



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – HIDRÁULICA

**EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LAS ENERGÍAS
DEL OCÉANO EN EL ESTADO DE MICHOACÁN**

T E S I S
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
JOSÉ LUIS GONZÁLEZ MENDOZA

TUTORES PRINCIPALES:
RODOLFO SILVA CASARÍN – INSTITUTO DE INGENIERÍA
JASSIEL VLADIMIR HERNÁNDEZ FONTES – INSTITUTO DE INGENIERÍA

Ciudad Universitaria, CDMX, septiembre de 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

Presidente: **Lilia Reyes Chávez**

Secretario: **Edgar Gerardo Mendoza Baldwin**

1 er. Vocal: **Rodolfo Silva Casarín**

2 do. Vocal: **Jassiel Vladimir Hernández Fontes**

3 er. Vocal: **Valeria Chávez Cerón**

INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM. CAMPUS C.U.

TUTOR DE TESIS:



Dr. Rodolfo Silva Casarín

FIRMA

*A mis padres,
Ma. Jaquelin Mendoza Ávila y
José Luis González Pimentel*

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por abrirme sus puertas para realizar mis estudios de posgrado y darme las herramientas necesarias para desarrollarme como profesionista, agradezco las instalaciones, el mobiliario y equipo; y lo más importante, la gran calidad del personal académico.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por brindarme el apoyo económico para poder sustentar mi estancia en la Ciudad de México, por apoyarme a generar investigación y conocimiento para el desarrollo de México.

Al Posgrado en Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, por la disposición de servicio para realizar trámites, por sus instalaciones, por los servidores administrativos y académicos.

Al Dr. Rodolfo Silva Casarín, por aceptar ser mi tutor principal en mi trabajo de tesis, por impulsarme a trabajar arduamente, por el conocimiento transmitido mediante clases y charlas, por admitirme en su grupo de investigación y confiar en el trabajo que podía llegar a realizar.

Al Dr. Jassiel Hernández Fontes, por ser un apoyo constante como cotutor en el desarrollo de este trabajo, por su disposición a ayudarme en cada duda que me surgía, por compartir su conocimiento y herramientas de trabajo, por la empatía y amistad brindadas.

A la Dra. Sonia Tatiana Sánchez Quispe, por impulsarme a hacer mis estudios de posgrado, por siempre ver mi potencial, por desarrollar el gusto por la hidráulica y la investigación, por ser un ejemplo de rectitud y trabajo, por ser además de un ejemplo a seguir, la mejor consejera.

A mis profesores de la maestría, los doctores Edgar G. Mendoza Baldwin, Valeria Chávez Cerón, Lilia Reyes Chávez, Ramón Domínguez Mora, Maritza L. Arganis Juárez, Oscar Arturo Fuentes Mariles, Oscar Arturo Pozos Estrada, Moisés Berezowsky Verduzco, Alejandro Mendoza Resendiz, y los M.I. Víctor Franco e Ixaso Odériz Martínez; por el valioso conocimiento transmitido durante las materias que tomé en estos dos años de maestría.

A mis padres, por siempre confiar en mí, por llamarme cada noche y preguntarme por mis estudios, por mis problemas, por siempre estar ahí, por festejar mis logros, por ser mis pilares, mis más grandes admiradores, por ser mi más grande inspiración, por ser un ejemplo de honestidad, responsabilidad, trabajo y amor.

A mis hermanos, a Yarazén por cuidarme siempre y ser un ejemplo de madre, de hermana y de amiga; a Jesús, por creer en sus sueños e impulsarnos a todos a correr por los nuestros, por hacerme admirarlo y estar orgulloso de él; a Jacqueline, por mostrarme que la rebeldía, el amor y la vida son cosas que tenemos que perseguir para ser felices.

A mis amigos, que gracias a la vida son muchos, Jesús Barajas, Yamina Mendoza, Enrique Mendoza, Luis Lescas, Daniel Ponce, Adalid Ávila, Eduardo Cortés, Francisco Arroyo, Hazán Rivera, Yazmín Ontiveros, Mar Farfán, Brianda Cortés, Kitziya Arizmendi, Isidro Vázquez, Fausto Alonso y a muchas personas más que quiero en mi vida siempre, gracias por brindarme felicidad y confianza.



RESUMEN

La energía eléctrica es de gran importancia en todos los sectores que implican la supervivencia diaria: productividad económica, alimentación, transporte, educación, salud, bienestar social, etc. Las fuentes renovables son aquellas que se pueden aprovechar mientras que, de manera natural, se recargan o no se agotan. Son ejemplos de este tipo la energía solar, la eólica, la hidráulica, la biomasa y la energía oceánica (debida a mareas, olas, gradientes salinos, gradientes térmicos y viento marino). México se encuentra rodeado por los océanos Atlántico y Pacífico, lo que le brinda oportunidades excepcionales para impulsar el aprovechamiento del potencial marino, tanto para abastecer a la red eléctrica nacional como a las comunidades aisladas que no cuentan con este servicio. Es necesario, entonces, realizar estudios enfocados en conocer los potenciales energéticos disponibles y las zonas de aprovechamiento plausibles. Mientras más específicos sean estos estudios, se pueden lograr mejores aproximaciones con menor incertidumbre. En el presente estudio, se considera el estado de Michoacán de Ocampo, un estado del pacífico mexicano para cuyos mares se evaluarán los recursos susceptibles de explotación considerando oleaje, corrientes marinas, gradiente térmico y gradiente salino como fuentes de energía. Para que el uso de las fuentes renovables de energía sea considerado además como limpia, es importante conocer cuánta energía es posible extraer de determinado lugar antes de provocar daños irreversibles. Por lo cual es importante conocer las condiciones propias de las zonas donde se puede extraer dicha energía. Una vía para lograr este objetivo es determinar las zonas con mayor viabilidad de explotación a través de un método para la toma de decisiones, con el que se consideren factores y restricciones ambientales, económicas y sociales. Por lo cual, para este trabajo de investigación se decidió hacer una evaluación multicriterio. Los resultados arrojan una disponibilidad energética teórica media por oleaje de 11.6 a 14 kW/m en el área de estudio, la cual es de aproximadamente 50 km mar adentro, medidos a partir de la línea de costa. La potencia media por corrientes resultó de 10 a 20 W/m² en la mayor parte del área de estudio. La potencia media por gradiente térmico resultó de 310 a 330 MW. Para gradiente salino se analizaron seis ríos con desembocaduras en la costa michoacana donde los resultados sugieren, para el río Coahuayana, una potencia teórica de hasta 41.3 MW y una potencia práctica de 6.9 MW siendo este el río con mayores valores. Mediante la evaluación multicriterio se demostró que solo son aprovechables, mar adentro, el oleaje y el gradiente térmico, debido a que las corrientes marinas no rebasan el umbral mínimo para el funcionamiento de los dispositivos convertidores de energía. Se introdujeron criterios económicos, ambientales, sociales y de infraestructura, donde se concluyen las áreas idóneas para la implementación de proyectos de conversión de energía, las cuales quedan definidas de acuerdo al valor de ponderación que se le da a cada criterio.

PALABRAS CLAVE:

Potencia teórica, oleaje, corrientes marinas, gradiente térmico, gradiente salino, evaluación multicriterio.



ABSTRACT

Electricity is a resource of great importance in all sectors that involve our daily survival: economic productivity, food, transportation, education, health, social welfare, etc. Renewable sources of energy are those that can be harnessed, while, naturally, they are recharged or not exhausted. Examples are solar, wind, hydraulic, biomass and ocean energy (due to tides, waves, salt gradients, thermal gradients and sea wind). Mexico is surrounded by the Atlantic and Pacific oceans, this gives the country exceptional opportunities to boost the use of marine potential, both to supply the national electricity grid and isolated communities that do not have this service. For these reasons it is necessary to conduct studies focused on the available energy potentials and plausible areas of exploitation. The more specific these studies are, the better approximations can be with less uncertainty. In the present study, the state of Michoacán de Ocampo is considered, a state of the Mexican Pacific for whose seas the resources susceptible to exploitation will be evaluated considering waves, sea currents, thermal gradient and saline gradient as energy sources. In order for the use of renewable energy sources to be considered as clean, it is important to know how much energy can be extracted from a certain location before causing irreversible damage. Therefore it is important to know the conditions of the areas where such energy can be extracted. One way to achieve this objective is to determine the areas with the greatest viability of exploitation through a method for decision-making, with which environmental, economic and social factors and restrictions are considered. Therefore, for this research it was decided to make a multicriteria evaluation. The results show an average theoretical energy availability per wave of 11.6 to 14 kW/m in the study area, which is approximately 50 km offshore, measured from the coastline. The average power per stream resulted from 10 to 20 W/m² in most of the area. The average power per thermal gradient was 310 to 330 MW. For saline gradient, six rivers with mouths in the Michoacan coast were analyzed where the results suggest, for the Coahuayana River, a theoretical power of up to 41.3 MW and a practical power of 6.9 MW, being the river with the highest values. Through the multi-criteria evaluation it was demonstrated that only the waves and the thermal gradient are usable offshore, because the sea currents do not exceed the minimum threshold for the operation of the energy converting devices. Economic, environmental, social and infrastructure criteria were introduced, where the ideal areas for the implementation of energy conversion projects are concluded, which are defined according to the weighting value given to each criterion.

KEY WORDS

Theoretical power, waves, sea currents, thermal gradient, saline gradient, multi-criteria evaluation.



ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN.....	1
2	OBJETIVOS	4
2.1	General	4
2.2	Particulares	4
3	JUSTIFICACIÓN	5
4	ESTADO DEL ARTE	10
4.1	Energía oceánica.....	10
4.1.1	Energía de las olas.....	12
4.1.2	Energía de las corrientes marinas.....	14
4.1.3	Energía por gradiente térmico.....	15
4.1.4	Energía por gradiente salino.....	17
4.2	Evaluación multicriterio (MCE).....	17
5	METODOLOGÍA.....	20
5.1	Caso de estudio.....	21
5.2	Recursos energéticos del océano	28
5.2.1	Potencia de las olas	28
5.2.2	Potencia de corrientes marinas	29
5.2.3	Potencia de gradiente térmico	30
5.2.4	Potencia de gradiente salino.....	30
5.2.5	Fuentes de información	32
5.3	Evaluación multicriterio (MCE).....	33
5.3.1	Restricciones booleanas	34
5.3.2	Factores estandarizados.....	35
5.3.3	Fuentes de información	39
6	RESULTADOS	40
6.1	Recursos energéticos del océano.....	40
6.1.1	Potencia de las olas	41
6.1.2	Potencia de corrientes marinas.....	43
6.1.3	Potencia de gradiente térmico	45



6.1.4	Potencia de gradiente salino	47
6.2	Evaluación multicriterio (MCE).....	49
6.2.1	Restricciones booleanas	49
6.2.2	Factores estandarizados.....	53
6.2.3	Evaluación multicriterio para diferentes escenarios.....	55
6.2.4	Selección de sitios	58
7	CONCLUSIONES.....	61
8	BIBLIOGRAFÍA	64



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Disponibilidad de energía eléctrica en viviendas de los estados con costa entre 2010 y 2015 (INEGI, 2015).	5
Tabla 2. Plantas productoras de energía eléctrica en Michoacán (INEL, 2016).	7
Tabla 3. Descripción de las localidades de la costa del estado de Michoacán, México (INEGI, 2015, INPI, 2018).	23
Tabla 4. Nombre y coordenadas de las zonas con actividad pesquera en la costa del estado de Michoacán, México (Ramírez-Rodríguez et al., 2006).	26
Tabla 5. Cobertura del área de estudio que abarcan los intervalos de potencia media por olas, en porcentaje.	42
Tabla 6. Cobertura del área de estudio que abarcan los intervalos de potencia media por corrientes marinas, en porcentaje.	43
Tabla 7. Cobertura del área de estudio que abarcan los intervalos de potencia media por gradiente térmico, en porcentaje.	46
Tabla 8. Potencia teórica y práctica media anual de gradiente salino, en las desembocaduras de los principales ríos de la costa del estado de Michoacán, México.	48
Tabla 9. Valores de ponderación para los diferentes factores estandarizados, para siete casos propuestos.	55
Tabla 10. Principales datos estadísticos del índice de idoneidad (I), así como la cobertura del área en porcentaje, en tres niveles: idoneidad baja, media o alta; para los siete casos propuestos.	56



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Tipos de energía generados en el Estado de Michoacán (INEL, 2016).	6
Figura 2. Diagrama general de la metodología a seguir.	20
Figura 3. Localización geográfica de la costa del estado de Michoacán, México.	22
Figura 4. Localidades con cierta relevancia y vías de comunicación de la costa del estado de Michoacán, México (INEGI, 2015, INPI, 2018).	23
Figura 5. Infraestructura portuaria y eléctrica en la costa del estado de Michoacán, México (CENAPRED, 1988).	25
Figura 6. Zonas con actividad pesquera en la costa del estado de Michoacán, México (Ramírez-Rodríguez et al., 2006).....	26
Figura 7. Relieve de la costa y parte del océano del estado de Michoacán, México (INEGI, 2013; SEMAR, 2019).....	27
Figura 8. Métodos analíticos para la obtención de los recursos energéticos del océano.	28
Figura 9. Diagrama de la evaluación multicriterio (MCE).	33
Figura 10. Representación gráfica de la ecuación (10)......	34
Figura 11. Mapa tipo raster de declaraciones Booleanas.	35
Figura 12. Producto y resultado de dos restricciones booleanas.....	35
Figura 13. Estandarización de puntos mediante polígonos de Thiessen.....	36
Figura 14. Estandarización de puntos mediante distancia perpendicular	37
Figura 15. Estandarización de líneas mediante isolíneas.....	37
Figura 16. Estandarización de regiones con influencia sobre puntos	38
Figura 17. Estandarización de regiones con influencia sobre líneas.....	38
Figura 18. Diagrama de la presentación de los resultados de los recursos energéticos del océano.....	40
Figura 19. Potencia teórica media anual del oleaje, para un periodo de 10 años (2008-2018) en la costa del estado de Michoacán, México. En kW/m.	41
Figura 20. Potencia teórica de olas en porcentaje de días (a lo largo del periodo de 10 años) en los cuales la potencia disponible es mayor a los umbrales establecidos. (a) umbral de 2 kW/m. (b) umbral de 10 kW/m. (c) umbral de 15 kW/m.	42
Figura 21. Potencia teórica media anual de corrientes marinas, para un periodo de 10 años (2008-2018) en la costa del estado de Michoacán, México. En W/m ²	43



Figura 22. Potencia teórica de corrientes marinas en porcentaje de días (a lo largo del periodo de 10 años) en los cuales la potencia disponible es mayor a los umbrales establecidos. (a) umbral de 4 W/m^2 . (b) umbral de 14 W/m^2 . (c) umbral de 32 W/m^2	44
Figura 23. Potencia teórica media anual de gradiente térmico, para un periodo de 10 años (2008-2018) en la costa del estado de Michoacán, México. (En MW).	45
Figura 24. Potencia teórica de gradiente térmico en porcentaje de días (a lo largo del periodo de 10 años) en los cuales la potencia disponible es mayor a los umbrales establecidos. (a) umbral de 100 MW. (b) umbral de 200 MW. (c) umbral de 300 MW.	46
Figura 25. Localización geográfica de los principales ríos de la costa del Estado de Michoacán, México.	48
Figura 26. Desarrollo gráfico de la ecuación (10).	49
Figura 27a. Restricciones ambientales booleanas en la costa del Estado de Michoacán, México.	50
Figura 27b. Zona de estudio final al excluir las restricciones ambientales.....	50
Figura 28. Restricción booleana por umbral mínimo permitido para potencia de olas, para el funcionamiento de dispositivos convertidores de energía.	51
Figura 29. Restricción booleana por umbral mínimo permitido para potencia por corrientes, para el funcionamiento de dispositivos convertidores de energía.	52
Figura 30. Restricción booleana por umbral mínimo permitido para potencia de gradiente térmico, para el funcionamiento de dispositivos convertidores de energía.	52
Figura 31. Estandarización de la infraestructura presente en la zona de estudio (puertos y subestaciones eléctricas).	53
Figura 32. Estandarización de los factores sociales (población beneficiada y población indígena).	54
Figura 33. Estandarización de los factores por usuarios de la zona de estudio (zonas de pesca).	55
Figura 34. Índice de idoneidad (I) para los siete casos propuestos en la costa del estado de Michoacán, México. ($I < 0.5$ es idoneidad baja, $0.5 < I < 0.7$ es idoneidad media, $0.7 < I$ es idoneidad alta).	57
Figura 35. Regiones con idoneidad alta en la costa del estado de Michoacán, México.	58
Figura 36. Elección del tipo de energía oceánica a colocar en las zonas idóneas (Caso A) de la costa del estado de Michoacán, México.....	59
Figura 37. Localización en coordenadas geográficas de los sitios seleccionados para la colocación de dispositivos para los diferentes tipos de energía oceánica.	60



1 INTRODUCCIÓN

La energía eléctrica es de gran importancia en la actualidad, desde encender los focos al llegar a casa hasta todos los sectores que implican la supervivencia diaria: productividad económica, alimentación, transporte, educación, salud, bienestar social, etc. El uso de recursos energéticos es un tema de gran relevancia en nuestro tiempo e indispensable en la vida cotidiana. El consumo adecuado de energía es indispensable para el desarrollo económico y social de un país. La energía contribuye al bienestar económico y social mediante la generación de riqueza que, a su vez, da lugar a la creación de empleos, elevando la economía de las personas (SENER, 2012). La energía se obtiene a partir de diversas fuentes y se puede almacenar de distintas formas. Las fuentes de producción de energía se pueden clasificar en primarias o secundarias, según pueda obtenerse de ellas la energía de manera directa o a través de otra fuente, respectivamente. Así, por ejemplo, el fluido eléctrico es una fuente secundaria de energía, porque para su producción es necesario recurrir a otra fuente de energía.

También, las fuentes de energía se clasifican en renovables y no renovables. Las fuentes renovables son aquellas que se pueden aprovechar mientras que, de manera natural, se recargan o no se agotan. Son ejemplos de este tipo la energía solar, la eólica, la hidráulica, la biomasa y la energía oceánica (debida a mareas, olas, gradientes salinos, gradientes térmicos y viento marino). Por otro lado, las fuentes no renovables son las que se agotan o su recarga es demasiado lenta en términos temporales humanos. A este segundo tipo pertenecen las reservas fósiles: petróleo, carbón y gas natural.

El aumento constante del consumo de energía proveniente de combustibles fósiles ante la finitud de sus reservas es razón suficiente para buscar con interés fuentes energéticas renovables. A ello se debe añadir la polarización existente entre zonas productoras y consumidoras. Es común que algunos países consumidores, de gran desarrollo económico y alto consumo de petróleo, no sean productores, y sus economías resulten dependientes y muy sensibles a cualquier crisis en la producción. Además de estas razones, posiblemente el motivo más importante para sustituir los combustibles fósiles por fuentes de energía renovables, sea el impacto ambiental que origina su combustión, la cual emite óxidos de carbono, de azufre y de nitrógeno. El dióxido de carbono (CO_2) es el principal causante del efecto invernadero, ya que absorbe la radiación infrarroja emitida por la superficie terrestre, con lo que se produce un calentamiento de la atmósfera. Por otro lado, los óxidos de azufre y nitrógeno, al combinarse con la humedad de la atmósfera, pueden generar ácidos sulfúrico y nítrico, respectivamente, los cuales pueden caer junto a la lluvia, dando lugar a la lluvia ácida (De Juana et al., 2003). Por todo ello, se hace necesaria la consideración de las energías renovables con objeto de contribuir a la atenuación de dichas emisiones y a sus nocivos efectos. Entre las energías renovables, uno de los campos menos estudiados es el océano, el cual es uno de las fuentes más promisorias de energías limpias, por lo que es necesario despertar interés tanto en México, como en el mundo; como una vía de desarrollo para conseguir el bienestar ecológico, económico y social que ayude a la eficacia en la explotación de los recursos.



México se encuentra rodeado por los océanos Atlántico y Pacífico, lo que le brinda oportunidades excepcionales para impulsar el aprovechamiento del potencial marino, tanto para abastecer a la red eléctrica nacional como a las comunidades aisladas que no cuentan con este servicio. Es necesario, entonces, realizar estudios enfocados en conocer los potenciales energéticos disponibles y las zonas de aprovechamiento plausibles. Mientras más específicos sean estos estudios, se pueden lograr mejores aproximaciones con menor incertidumbre. En el presente estudio, se considera el estado de Michoacán de Ocampo, un estado del pacífico mexicano para cuyos mares se evaluarán los recursos susceptibles de explotación considerando oleaje, corrientes marinas, gradiente térmico y gradiente salino como fuentes de energía.

Oleaje: La energía generada por las olas es una forma concentrada de energía solar: el sol produce diferencias de temperatura en todo el mundo, causando vientos que soplan sobre la superficie del océano. Estos vientos causan oscilaciones, que se convierten en olas. Tales olas pueden viajar miles de kilómetros sin prácticamente ninguna pérdida de energía. La densidad de potencia es mucho mayor que la de la energía eólica o solar. Es importante recalcar, que las olas de aguas profundas tienen características diferentes con las olas que se ven rompiendo en la playa. Cuando una ola llega a aguas poco profundas (aproximadamente cuando la profundidad del agua es inferior a media longitud de onda), se ralentiza, su longitud de onda disminuye y crece en altura, lo que conduce a la rotura. Las mayores pérdidas de energía se producen por rotura y por fricción con el fondo marino, por lo que sólo una fracción del recurso llega a la orilla (Cruz, 2008). Es por eso que diferentes metodologías deben ser empleadas para aprovechar la energía de olas en aguas someras, intermedias y profundas.

Corrientes oceánicas: Las corrientes oceánicas son el flujo continuo de agua oceánica en ciertas direcciones, y pueden variar mucho en términos de fuerzas impulsoras dominantes, ubicaciones espaciales y escalas temporales. Las corrientes oceánicas en rápido movimiento son ricas en energía hidrocínética; dado que el agua es aproximadamente 800 veces más densa que el aire, las corrientes oceánicas de aproximadamente 1/9 de la velocidad del viento llevan una densidad de potencia cinética comparable al viento (Yang et al., 2015). La circulación general del océano es un resultado combinado de fuerzas que incluyen el esfuerzo cortante del viento, la fuerza de Coriolis, los gradientes de presión, las diferencias de temperatura y salinidad, la fricción y las interacciones con las costas y el lecho marino. Además de esto, las mareas, la descarga del río y los gradientes de presión atmosférica de la superficie también desempeñan un papel en la configuración de las corrientes (Leaman, Molinari, & Vertes, 1987).

Gradiente térmico: La diferencia de temperatura entre el agua superficial y a grandes profundidades del océano, puede ser aprovechada para la generación de energía eléctrica, debido a que el calor específico del agua (4.18 kJ / kg C) es aproximadamente tres veces más alto que el del suelo (1.48 kJ / kg C), por lo que la capacidad de calor del océano es casi un orden mayor que la de la tierra. La mayor parte de la energía solar es absorbida por una capa delgada de la superficie del océano y apenas hay luz solar que penetra por debajo de los 200 m. La temperatura del agua de mar profunda se mantiene a 4-8 °C a 600-1000 m de profundidad. Cuando la superficie cálida y el agua fría profunda del mar tienen una diferencia de temperatura de al menos 20 °C, se puede producir energía eléctrica y/o agua



desalinizada utilizando el gradiente de energía térmica. Este mecanismo se denomina conversión de energía térmica oceánica (OTEC) (A. S. Kim, et al, 2016).

Gradiente salino: La energía por gradiente de salinidad se genera cuando dos aguas de diferente concentración de sal se mezclan, lo que produce una liberación de energía impulsada por la diferencia en el potencial químico entre ellas. Si se controla la mezcla y se atrapa la energía antes que sea liberada, se puede usar el potencial químico para generar electricidad. Las desembocaduras de los ríos, donde el agua dulce del drenaje terrestre se mezcla con el agua de mar salina, son los lugares más apropiados para aprovechar el gradiente de salinidad (Alvarez-Silva, et al, 2016).

En resumen, en cualquier lugar en el cual exista algún tipo de gradiente, ya sea cinético, potencial, térmico o químico, podría ser posible encontrar al menos una fuente de energía susceptible de ser aprovechada. Para que el uso de las fuentes renovables de energía sea considerado además como limpia, es importante conocer cuánta energía es posible extraer de determinado lugar antes de provocar daños irreversibles. Por lo cual es importante conocer las condiciones propias de las zonas donde se puede extraer dicha energía. Una vía para lograr este objetivo es determinar las zonas con mayor viabilidad de explotación a través de un método para la toma de decisiones, con el que se consideren factores y restricciones ambientales, económicas y sociales. Por lo cual, para este trabajo de investigación se decidió hacer una Evaluación Multicriterio (MCE) (Eastman, 2005). Este tipo de análisis se logra mediante la estandarización de criterios, la ponderación y la combinación de los mismos, mediante procesamientos de datos en sistemas de información geográfica (SIG) que ayudarán a la evaluación espacial de la determinación de sitios.



2 OBJETIVOS

2.1 General

El objetivo general del presente estudio es determinar zonas potenciales para extracción de energías del océano en el estado de Michoacán, México, considerando algunos factores sociales, económicos y ambientales para ejecutar una evaluación multicriterio. Con esto, se pretende crear una metodología de análisis que pueda ser extendida para la identificación de sitios potenciales en otras regiones, dando lugar a análisis más detallados para proyectos de instalación de dispositivos convertidores de energía del océano.

2.2 Particulares

- Evaluar el potencial teórico medio de energía en el océano debido a olas, corrientes marinas, gradientes salinos y gradientes térmicos, disponibles en zonas potenciales a lo largo de la costa del estado de Michoacán, México;
- Delimitar las regiones con restricción ambiental mediante el uso de sistemas de información geográfica.
- Obtener las restricciones económicas y de repercusión social mediante el uso de sistemas de información geográfica.
- Con los tres aspectos mencionados, proponer una metodología de toma de decisiones para encontrar los sitios más adecuados para la instalación de dispositivos, considerando aspectos ambientales, económicos y sociales, mediante una evaluación multicriterio.
- Seleccionar sitios idóneos para la instalación de dispositivos convertidores de energía oceánica.



3 JUSTIFICACIÓN

Recientemente, ha sido reportado que México obtiene el 27% de su energía eléctrica a partir de centrales hidráulicas, y se pretende diversificar el aprovechamiento de las fuentes con el uso de los recursos geotérmicos, eólicos y de gas natural (González-Ramírez et al. 2017). En el año 2015, la inversión en energías limpias en México aumentó en 1 600 millones de dólares comparado con 2014. Las inversiones en proyectos de producción de energía limpia en México rompieron récord en 2015, para alcanzar un monto de 3 900 millones de dólares (MacDonald, 2016). La inversión en eólica terrestre más grande del mundo en 2015 fue la del portafolio de Nacional Financiera (Nafin) en México de 1.6 GW y unos 2 200 millones de dólares (MacDonald, 2016). Además, las inversiones incluyeron un aumento en la capacidad de generación de 64 GW en eólica y de 57 GW en energía solar, lo que constituye un aumento de 30% en estos rubros energéticos (REVE, 2016). Sin embargo, a pesar de que ha existido una gran inversión en estas fuentes energéticas, estadísticamente las energías oceánicas aún no se proyectan como capacidad instalada adicional al 2029 ni como generación de energía eléctrica de acuerdo con el Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN) 2015-2029 (SENER, 2015). En la prospectiva para 2029 en generación de energías renovables, es notable un aumento en un 128.86% de su participación con respecto a la generación del año 2014. La meta del gobierno federal es alcanzar una participación de 35% en la generación total de electricidad con tecnologías sustentables para el año 2024 (SENER, 2012).

El Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) llevó a cabo la Encuesta Intercensal en 2015 (INEGI, 2015), la cual indicó que 98.72% de las viviendas de México dispone de energía eléctrica y el restante 1.02% no. Entre 2000 y 2010 el porcentaje de viviendas con servicio de energía eléctrica se incrementó en 2.8%; en cambio, de 2010 a 2015 solo aumentó en un 0.9% (INEGI, 2015). Con base en esto, es posible suponer que las viviendas que aún no disponen de tal servicio se encuentran en lugares de difícil acceso. De acuerdo con la Encuesta Intercensal descrita, la Tabla 1 presenta la disponibilidad del servicio de energía eléctrica en viviendas particulares habitadas, específicamente en los estados que tienen zonas costeras. Considerando dichos estados, se describen los porcentajes de la disponibilidad de energía eléctrica (Dis.), de la No disponibilidad de energía eléctrica (No dis.), y de las viviendas No especificadas (No esp.).

Tabla 1. Disponibilidad de energía eléctrica en viviendas de los estados con costa entre 2010 y 2015 (INEGI, 2015).

Viviendas particulares habitadas (2015)				
Estado	Total de viviendas	Dis.	No dis.	No esp.
		(%)	(%)	(%)
Baja California	961 533	99.29	0.68	0.03
Baja California Sur	208 972	98.44	1.39	0.18
Campeche	244 299	98.08	1.88	0.04
Colima	204 949	99.38	0.56	0.05

Viviendas particulares habitadas (2015)				
Estado	Total de viviendas	Dis.	No dis.	No esp.
		(%)	(%)	(%)
Chiapas	1 238 565	97.54	2.33	0.13
Guerrero	894 621	97.34	2.48	0.18
Jalisco	2 058 775	99.55	0.37	0.08
Michoacán	1 191 405	98.97	0.97	0.12
Nayarit	332 279	97.87	2.07	0.06
Oaxaca	1 042 941	95.03	3.11	1.86
Quintana Roo	440 663	98.76	1.19	0.05
Sinaloa	805 854	99.27	0.64	0.08
Sonora	812 567	98.01	1.34	0.65
Tabasco	656 059	99.32	0.57	0.11
Tamaulipas	986 886	98.79	0.95	0.26
Veracruz	2 250 001	98.08	1.84	0.08
Yucatán	564 613	98.62	1.31	0.08

Los datos mostrados en la Tabla 1 no especifican la disponibilidad en las regiones costeras; sin embargo, existen comunidades aisladas en zonas donde existe disponibilidad de recursos del océano. Tal es el caso de la región suroeste de México, donde ha sido reportada la disponibilidad de recursos energéticos por gradiente térmico en regiones cercanas a las costas (García-Huante, et al., 2018). Michoacán, Guerrero y Oaxaca son algunos de los estados con este potencial. Esta es una de las razones por la cual, el estado de Michoacán ha sido considerado para fines del presente estudio. Según datos del INEGI (Tabla 1), el 98.97 % de la población en el Estado de Michoacán cuenta con energía eléctrica (INEGI, 2015): En la Figura 1 se muestran los tipos de energía que se generan en Michoacán (GWh) (INEL, 2016).

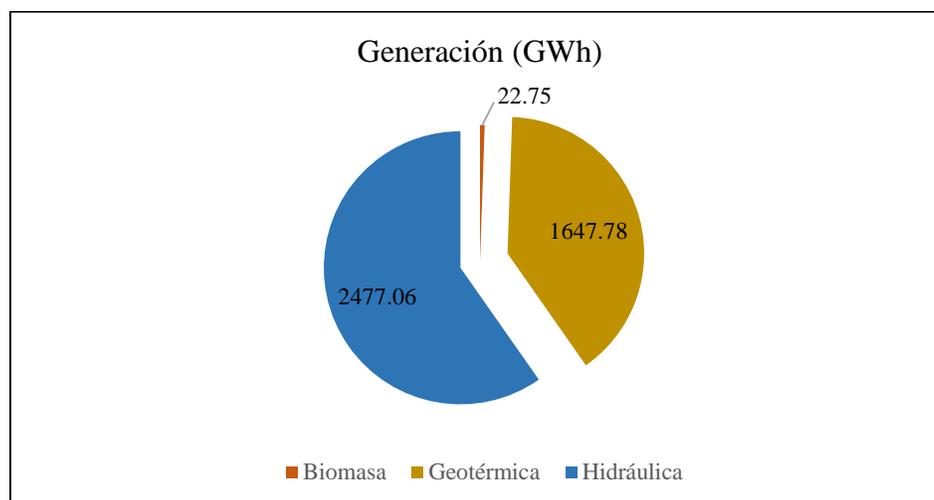


Figura 1. Tipos de energía generados en el Estado de Michoacán (INEL, 2016).

Como se puede observar, en el estado de Michoacán, México, se generan tres tipos de energía: biomasa (0.5%), geotérmica (39.73%) e hidráulica (59.72%). En la Tabla 2 se muestra la ubicación de las plantas productoras en Michoacán, así como el tipo de planta, la capacidad instalada (CI) en MW y la generación anual de energía (GE) en (GWh) (INEL, 2016).

Tabla 2. Plantas productoras de energía eléctrica en Michoacán (INEL, 2016).

Energía	Municipio	Nombre	Sector	Tipo	CI (MW)	GE (GWh)
Biomasa	Taretan	Ingenio Lázaro Cárdenas	Privado	Combustión directa	5.50	9.98
Biomasa	Tocumbo	Ingenio Santa Clara	Privado	Combustión directa	9.10	12.77
Geotérmica	Cd. Hidalgo	Los Azufres	CFE	Geotermoeléctrica	225.00	1,647.78
Hidráulica	Tacámbaro	Bartolinas	CFE	Pequeña hidroeléctrica	0.75	0.79
Hidráulica	Panindicuaro	Botello	CFE	Pequeña hidroeléctrica	18.00	27.08
Hidráulica	Uruapan	Cupatitzio	CFE	Grande hidroeléctrica	80.00	231.71
Hidráulica	Zamora	El Cóbano	CFE	Grande hidroeléctrica	60.00	124.94
Hidráulica	Arteaga	Central El Infiernillo	CFE	Grande hidroeléctrica	1,200.00	1,249.75
Hidráulica	Peribán	Itzicuaro	CFE	Pequeña hidroeléctrica	0.62	0.97
Hidráulica	Lázaro Cárdenas	La Villita	CFE	Grande hidroeléctrica	320.00	572.36
Hidráulica	Jacona	Platanal	CFE	Pequeña hidroeléctrica	12.60	17.88
Hidráulica	Villa Madero	San Pedro Poruas	CFE	Pequeña hidroeléctrica	2.56	1.32
Hidráulica	Morelia	Tirio	CFE	Pequeña hidroeléctrica	1.10	1.18
Hidráulica	Uruapan	Zumpimito	CFE	Pequeña hidroeléctrica	8.40	22.46
Hidráulica	Uruapan	GOB de Michoacán	Privado	Pequeña hidroeléctrica	4.05	14.98
Hidráulica	Contepec	Generadora Fénix, S. A. P. I. de C. V., Central Lerma	Privado	Grande hidroeléctrica	35.00	173.19
Hidráulica	Contepec	Generadora Fénix, S. A. P. I. de C. V., Central Lerma 3	Privado	Pequeña hidroeléctrica	22.00	38.47

Se puede notar a partir de la información de la Tabla 2, que la producción eléctrica en Michoacán depende casi en su totalidad del agua continental (lagos, ríos, acuíferos, etc.) mediante hidroeléctricas o plantas geotermoeléctricas. Se estima que, actualmente se tiene concesionado en todo el estado un volumen de agua de 26 984 hm³/año, donde 44 hm³/año corresponden a agua subterránea utilizada en termoeléctricas, la cual se considera como agua de uso consuntivo (que se consume en gran parte). Los 26 940 hm³/año restantes, corresponden a agua de origen superficial, considerada como de uso no consuntivo, la cual se utiliza para mover las turbinas en las presas hidroeléctricas. Del volumen superficial, 94% corresponde a las presas “Infiernillo” y “La Villita”, localizadas en la parte baja de la Región Hidrológica Administrativa 18 (Balsas) (CONAGUA, 2014), donde se tiene doblemente concesionado un volumen 12 699 hm³/año para cada una. Estas presas tienen una capacidad instalada de 1 000 MW y 300 MW, respectivamente; representan el 85% de todas las hidroeléctricas del estado, que ascienden a 1 525 MW. Les siguen en importancia las hidroeléctricas Cupatitzio (72 MW), Tepuxtepec (67 MW) y Cobano (52 MW), la primera y la última en la cuenca del Río Cupatitzio, y la segunda en Río Lerma 2.

Para poder garantizar el volumen mencionado para las presas hidroeléctricas de “Infiernillo” y “La Villita”, se mantiene una reserva de agua superficial en toda la región hidrológica del Balsas que



impide mayores aprovechamientos. Esta situación se ha convertido en una severa limitante que frena el desarrollo hidráulico en los estados que conforman esta región. El volumen reservado representa el 74% del escurrimiento generado en toda la región Balsas, que es de 17 057 hm³/año. Sólo en el estado de Michoacán, el volumen reservado asciende al 52% de su escurrimiento.

Del agua subterránea concesionada para este uso, destaca la zona conocida como los Azufres, que mediante la energía geotérmica genera también electricidad. Su capacidad asciende a 225 MW (INEL, 2016); por lo que es la tercera central más importante en la entidad, después de “Infiernillo” y “La Villita” (CONAGUA, 2009).

Por lo ya expuesto, es necesario encontrar fuentes alternativas para generación de energía eléctrica. En Michoacán, como en otros estados mexicanos, el agua superficial es un recurso cada vez más cotizado que va menguando con el tiempo. Por lo tanto, los distintos tipos de producción de energía, como la que se puede generar a partir de recursos del océano, tienen que empezar a tomar fuerza en todo México. Por tal motivo, se decidió comenzar con un estudio sobre el potencial de energías oceánicas que puede tener el estado de Michoacán. Ya que si bien el 98.7% de la población cuenta con electricidad, el 1.3% restante no. Además de que existen comunidades aisladas a lo largo de la costa que no cuentan con electricidad para necesidades básicas y que tienen dificultad de integración a la red eléctrica debido a los costos y a los problemas logísticos implicados. Más aún, el hecho de dotar de fluido eléctrico a las comunidades que no cuentan con este servicio, bien puede servir para detonar actividades económicas con mayor valor agregado.

Michoacán cuenta con 228 km de costa, en la cual se encuentran al menos 24 playas con acceso a vías importantes de comunicación y transporte. Además, es posible encontrar el puerto de Lázaro Cárdenas, que sirve de punto de enlace entre Asia y Norteamérica (SCT, 2012). Así como se encuentran regiones de importancia comercial, también existe una zona ecoturística conformada por el Faro de Buserías, La Ticla, Maruata, entre otras; donde a través de encuestas realizadas a la población se detalla que la electricidad les cuesta más que en otras zonas, teniéndose que apoyar de pequeñas plantas solares. Debido a que no se cuenta con alumbrado público y que solo cuentan con electricidad por tres horas a partir de las 8 pm, éstas comunidades se quedan completamente oscurecidas a partir de las 11 pm. Entonces, es necesario llevar alternativas a las poblaciones, para que sigan cumpliendo con la visión ecológica del lugar, y que puedan representar menores costos para la población. Motivos como los mencionados anteriormente sustentan la necesidad de optar por fuentes alternativas de energía que permitan el desarrollo local y regional, tales como las producidas por medio de recursos del océano. Es por ello que en el presente trabajo se desarrolla una investigación para evaluar los recursos energéticos en el estado de Michoacán:

En el capítulo 4 se presenta un estado del arte de diferentes investigaciones en el área de los recursos oceánicos, el cual muestra estudios de energía oceánica en general, después se detallan estudios enfocados en una sola forma de generación de energía (olas, corrientes, gradiente térmico o gradiente salino), debido a que la naturaleza de este estudio incluye la ejecución de una Evaluación Multicriterio, se hizo una revisión bibliográfica de este tema, incluyéndolo en el estado del arte.



El capítulo 5, muestra la metodología a seguir para evaluar el potencial teórico de energía del océano en el estado de Michoacán, donde se detalla una caracterización (geográfica, geomorfológica, demográfica, entre otras) del caso en estudio; además se describen los métodos analíticos para estimar este potencial y ejecutar la evaluación multicriterio.

El capítulo 6 presenta los resultados de energía de energía, en dos maneras, por potencia media y por porcentaje de potencia disponible, respecto al tiempo; además se incluyen los criterios utilizados en la evaluación multicriterio, para al final proponer sitios viables para la explotación de los recursos energéticos del océano.



4 ESTADO DEL ARTE

4.1 Energía oceánica

En los últimos años se han realizado evaluaciones de los recursos energéticos en el océano. Países como Turquía, Reino Unido, Corea, Estados Unidos, Arabia Saudita, entre otros han generado estudios con el fin de evaluar los recursos oceánicos disponibles en algunas regiones o en la totalidad de estos países.

En la Universidad de Southampton, Reino Unido, Bahaj (2011) desarrolló una investigación acerca de la generación de energía en los océanos, en el cuál define cinco formas de energía: mareas, ondas superficiales, circulación oceánica, salinidad y gradientes térmicos. Dicho estudio considera que existe un creciente interés en todo el mundo en la utilización de la energía oceánica. Además, establece un enfoque paso a paso que podría utilizarse en la tecnología y el desarrollo de proyectos e incluye el análisis de las diversas vías y enfoques necesarios para la selección de tecnologías y el abordaje de problemas de implementación de dispositivos o convertidores. Se establece como un aspecto de relevancia que la tecnología debe probarse a sí misma dentro del entorno operativo, es decir, existe una necesidad urgente de obtener experiencia operacional en el mar. Esta experiencia es primordial, ya que podría atraer la confianza de los inversores, de las empresas de energía y de los gobiernos en materia de viabilidad de la tecnología. La viabilidad de la tecnología dependerá, a largo plazo, de la confiabilidad operativa de los dispositivos, de sus costos de mantenimiento y operación, de los permisos y el consentimiento para los proyectos, de la disponibilidad de puertos y la infraestructura de red, y lo más importante, de la disponibilidad de las finanzas (en la era de la crisis crediticia actual). Los desarrolladores de tecnología y las partes interesadas deberán establecer una cadena de suministro sólida para el diseño, la fabricación, el transporte al sitio y los procedimientos de instalación adecuados (Wood, et al., 2010). Por otro lado, también se reconoce que una de las principales barreras para las tecnologías de conversión de energía, como la de las olas y las corrientes marinas, es el costo por MW instalado actualmente está en el rango de US \$ 11–15 millones. Por lo tanto, se recomienda que los desarrolladores de tecnología deberán encontrar un camino hacia la reducción de costos, con la finalidad de alcanzar la paridad futura a un costo actualmente aceptable (Bahaj, 2011).

La Universidad Nacional Marítima de Mokpo, junto con la Universidad Nacional de Seúl y el Instituto de Investigación y Desarrollo Oceánico en Corea, desarrollaron un trabajo por parte de Kim et al. (2012), en el cual se indica que Corea basa la generación eléctrica para satisfacer la mayor parte de sus demandas de consumo en combustibles fósiles importados. Por lo tanto, existe la necesidad de investigar recursos energéticos alternativos, como la energía renovable. Evaluaron el potencial de varios recursos de energía renovable oceánica en el mar alrededor de Corea, así como fuentes potenciales de energía, incluyendo la energía del oleaje, la energía de las mareas, la energía de la corriente de las mareas y la energía térmica oceánica. Debido a las características de recursos oceánicos disponibles en Corea, se concluyó que los potenciales de la energía de las olas y la energía térmica oceánica son relativamente



bajos. Por otro lado, se resaltó la posibilidad de que la energía de las corrientes de las mareas desempeñe un papel importante para satisfacer las necesidades energéticas futuras en dicho país.

Varlas, et al. (2017) trabajaron en un estudio de variabilidad espaciotemporal de los recursos de energía renovable marina en Noruega, donde describieron que los recursos de energía renovable marina dependen en gran parte del complejo comportamiento del clima, lo que determina el desarrollo de las tecnologías, la conexión a la red de energía, así como su suministro y los precios. Este estudio investiga la variabilidad espaciotemporal de los recursos de energía marina a lo largo de la costa de Noruega utilizando los datos NORA10 (NORwegian ReAnalysis 10 km), que es una combinación de la retransmisión de las olas sobre el Océano Atlántico Norte, implementada por el Instituto Meteorológico Noruega (Reistad et al. 2011), para el período 1957-2016. Los resultados indican alta disponibilidad de recursos locales de energía eólica y energía de las olas, los cuales exceden 1 kW/m^2 y 40 kW/m , respectivamente (Varlas et al. 2017).

En el departamento de ingeniería química de la Universidad Técnica de Gebze en Turquía, Melikoglu (2018) se realizó un estudio en el que se presenta una revisión global del estado actual y futuro de las fuentes de energía oceánicas: mareas, oleaje, gradientes de temperatura y gradientes salinos. En dicho estudio se sugirió que el potencial global anual agregado de diferentes fuentes de energía del océano es significativamente mayor que la demanda anual de electricidad, existiendo un inmenso potencial energético en los océanos. El análisis detallado de la literatura de dicho estudio mostró que las diferentes fuentes de energía oceánica tienen los siguientes potenciales globales anuales: marea de casi $1\,000 \text{ TWh}$; oleaje de hasta $93\,000 \text{ TWh}$; gradientes de temperatura de hasta $87\,600 \text{ TWh}$; y gradientes de salinidad entre $2\,000$ y $5\,200 \text{ TWh}$ o incluso hasta $27\,700 \text{ TWh}$. Esto explica el motivo por el cual muchos países alrededor del mundo pretenden convertir fuentes de energía oceánicas en energía eléctrica para satisfacer sus demandas energéticas. Sin embargo, actualmente esto no es posible a gran escala porque la mayoría de las tecnologías de energía oceánica aún están en desarrollo y existen limitantes económicas, técnicas y ambientales que deben resolverse. Por lo tanto, se propone que la investigación y el desarrollo en ingeniería de energía oceánica deben ser promovidos por los gobiernos y el sector privado en todo el mundo para que sea posible utilizar estas fuentes de energía limpia para satisfacer nuestra creciente demanda de electricidad (Melikoglu, 2018).

Hernández-Fontes, et al. (2019) hicieron una evaluación sobre los recursos energéticos marinos de México, donde mencionan que las costas del Atlántico y el Pacífico de México ofrecen una variedad de fuentes de energía marina para su explotación. Los resultados muestran que el potencial de la energía de las olas es mayor en el noroeste de México ($2\text{-}10 \text{ kW/m}$ durante más del 50% del tiempo), y que hay una fuente constante de energía de la corriente oceánica en el estado de Quintana Roo ($32\text{-}215 \text{ W/m}^2$ durante más del 50% del tiempo). La potencia del gradiente térmico es más persistente en el suroeste y sureste del país, donde se pueden encontrar $100\text{-}200 \text{ MW}$ el 70% del tiempo. La energía del gradiente de salinidad es más fuerte en el sureste de México. El enfoque práctico que aquí se presenta puede ampliarse para realizar evaluaciones preliminares de los recursos en regiones donde la información es escasa.



4.1.1 Energía de las olas

En Hawái, Stopa et al. (2011) realizaron una evaluación de los recursos de energía de las olas, en donde implementaron, a lo largo de las principales islas de Hawái, el modelo global WaveWatch III (Tolman, 2009) y utilizaron el modelo Weather Research and Forecast (WRF) para proporcionar fuerza de viento de alta resolución en la región de Hawái. Dos estudios de casos de retransmisión representativos de las condiciones de todo el año brindaron una evaluación cuantitativa de los patrones regionales de viento y de olas, así como los recursos de energía de las olas a lo largo de la cadena de islas de Hawái. Los resultados demostraron el potencial de energía de las olas en las aguas de Hawái, donde concluyeron que los eventos extremos tienen una potencia significativa que alcanza los 60 kW/m, mientras que las olas generadas por el viento, proporcionan un recurso energético constante de 15 - 25 kW/m durante todo el año, que es bastante alta en comparación con otras partes del mundo (Stopa et al., 2011).

Lehmann, et al. (2017) investigaron acerca del estado actual y las perspectivas futuras de la energía de las olas en los Estados Unidos, donde revisaron el estado actual de las tecnologías de conversión de energía de las olas. Se identificaron instalaciones existentes, software, instalaciones y recursos de laboratorio y pruebas de aguas abiertas, grupos de investigación activos y actividades comerciales. Más de un tercio de los desarrolladores de energía de ola comercialmente activos en todo el mundo están ubicados dentro de los Estados Unidos, pero solo unos pocos han alcanzado un alto nivel de preparación tecnológica. Estos hallazgos, junto con un recurso práctico relevante y la naturaleza ventajosa del recurso en comparación con otros recursos renovables, indican que los Estados Unidos están bien posicionados para avanzar en la industria de la energía de las olas en un futuro próximo. El estudio revela que la energía de las olas ofrece un recurso renovable con la ventaja de ser predecible con varios días de anticipación, consistente durante el día y la noche, y una densidad de energía significativamente mayor en comparación con las energías eólica y solar. El Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE por sus siglas en inglés) define tres áreas de enfoque para abordar las oportunidades críticas de aceleración y despliegue del mercado: 1) recopilación de datos y experimentación, 2) desarrollo de tecnologías, técnicas de monitoreo y mitigación; e 3) intercambio de información y colaboración internacional (DOE, 2015).

En la República de Uruguay, Alonso et al. (2017) evaluaron el recurso energético de las olas en los mares uruguayos, donde las inversiones en energía renovable han experimentado un fuerte crecimiento en los últimos años, principalmente debido al desarrollo de parques de energía eólica. En esta investigación se obtuvieron imágenes previas de alta resolución de las olas forzadas con vientos de reanálisis. Los resultados se utilizaron para generar mapas de potencial de energía y estos mapas fueron superpuestos en otros usos para identificar posibles zonas de explotación. Los resultados confirman que, dado que el país está ubicado en una zona de mareas bajas, la energía de las olas es la más prometedora entre las fuentes analizadas (Alonso et al., 2017).

Utilizando modelos numéricos, Aboobacker, et al., (2017) realizaron en Arabia Saudita una evaluación de los recursos de energía de las olas para el Mar Rojo. Utilizando el modelo WaveWatch III (Tolman, 2009) y forzándolo con vientos de reanálisis del sistema de pronóstico climático de la NOAA



(Chawla et al. 2013), se simularon las condiciones de oleaje para 1979 a 2010 (32 años). Los resultados del modelo fueron validados contra mediciones *in situ* en el Mar Rojo. Los parámetros del oleaje simulados se utilizaron para estimar la potencia en el Mar Rojo para los 32 años, un período razonable a largo plazo para una evaluación precisa. La energía del oleaje estimado fue analizada en forma mensual, estacional e interanual. Los resultados indican fuertes variaciones espaciales y estacionales en la potencia del oleaje medio. El estudio arrojó resultados de zonas altamente potenciales para el aprovechamiento de energía, donde la zona con potencia del oleaje medio más alto se encontró en la costa oeste de Yemen (1.8 kW/m), seguida de la costa oeste central de Arabia Saudita (1.6 kW/m) y la costa este de Egipto (1.03 kW/m). Esta investigación sobre el potencial de energía de las olas y las características asociadas, como la variabilidad interanual y las tendencias a largo plazo en el Mar Rojo, destaca la cuantificación de la potencia de las olas y la conveniencia de la exploración de la energía renovable en áreas relevantes.

Haces-Fernandez et al. (2018) realizaron una caracterización y evaluación de la energía de las olas en el Golfo de México, la costa este y oeste de los Estados Unidos en el Departamento de Ingeniería Ambiental de la Texas A&M University-Kingsville, donde define al oleaje como un recurso complejo que depende directamente de dos parámetros meteorológicos, que producen fluctuaciones significativas de la energía de las olas tanto en criterios espaciales como temporales. En este documento se analizan los datos meteorológicos generados por el WaveWatch III (Tolman, 2009) que incluyen altura de ola significativa y periodo de ola durante 36 años con el fin de caracterizar y evaluar el comportamiento de la energía de las olas utilizando estadísticas extremas, segmentando la energía de las olas con diferentes umbrales y evaluando la producción de energía de las olas en un marco temporal y espacial. En el estudio se concluye que las densidades de potencia de ola en el Golfo de México, en las costas este y oeste se mostraron como un sistema de dos estados temporales, con períodos de alta energía de oleaje denominados eventos de energía y periodos de baja energía de oleaje denominados roturas. Los resultados muestran que, en la costa este y oeste la potencia de energía de oleaje es alta, superando valores de 100 kW/m, por lo que en estas zonas los dispositivos de conversión de energía de las olas aumentan en tamaño, precio y están expuestos a un mayor riesgo debido a la presencia de oleaje muy energético que se presenta en el área durante un periodo de tiempo significativo. Por otro lado, el Golfo de México cuenta con un gran número de regiones capaces de producir una cantidad significativa de energía de las olas, superando en muchos casos el umbral de 35 kW/m, lo que hace que su cosecha sea comercialmente viable (Haces-Fernandez et al., 2018).

En Bangkok Tailandia; Komporn et al. (2018) evaluaron el potencial de recursos energéticos de las olas del océano de Tailandia, donde asegura que la tecnología que genera energía a partir de las olas se puede diseñar para que sea compatible con el medio ambiente marino. En Tailandia, la energía de las olas del océano se puede producir en ambas costas porque Tailandia tiene el Golfo de Tailandia al este y el Mar de Andamán situado al oeste. El modelo numérico utilizado en este estudio es el modelo Simulated Waves Nearshore (SWAN). Este modelo, que es adecuado para aguas poco profundas, se puede utilizar para determinar las características de las olas oceánicas, incluida la altura de las olas. La altura de la ola significativa se utilizó para evaluar el potencial natural de la energía de las olas oceánicas tanto en el Golfo de Tailandia como en el mar de Andamán, utilizando datos que abarcan un período de 10 años



desde 2005 hasta 2015. Al observar los resultados para una potencia de ola promedio general para todas las estaciones en el Golfo de Tailandia, es posible sugerir que la potencia más alta es de aproximadamente 0.52 kW/m, durante la temporada de monzones noreste; en cuanto al mar de Andamán se alcanzan potencias de 5.12 kW/m y 3.25 kW/m durante las temporadas monzón suroeste y monzón noreste, respectivamente (Komporn et al., 2018).

4.1.2 Energía de las corrientes marinas

Duerr & Dhanak (2012) presentaron una evaluación de los recursos energéticos de la corriente de Florida que, aunque se ha caracterizado por su rápida corriente y su potencial para la extracción de energía durante casi 40 años, requiere un análisis detallado de las características de la distribución de la corriente para apoyar el diseño y desarrollo de matrices de dispositivos de extracción de energía. Se estima que la corriente alcanza aproximadamente 25 GW de potencia; sin embargo, la potencia dentro del área operativa realista de los dispositivos actuales de extracción de energía varía de 1 a 4 GW, dependiendo de las restricciones del área operativa. Este tipo de consideraciones puede proporcionar una aproximación realista de cuánta potencia podría extraer una serie de turbinas. La matriz en el estudio de caso discutido en este documento indica que se podría potencialmente extraer un estimado de 200 MW de la Corriente de Florida. Sin embargo, es importante mencionar que también es posible evaluar el potencial de extracción considerando diferentes turbinas y configuraciones de arreglos.

Yang, et al. (2013) hicieron una evaluación teórica del potencial energético de las corrientes oceánicas para el sistema de la corriente del Golfo, la cual presenta algunas de las velocidades más rápidas y persistentes en el Océano Atlántico. Se calibró un modelo analítico simplificado para representar el equilibrio geostrófico en la circulación subtropical del Atlántico norte. Se estima que el sistema puede sostener la disipación de energía por turbinas hasta aproximadamente 44 GW con un coeficiente de resistencia de la turbina dos veces mayor que el coeficiente de resistencia natural. El flujo de energía cinética a lo largo del límite occidental es mucho más alto que en cualquier otro lugar debido al efecto Coriolis. Por lo tanto, la mayor parte de la disipación de energía se produce a lo largo del límite occidental, incluso cuando se aplica un arrastre uniforme de la turbina. Si bien la disipación de energía de las turbinas se deriva de un coeficiente de arrastre de turbina uniforme, todavía es una primera aproximación razonable de la disipación de energía solo desde el límite occidental.

En Atlanta, EUA, Yang, et al. (2015) presentaron una base de datos nacional de recursos de energía cinética de la corriente oceánica derivada de siete años de simulaciones de modelos numéricos en los Estados Unidos, donde defendieron que las corrientes oceánicas representan una fuente alternativa de energía limpia dada su fiabilidad, persistencia y sostenibilidad. Este estudio proporciona una interfaz GIS que incluye capas de velocidad media de la corriente oceánica media mensual y anual, y la densidad de potencia asociada a lo largo de las líneas costeras de los Estados Unidos. El sistema de la Corriente del Golfo, especialmente la Corriente de Florida, concentra la mayor densidad de potencia cinética superior a 2000 W/m²; mientras que la mayoría de las aguas marinas de EUA tienen una densidad de potencia de superficie media inferior a 100 W/m². Fue sugerido que la mayor parte de la potencia cinética y su variabilidad solo están presentes en aguas relativamente poco profundas, dada la fuerte correlación



de la tensión del viento en la superficie. La potencia disponible asociada con la condición de flujo natural no perturbado del sistema de la Corriente del Golfo se calculó utilizando parámetros de turbina seleccionados a propósito para que coincidan con la estimación de potencia teórica total de aproximadamente 5 GW.

Kabir, et al. (2015) evaluaron la energía de la corriente oceánica disponible cerca de la costa de Carolina del Norte, utilizando los datos del Modelo Oceánico de Coordenadas Híbridas (HYCOM, por sus siglas en inglés) y mediciones de radar de alta frecuencia. La evaluación mostró que el área exhibe una densidad de potencia de al menos 500 W/m^2 en más del 50% de los días y 1000 W/m^2 o más de un tercio del período estudiado. Los resultados también mostraron que la dirección de la velocidad del océano es muy uniforme en la dirección noreste, lo que facilitaría una futura explotación del recurso. Además, también se presentó un análisis estadístico que aplica distribuciones de probabilidad. Se mostró que el uso de una distribución de probabilidad de Weibull puede facilitar el análisis de las condiciones de velocidad del océano, siendo capaz de predecir la densidad de potencia con un alto grado de precisión.

En Sudáfrica, Meyer & Van Niekerk (2016) hicieron una evaluación de recursos prácticos de la energía extraíble en la corriente de Agujas, en el suroeste del Océano Índico, donde se encontró un área de flujo rápido, aproximadamente a 100 km al noreste del centro económico más cercano. Se analizó un sitio “mid-shelf” (en aguas intermedias) y uno “off-shore” (costa afuera) y se encontró que el sitio “off-shore” tiene más energía, con velocidades más altas y poca variabilidad direccional. Fue sugerido que las velocidades medias encontradas a 30 metros de profundidad en la ubicación “off-shore” es de 1.59 m/s y en la ubicación “mid-shelf” es de 1.34 m/s. Idealmente, en este rango de velocidad, una turbina funcionará a la velocidad nominal. También se encontró que la capacidad de un sistema de 2000 MW en la ubicación “off-shore” era del 47%, 27% más que el de las plantas de energía eólica de la misma magnitud. Esta cifra indica que una planta de aprovechamiento de corriente oceánica podría aumentar el suministro de electricidad de carga base en Sudáfrica, lo que podría aumentar la confiabilidad del sistema a medida que se suministra energía durante los períodos de mayor demanda. Con esto, se sugiere que la corriente de Agujas cuenta con potencial para hacer una contribución significativa a la red eléctrica de Sudáfrica.

4.1.3 Energía por gradiente térmico

En Japón, Uehara, et al. (1988) desarrollaron un diseño conceptual de las plantas eléctricas de conversión de energía térmica oceánica en Filipinas, donde aseveran que la conversión de energía térmica oceánica (OTEC), en electricidad, ocurre al usar la diferencia de temperatura entre el agua caliente en la superficie del océano y el agua fría de las profundidades. Se obtuvieron extensas lecturas de temperatura para determinar los sitios adecuados de las centrales eléctricas de OTEC en Filipinas. Un análisis de los perfiles de temperatura revela que el agua de mar superficial está en el rango de 25 a 29 °C durante todo el año, mientras que el agua de mar a una profundidad de 500 a 700 m permanece a una temperatura baja de 8 a 4 °C, respectivamente. En este artículo se sugieren 14 sitios adecuados dentro de los mares filipinos. Se proponen diseños conceptivos para una planta de energía OTEC de 5 MW de tipo terrestre y 25 MW de tipo flotante. Se obtuvieron las estimaciones de costos resultando en que la planta flotante de



25 MW genera electricidad a un costo en c/kW.h 60% menor que lo que costaría la planta terrestre de 5 MW. De los 14 sitios estudiados se concluyó que 10 son ideales para plantas tipo flotante OTEC y 4 son sitios ideales para plantas terrestres.

En Hawái, Kim, et al. (2016) desarrollaron una investigación acerca de la conversión de energía térmica oceánica de ciclo abierto (“OC, Open-Cicle”) de doble uso, usando condensadores múltiples. En la investigación se evalúan analíticamente el rendimiento del sistema de condensador múltiple, la generación de energía y las capacidades de desalinización del agua de mar; en términos de fracciones de flujo de vapor, temperatura del agua de admisión y presión de vacío. Los parámetros de control importantes incluyen la temperatura del agua caliente y su tasa de consumo, la presión de vacío en el evaporador y la temperatura del agua fría. La tasa de ingesta del agua fría profunda se calcula en función del modo y las condiciones operacionales. Se sugieren ecuaciones fenomenológicas para estimar la generación de vapor y las tasas de condensación, que se utilizan para optimizar el rendimiento general de las operaciones de doble uso.

En Colombia, Osorio, et al. (2016) estudiaron el potencial en posibles eco-parques de energía térmica en las pequeñas islas tropicales, donde manifiestan que estas islas enfrentan desafíos difíciles para garantizar el suministro de energía, agua dulce, alimentos y el desarrollo sostenible. El mar profundo es un recurso que puede proporcionar electricidad a través de una combinación con el agua de superficie. La tecnología del océano de los eco parques (OTEP) involucra la generación de energía, la producción de agua dulce y los nutrientes del mar profundo, considerando actividades de investigación y desarrollo (I&D). En esta investigación se presenta una aplicación de OTEP a San Andrés, una isla colombiana que reúne todas las condiciones necesarias; se identificaron seis barreras principales para su adopción en la isla: difusión de conocimiento, regulación de servicios, financiamiento y costos, capacidades industriales existentes, compromiso de las autoridades e impactos ambientales y sociales. Se propuso una hoja de ruta de cuatro etapas para el desarrollo y la consolidación de la OTEP. Una etapa preliminar incluye estudios de ubicación. A partir de entonces, dos etapas de viabilidad deben permitir la definición de los últimos signos de OTEC, y su instalación posterior en el terreno. Por último, una etapa de consolidación debe centrarse en la creación de industrias derivadas para otros usos de los recursos del mar profundo.

En la Florida, VanZwieten, et al. (2017) evaluaron los recursos OTEC de Florida, EE. UU., el recurso OTEC se analizó en el océano alrededor del estado de Florida mediante el modelo de circulación oceánica HYCOM, junto con un modelo de planta OTEC para predecir los valores de energía alcanzables en la costa de Florida; también se hizo una validación de datos a través de la comparación con las mediciones oceánicas in situ para validar los valores de potencia previstos. Se estimó la potencia de una planta OTEC de ciclo cerrado de 100 MW, las estimaciones predijeron que al sur de los Cayos de Florida y al este de la parte continental de Florida se pueden producir 112 MW Y 90 MW de potencia neta. Las comparaciones de HYCOM con los datos medidos de la velocidad del agua y la temperatura del agua muestran que es un modelo apropiado para estimar el potencial de OTEC en esta región, con el mayor error en las regiones de aguas poco profundas.



4.1.4 Energía por gradiente salino

En los Ángeles, EUA, Guy, et al. (2011) estudiaron los principios fundamentales que rigen el funcionamiento de los métodos basados en membranas para la extracción de energía por gradiente de salinidad. Actualmente existen dos tecnologías de este tipo: la ósmosis retardada a presión (“PRO, Pressure-Retarded Osmosis”) y la electrodiálisis inversa (“RED, Reverse Electro-Dialysis”), ambos procesos, particularmente RED, requieren un mayor diseño y optimización a escala de módulo, para lo cual se deben considerar las configuraciones de flujo, transferencia de masa, disipación viscosa y recuperación de energía con la ayuda de modelos matemáticos más elaborados. Para mejorar el proceso RED se tiene que hacer énfasis en el diseño del canal de alimentación, ya que se podría generar muy poco mejorando las membranas. En contraste, las membranas PRO tienen mucho potencial de mejora. El parámetro más importante para mejorar el proceso PRO es la permeabilidad al agua; los resultados muestran que las membranas disponibles en la actualidad no están limitadas por el factor de estructura sino por su permeabilidad.

En Colombia, Alvarez-Silva, et al. (2016), desarrollaron un proyecto donde se buscó la obtención del potencial energético global de gradiente de salinidad. En este estudio proponen que esta energía puede aprovecharse a partir de la mezcla controlada de dos masas de agua de diferente concentración de sal. Un sistema natural que ofrece estas condiciones son las bocas de los ríos, donde se estima que el potencial teórico global de energía de gradiente salino es de 15,102 TWh/a, equivalente al 74% del consumo mundial de electricidad. Sin embargo, la energía práctica extraíble por gradiente salino de estos sistemas depende de varias restricciones físicas y ambientales. Se ha demostrado que prácticamente 625 TWh/a de energía por gradiente salino se puede extraer globalmente de las bocas de los ríos, lo que equivale al 3% del consumo mundial de electricidad. Aunque este valor es mucho menor que el potencial teórico, sigue siendo una cantidad significativa de energía limpia.

En Turquía, Emdadi, et al. (2016) calculó el potencial de energía de gradiente de salinidad en el sistema hipersalino del río Urmia-Zarrineh Rud en Irán. Se señala que el gradiente de salinidad tiene un alto potencial, especialmente cuando los ríos de baja salinidad desembocan en lagos hipersalinos. Con base de en cálculos termodinámicos y datos de campo, el potencial teórico de la producción de energía en este sistema fue calculado entre 400 y 1000 MW. Se investigaron dos procesos para la producción de electricidad a partir de gradientes de salinidad: PRO y RED. Puntos importantes a considerar en la evaluación de dichos procesos son función del costo de la membrana, la densidad de energía, la expectativa de vida útil y el precio de venta de la energía eléctrica. Según la tecnología disponible, se espera que el proyecto sea viable si se utilizan membranas con una densidad de potencia superior a 5W/m^2 y una expectativa de vida útil de 10 años, o bien, 10W/m^2 y una expectativa de vida útil de 5 años.

4.2 Evaluación multicriterio (MCE)

Eastman (2005) publicó un estudio de evaluación multicriterio donde hace un análisis de idoneidad para el desarrollo industrial de la región de Nakuro (Kenya), la cual es una región de gran potencial agrícola que ha experimentado un rápido desarrollo urbano en los últimos años. En el estudio



se indicó que una de las aplicaciones más importantes de los sistemas de información geográfica (SIG) es la visualización y el análisis de datos para apoyar el proceso de toma de decisiones. Definió una decisión como una elección entre alternativas, donde las alternativas pueden ser diferentes acciones, lugares, objetos, etc. Las decisiones están basadas en uno o más criterios (atributos) medibles de las alternativas consideradas, que pueden combinarse y evaluarse en forma de una regla de decisión, exceptuando casos donde las decisiones de asignación pueden tomarse sobre la base de un único criterio. El autor mostró diferentes métodos de evaluación multicriterio, tanto para datos de tipo vectorial como datos rasterizados, concluyendo que para el primer tipo de datos la superposición booleana es típicamente utilizada para datos vectoriales, mientras que las medidas difusas son aplicables a sistemas rasterizados, que contienen mínimo y máximo.

Flocard, et al. (2016) presentaron un enfoque de evaluación geoespacial de criterios múltiples (MCE) con el fin de identificar ubicaciones óptimas para desplegar una granja de energía de las olas y minimizar los conflictos con otros usuarios costeros y en alta mar. El estudio se centró a lo largo de un tramo de costa de más de 500 km en el sureste de Australia, donde se aplica una metodología MCE. Se discute la justificación de la elección de los criterios principales, los factores utilizados en el estudio y la sensibilidad a los parámetros empleados. La metodología presentada se basa en cinco criterios principales: climatología de las olas oceánicas, naturaleza del fondo marino, distancia a la infraestructura clave, factores ambientales y conflicto potencial con otros usuarios, como el transporte marítimo y la pesca. Estos factores fueron combinados por medio de una combinación lineal ponderada, donde cada factor se multiplicó por un peso de importancia relativa, y los resultados se sumaron para llegar a un índice de idoneidad. En el estudio también se realizó un análisis de sensibilidad donde se encontró que los resultados del modelo eran robustos al considerar la variabilidad en la ponderación de los parámetros individuales del modelo y permitió el análisis de la persistencia espacial de áreas altamente adecuadas entre los resultados del modelo. Los resultados identificaron claramente las ubicaciones óptimas, totalizando un área de más de 700 km² con puntuaciones de alta idoneidad correspondientes a dos ubicaciones.

Murrant & Radcliffe (2018) afirmaron que el almacenamiento de energía abarca una familia de tecnologías, cada una con su propio conjunto de prestaciones, costos y características físicas, en las diferentes fases de desarrollo de un proyecto. Además de que cada sistema energético, cualquiera que sea su definición, tiene necesidades específicas y forman parte de un sistema socio-técnico. Todos estos factores técnicos y no técnicos que se tienen que considerar son difíciles de evaluar por parte de los responsables de la toma de decisiones. En el proyecto que desarrollaron estos autores evaluaron los beneficios más amplios que se derivan del despliegue de energía, utilizando la Teoría del Valor de Atributos Múltiples (MAVT, por sus siglas en inglés) una forma de Análisis de Decisión de Criterios Múltiples. Además de que evaluaron seis proyectos potenciales de almacenamiento de energía mediante una combinación de análisis técnico y aportaciones de las partes interesadas en el condado de Cornwall en el Reino Unido. Los proyectos evaluados fueron: energía de gas, un sistema de baterías distribuido, almacenamiento de baterías integrado con energía solar fotovoltaica y demanda del aeropuerto de Cornwall Newquay, almacenamiento de energía de aire líquido, almacenamiento de baterías integrado



con energía de las olas y almacenamiento de energía térmica en un nuevo desarrollo residencial. Los autores concluyeron que el MAVT puede proporcionar un enfoque sencillo y fácil de usar por los responsables de la toma de decisiones para evaluar los proyectos de almacenamiento de energía a través de una serie de criterios. Este enfoque también permitió explorar la subjetividad de la toma de decisiones, una limitación potencial, a través de un análisis de sensibilidad.

5 METODOLOGÍA

En esta sección se describe la metodología propuesta para la selección de sitios potenciales para extracción de energía del océano en el estado de Michoacán (Figura 2).

La primera parte del capítulo (Sección 5.1) presenta el caso de estudio, en la cual se muestran las características geográficas de la región de interés correspondiente al estado de Michoacán, así como factores sociales, económicos y ambientales a ser considerados en dicha región. Estos factores incluyen áreas protegidas, la actividad portuaria en la zona, las subestaciones eléctricas más protegidas, vías de comunicación, así como las principales regiones de actividad pesquera.

La segunda parte del capítulo (Sección 5.2) presenta los métodos utilizados para estimar el potencial de recursos energéticos del océano.

Finalmente, la tercera parte (Sección 5.3) presenta la metodología para realizar la selección de sitios prospectos utilizando evaluación multicriterio, considerando la información descrita en las secciones 5.1 y 5.2.

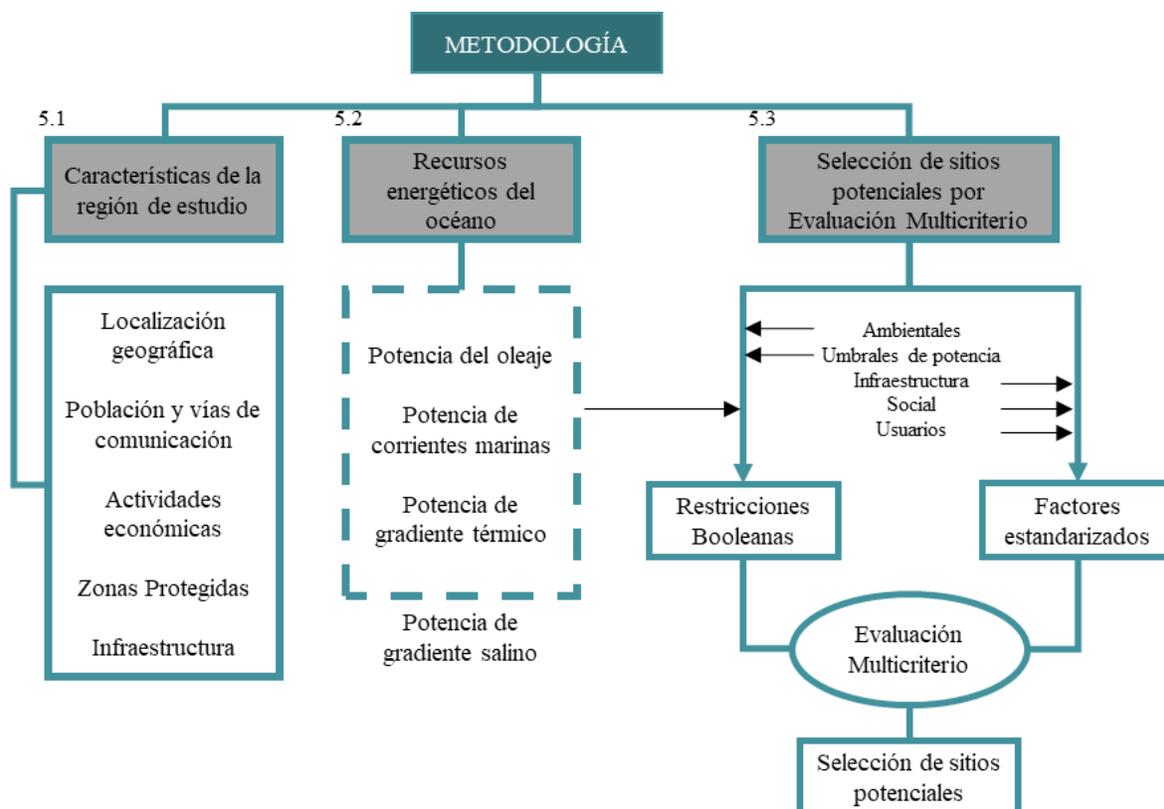


Figura 2. Diagrama general de la metodología a seguir.



5.1 Caso de estudio

La ubicación geográfica de México lo posiciona entre los dos océanos más grandes del planeta (el Océano Pacífico en la zona este del país y el Océano Atlántico en frontera con la zona oeste del país). De las 32 entidades federativas que conforman la República Mexicana, 17 tienen apertura al mar y representan el 56% del territorio nacional. La longitud de costa del país, sin contar la correspondiente a las islas, es de 11 122 km. En el litoral del Pacífico y Golfo de California se tienen 7 828 km y 3 294 km en el Golfo de México y Mar Caribe (SEMARNAT, 2014).

En la literatura se ha reportado (García-Huante et al. 2018, Hernández-Fontes et al. 2019), que las costas mexicanas localizadas en el Océano Pacífico pueden presentar potencial para extracción de algunos tipos de energía del océano, tales como oleaje, gradiente salino y gradiente térmico. Pero aun con la presencia de potencial energético, es relevante mencionar que no toda la línea costera se puede aprovechar, debido a factores que se deben tomar en cuenta, tales como las repercusiones ambientales, sociales y económicas, así como de acceso a la red o a infraestructuras. El análisis de estos factores en toda la región de la costa del Pacífico mexicano resultaría complicado y con gran margen de error, es por ello que se decidió estudiar una región estatal. En el presente estudio, el estado de Michoacán se ha seleccionado como caso de estudio para generar las ubicaciones de sitios potenciales de extracción. La intención es proponer un procedimiento de análisis cuya aplicación pueda ser extendida a otras regiones.

La costa del estado de Michoacán (Figura 3) es una franja de 262 km de litoral de cara al Océano Pacífico, esta área inicia por el sureste en la desembocadura del río Balsas, limita con el estado de Guerrero, y se prolonga hasta el río Coahuayana en el extremo noroeste, el cual marca el límite con el estado de Colima. Dicha zona cuenta con amplias planicies en sus extremos y algunas menores en sus partes centrales, pero sobre todo, se caracteriza por sus variados accidentes geográficos, debido a que es un espacio donde la Sierra Madre del Sur entra abruptamente al mar formando extensas zonas de acantilados, isletas, puntas, bahías y algunos tramos de playa, además de múltiples ríos que bajan de la sierra y desembocan en el mar (Marín, 2007).

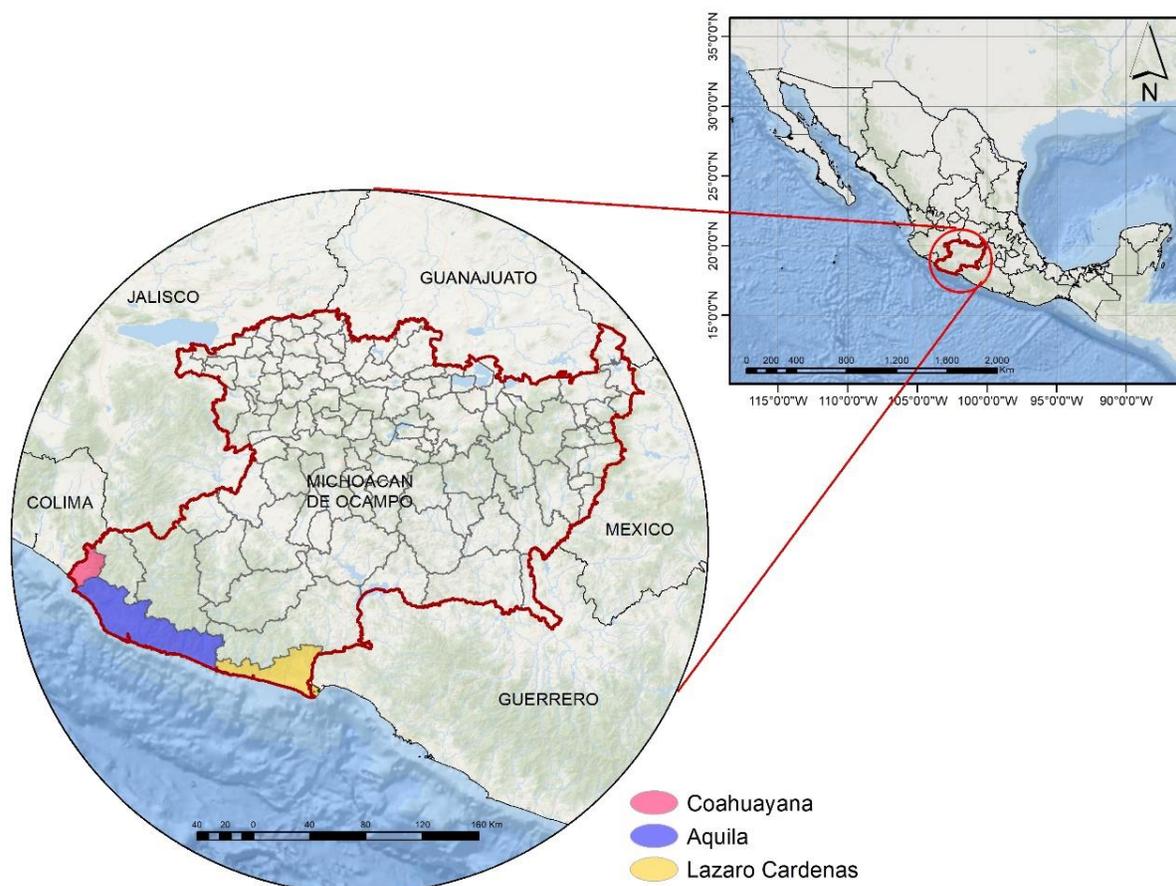


Figura 3. Localización geográfica de la costa del estado de Michoacán, México.

El sector de la línea de costa que abarca el estado de Michoacán, incluye tres municipios: Lázaro Cárdenas, Aquila y Coahuayana. Lázaro Cárdenas posee una extensión territorial de 1 160 km², una población de 178 817 habitantes. Estos habitantes ocupan un total de 46 498 viviendas de los cuales solo el 1.13% no cuenta con electricidad. El municipio de Aquila abarca la parte central de la línea de costa, con una extensión territorial de 2 312 km² y con 23 536 habitantes en 4955 viviendas, de los cuales el 33% no cuenta con energía eléctrica. Limitando con el estado de Colima se encuentra el municipio de Coahuayana con una superficie de 362 km² y una población total de 14 136 habitantes, distribuidos en 3 626 viviendas, de los cuales el 1.98% no cuenta con electricidad (INEGI, 2010).

Identificación de localidades costeras

En la Figura 4 se muestran las localidades cercanas a la costa, las cuales fueron seleccionadas con base en el cumplimiento de dos criterios asumidos para el presente estudio: (i) las que representan una población importante, mayor a 100 habitantes; (ii) y las que están más cercanas a la carretera en un radio de 10 km. También, son mostradas las poblaciones indígenas que se filtraron de acuerdo a los dos criterios anteriores. En la Tabla 3 se presentan los nombres de estas localidades, así como el número de habitantes y su localización geográfica. Esta información puede ser utilizada para considerar cuáles

localidades podrían ser las más perjudicadas o beneficiadas por la implementación de algún proyecto de energías del océano.

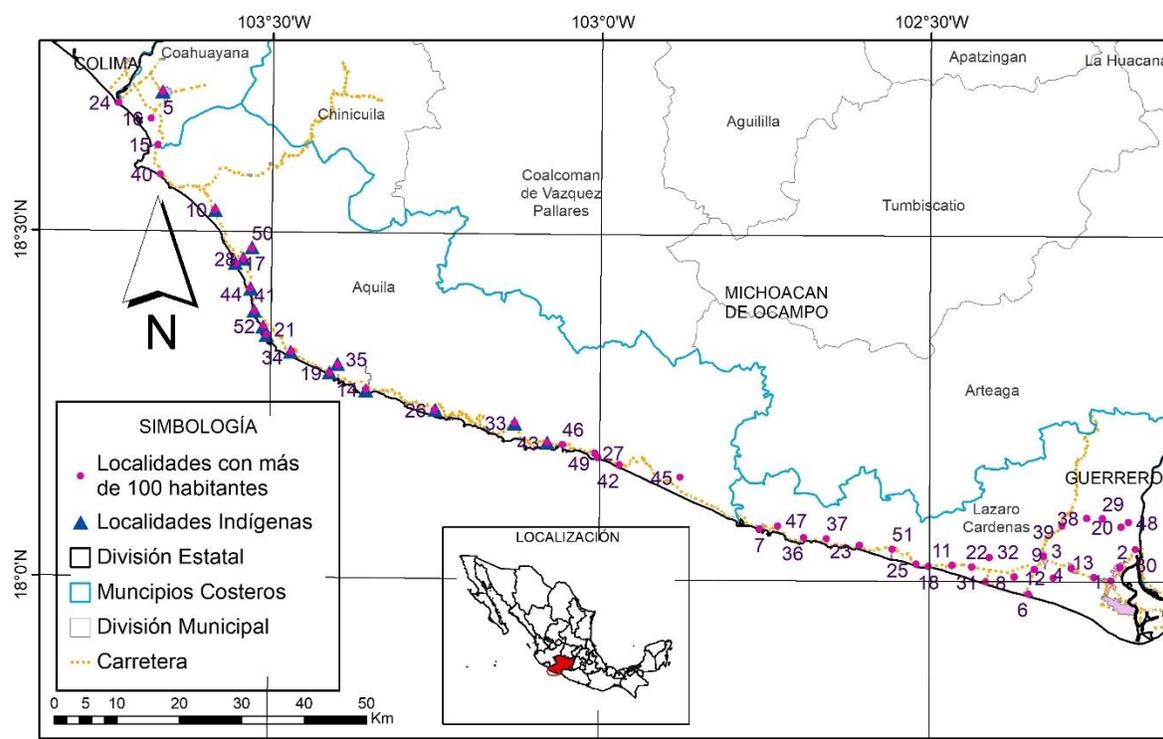


Figura 4. Localidades con cierta relevancia y vías de comunicación de la costa del estado de Michoacán, México (INEGI, 2015, INPI, 2018).

Tabla 3. Descripción de las localidades de la costa del estado de Michoacán, México (INEGI, 2015, INPI, 2018).

	Nombre	Población	Longitud (°)	Latitud (°)	Elevación (msnm)	
1	Lázaro Cárdenas	63732	102.13	18.00	20	
2	Guacamayas	36724	102.12	18.01	20	
3	La Mira	14224	102.19	18.02	40	
4	Buenos Aires	9551	102.17	18.01	60	
5	Coahuayana de Hidalgo	6037	103.40	18.42	10	△
6	Playa Azul	3193	102.21	17.59	10	
7	Bahía Bufadero	2065	102.45	18.04	30	
8	El Habillal	1821	102.22	18.00	20	
9	Acalpican De Morelos	1727	102.20	18.01	20	
10	La Placita De Morelos	1274	103.35	18.32	20	△
11	Chucutitán	770	102.28	18.01	10	
12	El Bordonal	689	102.18	18.00	40	
13	Puente de La Vía	613	102.15	18.00	40	
14	Maruata	491	103.21	18.16	10	△



	Nombre	Población	Longitud (°)	Latitud (°)	Elevación (msnm)	
15	Ojo de Agua de San Telmo	474	103.40	18.37	20	
16	El Ticuiz	469	103.41	18.39	10	
17	La Ticla	420	103.33	18.27	10	△
18	Las Pecas	395	102.30	18.01	20	
19	Colola	395	103.24	18.17	10	△
20	San Rafael	356	102.12	18.04	100	
21	El Faro de Bucerías	347	103.30	18.21	10	△
22	Solera de Agua	324	102.26	18.01	20	
23	Chuquiapan	316	102.36	18.03	20	
24	Boca De Apiza	308	103.44	18.41	3	
25	Llanos Del Bejuco	307	102.31	18.01	20	
26	Cachán De Echeverría	286	103.15	18.14	10	△
27	Huahua	281	103.00	18.11	10	
28	El Duin	272	103.32	18.27	20	△
29	El Reino	270	102.14	18.05	120	
30	La Villita	266	102.11	18.03	20	
31	Las Calabazas	257	102.25	17.60	10	
32	El Colomo	236	102.24	18.02	40	
33	Tizupan	225	103.07	18.13	50	△
34	Motán del Oro	206	103.28	18.19	10	△
35	Las Haciendas	195	103.24	18.18	20	△
36	La Manzanilla	194	102.41	18.03	20	
37	Mexcalhuacan	183	102.39	18.03	20	
38	Las Higueras	182	102.15	18.05	200	
39	San Juan Bosco	181	102.18	18.05	160	
40	San Juan de Alima	174	103.40	18.35	5	
41	El Zapote de Madero	168	103.31	18.23	20	△
42	Boca de la Manzanilla	165	102.58	18.10	20	
43	Cuilala de Hidalgo	156	103.04	18.12	20	△
44	Ixtapilla	149	103.32	18.25	10	△
45	El Atrancón	132	102.52	18.09	40	
46	Arenas Blancas	120	103.03	18.11	10	
47	Teolán	118	102.43	18.04	20	
48	La Paz	115	102.12	18.05	80	
49	Campo de Huahua	110	103.00	18.10	10	
50	Cobanera de Ostula	108	103.31	18.28	20	△
51	Chuta	102	102.33	18.02	20	
52	La Palma Sola	100	103.30	18.22	20	△

△ = Poblaciones indígenas

Infraestructura

La necesidad de infraestructura existente para la construcción de nuevas obras es redundante en todo proyecto, como puntos de acceso, conexión o transporte de materiales; en la Figura 5, se muestran, además de la carretera que recorre toda la línea de costa del estado de Michoacán, los puertos más presentes en la zona o cercanos a ella, sobresaliendo el puerto de Lázaro Cárdenas, en el estado de Michoacán; y el puerto de Manzanillo, en el estado de Colima. El primero destaca por ser un puerto industrial y comercial líder en el pacífico mexicano (SCT, 2012). El Puerto de Manzanillo se ha posicionado como la principal entrada para el manejo de mercancías en el comercio internacional, de las zonas centro y Bajío del país (API Manzanillo, 2019). También se denotan las subestaciones eléctricas (SE) más cercanas a la costa, a fin de tener puntos para conexión a la macro red del país. Entre las que se encuentran la SE Coahuayana, casi en el límite del estado con Colima y la SE San Isidro en los límites con Guerrero (CENAPRED, 1988).

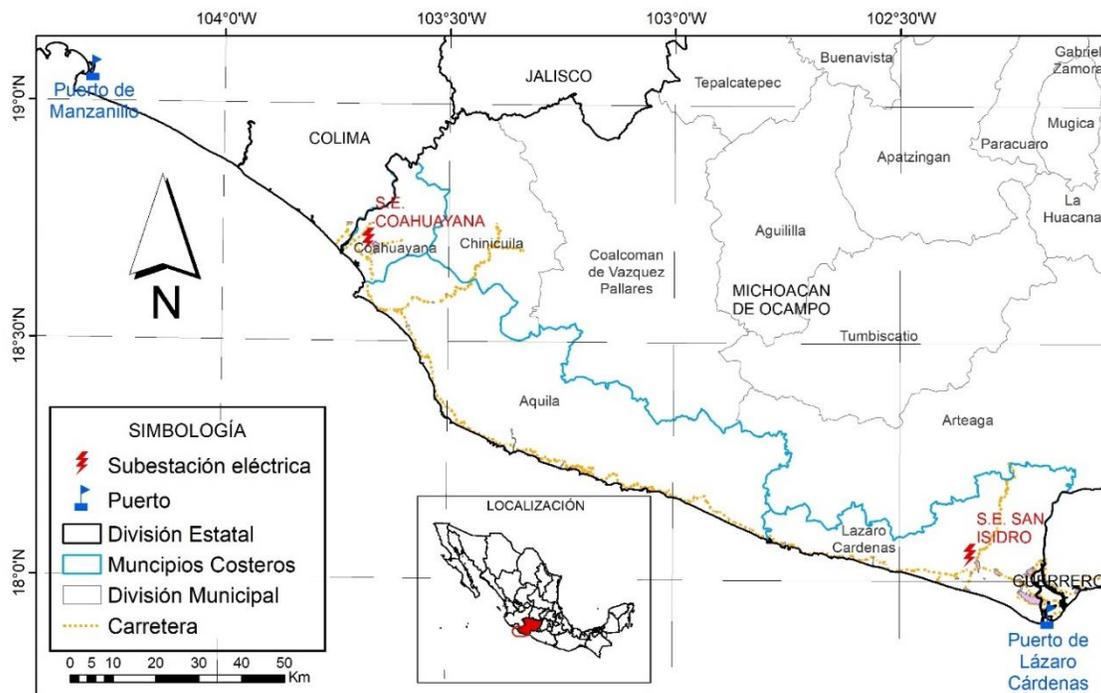


Figura 5. Infraestructura portuaria y eléctrica en la costa del estado de Michoacán, México (CENAPRED, 1988).

Zonas de desarrollo económico marino

La actividad económica que más se desarrolla en la costa michoacana es la pesca. A pesar de que también se cuenta con una gran zona eco-turística en las playas del municipio de Aquila, la pesca tiene mayor importancia en el estado. En la Figura 6 se muestran las principales zonas de captura en la región de acuerdo al Atlas de localidades pesqueras de México, información que se detalla en la Tabla 4 (Ramírez-Rodríguez et al. 2006).

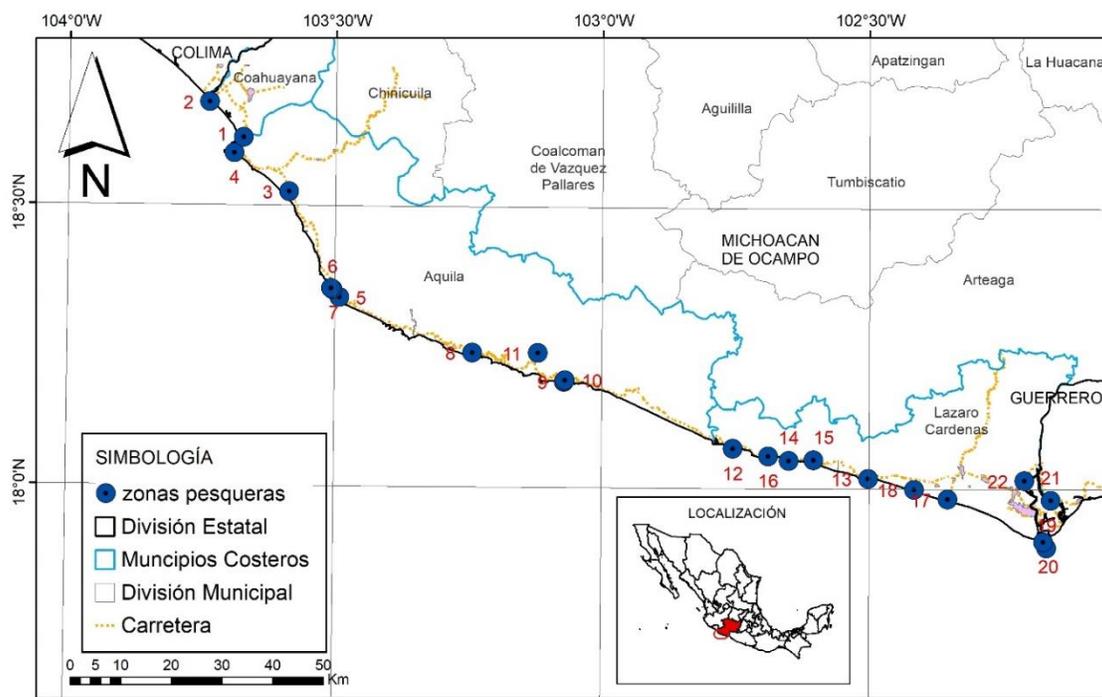


Figura 6. Zonas con actividad pesquera en la costa del estado de Michoacán, México (Ramírez-Rodríguez et al., 2006).

Tabla 4. Nombre y coordenadas de las zonas con actividad pesquera en la costa del estado de Michoacán, México (Ramírez-Rodríguez et al., 2006).

	Localidad	Longitud (°)	Latitud (°)
1	Punta San Telmo	-103.67	18.62
2	Boca de Apiza	-103.74	18.68
3	La Placita	-103.59	18.52
4	La Privada	-103.69	18.59
5	La Llorona	-103.49	18.34
6	Faro de Bucerías	-103.50	18.35
7	La Manzanilla II	-103.51	18.35
8	Cachán de Echeverría	-103.24	18.24
9	Punta de Pichilinguillo	-103.07	18.19
10	Pichilinguillo	-103.07	18.19
11	Punta Maruata (Piedras Blancas)	-103.12	18.24
12	Caleta De Campos (Bahía Bufadero)	-102.75	18.07
13	Las Peñas	-102.50	18.02
14	Caletilla de Mexcalhuacan	-102.65	18.05
15	Chuquiapan	-102.60	18.05
16	La Manzanilla I	-102.69	18.06
17	Playa Azul	-102.35	17.98
18	Las Calabazas	-102.42	18.00
19	Las 17 Brasas	-102.17	17.90
20	Las 14 Brasas	-102.17	17.91
21	Lázaro Cárdenas	-102.16	17.98
22	Guacamayas	-102.21	18.02

Aspectos geomorfológicos: relieve marino

El relieve es pieza clave para iniciar un proyecto de obra marina, ya que permite obtener la representación del fondo marino, base para realizar el diseño de construcción en el sitio, ubicar acantilados o para conocer la estabilidad de las playas. La elevación de la costa del estado de Michoacán (Figura 7) es muy variable, alcanzando valores de altura sobre el nivel del mar de hasta 2 270 m, y llegando a 200 m de profundidad en los primeros 4 km alejados a la línea de costa, alcanzando profundidades de hasta 5 000 m relativamente cerca de la costa (INEGI, 2013; SEMAR, 2019).

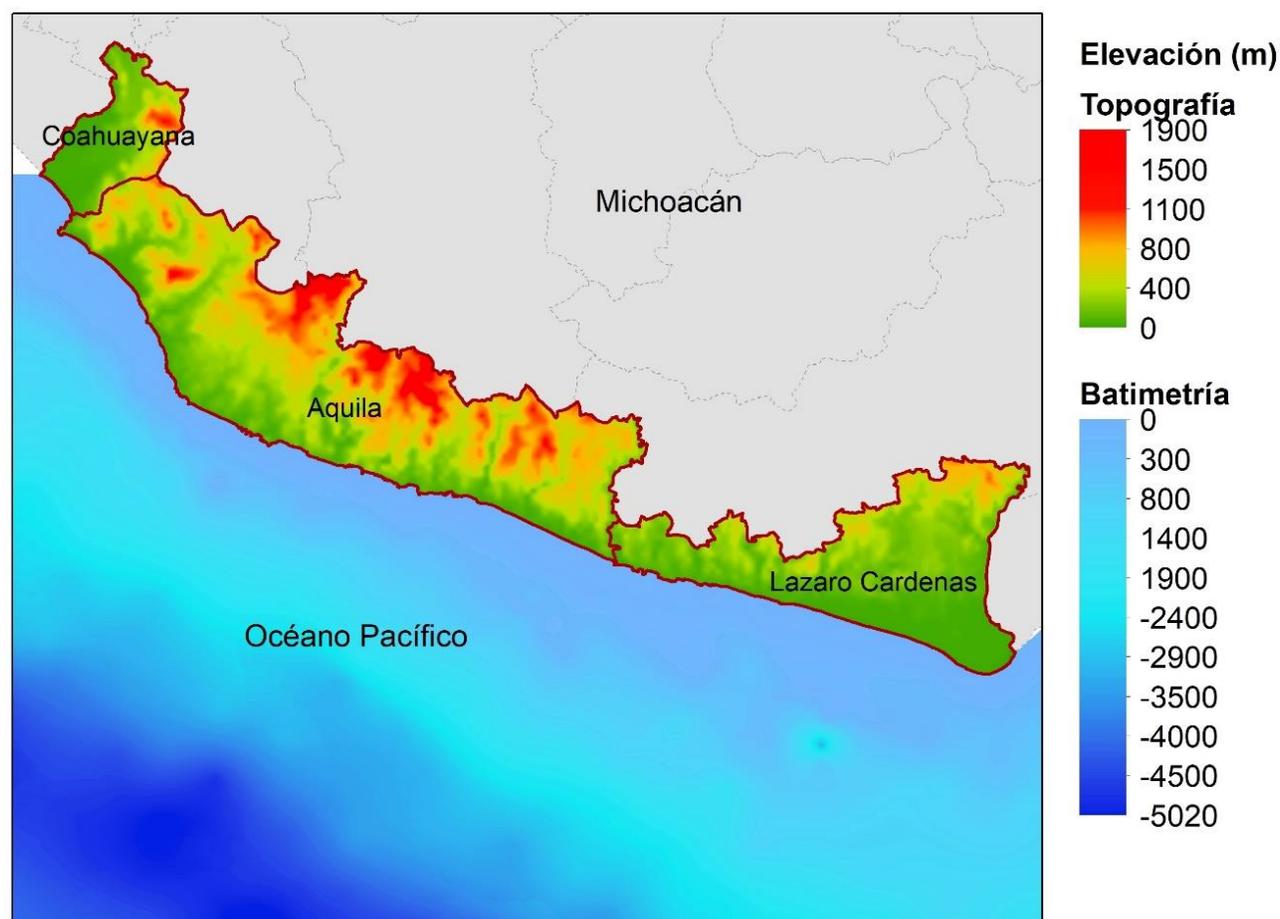


Figura 7. Relieve de la costa y parte del océano del estado de Michoacán, México (INEGI, 2013; SEMAR, 2019).

5.2 Recursos energéticos del océano

En esta sección se describen los métodos a seguir para obtener cuantitativamente los recursos energéticos del océano. En la Figura 8 se ilustran los métodos analíticos necesarios para evaluar, de manera teórica, la potencia de oleaje, corrientes marinas, gradiente térmico y gradiente salino.

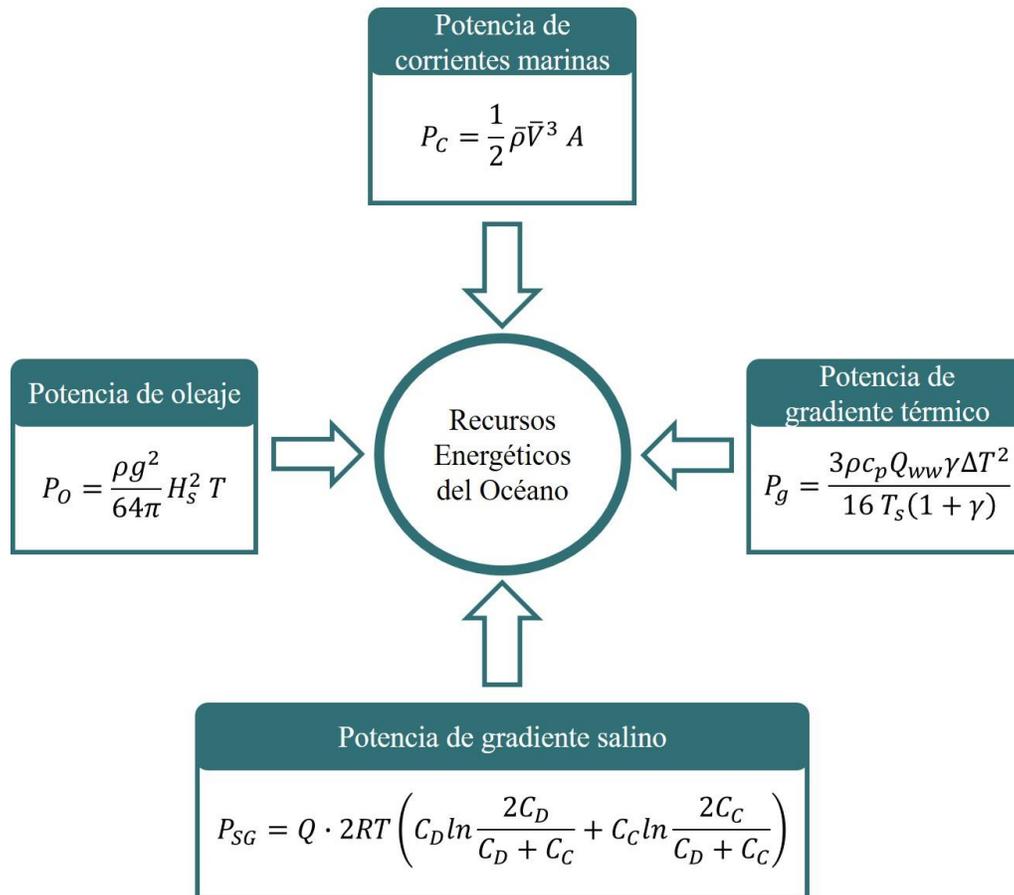


Figura 8. Métodos analíticos para la obtención de los recursos energéticos del océano.

5.2.1 Potencia de las olas

La cantidad de potencia en un tren de olas puede estimarse calculando el cambio de energía potencial a medida que el agua de una ola sobre el nivel del mar cae en la depresión frente a la ola. Si el agua de mar tiene una densidad ρ (kg/m^3), la cantidad de masa en la sinusoide sobre el nivel del mar, por unidad de ancho, es (Salter, 1974):

$$\rho(L/2)(a/\sqrt{8})$$

donde a es la amplitud de la onda (m) o la distancia entre crestas y L es la longitud de la onda (m). La altura del centro de gravedad sobre el nivel del mar (m) es: $a/2\sqrt{8}$ cayendo a una distancia igual debajo. En tal situación el cambio de energía potencial sería:

$$g\rho(L/2)(a/\sqrt{8})^2 = \rho g a^2 L/16$$



donde g es 9.8 m/s^2 , se sabe que la frecuencia de las ondas de gravedad en aguas profundas es:

$$\frac{1}{L} \cdot \sqrt{\frac{gL}{2\pi}}$$

y, por lo tanto, la tasa de transferencia de energía potencial, o la potencia, es:

$$\rho g a^2 \frac{\sqrt{gL}}{16\sqrt{2\pi}} \quad (1)$$

las olas progresivas transportan energía a través del mar, y es válido decir que la tasa de energía a través de alguna línea es energía. La densidad de potencia (P_o) se puede especificar convenientemente en kW/m.

Mediante las relaciones entre varios parámetros de onda, se explica que para las olas en el mar es más conveniente medir el período T (s), que la longitud de onda, L . También es más conveniente la medición de la altura de onda significativa, H_s (m), definida como la altura media del tercio más alto de las olas en el mar, a se puede convertir en H_s , utilizando la altura cuadrática media de la onda, H_{rms} en un tren sinusoidal.

$$\begin{aligned} a &= \sqrt{8}H_{rms} \\ H_s &= 4H_{rms} \\ \therefore a^2 &= H_s^2/2 \end{aligned}$$

la longitud de onda, L , puede convertirse en período medio, T_m (s):

$$\begin{aligned} L &= \frac{T^2 g}{2\pi} \\ \therefore P_o &= \frac{\rho g^2}{64\pi} H_s^2 T_m \end{aligned} \quad (2)$$

5.2.2 Potencia de corrientes marinas

La potencia media en un canal de agua que fluye está relacionada con la velocidad del agua y el área de la sección transversal (Duerr and Dhanak, 2010):

$$\begin{aligned} P_C &= \int \frac{1}{2} \rho \left((\vec{V} \cdot \vec{n})^2 + (\vec{V} \cdot \vec{t})^2 \right) \vec{V} \cdot \vec{n} dA \\ &\cong \int \frac{1}{2} \rho (\vec{V} \cdot \vec{n})^3 dA = \\ P_C &= \frac{1}{2} \bar{\rho} \bar{V}^3 A \end{aligned} \quad (3)$$

donde la integral está sobre la sección transversal del canal de agua, \vec{n} y \vec{t} son vectores unitarios y tangentes al plano de la sección transversal, A es el área de la sección transversal (m^2), ρ es la densidad media (kg/m^3), V es la velocidad promedio de corriente sobre la sección transversal (m/s), y P_c es la potencia total. Se supone que la densidad es constante en toda la columna de agua. Debido a la relación de la potencia con la velocidad, se pueden hacer predicciones de potencia una vez que se conoce la velocidad del movimiento del agua a través de un área de sección transversal. El área de la sección transversal se utiliza para calcular la potencia existente en W , si se desconoce el área las unidades resultan en W/m^2 .

5.2.3 Potencia de gradiente térmico

Nihous (2007), propuso un modelo para calcular la potencia OTEC, en el cual se parte del caudal de agua de mar profunda Q_{cw} . Se establece una relación con el agua de mar caliente Q_{ww} mediante γ representando Q_{ww}/Q_{cw} , γ varía en cuestión de una flexibilidad operativa. La potencia eléctrica bruta P_g es el producto de la carga térmica del evaporador y de la eficiencia termodinámica:

$$P_g = \frac{3\rho c_p Q_{ww} \gamma \Delta T^2}{16 T_s (1 + \gamma)} \quad (4)$$

donde ρ es la densidad media del agua de mar, definida como $1025 kg/m^3$ y c_p es el calor específico del agua de mar, alrededor de $4000 J/kg \text{ } ^\circ K$. El factor de eficiencia γ se propone de 1.6, donde Q_{ww} se calcula como γQ_{cw} ; Q_{cw} se considera de $250 m^3/s$, debido a que la capacidad de potencia OTEC depende de que se manejen los caudales adecuados a través de las tuberías, este caudal es considerado para una planta de $100 MW$ (Hernández-Fontes et al. 2019).

5.2.4 Potencia de gradiente salino

El potencial teórico de producción de energía a partir del gradiente de salinidad (P_{SG}), debido a la descarga de un río de baja salinidad a un lago de alta salinidad (o al mar), es una función del caudal de descarga del río (Q), la temperatura (T) y la salinidad del río y del lago salino (o del mar) (C_D y C_C , respectivamente). Obviamente, todos los factores anteriores son variables con el tiempo y la estación, por lo que se pueden utilizar valores medios para estimar el potencial teórico de producción de energía (P_{SG}). Hernández-Fontes et al. (2019) describe una ecuación, ecuación (5), para la estimación del valor teórico del potencial de producción de energía (P_{SG}), basado en los valores medios de los parámetros mencionados anteriormente.

$$P_{GST} = Q \cdot 2RT \left(C_D \ln \frac{2C_D}{C_D + C_C} + C_C \ln \frac{2C_C}{C_D + C_C} \right) \quad (5)$$

Una vez que se obtiene el potencial teórico, se calculará el potencial práctico (Alvarez-Silva et al., 2016) de las desembocaduras de los ríos (P_{GSP}), el cuál puede expresarse en términos de reducción del potencial teórico mediante un factor de extracción (FE) y un factor de capacidad (FC):



$$P_{GSP} = P_{GST} \cdot FE \cdot FC \quad (6)$$

El factor de extracción (FE) es la relación entre el caudal de diseño (Q_D) de la central (cantidad de agua dulce que puede extraerse del río para la generación de energía), y el caudal medio del río (Q).

$$FE = Q_D / Q \quad (7)$$

La cantidad del caudal de diseño debe tomar en cuenta consideraciones ambientales que limitan la extracción de agua, con el fin de reducir el impacto a otros usos del recurso (pesca, riego, etc.); así como a la flora y a la fauna. Es por ello que el caudal después de la extracción $Q_R = Q - Q_D$ no debe ser menor que un valor crítico, conocido como caudal ambiental Q_A , el cual es una fracción del caudal que debe permanecer constante para satisfacer las demandas ambientales del río. De acuerdo al método de Tennant (1976) se calcula como:

$$Q_A = 0.3Q \quad (8)$$

El factor de capacidad (FC) se calcula como la relación equivalente entre el caudal de operación Q_{OP} a lo largo de un año (T) y el caudal de diseño durante el mismo intervalo de tiempo (Alvarez-Silva et al., 2016):

$$FC = \frac{\int_0^T Q_{OP} dt}{Q_D T} \quad (9)$$

El factor de capacidad depende del factor de extracción, ya que define el caudal de diseño, y del caudal ambiental, que define el caudal de operación, el cual deduce que una planta puede funcionar a diferentes capacidades:

- Si $Q > (Q_D + Q_A)$: operación a plena capacidad, $Q_{OP} = Q_D$ (modo estándar).
- Si $Q_A < Q < (Q_D + Q_A)$: operación a capacidad parcial, $Q_{OP} = Q - Q_A$
- Si $Q < Q_A$: sin operación $Q_{OP} = 0$



5.2.5 Fuentes de información

Para el empleo de los distintos modelos teóricos con los que se calculará la potencia de cada fuente de energía, se usaron bases de datos generadas con modelos de pronóstico y asimilación de datos para simular las variables atmosféricas. Para las energías del oleaje, corrientes, gradiente térmico y datos de salinidad del océano, se generarán los cálculos en un periodo de datos de 10 años debido a que la fuente de datos de uno de los modelos solo cubre este periodo, que abarca desde el 1 de septiembre de 2008 al 31 de agosto de 2018.

Para la obtención del potencial teórico del oleaje es necesario conocer la altura de ola significativa, así como los periodos asociados. Para obtener estos datos se utilizó el modelo de reanálisis ERA-Interim producido por el Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Medio Plazo (ECMWF por sus siglas en inglés), el cual describe condiciones meteorológicas, así como las condiciones del océano y de la superficie terrestre cada tres o seis horas y resolución espacial de 80 km con habilidad de interpolación hasta $1/8^\circ$ (~ 14 km). El reanálisis abarca el periodo de 1979 a la actualidad y se basa en generar datos históricos, proporcionando un registro multivariado, espacialmente completo y coherente de la circulación atmosférica global (Dee et al, 2011).

Para la modelación del potencial de corrientes marinas es necesario conocer la velocidad en las direcciones u y v , para conocer estos valores se utilizará el modelo oceánico de coordenadas generalizadas (híbrido) HYCOM (Bleck, 2002), el cual está configurado para combinar tres tipos de coordenadas verticales. Es isopícnico en el océano abierto y estratificado, pero usa la ecuación de continuidad de capas para hacer una transición dinámica y suave a una coordenada que sigue el terreno en regiones costeras poco profundas, y coordenadas de nivel z en la capa mixta y/o mares no estratificados. El HYCOM tiene una resolución horizontal de $1/12^\circ$ con una habilidad de interpolación dinámica, por lo que pronostica el estado tridimensional del océano con precisión (Chassignet & Verron, 2006). Este modelo contiene datos diarios a partir del 2008 y continúa generando, la última modelación disponible es del 2018.

El cálculo del potencial de gradiente térmico se calcula mediante valores de temperatura en la superficie y a una profundidad determinada (500 m) para este caso de estudio. El modelo HYCOM también proporciona valores de temperatura, por lo que este modelo se usará para el cálculo mediante gradiente térmico.

Para el cálculo del potencial de gradiente salino, es necesario conocer datos como temperatura, salinidad y caudal de agua, tanto del agua de mar como de los ríos en su desembocadura. Para conocer el caudal de los ríos en su desembocadura, el Diario Oficial de la Federación (DOF, 2016a) establece la disponibilidad hídrica media anual de las 731 cuencas hidrológicas en las que se divide la república mexicana, donde se utiliza un modelo empírico que suma las aportaciones de agua (precipitación, escurrimiento aguas arriba) y resta las exportaciones (evaporación, extracción), al identificar las cuencas exorreicas en la zona de estudio con un solo punto de salida, se conocen los ríos principales de la zona y se conocen los caudales. Para obtener el valor de salinidad del agua de mar en la desembocadura de los ríos, así como la temperatura de la misma también se utilizará el modelo HYCOM.

5.3 Evaluación multicriterio (MCE)

En este apartado se aborda una descripción de la evaluación multicriterio, la metodología a seguir para evaluar los diversos factores considerados en este estudio. En la Figura 9 se presentan los tipos de restricciones y factores que se utilizarán en esta Evaluación Multicriterio.



Figura 9. Diagrama de la evaluación multicriterio (MCE).

Una evaluación multicriterio (MCE por sus siglas en inglés; Eastman, 2005), se define como el análisis de datos para apoyar al proceso de toma de decisiones en diferentes ámbitos, como económicos, sociales o ambientales. Una decisión se puede definir como una elección entre alternativas, donde las alternativas pueden ser de diferentes acciones, lugares, objetos, entre otros. El objeto de desarrollar un análisis multicriterio en este trabajo es identificar las áreas que serán más adecuadas para la colocación de plantas de producción de energía eléctrica en el océano.

La MCE se enfocará en dos procedimientos de análisis, donde los criterios serán considerados como restricciones booleanas o como factores estandarizados.

En el primero, los criterios son convertidos en restricciones booleanas (es decir, declaraciones lógicas: verdadero/falso) de idoneidad para la decisión que se está considerando. Este caso se utilizará para denotar cualquier mapeo espacial en el que las áreas serán designadas por un sistema de números binarios como pertenecientes o no al conjunto designado. Se consideran como restricciones, ya que sirven para delinear áreas que no son adecuadas para su consideración.

El segundo procedimiento consiste en evaluar criterios cuantitativos como variables continuas. Estos criterios se llaman factores y expresan diferentes grados de idoneidad para la decisión que se está considerando. Por ejemplo, la proximidad a ciudades o vías de comunicación, las cuales no pueden definirse mediante una restricción booleana; sino como expresiones continuas de idoneidad según una escala numérica (que para este estudio será de 0 a 1), aumentando conforme las áreas sean más idóneas. Este proceso de conversión de datos a escala numérica se denomina comúnmente como estandarización (Voogd, 1982).

Para poder combinar los dos procedimientos de análisis descritos anteriormente, es requerido utilizar una combinación lineal ponderada, es decir, cada factor estandarizado se multiplica por un peso (en escala de 0 a 1), y los resultados se suman para llegar a una solución multicriterio. Además, el resultado se multiplica por el producto de cualquier restricción booleana que pueda aplicarse (Eastman,

2005). De esta manera, se define un índice de idoneidad (I) expresado en la escala numérica seleccionada, el cual revela las áreas que son más aptas (en escala de 0 a 1) de acuerdo al fin de la MCE.

$$I = \sum w_i X_i \cdot \Pi C_j \quad (10)$$

donde w_i es el peso asignado al factor i , X_i es la puntuación del factor estandarizado i , C_j es la restricción booleana j .

En la Figura 10 se muestra una descripción gráfica de la ecuación (10) de manera espacial; donde se consideran dos criterios, los cuales se muestran en las dos capas inferiores. En la capa superior se representa el índice de Idoneidad, con el fin de mostrar que las zonas idóneas varían al considerar más de un criterio y que no se tiene un comportamiento lineal; es decir, en unas zonas tendrá mayor peso un criterio que otro.

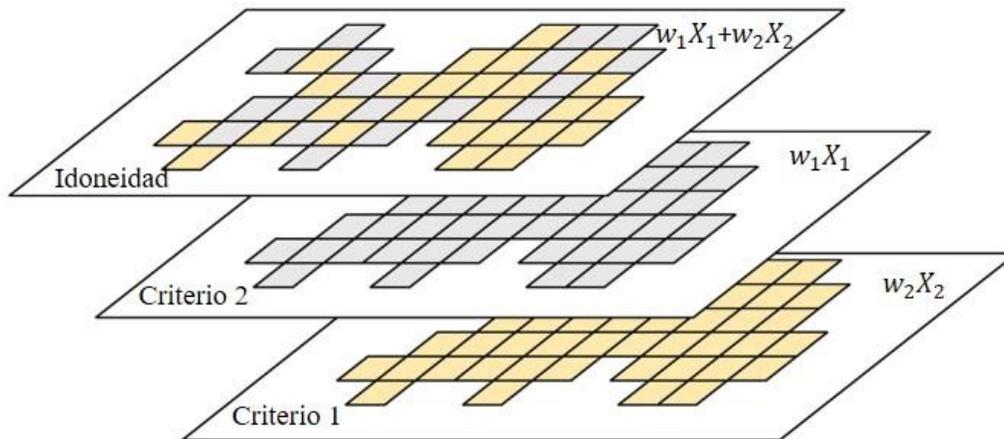


Figura 10. Representación gráfica de la ecuación (10).

5.3.1 Restricciones booleanas

Para definir las restricciones booleanas es necesario elegir los criterios con base en los objetivos del proyecto, a las bases de datos y la literatura existentes, preferentemente en algún tipo de formato que se pueda manejar en sistemas de información geográfica (SIG), ya que la MCE se hace espacialmente. A fin de generalizar los alcances del uso de la presente metodología, el organismo que genere el proyecto debe definir este tipo de criterios, basándose en un simple hecho: ¿es posible o no, explotar el recurso en la zona?. Una vez que se tienen las áreas restringidas, se genera un mapa del tipo “raster”, considerando toda la zona de interés, colocando 0 en las celdas restrictivas y 1 en las celdas idóneas, como se muestra en la Figura 11. Este procedimiento se hace con álgebra de mapas en un SIG, mediante el uso de condicionantes, es decir, “si la celda del mapa *raster* es idónea cuando el valor supera un límite (colocar 1)”, “si la celda es menor a ese límite (colocar 0)”.

1	1	1	1	1	1	0	1
1	1	0	0	1	1	1	1
1	0	0	0	0	1	1	1
0	0	0	0	0	0	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 11. Mapa tipo raster de declaraciones Booleanas.

Se hace un mapa como el mostrado en la Figura 11 para cada restricción booleana que se considere en el estudio; si se tiene más de una restricción se multiplican entre sí, quedando solo un mapa con zonas idóneas, como se muestra en el siguiente esquema (Figura 12).

1	1	1	1	1	1	0	1
1	1	0	0	1	1	1	1
1	0	0	0	0	1	1	1
0	0	0	0	0	0	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0

 $*$

0	0	1	1	0	1	1	0
1	1	0	0	1	1	1	0
1	0	0	0	0	1	1	0
0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	0	0

 $=$

					1	1					1		
	1	1								1	1	1	
	1											1	1

Figura 12. Producto y resultado de dos restricciones booleanas.

En este estudio se usarán dos tipos de restricciones booleanas:

- Ambiental: donde se consideraron las zonas federales naturales protegidas, así como manglares existentes en la zona, dado que representan zonas de exclusión donde se afectaría potencialmente de manera negativa a la flora y fauna de la región.
- Umbrales de potencia: es importante recalcar que se está haciendo el estudio de cuatro diferentes tipos de recursos de energía en el océano, de las cuales, tres (olas, corrientes y gradiente térmico) se explotan en aguas someras o profundas, contrario al gradiente salino, el cual se genera en la desembocadura de los ríos. Es por ello que como zonas de exclusión se delimitaron únicamente los umbrales mínimos de operación de dispositivos de transformación de energía, de los primeros tres tipos de energía, en las cuales, si no cumple con este mínimo la zona se marca como zona de exclusión. Además de que en el caso de gradiente térmico también es considerada como zona de exclusión la zona correspondiente a una profundidad menor a 500 m.

5.3.2 Factores estandarizados

Para definir los factores estandarizados se tienen que identificar las zonas de conveniencia, donde, por diferentes criterios (ambientales, económicos, políticos o sociales) resultaría favorable o no colocar un dispositivo de generación de energía eléctrica. Estos criterios no son 100% excluyentes, y entre más cerca o lejos se esté de ellos es como se definirá la escala numérica. Por ejemplo, si se quiere desarrollar actividades turísticas, se definirán como zonas benéficas (favorables) los puntos de fácil acceso, de mayor tránsito, de mejor clima. Por otro lado, entre más alejados se esté de esas zonas es donde se presentan las regiones no favorables. La naturaleza de los datos de los factores estandarizados es muy variable (puntos,

polígonos, líneas) y el tratamiento para generar los mapas de combinación lineal ponderada es diferente para cada tipo de dato.

A continuación, se presentan algunos tipos de datos que se pueden presentar en un SIG, así como el tratamiento que se les puede dar:

- **Puntos:** cuando el criterio está denotado por un punto con coordenadas X, Y, (Ej.; ciudades, puertos, muelles, estaciones eléctricas, etc.) se le tiene que dar un tratamiento para generar la interpolación lineal. Primero se tiene que identificar si los puntos benefician o restringen los intereses del proyecto o a un determinado sector. Si benefician, entonces se les coloca la puntuación de criterio más alta, que para este caso será de 1. Si el criterio restringe, entonces se le coloca la puntuación de 0.1. Para definir cuál es el alcance de un punto benéfico o las zonas donde restringe se siguen los siguientes métodos, de acuerdo a la naturaleza de los datos y el criterio del proyectista.
 - **Polígonos de Thiessen:** al tener un conjunto de puntos de interés en un mismo criterio, si se requiere saber el alcance que genera los puntos (ya sean favorables o desfavorables), una manera es generando polígonos de Thiessen, donde limitan sus fronteras o las distancias mayores que generan, es donde se coloca el valor (mayor o menor dependiendo de la factibilidad del punto) para así generar la interpolación. En la Figura 13 se muestra un ejemplo donde los puntos se definen como favorables (con valor de 1) sobre esos puntos se generaron polígonos de Thiessen; donde se observa que los polígonos representa la influencia de cada punto, por lo que en las fronteras de los polígonos se colocó el valor de 0.1 (desfavorables).

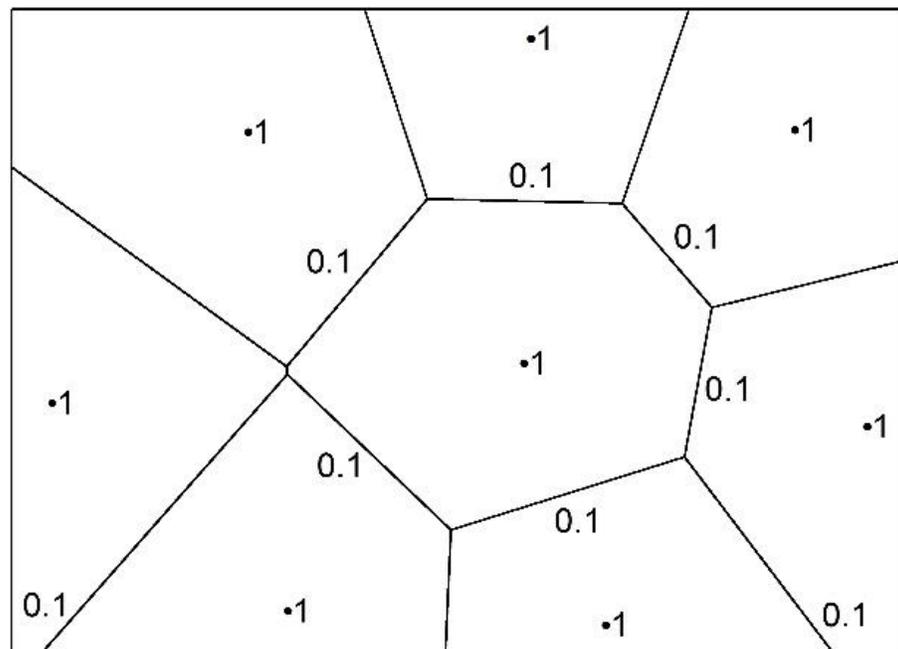


Figura 13. Estandarización de puntos mediante polígonos de Thiessen.

- **Distancia perpendicular:** si se define que al tener una mayor distancia a los puntos es una condición favorable o desfavorable para los objetivos del proyecto, la distancia perpendicular mayor que limita la zona de estudio, tendrá el valor (mayor o menor dependiendo de la factibilidad del punto) contrario (1 o 0.1), definiendo el valor de otras zonas de la frontera mediante una interpolación lineal tal como se muestra en la Figura 14, donde los conjuntos de puntos que representan el criterio son clasificados como favorables (valor de 1). La distancia más grande adquiere el valor más desfavorable (0.1) y conforme disminuye la distancia a la frontera en estudio, el valor de estandarización aumenta.

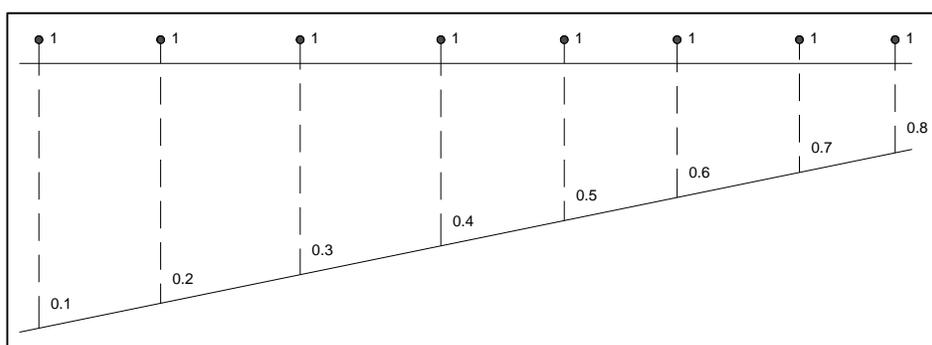


Figura 14. Estandarización de puntos mediante distancia perpendicular

- **Líneas:** si el criterio está definido por líneas para su lectura en un SIG (Ej.: carreteras, límites, línea de costa, línea eléctrica, etc.) se define si la línea es un criterio favorable (valor de 1) o desfavorable (valor de 0.1) para los fines del proyecto o para un determinado sector. Después, en la línea que limita la zona de estudio, se coloca el valor (mayor o menor dependiendo de la factibilidad de la línea) y se generan isolíneas (desfases de la línea original) a fin de tener valores en toda la zona de estudio para generar la interpolación lineal ponderada. En la Figura 15 se muestra una línea con valor favorable en la parte de arriba y una línea que limita la zona de estudio en la parte de abajo, la cual representa la zona más desfavorable (valor de 0.1) además de las isolíneas que se generan al interpolar entre la factibilidad de las líneas inicial y final.

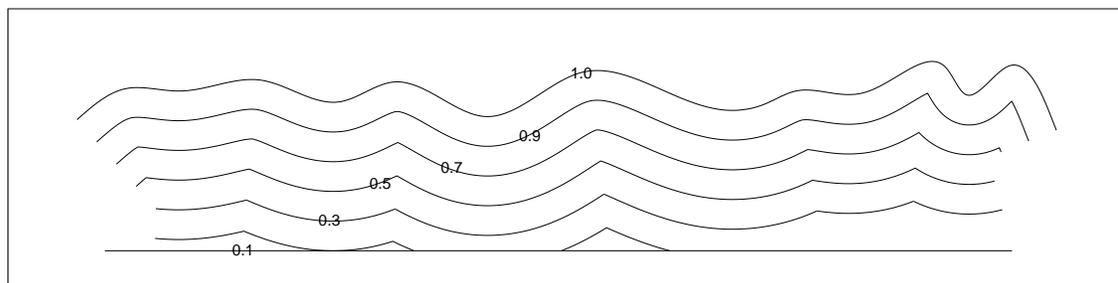


Figura 15. Estandarización de líneas mediante isolíneas

- **Polígonos:** Un polígono está definido por una región, puede ser de exclusión o totalmente propicia, cuyo caso entraría en las restricciones booleanas, pero también se puede dar el caso que la región no sea totalmente excluyente y que mientras mayor sea la distancia a estos polígonos

aumenta o disminuye la restricción. Los datos iniciales muchas veces no son polígonos, sino puntos (regiones de pesca, zonas de arrastre de sedimentos) o líneas (zona económica, oleoductos, gasoductos, rutas de navegación, etc.) que tienen cierta área de influencia. Esta área se define en base a experiencia, reglamento o literatura, convirtiendo los puntos o líneas en polígonos mediante un buffer. Es importante recalcar que, para realizar una interpolación de regiones, es necesario que todos los datos sean polígonos. En la Figura 16 se muestra un ejemplo donde los datos iniciales son puntos desfavorables (valor de 0.1) los cuales tienen cierta área de influencia y en la línea que limita la zona de estudio se colocaron polígonos con valor favorable (valor de 1). En la Figura 17 se muestra una línea favorable (valor de 1) a la cual se le desfasó un área de influencia, dentro de esa área de influencia se generaron polígonos más pequeños, con el fin de tener mayor discretización de los datos al momento de interpolar los polígonos con los desfavorables, los cuales se encuentran en el límite de la zona de estudio.

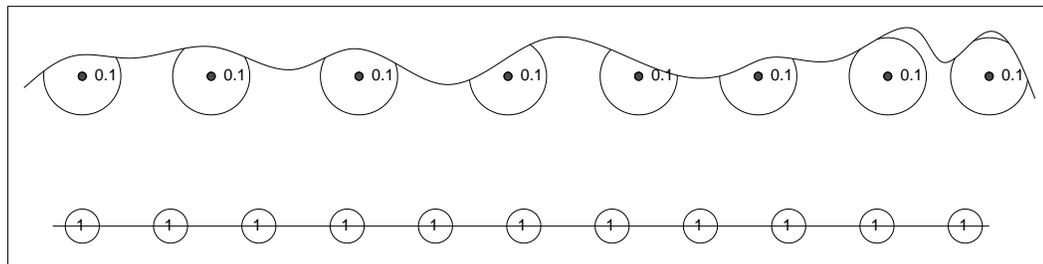


Figura 16. Estandarización de regiones con influencia sobre puntos

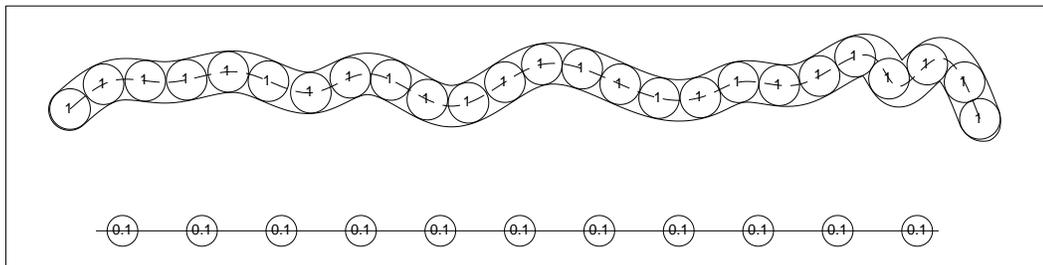


Figura 17. Estandarización de regiones con influencia sobre líneas

En este estudio se consideraron tres tipos de factores estandarizados, de acuerdo a las actividades y recursos presentes en la zona de estudio:

- **Infraestructura:** Donde se consideran los puertos presentes o cercanos a la zona de estudio, debido a que es necesario abastecer de recursos para la construcción de las plantas y entre más cerca se esté de ellos, se disminuyen los costos de traslado. Así también, se incluyen las subestaciones eléctricas más cercanas a la costa, ya que, si se requiere conectar las plantas a la red eléctrica nacional, resulta más favorable estar cerca de estas subestaciones.
- **Sociales:** las comunidades aledañas a la costa serían las más beneficiadas con este tipo de proyectos, pero cuando se trata de comunidades indígenas, las personas pueden ser renuentes a los cambios y a las mejoras tecnológicas que implementan las instituciones, empresas u



organismos; por lo que, estas comunidades representan una restricción, no del 100%, pero si lo suficiente para considerarlo como un factor en este tipo de estudios.

- Usuarios: las acciones que se generan dentro del mar se considerarán como usuarios debido a que representan la actividad humana, en la zona de estudio la actividad de más importancia es la pesca, por lo que se consideraron las regiones pesqueras como un punto de exclusión, donde no resulta muy benéfico considerar la instalación de plantas eléctricas.

5.3.3 Fuentes de información

Para obtener los datos de los distintos criterios a evaluar (ambientales, umbrales de potencia, infraestructura, sociales y usuarios), México tiene distintos portales de información geográfica.

Para obtener los criterios ambientales, la Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad (CONABIO, 1992) proporciona información sobre la biodiversidad y sirve de puente entre la academia, el gobierno y la sociedad; promueve que la conservación y manejo de la biodiversidad se base en acciones realizadas por la población local, la cual debe ser un actor central en ese proceso. De esta plataforma se obtienen datos como las zonas federales naturales protegidas, las zonas con restricciones ecológicas, manglares con relevancia biológica, etc.

Los datos necesarios para conocer la infraestructura presente en el caso de estudio se obtuvieron del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED, 1988), el cual, entre sus servicios está el proporcionar capas de información de otras instituciones como INEGI, Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), la Secretaría de Salud, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), la Comisión Federal de Electricidad (CFE), entre otras.

Para obtener los criterios sociales, como datos de población y localidades con cierta relevancia el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) ofrece acceso a la información de México en cuanto al territorio, los recursos, la población y la economía. También, se cuenta con el Instituto Nacional de los Pueblos Indígenas (INPI, 2018), el cual genera información en mapas acerca de la descripción etnográfica y la distribución geográfica de los pueblos indígenas de México.

Los datos para el criterio de usuarios de la zona de estudio se obtuvieron de la comisión Nacional de Acuicultura y Pesca (CONAPESCA, 2001), que es el encargado de implementar programas y normas para el desarrollo pesquero y acuícola del país, el cual provee información acerca de la posición de las zonas pesqueras en México.

En base a los datos disponibles por estas instituciones se tomarán los criterios que afectan o benefician a la zona de estudio para generar la evaluación multicriterio.

6 RESULTADOS

En este capítulo se muestran los resultados que se arrojaron al aplicar la metodología sobre el caso de estudio. Primero, se muestra la disponibilidad de los recursos energéticos del océano en aguas territoriales correspondientes al estado de Michoacán, México. Después, se muestran los resultados de la evaluación multicriterio para la selección de sitios idóneos para la colocación de dispositivos para la generación de energía eléctrica.

6.1 Recursos energéticos del océano

Esta sección muestra los resultados de potencia teórica de las olas (sección 6.1.1), de las corrientes marinas (sección 6.1.2), por gradiente térmico (sección 6.1.3) y por gradiente salino (sección 6.1.4) en la boca de ríos presentes en la zona de estudio. En la Figura 18 se muestra un diagrama de la manera en que se presentan los resultados.

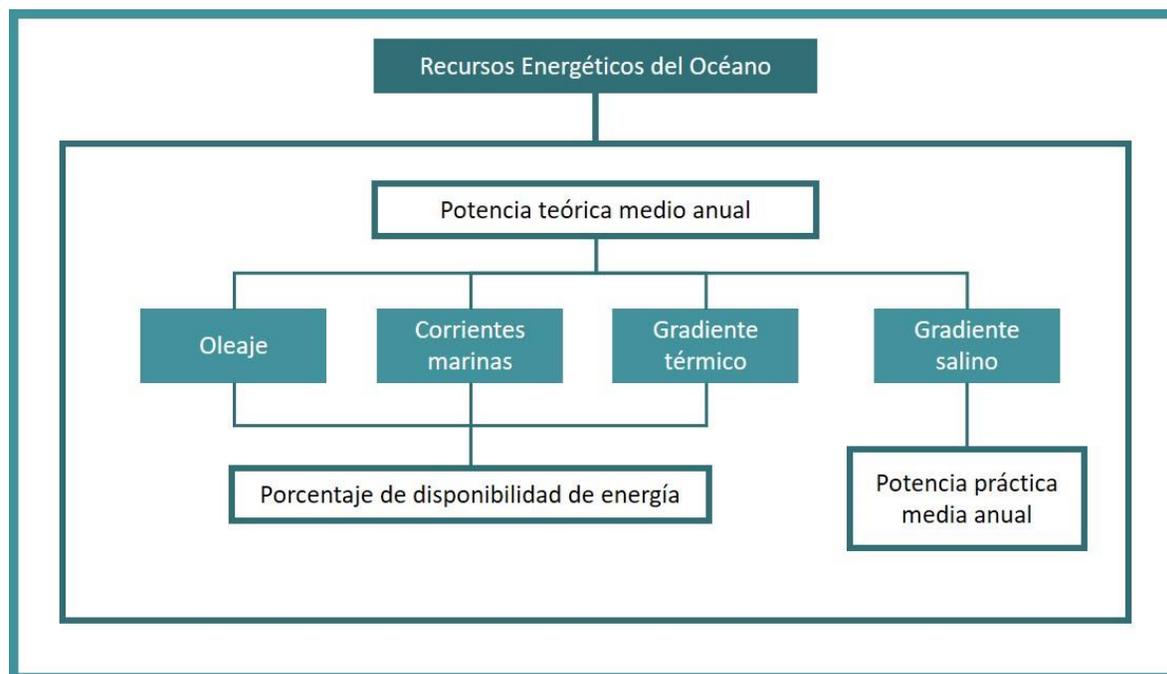


Figura 18. Diagrama de la presentación de los resultados de los recursos energéticos del océano.

Para los primeros tres tipos de recurso (secciones 6.1.1, 6.1.2 y 6.1.3), la región de análisis para estimar la disponibilidad energética se delimitó mediante dos líneas, horizontal y vertical que parten de las fronteras sureste y noroeste del estado de Michoacán, hasta una distancia de 50 km mar adentro, en promedio, contados desde la línea de costa continental. En primer lugar, se presenta la potencia teórica media de energía por oleaje, corrientes marinas y gradiente térmico para un periodo de 10 años, que va desde el 1 de septiembre de 2008 al 31 de agosto de 2018. Además, los resultados se analizan en términos de porcentaje de disponibilidad de energía durante todo el periodo considerado, mediante diferentes

umbrales de energía. Es decir, se analiza el porcentaje de días en que la potencia es superior a los umbrales definidos.

Para el caso de gradiente salino, los resultados fueron analizados de manera distinta, considerando las medias anuales de los ríos más importantes que desembocan en la línea de costa del estado de Michoacán. Se presenta la potencia teórica media anual para cada uno de los ríos, a este valor se le aplica un factor de extracción y un factor de capacidad con el fin de obtener la potencia práctica media anual en todos los ríos.

6.1.1 Potencia de las olas

6.1.1.1 Potencia media anual

En la Figura 19 se muestra la media de potencia de las olas para 10 años de modelación (2008-2018). En la figura se muestra una malla de $1/8^\circ$ debido a que los datos de entrada se dan en ese intervalo, se observa que la potencia media tiene una variación de 2.5 kW/m en toda el área de estudio (en la figura, esta variación, se detalla en cinco intervalos, que van aumentando en 0.5 kW/m), lo que indica que la potencia media es prácticamente constante en toda el área de estudio. La zona que presenta mayor potencia se encuentra al noroeste alcanzando valores de 13.5 a 14 kW/m, en un 5.2% de la cobertura total del área en estudio (región de color rojo). El 41.8% de la cobertura del área en estudio oscila en valores de 11.6 a 12 kW/m de potencia (región de color azul), los porcentajes de cobertura de área para todos los intervalos se muestran en la Tabla 5.

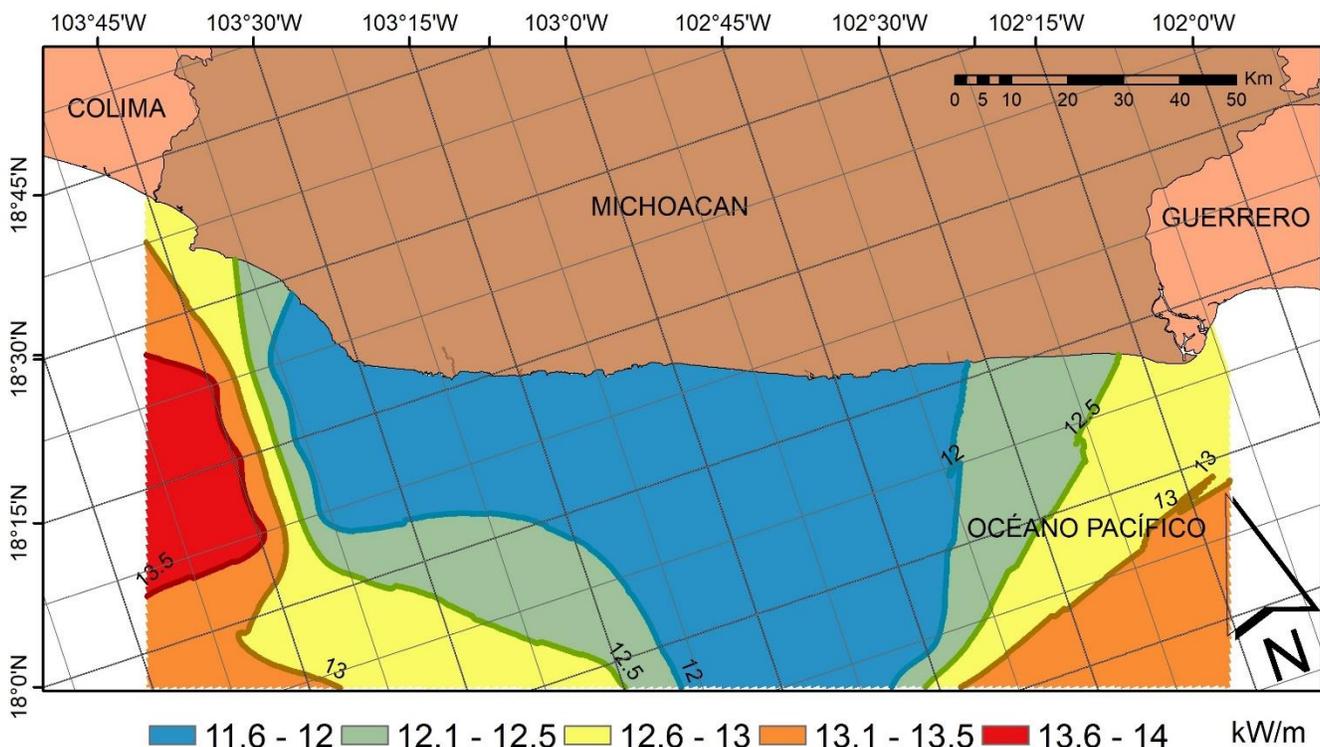


Figura 19. Potencia teórica media anual del oleaje, para un periodo de 10 años (2008-2018) en la costa del estado de Michoacán, México. En kW/m.

Tabla 5. Cobertura del área de estudio que abarcan los intervalos de potencia media por olas, en porcentaje.

Potencia media por olas (kW/m)	Porcentaje de cobertura del área (%)
11.6 - 12	41.8
12.1 - 12.5	18.4
12.6 - 13	20.6
13.1 - 13.5	14.0
13.6 - 14	5.2

6.1.1.2 Disponibilidad del recurso

La Figura 20 presenta los resultados de la disponibilidad de energía, se consideraron tres umbrales de potencia diferentes para identificar las regiones donde la energía es más disponible y persistente. Las Figura 20a, b y c muestran las regiones en las que la potencia es superior a 2, 10 y 15 kW/m, respectivamente. El primer umbral (2 kW/m) se definió a partir de matrices de potencia de los convertidores de energía presentes en la literatura (Bernardino et al., 2017). En estos datos se sugiere que la altura de ola significativa mínima (H_s) para la operación de dispositivos es de 0.5 m, y el periodo significativo asociado (T_s) es de 4 s. En la Figura 20a se muestra que es posible extraer potencia arriba de 2 kW/m todo el tiempo, debido a que el 100% de la zona en estudio rebasa este umbral. En la Figura 20b se observa que la potencia entre 10-15 kW/m se puede extraer en la costa del estado de Michoacán en un 50-60% del tiempo; mientras que la potencia superior a 15 kW/m (Figura 20c) es posible que se extraiga del 20-30% del tiempo.

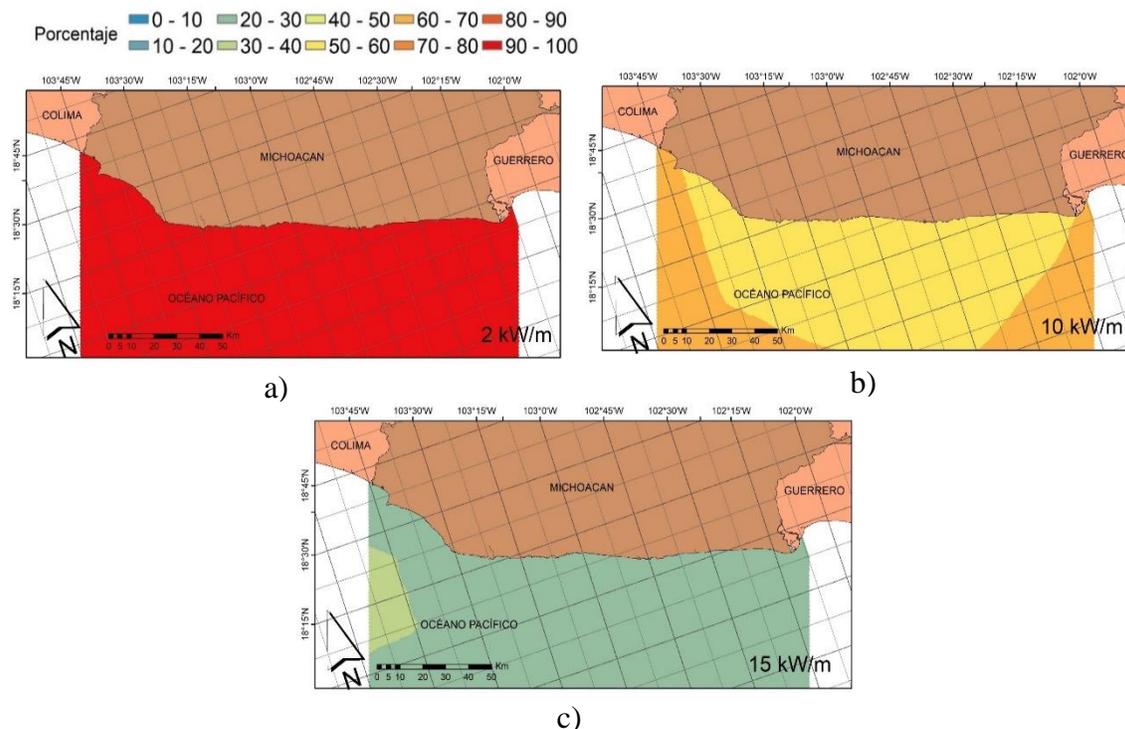


Figura 20. Potencia teórica de olas en porcentaje de días (a lo largo del periodo de 10 años) en los cuales la potencia disponible es mayor a los umbrales establecidos. (a) umbral de 2 kW/m. (b) umbral de 10 kW/m. (c) umbral de 15 kW/m.

6.1.2 Potencia de corrientes marinas

6.1.2.1 Potencia media anual

En la Figura 21 se muestra la media de potencia por corrientes marinas, para 10 años de modelación (2008-2018), los datos de potencia se evaluaron a cada $1/12^\circ$, es por ello que la malla representada en la figura tiene este intervalo. La potencia media por corrientes marinas, en la costa del estado de Michoacán, oscila entre 0 a 25 W/m^2 los cuales, se muestran en la figura en intervalos de 5 W/m^2 , también se nota que la potencia aumenta de forma paralela a la línea de costa. Es la Tabla 6 se muestran los porcentajes que abarcan cada uno de los intervalos de potencia, de acuerdo a estos datos se conoce que en 45% de la zona de estudio la potencia oscila entre $15\text{-}20 \text{ W/m}^2$. La región donde existe mayor potencia ($20\text{-}25 \text{ W/m}^2$) se encuentra a 15 km aproximadamente de la línea de costa más cercana.

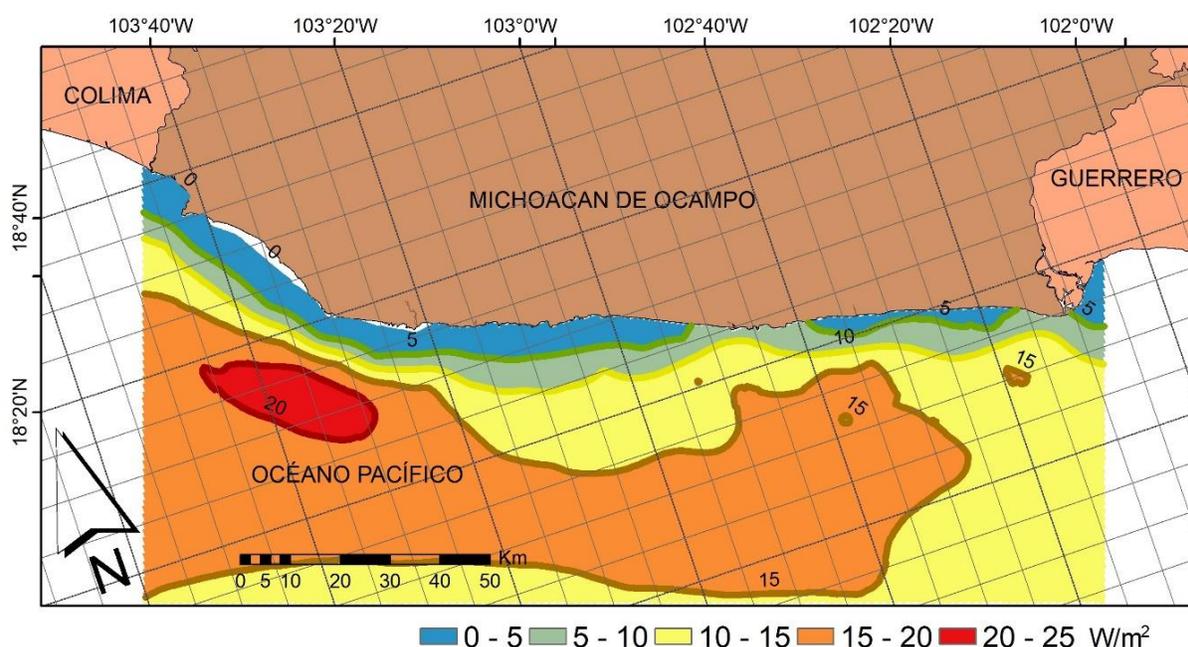


Figura 21. Potencia teórica media anual de corrientes marinas, para un periodo de 10 años (2008-2018) en la costa del estado de Michoacán, México. En W/m^2 .

Tabla 6. Cobertura del área de estudio que abarcan los intervalos de potencia media por corrientes marinas, en porcentaje.

Potencia media por corrientes marinas (W/m^2)	Porcentaje de cobertura del área (%)
0 - 5	7.2
5 - 10	8.2
10 - 15	36.9
15 - 20	45.0
20 - 25	2.7

6.1.2.2 Disponibilidad del recurso

Un criterio para poder aprovechar la energía de las corrientes marinas está definido por las velocidades de flujo operacional mínima y máxima de los dispositivos hidrocineéticos más típicos. La

universidad de Michigan desarrolló un dispositivo que utiliza vibraciones inducidas por vórtices para impulsar cilindros transversales al flujo, con un generador lineal. Este dispositivo es llamado VIVACE (Vivace Induced Vibration for Clean Energy, por sus siglas en inglés) el cual tiene la capacidad de extraer energía de flujos tan lentos como 0.4 m/s (Laws & Epps, 2016).

Dados estos datos, se establece esta velocidad como la mínima operacional de dispositivos de conversión de energía de corrientes marinas, lo que resulta en un umbral de potencia de 32 W/m^2 .

Para el análisis se consideraron las velocidades en superficie libre, que son las de mayor magnitud, viables para el cálculo de una estimativa teórica de la potencia, en la Figura 22 se muestran los porcentajes de días a lo largo del periodo de 10 años (2008-2018) en el que la potencia por corriente oceánica presenta una disponibilidad de energía superior a 32 W/m^2 (Figura 22c) debido a que muy pocos días rebasan este umbral (10-20%) no se consideraron umbrales mayores; no obstante, con el fin de ejemplificar otros umbrales, se muestra la energía superior a 4 (Figura 22a) y 14 (Figura 22b) W/m^2 .

El umbral de relevancia para el presente estudio es el que se detalla en la Figura 22c, de 32 W/m^2 , el cual en las zonas próximas a la costa solo se presenta del 0-10% del tiempo. En zonas próximas (15 km aproximadamente) se presenta de un 10-20% del tiempo. Se nota entonces que la presencia de potencia por corrientes marinas en la zona es muy poca, por lo cual no resulta muy factible colocar dispositivos que aprovechen la energía de las corrientes marinas en Michoacán.

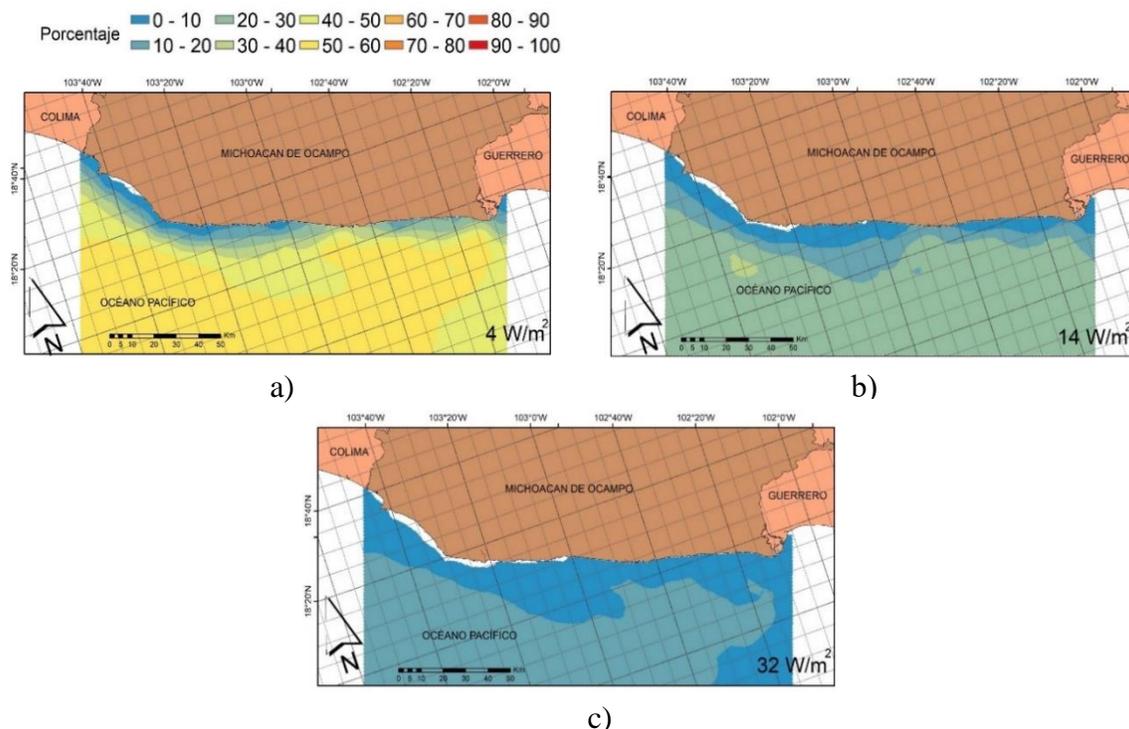


Figura 22. Potencia teórica de corrientes marinas en porcentaje de días (a lo largo del periodo de 10 años) en los cuales la potencia disponible es mayor a los umbrales establecidos. (a) umbral de 4 W/m^2 . (b) umbral de 14 W/m^2 . (c) umbral de 32 W/m^2 .

6.1.3 Potencia de gradiente térmico

6.1.3.1 Potencia media anual

Los criterios de profundidad de agua recomendados para encontrar gradientes térmicos utilizables indican que es de al menos 1000 m (Nihous, 2007). Sin embargo, existen estudios donde se han encontrado gradientes térmicos considerables a 500 m de profundidad (Syamsuddin et al., 2015), por lo que se evaluó si en la zona de estudio los gradientes térmicos a 500 m rebasaban los 20 °C, gradiente de diseño propuesto por Nihous (2007). Se encontró que en promedio se tiene un gradiente térmico de 28 °C, por lo que se decide evaluar la potencia a los 500 m de profundidad del mar a partir de la línea de costa.

En la Figura 23 se muestra la media de potencia por gradiente térmico, en donde se detalla una malla con resolución 1/12°, que representa la posición de los datos de entrada, la modelación se hizo para 10 años (2008-2018). En la figura se puede observar una separación entre la línea de costa hasta la zona donde la profundidad es mayor a 500 m. Los resultados de potencia media rebasan, en toda la zona, los 300 MW. También se nota que existen zonas potenciales muy próximas a la costa en el este del estado de Michoacán, de 5 km aproximadamente, y las zonas de mayor potencia (325-330 MW), que abarca el 30.9% del área en estudio, se encuentran en la parte oeste a 30 km de la costa, aproximadamente. En la Tabla 7 se muestran los porcentajes que abarcan cada uno de los intervalos de potencia, la mayor cobertura del área (50.8%) la tiene el intervalo de potencia de 320-325 MW, que se encuentra a 20 km de la costa, aproximadamente. De acuerdo a (Board, 2013) la potencia de diseño de una planta típica de conversión de energía térmica (OTEC) se considera de 100 MW; al tener una potencia media tres veces mayor se concluye que la zona es óptima para la colocación de plantas OTEC.

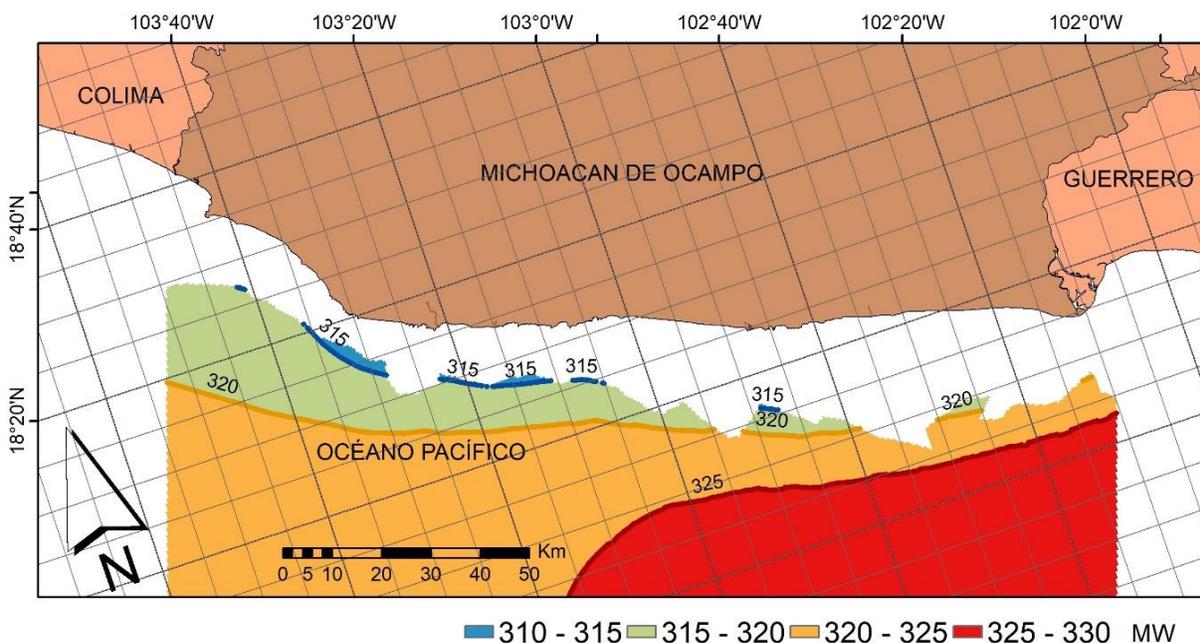


Figura 23. Potencia teórica media anual de gradiente térmico, para un periodo de 10 años (2008-2018) en la costa del estado de Michoacán, México. (En MW).

Tabla 7. Cobertura del área de estudio que abarcan los intervalos de potencia media por gradiente térmico, en porcentaje.

Potencia media por gradiente térmico (MW)	porcentaje de cobertura del área (%)
310 - 315	0.8
315 - 320	17.5
320 - 325	50.8
325 - 330	30.9

6.1.3.2 Disponibilidad del recurso

Como se menciona en la sección 6.1.3.1, la potencia necesaria para el funcionamiento de una planta OTEC es de 100 MW, por lo que para mostrar los resultados de disponibilidad de energía, en porcentajes de días (Figura 24), se utilizará el umbral de 100 MW como el mínimo necesario, tal como se muestra en la Figura 24a, además se muestran umbrales de 200 MW (Figura 24b) y de 300 MW (Figura 24c).

La disponibilidad de energía de 100-200 MW y de 200-300 MW resulta constante durante todo el periodo considerado (10 años), es decir del 90-100% del tiempo. Además, presenta una disponibilidad mayor a 300 MW del 70-80% del tiempo en prácticamente toda la región de estudio. Por lo que las costas Michoacanas a distancias de 5 a 30 km resultan atractivas para extracción de energía térmica.

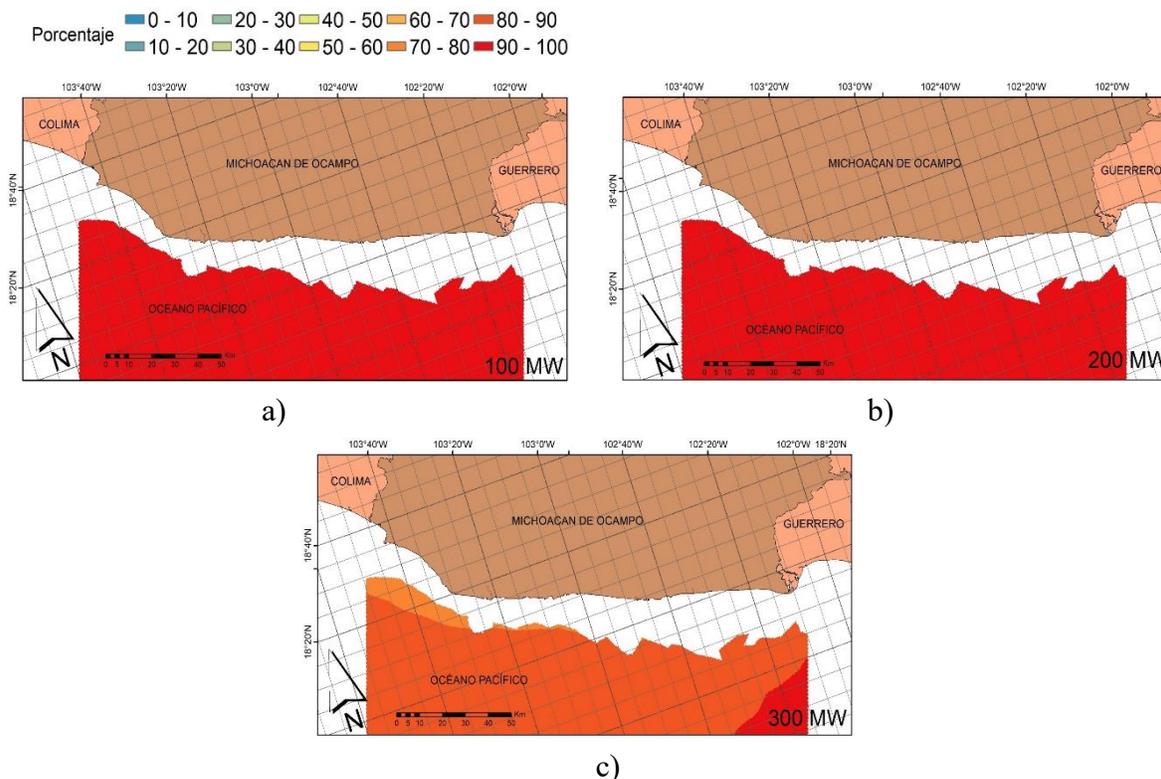


Figura 24. Potencia teórica de gradiente térmico en porcentaje de días (a lo largo del periodo de 10 años) en los cuales la potencia disponible es mayor a los umbrales establecidos. (a) umbral de 100 MW. (b) umbral de 200 MW. (c) umbral de 300 MW.



6.1.4 Potencia de gradiente salino

En la Región Hidrológico-Administrativa número 17, llamada Costa de Michoacán, desembocan al mar los ríos Aquila-Ostula (R2), Coalcomán (R3), Nexpa (R4), Chula (R5) y Acapilcan (R6). Además del río Coahuayana (R1) que desemboca en la frontera con Colima, perteneciente a la Región Hidrológico-Administrativa número 16 (Armería-Coahuayana). La distribución de estos ríos como sus desembocaduras se muestra en la Figura 25.

En estos ríos se evaluaron los recursos energéticos de gradiente salino, mediante la ecuación (5). Para lo cual es necesario conocer la salinidad del agua de mar, la cual es prácticamente igual a lo largo de toda la costa del estado de Michoacán; así como la salinidad del agua de los ríos, en su desembocadura. En la Tabla 8 se muestra que el río Coahuayana (R1) es el de mayor potencia, con 41.3 MW, solo que al estar en frontera con otro estado, puede representar problemas para su aprovechamiento; sin embargo, en la región central del estado, se encuentra el río Coalcomán (R3) el cual genera 31.4 MW de potencia teórica, por lo que es el más factible para su aprovechamiento. Los ríos con menor potencia son el R2, R5 y R6; esto se debe a diferentes factores, si se observa la Figura 25, el río R2 y el R5 producen prácticamente la misma potencia, pero la longitud de ellos varía considerablemente; por lo que además del área de la cuenca que descargan estos ríos, es necesario contemplar aspectos de temperatura (evapotranspiración), procesos de lluvia-escurrimiento, entre otros, para definir las zonas más aptas para el aprovechamiento de este tipo de energía.

El potencial teórico es una aproximación que puede sobreestimar la potencia disponible, el cual sirve para formar un juicio preliminar sobre las desembocaduras de ríos que pueden ser aprovechables. Sin embargo, existen estudios que detallan la evaluación de un potencial práctico (Alvarez-Silva et al., 2016) aplicando la ecuación (6), el cual tiene por objeto reducir la sobreestimación del potencial teórico, mediante un factor de extracción (ecuación (7)) y un factor de capacidad (ecuación (9)). Álvarez-Silva et al., (2016), evaluaron estos factores de manera global, por lo que se utilizaran los mismos resultados, de 0.20 como factor de extracción y 0.84 como factor de capacidad. En la Tabla 8 se muestran estos resultados donde, el río Coalcomán (R3), considerado el más apto para su aprovechamiento, tiene un potencial práctico de 5.3 MW.

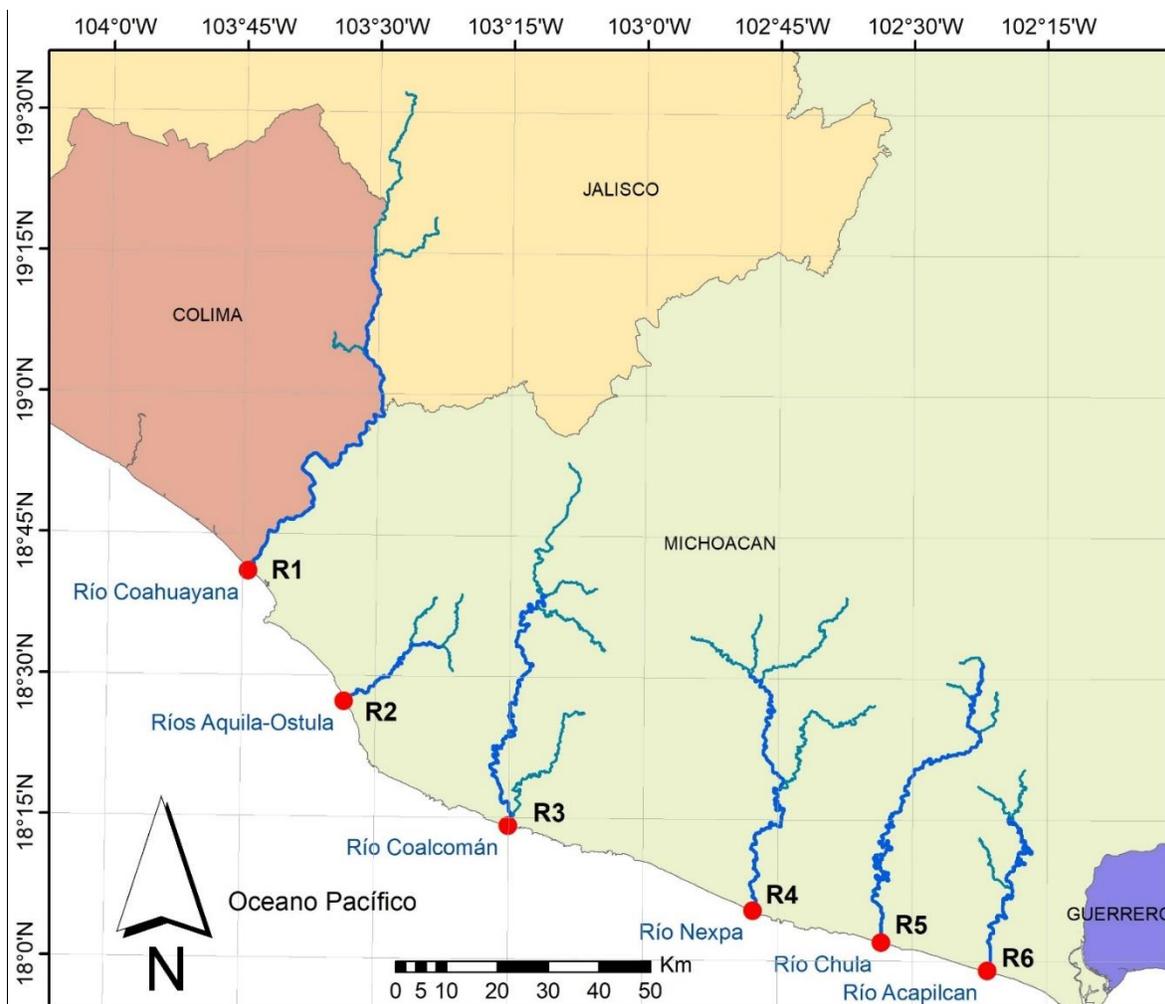


Figura 25. Localización geográfica de los principales ríos de la costa del Estado de Michoacán, México.

Tabla 8. Potencia teórica y práctica media anual de gradiente salino, en las desembocaduras de los principales ríos de la costa del estado de Michoacán, México.

Río	Caudal (Q) m ³ /s	Salinidad mol/L		Temperatura °K	Potencia Teórica (P _{GST}) MW	Potencia Práctica (P _{GSP}) MW	
		Mar	Río				
R1	Coahuayana	21.6	586.8	5	301.5	41.3	6.9
R2	Aquila-Ostula	6.0	586.5	5	301.7	11.4	1.9
R3	Coalcomán	16.4	586.2	5	301.6	31.4	5.3
R4	Nexpa	11.5	585.8	5	301.3	22.0	3.7
R5	Chula	6.1	585.8	5	301.0	11.6	2.0
R6	Acapulcan	4.8	585.4	5	307.2	9.2	1.6

6.2 Evaluación multicriterio (MCE)

Con el objeto de analizar distintos criterios para la toma de decisiones, sobre la colocación de dispositivos convertidores de energía, en esta sección se muestran las restricciones booleanas (sección 6.2.1) que se encontraron en el estado de Michoacán; así como los factores estandarizados (sección 6.2.2) considerados para generar la Evaluación Multicriterio, mediante la ecuación (10). Esta evaluación resulta en un mapa que muestra los sitios con mayor idoneidad para su aprovechamiento. En la Figura 26 se muestra una descripción gráfica del proceso a seguir para obtener los sitios más idóneos.

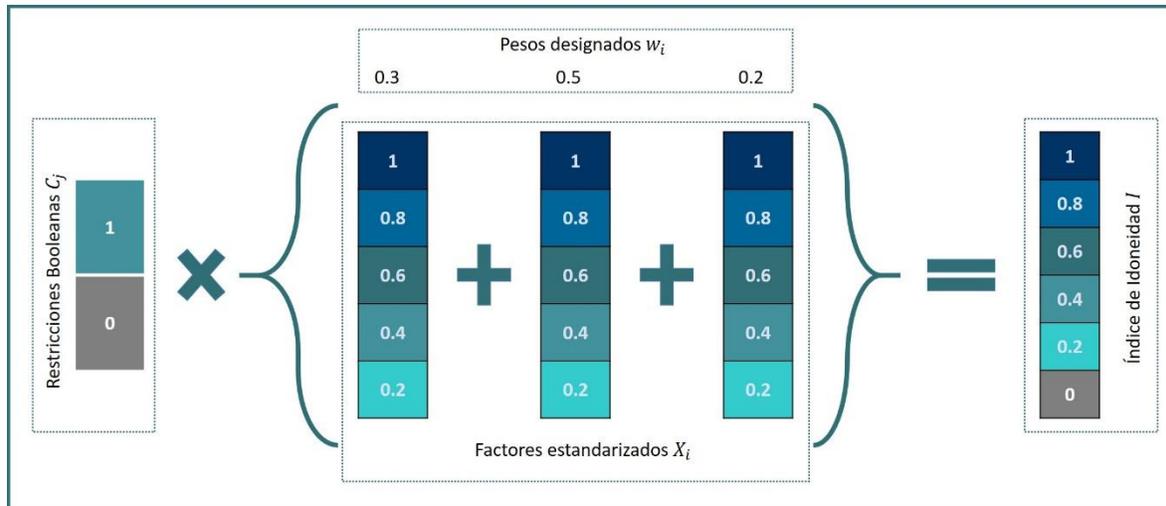


Figura 26. Desarrollo gráfico de la ecuación (10).

6.2.1 Restricciones booleanas

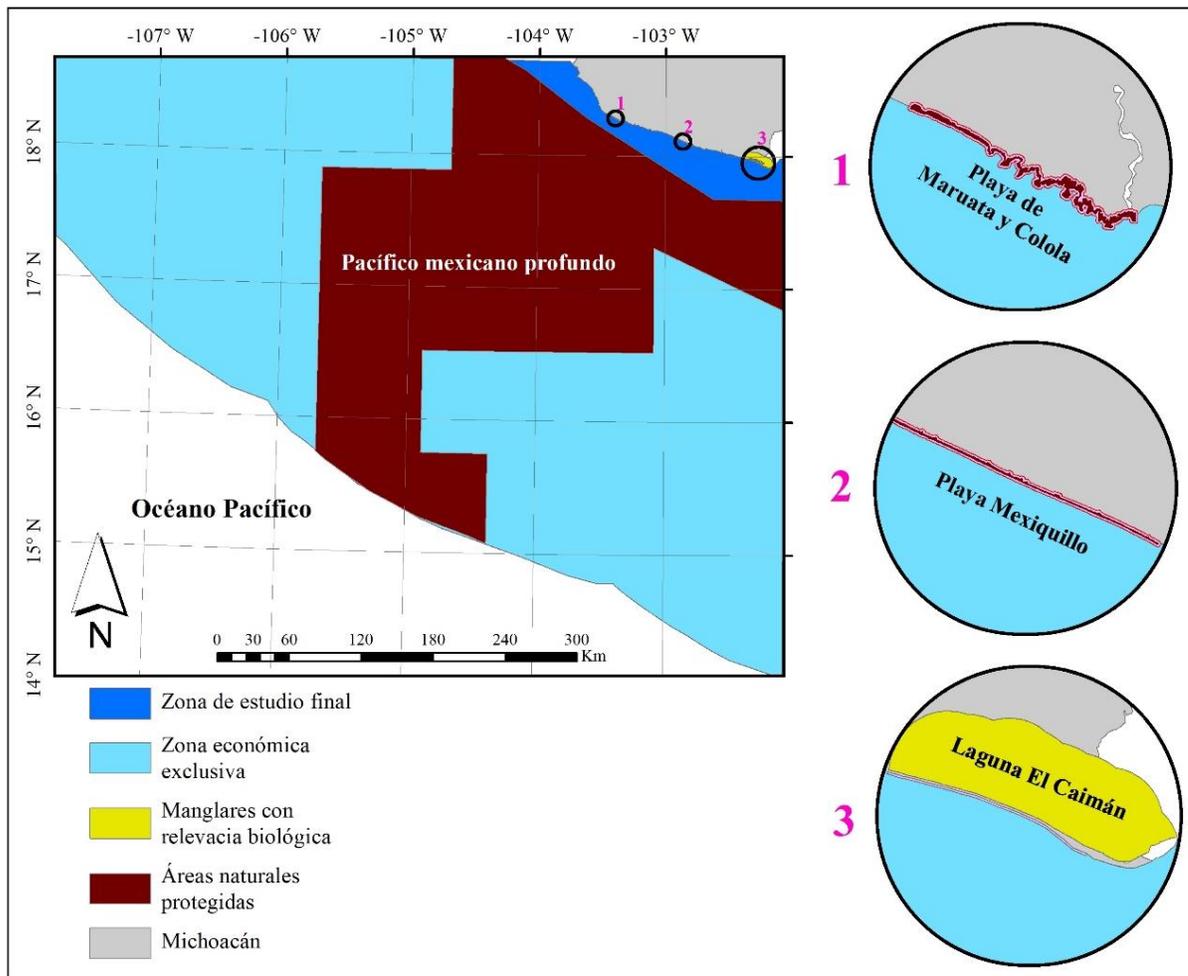
6.2.1.1 Ambientales

Las áreas naturales protegidas son las zonas del territorio nacional sobre las que la nación ejerce su soberanía y jurisdicción en donde, los ambientes originales no han sido significativamente alterados por la actividad del ser humano o que requieren ser preservadas y restauradas, estas zonas se crean mediante un decreto presidencial y están sujetas a regímenes especiales de protección, conservación, restauración y desarrollo (CONAMP, 2016).

En la zona de estudio, a noviembre de 2017, están presentes tres áreas protegidas (Figura 27), establecidas en formato “shape” por la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO):

- La playa de Maruata y Colola que, son los sitios de mayor anidación de tortuga negra a lo largo del Pacífico, mientras que sus afloramientos rocosos son zonas de forrajeo de tortugas carey juveniles (ICAPO, 2014).
- La playa Mexiquillo es considerada una de las cinco playas más importantes para la cría de la tortuga laúd en el Pacífico mexicano y mesoamericano, también se cría la tortuga marina Olive Ridley y la tortuga verde (RAMSAR, 2004).

- El Pacífico Mexicano Profundo ubicado al suroeste de México, presenta ecosistemas y hábitats con características únicas; que permiten la existencia de especies y poblaciones altamente adaptadas y especializadas, de composición genética única, como invertebrados bentónicos, peces bentónicos y demersales, por lo que estos sitios son estratégicos para el conocimiento de la sistemática, evolución y estructura de la biodiversidad, además, se caracteriza por una elevada productividad y temperatura cálida durante todo el año, factores esenciales en el desarrollo de fauna marina tropical que sostiene importantes pesquerías para el país (DOF, 2016b).



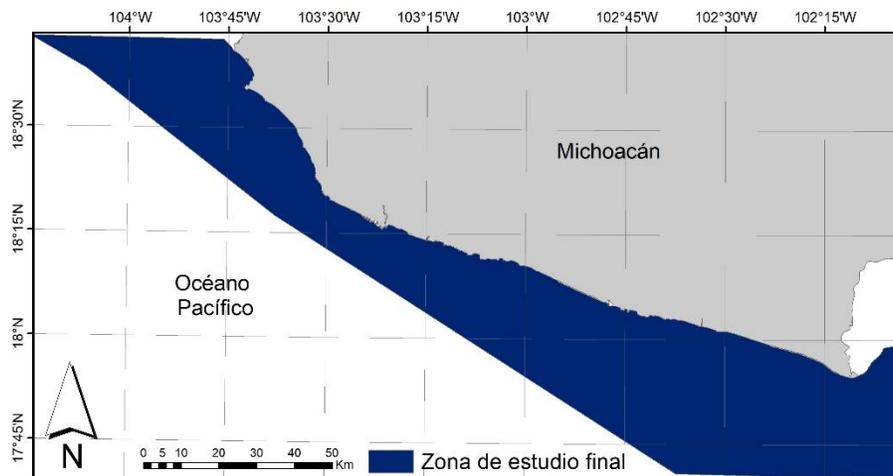


Figura 27b. Zona de estudio final al excluir las restricciones ambientales.

Considerando la importancia de estas áreas se declaran como restricciones booleanas, considerando 0 donde existen áreas protegidas y 1 donde no existen. Al hacer las operaciones la zona de estudio inicial queda particionada por la región del Pacífico Mexicano Profundo, por cuestiones de distancia se decide eliminar del estudio toda la zona posterior a esta región hacia mar adentro, quedando la región marcada en la Figura 27 como zona de estudio final.

6.2.1.2 Potencial energético

6.2.1.2.1 Umbral mínimo de potencia por Oleaje

Tal como se menciona en la sección 6.1.1.2 el umbral mínimo para que funcione un dispositivo convertidor de energía es de 2 kW/m. El cual se definió a partir de matrices de potencia de los convertidores de energía presentes en la literatura (Bernardino et al., 2017); por lo que si existen valores por debajo de este umbral, en la zona de estudio, se consideran con valor 0 y toda la zona que rebasa el umbral se le otorga el valor de 1, tal como se muestra en la Figura 28.

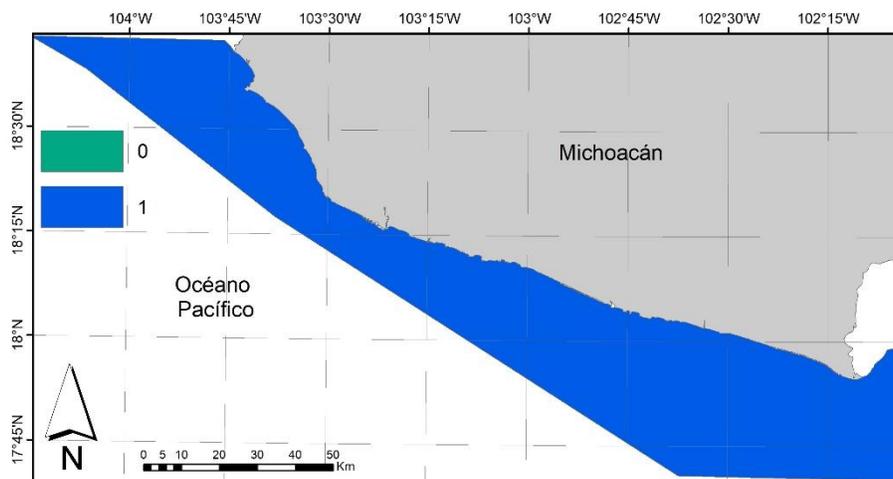


Figura 28. Restricción booleana por umbral mínimo permitido para potencia de olas, para el funcionamiento de dispositivos convertidores de energía.

6.2.1.2.2 Umbral mínimo por corrientes

El umbral mínimo de potencia por corrientes es de 32 W/m^2 (sección 6.1.2.2), debido a la velocidad mínima operacional de dispositivos de conversión de energía de corrientes marinas (Laws & Epps, 2016) por lo que en la Figura 29 se detallan con valor de 0 las zonas por debajo de este umbral y con 1, las zonas aptas para la extracción de energía.

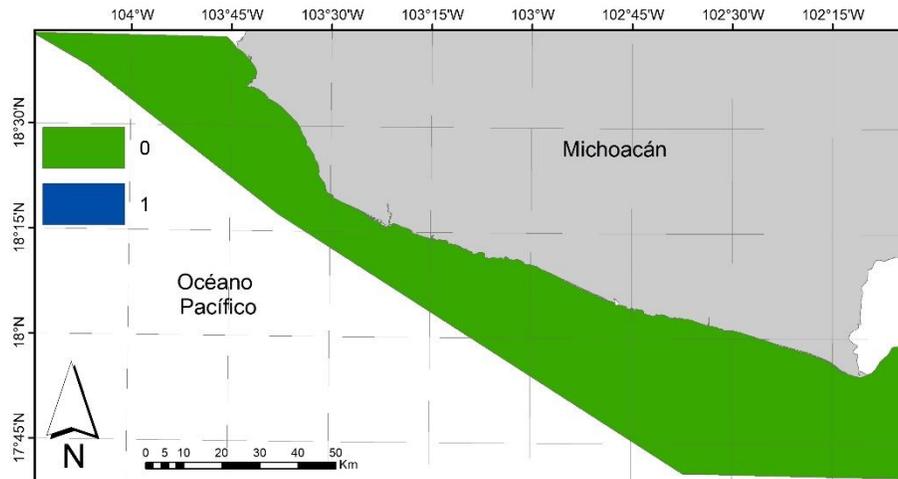


Figura 29. Restricción booleana por umbral mínimo permitido para potencia por corrientes, para el funcionamiento de dispositivos convertidores de energía.

6.2.1.2.3 Umbral mínimo por gradiente térmico

Como se menciona en la sección 6.1.3.1 la potencia de diseño de una planta típica de conversión de energía térmica (OTEC) se considera de 100 MW (Board, 2013) por lo que se considera que las zonas que estén por debajo de este valor de potencia se les asigna valor de 0 y con 1 a las zonas que cumplen con el mínimo necesario, recordando que el gradiente térmico se evaluó a los 500 m de profundidad, la zona de estudio por gradiente térmico comienza a partir de profundidades mayores a los 500 m tal como se muestra en la Figura 30.

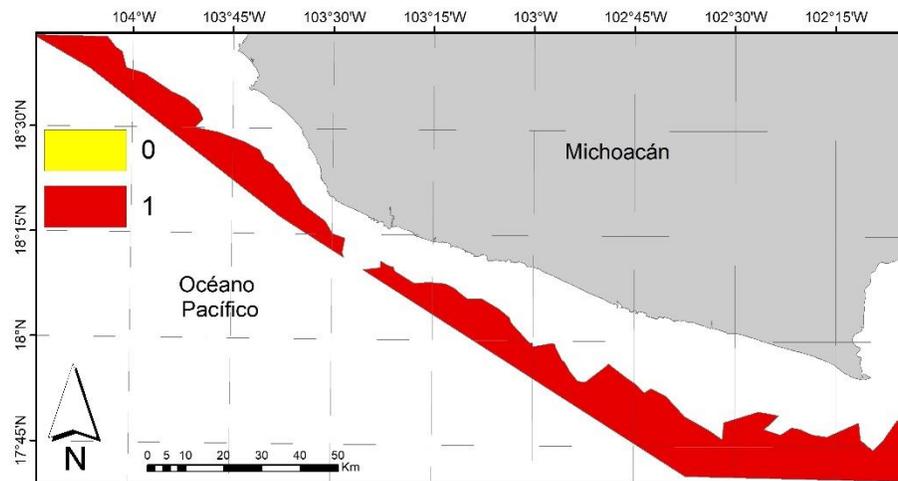


Figura 30. Restricción booleana por umbral mínimo permitido para potencia de gradiente térmico, para el funcionamiento de dispositivos convertidores de energía.

6.2.2 Factores estandarizados

6.2.2.1 Infraestructura

Un desarrollo económico y factible de cualquier proyecto de energía dependerá en gran parte de su acceso a la infraestructura necesaria durante las distintas etapas de construcción y después de la puesta en servicio, para entregar la energía capturada y transformada a la red. La estructura disponible o necesaria para determinado proyecto variará según la zona de estudio o la índole del proyecto; no obstante, con las características presentes en esta región se da una amplia idea de cómo ponderar este tipo de datos. Como se mostró en la Figura 5, cerca de la costa Michoacana se encuentran los Puertos de Manzanillo y de Lázaro Cárdenas, por lo que se decide generar polígonos de Thiessen entre estos dos puntos, colocando valor de 0.1 en la frontera entre los dos polígonos limitada por el polígono en estudio, mediante una interpolación lineal se asignan más valores llegando a 1 en la proximidad a los puertos. Se hizo el mismo procedimiento para las subestaciones eléctricas presentes en la zona de estudio, Coahuayana y San Isidro, al final se ponderaron los dos criterios (Puertos y Subestaciones) con un valor de ponderación de 0.5 a cada uno. En la Figura 31 se muestran los resultados, donde se observa que la región más adecuada se encuentra en las fronteras sureste y noroeste del estado.

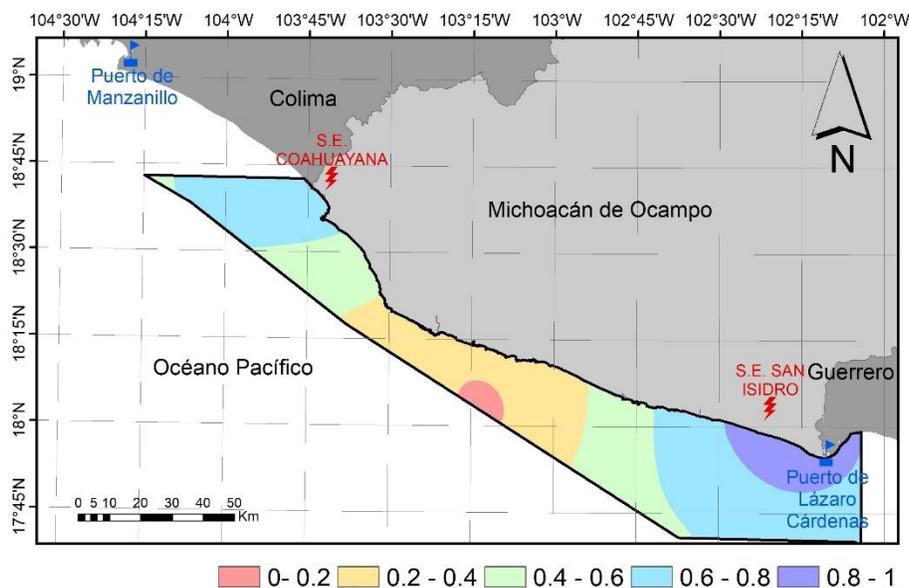


Figura 31. Estandarización de la infraestructura presente en la zona de estudio (puertos y subestaciones eléctricas).

6.2.2.2 Social

Las localidades presentes en la zona de estudio pueden ser totalmente beneficiadas por la instalación de dispositivos de conversión de energía oceánica; no obstante, en determinadas comunidades puede resultar complejo realizar algunos cambios debido a sus creencias y por el miedo a que se modifique el ecosistema o los valores de las zonas. Tal es el caso de las comunidades indígenas en toda la República Mexicana, las cuales de acuerdo al periódico “El Informador” viven amenazadas y resistiendo la extinción de su identidad y su cultura (El Informador, 2018). Es por ello que, en estos

pueblos puede existir renuencia al cambio, representando un reto para los fines del proyecto. Por lo que a estos puntos se les asigna un factor de 0.4, mientras que al resto de las localidades de interés en la zona se les asigna un valor de 1. El valor mínimo de 0.1 se designa a la distancia perpendicular más alejada de las localidades. La ubicación de estas localidades se tratará como puntos que, una vez designados los valores, se interpolan resultando en la Figura 32, donde se observa que las zonas más alejadas de la costa son las de menor valor, aumentando conforme nos acercamos a las localidades, las cuales se describen en la Tabla 3.

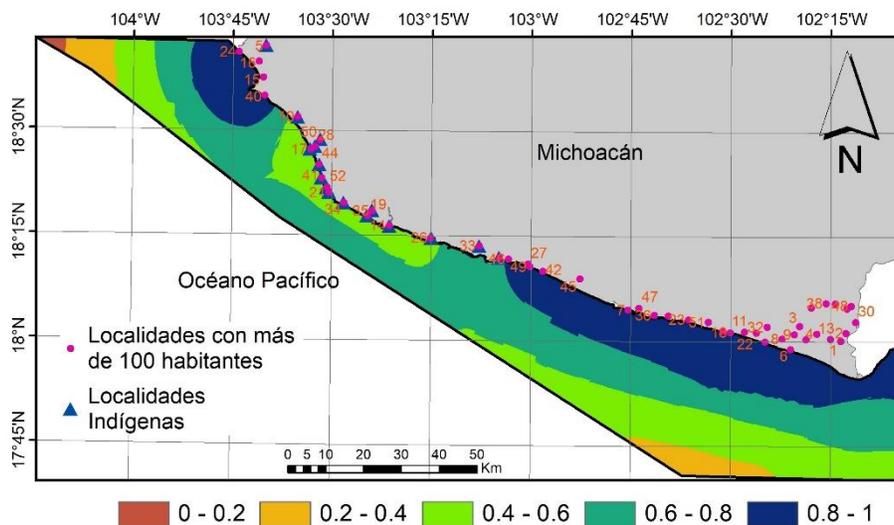


Figura 32. Estandarización de los factores sociales (población beneficiada y población indígena).

6.2.2.3 Usuarios

La producción y consumo de alimentos, las actividades turísticas o comerciales en las playas, son factores que pueden llegar a ser complejos de abordar para el desarrollo de un proyecto. Designar estos factores es difícil y varía para cada zona donde se requiera hacer un estudio, de acuerdo a las actividades industriales y económicas presentes. En la región de la costa Michoacana, además de la actividad siderúrgica de Lázaro Cárdenas (que no se considera por estar centralizada en un solo punto), la principal actividad económica es la pesca. En los últimos años el turismo va en alza, pero todavía dista de ser importante.

A pesar de que es desconocido el efecto que tendría un proyecto de conversión de energía en las zonas pesqueras, para poder considerar su aprovechamiento como energía limpia, uno de sus principales objetivos debe ser, evitar los conflictos con los usuarios de la zona. Para esto, se consideraron con el valor mínimo de 0.1 los lugares de pesca, obtenidos del Atlas de localidades pesqueras de México (Ramírez-Rodríguez et al., 2006), considerando un radio de 4 km alrededor de estas zonas. Esto en base a que en México, es regular que las zonas de pesca se encuentren en la plataforma continental donde se tiene una profundidad promedio de 200 metros (Cifuentes Lemus, 1979). Tal profundidad se presenta en la costa Michoacana a los 4 km a partir de la línea de costa. Entonces, se asignaron valores de 1 a los puntos más alejados de las zonas pesqueras (Tabla 4), designándolos como los de más conveniencia, para

así generar la interpolación tal como se muestra en la Figura 33, donde se observa que las regiones más cercanas a las zonas pesqueras son los de menor valor estandarizado.

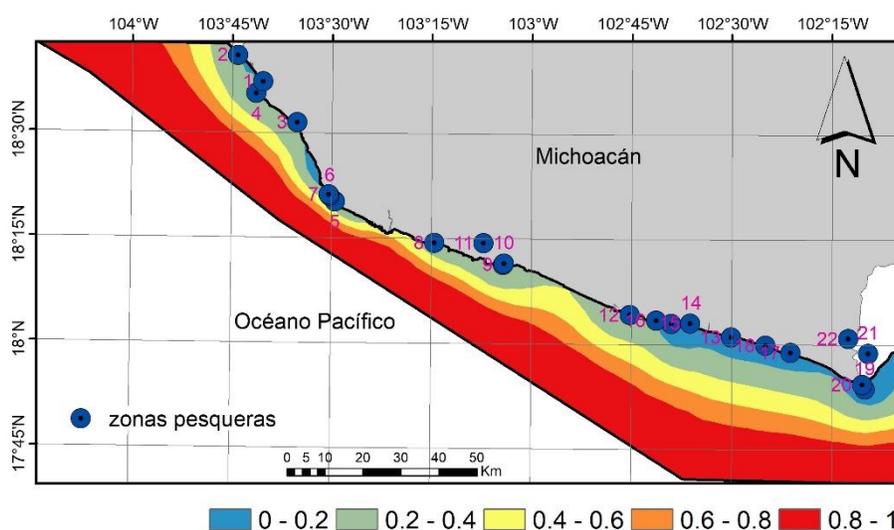


Figura 33. Estandarización de los factores por usuarios de la zona de estudio (zonas de pesca).

6.2.3 Evaluación multicriterio para diferentes escenarios

Para realizar la evaluación multicriterio se debe dar un peso a cada uno de los factores estandarizados. La elección de estos pesos debe ser el resultado de un proceso transparente mediante la consulta con las diferentes partes interesadas, el uso de la experiencia técnica en conversión de energía oceánica y el uso de la información existente de industrias más maduras (Flocard et al., 2016). También, se tienen que considerar casos de estudio, en los que un factor tendrá mayor o menor peso. Un ejemplo se da al conocer el tipo de conexión a la red ya que, si se quiere conectar a la macro-red, las subestaciones son importantes, pero si se quiere hacer una micro-red local, la disponibilidad de conexión a la red carecería de importancia, por lo que su valor de ponderación bajaría. Es por ello que se decide proponer diferentes escenarios, variando los valores de ponderación (Tabla 9) a fin de ejemplificar. De esta manera será posible determinar la solidez y la validez de los sitios resultantes con un criterio más adecuado.

Tabla 9. Valores de ponderación para los diferentes factores estandarizados, para siete casos propuestos.

Caso	Infraestructura	Sociales	Usuarios
A (Base)	0.34	0.33	0.33
B	0.25	0.37	0.38
C	0.50	0.25	0.25
D	0.60	0.20	0.20
E	0.75	0.13	0.12
F	0.80	0.10	0.10
G	0.20	0.40	0.40

La ponderación se realizó para siete casos (A-G). Utilizando los valores de ponderación presentadas en la Tabla 9. Considerando factores estandarizados de Infraestructura, sociales y usuarios,



se aplicó la ecuación (10), es importante recalcar que para evaluar esta ecuación, es necesario multiplicar por las restricciones booleanas, dependiendo del tipo de energía que se quiera explotar, para este caso, toda la zona de estudio se multiplica por el valor de 1 para oleaje (Figura 28), para corrientes toda la zona de estudio resultó de 0 (Figura 29) y para gradiente térmico la zona de estudio comienza a partir de la cota a 500 m de profundidad y se tiene un valor general de 1 (Figura 30). Estos resultados se muestran en la Figura 34, donde se decidió mostrar oleaje y gradiente térmico de manera conjunta, recalcando la cota a 500 m de profundidad que es donde existe gradiente térmico. No obstante, si las zonas con valores booleanos cambiaran de un tipo de energía a otra, se tendría que mostrar los resultados para cada tipo de energía, en figuras diferentes. Se puede observar que las zonas con mayor idoneidad oscilan entre el 20 y el 30% del área en estudio, con una variación de 10%. Las áreas que interesan a los tomadores de decisiones, son las de idoneidad alta, como se detalla la variación de porcentaje entre todos los casos, no es tan significativa. La zona de la costa de Lázaro Cárdenas muestra áreas de idoneidad alta para todos los casos.

Se nota también que las zonas con idoneidad baja y media, aumentan o disminuyen de manera más significativa que la idoneidad alta, en un 24 y 27%, respectivamente; por lo que las zonas con idoneidad alta son más estables al variar los valores de ponderación. Las principales estadísticas del índice de idoneidad (I) se muestran en la Tabla 10, incluyendo la identificación de los valores medio, mínimo y máximo de todas las celdas del mapa de índice de idoneidad, así como el cálculo de la desviación estándar celda por celda. También se proporciona el porcentaje de área, de la zona de estudio, sobre diferentes valores de I.

Los casos A, B y G son los que tienen menor desviación estándar, es decir, el índice de idoneidad se concentra en los valores medios, curiosamente el caso A y G representan, respectivamente, la menor y mayor cobertura de área de idoneidad alta. La desviación estándar mayor se presenta en el caso F, donde se tiene una menor variación entre las áreas baja, media y alta. En este caso también se presenta el índice de idoneidad más alto, de 0.82. Los casos E y F son los que arrojaron valores prácticamente iguales,

Tabla 10. Principales datos estadísticos del índice de idoneidad (I), así como la cobertura del área en porcentaje, en tres niveles: idoneidad baja, media o alta; para los siete casos propuestos.

Caso	Idoneidad (I)				Cobertura del área de estudio		
	Mínimo	Medio	Máximo	Desviación Estándar	Baja $I < 0.5$	Media $0.5 < I < 0.7$	Alta $0.7 < I$
A (Base)	0.29	0.63	0.77	0.08	8.2%	72.2%	19.6%
B	0.30	0.65	0.80	0.08	6.9%	68.6%	24.5%
C	0.28	0.62	0.78	0.10	13.4%	65.6%	21.0%
D	0.27	0.60	0.79	0.11	21.2%	58.1%	20.7%
E	0.26	0.59	0.81	0.14	28.5%	47.2%	24.3%
F	0.26	0.58	0.82	0.15	29.9%	45.6%	24.5%
G	0.30	0.65	0.81	0.08	6.1%	64.3%	29.6%

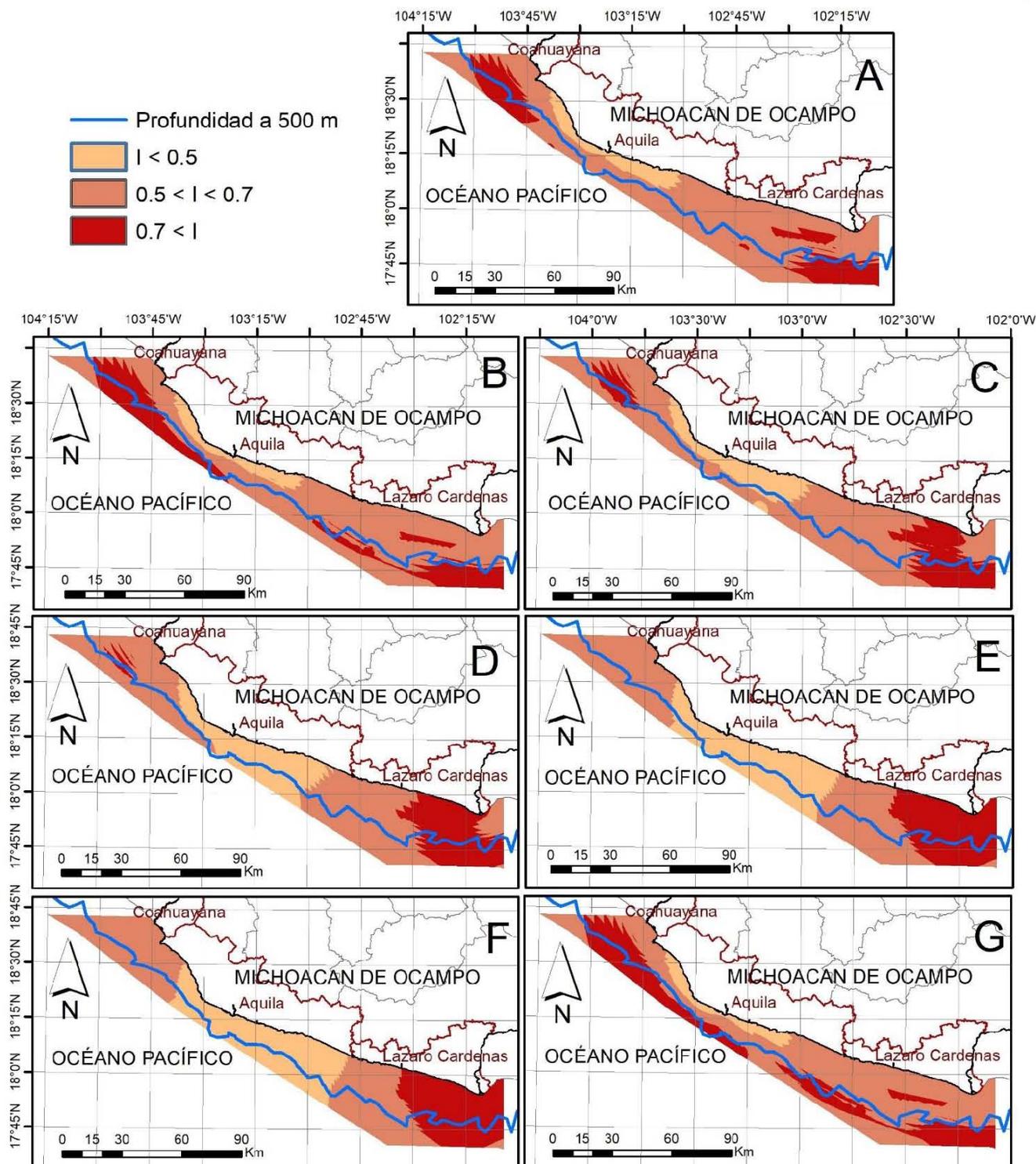


Figura 34. Índice de idoneidad (I) para los siete casos propuestos en la costa del estado de Michoacán, México. ($I < 0.5$ es idoneidad baja, $0.5 < I < 0.7$ es idoneidad media, $0.7 < I$ es idoneidad alta).

6.2.4 Selección de sitios

En la Figura 35 se muestran los sitios con idoneidad alta de los siete casos de estudio, estos sitios representan las áreas más prospectas para la colocación de dispositivos convertidores de energía de oleaje (toda la zona con Idoneidad alta) y gradiente térmico (la zona con idoneidad alta después de la profundidad a 500 m hacia costa afuera). Los casos A, C y D concentran las zonas idóneas cerca de Coahuayana y de Lázaro Cárdenas. Los casos E y F únicamente muestran idoneidad en la costa del municipio de Lázaro Cárdenas. Por último, los casos B y G son los que muestran una idoneidad más distribuida sobre toda la costa del estado de Michoacán, mostrando zonas idóneas para el municipio de Aquila.

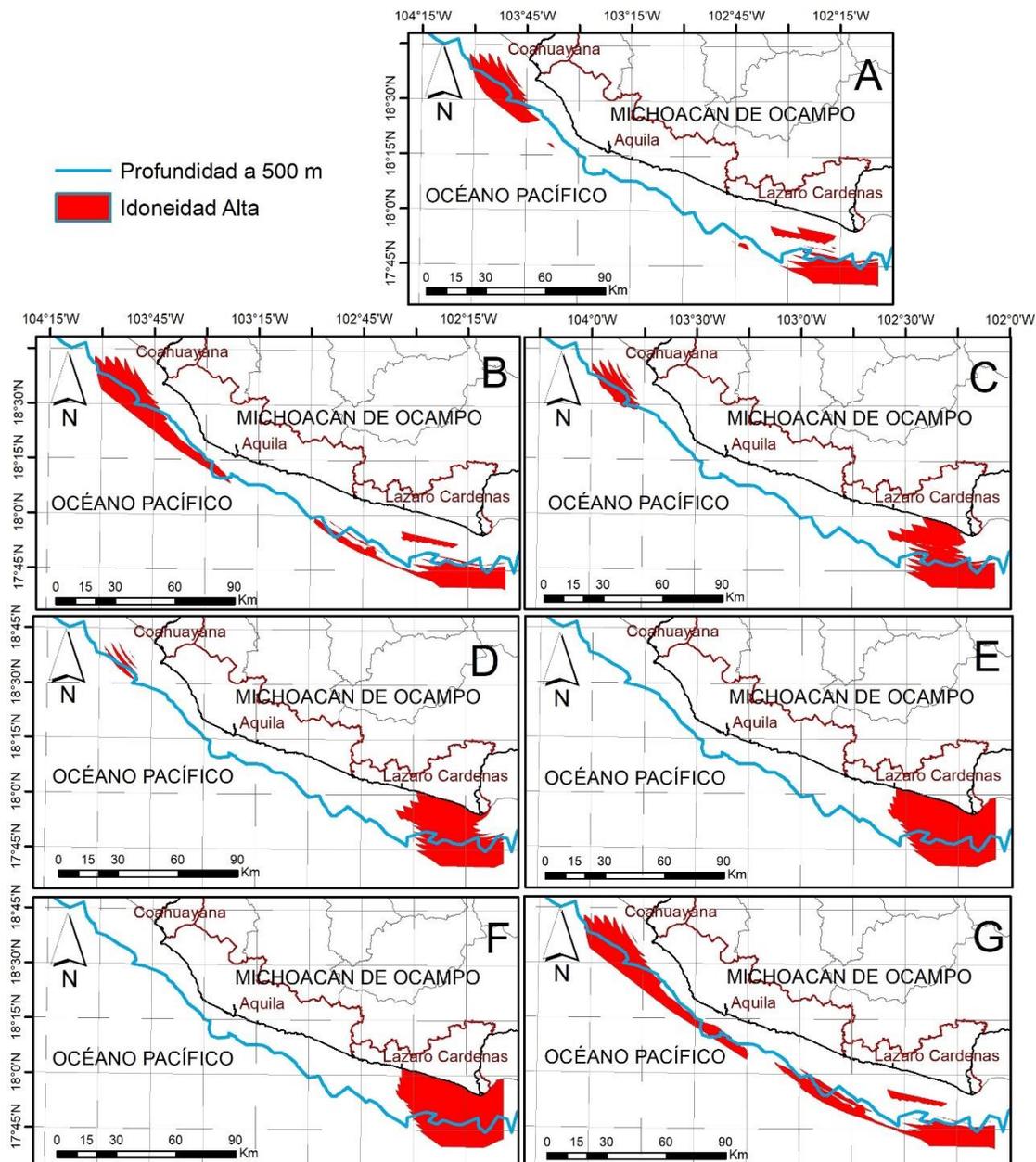


Figura 35. Regiones con idoneidad alta en la costa del estado de Michoacán, México.

La idoneidad alta se mostró relativamente consistente en valores cuantitativos, mientras cualitativamente se observa que para el caso B y G, se extiende alrededor de la mayoría de la costa, mientras en los otros casos persisten las zonas cercanas a Coahuayana y Lázaro Cárdenas. Será responsabilidad del tomador de decisiones decidir los valores de ponderación para los criterios de acuerdo a la importancia que se les designe.

Para términos prácticos en este estudio se usará el caso de estudio A, debido a que se observó la persistencia de esas áreas mediante el análisis de sensibilidad y es el caso neutro, ya que todos los criterios se evalúan con el mismo valor de ponderación, el cual se muestra en la Figura 36. También, se muestra la cota batimétrica a 500 metros de profundidad, con el fin de marcar el límite para el aprovechamiento de gradiente térmico.

Recordando las restricciones booleanas, se sabe que toda el área es aprovechable por gradiente térmico y por energía de olas; mientras que la energía por corrientes marinas no se puede aprovechar. Es por ello que en este estudio se seleccionaran zonas aprovechables para extraer la energía de las olas, de gradiente térmico y uno de los ríos con mayor potencia de gradiente salino.

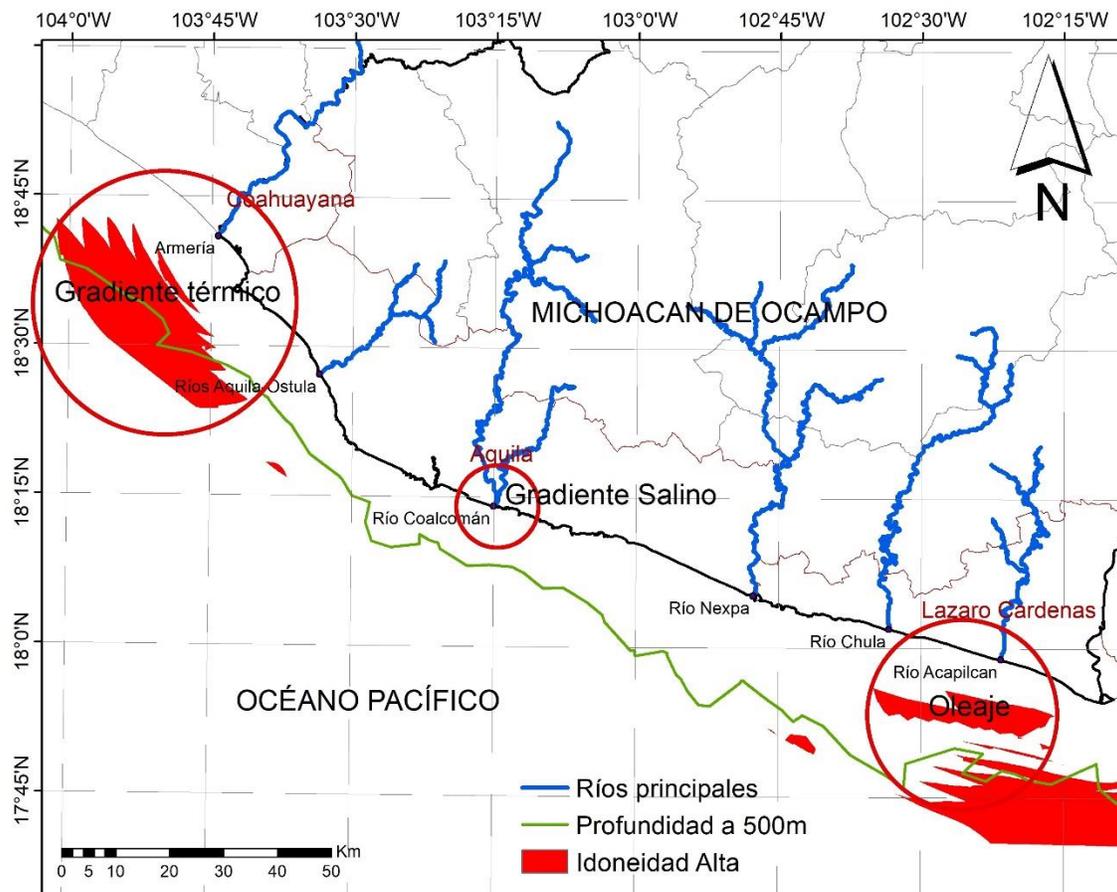


Figura 36. Elección del tipo de energía oceánica a colocar en las zonas idóneas (Caso A) de la costa del estado de Michoacán, México.

En relación a la Figura 36, la profundidad de 500 metros es más cercana a la costa en la zona de Coahuayana y Aquila, por lo que se propone usar energía por gradiente térmico en esta zona. Se aprecia también que hay zonas idóneas muy cercanas a Lázaro Cárdenas, donde se podría aprovechar la energía de las olas. Es notorio que la región cercana a la costa del municipio de Aquila presenta baja idoneidad en casi toda su extensión, pero a la mitad del municipio se presenta el río Coalcomán que es el segundo con mayor potencia, por lo que sería conveniente seleccionar este río para aprovechar la energía por gradiente salino.

En la Figura 37 se muestran algunos sitios propuestos de manera puntual, los cuales se eligieron en base a las coordenadas que tienen información en los modelos de ERA-Interim para oleaje y HYCOM para gradiente térmico, en las zonas de interés descritas en la Figura 36. Para energía por olas se propone el sitio con coordenadas $102^{\circ}45'00''$ en dirección oeste y $17^{\circ}52'30''$ en dirección norte. Para la energía por gradiente térmico se determinaron las coordenadas $103^{\circ}45'36''$ en dirección oeste y $18^{\circ}18'17''$ en dirección norte. Para la energía por gradiente salino se posicionó en el río Coalcomán en las coordenadas $103^{\circ}15'3.4''$ en dirección oeste y $18^{\circ}14'8.5''$ en dirección norte.

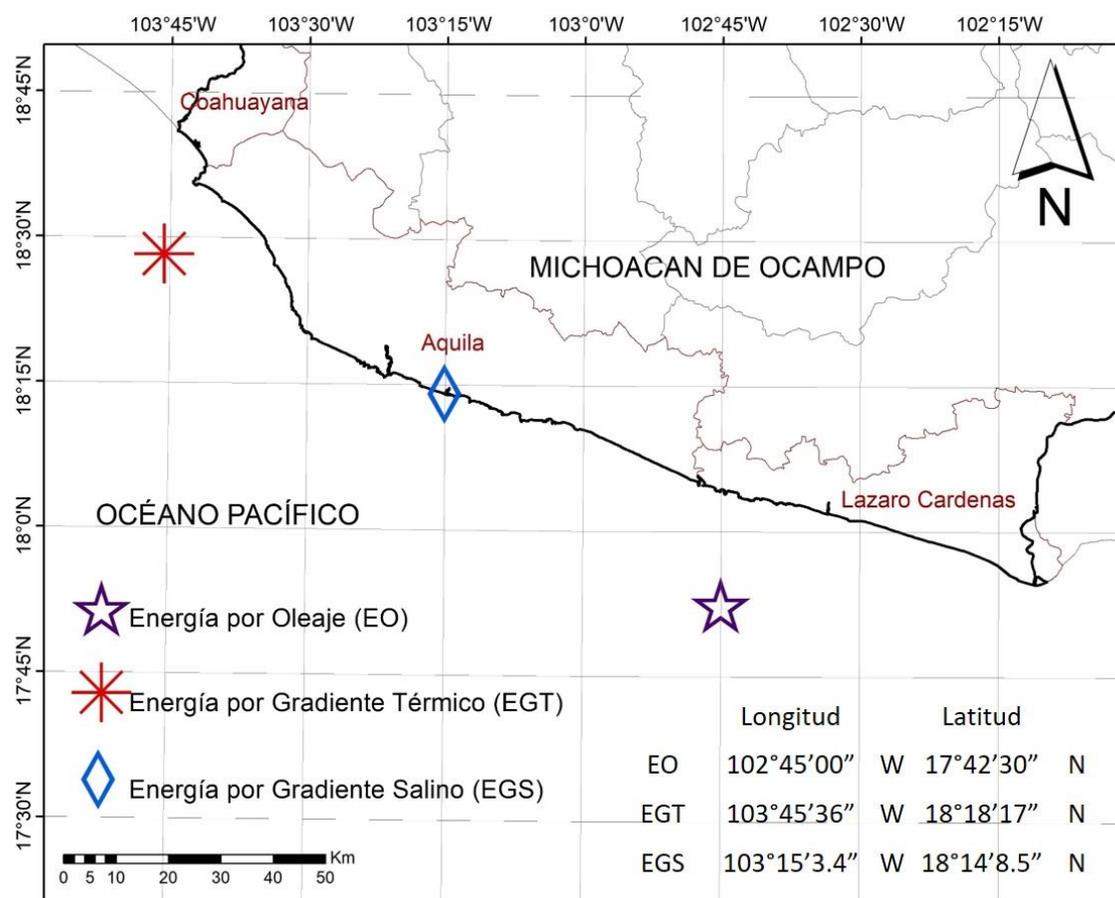


Figura 37. Localización en coordenadas geográficas de los sitios seleccionados para la colocación de dispositivos para los diferentes tipos de energía oceánica.



7 CONCLUSIONES

En esta sección se muestran las conclusiones, comentarios y resultados principales del presente estudio, en el cual, se buscó determinar zonas potenciales para extracción de energías del océano en el estado de Michoacán, México, considerando algunos factores sociales, económicos y ambientales por medio de una evaluación multicriterio.

Para definir sitios específicos viables para el uso de los recursos energéticos del océano es necesario analizar los factores sociales, económicos y ambientales que pueden afectar el desarrollo de proyectos en la zona de estudio, para ello se decidió realizar una evaluación multicriterio. Es importante hacer notar que la elección de los criterios depende enteramente del proyectista y del apoyo interdisciplinario que se le brinde para generar la toma de decisiones. Una toma de decisiones requerirá del conocimiento exacto de ¿Qué ocurre? y ¿Qué afecta?, la zona donde se quiera llevar a cabo determinado estudio. Con esto, el presente estudio se puede extender para crear una metodología de análisis que permita la identificación de otros sitios potenciales, dando lugar a análisis más detallados para proyectos de instalación de dispositivos convertidores de energía del océano. El manejo de datos mediante sistemas de información geográfica es esencial en nuestra era, por lo que en este trabajo se generó una metodología para saber cuantificar los datos de acuerdo a su naturaleza geométrica (puntos, líneas o polígonos) lo que facilitará la comprensión para cualquier desarrollador de proyectos. Con este trabajo se buscó dejar las bases para que cualquier proyectista pueda generar una evaluación multicriterio en el estudio que se le presente.

Las restricciones booleanas que se utilizaron en este estudio se definieron a partir de los siguientes criterios: ¿Se pueden instalar dispositivos o no se puede?. Se decidió que las zonas federales naturales protegidas, eran sitios de mucho riesgo, ya que se puede dañar el ecosistema existente, por lo que se consideraron zonas de exclusión de la zona de estudio. La otra restricción fue la de los umbrales de potencia, donde se definió que si no rebasaban el umbral mínimo para que los dispositivos pudieran funcionar, serían considerados como zonas de exclusión. Al evaluar esta restricción se encontró que solo era viable el uso de la energía por oleaje y gradiente térmico.

Dentro de los factores estandarizados se definieron como actividades económicas, las zonas de pesca. Dentro de las repercusiones sociales, se seleccionaron las poblaciones indígenas (con un valor de riesgo) y las poblaciones más beneficiadas (con un valor viable). Por último, dentro de la infraestructura cercana, se definieron los puertos y las subestaciones como zonas viables, ya que entre mayor infraestructura exista se reducirán los costos de traslado de equipo, material y mano de obra al lugar del proyecto.

Al realizar la ponderación de la evaluación multicriterio, se observó que todos los casos de estudio propuestos, quedan marcados por la infraestructura, debido a que son puntos enteramente benéficos; esto se definió para fines prácticos del proyecto; sin embargo, para hacer un reflejo correcto de la realidad es importante ver si los puertos o las subestaciones son completamente viables, si los organismos operadores estarían de acuerdo en la implementación de este tipo de proyectos, para de esa manera asignar el valor



específico y generar una correcta estandarización de esta variable. En caso de que no se tengan puertos o subestaciones, la infraestructura se deberá definir en base a las zonas con fácil acceso, ya sean carreteras, muelles, embarcaderos, etc.; también pueden ser definidos como puntos no benéficos, donde no se puede acceder, como los acantilados, por ejemplo. En cuanto a los factores sociales, es necesario mencionar las limitantes que se tienen debido a la falta de información por parte de las instituciones, donde los censos poblacionales son de hace 5 o 10 años, y solo muestran la marginación en poblaciones indígenas, sin tomar en cuenta zonas de riesgo por delincuencia o narcotráfico, además de que se necesita tener una mayor comunicación con la población, mediante encuestas, censos y diálogo; para evaluar la renuencia o la disposición a la implementación de un proyecto de energías renovables.

La selección de los sitios puntuales mostrados en la Figura 37 se hizo en base a los puntos más cercanos que tienen las fuentes de información, a las zonas propicias que arrojó la evaluación multicriterio; sin embargo, esto no limita que se pueda aproximar más a la costa, para el caso de oleaje, (gradiente térmico queda limitado por la profundidad) teniendo estos puntos viables, se pueden generar modelaciones más detalladas para tener información precisa del oleaje en zonas próximas a la costa. También se pueden hacer análisis de tormentas, para no solo limitar por umbral mínimo de funcionamiento de dispositivos, sino para saber si existen siniestros (huracanes) y definir zonas de exclusión en base a ello.

En fin, la elección de los criterios, puede ir tan lejos como los tomadores de decisiones lo indiquen, es en base a cada índole del proyecto que se decidirá el valor (peso) que tendrá cada criterio, esto se analizará a detalle con las partes interesadas y resultará en la viabilidad o el riesgo de la construcción en determinado sitio. Es por ello que, como línea de estudio futura, se propone un análisis socio-económico técnico que nos proporcione información concisa de lo que ocurre en el caso de estudio.

Se encontró el potencial medio por oleaje durante un periodo de 10 años (2008-2018), el cual resultó que en la mayor parte del área de estudio (41.8%) la potencia osciló entre 11.6-12 kW/m. De acuerdo a la bibliografía consultada, se detalló que la potencia necesaria para que puedan funcionar los convertidores de energía es de 2 kW/m, por lo que, al estar todos los valores de potencia por arriba de este umbral, se concluye que existe un potencial considerable para el desarrollo de proyectos de energía por oleaje en la costa del estado de Michoacán, por lo menos para bajo consumo.

También se hicieron los cálculos para obtener el potencial medio por corrientes marinas durante el periodo (2008-2018), donde se encontró que en el 45% del área de estudio los valores de potencia oscilaron entre 15-20 W/m², de acuerdo a las fuentes consultadas se definió que la potencia mínima para el funcionamiento de dispositivos por corrientes es de 32 W/m², por lo que la costa del estado de Michoacán no es viable para el uso de este tipo de energía.

El potencial medio por gradiente térmico también fue evaluado. Durante el periodo 2008-2018 se encontraron resultados de potencia de 320-325 MW, en el 50.8% del área de estudio. Asumiendo que los dispositivos convertidores de energía por gradiente térmico considerados en este estudio funcionan a partir de 100 MW, se concluye que la costa del estado de Michoacán es viable para el desarrollo de proyectos de este tipo de energía, sobre todo a una distancia considerable desde la costa.



Se analizaron 6 ríos que desembocan en la costa del estado de Michoacán, para determinar la potencia media por gradiente salino, durante el periodo 2008-2018. Los resultados sugieren una potencia teórica de hasta 41.3 MW, en el río Coahuayana y 31.4 MW en el río Coalcomán, siendo estos dos los ríos con valores más altos. Sin embargo, esta potencia no es la que en realidad se puede utilizar debido a restricciones como el factor de extracción y un factor de capacidad que, al utilizar los valores dados por un estudio para los ríos a nivel global, la potencia práctica resultó de 6.9 MW para el río Coahuayana y 5.3 MW para el río Coalcomán. Estos potenciales son considerables para el desarrollo de un proyecto de dispositivos convertidores de energía por gradiente salino en las desembocaduras de estos ríos; no obstante, estudios técnicos y prácticos en las áreas de interés aún son requeridos para determinar la viabilidad de extracción de energía de gradiente salino en las desembocaduras de los ríos analizados.

Aunque los resultados de este proyecto son basados en modelaciones, datos e instituciones veraces, no deja de ser un estudio teórico por lo que, para ser llevado a la práctica, este estudio tiene que completarse con varias líneas faltantes; como considerar que además de obtener los potenciales teóricos que se pueden aprovechar por cualquiera de las tecnologías, será necesario estudiar la correlación de la energía con la capacidad de generación de los dispositivos. Estudiar a detalle la geomorfología de la zona donde se desplegará el proyecto. Hacer modelaciones de oleaje, para obtener matrices de potencia y proponer dispositivos. Presupuestar la implementación de los dispositivos en las zonas seleccionadas. Con base en los resultados se concluye que la energía oceánica puede ser una fuente alternativa de generación de energía eléctrica en las regiones en desarrollo; sin embargo, deben analizarse las limitaciones ambientales y socioeconómicas, especialmente en estos lugares, para determinar la viabilidad de desplegar proyectos en lugares potenciales. Considerar la evaluación multicriterio es de suma importancia debido a que ayuda a delimitar zonas prospectas y zonas afectadas para el despliegue de cualquier tipo de proyecto, es relevante mencionar que este tipo de evaluaciones se pueden llevar a cualquier campo de la ingeniería donde se requiera conocer la viabilidad de un proyecto ya que, al arrojar resultados cuantitativos del espacio utilizable, presenta una importante veracidad para la ejecución de los proyectos.



8 BIBLIOGRAFÍA

- Aboobacker, V. M., Shanas, P. R., Alsaafani, M. A., & Albarakati, A. M. A. (2017). Wave energy resource assessment for Red Sea. *Renewable Energy*, *114*, 46–58. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.09.073>
- Alonso, R., Jackson, M., Santoro, P., Fossati, M., Solari, S., & Teixeira, L. (2017). Wave and tidal energy resource assessment in Uruguayan shelf seas. *Renewable Energy*, *114*, 18–31. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.03.074>
- Alvarez-Silva, O. A., Osorio, A. F., & Winter, C. (2016). Practical global salinity gradient energy potential. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *60*, 1387–1395. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.03.021>
- API Manzanillo, A. P. I. de M. S. A. de. C. V. (2019). Ubicación y Zona de Influencia del Puerto de Manzanillo. Retrieved from <https://www.puertomanzanillo.com.mx/esps/0020202/ubicacion-y-zona-de-influencia>
- Bahaj, A. S. (2011). Generating electricity from the oceans. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *15*(7), 3399–3416. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.04.032>
- Bernardino, M., Rusu, L., & Guedes Soares, C. (2017). Evaluation of the wave energy resources in the Cape Verde Islands. *Renewable Energy*, *101*, 316–326. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.08.040>
- Bleck, R. (2002). An oceanic general circulation model framed in hybrid isopycnic-Cartesian coordinates. *Ocean Modelling*, *4*(1), 55–88. [https://doi.org/10.1016/S1463-5003\(01\)00012-9](https://doi.org/10.1016/S1463-5003(01)00012-9)
- Board, O. S. (2013). *An Evaluation of the U.S. Department of Energy's Marine and Hydrokinetic Resource Assessments*. National Research Council, & Marine and Hydrokinetic Energy Technology. <https://doi.org/10.17226/18278>
- CENAPRED. (1988). Comisión Nacional de Prevención de Desastres. Retrieved from <https://www.gob.mx/cenapred/que-hacemos>
- Chassignet, E. P., & Verron, J. (2006). *Ocean Weather Forecasting*. Springer.
- Chawla, A., Spindler, D. M., & Tolman, H. L. (2013). Validation of a thirty year wave hindcast using the Climate Forecast System Reanalysis winds. *Ocean Modelling*, *70*, 189–206. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2012.07.005>
- Cifuentes Lemus, J. L. (1979). El Océano y sus recursos. Retrieved from http://cataleg.uab.cat/record=b1987569~S1*cat
- CONAGUA. (2009). *Programa Hídrico Visión 2030 del Estado de Jalisco. Serie planeación hidráulica en México*.
- CONAGUA. (2014). *Atlas de Agua en México 2014*. Retrieved from http://www.conagua.gob.mx/archivohistoricodelagua13/NotaP/Atlas_del_Agua_Mexico_2014.pdf
- CONAMP. (2016). Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. Retrieved from



<https://www.conanp.gob.mx/regionales/>

- CONAPESCA. (2001). Comisión Nacional de Acuacultura y Pesca. Retrieved from <https://www.gob.mx/conapesca/que-hacemos>
- CONBABIO. (1992). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Retrieved from <https://www.gob.mx/conabio/que-hacemos>
- Cruz, J. (2008). *Ocean Wave Energy: Current status and future perspectives, Green Energy and Technology*.
- De Juana, J. M., Santos, F., Crespo, A., Herrero, M. Á., De Francisco, A., & Fernandez, J. (2003). *Energías Renovables para el Desarrollo* (2003rd ed.). España: International Thomson Ediciones Spain.
- Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Healy, S. B., Balmaseda, M. A., ... Morcrette, J.-J. (2011). The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137(656), 553–597. <https://doi.org/10.1002/qj.828>
- DOE, U. D. of E. (2015). Quadrennial Technology Review 2015, Chapter 4: Advancing Clean Electric Power Technologies, Technology Assessments., (September).
- DOF. (2016a). ACUERDO por el que se actualiza la disponibilidad media anual de las aguas superficiales nacionales de las 731 cuencas hidrológicas que comprenden las 37 regiones hidrológicas en que se encuentra dividido los Estados Unidos Mexicanos. *Diario Oficial de La Federación*.
- DOF. (2016b). DECRETO por el que se declara Área Natural Protegida, con el carácter de reserva de la biosfera, la región conocida como Pacífico Mexicano Profundo. *Diario Oficial de La Federación*. Retrieved from http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5464452&fecha=07/12/2016&print=true
- Duerr, A. E S, & Dhanak, M. R. (2010). Hydrokinetic power resource assessment of the Florida current. *MTS/IEEE Seattle, OCEANS 2010*, 1–7. <https://doi.org/10.1109/OCEANS.2010.5664377>
- Duerr, Alana E S, & Dhanak, M. R. (2012). An assessment of the hydrokinetic energy resource of the Florida current. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 37(2), 281–293. <https://doi.org/10.1109/JOE.2012.2186347>
- Eastman, J. R. (2005). Multi-criteria Evaluation and GIS. *Geographical Information Systems: Principles, Techniques, Applications and Management*, 493–502. <https://doi.org/10.1080/095008396180344>
- El Informador. (2018, May 5). Las comunidades indígenas frente a los problemas sociales. Retrieved from <https://www.informador.mx/mexico/Las-comunidades-indigenas-frente-a-los-problemas-sociales--20180505-0021.html>
- Emdadi, A., Gikas, P., Farazaki, M., & Emami, Y. (2016). Salinity gradient energy potential at the hyper saline Urmia Lake - ZarrinehRud River system in Iran. *Renewable Energy*, 86, 154–162. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.08.015>
- Flocard, F., Ierodionou, D., & Coghlan, I. R. (2016). Multi-criteria evaluation of wave energy projects



- on the south-east Australian coast. *Renewable Energy*, 99(2016), 80–94. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.06.036>
- García-Huante, A., Mendoza, E., Vega, L., Rodríguez Cueto, Y., & Silva, R. (2018). Determination of the Potential Thermal Gradient for the Mexican Pacific Ocean. *Journal of Marine Science and Engineering*, 6(1), 20. <https://doi.org/10.3390/jmse6010020>
- González-Ramírez, X., Hernández-Robles, I. A., & Barrios-Piña, H. (2017). Potencial energético undimotriz en nodos costeros de México Parte 1: Estimación energética. *Tecnología y Ciencias Del Agua*. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-06-01>
- Guy, R., Feinberg, B., & Hoek, E. (2011). Membrane-based production of salinity-gradient power. *Energy and Environmental Science*, 4(11), 4423–4434. <https://doi.org/10.1039/c1ee01913a>
- Haces-Fernandez, F., Li, H., & Ramirez, D. (2018). Wave energy characterization and assessment in the U.S. Gulf of Mexico, East and West Coasts with Energy Event concept. *Renewable Energy*, 123, 312–322. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.02.047>
- Hernández-Fontes, J. V., Felix, A., Mendoza, E., Cueto, Y. R., & Silva, R. (2019). On the Marine Energy Resources of Mexico. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(6), 191. <https://doi.org/10.3390/jmse7060191>
- ICAPO. (2014). Iniciativa Carey del Pacífico Oriental. Retrieved from <http://www.hawksbill.org/es/loque-hacemos/map/maruata-y-colola-mexico-spa/>
- INEGI. (2010). México en cifras. Retrieved from <http://www.beta.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/default.aspx>
- INEGI. (2013). Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM 3.0). Retrieved from <http://www.beta.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>
- INEGI. (2015). Encuesta Intercensal 2015 (archivo de datos). Retrieved from <https://www.inegi.org.mx/programas/intercensal/2015/>
- INEL. (2016). Inventario Nacional de Energías Limpias.
- INPI. (2018). Instituto Nacional de los Pueblos Indígenas. Retrieved from <http://atlas.cdi.gob.mx/>
- Kabir, A., Lemongo-Tchamba, I., & Fernandez, A. (2015). An assessment of available ocean current hydrokinetic energy near the North Carolina shore. *Renewable Energy*, 80, 301–307. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.02.011>
- Kim, A. S., Kim, H. J., Lee, H. S., & Cha, S. (2016). Dual-use open cycle ocean thermal energy conversion (OC-OTEC) using multiple condensers for adjustable power generation and seawater desalination. *Renewable Energy*, 85, 344–358. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.06.014>
- Kim, G., Park, J.-S., Soh, J.-G., Lee, K. S., Kang, S. K., Kim, H., ... Lee, M. E. (2012). An overview of ocean renewable energy resources in Korea. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(4), 2278–2288. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.040>
- Komporn, W., Ekkawatpanit, C., & Kositgittiwong, D. (2018). Assessment of ocean wave energy resource potential in Thailand. *Ocean and Coastal Management*, 160(March), 64–74. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2018.04.003>



- Laws, N. D., & Epps, B. P. (2016). Hydrokinetic energy conversion: Technology, research, and outlook. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 1245–1259. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.189>
- Leaman, K. D., Molinari, R. L., & Vertes, P. S. (1987). Structure and Variability of the Florida Current at 27°N: April 1982–July 1984. *Journal of Physical Oceanography*. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1987\)017<0565:savotf>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1987)017<0565:savotf>2.0.co;2)
- Lehmann, M., Karimpour, F., Goudey, C. A., Jacobson, P. T., & Alam, M. R. (2017). Ocean wave energy in the United States: Current status and future perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74(March), 1300–1313. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.101>
- MacDonald, J. (2016). Clean Energy Defies Fossil Fuel Price Crash To Attract Record \$329Bn Global Investment in 2015, 2015–2018. Retrieved from <http://about.bnef.com/press-releases/clean-energy-defies-fossil-fuel-price-crash-to-attract-record-329bn-global-investment-in-2015/>
- Marín, G. (2007). Pesca artesanal, comunidad y administración de recursos pesqueros. Experiencias en la costa de Michoacán, México. *Gazeta de Antropología*, 23(20), 1–16.
- Melikoglu, M. (2018). Current status and future of ocean energy sources: A global review. *Ocean Engineering*, 148(December 2017), 563–573. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.11.045>
- Meyer, I., & Van Niekerk, J. L. (2016). Towards a practical resource assessment of the extractable energy in the Agulhas ocean current. *International Journal of Marine Energy*, 16, 116–132. <https://doi.org/10.1016/j.ijome.2016.05.010>
- Murrant, D., & Radcliffe, J. (2018). Assessing energy storage technology options using a multi-criteria decision analysis-based framework. *Applied Energy*, 231(June), 788–802. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.170>
- Nihous, G. C. (2007). A Preliminary Assessment of Ocean Thermal Energy Conversion Resources. *Journal of Energy Resources Technology*, 129(1), 10. <https://doi.org/10.1115/1.2424965>
- Osorio, A. F., Arias-Gaviria, J., Devis-Morales, A., Acevedo, D., Velasquez, H. I., & Rango-Aramburo, S. (2016). Beyond electricity: The potential of ocean thermal energy and ocean technology ecoparks in small tropical islands. *Energy Policy*, 98, 713–724. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.05.008>
- Ramírez-Rodríguez, M., López-Ferreira, C., & Hernández-Herrera, A. (2006). Atlas de localidades Pesqueras de México. *Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas Del Instituto Nacional de Pesca*.
- RAMSAR. (2004). Playón Mexiquillo. Retrieved from <https://rsis.ramsar.org/es/ris/1350?language=es>
- Reistad, M., Breivik, Ø., Haakenstad, H., Aarnes, O. J., Furevik, B. R., & Bidlot, J. R. (2011). A high-resolution hindcast of wind and waves for the North Sea, the Norwegian Sea, and the Barents Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 116(5), 1–18. <https://doi.org/10.1029/2010JC006402>
- REVE. (2016). Inversión de energías renovables en México. Retrieved from <http://www.evwind.com/2016/01/23/inversion-de-energias-renovables-en-mexico/>
- Salter, S. H. (1974). Wave power. *Nature*, 249(1), 720–724. <https://doi.org/10.1088/0305-4624/111/1/407>
- SCT, S. de C. y T. (2012). Administración Portuaria Integral de Lázaro Cárdenas. Retrieved from



<https://www.puertolazarocardenas.com.mx/plc25/nosotros-somos>

- SEMAR. (2019). *Catálogo de Cartas y Publicaciones Náuticas 2019* (Secretaría). Dirección General de Investigación y Desarrollo. Retrieved from <https://digaohm.semar.gob.mx/hidrografia/imageneshidrografia/catalogo2019.pdf>
- SEMARNAT. (2014). Costas de México | Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Retrieved from <http://www.semarnat.gob.mx/temas/gestion-ambiental/zona-federal/costas-de-mexico>
- SENER. (2012). *Prospectiva de Energías Renovables 2012-2026* (Secretaría). México, D.F. Retrieved from https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/62954/Prospectiva_de_Energias_Renovables_2012-2026.pdf
- SENER. (2015). Prospectiva del sector eléctrico. *Diario Oficial de La Federación*, 1, 127. Retrieved from https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/44328/Prospectiva_del_Sector_Electrico.pdf
- Stopa, J. E., Cheung, K. F., & Chen, Y. L. (2011). Assessment of wave energy resources in Hawaii. *Renewable Energy*, 36(2), 554–567. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.07.014>
- Syamsuddin, M. L., Attamimi, A., Nugraha, A. P., Gibran, S., Afifah, A. Q., & Oriana, N. (2015). OTEC Potential in the Indonesian Seas. *Energy Procedia*, 65, 215–222. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.01.028>
- Tennant, D. L. (1976). Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources. *Fisheries*, 1(4), 6–10.
- Tolman, H. L. (2009). User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 3.14. NOAA / NWS / NCEP / MMAB . *Technical Note 276*, (276), 194. Retrieved from ftp://ftp.ifremer.fr/ifremer/cersat/products/gridded/wavewatch3/HINDCAST/publications/Tolman_et_al_MMAB276_2009.pdf%0Apapers3://publication/uuid/E1C39B58-DBCB-4F8A-ADCD-F2D2210DDC46
- Uehara, H., Dilao, C. O., & Nakaoka, T. (1988). Conceptual design of ocean thermal energy conversion (OTEC) power plants in the Philippines. *Solar Energy*, 41(5), 431–441. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(88\)90017-5](https://doi.org/10.1016/0038-092X(88)90017-5)
- VanZwieten, J. H., Rauchenstein, L. T., & Lee, L. (2017). An assessment of Florida's ocean thermal energy conversion (OTEC) resource. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75(November 2016), 683–691. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.043>
- Varlas, G., Christakos, K., Cheliotis, I., Papadopoulos, A., & Steeneveld, G. J. (2017). Spatiotemporal variability of marine renewable energy resources in Norway. *Energy Procedia*, 125, 180–189. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.08.171>
- Voogd, J. H. (1982). Multicriteria Evaluation for Urban and Regional planning, (1982), 125. <https://doi.org/10.6100/IR102252>
- Wood, R. J. K., Bahaj, A. S., Turnock, S. R., Wang, L., & Evans, M. (2010). Tribological design constraints of marine renewable energy systems. *Philosophical Transactions of the Royal Society*



A: *Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 368(1929), 4807–4827.
<https://doi.org/10.1098/rsta.2010.0192>

Yang, X., Haas, K. A., & Fritz, H. M. (2013). Theoretical Assessment of Ocean Current Energy Potential for the Gulf Stream System. *Marine Technology Society Journal*, 47(4), 101–112.
<https://doi.org/10.4031/mts.47.4.3>

Yang, X., Haas, K. A., Fritz, H. M., French, S. P., Shi, X., Neary, V. S., & Gunawan, B. (2015). National geodatabase of ocean current power resource in USA. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, 496–507. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.007>