar OTEC (Figura 2.12, círculos en amarillo). Un parámetro general nos enuncia que una planta OTEC de 100 MWe ocupa un área circular de 10 km de diámetro ( $\approx 80 \text{ km}^2$  por planta de 100MWe) sin embargo la densidad de plantas crea una interferencia por lo que se utiliza otro parámetro que menciona que con un gradiente de 20 °C se producirían 200 kW·km<sup>-2</sup> de océano, esto implica también 2000 MWe de capacidad instalada para el área disponible. (Avery y Wu 1994).

Esta cantidad de energía resulta técnicamente suficiente para soportar plantas OTEC de 100 MW ó 500 MWe de capacidad instalada totales para el Caribe de México, sin considerar aun cuestiones ambientales, económicas y financieras. Una variable muy importante para tener varias plantas OTEC es la dirección e intensidad de las corrientes marinas, ya que las plantas OTEC de preferencia deberían tener una orientación ortogonal a la corriente dominante requiriendo de un espaciamiento mínimo lateral de 4,8km para plantas de 100 MWe y 36km para plantas de 400 MW. En el caso del Caribe Mexicano esto no aplicaría ya que los lugares potenciales de OTEC no quedan ortogonales sino en línea con la corriente principal que es la corriente de Yucatán, situación que permitiría la interferencia entre plantas OTEC.

<sup>6</sup> Contador de áreas del Mapa Digital de México, INEGI 2011

## 2.11 Resultados.

### 2.11.1 Potencial Energético del Mar Caribe de México.

La potencia técnicamente disponible es de 2000 MWe para lugares no mayores a 10 kilómetros de la costa. El porcentaje que se podría extraer representa un porcentaje muy bajo del potencial teórico (Tabla 2.9).

Tabla 2.9 Tabla de resultados Potencial Energético del Mar Caribe de México.

Potencial	Unidades	
Potencial teórico máximo disponible de la mezcla de; ( $m_1 + m_2 + m_3 + m_4 + m_5$ )	EJ	2846
Potencial teórico máximo disponible de la mezcla de AM + ASSAN; ( $m_1 + m_2$ ).	EJ	625
Potencial teórico bruto disponible.	PJ	68.75
Potencial técnicamente disponible.	MWe	2000
Producción anual técnicamente disponible	GWh-año	17500

### 2.11.2 Lugares potenciales OTEC a distancia menores a 10km.

Con la Carta Batimétrica Internacional del Mar Caribe y Golfo de México (IBCCA), Hoja 1-06 se localizaron cinco áreas (Figura 2.11) que cumplen con dos de los criterios más importantes de la tecnología OTEC, que son; Gradiente de temperatura de  $< 20^\circ\text{C}$  y que este potencial se encuentre a  $\geq 10$  kilómetros de distancia de la costa. Las áreas OTEC presentados en la Figura 3 Cozumel ya presentados por Aviña Jiménez M. H. (2007) comprenden un área mostrada en la figura 2.13 donde por medio de SIG y la carta batimétrica medí la distancia de la costa a las isobatas de 700 m.

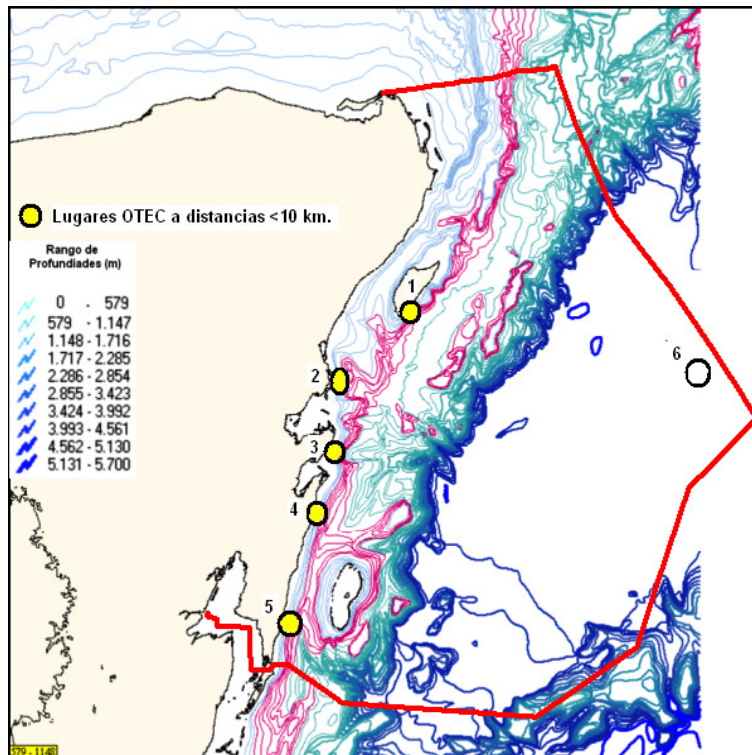


Figura 2.11. Batimetría de la ZEE y Zonas con potencial OTEC, las isobatas rosa en donde la profundidad está en el rango de 700 a 1000 metros. Los círculos amarillos representan los lugares OTEC con potencial. Isla de Cozumel, Punta Allen, Tulum, Sian Ka'an, Xcalac, Mahahual y banco Chinchorro.

### Zonas con potencial OTEC Isla de Cozumel.

La isobata de 700 metros de profundidad se encuentra a una distancia de 4 kilómetros de distancia y 6.7 km a la de 1000 metros en la costa sureste y de la costa a la ciudad de Cozumel a 30 km (Figura 2.12).

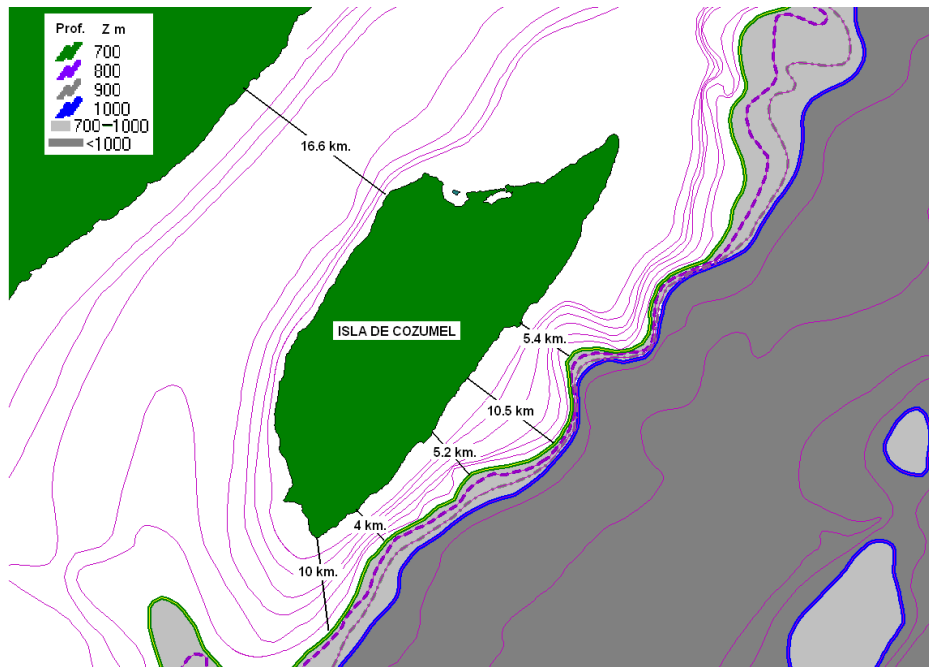


Figura 2.12. Zonas con potencial OTEC Isla de Cozumel.

### Zonas con potencial OTEC Punta Allen y Tulúm.

Punta Allen es un poblado que carece servicios de electricidad, agua potable y alcantarillado. Se encuentra a 50 km de Tulúm. El punto OTEC de interés se encuentra a 40 km desde la costa hasta Tulúm. Las isobatas de 700 metros y 800 son las más cercanas pero al límite de los 10 km (Figura 2.13).

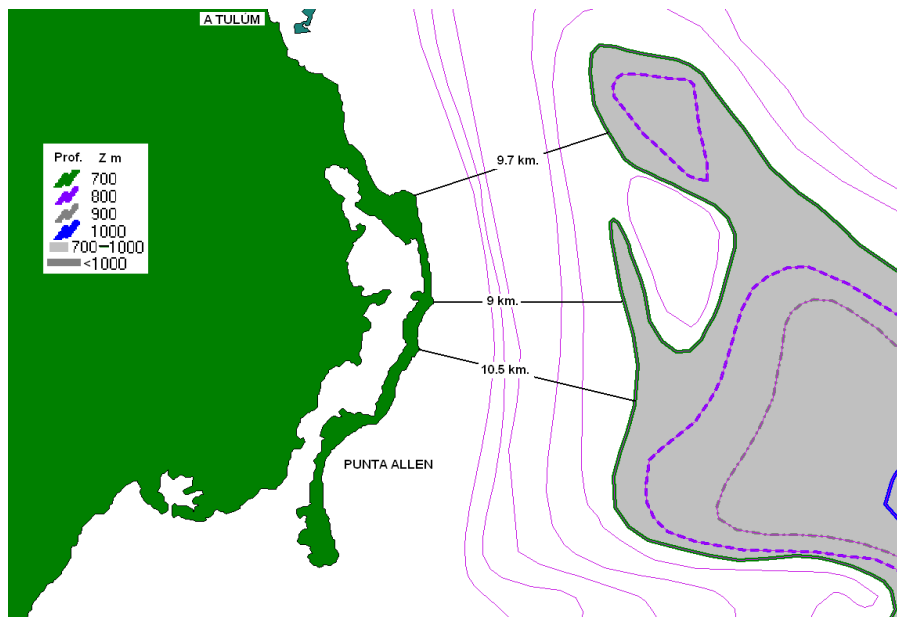


Figura 2.13. Zonas con potencial OTEC Punta Allen y Tulúm.

### Zonas con potencial OTEC Sian Ka'an.

Es una Reserva de la Biósfera, sin embargo se encuentra en un lugar adecuado para OTEC, para desalinizar agua como los sistemas de la India. El poblado más próximo es Felipe Carrillo Puerto a 65 km en línea recta (Figura 2.14).

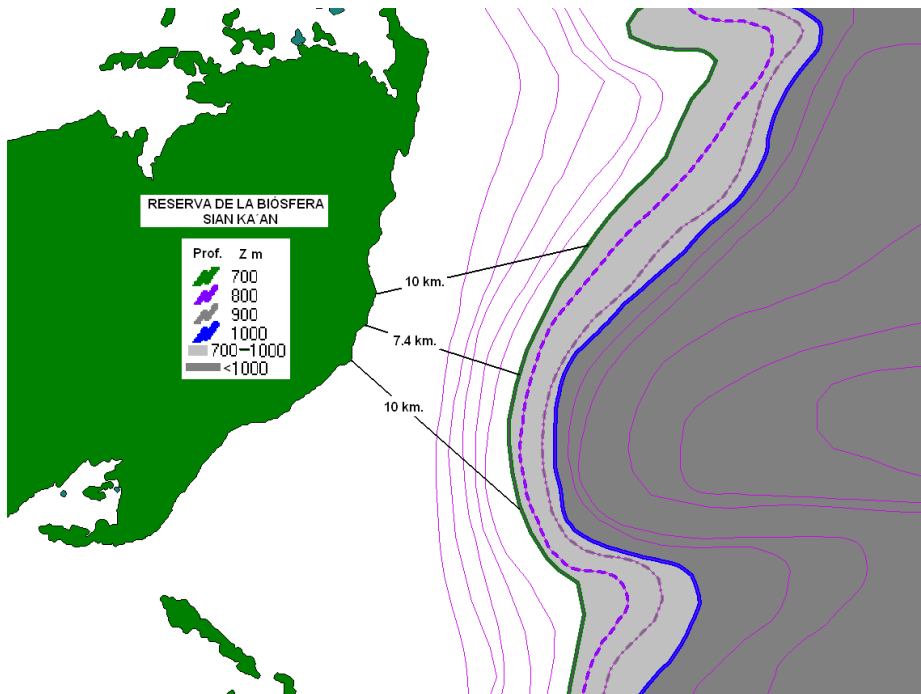


Figura 2.14. Zonas con potencial OTEC Sian Ka'an Reserva de la biósfera.

### Zonas con potencial OTEC Xcalac, Mahahual y banco Chinchorro.

Esta zona es una amplia franja que costea los mejores lugares OTEC, desde Xcalac hasta Mahahual con distancia a la costa desde 6.7 a 14.4 km. La ciudad más cercana es Chetumal a 55 km en línea recta (Figura 2.15).

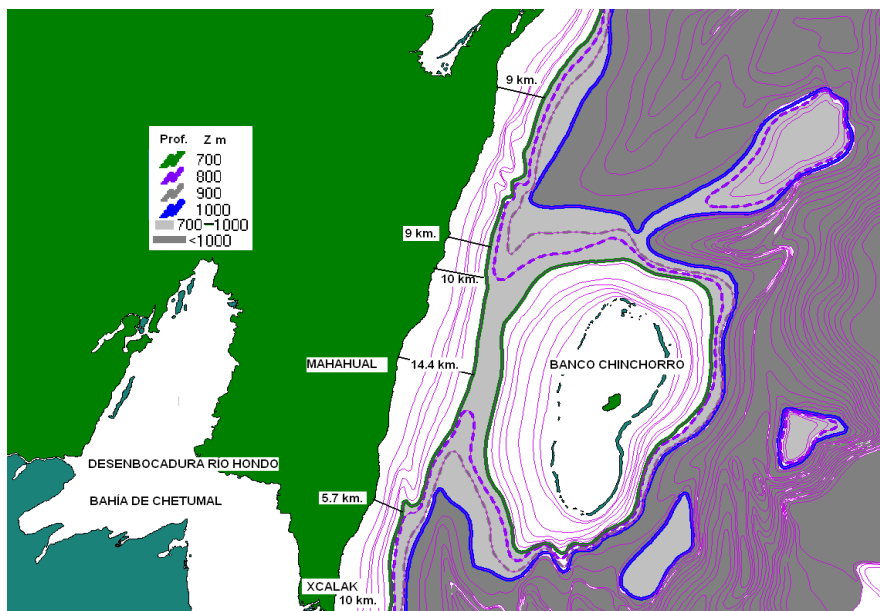


Figura 2.15. Zonas con potencial OTEC Xcalac, Mahahual y Banco Chinchorro.

### 3. POTENCIAL ENERGÉTICO DEL GRADIENTE SALINO.

#### 3.1 Antecedentes.

En el Caribe Mexicano la interface entre cuerpos superficiales de agua dulce y el mar se da principalmente en la bahía de Chetumal (Figura 3.1). Quintana Roo cuenta con dos ríos, el Hondo (RH) y el Escondido<sup>7</sup>, éstos se encuentran al sur del estado en la ciudad de Chetumal, siendo el más importante el RH debido a que es la línea divisoria entre México y los países de Guatemala y Belice. El RH tiene una longitud de 115 Km., más 45 Km. del Río Azul, con un escurrimiento promedio anual de 1988.58 millones de metros cúbicos. La cuenca del RH tiene una superficie en México, Guatemala y Belice de 7614 (56.5%), 2978 (22%), y 2873 (21.5%) km<sup>2</sup> respectivamente, con un total de 13465 km<sup>2</sup>. (Peña F. S. y Sánchez V.A. 2004). Al respecto García García A. y Kauffer Michel E. F. (2001) contabilizan 14859 km<sup>2</sup> para la cuenca del RH, con 4866 (32.75 %), 5031(33.86 %) y 4962 (34.39 %) kilómetros cuadrados respectivamente para México, Guatemala y Belice. Mencionan también una longitud para el RH de 184 km, de los cuales 168 sirven de frontera entre México y Belice, los restantes para la frontera con Guatemala. Benítez Jorge A. (2010) menciona un valor de área de 17690 km<sup>2</sup>, con 7535.94 km<sup>2</sup> para México (42.6%), 5147.79 km<sup>2</sup> Belice (29.1%) y 4988.58 km<sup>2</sup> Guatemala (28.2%). El RH es la mayor corriente superficial permanente de su región y está alimentado por tributarios como el Agua Dulce, el Arroyo Ucum (Río Escondido) y pequeños cauces provenientes de la Laguna de Bacalar, laguna Encantada y Milagros (SIATL-INEGI 2010).



**Figura 3.1. Bahía de Chetumal y Río Hondo al fondo. Fuente: Dominio público.**

<sup>7</sup> Reportado como Arroyo Ucum en el SIATL 2010.

Con respecto a la descarga de agua dulce del RH a la Bahía de Chetumal, T. Legorreta Álvarez (1999) menciona descargas a la Bahía de Chetumal de  $220 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  en tiempo de lluvia y  $20 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  en tiempo de secas. De acuerdo a Benítez Jorge A. (2010) la descarga promedio anual es de 1500 millones de  $\text{m}^3$ . Carrillo L. *Et al* (2009) reporta también el valor de descarga líquida anual de 1500 millones de  $\text{m}^3$ , menciona también caudales en tiempo de secas de 9 a  $24 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , y  $78 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  en tiempo de lluvias (T. Legorreta Álvarez citado por Carrillo Laura).

La Limnología básica del RH, apunta a aguas con flujo lento con desembocadura en la Bahía de Chetumal (CONABIO 2011). La bahía tiene característica estuarina con un rango de salinidades de 10 a 18 ups que decrecen desde la boca hacia la cabeza de la bahía. La batimetría de la bahía es relativamente somera (4 m en promedio), con un canal central que presenta una profundidad promedio de 6 a 8m con dirección SO. (Sánchez A. *et al* 2008). Carrillo L. (2009) Menciona que la salinidad varía estacionalmente con gradientes horizontales desde la desembocadura del RH, con: 18 -22 ups en la estación seca que es de marzo a mayo; 10-15 ups en la estación de lluvias que es de junio a octubre y en la estación de nortes de octubre a febrero con 13 a 16 ups. Reporta también un área de la Bahía de  $2560 \text{ km}^2$ , con mareas semidiurnas mixtas con rangos de 10 a 20 centímetros. El clima de la región es cálido subhúmedo con lluvias en verano, temperatura promedio anual 24-28 °C. Con una precipitación total anual 1200-1500 mm. Peña F. S. y Sánchez V.A. (2004) determinan 1272.9 mm de lluvia media anual. El tipo de terreno que predomina en la zona sur del estado es plano en el norte y con elevaciones de hasta 240 metros sobre el nivel del mar en la zona sur, el tipo de suelo es permeable para retener el agua y en su mayoría trasmina formando ríos subterráneos y cenotes (Uh Us Freddy, 2010).

La bibliografía no menciona una metodología de evaluación del potencial energético del gradiente salino, pero de acuerdo a Skilhagen S.E. *et al* (2010) se toma como base que un flujo de agua dulce de  $1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  de agua generaría 1MW eléctrico bruto y de acuerdo al mismo autor, las membranas comerciales utilizadas en ósmosis producen hasta ahora de 4 a  $6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , lo que equivaldría a utilizar entre 167 mil y 250 mil  $\text{m}^2$  de membrana para generar 1MW. Es decir en promedio un metro cuadrado de membrana genera 5W. Guy Z. *Et al* (2011) mencionan que para una planta de energía muy grande (11,2 GW, estimación para el Río Mississippi), los costes (en dólares) resultantes serían de \$20,000 /kW instalado y \$0.2 / kWh, esto suponiendo una densidad de potencia de  $3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  en las membranas. Para el mismo lugar pero con el uso de un valor proyectado de  $7,7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  el costo sería  $12000 \text{ \$} \cdot \text{kW}^{-1}$  y el coste de la electricidad  $0,06 \text{ \$} \cdot \text{kWh}^{-1}$ . Siendo de esta forma que la variable clave del costo de amortización de estas plantas la densidad de potencia y el costo por metro cuadrado de membrana. Estas membranas se encuentran comercialmente disponibles a precios en dólares USA que oscilan entre los  $100\text{-}200 \cdot \text{m}^{-2}$ .

### 3.2 Procedimiento.

Con fundamento a la ecuación de Van't Hoff, revisada por Skilhagen S.E. *et al* (2008), la información necesaria para efectuar una evaluación del potencial energético del gradiente salino, se presenta en la Tabla 3.1:

**Tabla 3.1. Variables necesarias para el cálculo del potencial de gradiente salino.**

Nº	Variable	Unidades
1	Caudal o flujo volumétrico promedio mensual del agua de río	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
2	Velocidad promedio mensual del flujo	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
3	La temperatura promedio mensual en la desembocadura del río	°C
4	Concentración promedio mensual de NaCl del agua de mar en la desembocadura	$\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ o ups
5	Dirección del flujo del río.	Flujo- reflujo

Para las variables flujo volumétrico<sup>8</sup> y velocidad del flujo no se tiene aun un inventario de descargas, o estudios hidrodinámicos del río, tampoco aparece información en el *extended data set of river discharges for validation of general circulation models* en el cual aparecen ríos mexicanos pero no el RH de Quintana Roo (Perry, G. D. *et al* 1996).

La institución que regula y hace mediciones en el RH es la Sección Mexicana de las Comisiones Internacionales de Límites y Aguas Internacionales, entre México y Guatemala, entre México y Belice, pero los datos de caudal promedio mensual, constante del valor de la envolvente de Creager, velocidad promedio de la corriente del río, temperatura superficial del agua del RH son inexistentes, de acuerdo al oficio expedido CGB-312/12 con fecha 17 de mayo de 2012 enmarcado en la solicitud con folio 00005000072312. De acuerdo a la falta de información de primera mano trabajé con los datos que me proporcionaron diversos trabajos mencionados a continuación:

- El SIATL Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas, INEGI 2010. En este Sistema de Información Geográfica permite hacer cálculos de área de cuenca, flujos volumétricos, y las variables más importantes que afectan los escurrimientos superficiales como el tiempo de concentración y la intensidad promedio de la lluvia, asignando los valores conocidos en tablas de periodo de retorno, coeficiente de escurrimiento. Utiliza el método racional y la ecuación de Cadena Cepeda. Para la intensidad de lluvia.
- Uh Us Freddy (2010). Trabajo de tesis de maestría sobre la evaluación de cauces a través de parámetros fluviales, que contiene un estudio morfológico en nueve secciones que abarcan 10487 metros desde la desembocadura (Figura 3.2). También se reporta información sobre la velocidad de la corriente medida en campo que fue de  $20 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ , hecha el 14 de noviembre de 2009 a tres cuartos de kilómetro de la desembocadura del río.
- El artículo de Peña Fierro Sergio y Sánchez Vega Alejandro D. (2004), Disponibilidad de agua superficial en la cuenca transfronteriza del RH-subcuenca Río Escondido, Quintana Roo.

La bibliografía donde encontré métodos de cálculo o estimación de caudales y velocidades del flujo, para complementar o para validar la información arriba mencionada es:

- Ecuación de Strahler, ecuación de Davis y correlación de Einsele, en el *Limnological analyses* de Robert G. Wetzel, Gene E. Likens (2000).
- Métodos Creager y Racional, descritos en el Manual de Ingeniería de Ríos, capítulos 3 y 11, Estudio Hidrológico para Obras de Protección y Morfología de Ríos respectivamente, del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (sin año).

Paralelamente utilicé información disponible en: Sistema de Consulta de las Cuencas Hidrográficas de México; el Portal del Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad; el trabajo las cuencas hidrográficas de México: Diagnóstico y priorización; de trabajos diversos sobre la Bahía de Chetumal. La institución que ha emprendido estudios desde el año 2011 es la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), delegación Quintana Roo, en coordinación con el Gobierno del Estado, con miras a caracterización del agua y hacer un inventario de descargas (La revista Peninsular 2010).

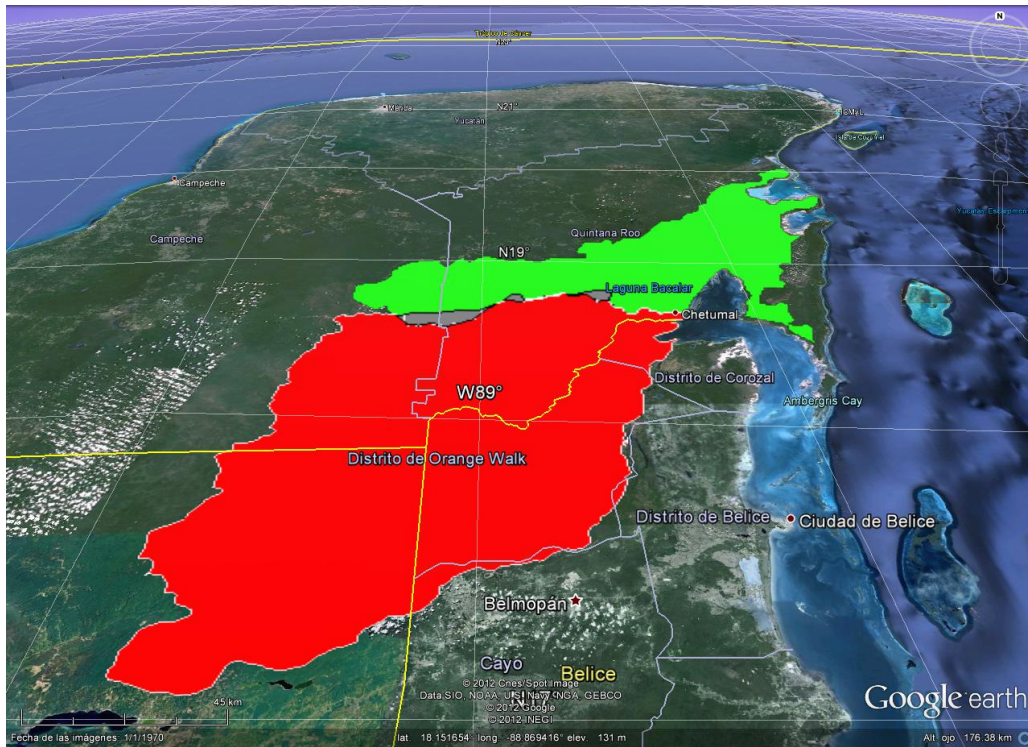
---

<sup>8</sup> Nota: Se utiliza indistintamente el término caudal o flujo volumétrico, ambos en metros cúbicos por segundo  $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ . Se utilizará también escurrimiento el cual se maneja principalmente en periodos de tiempo largos, léase escurrimiento promedio anual de la cuenca, equivalente ambos a  $1000000\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1} = 1\times 10^6\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ .



### 3.3 Esguerrimiento superficial al RH de sus subcuencas.

En el Caribe Mexicano el aporte natural superficial de agua dulce está regido por dos regiones hidrográficas Yucatán norte y Yucatán este, ambas perteneciente a la Región Hidrológica Administrativa XII (CONAGUA 2011). La región hidrográfica (Figura 3.2) que es la que contienen al RH, está conformada por las cuencas de RH, de Bacalar (Instituto de Nacional de Ecología 2011).



**Figura 3.2.** Cuenca tripartita del RH en oscuro y cuenca de Bacalar en claro. Fuente: Google earth (2012) con superposición de imagen tomada de Benítez Jorge A. (2010) y SIATL-INEGI 2010.

Los aportes de agua de estas dos cuencas se dividen en subcuencas (Figura 3.3 y 3.4) que entre las más importantes por su caudal son la del Arroyo Ucum, la del Río Agua Dulce, y la de Bacalar. De acuerdo a Peña F. S. y Sánchez V.A. (2004) el RH nace en Guatemala con el nombre de Arroyo Azul y a partir de la confluencia de este con el río Bravo proveniente de Belice, recibe el nombre de RH. Tanto el Arroyo Azul como el RH constituyen el límite internacional entre México y Belice en aproximadamente 160 kilómetros. la Subcuenca del Arroyo Ucum o Río Escondido, nace al sureste del estado mexicano de Campeche, en los límites con Quintana Roo y ya dentro de este último, sigue una trayectoria noreste y después de un recorrido de aproximadamente 173 kilómetros, confluye por margen izquierda al RH, a la altura del poblado Juan Sarabia.

### 3.4 Cálculo del flujo volumétrico por estimación de diferentes métodos.

El primer procedimiento para estimar el caudal del RH es utilizando la información de las fuentes bibliográficas de los antecedentes, posteriormente y De acuerdo a Robert G. Wetzel, Gene E. Likens (2000) existen varios modelos simplificados para estimar el flujo volumétrico de un río a partir de correlaciones estadísticas como las siguientes:

- del diámetro aproximado del sedimento con el rango de velocidad del cauce (Tabla 3.3)
- Número de tributarios, promedio de longitud, flujo volumétrico como función del área de cuenca. (Tabla 3.4)
- flujo volumétrico como función del área de cuenca (Figura 3.2)



### 3.4.1 Procedimiento aritmético.

Haciendo un análisis de los datos generados por Uh Us Freddy (2010)<sup>9</sup>, las Estadísticas del Agua en México de CONAGUA (2011), a Benítez Jorge A. (2010) y de Peña F. S. y Sánchez V.A. (2004) estimé parámetros generales como el volumen promedio anual debido a la precipitación pluvial en la cuenca tripartita del RH ( $V_d$ ) y del flujo volumétrico promedio del año ( $Q$ ). Para estimar el volumen promedio anual disponible debido a la precipitación pluvial en la cuenca del RH procedí con la ecuación siguiente (37):

$$V_d = A_c \cdot \bar{p} \quad (37)$$

Donde:

$V_d$ = volumen promedio anual de agua disponible de lluvias en la cuenca ( $\text{hm}^3$ )

$A_c$ = área de la cuenca ( $\text{m}^2$ )

$\bar{p}$  = precipitación promedio anual o lámina (m)

Los valores de la de precipitación y área de la cuenca arrojaron en promedio una disponibilidad de agua de lluvia aplicando la ecuación 37. El volumen promedio anual de agua disponible de lluvias en la cuenca es de  $19171\text{Mm}^3\cdot\text{año}^{-1}$ , este valor representa del 7.8 - 10.37 % del agua encausada al RH ( $1500$  y  $1988.58\text{Mm}^3$ ). El otro porcentaje se pierde principalmente por a la evapotranspiración, que en términos nacionales representa en promedio el 73 %, siendo en México la precipitación pluvial promedio de  $1489 \text{ km}^3\cdot\text{año}^{-1}$  ó  $1489000 \text{ Mm}^3\cdot\text{año}^{-1}$ , del cual el escurrimiento promedio nacional es del 22%.

Si el escurrimiento promedio anual para la cuenca del RH ( $\bar{v}_e$ ) está entre  $1500$  y  $1988.58 \text{ hm}^3\cdot\text{año}^{-1}$ , el flujo volumétrico medio anual ( $\hat{Q}$ ) en  $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ , sería el cociente de esa cantidad con el tiempo en segundos que contiene un año (Ec. 38), donde  $\hat{Q}_e$  = flujo volumétrico medio anual ( $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ),  $\bar{v}_e$  = escurrimiento promedio anual para la cuenca del RH ( $\text{m}^3$ ) y  $t$  = tiempo (s).

$$\hat{Q} = \frac{\bar{V}_e}{t} \quad (38)$$

$\hat{Q}_1 = 48 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  =descarga media anual del RH, valores de Benítez Jorge A. (2010) y

$\hat{Q}_2 = 63 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  = descarga media anual del RH, valores de Sánchez V.A. (2004).

De acuerdo a los antecedentes, los valores reportados en una fuente escrita son los de L. Carrillo (2009) y T. Álvarez Legorreta (1999) Y Benítez Jorge A. (2010). Estos valores servirán de marco de referencia para los procedimientos de cálculo de descarga del RH en la Bahía de Chetumal y tener más elementos de análisis.

Con respecto al área de la cuenca se reportan dos áreas para la cuenca del RH:

- CONAGUA (2011).  $13465 \text{ km}^2$
- Benítez, Jorge A. (2010)  $17690 \text{ km}^2$

Para efecto de los siguientes cálculos se utilizará el valor oficial de la CONAGUA 2011.

### 3.4.2 Ecuación de Strahler (1964).

Aplicación de la ecuación matemática simple que relaciona el área de la cuenca y la descarga del río, conocida como la *ecuación de Strahler (1964)*. Donde;  $Q$ = Flujo volumétrico en una sección transversal del río o descarga ( $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ );  $A_T$ = área de la sección transversal de una sección

---

<sup>9</sup> Se presenta detalles en anexo 1.

del río ( $m^2$ ) Valor obtenido del anexo 2<sup>10</sup>,  $j$ = constante derivadas de una análisis de regresión lineal de datos reales y  $m$ = constante, valores para ríos del NE de USA (0.6- 0.7). Aplicando la ecuación 39 para área  $A_T= 634 m^2$ ;  $j= 1.4$  y  $m= 0.7$  el flujo volumétrico es de  $128 m^3s^{-1}$

$$Q = j \cdot A^m \quad (39)$$

### 3.4.3 Ecuación de continuidad.

Para el caso de contar con la velocidad promedio de un río se puede calcular su flujo volumétrico tomando de base la ecuación de la continuidad o conservación de la masa de dinámica de los fluidos, donde el flujo volumétrico que atraviesa una sección trasversal de un canal en el caso de que el flujo sea perpendicular al área  $A_T$  es:

$$\bar{v}_1 \cdot A_{T1} = \bar{v}_2 \cdot A_{T2} \quad (40)$$

$$Q_1 = Q_2 \quad (41)$$

Donde;  $Q$ = Flujo volumétrico ( $m^3 \cdot s^{-1}$ );  $\bar{v}$  = velocidad media del flujo 1 y 2 que pasa por la sección trasversal  $A$  ( $m \cdot s^{-1}$ );  $A$ = área de la sección trasversal 1 y 2 ( $m^2$ );  $\bar{v}_1$  y  $\bar{v}_2$  = velocidades promedio 1 y 2 en la sección trasversal 1 y 2 ( $m \cdot s^{-1}$ ) y  $A_{T1}$  y  $A_{T2}$  = Secciones trasversales 1 y 2 ( $m^2$ ). La ecuación 40 se resuelve de forma general en la ecuación 42 para obtener flujo volumétrico. Aplicando la ecuación 42 para una velocidad promedio<sup>11</sup> de  $0.20 m \cdot s^{-1}$  el flujo volumétrico para ese es de  $126.8 m^3 \cdot s^{-1}$ .

$$Q = \bar{v} \cdot A_T \quad (42)$$

### 3.4.4 Ecuación de Davis (1938).

Davis (1938) tiene una ecuación (Ec. 43) utilizada para conocer el flujo volumétrico de un río, utilizando un objeto flotante en la superficie libre, en donde se toma el tiempo  $t$  de desplazamiento  $d$  el ancho del río  $w$  y un coeficiente de rugosidad  $a$ . Tomando como base también las observaciones de Uh Us Freddy (2010) aplicando la ecuación siguiente 43, donde;  $w$ = ancho del río sección trasversal= 123 m;  $l$ = distancia recorrida por el flotador = 6m;  $d$ = profundidad media = 5.76 m;  $a$ = coeficiente de acuerdo al sedimento (rugoso=0.8 cantos rodados, arena; suave= 0.9 como fango o barro) ;  $t$ = tiempo trascurrido en recorrer la distancia  $l$ = 30s y entonces  $v= 0.2 m \cdot s^{-1}$ . El resultado de esta operación es de  $127.53 m^3 \cdot s^{-1}$ .

$$Q = \frac{wdla}{t} = wvda \quad (43)$$

Aplicando la ecuación 37 a 43, se obtienen valores de flujo volumétrico consistentes en los tres últimos valores, siendo el primer valor la media anual. Se debe considerar que en el caso de las tres últimas ecuaciones se utilizaron datos reales a partir de las observaciones de Uh Us Freddy (2010) hechas el 14 de noviembre de 2009, a tres cuartos de la desembocadura del río en al cual se le realizó diferentes perfiles del canal (Anexo A3.1).

### 3.4.5 Correlación de Einsele (1969).

Las correlaciones usadas por los autores son las que ponen el flujo volumétrico de un río en función de su área de cuenca, el factor de escurrimiento, por la precipitación media anual, en otros casos por la relación existente entre la velocidad de la corriente y la composición del sedimento. La composición del fondo del RH es materia inorgánica en descomposición que

<sup>10</sup> El área presentada fue obtenida de Uh Us Freddy (2010) p. 64. Anexo 2.

<sup>11</sup> La velocidad promedio presentada fue obtenida de Uh Us Freddy (2010) p. 59.

forma un fango, principalmente por la existencia de vegetación en las márgenes del río a través de todo su curso, lo cual concuerda con el rango de velocidades sugerido por Einsele (1960) de 3 a 20  $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ . Aplicando la ecuación 42 con los mismos datos, el rango de velocidades estimado para esta sección del RH para esa fecha es de 126.8 y 19.02  $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$  respectivamente.

### 3.4.6 Método de Creager o de la envolvente.

De acuerdo a Fuentes Mariles O. y Franco V. (1998), existe una relación precipitación-escorrimento, conocido como el método de Creager o de la envolvente. De acuerdo a este autor, la forma más fácil para el estudio de una cuenca es por la fisiografía del río, a partir de relaciones de precipitación- escorrimento históricas, es decir, ecuaciones que integran las características fisiográficas de la cuenca, así como de la información sobre el uso de la tierra, condiciones de suelo, pendiente del terreno, longitud o pendiente del cauce principal, y la intensidad o altura de precipitación total que provocó el gasto máximo. Estos métodos solo proporcionan los gastos pico. A continuación el método Creager que utilizó la asociación de los gastos más grandes observados en el mundo, respecto al área de la cuenca donde se presentaron, de acuerdo al nomograma (figura 3.5).

$$Q_p = 1.303 \cdot C(0.386 \cdot A)^\alpha \quad (44)$$

$$Q_p = q \cdot A \quad (45)$$

$$\alpha = \frac{0.936}{A^{0.048}} \quad (46)$$

$$C_{\text{Río-Hondo}} = \frac{Q_p}{1.303 \cdot [(0.386A)^\alpha]} \quad (47)$$

Donde;  $Q_p$ = flujo volumétrico pico máximo del río ( $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ );  $q$ = flujo volumétrico por kilómetro cuadrado de cuenca ( $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^{-2}$ ) obtenida del nomograma de la envolvente mundial de Creager (Figura 3.5);  $C$ = constante de valor de la envolvente;  $\alpha$  = Constante que depende del área de la cuenca y  $A$ = área de la cuenca en  $\text{km}^2$ . La constante  $C$  fue evaluada por la desaparecida SARH<sup>12</sup> para las 37 regiones hidrológicas en las que estaba dividida la República Mexicana, que depende del tipo de área de drenaje, el uso de suelo. En esta lista no se encuentra el valor de  $C$  de la cuenca del RH, pero se puede deducir por medio del nomograma de la figura 5 o por el desarrollo de las ecuaciones 44 a 47, donde el valor arrojado del gasto unitario  $q$  para las áreas de cuenca reportada en la bibliografía es  $q=0.7\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^{-2}$ . Sustituyendo los valores y calculado para  $C$  en ambas áreas que reporta la bibliografía:

$$\alpha = \frac{0.936}{(13465 \cdot \text{km}^2)^{0.048}} = 0.59$$

$$Q_p = 1.303 \cdot 0.59 \frac{\text{m}^3}{\text{s}\cdot\text{km}^2} \cdot (0.386 \cdot 13465 \cdot \text{km}^2)^{0.5853} = 115 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$C_{\text{Río-Hondo}} = \frac{115 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{1.303 \cdot [(0.386 \cdot 13465 \cdot \text{km}^2)^{0.59}]} = 0.567$$

Donde;  $C$ = constante de valor de la envolvente para el RH (Adimensional).

<sup>12</sup> Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos.

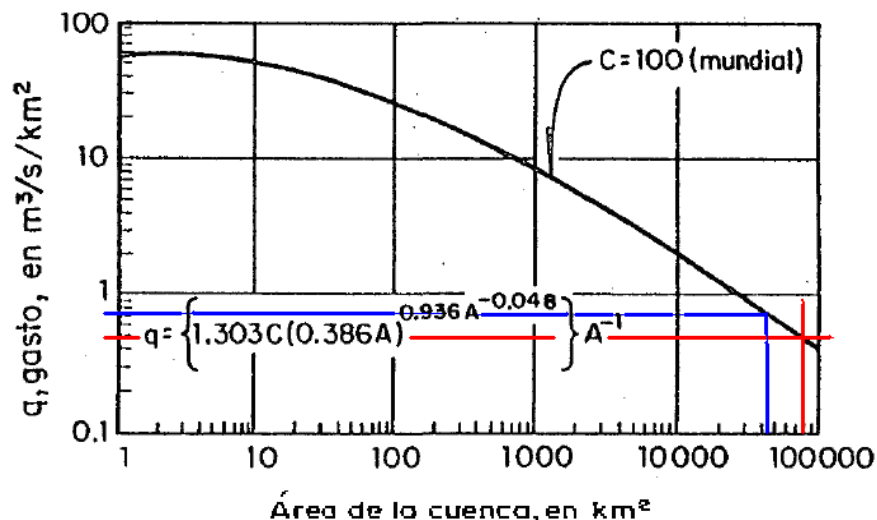


Figura 3.5. Envolvente mundial de Creager y q para el RH. Fuente: Imagen IMTA (2011) P.57.

### 3.4.7 El método Racional.

El método racional: Citado por Kuichling en el año 1889, otros autores dicen que este método está explicado por Mulvaney (1851). Este método provee solo el gasto pico. La ecuación de acuerdo a Fuentes Mariles O. y Franco V. (1998) es la 48. Donde;  $Q_p$ =flujo volumétrico pico total ( $m^3 \cdot s^{-1}$ );  $A$ = área de la cuenca de  $13465 \text{ km}^2$ ;  $C$ = constante de valor de la envolvente para el RH. E  $i$ = intensidad de la lluvia que es igual generalmente al tiempo de concentración, en  $mm \cdot h^{-1} = 0.2$ , con un periodo de retorno de 10 años y duración de la lluvia de 20 horas. La selección de  $i$  se fundamenta en la estimación de la frecuencia de ocurrencia, de la duración y sustituyendo valores  $Q_p$  es igual a  $424 \text{ m}^3 \cdot s^{-1}$ .

$$Q_p = 0.278 \cdot CiA \quad (48)$$

### 3.4.8 Método Racional SIATL.

Estimación de caudal utilizando el SIATL. Este simulador utiliza también el método racional citado en el documento de N.W. Hudson Silsoe Associates, de acuerdo a la ecuación de 49 y 50 (SIATL-INEGI (2010)). Donde;  $Q$ = flujo volumétrico ( $m^3 \cdot s^{-1}$ );  $I$ = promedio de la intensidad de la lluvia ( $mm \cdot h^{-1}$ );  $A$ = el área de la cuenca en  $km^2$ ;  $C$ = coeficiente de escorrentía o de la envolvente (Adimensional);  $F$ = frecuencia de lluvias o periodo de retorno (tabla de frecuencia de lluvia o de diseño) y  $t$ = tiempo de duración de la lluvia en minutos (minutos).

$$Q = \frac{CIA}{360} \quad (49)$$

$$I = \frac{16\sqrt{F}}{t^{0.46}} \quad (50)$$

La ecuación 50 fue determinada por el Ing. Raúl Cadena Cepeda, mediante el análisis de todas las lluvias ocurridas entre 1926 y 1966. Para determinar la frecuencia de diseño en años se emplea el uso de suelo y coeficiente de escurrimiento. Para calcular el caudal por medio del SIATL se selecciona un tributario y el sistema calcula el área de la subcuenca, posteriormente se ingresan los valores de periodo de retorno y coeficiente de escurrimiento, ingresados estos valores se despliegan los resultados incluyendo el caudal del río o tributario, se detalla en la tabla 3.1.

**Tabla 3.2 Caudales por subcuenca y balance general en la desembocadura.**

Propiedad	Unidades	Tributarios		
		Arroyo Dulce, subcuenca de RH33ad	Arroyo Ucum, subcuenca de RH33ad	Bacalar, subcuenca RH33ac
		Valor	Valor	Valor
Elevación máxima	m	140	342	10
Elevación media	m	70	175	5
Elevación mínima	m	1	9	0
Longitud	m	56,356	201,112	86,884
Pendiente Media	%	0.2466	0.1655	0.0115
Tiempo de Concentración	minutos	890.94	2778.99	4035.15
Área Drenada:	km <sup>2</sup>	847.43	3006.75	669.34
Periodo de Retorno:	años	5	5	5
Coefficiente de escurrimiento:	%	.5	.5	.5
Intensidad de la Lluvia:	cm·h <sup>-1</sup>	1.57	0.93	0.78
Caudal	m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup>	18,47	38,83	7,25

Fuente: Datos obtenidos del SIATL 2012. Tabla exportada y editada.

Con el Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas, INEGI 2010, se puede aproximar el caudal que pasa por la desembocadura del RH, haciendo una sumatoria de los escurrimientos de cada subcuenca (ecuación 51), donde; Q= Flujo volumétrico que atraviesa la desembocadura del RH (m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>); Q<sub>1</sub> a Q<sub>n</sub> son los aportes de cada subcuenca al canal principal en (m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>). De acuerdo a los datos generados con el simulador SIATL (Tabla 3.2), la sumatoria de los caudales que alimentan el RH suman 64.65 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>.

$$Q = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n \quad (51)$$

### 3.5 Sumario de Resultados de variables Río Hondo.

Al listar los valores de caudal de los diferentes autores y procedimientos de cálculo se generó la tabla 3.3. De acuerdo a estos resultados del caudal que lleva el RH, los valores que se utilizarán para estimar el potencial energético del gradiente salino en la interface con la Bahía de Chetumal serán los promedios anuales.

**Tabla 3.3. Sumario de variables necesarias para la estimación del potencial de gradiente salino.**

Variable	Caudal Río Hondo	Fuente
Caudal media anual del RH	$\hat{Q}_1 = 48 \frac{m^3}{s}$	De acuerdo a los valores de Benítez Jorge A. (2010)
Caudal media anual del RH	$\hat{Q}_2 = 63 \frac{m^3}{s}$	De acuerdo a los valores de Sánchez V.A. (2004)
Caudal promedio anual	$Q_7 = 64.65 \frac{m^3}{s}$	Valor obtenido con el simulador del INEGI 2010, SIATL.
Caudal promedio temporada de lluvias (junio- octubre)	$Q_{Máx} = 220 \frac{m^3}{s}$	T. Álvarez Legorreta (1999)
Caudal promedio temporada seca (marzo a mayo)	$\bar{Q}_3 = 20 \frac{m^3}{s}$	T. Álvarez Legorreta (1999)
Caudal promedio temporada seca (marzo a mayo)	$\bar{Q}_4 = 24 \frac{m^3}{s}$	L. Carrillo (2009)
Caudal promedio temporada de lluvias (junio- octubre)	$\bar{Q}_5 = 78 \frac{m^3}{s}$	L. Carrillo (2009)
Caudal mínimo registrado temporada de secas (marzo a mayo)	$Q_{Min} = 9 \frac{m^3}{s}$	L. Carrillo (2009)
Caudal en una sección transversal del río 14 de noviembre de 2009	$Q_1 = 128 \cdot \frac{m^3}{s}$	Ecuación de Strahler (1964) área obtenida de Uh Us Freddy (2010)
Caudal instantáneo ecuación de la continuidad o conservación de la masa	$Q_2 = 126.8 \frac{m^3}{s}$	Calculada con procedimiento 3 con valores in situ de Uh Us Freddy (2010)
Caudal instantáneo	$Q_3 = 127.53 \frac{m^3}{s}$	Procedimiento 4 ec. de Davis (1938) y valores in situ de Uh Us Freddy (2010)
Caudal máximo promedio estimado	$Q_4 = 126.8 \frac{m^3}{s}$	Procedimiento y valores de Einsele 1960 de la tabla 3.
Caudal mínimo promedio estimado	$Q_5 = 19.02 \frac{m^3}{s}$	Procedimiento y valores de Einsele 1960 de la tabla 3
Caudal pico calculado	$Q_p = 115 \frac{m^3}{s}$	Correlación de Fuentes Mariles O. y Franco V. (1998)
Caudal pico en una tormenta PR de 10 años y duración de la lluvia de 20 horas	$Q_6 = 424 \frac{m^3}{s}$	El método racional, Kuichling (1889) citado en Fuentes Mariles O. y Franco V. (1998)
Temperatura superficial promedio anual agua bahía de Chetumal.	$\bar{T} = 28.6 \text{ }^\circ\text{C}$	Álvarez Legorreta (2007)
Temperatura promedio mín superficial	24.6 °C	Álvarez Legorreta (2007)
Temperatura promedio máx superficial	32.6 °C.	Álvarez Legorreta (2007)
Salinidad promedio anual Bahía de Chetumal.	19.1 ‰	Álvarez Legorreta (2007)
Salinidad mínima promedio Bahía de Chetumal.	2.3‰	Álvarez Legorreta (2007)
Salinidad máxima promedio bahía de Chetumal.	26.7 ‰	Álvarez Legorreta (2007)
Rango de Salinidad cuando hay nortes (octubre - febrero) en la Bahía de Chetumal.	13- 16 PSU.	L. Carrillo (2009)
Salinidad promedio tiempo de sequía (marzo a mayo) bahía de Chetumal.	18-22 PSU	L. Carrillo (2009)
Salinidad promedio tiempo de lluvias (junio- octubre) Bahía de Chetumal.	10- 15 PSU	L. Carrillo (2009)



### 3.6 Evaluación del potencial energético del gradiente salino.

Existe información parcial para evaluar el potencial energético del gradiente salino con promedios mensuales. En términos generales y con propósitos descriptivos, Skilhagen S.E. *et al* (2008) menciona que en términos teóricos  $1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  de agua generaría 1 MW eléctrico bruto, además considerando una eficiencia combinada de turbina- generador del 80% y funcionamiento de base con caudal medio anual de  $50 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , el RH alcanzaría en promedio alrededor de los 50 MW<sub>e</sub> brutos de capacidad instalada. Esta cantidad es una estimación muy general, pero nos da una idea del potencial del gradiente salino en la interface del RH y la Bahía de Chetumal.

La presión osmótica es capaz de elevar el nivel del agua salada por encima del nivel de agua dulce, creando una columna de agua que detendrá su aumento al igualarse a la presión hidrostática (Ec. 52) de la columna de agua salada de acuerdo a la ecuación de Van't Hoff (Ec. 53). La altura teórica  $h$  quedaría directamente proporcional al gradiente salino y a la temperatura (Ec. 54). El gradiente de alturas puede utilizarse como en una hidroeléctrica, y su velocidad viene dada en función de esa altura (Ec. 55). En teoría, una corriente de agua dulce que fluye a  $1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  produciría 1MW de electricidad. Los lagos interiores hipersalinos tienen un mayor potencial, (Gerstandt, Karen *et al* 2008):

$$P_{hidrostática} = \rho \cdot g \cdot h \quad (52)$$

Donde; P= presión hidrostática ( $\text{N} \cdot \text{m}^{-2} = \text{Pa}$ );  $\rho$ = densidad del agua ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ );  $g$ = aceleración de la gravedad terrestre ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ) y  $h$ = altura de la columna de agua (m)

$$\Pi_{osmotica} = 2 \cdot c_{NaCl} \cdot R \cdot T \quad (53)$$

Para la ecuación de Van't Hoff es válida para soluciones diluidas donde; R= es la constante de los gases =  $8.314472 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1} = 0,082 \text{ atm} \cdot \text{L} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ ; T, la temperatura absoluta (K) y  $c$ = la concentración de NaCl ( $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ). Igualando 52 y 53, despejando  $h$  (Ec. 54):

$$h = \frac{2 \cdot c \cdot R \cdot T}{\rho \cdot g} \quad (54)$$

La altura de la columna de agua proporciona una velocidad teórica de acuerdo a la relación existente entre la altura y la velocidad (Ec. 55).

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (55)$$

La potencia eléctrica se considera una eficiencia total del sistema de 0.5 debido la eficiencia de la turbina hidráulica, el acople mecánico y del generador eléctrico (Ec. 56). Sustituyendo las ecuaciones 54 y 55 en la ecuación 56 queda la ecuación 57 que explica la potencia eléctrica generada por el gradiente salino y por el flujo másico. Donde;  $\eta$ = eficiencia de la turbina hidráulica, acople mecánico y generador eléctrico, (0.5);  $\dot{m}$ =flujo másico del agua por la turbina ( $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ) y  $v$ = velocidad del fluido a través de la turbina ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ).

$$P_{e(v)} = \frac{1}{2} \cdot \eta \cdot \rho \cdot \dot{m} \cdot v^2 \quad (56)$$

$$P_{e(v)} = 2 \cdot \eta \cdot \dot{m} \cdot c \cdot R \cdot T \quad (57)$$

### 3.7 Resultados.

De acuerdo a las ecuaciones 52 a 57 se generaron las tablas 3.4 y 3.5, que muestran el rango de potencias netas teóricas posibles y producción anual promedio de energía eléctrica, de acuerdo a los datos históricos de temperatura mínima promedio, temperatura promedio anual y temperatura máxima promedio del agua superficial de la bahía de Chetumal (rango anual de 24 °C a 32 °C), datos de Álvarez Legorreta (2007), así como de valores de salinidad máxima promedio, promedio anual y salinidad mínima promedio (10 ups–22ups) de L. Carrillo (2009). El rango neto teórico mínimo por  $1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  es de 411.3 kW<sub>e</sub> y un máximo de 929.2 kW<sub>e</sub>, de los datos tabla 6 recuadros en gris. De la misma tabla el promedio de todos los valores de toda la tabla es de 667 kW<sub>e</sub> ó 0.667 MW<sub>e</sub>, un valor por debajo al reportado por Skilhagen S.E. *et al* (2008) que dice que en general son 1 MW<sub>e</sub> por cada  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Donde; Potencia neta promedio = 43 MWe, Y la Producción de energía anual (estimada) = 380 GWh-año.

**Tabla 3.4. Rango de potencias netas por  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  esperadas en el RH.**

Potencia neta teóricas promedio esperadas por cada $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (en kW <sub>e</sub> y recuadro sombreado en gris) generados por la columna de agua en la interface Río Hondo - Bahía de chetumal, en función de los rangos mínimos y máximos promedio de temperatura y salinidad, de acuerdo a las ecuaciones 1, 2 y 3 y los valores promedio de la tabla 5.									
$T_{(°C)}$ / $S_{(ups)}$	24	25	26	27	28	29	30	31	32
10	411,3	412,7	414,1	415,5	416,8	418,2	419,6	421,0	422,4
11	452,4	454,0	455,5	457,0	458,5	460,0	461,6	463,1	464,6
12	493,6	495,2	496,9	498,5	500,2	501,9	503,5	505,2	506,8
13	534,7	536,5	538,3	540,1	541,9	543,7	545,5	547,3	549,1
14	575,8	577,8	579,7	581,6	583,6	585,5	587,4	589,4	591,3
15	617,0	619,0	621,1	623,2	625,3	627,3	629,4	631,5	633,6
16	658,1	660,3	662,5	664,7	666,9	669,2	671,4	673,6	675,8
17	699,2	701,6	703,9	706,3	708,6	711,0	713,3	715,7	718,0
18	740,3	742,8	745,3	747,8	750,3	752,8	755,3	757,8	760,3
19	781,5	784,1	786,7	789,4	792,0	794,6	797,3	799,9	802,5
20	822,6	825,4	828,1	830,9	833,7	836,4	839,2	842,0	844,7
21	863,7	866,6	869,5	872,5	875,4	878,3	881,2	884,1	887,0
22	904,9	907,9	911,0	914,0	917,0	920,1	923,1	926,2	929,2

Tomando en consideración los promedios de descarga, temperatura y salinidad la producción promedio anual de energía rondaría los 347 GW<sub>h-año</sub> de acuerdo a los cálculos mostrados en la tabla 3.5 que muestra también la producción promedio anual de energía en función de cada combinaciones posibles de salinidad y temperatura para los rangos de salinidad 10 a 22 ups y temperatura de 24 a 32 °C. Para aumentar la exactitud de la estimación de producción de energía se realizó un cálculo por mes mostrado en la tabla 3.6. En esta tabla y con los valores de promedios estacionales (con excepción de la temperatura superficial del agua)<sup>13</sup>, salinidad y caudal se propuso un escenario teórico de la producción anual de energía quedando un valor estimado de 38 GW<sub>h-año</sub>. Se aprecia en la figura 3.6 y 3.7 los comportamientos de las variables salinidad de la Bahía de Chetumal, caudal del RH, altura teórica de la columna de agua y precipitación como variable correlacionada con el caudal.

Para las diversas tecnologías existentes de producción de electricidad con gradiente salino, los costos estimados para grandes centrales oscila en dólares Estadunidenses de entre 20,000 \$·kW<sup>-1</sup> instalados y costos de producción de \$0.2 / kWh y hasta los \$4500 / kW instalados y costos de producción de \$0.1 / kWh. Suponiendo el costo más alto para el caso del Río Hondo una planta de 50 MWe costaría alrededor de los mil millones de dólares. Para el costo más bajo el sería de 225 millones de dólares un costo demasiado alto para nuestro país dados los costos de otras tecnologías de producción de energía eléctrica.

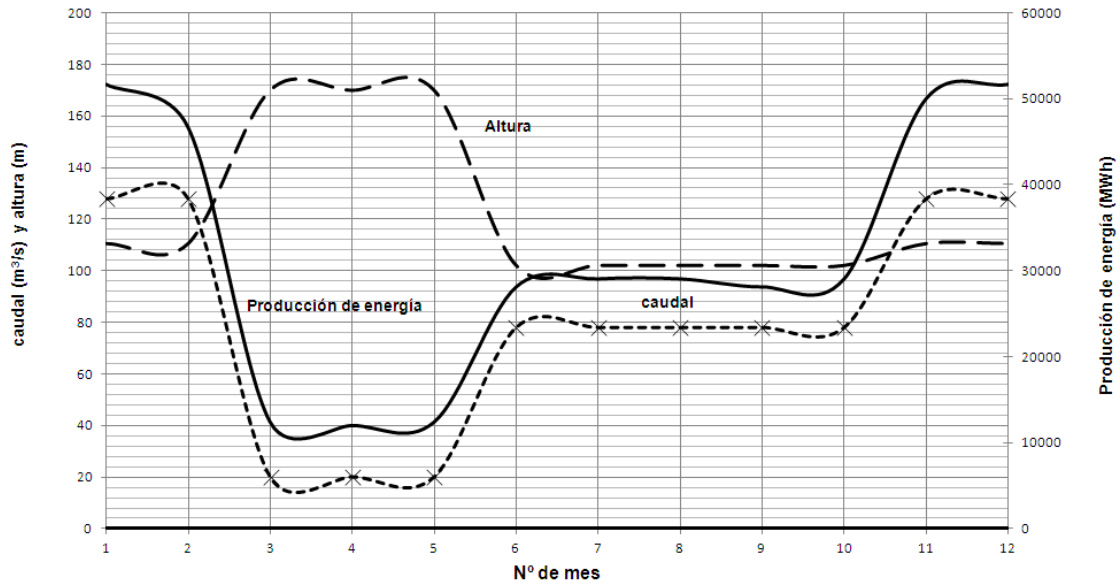
<sup>13</sup> Se tomó el valor promedio anual de 28.6 °C de la tabla 5.

**Tabla 3.5. Producción anual teórica de energía eléctrica. Fuente: Elaboración propia.**

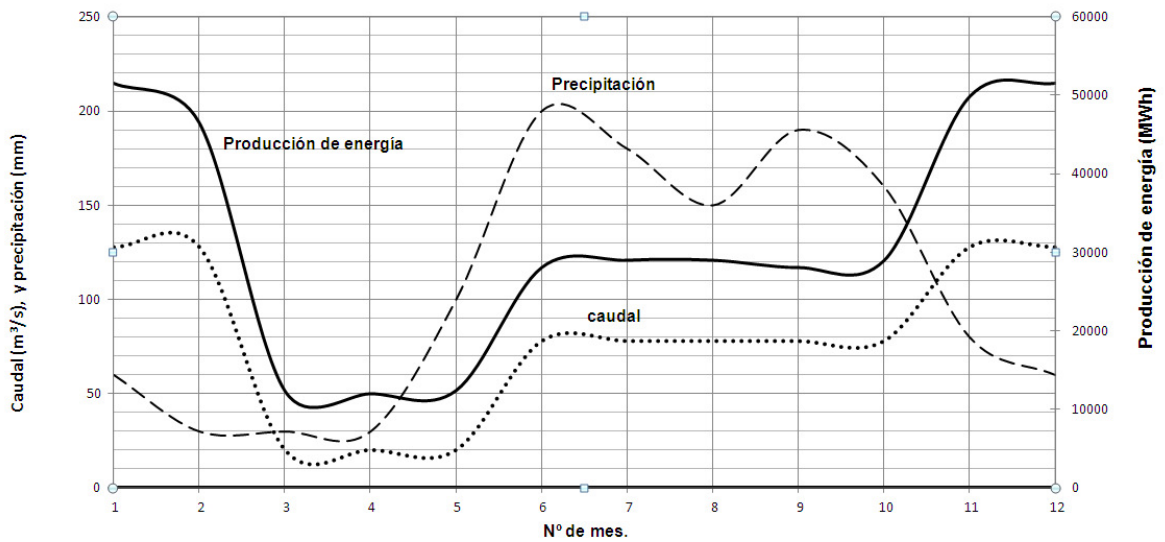
Producción eléctrica teóricas promedio esperadas por $50 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ como promedio anual (en GWh-año y cruce sombreado en gris) valores promedio de temperatura superficial del agua y salinidad promedio anual.									
$T_{(^\circ\text{C})}$ $S_{(\text{ups})}$	24	25	26	27	28	29	30	31	32
10	180,1	180,8	181,4	182,0	182,6	183,2	183,8	184,4	185,0
11	198,2	198,8	199,5	200,2	200,8	201,5	202,2	202,8	203,5
12	216,2	216,9	217,6	218,4	219,1	219,8	220,5	221,3	222,0
13	234,2	235,0	235,8	236,6	237,3	238,1	238,9	239,7	240,5
14	252,2	253,1	253,9	254,8	255,6	256,5	257,3	258,2	259,0
15	270,2	271,1	272,0	273,0	273,9	274,8	275,7	276,6	277,5
16	288,2	289,2	290,2	291,1	292,1	293,1	294,1	295,0	296,0
17	306,3	307,3	308,3	309,3	310,4	311,4	312,4	313,5	314,5
18	324,3	325,4	326,5	327,5	328,6	329,7	330,8	331,9	333,0
19	342,3	343,4	344,6	345,7	346,9	348,0	349,2	350,3	351,5
20	360,3	361,5	362,7	363,9	365,1	366,4	367,6	368,8	370,0
21	378,3	379,6	380,9	382,1	383,4	384,7	386,0	387,2	388,5
22	396,3	397,7	399,0	400,3	401,7	403,0	404,3	405,7	407,0

**Tabla 3.6. Potencial energético por gradiente salino del RH. Fuente: Elaboración propia.**

Variables temporales para el cálculo del potencial energético anual del Río Hondo (GWh-año)													
Variable	unidades	mes del año											
		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
temporada		nortes			secas			lluvias				nortes	
caudal	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	128	128	20	20	20	78	78	78	78	78	128	128
salinidad	ups	13,5	13,5	20	20	20	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	13,5	13,5
temperatura Bahía de Chetumal	$^\circ\text{C}$	28,6	28,6	28,6	28,6	28,6	28,6	28,6	28,6	28,6	28,6	28,6	28,6
precipitación	mm	60	30	30	30	100	200	180	150	190	160	80	60
Altura $h$	m	110,5	110,5	170	170	170	102	102	102	102	102	110,5	110,5
potencia neta promedio	$\text{MW}_e$	69,4	69,4	16,7	16,7	16,7	39,0	39,0	39,0	39,0	39,0	69,4	69,4
nº días	días	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
producción de energía mensual	$\text{MW}_{\text{h-mes}}$	51616	46621	12408	12007	12408	28097	29034	29034	28097	29034	49951	51616
<b>producción de energía anual</b>	<b><math>\text{GW}_{\text{h-año}}</math></b>	<b>380</b>											



**Figura 3.6. Representación estacional de la producción de energía de acuerdo al caudal y a los valores de salinidad y temperatura históricos que son función de la altura teórica generada por la presión osmótica. Fuente: Elaboración propia.**



**Figura 3.7. Representación estacional de la producción de energía de acuerdo al caudal y la correlación con la precipitación pluvial en la zona. Fuente: Elaboración propia.**

#### 4. CÁLCULO DEL POTENCIAL ENERGÉTICO POR CORRIENTES MARINAS.

##### 4.1 Antecedentes.

En un principio las primeras corrientes marinas que se utilizaron fueron las de marea, principalmente para mover molinos para granos. Estos molinos son conocidos como *tide mills* en el argot arqueológico europeo, incluso hay un Tide Mill Institute por la relevancia del tema en cuanto a desarrollo tecnológico. Al respecto se han hecho hipótesis de que ya en tiempos de los romanos desarrollaron esta tecnología en el estuario del Río Támesis actualmente Londres, por los años de 43-200 D.C. El auge de estos molinos se dio en el Medievo como el ejemplo de la figura 4.1 (Spain Robert 2002). En el Caribe Mexicano, uno de los temas que ha cobrado importancia en la arqueología es el uso de corrientes en las rutas marítimas de comercio de los mayas precolombinos, dada su importancia en el desarrollo de la región de Centroamérica y la Península de Yucatán. Existen más preguntas que respuestas al respecto ya que las corrientes marinas sirvieron al igual que los remos como fuerza impulsora de las embarcaciones mayas, las cuales se desplazaban por ríos lagunas y mares, desde la Laguna de términos en Campeche hasta honduras. Hay dos hechos muy bien conocidos en la historia, acerca de la navegación en tiempos Precolombinos. Uno de ellos, es el que relata el hermano de Cristóbal Colón quién lo acompañó sus viajes a América, en el cual encontró a un grupo de Comerciantes Mayas en alta mar, los cuales de forma por demás confiada, se acercaron a las carabelas de Colón, intercambiando información de la ruta que debía seguir el navegante Cristóbal Colón, al igual que conocer de donde venían (NOAA-OER 2011). Estos dos ejemplos nos manifiestan que el uso de la energía oceánica de forma directa ha sido una fuente de energía desde entonces.



Figura4.1. Molino de marea en l'Ile de Brehat, Bretaña, Francia. Fuente: Silveira Claudia (2008).

En el Caribe de México la única corriente que pasa por la zona es la Corriente de Yucatán, que atraviesa el canal del mismo nombre y desemboca en el Golfo de México como la corriente de lazo. De acuerdo a Athié G. Et al (2011) la corriente de Yucatán se ubica en el lado oeste del canal de Yucatán.

## 4.2 Procedimiento.

Las variables necesarias para el cálculo del potencial energético por corrientes marinas se concentran en una matriz de frecuencias medidas en horas, y de velocidades, esta tabla permite hacer las estimaciones de un solo lugar. En estudios de energía generada por corrientes se define un área técnicamente explotable, que depende principalmente de la distancia a la costa. En la tabla 4.1 se enumeran los datos necesarios para obtener el potencial de las corrientes marinas:

**Tabla 4.1. Datos necesarios para el cálculo del potencial de corrientes.**

N°	Variable	Unidades
2	Área transversal a la corriente técnicamente explotable	m <sup>2</sup>
3	Perfil vertical y horizontal de velocidades	m/s
4	Horas anuales por rango de velocidades	h/año

Para contrastar los resultados de esta evaluación revisé los trabajos hechos para utilizar corrientes oceánicas como fuente de energía renovable. Tal es el caso de la Corriente de Florida, la del Golfo, Kuroshio y Gibraltar.

## 4.3 Estimación del potencial energético.

La energía cinética de un fluido que atraviesa un área viene dada por la expresión (ecuación 58); donde  $P_c$  es potencia de la corriente (W),  $A$  es el área de transversal de flujo de la corriente (m<sup>2</sup>),  $v$  es la velocidad del flujo de agua a través del área (m·s<sup>-1</sup>) y  $\rho$  es la densidad relativa del agua de mar (kg·m<sup>-3</sup>).

$$P_c = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (58)$$

La producción de energía eléctrica por corrientes marinas se estima normalmente por medio de una distribución de las velocidades en horas por año (Nielsen, K. 2010), pero en caso de no llegar a tener la distribución de horas por año en los rangos estándar, entonces se realiza una predicción de la potencia disponible con la ecuación 59, de acuerdo a Duerr A.E.S. and Dhanak M.R. (2010).

$$P_c = \int \frac{1}{2} \cdot \bar{\rho} \bar{v}^3 \cdot A \quad (59)$$

La predicción de la potencia disponible en un canal de agua que fluye, está relacionada con la velocidad del agua y el área de sección transversal (ecuación 59). En donde la integral es en el área de la sección transversal  $A$  (m<sup>2</sup>),  $\rho$  es la densidad media del agua de mar (kg·m<sup>-3</sup>),  $v$  es la velocidad media de la corriente sobre la sección transversal (m·s<sup>-1</sup>) y  $P$  es la potencia total (W). La densidad se supone constante en toda la columna de agua. La estructura del gradiente transversal de la velocidad puede ser generada por ordenador o medida (Duerr A.E.S. and Dhanak M.R. 2010).

### 4.3.1 Bases de datos.

Las bases de datos consultadas fueron los datos obtenidos de The Yucatan Current de Joanna Gyory (2013) y los datos obtenidos de las publicaciones del proyecto Canek, especialmente los trabajos de G. Athié *et al* (2011), Cetina *et al* (2006) y Chavez *et al* (2003). El estudio más reciente sobre el tema es el de la Estructura de la corriente de Yucatán de G. Athié *et al* (2011). Este trabajo menciona que el transporte que atraviesa por el Canal de Cozumel que es más accesible a observarlo, explica en gran parte lo que acontece en la corriente que atraviesa el canal de Yucatán. Menciona también, que la posición de máxima velocidad de la corriente oscila entre 86.4°W y 85.8°W y que se mueve hacia el este cuando la corriente se intensificaba en el canal de Cozumel y hacia el oeste cuando ésta se debilitaba. El núcleo de la corriente de Yucatán se caracteriza en todo momento con un ancho aproximadamente entre 50 y 100 km; su

velocidad máxima se observa en la superficie y decrece paulatinamente hasta los 800m de profundidad.

Cetina *et al* (2006) haciendo mediciones directas con siete perfiladores de corrientes acústicos Doppler (ADCP) en diferentes partes de la costa de Quintana Roo, por doce meses (agosto 2002 -agosto 2003) y como parte de las actividades del proyecto Canek, reportó que el lugar con mayor velocidades de corrientes es frente a Puerto Morelos a 20 kilómetros adelante de la salida del Canal de Cozumel, con velocidades de la corriente de 1.5 a 2  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Este ADCP enfrente de Puerto Morelos se localizó a 13 km de la costa, anclado a 501 metros de profundidad y el otro a 130 m. Otro ADCP que reportó velocidades altas fue el instalado en el exterior de la isla de Cozumel o sureste a un poco más de 8 km de la costa. De igual forma enfrente de Tulúm se describen velocidades de alrededor de  $1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , esta medición se hizo a 34 km de la costa de Tulúm y a 26 km de Punta del Faro Celarain de Cozumel. Los otros puntos que midió Cetina *et al* (2006) fueron entre Banco Chinchorro y la costa de Xcalac, el exterior de Banco Chinchorro y Boca bacalar. En síntesis utilizando el método de variabilidad de elipses se obtuvieron para cada estación las velocidades medias en  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  de; Puerto Morelos, media 1.3 con máximos de 2.4 y mínimos de 0.1 con desviación estándar de 0.3; Exterior de Cozumel con 0.9, 1.5, 0.3 y 0.2 respectivamente; En frente de Tulúm, 0.7, 1.7, 0.1 y 0.2; Los demás lugares tuvieron velocidades medias de 0.5 con máximos inferiores a 1.4 y mínimos de -0.6 que implica contracorrientes en estos puntos.

Otras fuente de información sobre corrientes en el Caribe de México pero utilizando el método Lagrangeano es el Sistema de Información Geográfica Ocean Surface Currents en donde se encuentra el tema “The Yucatan Current” Joanna Gyory (2013), este trabajo por medio de boyas a la deriva ha expuesto mapas (Spaghetti Maps) con las descripción de la corriente de Yucatán de trayectorias, velocidad y rumbo (figuras 4.2 y 4.3) donde se muestran las trayectorias históricas de las boyas a la deriva que pasaron en el Caribe Mexicano. Estos mapas se encuentran disponibles en Internet y se me dio el permiso explícito por parte del responsable de la base de datos de utilizar dicha información Dr. Arthur J. Mariano/The Gulf of México Research Initiative (GoMRI)/ The Consortium for Advanced Research on Transport of Hydrocarbon in the Environment (CARTHE) /The University of Miami Rosenstiel School of Marine and Atmospheric Science (RSMAS). - National Oceanographic Partnership Program (NOPP) - HYCOM Consortium for Data Assimilative Modeling Program. En este mapa se observa que las velocidades más altas (puntos negros  $< 1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) están ubicados en frente de la costa de Quintana Roo entre los 20° y 21° N bordeando la plataforma continental. Las boyas indican que los mejores lugares en cuanto a mayores velocidades son el Canal de Cozumel y enfrente de Puerto Morelos y algo más alejado de Cancún por el banco de Arrowsmith. En cuanto a la dirección de las boyas  $< 1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  siguen el contorno de la costa con dirección norte a sureste como se aprecia en la figura 4.2 y 4.3.

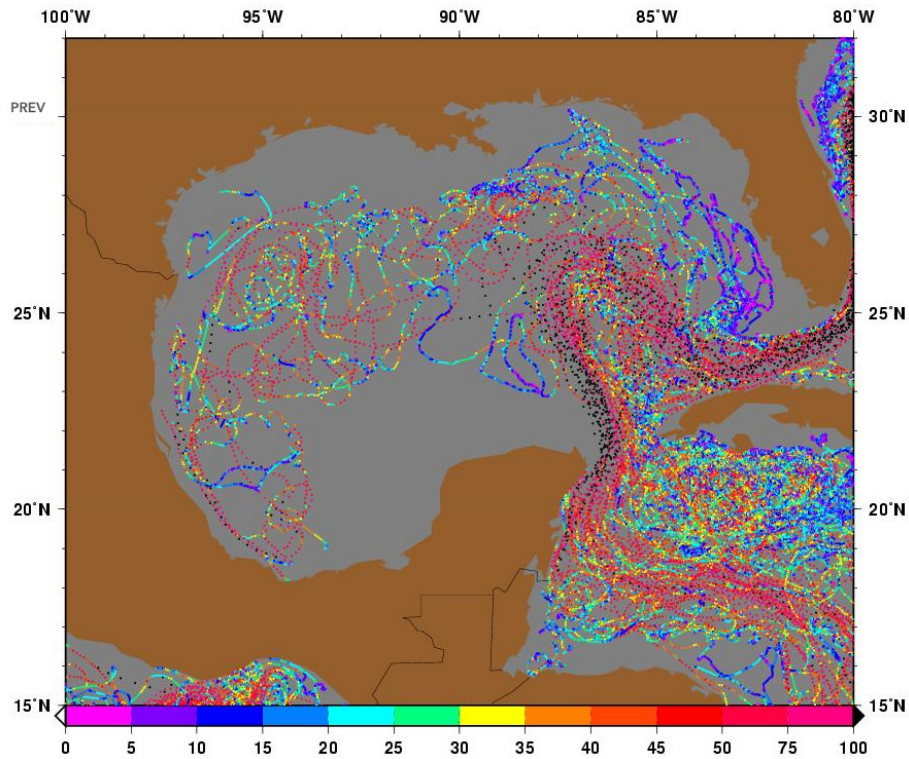


Figura 4.2. Corriente de Yucatán representada por las trayectorias, velocidad y rumbo de Boyas a la deriva. Las velocidades están codificadas en púrpuras y azules oscuros (bajas velocidades); de verde a rosa (medias velocidades) y de más de  $100\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$  en negro. Fuente: Con permiso del autor Joanna Gyory (2013)

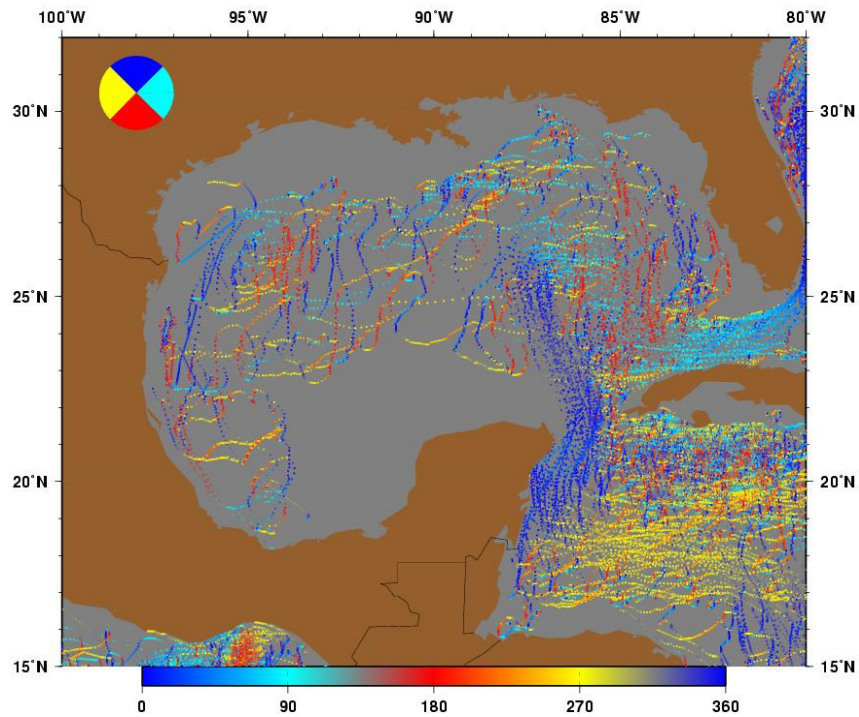


Figura4. 3. La dirección correspondiente (partida / rodamiento) de las boyas en grados respecto al norte ( $0/360^\circ$ ), que es de color azul oscuro. Debido al sur ( $180^\circ$ ) es de color rojo, mientras que el oeste ( $270^\circ$ ) es de color amarillo y el este ( $90^\circ$ ) es de color cian. Fuente: Con permiso del autor Joanna Gyory (2013).



#### 4.4 Las corrientes marinas de referencia $\leq 1.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Para la Corriente de Yucatán no existe estimación referente a la energía que transporta, por lo cual tomé como referencias de actualidad y como comparativa, otras corrientes que han sido objeto de estudio para su aprovechamiento energético, tales como la corriente que atraviesa el estrecho de Florida en USA, la del estrecho de Gibraltar España y corriente de Kuroshio en Taiwán. Hasta la fecha en ninguno de estos lugares se tiene registrado algún dispositivo de aprovechamiento energético, pero de acuerdo a la información recopilada es muy probable que en Taiwán y USA se tengan los primeros sistemas energéticos en unos 5 años.

**4.4.1 Corriente de Florida y *Gulf Stream*.** La Corriente del Golfo y, que de acuerdo a Xiufeng Yang et al (2012), la energía máxima teórica que podrían aprovechar dispositivos con turbinas hidráulicas estaría en el rango de 20 a 60 GWe. Con respecto a la corriente del Golfo, pero solo la porción de la Corriente de Florida, Hanson H. P. *et al* (2010) menciona que es de 32 Sv en promedio anual dirigido hacia el norte a lo largo de la canal teniendo lugar un núcleo de flujo de alta velocidad de  $\sim 2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  a unos 20 km de la costa de Florida y esta velocidad se mantiene a 50 m y es de  $\sim 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  a  $\sim 300 \text{ m}$  de la superficie. Al igual que la corriente de Yucatán esta corriente tiene variaciones y son más fuertes al oeste de este núcleo, siendo gran parte de esta variabilidad a la existencia de remolinos y oleaje. El autor reporta que la potencia en una sección transversal de la corriente de Florida (latitud  $27^\circ \text{ N}$ ) es de mínimo 20 GW.

Duerr, A. E. S., and Dhanak, M. R. (2010) estudiaron los posibles impactos de la extracción de energía de la corriente del Golfo, la cual mencionan sería mínimo ya que el transporte de masa de la Corriente del Golfo se incrementa de alrededor de 30 Sv hasta un máximo de 150 Sv en el Atlántico Norte. También estimaron que la energía total disponible en la Corriente del Golfo con un transporte de 150Sv, sería de 200 GW. Mencionan que podrán existir impactos locales al flujo de la Corriente de Florida y que esto debe ser tenido en cuenta en la siembra de las turbinas. Bozec, A. *et al* (2010) menciona que el 60% de la energía que transporta la corriente de Florida (Latitud  $27^\circ \text{ N}$ ) es por las velocidades  $< 1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Esta corriente tiene un mínimo en septiembre y un máximo en diciembre con una densidad energética de  $1.1\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$  y  $3.8\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$  respectivamente (Figura 4.4).

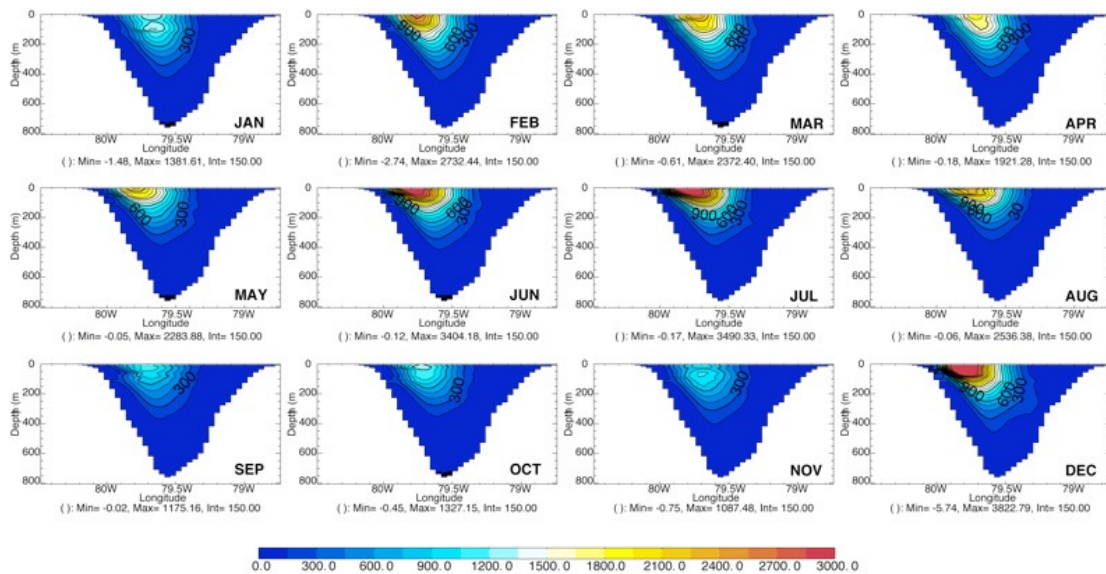


Figura 4.4. Densidad de potencia de la corriente para la corriente de Florida ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ) para el año 2008 y  $27^\circ \text{ N}$  de latitud. Fuente: Bozec A. (2013).

#### 4.4.2 Corriente del Estrecho de Gibraltar.

El estrecho de Gibraltar también ha sido objeto de estudio de las corrientes marinas que lo atraviesan, con miras en aprovechamiento de energía eléctrica del lado Español. Existe una investigación que utilizando los modelos numéricos, simuló el intercambio de aguas a través del Estrecho de Gibraltar incluyendo el forzamiento mareal, decisivo para explicar la alta intensidad de corrientes marinas observadas en el Estrecho. Este trabajo se enfocó a estudiar el potencial energético de estas corrientes para su uso como fuente de energías renovables, evaluando en espacial y temporalmente el flujo de energía, dando como resultado la identificación de las zonas más adecuadas de toda la región del Estrecho para la instalación de centrales eléctricas que extraigan energía de las corrientes. Con valores de densidad de potencia de  $0.3\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$  hasta  $2\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$  desde la superficie y decae notablemente a 60 ó 70 metros de profundidad (Figura 4.5). Las velocidades medias en dos lugares son de  $0.57\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  y  $1.06\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , un ejemplo de los mapas que se generaron en este trabajo es la figura 3 donde se aprecia en el lado Español corrientes favorables hasta los 50m de profundidad con hasta  $0.8\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$  (Calero Quesada C. 2011).

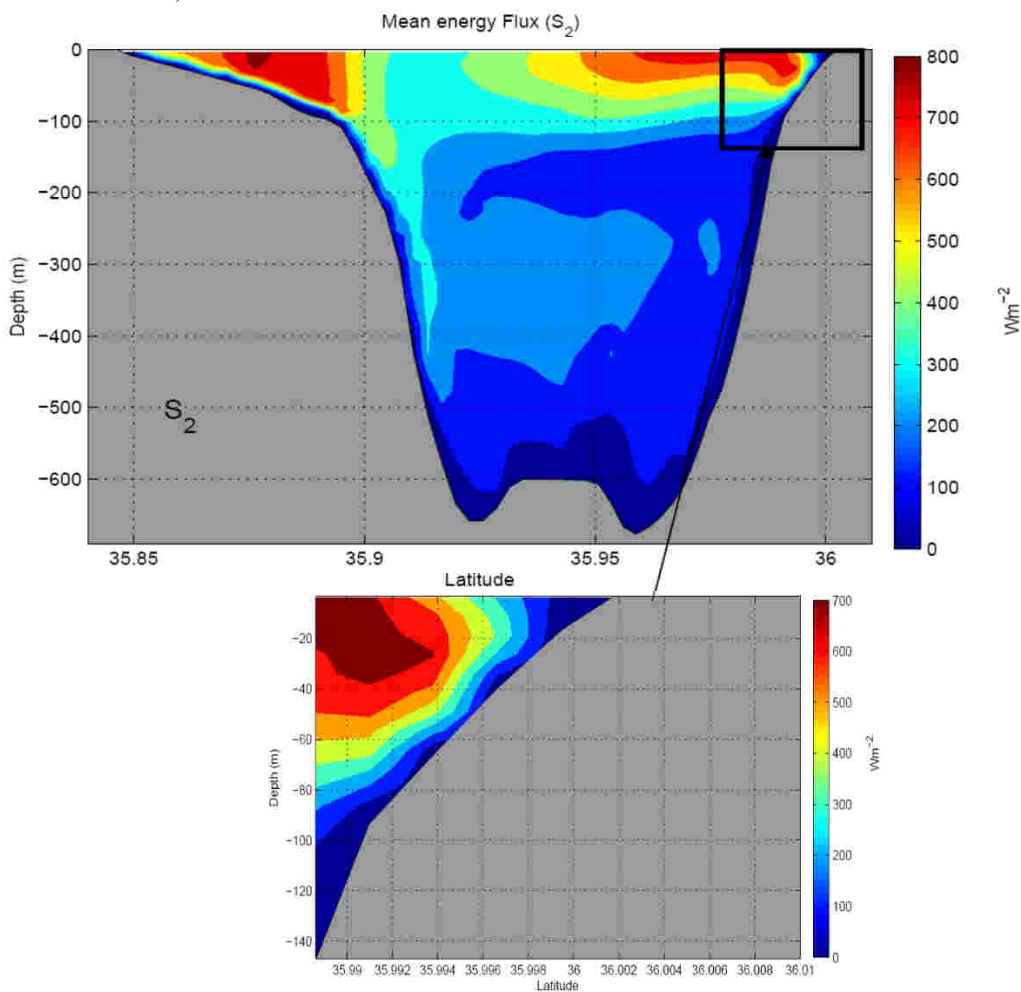


Figura 4.5. Ejemplo del potencial energético unitario para el estrecho de Gibraltar. Fuente: Calero Quesada C. (2011).

**4.4.3 Corriente de Kuroshio.** En Taiwán, Falin Chen (2010) también está realizando estudios sobre la corriente de Kuroshio que es una rama de la corriente del Océano Pacífico Norte. De acuerdo al estudio esta corriente del océano es fuerte y estable con dirección del flujo hacia el norte cerca de la costa este de Taiwán. El caudal es de aproximadamente 30 Sv, la velocidad media es de  $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . De acuerdo al autor se ubicaron los sitios de alta calidad con una expectativa de generación más de 30 GW aprovechando la corriente hasta los 50 metros de profundidad (Figura 4.6).

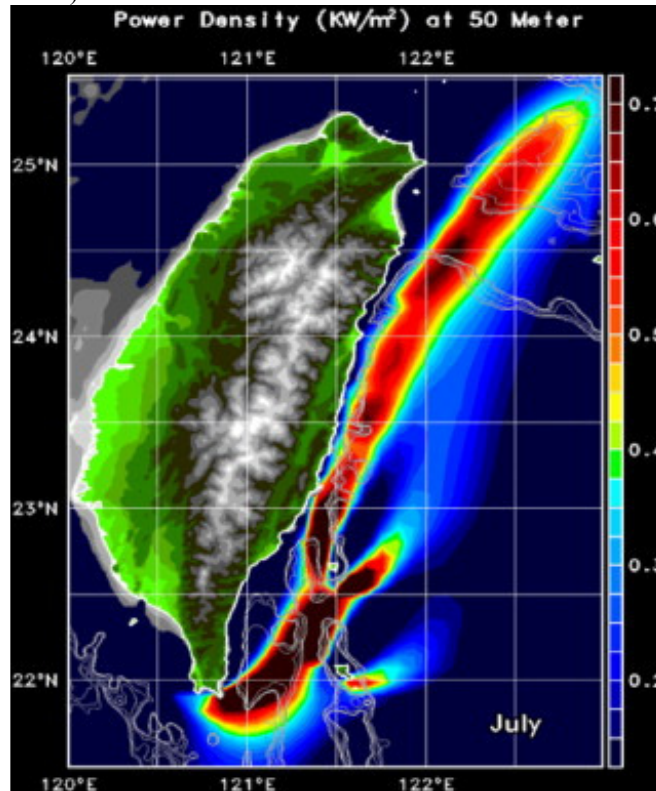


Figura 4.6. Corriente de Kuroshio que pasa por Taiwán. Fuente: Falin Chen (2010).

**4.4.4 La corriente del Canal de Yucatán.** El núcleo de la corriente de Yucatán se caracteriza por tener velocidades superiores a los  $0.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  en todo momento y un ancho aproximadamente entre 50 y 100 km; su velocidad máxima se observa en la superficie y decrece paulatinamente hasta los 800m de profundidad G. Athié *et al* (2011). Este canal de Yucatán tiene un área o sección trasversal de  $\sim 230 \text{ km}^2$ , y el núcleo de la corriente (velocidad  $\leq 0.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) fluctúa del 1 al 4 % del área. El transporte de acuerdo a Sheinbaum J. *Et al* (2002) estimado por medio de observaciones de corrientes oceánicas directas, a través del Canal de Yucatán obtenida del proyecto Canek, reporta un transporte neto de  $23,8 \pm 1\text{Sv}$  ( $1\text{Sv} = 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ; con un Intervalo de confianza del 95%) este transporte promedio se obtuvo con las observaciones del período comprendido entre septiembre de 1999 y junio de 2000. Con respecto a la energía que transporta no existe referencia como es el caso de las otras corrientes referidas anteriormente.

En el caso específico del transporte que atraviesa el Canal de Cozumel, existen un grupo de mediciones de 16 observaciones con ADCP del proyecto Canek, producto de cinco cruceros oceanográfica que tuvieron lugar en diciembre de 1996, mayo-junio 1997, marzo-mayo de 1998, enero-febrero de 1999, y Junio-julio de 2000 de los cruceros CANEK0, CANEK1, CANEK3, CANEK4, and CANEK5. El transporte promedio para este período fue de 5.05 Sv con una tendencia a aumentar de invierno a verano (Chávez G. *et al* 2003).

De acuerdo a los trabajos de Cetina *et al* (2006) y Chávez G. *et al* (2003) los lugares con una velocidad de la corriente aprovechable para energía son; el Canal de Cozumel, frente a Puerto

Morelos a 13 km de la costa, con una velocidad media de la corriente en  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  de 1.3 con máximos de 2.4 y mínimos de 0.1 con desviación estándar de  $0.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . El otro punto que de acuerdo a los datos del mismo autor es el del exterior de Cozumel, a un poco más de 8km de la costa con una velocidad media de la corriente en  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  de 0.9, máximos de 1.5, mínimos de 0.3 y una desviación estándar de  $0.2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  (Figura 4.7). Estas velocidades se mantienen a los 50 metros de profundidad a más.

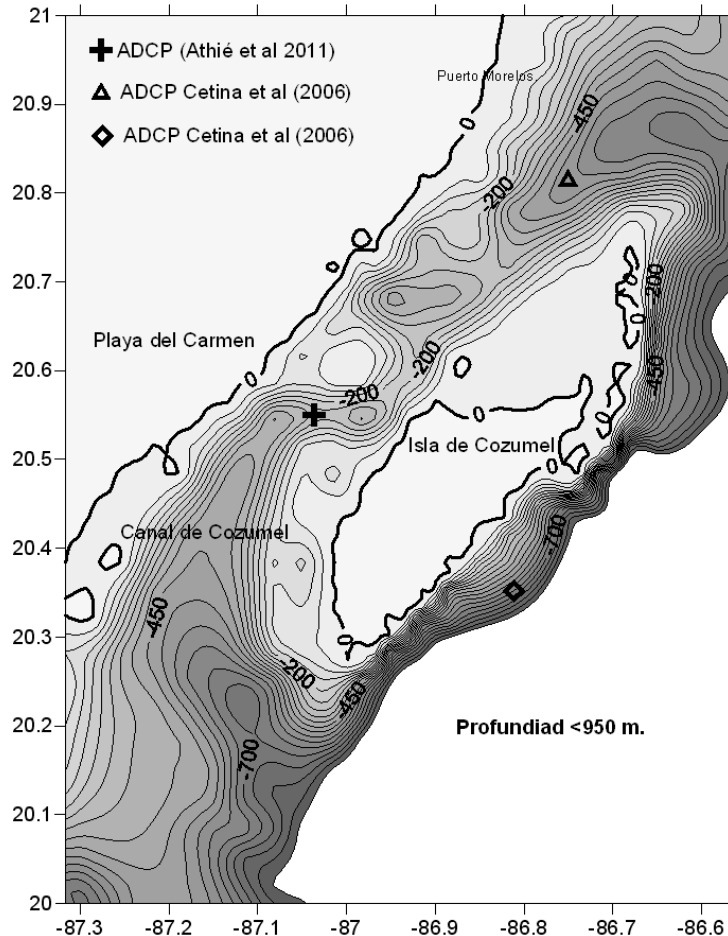


Figura 4.7. Batimetría del Canal de Cozumel y la posición de los ADCP. Cada isobata aumenta en 50 metros.

#### 4.5 Resultados.

En particular para este capítulo la obtención del potencial energético promedio mensual no se cumplió pues la información no fue suficiente. En específico las horas anuales por rango de velocidades no se tiene en la bibliografía. Sin embargo con los datos realicé una estimación del promedio anual. Los resultados son los siguientes:

- Aunque se han hecho muchos estudios en el área del Canal de Yucatán y Cozumel, aun no se llega a un entendimiento de la estructura de esta corriente –La de Yucatán-. Se han observado a través de las mediciones modos de movimiento preferidos de esta corriente pero no a un entendimiento total. Esto ha dado lugar que con cada análisis o re análisis surgen nuevas explicaciones de su funcionamiento.
- Los bancos de datos de series temporales interanuales no están disponibles de forma completa, únicamente como pequeñas series temporales de algunos meses (de velocidades de la corriente a diferentes profundidades) publicados en artículos científicos, producto de los Cruceros Oceanográficos y los sensores del Proyecto Canek principalmente.
- La corriente principal o núcleo de la corriente no se mantiene en una misma posición sino que tiene sus variaciones o modos, lo cual no permite ubicarla temporalmente a una distancia

determinada del perfil de costa. Athié G. *et al* (2011) menciona que el núcleo de la Corriente de Yucatán en el Canal del mismo nombre oscila en promedio entre los 86.4 °W y 85.8°W (62km).

- Con los datos obtenidos de Cetina *et al* (2006) y Chávez G. *et al* (2003) establecí tres lugares potenciales para el aprovechamiento de las corrientes marinas:
  1. Canal de Cozumel de alrededor de 18km de ancho y a menos de 10 km de la línea de costa.
  2. Frente a Puerto Morelos a 13km de la costa,
  3. Exterior de Cozumel, a un poco más de 8km de la costa.

#### 4.6 Estimación de la potencia disponible y técnicamente extraíble.

**4.6.1 Potencial energético del Canal de Cozumel.** Utilizando los datos del trabajo de Chávez G. *et al* (2003), la energía cinética que atraviesa por el canal de Cozumel es del orden de ~ 800 MW desde los 0 a 400 metros de profundidad. De igual forma con la representación gráfica de los ADCP del proyecto Canek que tuvieron lugar en diciembre de 1996, mayo-junio 1997, marzo-mayo de 1998, enero-febrero de 1999, y Junio-julio de 2000 de los cruceros CANEK0, CANEK1, CANEK3, CANEK4, y CANEK5, se realizó una estimación de la energía que atraviesa el canal de Cozumel pero para corrientes mayores a  $1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  (Tabla 2). En comunicación directa vía correo con el Dr. José Luis Ochoa de la Torre, Él ha estimado una potencia de ~1000 MW para el Canal de Cozumel. Utilizando la ecuación 8, en donde la integral es en el área de la sección transversal  $A=7, 200,000 \text{ m}^2$ ,  $\rho=1024$  es la densidad media del agua de mar ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ),  $v= 1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  es la velocidad media de la corriente sobre la sección transversal y la potencia  $P=0.92 \text{ GW}$  promedio total. Para este cálculo la densidad se supuso constante en toda la columna de agua.

En una estimación conservadora si se utilizara tecnología flotante o semiflotante a lo largo del canal de Cozumel en al menos 10 km y hasta los 100 metros de profundidad, se podría extraer  $\approx 200 \text{ MWe}$ , (Potencia unitaria =  $0.2 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ ) considerando una densidad del agua de mar  $\rho=1024 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $v=1$  velocidad media de la corriente sobre la sección transversal ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) y una eficiencia total de conversión  $\eta$  del dispositivo convertidor a energía eléctrica del 40%. Por otra parte si consideramos un factor de planta del 0.7 la producción teórica anual de energía es del orden de  $\approx 1200 \text{ GWh}\cdot\text{año}$ . El canal de Cozumel es la zona más idónea por su accesibilidad y tiene dos centros de consumo muy cerca; las ciudades de Cozumel y Playa del Carmen. De igual forma para el exterior de la isla de Cozumel y considerando 5km a partir de la costa perpendiculares a la corriente, se podrían obtener  $\approx 100 \text{ MW}$ . La producción anual sería del orden de  $\approx 600 \text{ GWh}\cdot\text{año}$

**4.6.2 Potencial energético del Canal de Yucatán.** En primer lugar se estimó el área que atraviesa la corriente con  $A \approx 160, 000, 000 \text{ m}^2$ , de los  $230 \text{ km}^2$  que mide la sección trasversal del canal pues la corriente decrece su velocidad a mayor profundidad siendo que hasta los 800 metros es de  $10 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$  (Sheinbaum J. *Et al* 2002). La densidad media del agua de mar  $\rho=1024$  ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ),  $v=1$  es la velocidad media de la corriente sobre la sección transversal ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). La potencia resultante fue  $P_c=20 \text{ GW}$  promedio. De todo este potencial el técnicamente extraíble hasta los 100 metros de profundidad y suponiendo que se aprovechara todo el ancho de la corriente la potencia de entrada a las turbinas sería del orden de  $2300 \text{ MWe}$ , considerando una eficiencia total de conversión  $\eta$  del dispositivo convertidor a energía eléctrica del 40%, entonces el total extraíble sería del orden de  $1000 \text{ MW}$  para toda la corriente de Yucatán. Con un factor de planta del 0.7 la producción anual de energía es del orden de  $6000 \text{ GWh}\cdot\text{año}$ .

## 5. MAREAS; FLUJO Y REFLUJO.

### 5.1 Antecedentes.

Las mareas se aprovechan de dos formas; por las corrientes que genera en lugares específicos y también se aprovechan por su altura conocida también como Rise and Fall (R&F) o crecimiento y decrecimiento. En el caso de R&F describo brevemente algunos métodos de evaluación que podrían servir en lugares con mareas mayores a los 3 metros, que es el mínimo utilizado de acuerdo a la bibliografía. Para las corrientes de marea la metodología es similar a la utilizada en el capítulo de corrientes marinas por lo cual no se describe en el presente capítulo.

Para el Caribe de México los valores reportados para las estaciones mareográficas de Isla Mujeres, Cozumel y Mahahual por la SEMAR (2012) y los valores obtenidos del estado del arte (resumidos en la tabla 5.1) se descarta una planta mareomotriz y de corrientes de marea para la costa mexicana del Mar Caribe ya que los rangos no cumplen con los criterios mínimos tal y como se muestra en la tabla 5.1.

**Tabla 5.1. Alturas de marea para mar Caribe de México.**

Planos de marea referidos al nivel de bajamar media inferior	Altura (m)		
	Isla Mujeres	Cozumel	Mahahual
Pleamar máxima registrada	0,79	0,46	1,968
Nivel de pleamar media superior	0,189	0,207	0,617
Nivel de pleamar media	0,168	0,19	0,594
Nivel medio del mar	0,089	0,108	0,358
Nivel de bajamar media	0,01	0,026	0,102
Nivel de bajamar media inferior	0	0	0
Bajamar mínima registrada	-0,26	-0,26	-1,214

Notas: Periodo de observación de los años 1999 a 2008 para Cozumel e Isla Mujeres y de 2002 a 2004 para Mahahual. Fuente SEMAR 2012.

**Fuente: (Elaboración propia con datos de la SEMAR).**

El evento de marea es visible en las costas por el *flood* o llenante, donde la dirección de la corriente de marea es de la costa al estuario dándose la pleamar, y el *ebb*, vaciante, reflujo, donde la dirección de la marea es del estuario hacia la costa, también conocido como bajamar. Los sistemas R&F utilizan el gradiente de alturas para generar electricidad como lo haría una hidroeléctrica y los de corriente de marea aprovechan la corriente causada por estos desplazamientos de agua en lugares específicos como lo haría una turbina eólica. El evento de marea es visible en las costas por el *flood* o llenante, donde la dirección de la corriente de marea es de la costa al estuario dándose la pleamar, y el *ebb*, vaciante o reflujo, donde la dirección de la marea es del estuario hacia la costa, también conocido como bajamar. Por otra parte el aprovechamiento de este recurso se da principalmente en los estuarios donde son amplificadas llegando a rangos de marea mayores a 10 metros de altura y produciendo corrientes con velocidades de gran energía (Jean Brown, 1989).

Las variaciones de las marea pueden ser modeladas en la mayoría de los lugares por la superposición de componentes armónicos, de frecuencias conocidas, pero cuyas amplitudes y fases son característicos de cada lugar, conocidos como constituyentes o componentes armónicos (Ec. 60). De acuerdo a Stewart Robert H. (Op cit. 2008) dos métodos son los más utilizados para la predicción de las mareas para puertos y aguas poco profundas, a través de mediciones del nivel del mar con un mareógrafo. Donde;  $h$ = altura de la marea resultante (m);  $h_0$ = altura media (m);  $h_n$ =amplitud de las diferentes componentes de marea (m);  $\omega_n$ =velocidad angular ( $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ );  $\alpha_n$ = fase (rad);  $t$ = tiempo (s) y  $N$ = número de frecuencias de marea consideradas.

$$h = h_o + \sum_{n=1}^N h_n \cdot \cos(\omega_n t - \alpha_n) \quad (60)$$

**El método de armónicos.** Método tradicional que utiliza hasta 18.6 años de datos de un mareógrafo costeros en donde se mide el nivel del mar con respecto al tiempo con lo cual se calcula matemáticamente la amplitud y fase de cada componente de la marea. Para una precisión de la amplitud de  $10^{-3}$  metros se requiere determinar de al menos 39 frecuencias y para una precisión de la amplitud de  $10^{-4}$  metros se requiere determinar 400 frecuencias. Las mareas más débiles tienen amplitudes menores que la variabilidad en la misma frecuencia debido a otros procesos como el viento y las corrientes establecido cerca del mareógrafo.

Para fines prácticos no es necesario tener todos esos años de datos y se puede recortar a un periodo de tiempo de al menos quince días de mediciones ya que la energía de las mareas es proporcional al cuadrado de la amplitud, el componente  $M_2$  representa alrededor del 95 % de la energía total (Ec. 61) (Clark Robert H. 2007)

**El método de respuesta.** De acuerdo a Clark Robert H. (2007) este método fue desarrollado por Munk y Cartwright en (1966), y calcula la relación entre la marea observada en algún momento y el potencial de las mareas. La técnica es la siguiente: Requiere de sólo unos meses de datos, se calcula el potencial de las mareas y no requiere del conocimiento de las frecuencias de las mareas. La entrada es  $Z_{(f)} = G_{(f)}/H_{(f)}$ . Donde  $G_{(f)}$  y  $H_{(f)}$  es la transformada de Fourier del potencial y los datos del mareógrafo,  $f$  es la frecuencia. La técnica sólo funciona si las ondas se propagan como ondas lineales.

**Método práctico de Bernshtein.** Para fines prácticos el efecto más importante para la producción de energía eléctrica es la resonancia de las mareas en un estuario. Una presa podría amplificar el rango natural de las mareas, por lo tanto, es muy importante hacer una investigación para simular la física el régimen natural de las mareas y luego determinar el efecto de este régimen por la colocación de diques en varios lugares dentro de la ría (Charlier R. H. & Finkl, C. W. 2009). La energía potencial (ecuación 61) y la potencia bruta (ecuación 62) de los sitios de las mareas para un ciclo de marea de 6.2 horas ha sido calculada por, Mosonyi (1963), Gibrat (1966), Bregman, R. *et al* (1995) con la cual se genera la gráfica 5.1 que muestra para diferentes rangos de marea y diferentes áreas de cuenca la energía potencial de la marea. La ecuación 63 proporciona la potencia eléctrica de salida e involucra al sistema turbina generador y acople mecánico. La ecuación 64 explica la velocidad máxima en términos de la altura de la marea y la ecuación 65 la velocidad asociada a la altura  $H$ . En la gráfica 5.1 realicé un nomograma con la ecuación 62, para simplificar una estimación rápida con los datos de entrada; área superficial de la cuenca ( $\text{km}^2$ );  $K$ = factor que varía de (1,92 y 1,97) y  $R=H$ = el rango promedio de la marea equinoccial (m).

$$E = 225AH^2 \quad (61)$$

$$P = K \cdot 10^6 \cdot A \cdot R^2 \quad (62)$$

$$P_{e(Q,H)} = \rho \cdot g \cdot \eta_T \cdot \eta_G \cdot \eta_M \cdot Q \cdot H \quad (63)$$

$$Q = v \cdot A_T \quad (64)$$

$$v_{(H)} = \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \quad (65)$$

Donde; E= flujo de energía potencial bruta (kWh); P = energía potencial (GWh-año);  $P_{e(Q,H)}$ = potencia eléctrica en función del caudal y el rango de marea (W); Q= flujo volumétrico o gasto ( $m^3 \cdot s$ ); v= velocidad del flujo de agua a través de la turbina (m/s);  $\rho$ = densidad relativa del agua de mar ( $kg/m^3$ ); g= aceleración de gravedad ( $m \cdot s^{-2}$ );  $A_T$ = área efectiva del paso de turbina ( $m^2$ ); A= área superficial de la cuenca ( $km^2$ ); R= el rango promedio de la marea equinoccial (m); H= rango de marea (m); K= factor que varía de (1,92 y 1,97);  $C_p$ =coeficiente de potencia= 16/27 para una turbina ideal;  $\eta_T$ = eficiencia de conversión de la turbina;  $\eta_M$ = eficiencia de conversión del acople mecánico turbina generador y  $\eta_G$ = eficiencia de conversión del generador. Otras metodologías ya aplicadas se encuentran en Redden A.M. et al, editores (2009). Esta fuente bibliográfica también describe los aspectos implicados en la Bahía de Fundy (Canadá) en donde ya se tiene una planta que aprovecha las mareas. En la tabla 5.2 se describe algunos ejemplos de cuanta energía se generaría a diversas velocidades del agua y diámetros de turbina.

**Tabla 5.2. Estimación de generación de potencia eléctrica en kWe para acoplos turbina-generador utilizadas en plantas mareomotrices.**

Diámetro de la turbina en m.	Velocidad de la corriente de mareas $s^{-1}$		
	1.75	2.25	2.5
2	3.7	5.5	8.5
5	23	35	53
10	90	140	210
15	205	310	480
20	370	550	850
30	820	1250	1910

Fuente: Sverdrup Keith, Armbrust Virginia (2005).

## 5.2 Resultados.

El Caribe de México no cuenta con potencial técnicamente explotable de mareas, ni por las corrientes que esta genera no por altura. La pleamar máxima registrada es de casi dos metros pero en general la media es de 0,358 metros para Mahahual. Las mareas más altas se dan en el sur del Caribe de México y decrecen hacia el norte (de acuerdo a las mediciones de la SEMAR 2012).



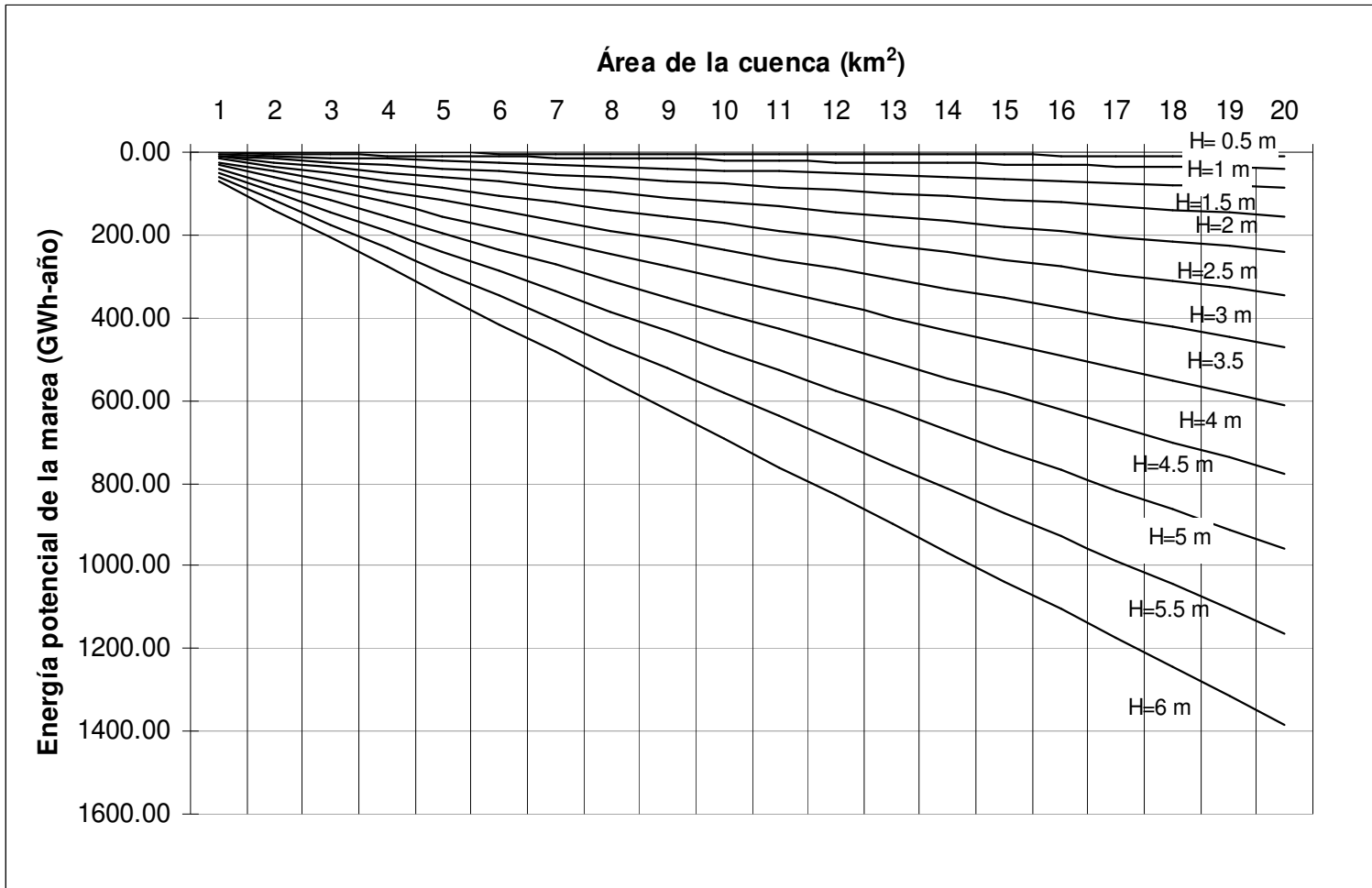


Figura 5.1. Flujo de energía potencial de las mareas en un año y ciclo de 6.2 horas, en cuencas de 1 km<sup>2</sup> a 20 km<sup>2</sup>, y para rangos de marea de H=0.5m hasta H=6m. Fuente: Elaboración propia, utilizando la ecuación 61.

## **6. ENERGÍA OCEÁNICA RENOVABLE E HIDROCARBUROS; ESFUERZOS EN MÉXICO.**

### **6.1 Antecedentes.**

Actualmente la generación de energía y principalmente energía eléctrica, está entrando a un periodo de transformación hacia tecnologías con bajas emisiones de carbono, como resultado de precios más elevados de combustibles fósiles y políticas gubernamentales para aumentar la seguridad energética. Se espera que la demanda mundial de electricidad siga incrementándose más fuertemente que cualquiera otra energía de uso final. Se estima a nivel global que entre el 2008 y 2035 la generación basada en energías renovables se triplique y la participación de estos en la generación global de electricidad se incrementa del 19% al 33% en el mismo periodo, principalmente por fuente eólica e hidráulica, solar geotérmica, biomasa moderna y energía del océano. (World Energy Outlook 2010).

Actualmente nuestro país que participa hasta el 2007 con el 1.1 % de las reservas probadas de petróleo (1P) a nivel mundial y el 4% en producción diaria de crudo. Para el mismo año las reservas 1P de petróleo fueron de 1660 Mega toneladas de petróleo (Mt) y la demanda anual fue de 89.2 De acuerdo a las cifras de producción de crudo para México la producción máxima de petróleo fue en el año 2004 con un total de 168 Mt (3.2 millones de barriles diarios MMBD) decreciendo 5.1% anual entre 2004-2009. La producción de gas natural por el contrario pasó de 4570 millones de pies cúbicos diarios (MMPCD) en 2004 a 6650 MMPCD en 2009. (BGR Annual Report 2009).

No obstante existe optimismo en Petróleos Mexicanos (PEMEX) ya que las reservas posibles (3P)<sup>14</sup> incrementaron considerablemente con la incorporación de las reservas del Golfo de México, que anticipa que la producción de hidrocarburos provendrá de aguas profundas. (PEMEX 2010). En la administración 2006-2012, la Estrategia Nacional de Energía que incluye una visión al año 2025 el primer objetivo de ocho, fue revertir la declinación de la producción de crudo y mantener la de gas natural, considerándose una actividad de vital importancia para el país, por el impacto en los ingresos fiscales del país y en el suministro interno de energéticos. (SENER 2011). Al ritmo actual de producción de crudo en México, quedarían reservas (1P) hasta el año 2020. Sumando las reservas petroleras y de gas natural 2P aumentaría el horizonte a 32 y 45 años (Años 2041 y 2054) suponiendo una producción igual. Y quedarían a la expectativa las reservas 3P del Golfo de México en aguas profundas.

### **6.2 Hecho en México.**

En México se ha llevado a cabo investigación y desarrollo tecnológico de energías renovables oceánicas y continentales. Las continentales han tenido más difusión y han sido explotadas más que las oceánicas. Actualmente existen ya grandes proyectos como parques eólicos, plantas geotérmicas entra los más destacados. En aprovechamiento de energía oceánica renovable aun no se tiene registro que se esté llevando a cabo algún proyecto importante, salvo la planta undimotriz de la CFE que está en construcción en Rosarito.

En México hay al menos una docena de instituciones dedicadas a la investigación y desarrollo de tecnología en energías renovables, tanto continentales como oceánicas y son: Centro de Investigaciones en Energía de la UNAM (CIE), Instituto de Ciencias del Mar y Limnología (ICMyL), Instituto de Ingeniería de la UNAM, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV), Universidad Autónoma Metropolitana (UAM), Instituto Politécnico Nacional (IPN), Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE), Universidad Autónoma de Guadalajara (UAG), Instituto Tecnológico de Cancún (ITC), Universidad de Quintana Roo (UQROO), Centro de Investigaciones Científicas

---

<sup>14</sup> Las reservas 1P=reservas probadas; 2P= reservas probables; 3P=Reservas posibles.

de Yucatán (CICY), Universidad del Caribe (UNICARIBE), Universidad Autónoma de Baja California (UABC). Las líneas de investigación desarrolladas en estas instituciones se centran principalmente en energía solar en sus diversas manifestaciones extraíbles en tierra firme y geotérmica, pero también se ha empezado a incursionar en energía renovable en el océano como se notará más adelante. Otras instituciones o proyectos actuales son:

### 6.2.1 Sistema de Información Geográfica para Energías Renovables en México.

Sistema del Instituto de Investigaciones Eléctricas. Instituto que reúne actualmente información SIG de los recursos energéticos renovables, y cuenta con el Sistema de Información Geográfica para Energías Renovables en México (SIGER) proyecto comenzado en 1997. Contiene información de la distribución del recurso energético en el país, como se muestra en la tabla 6.1. Como se observa existe aun información para generar sobre potencial de olas, mareas, corrientes de marea, gradiente térmico y salino.

**Tabla 6.1. Productos del SIGER.**

Fuente	Descripción	Productos
Solar	Mapas nacionales de irradiación solar global, directa y difusa ( $W/m^2$ )	Difusa, Directa, Global
Eólica	Mapas regionales de densidad del potencial de viento promedio mensual ( $W/m^2$ ) a mesoescala.	1er trimestre, 2do trimestre, 3er trimestre, 4to trimestre
Biomasa	Mapa del potencial bioenergético municipal de desechos agrícolas y pecuarios ( $GJ/km^2$ )	Biomasa
Mini Hidráulica	Mapa del potencial Mini Hidráulica de algunos ríos ( $kW/km$ )	Mini Hidráulica
Oceánica	Mapas regionales del potencial olas, mareas, gradiente térmico y salino.	No se tiene.

Fuente: IIE 2011.

### 6.2.2 Integración de Bases de datos oceanográficos.

Un esfuerzo de integrar las diferentes bases de datos de datos oceanográficos de los mares de México es el Centro Nacional de Datos Oceanográficos (CeNDO). Que es una iniciativa de la Comisión Nacional Coordinadora de Investigación Oceanográfica (CONACIO) y del Instituto de Investigaciones Oceanológicas (IIO) de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC). El Centro se aprobó durante la sexta reunión del subcomité técnico de la Comisión Nacional Coordinadora de Investigación Oceanográfica (CONACIO), celebrada en las instalaciones de la Secretaría de Marina (SEMAR) el día 30 de junio del 2011, donde se acordó que el CeNDO fuera operado por la UABC (ASOCEAN 2011).

Entre sus objetivos está el estandarizar, sistematizar e instrumentar una base de datos oceanográficos nacionales, para su integración, administración e intercambio rápido entre diferentes instituciones y participa en la cooperación internacional para el intercambio de datos e información oceanográfica para del programa IODE (International Oceanographic Data and Information Exchange) de la Comisión Oceanográfica Intergubernamental (COI) de la UNESCO.

### 6.2.3 Atlas Climático Digital de México (ACDM).

Este sistema del Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México es el proyecto eje de la Unidad de Informática para las Ciencias Atmosféricas y Ambientales (UNIATMOS). El ACDM se fundamenta en la necesidad de disponer de mapas y datos de nuestro país, que contengan información de distintas variables climáticas y oceanográficas derivadas en promedios mensuales como temperatura de la superficie del mar, velocidades de corrientes geostroficas y vientos marinos (Fernandez Eguiarte A. et al 2013, en el Atlas Climático Digital de México2013).

#### **6.2.4 Proyecto IMPULSA, UNAM.**

El proyecto Investigación Multidisciplinaria de Proyectos Universitarios de Liderazgo y Superación Académica fue creado en 2005, entre sus objetivos principales fue la desalación de agua de mar con energías renovables y contribuir a resolver los problemas de escasez y contaminación del agua subterránea. Sus proyectos principales son; Desaladora Inteligente piloto que funciona por osmosis inversa y actualmente se alimenta de la red de CFE; Centrales geotermoelectricas convencionales para el aprovechamiento de los recursos geotérmicos de baja entalpía; Hidrogenerador QK, dispositivo que transforma la energía cinética de un flujo de agua en energía eléctrica; Generar energía eléctrica aprovechando el potencial mareomotriz; Sistema de desalación térmica; Estudio sobre el aprovechamiento de las ventilas hidrotermales y Desaladora con paneles fotovoltaicos en Mexicali (IMPULSA 2005).

#### **6.2.5 Proyecto CONACYT Sectorial: Evaluación de Recursos Energéticos Renovables y uso eficiente del recurso para el desarrollo sustentable de la península de Baja California y Quintana Roo.**

Investigación llevada a cabo por la División de Ciencias Naturales y Exactas Universidad de Guanajuato. Atendiendo la demanda 14 del Fondo de Sustentabilidad Energética SENER-CONACYT, a través de la propuesta 119693. Su objetivo es evaluar los recursos renovables eólicos, solares fotovoltaicos y olas y mareas, existentes en la Península de Baja California y Quintana Roo. Actualmente los resultados se consultan en <http://energia.ugto.mx/> pero aun no reporta información del potencial de energía oceánica en ninguna de sus categorías.

#### **6.2.6 Proyecto CONACYT Sectorial: Determinación del potencial energético del oleaje en la costa de la Península de Baja California.**

Proyecto en curso de la Universidad Autónoma de Baja California (Proyecto 119798) con el objetivo Determinar e potencial energético del oleaje como fuente de energía renovable para la generación de electricidad en la costa oeste de la Península d Baja California.

#### **6.2.7 Estudios en México sobre los recursos energéticos renovables del océano reportado en Artículos y/o internet.**

- Estudio de Factibilidad de un método para el aprovechamiento de la energía contenida en el oleaje para la generación de energía eléctrica. Comisión Federal de Electricidad CFE, (1974). (Saldivar Urquiza G.y Medina Ríos A. 2009).
- Aplicación de Tecnología de patente australiana (Oceanlinx Ltd.) energía de oleaje de columna de agua oscilante, OWC por sus siglas en inglés) Comisión Federal de Electricidad CFE, (2005). (Saldivar Urquiza G. y Medina Ríos A. 2009).
- Factibilidad de instalar una planta OTEC en las Costas de México. Facultad de Ingeniería UNAM (2007). (Aviña Jiménez, M.H. 2007)
- Cuantificación de energía de una planta mareomotriz. Instituto de Ingeniería UNAM.(2009). (López González, J. et al 2010).
- Potencial energético del alto Golfo de California. Proyecto IMPULSA IV, Instituto de Ingeniería UNAM (2009). (Hiriart Le Bert, G. 2009).
- Determinación del potencial energético del oleaje en la costa de la península de Baja California (pe-oleajePBC). Departamento de Oceanografía Física del Centro de Investigación Científica y Estudios Superiores de Ensenada CICESE (2009, en proceso de elaboración). (CONACYT 2009)
- Problemáticas y recomendaciones sobre las tecnologías de aprovechamiento de energías oceánicas. Tecnología: Oleaje. Instituto de Ingeniería UNAM. (Torres Freyermuth A., Appendini Albrechtsen C.M. y Salles Afonso de Almeida P. 2012).

- Problemáticas y recomendaciones sobre las tecnologías de aprovechamiento de energías oceánicas. Tecnología: Corrientes Oceánicas. Instituto de Ingeniería UNAM. (López González J., Mendoza Ponce T., y Salles Afonso de Almeida P. 2012).
- Evaluación del potencial de conversión de energía renovable en el Mar Caribe Mexicano. Posgrado ICMYL, UNAM (2014)

### 6.2.8 Desarrollo de tecnología México.

- Sistema Renovador de Agua de Lagunas Costeras (REALCO) primera versión año 1989. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM. Actualmente se está construyendo en Laguna Larga, un cuerpo de agua altamente eutrofizado que forma parte del importante centro turístico de Cayo Coco, en Cuba. (Comunicación directa con el autor)
- Sistemas de Bombeo por Energía de Oleaje, SIBEO, UNAM (1996). -Laboratorio de Oceanografía Física. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología. (ICMYL 2013).
- Desarrollo de un modelo a escala de laboratorio de una planta OTEC. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Facultad de Ingeniería, UNAM (2006).
- Diseño y desarrollo de convertidores de energía del oleaje, DesCEO. Departamento de Oceanografía Física, laboratorio de Energía Alterna, Renovable y Sostenible, LEARS. CICESE (2012 en proceso)
- Hidrogenerador QK. Proyecto IMPULSA IV, Instituto de Ingeniería UNAM. (2005 al año?). (IMPULSA 2005).  
Conceptual de Desaladora térmica MED (Multi Effect Distillation) Proyecto IMPULSA IV, Instituto de Ingeniería UNAM. (2005 a la fecha). (IMPULSA 2005).
- Sobre los mares de México se han hecho estudios en gradiente térmico u OTEC que dieron como resultado tres lugares potenciales: los Cabos, Bahía Balderas y la Isla de Cozumel (Aviña Jiménez H. M. 2007).
- En mareomotriz se concluyó que para el alto Golfo de California el potencial energético en un embalse de 2590 km<sup>2</sup>, se tendría una potencia bruta de 26 GW. (López González J. *et al* (2009).

### 6.3 Resultados de esfuerzos en México.

Esta recopilación de esfuerzos en México no es extensiva ni pretendo cubrir todos los estudios y prototipos, presenté aquí los que me parecieron más pertinentes como ejemplo de que en México si hay Investigación y desarrollo en energías oceánicas renovables pues representan a los ojos de un sector de la academia una oportunidad de aprovechar los recursos energéticos, crear tecnología para proveer al menos parcialmente las necesidades energéticas del País.

Estos esfuerzos orientados al estudio y aprovechamiento de las energías oceánicas se han difundido poco tanto en la sociedad y en la misma academia, por lo que no permeado hasta los documentos oficiales como en las Estrategias Energéticas Nacionales a comparación de la contraparte de energías renovables continentales que ya están dentro de la visión (Figura I.2 y I.3) y participan en un muy pequeño porcentaje de la capacidad instalada de energía eléctrica principalmente. En el actual sexenio 2012-2018 en la Estrategia Nacional de Cambio Climático, Visión 10-20-40 aun no aparecen las energías renovables oceánicas, señal de que aun no se han contemplado como posibles fuentes potenciales de energía.

Lo anterior se irá encaminando según la tendencia internacional rumbo a la transición energética global con energías de bajo impacto ambiental, seguirá permeando en las instituciones de investigación y desarrollo y llegará a los planes y estrategias energéticas del país, tal y como las energías renovables continentales.

## 7. DISCUSIÓN.

La evaluación del potencial energético del *gradiente térmico* resultó ser el que está dentro de los parámetros de operación de las tecnologías existentes. El parámetro técnico más importante es alcanzar los gradientes de temperatura entre la superficie y el fondo de 700 a 1000 metros lo más cercano a la costa y al centro de consumo. De acuerdo a los datos batimétricos y el gradiente de temperatura existen cinco lugares potenciales para aprovechar esta fuente de energía, los cuales requerirían de estudios específicos para descartar imposibilidades ambientales, técnicas, económicas y financieras. El sitio que mas promete técnicamente es el de Cozumel que está a unos 4 km de distancia del potencial térmico y es el que está más cercano a un centro de consumo.

El *Oleaje* tiene potencial mínimo con respecto a otros lugares donde el potencial bruto es de 40 a 60  $\text{kW}\cdot\text{m}^{-1}$ , siendo que para el Caribe de México en promedio es de 7.57  $\text{kW}\cdot\text{m}^{-1}$  y la potencia de oleaje con mayor probabilidad está entre 5 y 10  $\text{kW}\cdot\text{m}^{-1}$ . Las tecnologías actuales están diseñadas para oleaje tipo *swell*, con alturas significantes de entre 0.75 a 7.25 metros de altura y periodos de entre 5.5 a 15.5 segundos. El oleaje en el Caribe de México es mayormente tipo *sea* a lo largo del año con alturas de oleaje con más probabilidades de aparecer 0.5 hasta 3.75 metros de altura y con periodos que oscilan entre 5 y 10 segundos. En oleaje entonces las tecnologías actuales si funcionarían pero en su límite inferior. Por las características del oleaje en su altura y periodo, las tecnologías ancladas al fondo tienen como fondo de operación de entre 20 y 10 metros de profundidad y tendrían la desventaja de estar expuestos a tormentas y huracanes con oleaje de hasta 10 metros de altura y longitudes de onda más largas lo que podría provocar socavación del fondo marino que podrían ocasionar daños a los equipos.

En *corrientes marinas* empíricamente se maneja la información cualitativa de que el Canal de Cozumel es un sitio con alto potencial energético por las velocidades que alcanzan las corrientes marinas que ahí pasan, más en la bibliografía no se encontró ningún referente a la cantidad. En cuanto a las velocidades en el exterior de la Isla de Cozumel existen también mediciones que indican que hay potencial en esta parte de Cozumel, así como enfrente de Puerto Morelos (Figura 4.7). Una de las limitantes de no contar con series de tiempo interanuales es que no pude calcular el número de horas por año promedio de los diferentes rangos de velocidad a diferentes profundidades, es decir como en las metodologías para evaluación de recursos eólicos. De tal forma que la velocidad media más recurrente en los textos es la de 1.2  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  como límite superior con la cual efectué la mayoría de los cálculos con la ecuación 59. Los resultados obtenidos fueron inferiores a las densidades energéticas utilizadas normalmente por las tecnologías actuales, que se diseñaron la mayoría para corrientes de marea de velocidades promedio 2.5  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Pero para corrientes con velocidades inferiores se ha utilizado un cono de entrada que acciona un efecto Vénturi con los cuales se obtienen mayores velocidades de a 1.2  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  a un estimado de 2  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , lo cual aumentaría la densidad de potencia específica donde el referente es de 3.3  $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$  de área de turbina. Para el Caribe de México sin cono de entrada y descontando las pérdidas y la eficiencia del sistema se obtuvieron 0.2  $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$  a 1.2  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  de velocidad y una eficiencia total de 25%. Sin embargo en lugares como el estrecho de Florida en donde la corriente es más predecible en la localización de su núcleo principal y donde se alcanzan las máximas velocidades mayores a 2  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  tienen densidades energéticas 1.1  $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$  y de acuerdo a sus estudios serían factibles al aumentar el precio de los hidrocarburos. De igual forma Taiwán aprovecharía corrientes de velocidad media de 1  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , la diferencia con México es que Taiwán importa el 95 % de sus combustibles.

### **Accesibilidad-calidad de las Bases de datos y certidumbre de los resultados.**

El estimado del potencial energético para cada categoría estuvo en función a la *accesibilidad de datos*, la *cantidad* y *calidad* de los mismos, así como el *periodo histórico* y la *densidad de datos* en el área de estudio o *cobertura espacio temporal*.

En la estimación del Gradiente térmico conté con una mayor cantidad de estaciones oceanográficas con un total de 293 Hidrocalas de XBT y 12 de CTD en un periodo de mediciones a partir de 1980 hasta el año 2010. Teniendo una densidad de datos (Anexo A.2.2) en la distribución de los lances de XBT que dio como resultado discrepancias máximas admitidas de los valores de gradiente térmico de entre 1.2 y 5% con respecto al valor real, desde los 0 a 700 metros de profundidad (Figura 2.10 y tabla 2.4). Es decir que la cobertura espacio (Área-profundidad) y tiempo da una mejor certidumbre. En cuanto a la accesibilidad de datos es relativamente fácil acceder a la información del NODC-NOOA y los datos llevan un control de calidad. Como resultado de lo anterior obtuve los promedios mensuales del gradiente térmico y los lugares potenciales para su explotación energética cumpliendo totalmente con el objetivo específico.

En *Oleaje* conté con una gran cantidad de datos con control de calidad de 49334 series de datos en el dominio de la frecuencia, pero con una cobertura espacial y temporal limitada. La información utilizada provino de una sola estación oceanográfica a 222 km de la costa ESE de la Isla de Cozumel que es la boya oceanográfica 42056, cubriendo mayormente la costa de México de Cabo Catoche hasta Sian Kan. Esta información fue respaldada con mediciones cercanas a la costa de diferentes trabajos para Cancún, Puerto Morelos, Playa del Carmen y Tulúm siendo consistente en los resultados tanto de altura significativa y periodo del oleaje. De acuerdo a estos trabajos de respaldo se constató que el oleaje proviene del ESE al menos para gran parte de la línea de costa con más accesibilidad a explotarse, ya que desde Xcalac hasta Sian Kan existen ANP y una densidad de población menor. En cuanto a la accesibilidad de datos es relativamente fácil la obtención de información de la NBDC-NOOA y los datos llevan un control de calidad. Con toda esta información obtuve un promedio del potencial energético promedio mensual para la costa del Caribe de México, cumpliendo con el objetivo específico.

En *corrientes marinas* no encontré suficientes datos para cumplir con el objetivo específico de obtener promedios mensuales del potencial energético disponible. La mayoría de los datos que utilicé fueron provenientes de artículos que emanaron de las mediciones hechas en el proyecto CANEK. Por otra parte utilicé como soporte y referencia un conjunto de mediciones con el método lagrangeano de boyas a la deriva, que me permitieron tener certeza sobre la dirección de las corrientes y sus velocidades cercanas a la costa, así como a las dimensiones del núcleo principal de la corriente en el Canal de Yucatán (Figura 4.2 y 4.3). La estimación del potencial energético en el canal de Cozumel se realizó con la asesoría del Dr. José Luís Ochoa de la Torre quien de forma general estimó un valor del potencial energético con el cual yo comprobé mi propia estimación. Lo que si queda claro es que por una parte; se requieren una mayor cobertura de sensores de medición de velocidades a lo largo y ancho del canal de Cozumel y también que las series de datos estén disponibles en un banco de información nacional. En síntesis hice una estimación de la cantidad de energía aprovechable con este sistema obteniendo el promedio anual y los lugares con un potencial accesible a ser aprovechado.

En *mareas* aunque el potencial energético no se tomó en cuenta por estar fuera de los rangos de operación de la tecnología actual, que indica que los promedios de altura de marea utilizados son mayores a los 3.9 metros cuando en el Caribe de México el mayor nivel de pleamar máxima registrada referidos al nivel de bajamar media inferior es de 1.968 metros para la estación de Mahahual. Este valor va decreciendo hacia el norte hasta llegar a 0.79 metros de pleamar máxima registrada en la estación de Isla Mujeres. Los niveles de pleamar media van de 0.594 - 0.168 metros para Mahahual e Isla Mujeres respectivamente. Lo que es un hecho es que existe suficientes datos históricos en las tres estaciones mareográficas del Caribe de México. En la accesibilidad de datos, la cantidad y calidad de los mismos, así como el periodo histórico es adecuada, pero en la densidad de datos en el área de estudio es limitada a tres estaciones oceanográficas de la SEMAR (Tabla 5.1) y otra instalada en el Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM en Puerto Morelos. También no encontré en la bibliografía reporte

alguno sobre un mapa de las líneas cotidales, puntos anfodrómicos y amplitud de las mareas, con el sentido de giro de la pleamar a nivel mesoescala para la zona de estudio.

### **Recursos energéticos y tecnología mexicana.**

Las instituciones en México han incursionado en ciencia y tecnología relacionada a los recursos energéticos renovables oceánicos. Los esfuerzos se reflejan en diferentes trabajos reportados en revistas de investigación, memorias de congresos, publicaciones en línea y otros que conocí a lo largo de esta investigación.

Estos esfuerzos orientado al estudio y aprovechamiento de las energías oceánicas se han difundido poco tanto en la sociedad y en la misma academia, por lo que no ha permeado hasta los documentos oficiales como en las Estrategias Energéticas Nacionales de Energía a comparación de la contraparte de energías renovables continentales que ya están dentro de la visión y participan en un muy pequeño porcentaje de la capacidad instalada de energía eléctrica principalmente. En el actual sexenio 2012-2018 en la Estrategia Nacional de Cambio Climático, Visión 10-20-40 aun no aparecen las energías renovables oceánicas, señal de que aun no se han contemplado como posibles fuentes potenciales de energía.

Es una realidad que la energía oceánica en México es una energía poco-conocida, existen algunos particulares, estudiantes y académicos interesados en este tema, ya existe información suficiente como referencia. En México a esta energía se le conoce en la jerga popular como *energía maremotriz*, término que al parecer la gente le ha dado de su conocimiento de una de las energías más famosas al menos en México que es la *energía mareomotriz* o de las mareas.

México debe invertir mucho más en la exploración de fuentes de energía oceánica renovable y al apoyo de la generación de tecnología nacional para aplicarla y usufructuarla.

Para resumir los datos generados de cada categoría realicé la tabla 7.1 con la finalidad de hacer más fácil la lectura de resultados de potencial energético y producción en promedios mensuales y anuales. Con la misma intención para visualizar los lugares potenciales y el tipo de tecnología realicé el mapa descriptivo Figura 7.1.



**Tabla 7.1. Inventario del potencial energético oceánico renovable del Caribe de México.**

Categoría	Potencial promedio para cada mes												U	Promedio anual bruto	Potencial técnicamente disponible	Producción anual técnicamente disponible	Potencia unitaria	Periodo de medición	Fuente base de datos
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC			MWe	GWh-año			
Oleaje, costa aprovechable 250km.	10.8	7.8	9.96	5.43	3.14	4.64	5.6	6.98	2.32	15.5	9.13	8.41	kW·m <sup>-1</sup>	1892 MW	280	1700	1.12KW <sub>e</sub> ·m <sup>-1</sup>	2005-2012	NDBC
Oleaje, total de la costa 400km	10.8	7.8	9.96	5.43	3.14	4.64	5.6	6.98	2.32	15.5	9.13	8.41	kW·m <sup>-1</sup>	3000 MW	450	2700	1.12KW <sub>e</sub> ·m <sup>-1</sup>	2005-2013	NDBC
Gradiente térmico de 10 a 700 metros de profundidad.	19.5	18.7	18.38	18.44	19.68	20.07	20.54	20.78	21.4	22.2	19.89	19.2	°C	68.75PJ	2000	17500	1.25MW <sub>e</sub> ·km <sup>-2</sup>	1980-2010	NODC
Gradiente salino	69.4	69.4	16.7	16.7	16.7	39	39	39	39	39	69.4	69.4	MW	43MW	43	380	0.6MW <sub>e</sub> ·m <sup>-3</sup> ·s <sup>-1</sup>	1999-2010	INEGI 2010, SIATL.
Corrientes canal de Cozumel para 10km de frente y 100 metros de profundidad.	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	MW	920MW	200	1200	0.2MW <sub>e</sub> ·m <sup>-2</sup>	1996-2000	Chávez G. et al (2003); Dr. José Dr. José Luis Ochoa de la Torre comunicación directa
Corrientes exterior de Cozumel 5km de frente y 100 metros de profundidad.	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	MW	*	100	600	0.2kW <sub>e</sub> ·m <sup>-2</sup>	2002-2003	Cetina et al (2006)
Canal de Yucatán	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*		20GW	*	*	0.125kW <sub>e</sub> ·m <sup>-2</sup>		Sheinbaum J. Et al 2002

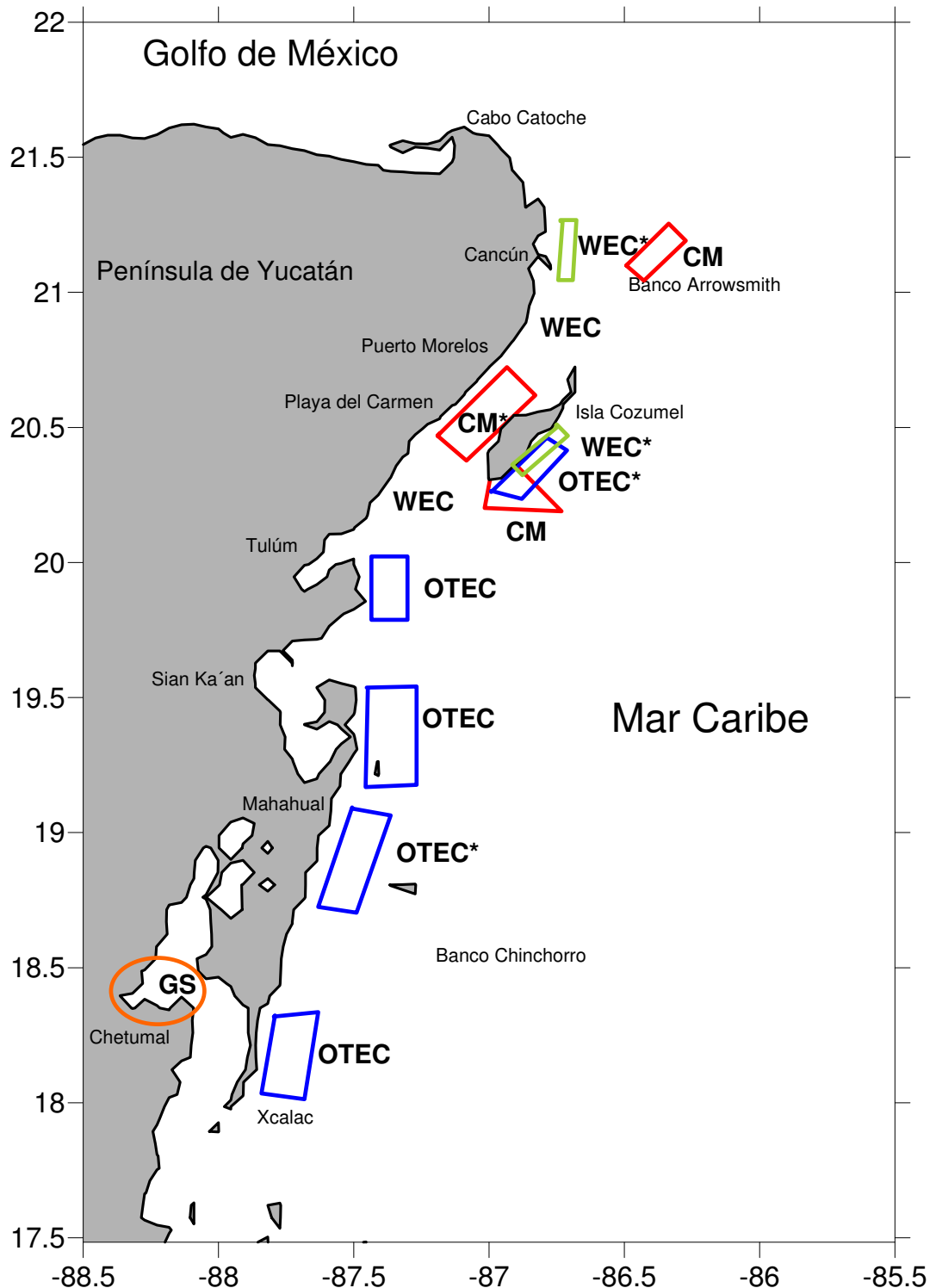


Figura 7.1 Ubicación de los lugares potenciales para el aprovechamiento de las energía oceánicas. En azul son las zonas de gradiente térmico OTEC, en rojo corrientes marinas (CM), en verde oleaje (WEC) y en naranja gradiente salino (GS). Las abreviaciones con asterisco son los lugares y tecnologías que de acuerdo a los resultados tienen más posibilidades de ser factibles por su cercanía a los centros de consumo y por cumplir con los parámetros de operación de cada tecnología. Fuente: Elaboración propia, mapa con datos de la NGDC 2013.

## 8. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO.

### En cuanto al potencial energético por categoría y su ubicación.

1. En el Caribe de México tienen potencial energético oceánico, técnicamente extraíble, las categorías de:

#### **Gradiente térmico OTEC.**

- En la parte sureste de la Isla de Cozumel a una distancia de cuatro y medio kilómetros de la costa. Entre Tulúm y Punta Allen a 10 kilómetros mar afuera. Frente a la reserva de Sian Ka'an a una distancia de entre siete y diez kilómetros. Frente a Mahahual y hasta Xcalac a una distancia de entre seis y diez kilómetros. El potencial es de 2000 MWe y 17500 GWh-año.

#### **Oleaje.**

- A lo largo de la costa del estado de Quintana Roo, con excepción de las Áreas Naturales protegidas y las Aéreas de importancia para la Conservación de las Aves, como Isla Contoy, corredor Calakmul Sian Ka'an, Isla Cozumel, corredor Central Vallarta y una zona entre Puerto Morelos y Tulúm. Por ello, solo el 30% de la costa podría ser técnicamente aprovechable, dentro de la legislación ambiental. El potencial técnicamente disponible es de 280 MWe y 1700 GWh-año.

#### **Corrientes marinas.**

- Se identificaron dos lugares, ambos en la Isla de Cozumel, ubicados entre el Canal de Cozumel y la zona del exterior a la altura del Faro Celarain, a una distancia de cinco kilómetros y hasta diez. Potencial técnicamente disponible de 300 MWe y 1800 GWh-año.

#### **Gradiente salino.**

- Cuenta con potencial energético técnicamente disponible pero tiene dos desventajas muy importantes: 1) la tecnología actual que aprovecha el gradiente salino pertenece a una sola empresa y su costo es de aproximadamente 4500 a 6000 dólares por cada kWe instalado y 2) la información actual sobre el caudal y la temperatura del Río Hondo es insuficiente, así como sobre la salinidad, temperatura y corrientes marinas en la Bahía de Chetumal, lo que no permite concluir si es técnicamente posible instalar una planta de aprovechamiento del gradiente salino en este sitio. Potencia técnicamente disponible de 43 MWe y 380 GWh-año.

#### **Mareas R&F y corrientes.**

- no tienen potencial técnicamente extraíble.

2. Se concluye que en total, sin contar la potencia instalada teórica y la producción del gradiente salino, el Caribe de México cuenta potencialmente con una suma del inventario de 2580 MWe y una producción de 21000 GWh-año. Actualmente el Corredor Turístico Cancún, Cozumel, Playa del Carmen, Riviera Maya y Chetumal demandan un máximo de 676 MWe, que provienen de centrales de ciclo combinado, termoeléctricas, grandes hidroeléctricas y turbo gas. El Mar Caribe de México podría proveer técnicamente el 100% de las necesidades eléctricas de la región.

## **Futuras líneas de trabajo.**

### **Gradiente térmico.**

Una de las áreas de oportunidad técnica es estudiar cómo influye la corriente de Yucatán en el tendido de tubos de extracción de agua fría para la tecnología OTEC en la zona sureste de la isla de Cozumel entre la costa y los 4 km de distancia. Otra área es con respecto a la obra civil necesaria para resistir tormentas y huracanes tanto de la planta como de las tuberías del sistema. Una tercera área de estudio sería la modelación de la pluma térmica, su disipación y sus posibles efectos en la termoclina y la ecología local.

Sería importante contar con el desarrollo de un prototipo OTEC basado en tierra para producción de agua dulce como por ejemplo en Cozumel que actualmente utiliza desalinizadoras.

### **Oleaje.**

Uno de los aspectos técnicos críticos en cuanto a los dispositivos de aprovechamiento del oleaje se presenta para el caso de las tecnologías ancladas al fondo, ya que éstas estarían entre los 20 y 10 metros de profundidad y tendrían la desventaja de estar expuestos a tormentas y huracanes con oleaje de hasta 10 metros de altura y longitudes de onda más largas, lo que podría provocar socavación del fondo marino. En primera instancia, el sentido común indica que este tipo de instalaciones sería muy vulnerable. Por otra parte habría pocos sitios adecuados para instalarlas en tierra, ya que la barrera arrecifal disipa la energía del oleaje al entrar a la laguna arrecifal. Por lo cual los sitios expuestos al oleaje directo serían unos cuantos y sería importante hacer mediciones en ellos.

### **Corrientes marinas.**

En relación con el aprovechamiento de las corrientes marinas se requiere de estudios más específicos, ya que la alta variabilidad de la corriente de Yucatán no permite obtener, con la información actual, un mapa de probabilidades de las velocidades y de ubicaciones de las mejores zonas. En particular, se requeriría tener más instrumentos de medición en el Canal de Cozumel y en su zona exterior pero con la finalidad de obtener los diferentes rangos de velocidades de la corriente y las horas anuales. Con estos datos y la ubicación de los instrumentos se podría hacer una estimación con mayor certidumbre.

### **Gradiente salino.**

El área de oportunidad en gradiente salino es que no existe un estudio completo sobre el Río Hondo y sus tributarios. Ni su hidrodinámica ni su batimetría se encuentran completas en ningún estudio. Lo mismo sucede con sus características termofísicas y Limnología en general.

### **Posibilidad ambiental.**

Actualmente para las tecnologías de aprovechamiento de la energía del océano los estudios ambientales son fundamentales para seguir adelante con un proyecto de esta índole. Sin embargo, como cada región es diferente, esos estudios servirían como referencias. Es decir que los estudios ambientales serían indispensables si se quisiera instalar algún dispositivo.

#### IV. LITERATURA CITADA.

1. Alatorre Mendieta Miguel Ángel (2003). Sistema de bombeo de agua marina utilizando la energía del oleaje y marea. Tesis, para obtener el Grado de doctor en Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de ingeniería.
2. Álvarez Legorreta Teresa (2007). Monitoreo de la Calidad del Agua de la Bahía de Chetumal y el RH. Informe técnico final. Clave del Proyecto: QR00-2003-001-12703. CONACYT-COQCYT-Fondos Mixtos.
3. Álvarez Legorreta, Teresa (1999). En Smith, S.V. J.I. Marshall Crossland and C.J. Crossland (edit) Mexican and central American coastal lagoon systems: carbon, nitrogen and phosphorous fluxes (regional workshop II) LOICZ report & studies N° 13, ii + 115 pp. LOICZ IPO, Texel, The Netherlands.
4. Amante, C. and B. W. Eakins, (2009). ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis. NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24, 19 pp., March 2009.
5. ASOCEAN (2011). Boletín electrónico. Asociación de Oceanólogos de México (ASOCEAN). No. 15 Mayo 2011. Liga: <http://www.asocean.org/boletin/boletin-15.htm>
6. Athié G., Candela J., Sheinbaum J., Badan A., Ochoa J. (2011). Estructura de la corriente de Yucatán en los canales de Cozumel y Yucatán. CISESE Ciencias Marinas (2011), 37(4A): 471–492.
7. Atlas of UK Marine Renewable Energy Resources (2008). Department for Business Enterprise and Regulatory reform (BEER). Producido por ABPmer the Met Office Proudman Oceanographic Laboratory. En: [http://www.renewables-atlas.info/downloads/documents/Renewable\\_Atlas\\_Pages\\_A4\\_April08.pdf](http://www.renewables-atlas.info/downloads/documents/Renewable_Atlas_Pages_A4_April08.pdf)
8. Aviña Jiménez, Miguel Héctor (2007). Factibilidad de instalar una planta OTEC (conversión de la energía térmica del océano) en las costas de México. Tesis de grado Ingeniero Mecánico, Instituto de Ingeniería, Universidad Autónoma Nacional de México.
9. Badán Candela, J. Sheinbaum and J. Ochoa (2005). Upper-layer Circulation in the Approaches to Yucatan Channel. Geophysical Monograph Series, American Geophysical union.
10. Benítez, Jorge A. (2010). Situación actual de las cuencas de los ríos Candelaria y Hondo. pp. 203- 209. En Las cuencas hidrográficas de México: Diagnóstico y priorización, primera edición. Coordinadora Helena Cottler Ávalos. Instituto Nacional de Ecología, SEMARNAT - Fundación Gonzalo Río Arronte I.A.P., México D.F., 231 p.
11. BGR Annual Report (2009). Hilmar Rempel, Sandro Schmidt y Ulrich Schwarz-Scampera (2009). Reserves, Resources and Availability of Energy Resources hasta 31 de diciembre de 2008. Federal Institute for Geosciences and Natural Resources. Hanover Germany. En: [www.bgr.bund.de](http://www.bgr.bund.de)
12. Bozec Alexandra (2013). página personal: <http://coaps.fsu.edu/~abozec/Welcome.html>, PhD, Physical Oceanography, Assistant Research Scientist Center for Ocean-Atmospheric Prediction Studies Florida State University. Contacto: [abozec@coaps.fsu.edu](mailto:abozec@coaps.fsu.edu)
13. Bozec, A.; Hanson, H.P.; Duerr, A.E.S. (2010). Power Availability in the Florida Current and Impact of its Extraction on the Gulf Stream [Presentation]. Presented at the American Geophysical Union, Fall Meeting, San Francisco, California, USA.
14. Bregman, R. Knapp, R.H. Takahasi P.K. (1995) Design considerations for ocean energy resource systems. University of Hawaii. OCEANS '95. MTS/IEEE. Challenges of Our Changing Global Environment. Conference Proceedings. 1084-1091 vol 2. en: <http://ieeexplore.ieee.org>
15. Brown Jean (1989) Waves, tides and shallow- Water Processes. Open University Course Team. Publicación con Pergamon Press. Gran Bretaña.
16. Calero Quesada C., Carlos Sánchez J. Garrido García Lafuente, J. (2011) Mapa de flujos de energía en el Estrecho de Gibraltar para su aprovechamiento como fuente de energías renovables. Informe final de Proyecto de Excelencia FLEGER (RNM-3738). Grupo de Oceanografía Física (GOFIMA) Universidad de Málaga. Liga: <http://oceanos.uma.es/proyectosref.php?Id=5&i=1>
17. Canadian Hydraulics Centre (2006). Inventory of Canadian Marine Renewable Energy Resources A. Cornett CHC-TR-041 April 2006. En: [http://oreg.ca/web\\_documents/chc-tr-041.pdf](http://oreg.ca/web_documents/chc-tr-041.pdf)
18. Cartwright D. E., Longuet-Higgins M. S. (1956). The Statistical Distribution of the Maxima of a Random Function. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, Vol. 237, No. 1209. (Oct. 9, 1956), pp. 212-232.

19. Carrillo Laura, Palacios Hernandez Emilio, Yescas Mario, Ramirez Manguilar Ana M. (2009) Spatial and Seasonal Patterns of Salinity in a Large and Shallow Tropical Estuary of the Western Caribbean. *Estuaries and Coasts* 32:906–916 DOI 10.1007/s12237-009-9196-2
20. Centro Nacional de Prevención de Desastres CENAPRED (2013). Atlas climatológico de ciclones tropicales en México. Rosengaus Moshinsky, Michel; Jiménez Espinosa, Martín; Vázquez Conde, María Teresa (2002). LIGA: <http://www.cenapred.gob.mx/es/Investigacion/RHidrometeorologicos/FenomenosMeteorologicos/CiclonesTropicales>
21. Cetina, J. Candela, J. Sheinbaum, J. Ochoa, and A. Badan (2006). Circulation along the Mexican Caribbean coast. *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, VOL. 111, C08021, doi:10.1029/2005JC003056, 2006.
22. Comisión Federal de Electricidad (2009). Programa de Obras e Inversiones del Sector Eléctrico 2012-2026.
23. Charlier R. H. & Finkl C. W. (2009) *Ocean Energy: Tide and Tide Power*. Springer- Verlag Berlin Heidelberg. Berlin. Versión en línea: <http://es.scribd.com/doc/40243499/Ocean-Energy-Tide-and-Tidal-Power>.
24. Charlier, R. H., (1969). Tidal energy, *Sea Frontiers*. XVI, 6, 339–348.
25. Chavez, G., J. Candela, and J. Ochoa (2003). Subinertial flows and transports in Cozumel Channel, *J. Geophys. Res.*, 108(0), XXXX, doi:10.1029/2002JC001456.
26. Chen Falin (2010). Kuroshio power plant development plan. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Volume 14, Issue 9, December 2010, Pages 2655–2668 <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.070>
27. Clément *et al.* (2002). Wave energy in Europe: current status and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 6 (5): 405–431. doi:10.1016/S1364-0321(02)00009-6.
28. CIESE (2012) Gaceta TODOS@CIESE. Liga: <http://gaceta2.cicese.mx/>
29. Cifuentes Lemus, J.L., P. Torres García & M. Frias. (1990). El océano y sus recursos, X Pesquerías. Fondo Cult. Econ. México, D.F. 228 p.
30. Comisión Nacional del Agua CNA (2011). Estadísticas del Agua en México, edición 2011. Comisión Nacional del Agua, México. En: [www.conagua.gob.mx](http://www.conagua.gob.mx)
31. CONABIO (2011). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Portal de Geoinformación Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad. En: [http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=gis\\_root/biodiv/monmang/manglegw](http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=gis_root/biodiv/monmang/manglegw)
32. CONACYT (2009). Fondo CONACYT-SENER Sustentabilidad/Energética-Conv.2009-01 <http://www.conacyt.gob.mx/fondos/FondosSectoriales/SENER/SustentabilidadEnergetica/200901/Fichas.pdf>
33. CONAGUA (2011). Estadísticas del Agua en México, edición 2011. Página oficial de la Comisión Nacional del Agua. Liga: [www.conagua.gob.mx/](http://www.conagua.gob.mx/)
34. CONANP (2013). Comisión Nacional de áreas Naturales Protegidas. Página oficial en: <http://www.conanp.gob.mx/regionales/>
35. Duerr, A. E. S., & Dhanak, M. R. (2010). Hydrokinetic power resource assessment of the Florida Current. In *OCEANS 2010* (pp. 1-7). IEEE.
36. Fernandez Eguiarte A., J. Zavala-Hidalgo, R. Romero-Centeno (2013). Atlas Climático Digital de México. Centro de Ciencias de la Atmósfera. Universidad Nacional Autónoma de México.
37. Fuentes Mariles O. y Franco V. (sa) Estudio hidrológico para obras de protección. Cap. 3, Manual de ingeniería de Ríos, IINGEN UNAM. [http://cenca.imta.mx/index.php?option=com\\_content&view=article&id=1545:manual-de-ingenieria-de-rios&catid=89:principal](http://cenca.imta.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=1545:manual-de-ingenieria-de-rios&catid=89:principal)
38. Gaja Ferrer, Santiago (2007) Características y modelación numérica del oleaje en dos regiones costeras del Caribe mexicano: Playa del Carmen y Akumal. Grado de Maestro en Ciencias del Mar y Limnología, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología UNAM.
39. Gallegos, A. y Czitrom, S. (1997). Aspectos de la oceanografía física regional del Mar Caribe, en: M.F: Lavín, editor, Contribuciones a la Oceanografía física de México, Monografía N° 3, Unión Geofísica Mexicana, p. 225-242.
40. Gerstandt Karen, Peinemann K.-V., Skilhagen Stein Erik, Thorsen Thor, Holt Torleif (2008). Membrane processes in energy supply for an osmotic power plant. *Desalination* 01/2008; DOI:10.1016/j.desal.2007.02.080
41. Gibrat R. (1963). L'énergie des mers. Paris: Presses Universitaires de France. Rev. Franc. de l'Énergie 1966;183:660–84.

42. Guy Z. Ramon, Benjamin J. Feinberg and Eric M. V. Hoek (2011) Membrane-based production of salinity-gradient power. *Energy & Environmental Science*. DOI: 10.1039/c1ee01913a
43. Gyory Joanna, Arthur J. Mariano, Edward H. Ryan (2013). "The Yucatan Current." *Ocean Surface Currents*. Liga: <http://oceancurrents.rsmas.miami.edu/caribbean/yucatan.html>.
44. Hanson Howard P., Susan H. Skemp, Gabriel M. Alsenas, Camille E. Coley, (2010). Power from the Florida Current: A New Perspective on an Old Vision. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 91, 861–866. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/2010BAMS3021.1>
45. Hiriart Le Bert, Gerardo. (2009). Potencial energético del Alto Golfo de California. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 61(1), 143-146. Recuperado en 24 de octubre de 2013, de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-33222009000100014&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-33222009000100014&lng=es&tlng=es).
46. ICMyL (2013) Instituto de Ciencias del Mar y Limnología. <http://www.fenomec.unam.mx/SIBEO/sibeo.html>
47. IEA OES (2003). *Ocean Energy Systems Annex II Report 2003. Implementing Agreement on Ocean Energy Systems*.
48. IEA-OES (2011). *International Energy Agency /Ocean Energy Systems*. Liga: [http://www.ocean-energy-systems.org/ocean\\_energy/](http://www.ocean-energy-systems.org/ocean_energy/)
49. Instituto de Nacional de Ecología (2011). Sistema de Consulta de las Cuencas hidrográficas de México (2011) En: <http://cuencas.ine.gob.mx/cuenca/>
50. INEGI (2011). El Mapa Digital de México V 5.0 (2011) Instituto Nacional de geografía y Estadística por: <http://gaia.inegi.org.mx/mdm5/>
51. INEGI-IBCCA (2000). Datos Vectoriales de la Carta Batimétrica Internacional del Mar Caribe y Golfo de México. Hoja 1-06, en formato digital escala 1:1000,000, proyección cartográfica normal de mercator y sistema geodésico de referencia WGS-84. México.
52. La Revista Peninsular (2010) CONAGUA Quintana Roo realizará estudios a RH Colegio de la Frontera Sur. Noticias en línea del Lunes, 13 de Diciembre de 2010 13:37 en: <http://www.larevista.com.mx/noticias/conagua-quintana-roo-realizara-estudios-rio-hondo-19857/>
53. Löhnberg Alfred (1960). Energía térmica del mar Banco Chinchorro, Quintana Roo. México. Enviado por la Base de datos de la Biblioteca del Archivo Histórico del Agua (AHA).
54. López González, J., Hiriart Le Bert, G., & Silva Casarín, R. (2010). Cuantificación de energía de una planta mareomotriz. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 11(2), 233-245. Recuperado en 24 de octubre de 2013, de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-77432010000200009&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-77432010000200009&lng=es&tlng=es).
55. López González J., Mendoza Ponce T., y Salles Afonso de Almeida P. (2012). Problemáticas y recomendaciones sobre las tecnologías de aprovechamiento de energías oceánicas. *Tecnología: Corrientes Oceánicas*. Programa de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Sustentabilidad Energética. Editado por Alianza FIDEM. A.C. *Proyectos de Investigación en Energías Oceánicas*-. Instituto de Ingeniería UNAM.
56. .MARERSA (2013). Página oficial del Grupo: <http://www.energiarenovablemareomotriz.com/>
57. Méndez Ramírez Ignacio, Namihira Guerrero Delia, Moreno Altamirano Laura, Sosa de Martínez Cristina (1990). El protocolo de investigación. Trillas México.
58. Mosonyi E. (1963) Utilizable power in seas and oceans. In *Water power development I*, chapter 4, Moscow, State Publishing House.
59. Nielsen, K. (2010) Report TO2-0.0 Development of recommended practices for testing and evaluating ocean energy Systems, OES-IA Annex II Extension summary report.
60. NIOT (2011). National Institute of Ocean Technology. Liga: [www.niot.res.in](http://www.niot.res.in)
61. NOAA (2013). National Oceanic Atmospheric Administration Liga: <http://www.noaa.gov/>
62. NOAA-OER (2011). Proyecto Costa Escondida Maritime Maya 2011 Expedition, (Exploración Oceánica e Investigación). Liga: <http://www.vistaalmar.es/ciencia-tecnologia/barcos/1584-exploran-oculto-mundo-marino-mayas.html>
63. NODC (2013). National Oceanographic Data Center. Liga: <http://www.nodc.noaa.gov>
64. NDBC (2013). National Data Buoy Center. Liga: <http://www.ndbc.noaa.gov>
65. NGDC (2013). National Geophysical Data Center. Liga: <http://www.ngdc.noaa.gov>
66. North American Ocean Energy Status (2007). Electric Power Research Institute U.S.A. (EPRI) Bedard R. Previsic M. Hagerman G. Polagye B. Musial W. Klure J. von Jouanne A. Mathur U. Collar C. Hopper C. Amsden S.
67. Oficina Española de Patentes y Marcas España (2008) Generador de energía eléctrica por transformación de la energía de las olas con convertidor a movimiento continuo ("GETEOCMC"). Fecha de publicación del folleto de la patente: 16.04.2008.

68. Oort Abraham H., Ascher Stephen C., Levitus Sydney, and Peixóto José (1989). New Estimates of the Available Potential Energy in the World Ocean. *Journal of Geophysical Research*, vol. 94, No. C3, Pages 3187-3200, March 15, 1989
69. Petróleos Mexicanos PEMEX (2010). Las Reservas de Hidrocarburos de México. Petróleos Mexicanos Exploración y Producción. México.
70. Peña Fierro Sergio y Sánchez Vega Alejandro D. (2004). Disponibilidad de agua superficial en la cuenca transfronteriza del RH-subcuenca Río Escondido, Quintana Roo. P. 40. Edith F. Kauffer Michel (Editora). La frontera México-Guatemala-Belice. Primera edición. México.
71. Pérez Peña, Abril Ichel (2013). Estimación del clima marítimo y la energía del oleaje disponible en las costas mexicanas.
72. Perry, G. D. Duffy, P. B. and Miller, N. L. (1996). An extended data set of river discharges for validation of general circulation models. Paper number 96JD00932. American Geophysical Union. En: <ftp://ftp.agu.org/apend/jd/96JD00932/all-data.txt>
73. Planas Juan Manuel (1930). La obra de Georges Claude. *Revista de la Sociedad Geográfica de Cuba*, III (4): oct.-dic. En:  
<http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Energia/Energia49/HTML/Articulo14.html>  
<http://blog.modernmechanix.com/harnessing-the-power-of-the-sun/#more-3225>  
<http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Energia/Energia46/HTML/Articulo07.htm>  
<http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Energia/Energia49/HTML/Articulo14.html>
74. Power Group México (2012). Manifestación de impacto ambiental, modalidad regional, Parque Eólico Cozumel. México. Liga:  
<http://sinat.semarnat.gob.mx/dgiraDocs/documentos/qroo/estudios/2012/23QR2012E0010.pdf>
75. Programa de Obras e Inversiones del Sector Eléctrico POISE, CFE (2013).
76. IMPULSA (2005). Proyecto de Investigación Multidisciplinaria de Proyectos Universitarios de Liderazgo y Superación Académica. Liga: <http://www.iingen.unam.mx/es-mx/SitiosWeb/Proyectos/Impulsa4/Paginas/default.aspx>
77. Redden A.M., Percy J.A., Wells P.G., and Rolston S.J. Eds (2009). Resource development and its implications in the Bay of Fundy and Gulf of Maine. *Proceedings of the 8th BoFEP Bay of Fundy Science Workshop, Acadia University, Wolfville, Nova Scotia, 26-29th May 2009. Bay of Fundy Ecosystem Partnership Technical Report No 4. Bay of Fundy Ecosystem Partnership, Wolfville, NS. 392 p.*
78. Rivillas Ospina Germán Daniel (2008). Re-análisis de oleaje para México: 1948-2007 / Tesis grado de Maestro en Ingeniería Civil. Instituto de Ingeniería UNAM.
79. Saldívar Urquiza Gaffie y Medina Ríos Aurelio (2009). Generación de energía basada en recursos Oceánicos: Aprovechamiento de las mareas en México. Posgrado en Ingeniería Eléctrica Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Presentación en la Semana Nacional de Energía Solar de la ANES. 45 p. Liga:  
<http://www.yumpu.com/es/document/view/14270171/generacion-de-energia-basada-en-recursos-anes-michoacan>
80. Sánchez Alberto et al (2008) Distribución de parámetros texturales de los sedimentos superficiales en la Bahía de Chetumal: Implicaciones en la inferencia de transporte. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 25, núm. 3, 2008, p. 523-532, México.
81. Secretariat of the World Meteorological Organization (1998). *Guide to wave analysis and forecasting, second edition*– Geneva – Switzerland. WMO-No. 702
82. SEMAR (2012) Secretaría de Marina. Sitios Oficial de la Secretaría de Marina-Armada de México. Liga: [www.semar.gob.mx/](http://www.semar.gob.mx/)
83. Secretaría Nacional de Energía SENER (2011). *Estrategia Nacional de Energía*. Secretaría de Energía México febrero 2011.
84. Sentinel S. C. (1898). El diario *The Washington Post* 09 de octubre 1910 edición, con fotografías. en *Central Coast Secrets 2011*. Liga: <http://www.sandylydon.com/index.html> y <http://www.outsidelands.org/wave-motor2.php>
85. Sheinbaum J. Candela J. Bdan A. Ochoa J. (2002). Flow structure and transport in the Yucatan Channel. *Geophysical Research Letters*, Vol. 29, No. 0, 10.1029/2001GL013990.
86. SIATL-INEGI (2010). Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas, En: [http://antares.inegi.org.mx/analisis/red\\_hidro/SIATL/index.html](http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/SIATL/index.html)
87. Silva Casarín Rodolfo (2005). Análisis y descripción estadística del oleaje. Instituto de Ingeniería Serie Docencia/49 UNAM, México.
88. Silveira Cláudia (2008). Moulins à Marée de l'Europe Occidentale. *Exposition Moulins à Marée d'Europe Occidentale*. Portugal. Liga: <https://sites.google.com/site/molinosdemarea/>



89. SIGER (2012). Sistema de Información Geográfica para las Energías Renovables en México. Liga: <http://www.iie.org.mx/mapas>
90. Skilhagen, S. E. Dugstad J. E. Aaberg, R. J. (2008). Osmotic power - power production based on the osmotic pressure difference between waters with varying salt gradients. *Desalination* 220 (2008) 476-482. En:<http://desline.com/articoli/8928.pdf>, datos adicionales en: <http://gwri-ic.technion.ac.il/pdf/IDS/384.pdf>
91. Skilhagen, S. E. (2010) Osmotic power-a new, renewable energy source. 11th Annual IDS Conference "Osmotic Processes-Past, Present and Future. *Desalination and Water Treatment* 15 (2010) 271-278 doi:10.5004/dwt.2010.1759 en: [www.deswater.com](http://www.deswater.com)
92. Smalley R. (2003). Top ten problems of humanity for next 50 years", Proc. Energy and NanoTechnology Conference, Rice University, May 3, 2003.
93. Spain R. (2002). A Possible Roman Tide Mill," Paper 005, Kent Archaeological Society. Liga: <http://www.kentarchaeology.ac/authors/rspain.html>
94. Stewart, Robert H. (2008). Introduction To Physical Oceanography. p 51. 2008 Edition Texas A & M University Department of Oceanography.USA.
95. Sverdrup Keith, Armbrust Virginia (2005). Introduction to the World's Oceans 8th ed. MCGrawHill.
96. Thorpe T. W. (1999). An Overview of Wave Energy Technologies: Status, Performance and Costs. *Wave Power: Moving towards Commercial Viability*, Broadway House, Westminster, London. ETSU, B 154.
97. Torres-Freyermuth A., Appendini Albrechtsen C.M., Salles Afonso de Almeida P. (2012). Problemáticas y recomendaciones sobre las tecnologías de aprovechamiento de energías oceánicas; Tecnología: Oleaje. En "Actualización del Programa de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Sustentabilidad Energética. Editado por Alianza FIDEM. A.C Laboratorio de Ingeniería y Procesos Costeros-LIPC-. Instituto de Ingeniería UNAM.
98. Uh Us Freddy (2010). Evaluación de cauces a través de parámetros fluviales. Tesis Recepcional para obtener el grado de Maestro en Ingeniería Hidráulica por la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México. 83 p.
99. UNESCO/SCOR/ICES/IAPSO (1983). Algoritmo para la obtención de la densidad relativa del agua de mar. N.P. Fofonoff & R.C. Millard Jr. Joint Panel on Oceanographic Tables and Standards and SCOR Working Group 51.
100. Vega Luis .A. (1999) OTEC overview, *Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC)*. Liga: <http://www.otecnews.org/portal/otec-articles/>
101. Vega, Luis. A. (2010). OTEC Environmental Impact: Historical Perspective. Presentación en el taller impartido en el Coastal Response Research Center (CRRC) titulado: OTEC: Assessing Potential Physical, Chemical and Biological Impacts and Risks. junio 22-24, 2010. En: [http://www.crrc.unh.edu/workshops/otec\\_2/](http://www.crrc.unh.edu/workshops/otec_2/)
102. Wetzel Robert G., Likens Gene E. (2000) *Limnological analyses*. Third Edition. Springer. p 429
103. World Energy Outlook 2010. Resumen Ejecutivo en español. Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos/ International Energy Agency OECD/IEA Francia. Online en: [http://www.iea.org/weo/docs/weo2010/weo2010\\_es\\_spanish.pdf](http://www.iea.org/weo/docs/weo2010/weo2010_es_spanish.pdf)
104. World Meteorological Organization (1998). Guide to wave analysis and forecasting 2nd edition. WMO-No. 702. Secretariat of the World Meteorological Organization. Geneva, Switzerland
105. Xiufeng Yang, Kevin A. Haas, Hermann M. Fritz (2012). Ocean Current Energy Assessment for the Gulf Stream. 4th Annual Marine Renewable Energy Technical Conference Oct 30-31, 2012 Providence/Warwick, Rhode Island.

## V. SIMBOLOGÍA Y UNIDADES MÉTRICAS DE LAS VARIABLES.

$A$  = Área (en  $m^2$  ó  $km^2$ )  
 $A_c$  = área de la cuenca ( $m^2$ )  
 $A_T$  = área perpendicular a la corriente del río ( $m^2$ )  
 $a$  = coeficiente de acuerdo al sedimento (rugoso=0.8; suave= 0.9 como fango o barro)  
 $C$  = coeficiente de escorrentía o de la envolvente (Adimensional)  
 $c$  = la concentración de NaCl ( $mol \cdot L^{-1}$ )  
 $C$  = capacidad calorífica ( $J \cdot (m^3 \cdot ^\circ C)^{-1}$ )  
 $c_p$  = calor específico  $J \cdot (kg \cdot ^\circ C)^{-1}$   
 $C_p$  = coeficiente de potencia= 16/27 para una turbina ideal  
 $d$  = profundidad media (m)  
 $df = \Delta f$  = Es el incremento de frecuencia (Hz)  
 $E_{(h)}$  = energía de la ola en función de la profundidad ( $J \cdot m^{-1}$ )  
 $F$  = frecuencia de lluvias o periodo de retorno (tabla de frecuencia de lluvia o de diseño)  
 $f_i$  = frecuencia i- esima (Hz)  
 $g$  = aceleración de gravedad ( $m \cdot s^{-2}$ )  
 $h$  = altura de la columna de agua (m)  
 $H$  = rango de marea (m)  
 $h_n$  = amplitud de las diferentes componentes de marea (m)  
 $h_o$  = altura media (m)  
 $H_{rms}$  = Altura de ola cuadrática media (m)  
 $H_s = Hm_0$  = Altura de ola de orden cero o Altura significativa (m)  
 $i$  = intensidad de la lluvia que es igual generalmente al tiempo de concentración, en  $mm \cdot h^{-1}$   
 $I$  = promedio de la intensidad de la lluvia ( $mm \cdot h^{-1}$ )  
 $j$  = constante derivadas de una análisis de regresión lineal de datos reales (Adimensional)  
 $K$  = factor que varía de (1,92 y 1,97)  
 $l$  = distancia recorrida por el flotador (m)  
 $m$  = constante, valores para ríos del NE de USA (0.6- 0.7) (Adimensional)  
 $m_0$  = momento espectral cero ( $m^2$ )  
 $m_1$  = primer momento espectral ( $m^2 Hz$ )  
 $m_2$  = segundo momento espectral ( $m^2 Hz^2$ )  
 $m_3$  = tercer momento espectral ( $m^2 Hz^3$ )  
 $m_4$  = cuarto momento espectral ( $m^2 Hz^4$ )  
 $n$  = número de datos de la muestra;  
 $N$  = número de frecuencias de marea consideradas.  
 $P$  = potencia (W)  
 $p$  = presión hidrostática ( $N \cdot m^{-2} = Pa$ )  
 $P_{e(Q,H)}$  = potencia eléctrica en función del caudal y el rango de marea (W)  
 $P_w$  = potencia por metro lineal de ola.  
 $Q$  = Flujo volumétrico ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )  
 $q$  = flujo volumétrico por kilómetro cuadrado de cuenca ( $m^3 \cdot s^{-1} \cdot km^{-2}$ )  
 $Q_{1,2}$  la transferencia de calor de la masa de agua 1 a la masa de agua 2  
 $Q_{2,1}$ , = transferencia de calor que recibe la masa 2 de la masa 1.  
 $Q_p$  = flujo volumétrico pico máximo del río ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )  
 $Q_p$  = Agudeza del pico de Goda 1985 (Adimensional)  
 $R$  = es la constante de los gases =  $8.314472 J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1} = 0,082 atm \cdot L \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$   
 $R=H$  = el rango promedio de la marea equinoccial (m).  
 $T$ , la temperatura absoluta (K)  
 $t$  = tiempo (s)  
 $T_{01}$  = Periodo medio (s)  
 $T_{02}$  = periodo medio (s)  
 $T_e$  = Periodo de energía (s)  
 $T_{n,2}$  = temperatura final al mezclarse ambas masas de agua.  
 $T_p$  = Periodo pico (s)  
 $v$  = velocidad del flujo (m/s)  
 $V$  = Volumen (en  $m^3$  ó  $km^3$ )  
 $V_d$  = volumen promedio anual debido a la precipitación pluvial en una la cuenca ( $km^3 \cdot año^{-1}$ )  
 $V_d$  = volumen promedio anual de agua disponible de lluvias en la cuenca ( $hm^3$ )  
 $w$  = ancho del río sección transversal (m)

$X_i$  = iésimo valor de la magnitud  
 $z$  = profundidad (m)  
 $\alpha$  = es el error aleatorio o nivel de significación (Adimensional)  
 $\alpha_n$  = fase (rad)  
 $\delta$  = discrepancia o error con respecto a la media  
 $\varepsilon$  = Anchura espectral de Cartwright y Lounguet- Higgins (1956)  
 $\eta$  = eficiencia de la turbina hidráulica, acople mecánico y generador eléctrico (Adimensional).  
 $\eta_G$  = eficiencia de conversión del generador (Adimensional).  
 $\eta_M$  = eficiencia de conversión del acople mecánico turbina generador (Adimensional).  
 $H_{rms}$  = Variación cuadrática media de la superficie libre (m)  
 $\eta_T$  = eficiencia de conversión de la turbina (Adimensional).  
 $\lambda$  longitud de onda (m)  
 $v$  = Anchura espectral de momentos de orden inferior de Lounguet- Higgins (1983)  
 $\rho$  = es la densidad media del agua de mar ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )  
 $\omega_n$  = velocidad angular ( $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ )

## VI. ACRÓNIMOS USADOS.

AHA= Archivo Histórico del Agua.  
 ASOCEAN= Asociación de Oceanólogos de México, AC.  
 BGR= Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Federal Institute for Geosciences and Natural Resources.  
 CENAPRED= Centro Nacional de Prevención de Desastres.  
 CFE= Comisión Federal de Electricidad.  
 CHC =Canadian Hydraulics Centre.  
 CICESE= Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California.  
 CICY= Centro de Investigaciones Científicas de Yucatán.  
 CIE= Centro de Investigaciones en Energía de la UNAM.  
 CINVESTAV = Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional.  
 COI = Comisión Oceanográfica Intergubernamental de la UNESCO.  
 CONABIO =Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.  
 CONACYT = Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.  
 CONAGUA =Comisión Nacional del Agua.  
 IBCCA= Batimetría Internacional del Mar Caribe y Golfo de México.  
 ICMYL= Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM.  
 IEA = International Energy Agency.  
 IIE= Instituto de Investigaciones Eléctricas.  
 IINGEN= Instituto de Ingeniería de la UNAM.  
 IMTA= Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.  
 INE= Instituto de Nacional de Ecología.  
 INEGI=Instituto Nacional de Estadística y Geografía.  
 INEGI-IBCCA= Carta Batimétrica Internacional del Mar Caribe y Golfo de México del INEGI.  
 IODE= International Oceanographic Data and Information Exchange.  
 IPN = Instituto Politécnico Nacional.  
 ITC= Instituto Tecnológico de Cancún.  
 LEARS= laboratorio de Energía Alterna, Renovable y Sostenible.  
 MARERSA= Mareomotrices de Energías Renovables, S.A. de C.V.  
 NDBC = National Data Buoy Center de la NOAA.  
 NGDC = National Geophysical Data Center de la NOAA.  
 NOAA = National Oceanic Atmospheric Administration.  
 NODC = National Oceanographic Data Center de la NOAA.  
 OECD= Organisation for Economic Co-operation and Development.  
 OES= Ocean Energy Systems.  
 POISE=Programa de Obras e Inversiones del Sector Eléctrico.  
 SARH= Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos.  
 SEMAR= Secretaría de Marina.  
 SENER=Secretaría de Energías.  
 SIGER =Sistema de Información Geográfica para las Energías Renovables en México.  
 UABC= Universidad Autónoma de Baja California.  
 UAG= Universidad Autónoma de Guadalajara.

UAM= Universidad Autónoma Metropolitana.  
UNICARIBE= Universidad del Caribe.  
UNAM= Universidad Nacional Autónoma de México.  
UNIATMOS = Unidad de Informática para las Ciencias Atmosféricas y Ambientales.  
UQROO= Universidad de Quintana Roo.

## VII. ABREVIACIONES USADAS.

ACAN; El Agua Central del Atlántico Noroccidental.  
ACDM = Atlas Climático Digital de México.  
ADCP= Acoustic Doppler Current Profiler.  
AIA; El Agua intermedia del Antártico.  
AICAS Áreas de Importancia para la Conservación de las Aves.  
AM; La zona de mezcla.  
ANP'S Áreas Naturales Protegidas.  
APAN; El agua Profunda del Atlántico Norte.  
ASSAN; Agua Subsuperficial del Atlántico Norte.  
CTD= Conductivity, Temperature, Depth.  
DesCEO= Diseño y desarrollo de convertidores de energía del oleaje.  
FV= Fotovoltaica.  
GPS= Sistema de Posicionamiento Global.  
MX= México.  
OTEC= ocean thermal Energy conversion.  
R&F= Rise and fall.  
REALco =Sistema Renovador de Agua de Lagunas Costeras.  
RH= Rio Hondo.  
SIATL-INEGI = Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas.  
SIBEO= Sistema de Bombeo por Energía de Oleaje.  
SIG= sistema de información geográfica.  
TISEC= tidal in stream energy conversión.  
UK= United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland.  
USA = United States of America.  
WEC wave Energy Conversion.  
WGS-84= World Geodetic System (sistema geodésico de referencia).  
WOD=World Ocean Database.  
XBT= expendable bathythermograph.  
ZEE= Zona Económica Exclusiva.  
1P = reservas probadas de petróleo en Mega toneladas de petróleo (Mt)  
2P= reservas probables en Mega toneladas de petróleo (Mt)  
3P=Reservas posibles en Mega toneladas de petróleo (Mt)  
EJ= Exa Joules= $10^{18}$  J.  
GWh-año Giga Watts hora año.  
MMBD = millones de barriles de petróleo diarios.  
MMPCD =millones de pies cúbicos diarios de gas natural  
Mt= mega toneladas de petróleo.  
Mtep= Mega toneladas equivalentes de petróleo;  
Mtep= Mega toneladas equivalentes de petróleo;  
MWe= Mega Watts eléctricos.  
PJ = Peta Joules.  
PJ= Peta Joules=  $10^{15}$  W.  
Sv= Sverdrup, unidad de flujo volumétrico= $10^6$  m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>  
TWh= Tera Watt hora=  $10^{12}$  Wh.  
Ups= Unidades practicas de salinidad

<b>VIII. LISTA DE FIGURAS.</b>	<b>Página</b>
<b>Figura I.1</b> Potencial energético estimado de las principales formas de energía del océano.	1
<b>Figura I.2</b> Participación de tecnologías en la capacidad de generación sector eléctrico mexicano para el año 2010 y el proyectado al 2026.	2
<b>Figura I.3</b> Generación bruta real para el sistema eléctrico mexicano para el año 2010 y el planeado al 2026	2
<b>Figura II.1.</b> Área de estudio en rojo que comprende en su totalidad la Zona Económica Exclusiva del Caribe y parte de la subprovincia V de banco de Campeche. Las líneas en tonalidades azules son las isobatas (Hoja 1-06, en formato digital, INEGI 2011)	4
<b>Figura III.2</b> Mapa solar de radiación directa en horas pico	7
<b>Figura III.3</b> Mapa recurso eólico promedio anual	8
<b>Figura 1.1.</b> Wave Motor de los Hermanos Armstrong, en Santa Cruz California USA, año 1898	9
<b>Figura 1.2.</b> Batimetría del Mar Caribe isobatas de 0 a 50 metros de profundidad en gris en 5 cuadrantes	11
<b>Figura 1.3.</b> Línea de costa Cabo Catoche a Tulúm. En rojo expuesta al oleaje franco, en verde efecto de sombreado de oleaje y en líneas blancas las ANP's Arrecifes de Tulúm, Cozumel, Puerto Morelos, Punta Cancún y Nizuc, costa occidental de Isla Mujeres, Isla Contoy	13
<b>Figura 1.4.</b> Línea de costa Tulúm- Xcalac. En rojo expuesta al oleaje franco, en verde efecto de posible sombreado de oleaje y en líneas blancas las ANP's Arrecifes de Xcalac, Banco Chinchorro, Sian Ka'an	13
<b>Figura 1.5.</b> Rosas de oleaje, para Akumal, Playa del Carmen y Cancún	14
<b>Figura 1.6.</b> La estación 42056 y su ubicación en el Mar Caribe a 222 km de distancia desde la costa ESE de la Isla de Cozumel	15
<b>Figura 1.7.</b> Distribución de la potencia del oleaje y anchura espectral epsilon, con la ecuación de Cartwright y Lounguet- Higgins (1956) que incluye todos los datos de la boya Station 42056, para el periodo 2005-2012	18
<b>Figura 1.8.</b> Distribución de la potencia del oleaje y agudeza del pico de acuerdo a la ecuación de Goda (1985) de todos los datos de la boya Station 42056, para el periodo 2005-2012	19
<b>Figura 1.9.</b> Distribución de la potencia del oleaje en función del periodo de energía de todos los datos de la boya Station 42056, para el periodo 2005-2012	19
<b>Figura 1.10.</b> Distribución de la potencia del oleaje y su altura significativa asociada	19
<b>Figura 1.11.</b> Espectros mensuales promedio	20
<b>Figura 1.12.</b> Descripción del oleaje para la zona de la estación a 222 km de distancia desde la costa ESE de la Isla de Cozumel.	21
<b>Figura 1.13.</b> Potencia, periodo de energía y altura significativa promedio mensual y anual del oleaje para el periodo 2005 a 2012. Con la base de datos de la estación 42056 (LLNR 110) – Yucatán Basin-120NM ESE De la Isla de Cozumel; ubicación (19°48'6"N 84°51'24"W).	24
<b>Figura 1.14.</b> Dispersión de las potencias del oleaje (puntos negros) y los nombres de los huracanes que los originaron y secuencia histórica del acumulado de energía del oleaje que pasó por la boya de la NDBC en el periodo 2005-2012, en rojo. La línea punteada a los 200 kW/m indica el 88 % del acumulado de energía está en ese rango.	25
<b>Figura 1.15.</b> Acercamiento de la dispersión de las potencias del oleaje (puntos negros) y secuencia histórica del acumulado de energía en kWh/m del oleaje que pasó por la boya de la NDBC en el periodo 2005-2012, en rojo.	25
<b>Figura 1.16.</b> Resultados de los valores de potencia por metro de ola, diversas fuentes Tabla en anexo 4.	27
<b>Figura 2.1</b> Planta OTEC de ciclo abierto desarrollada por George Claude y Boucherot en Matanzas Cuba en 1930.	28
<b>Figura 2.2.</b> Estado actual de las instalaciones OTEC de 1930 en Matanzas Cuba.	29
<b>Figura 2.3.</b> Lugares propuestos para plantas OTEC en la Isla de Cozumel.	30
<b>Figura 2.4.</b> Gradiente de temperatura promedio entre 0 y 1000 metros de profundidad.	32
<b>Figura 2.5.</b> Dispersión de temperaturas con respecto a la profundidad de 292 lances de Batitermógrafo desechable XBT+ 12 lances de CTD.	33
<b>Figura 2.6.</b> Promedio y desviación estándar de los rangos de temperatura en cada profundidad.	34
<b>Figura 2.7.</b> Promedios mensuales de temperaturas con respecto a la profundidad.	36
<b>Figura 2.8.</b> Promedio anual de las temperaturas a profundidades estándar (círculos) La desviación estándar se aprecia en rombos.	36
<b>Figura 2.9</b> Variación promedio mensual de la temperatura a profundidades estándar, en base a 293 perfiles de temperatura con XBT en el Mar Caribe mexicano de los años 1980 a 2010.	37

<b>Figura 2.10.</b> Gradientes de temperatura promedio mensual de temperatura entre 10 y 700 metros de profundidad.	38
<b>Figura 2.11.</b> Batimetría de la ZEE y Zonas con potencial OTEC, las isobatas rosa en donde la profundidad está en el rango de 700 a 1000 metros. Los círculos amarillos representan los lugares OTEC con potencial. Isla de Cozumel, Punta Allen, Tulúm, Sian Ka'an, Xcalac, Mahahual y banco Chinchorro.	44
<b>Figura 2.12.</b> Zonas con potencial OTEC Isla de Cozumel.	45
<b>Figura 2.13.</b> Zonas con potencial OTEC Punta Allen y Tulúm.	45
<b>Figura 2.14.</b> Zonas con potencial OTEC Sian Ka'an Reserva de la biósfera.	46
<b>Figura 2.15.</b> Zonas con potencial OTEC Xcalac, Mahahual y banco Chinchorro.	46
<b>Figura 3.1.</b> Bahía de Chetumal y Río Hondo al fondo. Fuente: Dominio público.	47
<b>Figura 3.2.</b> Cuenca tripartita del Río Hondo en rojo y cuenca de Bacalar en verde.	50
<b>Figura 3.3.</b> Vista general de Río Hondo Y Tributarios, amarillo arroyo Ucum, verde Rio Agua Dulce y azul blanco y rojo el Río Hondo.	51
<b>Figura 3.4.</b> Detalle de los Arroyos desde la Laguna de Bacalar, en gris claro la subcuenca. Donde; C= constante de valor de la envolvente para el Río Hondo (Adimensional).	51
<b>Figura 3.5.</b> Envolvente mundial de Creager y q para el Río Hondo.	55
<b>Figura 3.6.</b> Representación estacional de la producción de energía de acuerdo al caudal y a los valores de salinidad y temperatura históricos que son función de la altura teórica generada por la presión osmótica.	61
<b>Figura 3.7.</b> Representación estacional de la producción de energía de acuerdo al caudal y la correlación con la precipitación pluvial en la zona.	61
<b>Figura 4.1.</b> Molino de marea en l'lle de Brehat, Bretaña, Francia.	62
<b>Figura 4.2.</b> Corriente de Yucatán representada por las trayectorias, velocidad y rumbo de Boyas a la deriva. Las velocidades están codificadas en púrpuras y azules oscuros (bajas velocidades); de verde a rosa (medias velocidades) y de más de $100\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ en negro.	65
<b>Figura 4. 3.</b> La dirección correspondiente (partida / rodamiento) de las boyas en grados respecto al norte ( $0/360^\circ$ ), que es de color azul oscuro. Debido al sur ( $180^\circ$ ) es de color rojo, mientras que el oeste ( $270^\circ$ ) es de color amarillo y el este ( $90^\circ$ ) es cian.	65
<b>Figura 4.4.</b> Densidad de potencia de la corriente para la corriente de Florida ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ) para el año 2008 y $27^\circ\text{N}$ de latitud.	66
<b>Figura 4.5.</b> Ejemplo del potencial energético unitario para el estrecho de Gibraltar.	67
<b>Figura 4.6.</b> Corriente de Kuroshio que pasa por Taiwán.	68
<b>Figura 4.7.</b> Batimetría del Canal de Cozumel y la posición de los ADCP. Cada isobata aumenta en 50 m.	69
<b>Figura 5.1.</b> Flujo de energía potencial de las mareas en un año y ciclo de 6.2 horas, en cuencas de $1\text{ km}^2$ a $20\text{ km}^2$ , y para rangos de marea de $H=0.5\text{m}$ hasta $H=6\text{m}$ .	74
<b>Figura 7.1</b> Ubicación de los lugares potenciales para el aprovechamiento de las energía oceánicas.	83

## IX. LISTA DE TABLAS.

	<b>Página</b>
<b>Tabla III.1</b> Sumario de parámetros técnicos del estado del arte de cada categoría y los parámetros obtenidos para el área de estudio.	6
<b>Tabla 1.1.</b> Datos necesarios para el cálculo del potencial de olas.	10
<b>Tabla 1.2.</b> ANP'S y AICA'S Caribe de México.	12
<b>Tabla 1.3.</b> Estadísticos de altura de ola significante y de potencia del oleaje de datos procesados.	22
<b>Tabla 1.4.</b> Horas de eventos extremos y su porcentaje de producción de energía $<100\text{ kW}\cdot\text{m}^{-1}$ .	22
<b>Tabla 1.5.</b> Producción de energía en el rango de $P_w$ 0 a $14\text{ kW}\cdot\text{m}^{-1}$ .	23
<b>Tabla 2.1.</b> Variables necesarias para el cálculo del potencial de OTEC.	29
<b>Tabla 2.2.</b> Lances de XBT y CTD, periodo 1980- 2010.	32
<b>Tabla 2.3.</b> Estadísticos generales de los datos analizados.	35
<b>Tabla 2.4.</b> Combinaciones de mezcla de las masas de agua del Caribe.	39
<b>Tabla 2.5.</b> Cálculo del Potencial teórico máximo disponible.	41
<b>Tabla 2.6.</b> Cálculos teóricos de la transferencia de calor entre las diferentes masas de agua.	41
<b>Tabla 2.8.</b> Balance general de transferencia de calor.	42
<b>Tabla 2.9</b> Tabla de resultados Potencial Energético del Mar Caribe de México.	44
<b>Tabla 3.1.</b> Variables necesarias para el cálculo del potencial de gradiente salino.	48
<b>Tabla 3.2</b> Caudales por subcuenca y balance general en la desembocadura.	56

<b>Tabla 3.3.</b> Sumario de variables necesarias para la estimación del potencial de gradiente salino.	57
<b>Tabla 3.4.</b> Rango de potencias netas por $m^3 \cdot s^{-1}$ esperadas en el Río Hondo.	59
<b>Tabla 3.5.</b> Producción anual teórica de energía eléctrica. Fuente: Elaboración propia.	60
<b>Tabla 3.6.</b> Potencial energético por gradiente salino del Río Hondo.	60
<b>Tabla 4.1.</b> Datos necesarios para el cálculo del potencial de corrientes.	63
<b>Tabla 5.1.</b> Alturas de marea para mar Caribe de México.	71
<b>Tabla 5.2.</b> Estimación de generación de potencia eléctrica en $kW_e$ para acoples turbina- generador utilizadas en plantas mareomotrices.	73
<b>Tabla 6.1.</b> Productos del SIGER.	76
<b>Tabla 7.1.</b> Inventario del potencial energético oceánico renovable del Caribe de México.	82

## X. ANEXOS.

### Lista de anexos.

ANEXO: 1. Potencial energético por olas.

A.1.1 Cuadrante 1 Isla Blanca.

A.1.2 Cuadrante 2 Isla Cozumel.

A.1.3 Cuadrante 3 Playa del Carmen y Tulum.

A.1.4 Cuadrante 4 Reserva de Sian Ka'an.

A.1.5 Cuadrante 5 Banco Chinchorro.

ANEXO. Gradiente térmico.

A.2.1 Distribución de los lances de CTD de 1980 a 2010, de acuerdo a la NODC.

A.2.2 Distribución de los lances de XBT de 1980 a 2010, de acuerdo a la NODC.

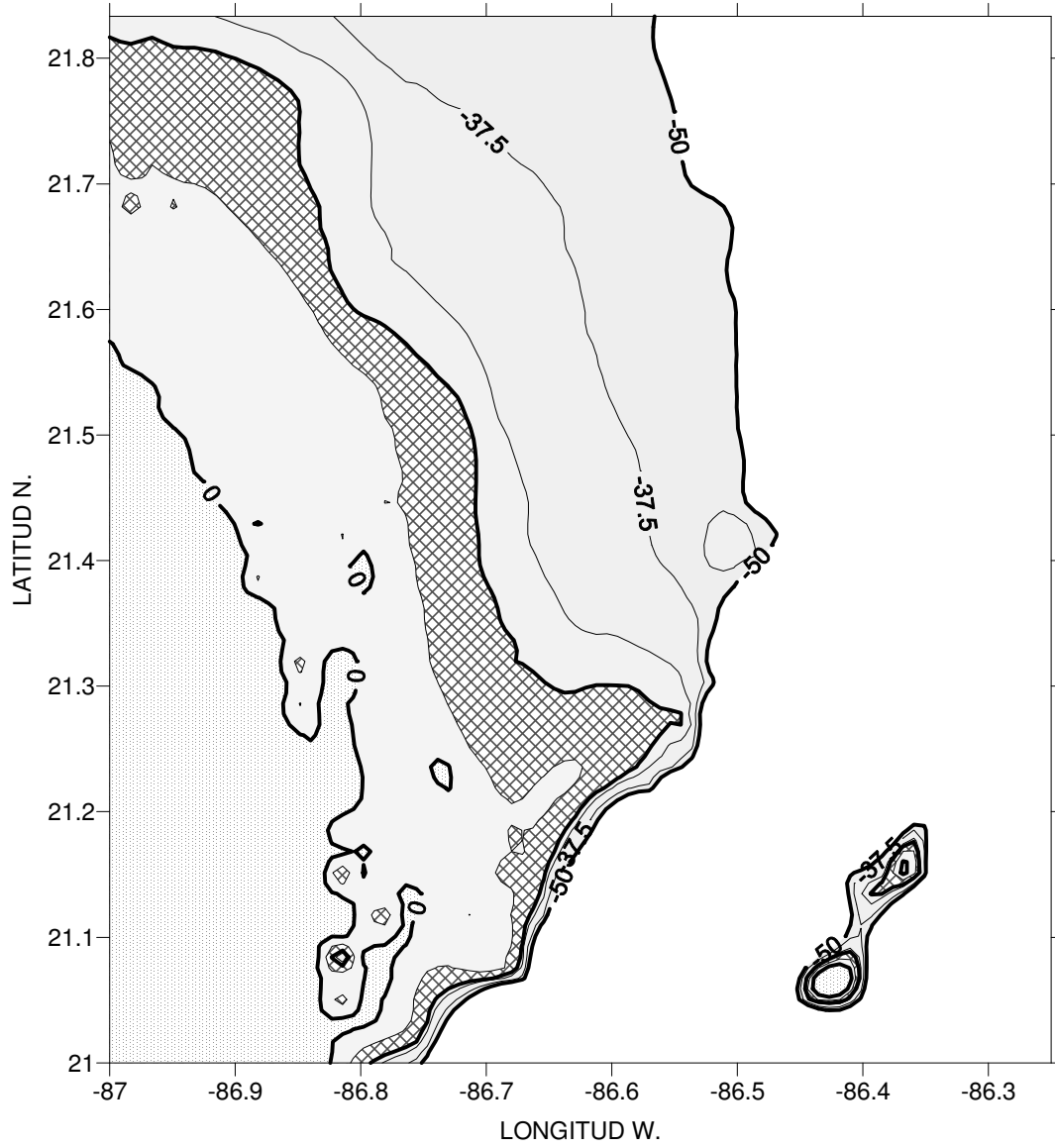
A.2.3. Promedios mensuales de temperatura del área seleccionada según figura A.2.2 por cada profundidad estándar hasta los 700 m.

ANEXOS: Gradiente salino.

Anexo A.3.1. Secciones transversales del Río Hondo.

**ANEXO: Potencial energético por olas.**

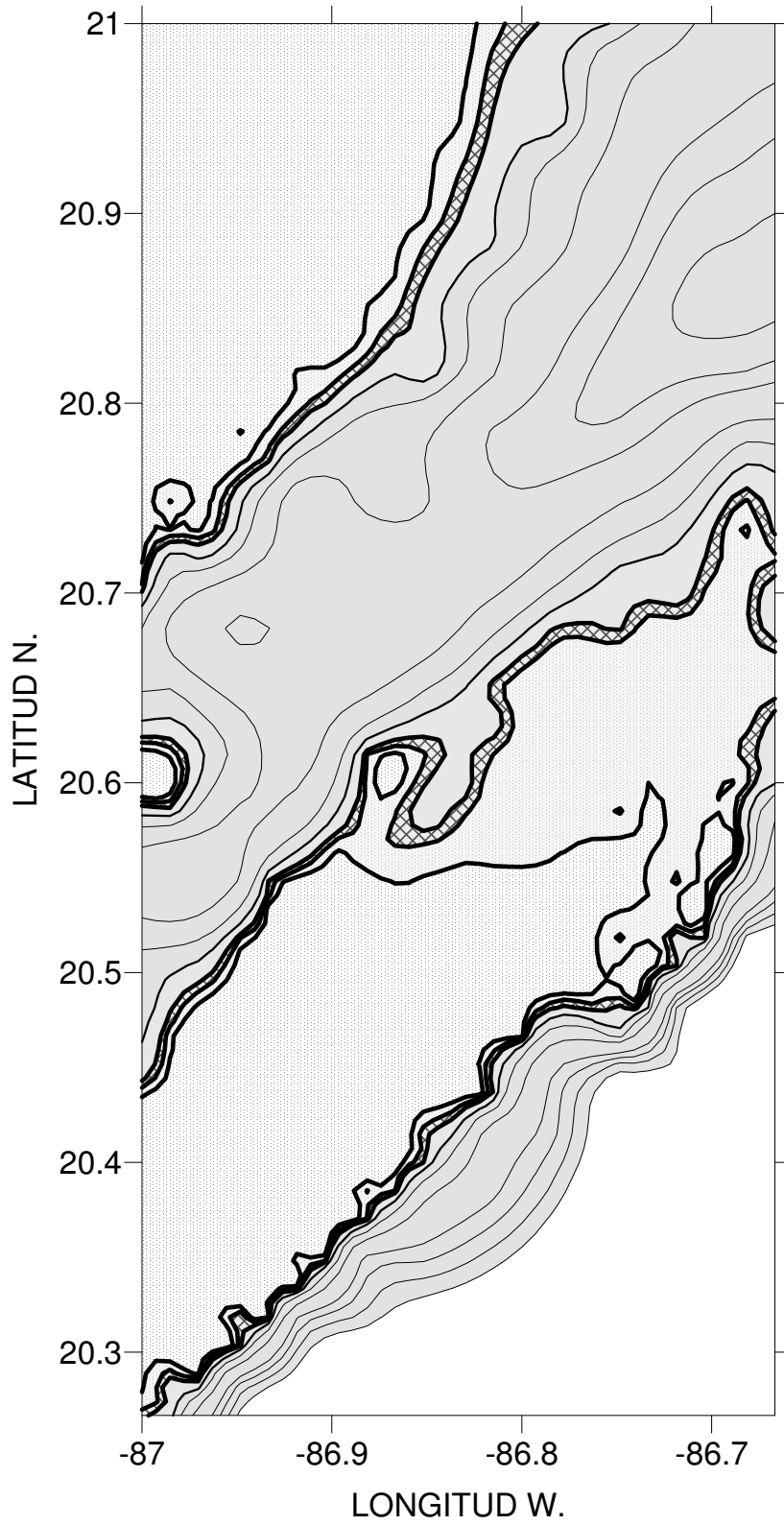
BATIMETRÍA 10 A 20 METROS, BOCA IGLESIAS, ISLA CONTOY E ISLA MUJERES.



**A.1.1 Cuadrante 1.**

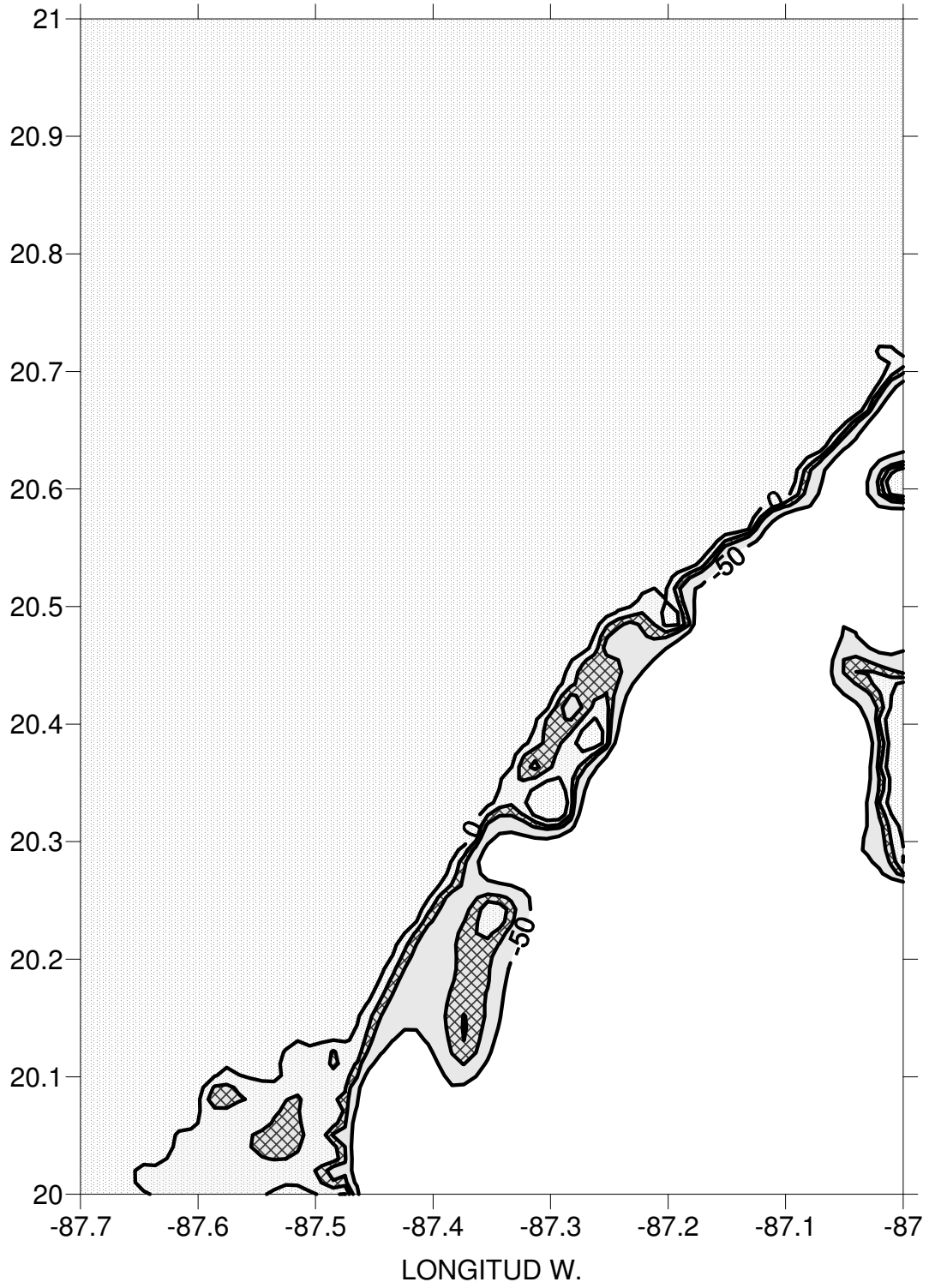


BATIMETRÍA 10 A 20 METROS COZUMEL Y PLAYA DEL CARMEN.



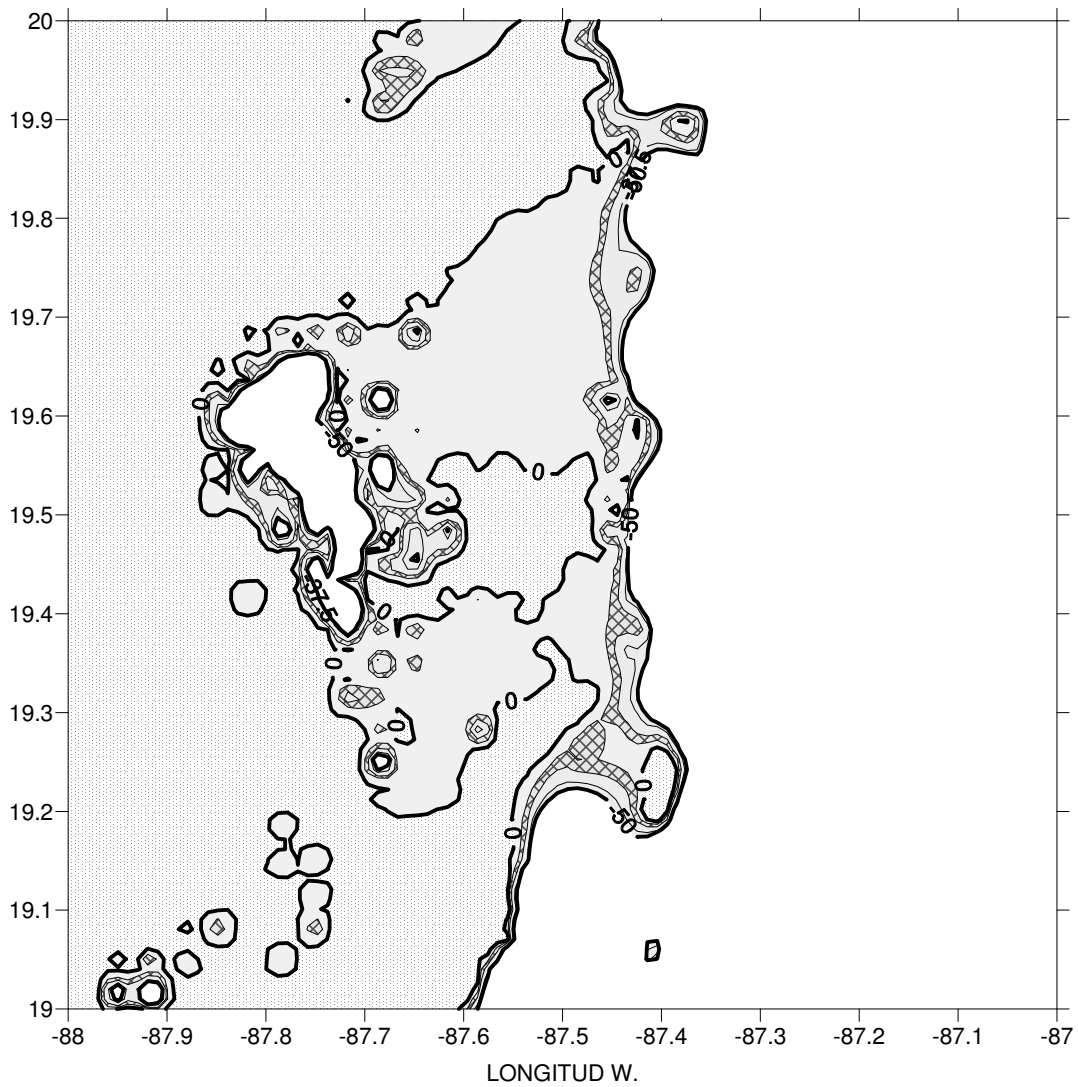
A.1.2 Cuadrante 2.

BATIMETRÍA 10 A 20 METROS PLAYA DEL CARMEN A TULUM.



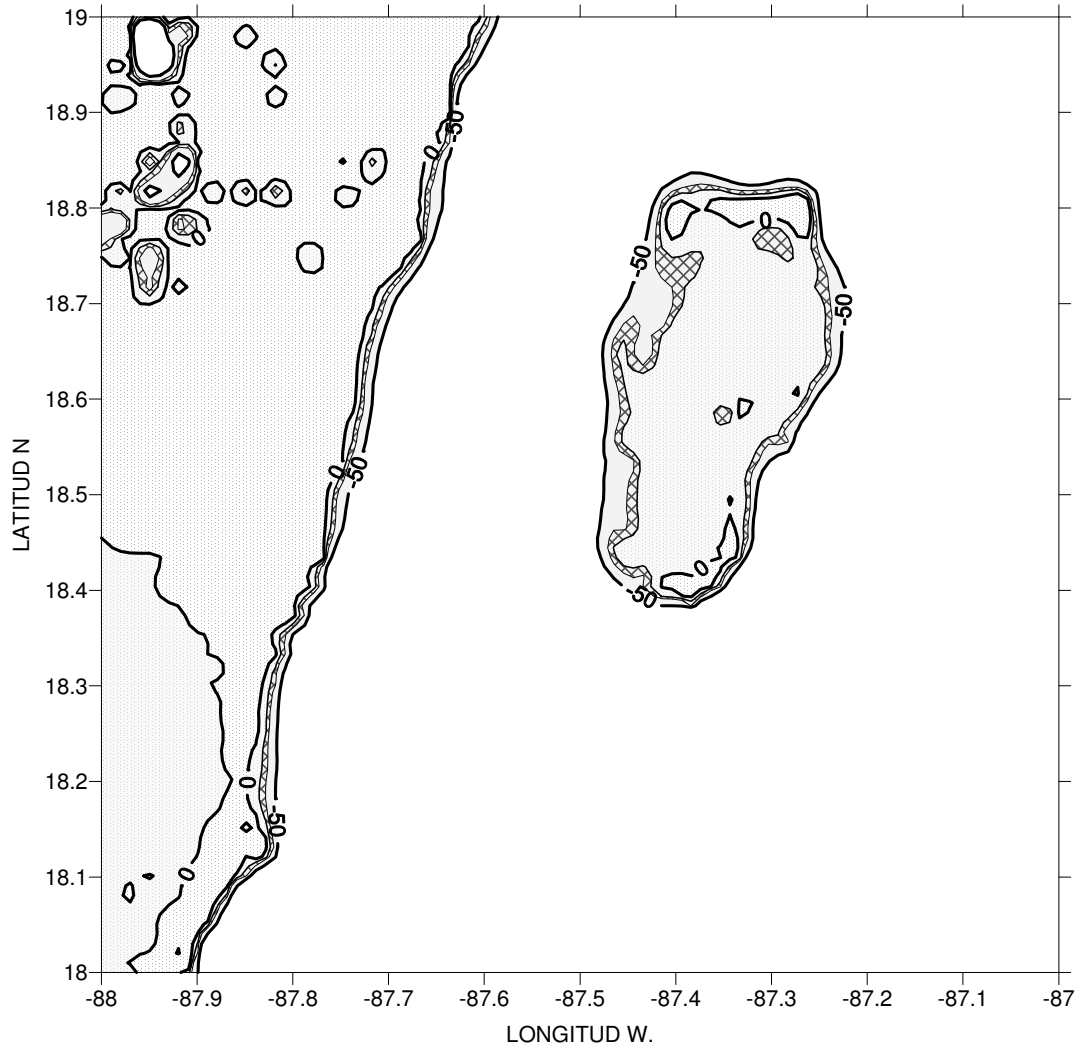
A.1.3 Cuadrante 3.

BATIMETRÍA 10 A 20 METROS PUNTO 99 EN LA PUNTA HERRERO.



A.1.4 Cuadrante 4.

BATIMETRÍA 10 A 20 METROS, MAHAHUAL, XCALAC Y BANCO CHINCHORRO.

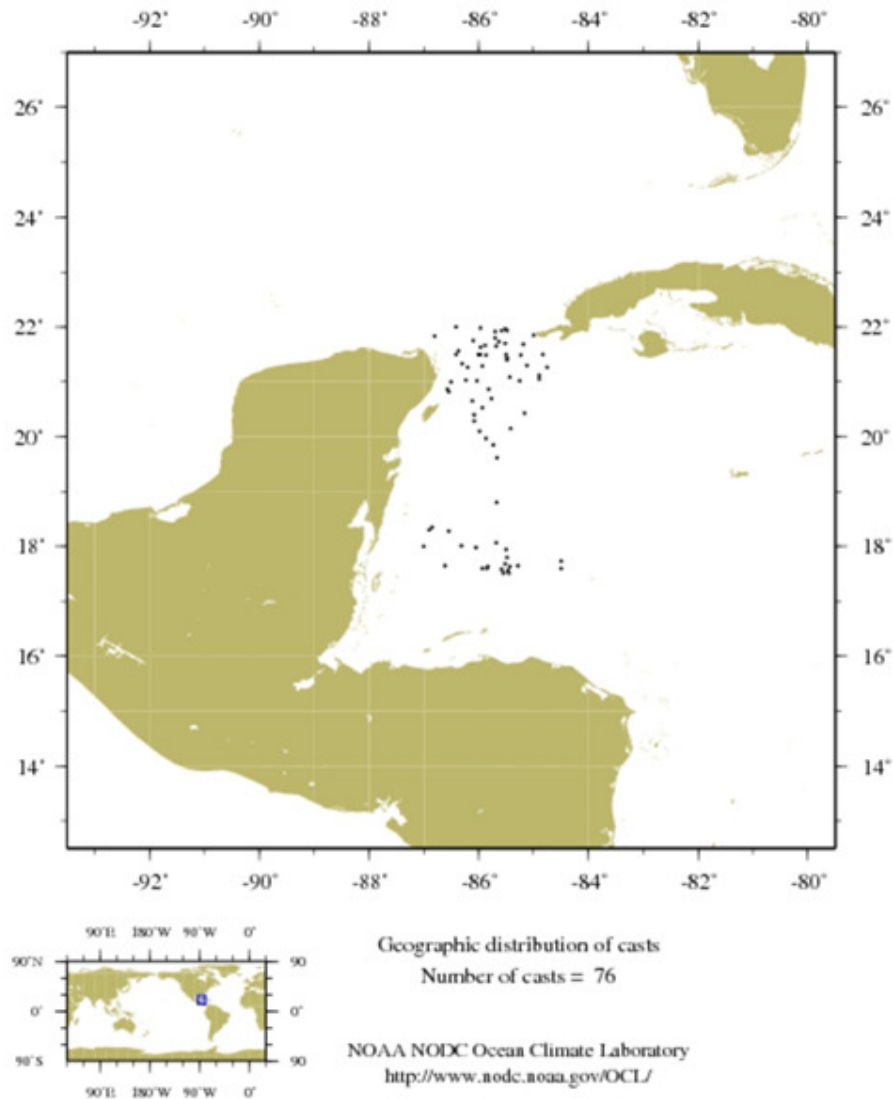


A.1.5 Cuadrante 5.

## ANEXO. Gradiente térmico.

### A.2.1 Distribución de los lances de CTD de 1980 a 2010, de acuerdo a la NODC.

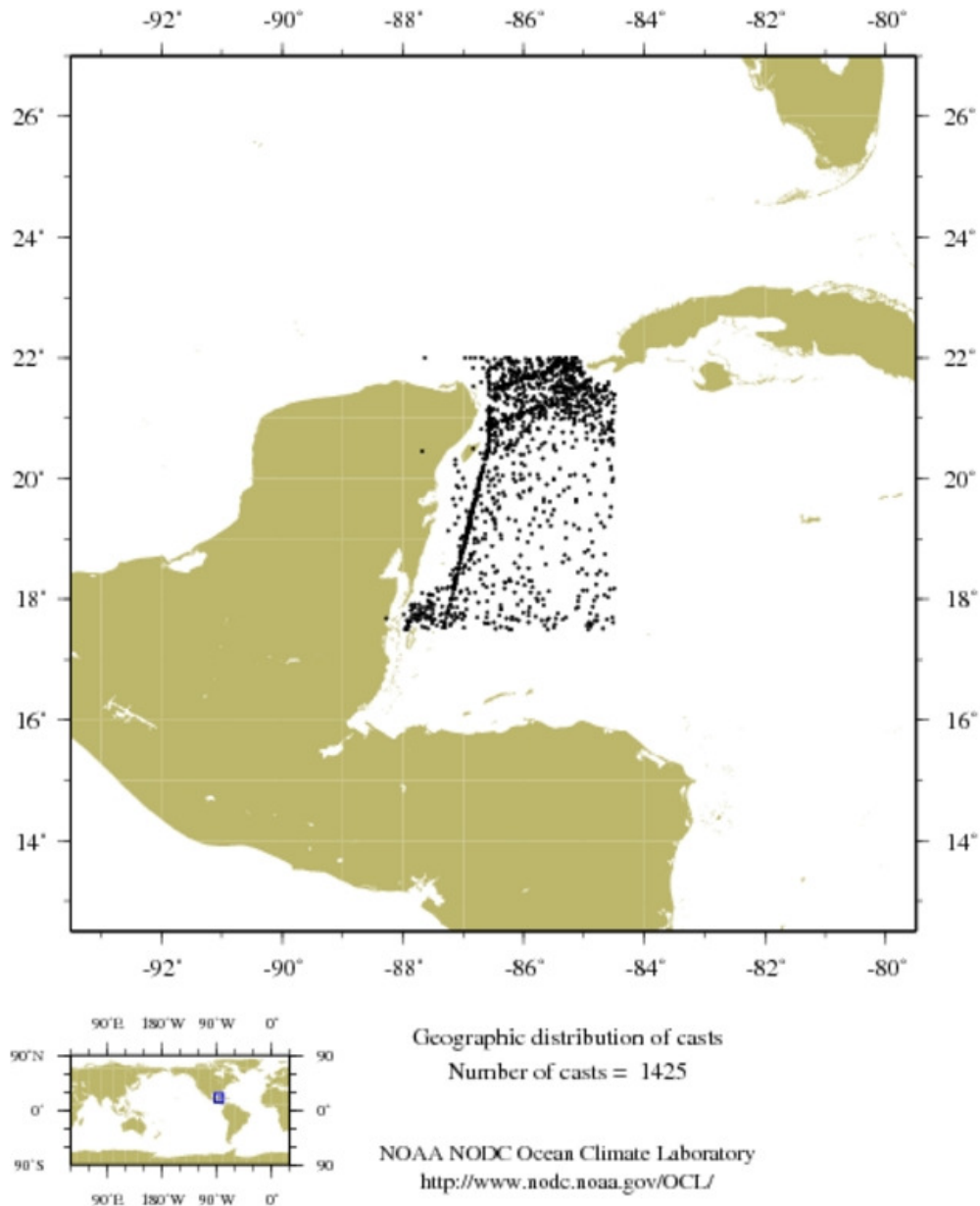
DATA DISTRIBUTION PLOT:



#### COPY OF YOUR SEARCH CRITERIA:

OBSERVATION DATES: Year from 1980 to 2010; Month from 1 to 12; Day from 1 to 31  
GEOGRAPHIC COORDINATES: Longitude from -88.5000 to -84.5000; Latitude from 22.0000 to 17.5000  
DATASET: CTD  
MEASURED VARIABLES (extract): all variables

### A.2.2 Distribución de los lances de XBT de 1980 a 2010, de acuerdo a la NODC.



#### **COPY OF YOUR SEARCH CRITERIA:**

**OBSERVATION DATES:** Year from 1980 to 2010; Month from 1 to 12; Day from 1 to 31  
**GEOGRAPHIC COORDINATES:** Longitude from -88.5000 to -84.5000; Latitude from 22.0000 to 17.5000  
**DATASET:** XBT  
**MEASURED VARIABLES (extract):**

**A.2.3. Promedios mensuales de de temperatura del área seleccionada según figura A.2.2 por cada profundidad estándar hasta los 700m.**

<b>Z</b> <b>m</b>	<b>Enero</b> <b>°C</b>	<b>Febrero</b> <b>°C</b>	<b>Marzo</b> <b>°C</b>	<b>Abril</b> <b>°C</b>	<b>Mayo</b> <b>°C</b>	<b>Junio</b> <b>°C</b>	<b>Julio</b> <b>°C</b>	<b>Agosto</b> <b>°C</b>	<b>Septiembre</b> <b>°C</b>	<b>Octubre</b> <b>°C</b>	<b>Noviembre</b> <b>°C</b>	<b>Diciembre</b> <b>°C</b>	<b>Promedio</b> <b>°C</b>
0	26,85	26,44	26,39	26,95	27,56	28,05	28,86	29,52	28,98	28,76	27,11	27,16	27,72
-10	26,86	26,43	26,42	26,78	27,50	28,11	28,80	29,35	28,89	28,74	27,11	27,20	27,68
-20	26,86	26,42	26,45	26,68	27,46	28,09	28,75	29,20	28,74	28,69	27,11	27,20	27,64
-30	26,86	26,40	26,44	26,54	27,41	27,97	28,67	29,07	28,58	28,64	27,11	27,17	27,57
-50	26,85	26,39	26,43	26,22	27,13	27,52	28,32	28,45	27,80	28,18	27,10	26,94	27,28
-75	26,79	26,29	26,43	25,75	26,57	26,91	27,63	27,52	26,73	26,80	26,65	26,66	26,73
-100	26,16	25,91	25,99	25,35	25,86	26,07	26,45	26,64	25,54	25,32	25,72	25,63	25,89
-125	24,62	25,15	24,72	24,58	24,89	25,09	25,17	25,79	24,25	23,70	24,58	24,41	24,75
-150	22,87	23,77	23,36	23,63	23,54	23,66	23,77	24,59	22,94	22,24	23,00	22,91	23,36
-200	19,90	20,48	20,44	21,20	20,59	21,17	20,88	21,89	19,57	19,32	19,67	20,41	20,46
-250	17,64	18,36	18,65	18,88	18,41	18,64	18,62	19,34	17,60	17,03	17,43	18,52	18,26
-300	15,89	16,67	16,94	17,34	16,74	16,70	16,76	17,66	15,76	15,18	15,80	17,06	16,54
-400	12,89	13,83	14,06	14,57	14,13	13,88	14,03	14,84	12,75	12,11	12,79	14,40	13,69
-500	10,58	11,23	11,58	12,03	11,56	11,46	11,58	12,30	10,62	9,45	10,47	11,72	11,22
-600	8,73	9,28	9,62	9,98	9,40	9,62	9,70	10,13	8,98	7,69	8,51	9,58	9,27
-700	7,37	7,78	8,04	8,34	7,82	8,04	8,26	8,58	7,54	6,53	7,22	8,02	7,79

**ANEXOS: Gradiente salino.**

**Anexo A.3.1. Secciones transversales del RH.**

Figura 6. Perfil de las secciones de estudio

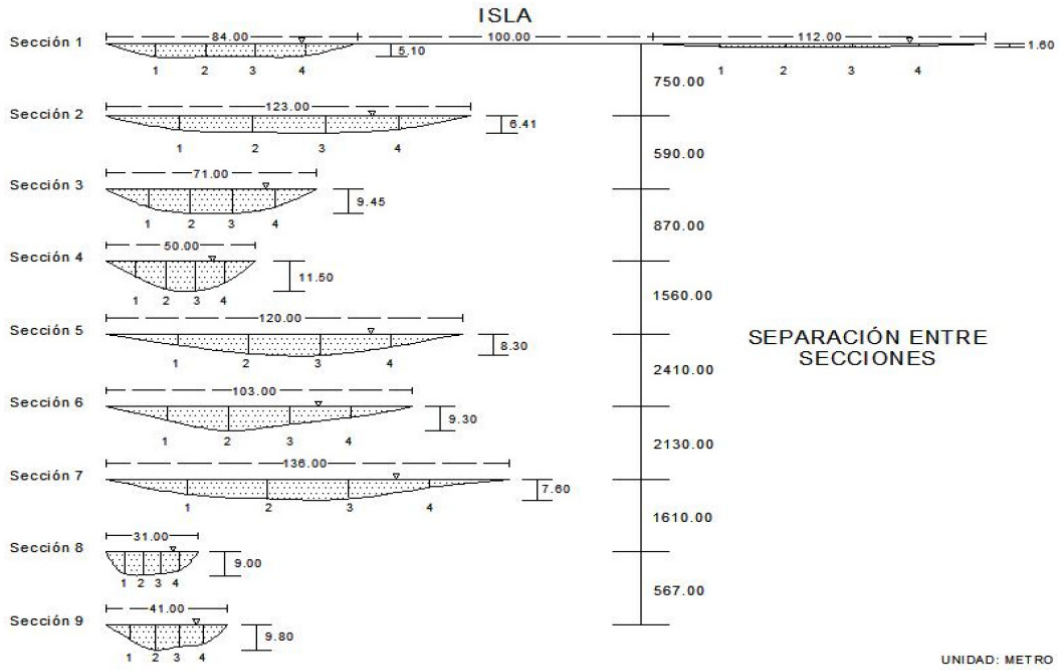


Figura 7. Vista en conjunto de las secciones de control.

Fuente: Copiado con permiso del autor (Uh Us Freddy 2010)