



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

DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DEL OCÉANO PACÍFICO  
MEXICANO: GRADIENTE TÉRMICO

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
DOCTOR EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
M.C. ALEJANDRO GARCÍA HUANTE

TUTOR PRINCIPAL  
DR. RODOLFO SILVA CASARÍN, INSTITUTO DE INGENIERÍA

COMITÉ TUTOR  
DR. CARLOS A. ESCALANTE SANDOVAL, FACULTAD DE INGENIERÍA  
DRA. LILIA REYES CHÁVEZ, FACULTAD DE INGENIERÍA  
DR. EDGAR GERARDO MENDOZA BALDWIN, INSTITUTO DE INGENIERÍA  
DR. EFRAÍN MATEOS FARFÁN, INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL  
AGUA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX., (ENERO) 2021



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: DR. CARLOS A. ESCALANTE SANDOVAL  
Secretario: DRA. LILIA REYES CHÁVEZ  
1er. Vocal: DR. RODOLFO SILVA CASARÍN  
2do. Vocal: DR. EDGAR GERARDO MENDOZA BALDWIN  
3er. Vocal: DR. EFRAÍN MATEOS FARFÁN

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

**TUTOR DE TESIS: DR. RODOLFO SILVA CASARÍN**

M. C. ALEJANDRO GARCÍA HUANTE



-----  
**FIRMA**



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
PROGRAMA DE DOCTORADO EN INGENIERÍA CIVIL  
(HIDRÁULICA)**

**DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DEL OCEÁNO  
PACÍFICO MEXICANO: GRADIENTE TÉRMICO**

**T E S I S**

que, para obtener el grado académico de

Doctor en Ingeniería Civil

p r e s e n t a

M. en C. ALEJANDRO GARCÍA HUANTE

Director de tesis: Dr. Rodolfo Silva Casarín

Comité tutorial: Dr. Edgar Gerardo Baldwin Mendoza  
Dr. Carlos Escalante Sandoval  
Dr. Efraín Mateos Farfán  
Dra. Lilia Reyes Chávez

Ciudad Universitaria, CDMX., a 13 de enero de 2021

# AGRADECIMIENTOS

## INSTITUCIONALES

A la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) por haberme brindado la oportunidad de superarme académica y profesionalmente. Por haber sido mi “alma mater” desde la universidad hasta la actualidad y por todas las facilidades para con mi tesis doctoral. Orgullo azul y oro por siempre.

Al Posgrado en Ingeniería (PI), al Instituto de Ingeniería (IINGEN) y a la Facultad de Ingeniería de la UNAM por el apoyo recibido para lograr doctorarme en Ingeniería Civil, por las facilidades para la visita técnica a la planta OTEC de Okinawa, Japón y para las participaciones en los simposios OTEC VI y VII, además del apoyo para pertenecer al grupo de participantes del CEMIE-O.

Al Instituto de Ciencias del Mar y Limnología (ICMyL) de la UNAM por el apoyo administrativo para formar parte del grupo de autores del Atlas Nacional de Gradiente Térmico, tanto en su versión impresa como digital, para formar parte de la tripulación del Crucero Oceanográfico de febrero del 2021 en el Buque Oceanográfico “El Puma” y por el apoyo como honorista dentro del CEMIE-O.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Técnica (CONACyT) por haberme otorgado la beca de estudio para el doctorado.

Al Centro Mexicano de Innovación en Energía Oceánica (CEMIE-O) por considerarme dentro del grupo de investigación en la línea estratégica de obtención de energía por gradiente térmico hasta el día de hoy, por los cursos-talleres, los ciclos de exposición, por el apoyo económico post-beca, la coautoría en el libro sobre el Estado del Arte de OTEC, los artículos publicados en la gaceta de difusión y para la participación en el VIII Simposio OTEC a realizarse en México.

A la Universidad de Graduados del Instituto de Ciencia y Tecnología de Okinawa (OIST) por las facilidades brindadas para la presentación oral del tema “Potencia eléctrica por medio de OTEC en el Océano Pacífico mexicano” en el VI Simposio OTEC 2018 y para la realización de la visita guiada a la planta OTEC de la isla Kumejima.

Al Instituto de Investigación Oceánica e Ingeniería de Embarcaciones de Corea del Sur (KRISO) por las facilidades brindadas para mi participación en el VII Simposio OTEC 2019 como parte de los expositores en modo poster.

A la Universidad Autónoma de Baja California Sur (UABCS) por las facilidades para la conferencia magistral “Sistemas OTEC” que tuve la oportunidad de presentar en el Departamento de Energías Renovables en el campus de La Paz.

Al Colegio de Chihuahua (COLECH) de Ciudad Juárez por las facilidades y el apoyo brindado para la exposición del tema “Determinación teórica de la emisión de CO<sub>2</sub> de una planta OTEC en la zona de Puerto Ángel, Oaxaca, México” durante el 2º. Congreso Internacional de Medio Ambiente y Sociedad (CIMAS) 2016, así como para su publicación en el libro del Congreso.

Al Journal of Marine Science and Engineering (JMSE) de la editorial Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), con sede en Suiza, por la oportunidad de publicar mi artículo científico para conseguir mi graduación como doctor en Ingeniería Civil en el 2018.

A la empresa IntechOpen Access, con sede en Inglaterra, por las facilidades para la publicación del capítulo “General criteria for optimal site selection for the installation of Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) plants in the Mexican Pacific” en el 2019 y para pertenecer a su grupo de autores.

## ACADÉMICOS

A los integrantes del Comité Doctoral por sus valiosas y acertadas aportaciones, consejos, sugerencias y comentarios que, en conjunto, hicieron el que el trabajo de investigación tomara el camino adecuado y pudiera concluir de excelente manera.

Al Dr. Rodolfo Silva Casarín (Instituto de Ingeniería, UNAM) por su apoyo y asesoramiento en los aspectos de Ingeniería Hidráulica y Energías Renovables, así como por sus sugerencias y comentarios para el mejor desarrollo de este trabajo. También agradecerle mi inclusión en el megaproyecto nacional del Centro Mexicano de Innovación en Energía Oceánica (CEMIE-O) lo que ha permitido un mayor conocimiento e investigación, así como el desarrollo tecnológico y de metodologías en la línea estratégica de Gradiente Térmico con el fin de implementar la misma en nuestro país. Agradecerle también por los apoyos económicos tanto del Sistema de Control de Estudiantes del Instituto de Ingeniería (SICOE) como por parte del CEMIE-O, lo que me ha permitido un mejor desarrollo personal y profesional, por su apoyo y participación en la publicación del artículo científico, por su confianza para formar parte de los coautores del libro del estado del arte del sistema OTEC, por su apoyo para la participación en el VI Symposium OTEC y la visita guiada a la planta de la isla Kumejima, Japón y por su apoyo incondicional para diversas actividades dentro del CEMIE-O. Mi agradecimiento total y eterno para un gran investigador y ser humano.

Al Dr. Edgar Gerardo Mendoza Baldwin por las sugerencias y las pláticas acerca del tema de tesis, por el apoyo para la publicación del artículo y para mi inclusión en el CEMIE-O y en el SICOE. También por las pláticas acerca de los temas de medio ambiente y la repercusión de las energías renovables en estos.

Al Dr. Carlos A. Escalante Sandoval por los comentarios a la tesis, el interés por conocer del tema y por el apoyo en los trámites administrativos para el examen de grado.

Al Dr. Efraín Mateos Farfán por los comentarios y sugerencias a la tesis, sin duda muy valiosas para concluir la misma.

A la Dra. Lilia Reyes Chávez por el apoyo y aceptación para formar parte del Comité Doctoral, por las revisiones oportunas a la tesis y por las facilidades para concluir los trámites administrativos para el examen de grado.

Al Dr. Miguel Ángel Alatorre Mendieta, sin duda alguna, el mejor investigador con el que he trabajado desde el 2010, el que me impulsó a estudiar el tema OTEC y el que me impulsó a ser mejor profesional y persona. Un segundo padre para mí, un excelente colega,

pero mejor como amigo y ser humano. Nunca podré expresarle de manera correcta mi agradecimiento por todo su apoyo en diez años de conocerlo y trabajar con él.

A la Dra. Estela Cerezo Acevedo, por su apoyo para participar de manera activa en el prototipo OTEC 1 que se maquila en las instalaciones de la UniCaribe, por tomarme en cuenta para los detalles y trabajos previos a la inauguración del VIII Symposium OTEC México 2021 y por su confianza para desarrollar diferentes actividades de gestión.

Al Dr. Raúl Martell Dubois, por su apoyo y sugerencias para el trabajo durante mi examen de candidatura en 2018 y por su interés incondicional para con mi crecimiento personal y profesional. Junto a su hijo Raúl Martell se ha forjado una valiosa amistad que espero siga creciendo hasta el final de nuestros días.

Al Dr. Ismael Mariño Tapia por su contribución a la tesis durante mi examen de candidatura en 2018, muchas gracias por su interés en conocer más el tema OTEC y por ayudarme a entender algunos conceptos en la parte de medio ambiente.

Al Dr. Sergio Cerdeira por permitírnos colaborar con la CONABIO en la parte del acceso de datos para la plataforma SIMAR y para trabajar con el en el desarrollo de la base de datos OTECMX.

Al Dr. Luis A. Vega, su apoyo valioso para entender la operación de la planta OTEC, el concepto de gradiente térmico y la variación del mismo para obtención de la potencia eléctrica mejoraron sustancialmente la tesis. Por su contribución y revisión del artículo científico, su colaboración para participar en el curso-taller OTEC en la Torre de Ingeniería del 2017 y por sus consejos y sugerencias desde el 2013 a la fecha.

Al Dr. Gérard Nihous por su apoyo incondicional para entender y comprender el concepto de potencia eléctrica neta, el análisis y cálculo por medio de su fórmula matemática y por sus consejos y sugerencias para mejorar la tesis. Siempre pendiente para cualquier duda que se presentara durante el proceso de trabajo, aportando ideas refrescantes para los objetivos.

Al Dr. Yasuyuki Ikegami por el apoyo recibido para participar en el curso-taller OTEC en la Ciudad de México en 2017 y por la invitación a participar en el VI Symposium OTEC 2018 en Okinawa, Japón y conocer la planta en la isla Kumejima. ¡Dōmo arigatō!

Al Dr. Hyeon Ju Kim por todo su apoyo desde que lo conocí en agosto de 2014 para poder conocer la planta OTEC de Goseong, por compartir sus conocimientos sobre el concepto de gradiente térmico, por colaborar y aceptar la invitación para el curso-taller OTEC en 2017, por sus preguntas y sus sugerencias durante estos 6 años, por estar siempre al tanto del desarrollo e investigación de OTEC en México, por la invitación a participar en el VII Symposium OTEC 2017 en Busan y por ser un gran colega y amigo. ¡Gansa hamnida!

Al Dr. Edgar Ocampo Téllez por su apoyo logístico para entender y comprender todo acerca de las energías renovables, por ser lo más realista y honesto en el tema acerca de los problemas que se pueden tener con una mala aplicación de las mismas y por confirmar el valor que tiene el hecho de realizar un buen trabajo sin caer en datos erróneos que quieran confundir al público en general.

A la Dra. Leonor Patricia Güereca Hernández por su colaboración en la línea de gradiente térmico del CEMIE-O y la de todo su grupo de trabajo para los análisis de ciclo de vida de la tecnología OTEC, por la invitación a ser conferencista y moderador del Congreso AMICA de 2019 en la Ciudad de México, por el apoyo durante el Congreso PAMEC 2020 en Costa Rica y por el apoyo constante para entender más el concepto de ACV.

A la Dra. María Guadalupe Paredes Figueroa por su colaboración y apoyo para trabajar conceptos de ACV en la línea OTEC del CEMIE-O. Esperamos seguir colaborando para futuros proyectos.

Al Dr. Oscar Reséndiz Pacheco por su apoyo y confianza para dar mi primera Conferencia Magistral en el 2019 sobre los sistemas OTEC en la Semana de las Energías Renovables realizada en el Departamento de Energías Renovables de la Universidad Autónoma de Baja California Sur (UABCS), por ser parte del grupo OTEC en el CEMIE-O contribuyendo con sus ideas y sus sugerencias y por permitirme ser parte de los directores de tesis para alumnos de licenciatura y posgrado en dicha institución.

Al Dr. Marco Ulloa por permitirme publicar el artículo de divulgación en la revista Agua&Ambiente en octubre del 2020 y dar un paso en mi formación profesional.

A la Dra. Esmeralda Cervantes Rendón por su apoyo logístico y excelente trato durante el 2º. Congreso de Medio Ambiente y Sociedad realizado en Ciudad Juárez, Chihuahua en 2016 y por las facilidades para la publicación del capítulo de libro de dicho evento.

Al Dr. Bruce Cameron y al Dr. Rodrigo Rojas Morales por las facilidades y el apoyo para participar en la I Conferencia Panamericana de Energías Marinas, realizada en enero del 2020 en San José, Costa Rica así como por las recomendaciones para la publicación del resumen en extenso de mi ponencia en el libro PAMEC.

Al M. I. Sergio Zamorano por su apoyo y colaboración con la línea OTEC desde el grupo de ACV. Un gran compañero y colega.

Al Dr. Yandy Rodríguez Cueto, por permitirme ser parte de su vida académica y personal, por su contribución, apoyo incondicional y por sus siempre atinados comentarios, dudas y sugerencias para con el trabajo. Pero, sobre todo, por ser un excelente ser humano y mejor amigo lo que nos ha permitido seguir trabajando juntos hasta la fecha. ¡¡¡¡De Cuba para el mundo, compadre!!!!

A la M. C. Erika Paola Garduño Ruíz, como siempre lo mencioné: mi fiel escudera durante el desarrollo de la tesis, por sus contribuciones, por sus ganas y deseos de trascender en este tema, por aceptar trabajar con nosotros, por ser una gran amiga, compañera y colega, además de formar parte activa del CEMIE-O como tesorera del Comité Estudiantil y darme la oportunidad desde esa trinchera para ayudar al grupo y seguir creciendo como profesional.

Al M. C. Ricardo Efraín Hernández Contreras, compañero desde la licenciatura en la Facultad de Ciencias en el 2005, compañero de trabajo durante el posgrado en el Instituto de Ciencias del Mar y Limnología desde el 2010 hasta la fecha y compañero y amigo desde hace ya más de 15 años. Gracias por las contribuciones para la tesis con la colocación de los termistores en Marina Cruz de Huanacastle, por tus anécdotas graciosas,

por las discusiones que hemos tenido, por ser parte del grupo OTEC y por ser un gran ser humano, siempre dispuesto a darlo todo por sus seres queridos. Lo mejor para ti siempre mi buen amigo.

Al M. C. Víctor Luna Gómez, compañero capaz y brillante, un gran amigo y excelente colega. Por formar parte de este grupo desde 2014 y por sus contribuciones para muchas de las ideas que se han realizado en el Laboratorio de Energía Oceánica en donde nos hemos formado en las cuestiones de las energías marinas. Muchas gracias por el apoyo y por la confianza de poder trabajar juntos.

Al M. Fil. Armando Alonso Pérez Pérez, por su labor invaluable de colocar el conocimiento y el análisis de los aspectos sociales en los proyectos de energía renovable, por su contribución en la tesis colocando los termistores en Marina Cruz de Huanacastle, por sus exposiciones durante los talleres sobre la importancia del análisis socioeconómico en los proyectos de energía renovable y por su sincera amistad.

A la Biol. Graciela Rivera Camacho por su contribución en la parte de medio ambiente y social para el grupo OTEC y por su colaboración para el resumen publicado en las memorias del Congreso PAMEC 2020.

A las M. C. Yudysleivis Ventura Díaz y Karla López por su contribución a la tesis con el análisis estadístico de clúster para la matriz de decisión que nos permitió determinar los sitios de interés para la implementación de OTEC en el Océano Pacífico Mexicano. Comadre, muchas gracias por ser parte de mi vida profesional y personal.

A la M. I. Marisela Bernal Francisco por su apoyo y comentarios para el mejoramiento de la tesis en el aspecto del desarrollo económico, así como por ser parte fundamental del grupo OTEC en sus inicios y colaborar con nosotros durante su estancia en el Instituto de Ingeniería.

Al M. C. Juan Francisco Bárcenas Graniel por ser un gran colega, compañero y amigo. Por su contribución y colaboración en diferentes publicaciones, por ayudarme a seguir creciendo como profesional y por siempre estar al pendiente de nuestro desarrollo como estudiantes. ¡A seguir colaborando juntos!

A la M. C. María Cauich y al Dr. Harry Álvarez por la confianza de apoyarlos durante dos semestres en el curso de Instrumentación en la Oceanografía Física en 2016 y 2018 en la Facultad de Ciencias de la UNAM. Seguimos adelante esperando volver a colaborar en el futuro.

## PERSONALES

A mis padres, Fis. Mat. Marcos García Trujillo y M. C. Yolanda Huante González. Ha sido un honor, placer y privilegio ser su hijo. De ustedes aprendí mucho, fueron parte motriz y central de mi crecimiento personal y profesional. Por siempre estar al pendiente de mis hermanas y de mí, por su lucha incansable para sacarnos adelante y por siempre estar conmigo en las buenas y en las malas. Por siempre ser amigos incondicionales, por apoyarme en los momentos amargos, por las discusiones que permitieron una autorreflexión para tomar decisiones y mejorar como ser humano, por sus contribuciones para ser mejor persona y mejor profesional, por darme principios y valores que me han permitido salir adelante, por los errores cometidos durante este camino que me hicieron

aprender, por su cariño, amor y comprensión en momentos clave de mi vida y sobre todo, por su infinita paciencia ante mis locuras y no abandonarme. ¡¡¡¡Los amo con todo mi corazón!!!!

A mis hermanas, M. I. A. Lissette García Huante y Dra. Yolanda Guadalupe García Huante por ser en su momento parte crucial de mi vida. Sigán adelante y den siempre lo mejor de ustedes en cada proyecto que realicen.

A mi esposa, M. C. Amelia López Herrera. 2005 el año en que nos conocimos, 2006 el año en que compartimos clase en la Facultad de Ciencias, 2008 en la que forjamos una gran amistad, 2015 en la que nos comprometimos, 2016 en la que nos casamos por el civil y 2017 en la que nos casamos por la iglesia y tuvimos a nuestra hija. Gracias por tu amor, por tu comprensión, por tu cariño, por ser mi compañera de vida, por tu interés en mi trabajo, en mis ideales, por tu confianza para contarme todo lo que te pasa, por siempre estar al pendiente de nosotros, por ser el pilar de nuestra pequeña familia, por estar aquí en las buenas y malas, por ser como eres, por involucrarme en tus proyectos y, sobre todo, por ser una gran mujer que desde hace ya cinco años camina a mi lado, sorteando todo tipo de obstáculos y festejando nuestros triunfos. Mi cielo en la Tierra, mi morenita linda... ¡por siempre y para siempre en mi corazón! ¡Te amo!

A mi hija, Sara Amélie. La culpable de muchos desvelos, de muchos cuidados, de mucho amor volcado hacia ella, mi primogénita; la que me anima a seguir siendo un mejor padre, pero sobre todo un mejor amigo, la que con sus travesuras y su forma de ser me alegra todos los días, la que me ayuda a ser más tolerante y más dedicado. Sus abrazos y besos llenos de ternura y cariño que me permiten seguir adelante. Gracias “zarigüeyita” por formar parte de mi vida, ¡te amo mi pequeñita!

A los demás miembros de la familia García Huante por su apoyo, consejos y compañía, esto forma parte de nuestros logros. En especial, muchas gracias a mi tío Jorge Luis Huante González y a mis abuelos Altagracia González, Juan Huante Huante y Adolfo García Pérez que siempre me procuraron desde niño. Hasta el cielo mi reconocimiento y mi cariño. Los extraño mucho, pero nos veremos en su momento para seguir platicando, riendo y jugando como antes. Descansen en paz.

A la familia López Herrera, mis cuñado(a)s y hermano(a)s Agustín, Bernardo, Yazmín, Lizbeth y Edalid. A Odalia, Alejandra, Alejandro y Miguel. Gracias por sus consejos, por permitirme ser parte de su grupo familiar, por su apoyo incondicional y por los momentos felices que hemos tenido desde hace ya cinco años. Gracias por ser siempre una inspiración para mi esposa y por ser una familia cuyo lazo es fuerte y resistente. Siempre a la orden cuando lo necesiten, los quiero mucho. Y especialmente, a mis suegros Agustín López Rodríguez y Dalila Herrera Estrada, este logro también es para ustedes. Suegrita, con mi respeto, cariño y agradecimiento por toda la eternidad. Se nos adelantó cuando nuestro lazo se estaba fortaleciendo al máximo, pero siempre recordaré con mucho cariño las pláticas y las anécdotas que me contó y por ser parte fundamental para mi relación con mi esposa. Gracias por esos valores inquebrantables que me ayudaron a mejorar como persona y para mejorar mi matrimonio y por, sobre todo, por haberme abierto las puertas de su casa y contar con su apoyo en los momentos de más apremio. ¡Por siempre en mi memoria!

A todos mis profesores que tuve el honor de conocer y de aprenderles mucho. Gracias por todos los consejos, conocimientos, respaldo y regaños.

A mis socios y amigos, M. C. Yuriria Castañeda Sánchez y M. C. Jorge Rosales Vásquez por su apoyo durante este tiempo para conocer del tema y sugerir ideas para mejorar y contribuir al trabajo. Un fuerte abrazo a ambos y que COSTERRA CONSULTORES S.C. siga cosechando éxitos.

Al Fis. Ebanibaldo Sánchez Zúñiga y al Biol. Josué Daniel Cortés Solano por ser compañeros y colegas durante nuestra estancia en el laboratorio de Energía Oceánica. Por siempre recordados.

A mis mejores amigos: Juan Alberto Esquivel Salas, César Miguel Eroza Osorio, Héctor García Nava, Marco Antonio Carballo Ontiveros, Ángel Franco Torres, Ángela Piedad Caro Borrero, Yúllica Santos Ortega, Susana Zamora Ruíz, Yuriria Castañeda Sánchez, Yandy Rodríguez Cueto y Amelia López Herrera. Personas que en su momento forjaron cimientos sólidos y que permitieron una amistad a toda prueba. Mi estimación por siempre y para siempre.

A todas las personas que directa o indirectamente participaron en este proceso.

# Contenido

1. Introducción.....	1
1.1. Concepto de OTEC .....	1
1.1.1 Ciclo Abierto.....	2
1.1.2. Ciclo Cerrado .....	3
1.1.3. Sistemas híbridos .....	4
1.1.4. Otros ciclos.....	5
1.2. Plantas .....	7
1.2.1. Planta sobre la costa ( <i>onshore</i> ).....	7
1.2.2. Planta fuera de la costa o sistemas flotantes ( <i>offshore</i> ).....	7
1.3. Componentes del sistema.....	8
1.3.1. Intercambiadores .....	8
1.3.2. Bombas.....	9
1.3.3. Turbinas.....	10
1.3.4. Fluido de trabajo .....	10
1.4. Plantas OTEC en operación .....	11
1.4.1. Saga.....	11
1.4.2. Goseong.....	11
1.4.3. Kumejima, Okinawa.....	12
1.4.4. Kailua-Kona .....	13
1.4.5. Isla de la Reunión.....	14
1.4.6. Tuticorin.....	15
1.5.1. Chennai, La India (NIOT).....	16
1.5.2. Chabahar, Omán.....	17
1.5.3. Yabucoa, Puerto Rico.....	17
1.5.4. República de Kiribati (KIOST, Corea del Sur) .....	18
1.6. OTEC en México .....	19
1.7. Objetivo general .....	21
1.8. Objetivos particulares.....	21
1.9. Hipótesis.....	21
2. Metodología.....	22
2.1. Descripción del área de estudio.....	22
2.1.2. Temperatura y salinidad en el Océano Pacífico mexicano.....	23
2.2. Obtención de datos .....	26
2.2.1. Datos de campo .....	26
2.2.2. Datos satelitales.....	28
2.2.3. Datos climatológicos globales.....	28

2.3. Análisis estadístico y comparativo de bases de datos y datos <i>in situ</i> .....	29
2.3. Representación gráfica de la temperatura, de acuerdo con el perfil vertical (0-1000 m de profundidad).....	30
2.4. Análisis e interpretación de datos por Sistemas de Información Geográfica (SIG). .....	30
2.5. Descripción y comportamiento por estación climática .....	31
2.6. Elaboración de mapas de temperatura superficial .....	31
2.7. Elaboración de mapas para sitios de interés.....	33
2.8. Elaboración de mapas para batimetría.....	33
2.9. Implementación para la elección del sitio para construcción y operación de una planta OTEC en México .....	33
2.10. Persistencia de temperatura superficial y diferencia de temperatura entre superficie y zona profunda. ....	35
2.11. Cálculo de la potencia neta media anual (GWh año <sup>-1</sup> ) que se puede tener en el Océano Pacífico mexicano por medio del gradiente térmico .....	35
2.12. Cálculo del flujo volumétrico teórico de agua fría (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ), agua superficial (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ) y agua potable (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ) .....	37
2.13. Cálculo del factor de planta (%) para una planta OTEC de 100 MW de generación eléctrica para el Océano Pacífico mexicano.....	39
3. Resultados iniciales .....	40
3.1. Análisis estadístico de los datos .....	40
3.1.1. Análisis comparativo.....	40
3.1.2. Prueba de normalidad.....	41
3.2. Comportamiento histórico de la diferencia de temperatura en el Océano Pacífico mexicano. ....	42
3.2.1. Golfo de Tehuantepec .....	42
3.2.2. Alberca Cálida del Pacífico mexicano .....	44
3.2.3. Golfo de California y Noroeste del Pacífico mexicano.....	46
3.3. Distribución geográfica y estacional de la temperatura superficial histórica para el Pacífico mexicano .....	48
3.3.1. Temperatura media anual del Océano Pacífico mexicano .....	48
3.3.2. Valores de temperatura superficial por medio de termistores .....	49
3.3.3. Temperatura anual promedio a 500 m de profundidad .....	50
3.3.4. Temperatura promedio a 750 m de profundidad .....	51
3.3.5. Temperatura promedio a 1000 m de profundidad .....	51
3.3.6. Temperaturas promedio estacionales en el Océano Pacífico mexicano .....	52
3.4. Distribución geográfica de la diferencia de temperatura anual y estacional históricos continentales.....	54
3.4.1. Diferencia térmica anual promedio en el Océano Pacífico mexicano (500 m) .....	54
3.4.2. Diferencia térmica anual promedio en el Océano Pacífico mexicano (750 m) .....	55
3.4.3. Diferencia térmica anual promedio en el Océano Pacífico mexicano (1000 m).....	56

3.4.4. Diferencia térmica estacional promedio en el Océano Pacífico mexicano .....	57
3.5. Distribución geográfica de la diferencia de temperatura anual y estacional históricos insulares.....	60
3.5.1. Diferencia térmica anual promedio insular a 500 m de profundidad .....	60
3.5.2. Diferencial térmico anual promedio insular a 750 m de profundidad.....	61
3.5.3. Diferencia térmica anual promedio insular a 1000 m de profundidad .....	61
3.5.3. Diferencial térmico insular estacional a 500 m de profundidad.....	62
3.6. Predeterminación de sitios adecuados para el aprovechamiento del diferencial de temperatura.....	64
3.7. Implementación del sitio de interés.....	66
3.8. Porcentaje de persistencia del diferencial térmico a 500, 750 y 1000 m de profundidad	68
3.8.1. Porcentaje de persistencia del diferencial térmico entre superficie y 500 m de profundidad .....	68
3.8.2. Porcentaje de persistencia del diferencial térmico entre superficie y 750 m de profundidad .....	69
3.8.3. Porcentaje de persistencia del diferencial térmico entre superficie y 1000 m de profundidad .....	70
3.9. Porcentaje de persistencia del diferencial térmico a 500, 750 y 1000 m de profundidad a una distancia máxima de 10 km .....	72
3.9.1. Persistencia a 500 m y menos de 10 km de distancia a la costa.....	72
3.9.2. Persistencia a 750 m y menos de 10 km de distancia a la costa.....	72
3.9.3. Persistencia a 1000 m y menos de 10 km de distancia a la costa.....	73
3.10. Potencia eléctrica.....	74
3.10.1. Mapas de potencia eléctrica neta teórica.....	77
3.10.2. Consumo eléctrico para cinco sitios de interés para implementación de OTEC en el Océano Pacífico mexicano .....	82
3.11. Flujo volumétrico teórico .....	86
3.12. Factor de planta .....	89
4. Discusión .....	90
4.1. Análisis estadístico de los datos .....	90
4.2. Temperatura superficial del Pacífico mexicano .....	92
4.3. Diferencia térmica y persistencia .....	93
4.4. Potencia eléctrica.....	95
4.5. Flujo volumétrico teórico .....	98
5. Conclusiones.....	100
6. Literatura citada .....	102
7. Anexo .....	108

## Índice de figuras

Figura 1. Promedios de gradientes térmicos para la zona ecuatorial y subtropical del planeta.....	2
Figura 2. Esquema conceptual de una planta OTEC de ciclo abierto.....	3
Figura 3. Esquema conceptual de una planta OTEC de ciclo cerrado.....	4
Figura 4. Esquema conceptual de una planta OTEC de ciclo híbrido.....	5
Figura 5. Representación esquemática del ciclo Kalina.....	6
Figura 6. Representación esquemática del ciclo Uehara.....	6
Figura 7. Esquema conceptual de una planta OTEC <i>onshore</i> .....	7
Figura 8. Esquema conceptual de una planta OTEC <i>offshore</i> .....	8
Figura 9. Diversos diseños de intercambiadores.....	9
Figura 10. Ubicación del Instituto de Energías Oceánicas en la Universidad de Saga, Japón.....	11
Figura 11. Ubicación de la planta OTEC <i>onshore</i> de Goseong, Corea del Sur.....	12
Figura 12. Ubicación de la planta <i>onshore</i> OTEC de Okinawa, Japón.....	13
Figura 13. Ubicación de la planta <i>onshore</i> OTEC Hawaii-II de 105 kW de generación.....	14
Figura 14. Ubicación de la planta <i>onshore</i> OTEC (Naval Group) en la Isla de La Reunión, Francia (territorio de ultramar africano).....	15
Figura 15. Planta flotante OTEC de la India (NIOT) cerca de la ciudad de Tuticorin... ..	16
Figura 16. Laboratorio de Energía y Agua Potable del campus Chennai de la National Institute of Ocean Technology.....	17
Figura 17. Prototipo OTEC de 1 MW en el muelle Wooam, Busan, Corea del Sur.....	18
Figura 18. Proyectos actuales y en operación de plantas OTEC en el mundo.....	19
Figura 19. Prototipo OTEC de 1 kWe en el Laboratorio de Ingeniería de la Universidad del Caribe, Quintana Roo, México.....	21
Figura 20. Océano Pacífico mexicano.....	23
Figura 21. Perfil vertical de temperatura estacional promedio (verano-invierno) del Pacífico Tropical Oriental (Pacífico Tropical Mexicano) durante el año 2013.....	24
Figura 22 Perfil vertical de salinidad estacional promedio (verano-invierno) del Pacífico Tropical Oriental (Pacífico Tropical Mexicano) durante el año 2013.....	25
Figura 23. Localización de Marina Cruz de Huanacaxtle, Nayarit.....	27
Figura 24. Localización de La Mina, Oaxaca.....	27
Figura 25. Diagrama de flujo para los análisis estadísticos realizados a las bases de datos	
Figura 26. Diferencia de temperatura histórica para el Golfo de Tehuantepec.....	43
Figura 27. Localidades de interés para la implementación de la tecnología OTEC en la zona del Golfo de Tehuantepec.....	44
Figura 28. Diferencia de temperatura histórica para la zona de la Alberca Cálida del Pacífico mexicano.....	45
Figura 29. Localidades de interés para la implementación de la tecnología OTEC en la zona del Pacífico Central mexicano (“Alberca cálida del Pacífico Tropical”).....	46
Figura 30. Diferencia de temperatura histórica para la zona del Golfo de California y el Noroeste del Pacífico mexicano.....	47
Figura 31. Localidades de interés para la implementación de la tecnología OTEC en la zona del Noroeste del Pacífico mexicano y el Golfo de California.....	48
Figura 32. Datos de promedio anual de temperatura superficial para el Océano Pacífico mexicano.....	49
Figura 33. Datos de promedio anual de temperatura para el Océano Pacífico mexicano a 500 m de profundidad.....	50

Figura 34. Datos de promedio anual de temperatura para el Océano Pacífico mexicano a 750 m de profundidad.....	51
Figura 35. Datos de promedio anual de temperatura para el Océano Pacífico mexicano a 1000 m de profundidad.....	52
Figura 36. Diferencia de temperatura anual histórica entre la superficie y 500 m de profundidad para el Pacífico mexicano.....	55
Figura 37. Diferencia de temperatura anual histórica entre la superficie y los 750 m de profundidad para el Pacífico mexicano.....	56
Figura 38. Diferencia de temperatura anual histórica entre la superficie y los 1000 m de profundidad para el Pacífico mexicano.....	57
Figura 39. Diferencia térmica de temperatura anual insular histórica entre la superficie y los 500 m de profundidad para el Pacífico mexicano.....	60
Figura 40. Diferencia de temperatura anual insular histórica entre la superficie y los 750 m de profundidad para el Pacífico mexicano.....	61
Figura 41. Diferencia de temperatura anual insular histórica entre la superficie y los 1000 m de profundidad para el Pacífico mexicano.....	64
Figura 42. Batimetría del Pacífico mexicano y las localidades continentales que tienen una distancia no mayor de 10 km a estas zonas.....	64
Figura 43. Batimetría para las localidades insulares del Pacífico mexicano, que tienen una distancia no mayor de 10 km a estas zonas.....	65
Figura 44. Sitio seleccionado a partir del método de selección por atributos y matriz de decisión (Puerto Ángel, Oaxaca).....	67
Figura 45. Porcentaje de persistencia de diferencia térmica de 20 °C para el Océano Pacífico mexicano entre la zona superficial y 500 m de profundidad	
Figura 46. Porcentaje de persistencia de diferencia térmica para el Océano Pacífico mexicano entre la zona superficial y 750 m de profundidad.....	70
Figura 47. Porcentaje de persistencia de diferencia térmica para el Océano Pacífico mexicano entre la zona superficial y 1000 m de profundidad.....	71
Figura 48. Porcentaje de persistencia de la diferencia térmica para el Océano Pacífico mexicano entre la zona superficial y 500 m de profundidad a 10 km de distancia.....	72
Figura 49. Porcentaje de persistencia de la diferencia térmica para el Océano Pacífico mexicano entre la zona superficial y 750 m de profundidad a 10 km de distancia.....	73
Figura 50. Porcentaje de persistencia de la diferencia térmica para el Océano Pacífico mexicano entre la zona superficial y 1000 m de profundidad a 10 km de distancia.....	74
Figura 51. Potencia neta media anual generada mediante OTEC en el Pacífico mexicano	
Figura 52. Potencia neta media estacional (primavera) generada mediante ciclo OTEC en el Pacífico mexicano.....	78
Figura 53. Potencia neta media estacional (verano) generada mediante ciclo OTEC en el Pacífico mexicano.....	79
Figura 54. Potencia neta media estacional (otoño) generada mediante ciclo OTEC en el Pacífico mexicano.....	80
Figura 55. Potencia neta media estacional (invierno) generada mediante ciclo OTEC en el Pacífico mexicano.....	81
Figura 56. Potencia eléctrica para cinco puntos del Océano Pacífico mexicano, tomando en cuenta la ecuación de Nihous para la implementación de OTEC (2010-2017).....	82
Figura 57. Consumo anual promedio de cinco puntos del Pacífico mexicano. Fuente: CENACE (2020).....	83

Figura 58. Potencia eléctrica por OTEC y consumo eléctrico de cinco municipios del Pacífico mexicano.....84

## Índice de tablas

Tabla I. Medición de temperatura superficial marina <i>in situ</i> .....	28
Tabla II. Comparación de la Temperatura Superficial Marina.....	29
Tabla III. Grupos de datos para el análisis de correlación múltiple.....	30
Tabla IV. Estadística descriptiva para las bases de datos WOA y SATMO.....	40
Tabla V. Estadística descriptiva para las bases de datos SATMO, WOA y el termistor de La Mina, Puerto Ángel.....	40
Tabla VI. Estadística descriptiva para valores promedio de 4 días para las diferentes bases de datos.....	41
Tabla VII. Prueba de normalidad para las bases de datos SATMO, WOA and <i>in situ</i> ...	41
Tabla VIII. Valores del factor de correlación múltiple (rho) para las tres bases de datos analizados.....	42
Tabla IX. Localidades y sus distancias a las isolíneas de 500, 750 y 1000 m de profundidad en el Golfo de Tehuantepec en kilómetros.....	43
Tabla X. Localidades y sus distancias a las isolíneas de 500, 750 y 1000 m de profundidad en la Alberca Cálida del Pacífico mexicano en kilómetros.....	45
Tabla XI. Localidades y sus distancias a las isolíneas de 500, 750 y 1000 m de profundidad en la zona del Golfo de California y el Noroeste del Pacífico mexicano en kilómetros.....	47
Tabla XII. Distancias de los sitios de interés en zona continental hacia la isolínea de 500 y 1000 m de profundidad para el Pacífico mexicano.....	65
Tabla XIII. Distancias de los sitios de interés en zona insular hacia la isolínea de 500 y 1000 m de profundidad para el Pacífico mexicano.....	66
Tabla XIV. Resultado final del análisis de matriz de decisión (Puerto Ángel, Oaxaca).66	66
Tabla XV. Resultado final del análisis de matriz de decisión (diferencia de temperatura)	
Tabla XVI. Potencia neta anual promedio en los sitios de interés utilizando el ciclo OTEC para zonas del Pacífico mexicano.....	74
Tabla XVII. Potencia neta estacional (primavera) en los sitios de interés utilizando el ciclo OTEC para zonas del Pacífico mexicano.....	75
Tabla XVIII. Potencia neta estacional (verano) en los sitios de interés utilizando el ciclo OTEC para zonas del Pacífico mexicano.....	75
Tabla XIX. Potencia neta estacional (otoño) en los sitios de interés utilizando el ciclo OTEC para zonas del Pacífico mexicano.....	76
Tabla XX. Potencia neta estacional (invierno) en los sitios de interés utilizando el ciclo OTEC para zonas del Pacífico mexicano.....	76
Tabla XXI. Porcentaje de variación de la potencia neta eléctrica con respecto al diferencial de temperatura en el Pacífico mexicano.....	82
Tabla XXII. Comparativa entre la potencia eléctrica teórica por medio de OTEC y el consumo eléctrico de los municipios elegidos (promedio del intervalo 2010-2019).....	83
Tabla XXIII. Capacidad efectiva instalada (MW) de plantas de energías renovables y convencionales <sup>1</sup> comparada con la teórica de ciclo OTEC, producción neta anual promedio, factor de planta y horas netas de producción.....	85
Tabla XXIV. Flujo volumétrico promedio anual de agua fría y superficial para diferentes sitios de interés y producción de agua potable.....	86
Tabla XXV. Flujo volumétrico estacional de agua fría y superficial para diferentes sitios de interés y producción de agua potable (primavera).....	86
Tabla XXVI. Flujo volumétrico estacional de agua fría y superficial para diferentes sitios de interés y producción de agua potable (verano).....	87

Tabla XXVII. Flujo volumétrico estacional de agua fría y superficial para diferentes sitios de interés y producción de agua potable (otoño).....	88
Tabla XXVIII. Flujo volumétrico estacional de agua fría y superficial para diferentes sitios de interés y producción de agua potable (invierno).....	88
Tabla XXIX. Factor de planta para una instalación OTEC de 100 MW para los sitios de interés por medio de la eficiencia de la planta de Goseong.....	89

## Resumen

México es un país que basa su producción energética en gran parte por medio de combustibles fósiles y, al ser recursos que en un futuro se agotarán, es importante y necesario investigar otras formas de obtención de energía que, además, sean menos agresivas con el medio ambiente. Una de estas fuentes es la que se conoce como OTEC (Conversión de la Energía Térmica Oceánica por sus siglas en inglés) que aprovecha la diferencia de temperaturas del agua superficial caliente y profunda fría para evaporar un fluido de trabajo con el fin de que mueva una turbina y se genere electricidad. Esto suele ser posible en zonas cuya posición geográfica sea cercana o esté en el Ecuador o en las regiones subtropicales y nuestro país cuenta con zonas que son propicias para la implementación de esta tecnología, siendo un área importante el Pacífico mexicano.

Es por ello que el objetivo de este trabajo fue evaluar y analizar aquellos parámetros fisicoquímicos a nivel oceanográfico, variables geográficas, y otras, que nos permitan identificar zonas con el diferencial de temperatura necesario para la implementación de OTEC en el país, así como colaborar en la elaboración del Atlas Nacional de Gradiente Térmico Oceánico para proporcionar información actualizada de condiciones económicas, ecológicas y sociales para determinar los sitios más apropiados para la instalación y operación de este tipo plantas.

A continuación, se analizó la temperatura y la diferencia de temperatura en todo el litoral del Pacífico mexicano para conocer el comportamiento del parámetro tanto temporal (anual y estacional) como espacialmente desde 1955 hasta el 2017, se realizó el análisis de persistencia de la diferencia de temperatura para descartar los sitios que no cumplían con los parámetros necesarios para la implementación de esta tecnología (sobre todo la distancia máxima de 10 km desde la toma de agua profunda a la línea de costa y la diferencia de temperatura igual o mayor a 20°C), la identificación de sitios de interés de acuerdo con un análisis de atributos y una matriz de decisión, el cálculo de la potencia neta eléctrica que puede generarse en el Pacífico mexicano a partir de una planta OTEC de 100 MW, el flujo volumétrico de agua profunda y agua superficial para el ciclo, el factor de planta que puede tener la planta y la elaboración de gráficas y mapas para ilustrar el parámetro por medio de Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Los resultados indican que en el sur-sureste del Pacífico mexicano se presentan valores de diferencia de temperatura a lo largo de todo el año (en los estados de Michoacán, Guerrero, Oaxaca y Chiapas) superiores a los 20°C. La matriz de decisión determinó que Puerto Ángel, Oaxaca es el sitio idóneo para la implementación de una planta OTEC, pero se destacan otros sitios como Bahía de Banderas (Yelapa y Puerto Vallarta), Colola, Michoacán y Nuxco, Guerrero. Sitios como la parte sur de la península de Baja California y las islas Marías y Revillagigedo pueden operar plantas entre 4 a 6 meses debido a que es el periodo en el que la diferencia de temperatura es adecuada. La potencia eléctrica máxima que se puede generar es de 178 MW con un flujo volumétrico máximo de 2.17 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> (2170 L s<sup>-1</sup>).

Se concluye que el Pacífico mexicano es un sitio prioritario para la investigación y la implementación de la tecnología OTEC.

# 1. Introducción

A pesar de los problemas ambientales asociados, en México, la investigación y explotación relacionada con energía generada a partir de combustibles fósiles, la cual ocupa el primer lugar en financiamiento público por medio de las empresas paraestatales Petróleos Mexicanos (PEMEX) y Comisión Federal de Electricidad (CFE), quienes aportan el 86% de la producción eléctrica y el 52% del parque eléctrico (SENER, 2020). Sin embargo, dado que estas fuentes están en un proceso de agotamiento, es urgente y necesaria la investigación en fuentes renovables y limpias. Una de estas opciones es la que se conoce como OTEC (Ocean Thermal Energy Conversion). Entre los pasos que deben seguirse están la determinación de los sitios y el nivel de explotación con que esta tecnología puede desplegarse pues de este modo se pueden identificar zonas que pueden beneficiarse social y económicamente con su aprovechamiento.

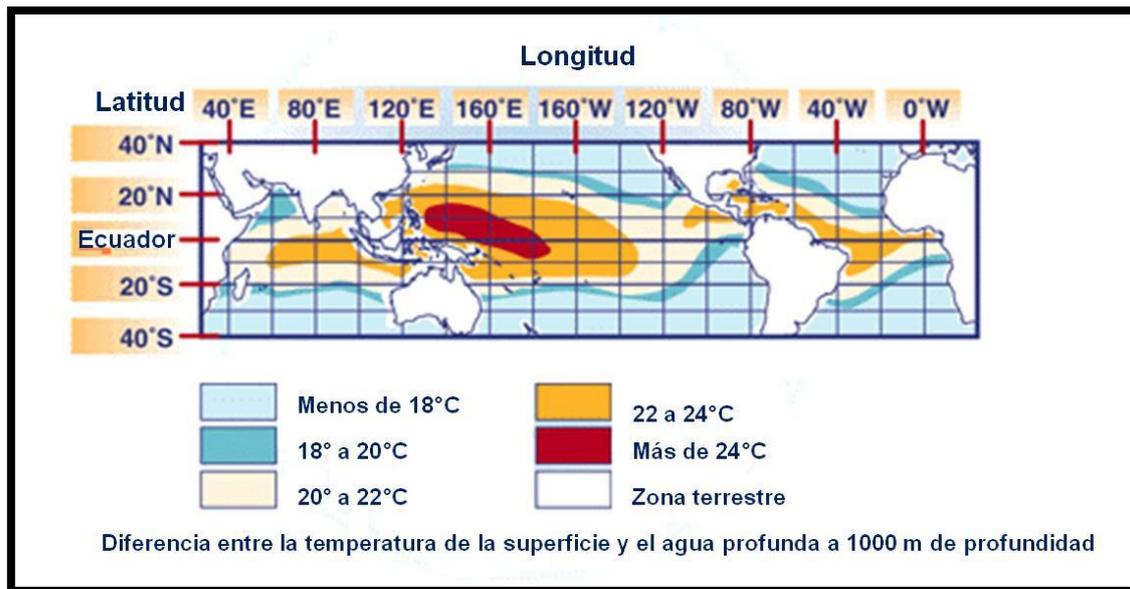
Por otra parte, México puede sumarse a los países como Estados Unidos, Francia, Alemania, Reino Unido, Holanda, Japón, Corea del Sur y la India en cuanto al desarrollo tecnológico y la implementación de este sistema pues su despliegue a escala comercial cada vez es más viable, de acuerdo con Vega (2007) y Kim *et al.* (2013) Además, el aprovechamiento de los productos secundarios que genera OTEC como la producción de agua potable, aire acondicionado, acuicultura y agricultura de agua fría han permitido la creación de una industria denominada “de agua profunda” que ha permitido elevar el nivel socioeconómico de regiones costeras, sobre todo en Asia (Kim *et al.* 2013).

Actualmente, con las tecnologías OTEC disponibles, el aprovechamiento energético es redituable cuando los precios del petróleo superan los US\$100 por barril. México, presenta zonas oceanográficas importantes para generar energía a partir del gradiente térmico, lo cual eventualmente podría reducir los costos de producción de muchos insumos y generar otros beneficios derivados del mismo funcionamiento de la planta.

Este trabajo pretende evaluar y analizar la diferencia de temperatura, la distancia a la toma de agua profunda, la batimetría, potencia neta eléctrica, generación de agua potable y otras, que nos permitan identificar zonas de interés para la implementación de OTEC en el país. Consecuentemente, resulta conveniente la elaboración de un Atlas del potencial de la diferencia de temperatura oceánica, pues con ello, se tendrá información actualizada de condiciones económicas, ecológicas y sociales para determinar los sitios más apropiados para la instalación y operación de este tipo plantas.

## 1.1. Concepto de OTEC

Las plantas de gradiente térmico oceánico (OTEC por sus siglas en inglés “Ocean Thermal Energy Conversion”) tienen dispositivos que aprovechan la diferencia de temperatura existente entre las aguas superficiales y las aguas profundas marinas para la generación de energía eléctrica. De acuerdo con d’Ansoval (1881) y Claude (1930), dicha diferencia debe ser de al menos 20°C para un aprovechamiento eficiente. Esto hace que las regiones ecuatoriales y subtropicales sean las áreas más adecuadas para la explotación de este tipo de energía. Por citar un ejemplo, la parte occidental y una porción de la zona oriental del Océano Pacífico, incluido el litoral mexicano, son zonas propicias para el despliegue de tecnología OTEC (Figura 1).



**Figura 1. Promedios de gradientes térmicos para la zona ecuatorial y subtropical del planeta (Modificado de Crews, 1997)**

El desarrollo de la tecnología OTEC empezó con los estudios del físico francés Jacques Arsene D'Arsonval en 1881 (d'Arsonval, 1881) y se demostró con los procedimientos del físico francés Georges Claude, quien en 1926 comprobó ante la Academia de Ciencias de París un modelo a escala que mostraba la posibilidad de aprovechar la energía generada a partir del gradiente térmico del agua marina (Claude, 1930).

En 1930, en la bahía de Matanzas, Cuba, Claude hizo una evaluación y exposición ante inversionistas norteamericanos de la generación de energía eléctrica (22 kW) (Claude, 1930). A partir de ese y otros logros a lo largo del mundo, se han generado diferentes proyectos que han obtenido resultados satisfactorios; tanto en la generación de energía como en el mejoramiento y adaptación de nueva tecnología, lo que ha permitido reducir los costos de operación de la planta.

La tecnología OTEC utiliza para su funcionamiento general el ciclo de calor termodinámico Rankine para generar electricidad por medio de turbinas de vapor y puede tener tres modalidades de ciclo: abierto (OC, por sus siglas en inglés), cerrado (CC, por sus siglas en inglés) e híbrido.

### 1.1.1 Ciclo Abierto

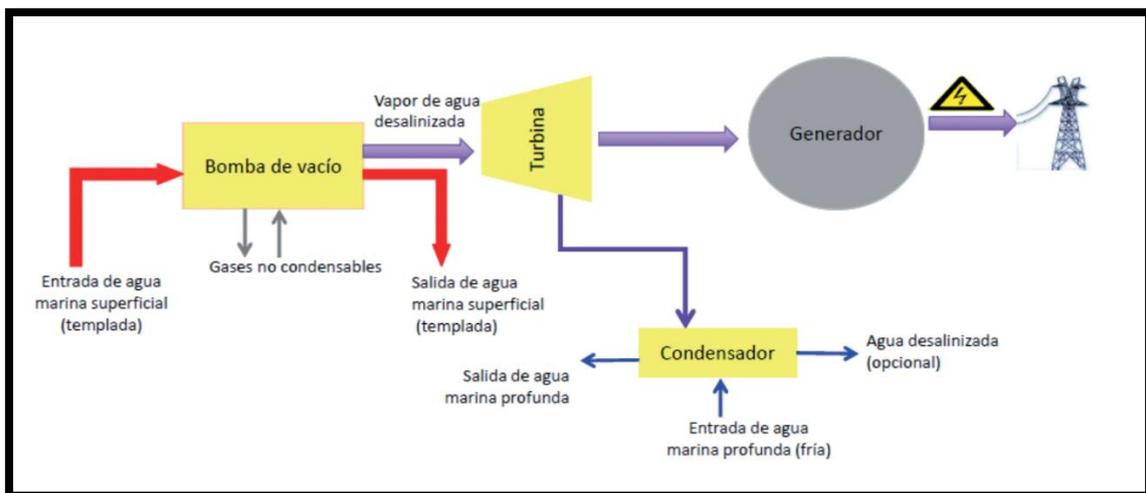
El ciclo abierto, también conocido como ciclo de Claude (el primer ciclo utilizado), usa el agua marina como fluido de trabajo, este funciona cuando el agua marina superficial (~25°C) entra es bombeada y sometida a vacío para bajar su presión hasta que el agua llega a su punto de ebullición, convirtiendo el líquido en vapor, este se dirige hacia una turbina conectada a un generador para producir energía eléctrica y luego se dirige a un condensador, en el que se obtiene de nuevo agua líquida saturada a una presión y temperatura aproximadas de 1.7 kPa y 15°C, respectivamente (Figura 2). Este procedimiento se lleva a cabo utilizando agua fría del mar que se bombea desde las profundidades (aproximadamente 1 000 m) como fluido refrigerante. El agua del condensador se regresa al mar y así el proceso se repite de manera continua. Es en el proceso de evaporación es donde la mayor parte de sales se precipita, este vapor es el que

pasa a la turbina y luego al pasar en el condensador se recupera el agua sin sal, pero la desalinización pasa en el evaporador.

Una planta pequeña puede producir de 1 a 10 MW de electricidad neta y producir de 1700 m<sup>3</sup> a 3500 m<sup>3</sup> de agua dulce al día. Estas cantidades podrían cubrir las necesidades de comunidades con alrededor de 4 500 a 100 000 personas (Vega *et al.*, 2002; Morales *et al.*, 2014; OTEC Matters, 2015). Dado que el fluido de trabajo es agua marina, no representa daño ambiental pues esta es completamente aprovechada y no regresa al medio marino, pero el costo de mantenimiento podría ser elevado porque se promueve la corrosión de los equipos. Además, se debe considerar que una instalación de este tipo requiere de equipos especiales para eliminar gases disueltos en el agua de mar, que no son condensables.

El ciclo de Claude tiene ciertas características que lo hacen distinto a otros ciclos, por ejemplo, en el evaporador de un ciclo abierto se usa un sistema de aspersión para que el agua tibia se evapore en una mayor proporción, a este método de evaporación se le llama evaporación flash; es decir, disminuye súbitamente la presión para evaporar un fluido (Bernal-Francisco, 2016).

El rendimiento de este sistema es muy bajo pues está sobre un 7% teóricamente, además es preciso consumir energía para bombear el agua fría de las profundidades del mar para condensar el vapor y para accionar la bomba de vacío del evaporador. Se estima que entre un 20% a un 30% de la potencia eléctrica generada se consume en las operaciones de bombeo (Fernández, 2008).

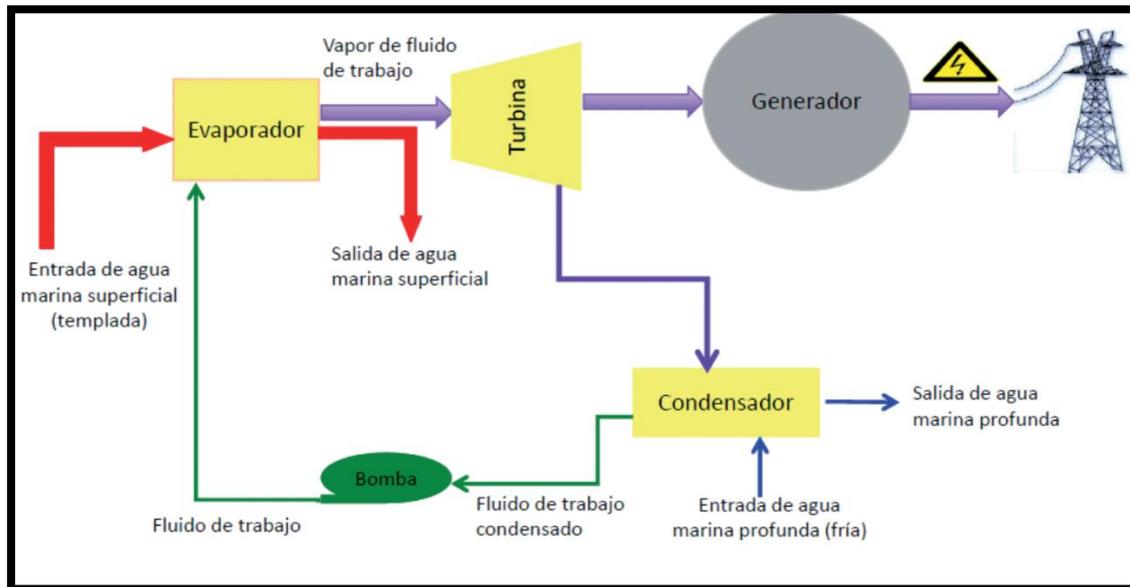


**Figura 2. Esquema conceptual de una planta OTEC de ciclo abierto (Garduño-Ruíz *et al.*, 2017).**

### 1.1.2. Ciclo Cerrado

En el ciclo cerrado, también conocido como ciclo de Anderson (en honor de los doctores norteamericanos Anderson y Anderson Jr. que lo patentaron en 1960), utiliza fluidos que tienen bajos puntos de ebullición, tales como el amonio, propano, freón, R134, R123, R152a, entre otros, para impulsar una turbina que genere electricidad. El agua marina superficial es bombeada a través de un intercambiador de calor (evaporador) que vaporiza el fluido de trabajo provocando el movimiento del sistema turbina-generador para producir energía eléctrica. El agua fría proveniente de las profundidades del mar es

bombada a través de un segundo intercambiador de calor (condensador) donde el vapor se transforma en líquido de nuevo y se bombea al evaporador para comenzar otra vez el ciclo termodinámico (Figura 3).



**Figura 3. Esquema conceptual de una planta OTEC de ciclo cerrado (Garduño-Ruíz *et al.*, 2017).**

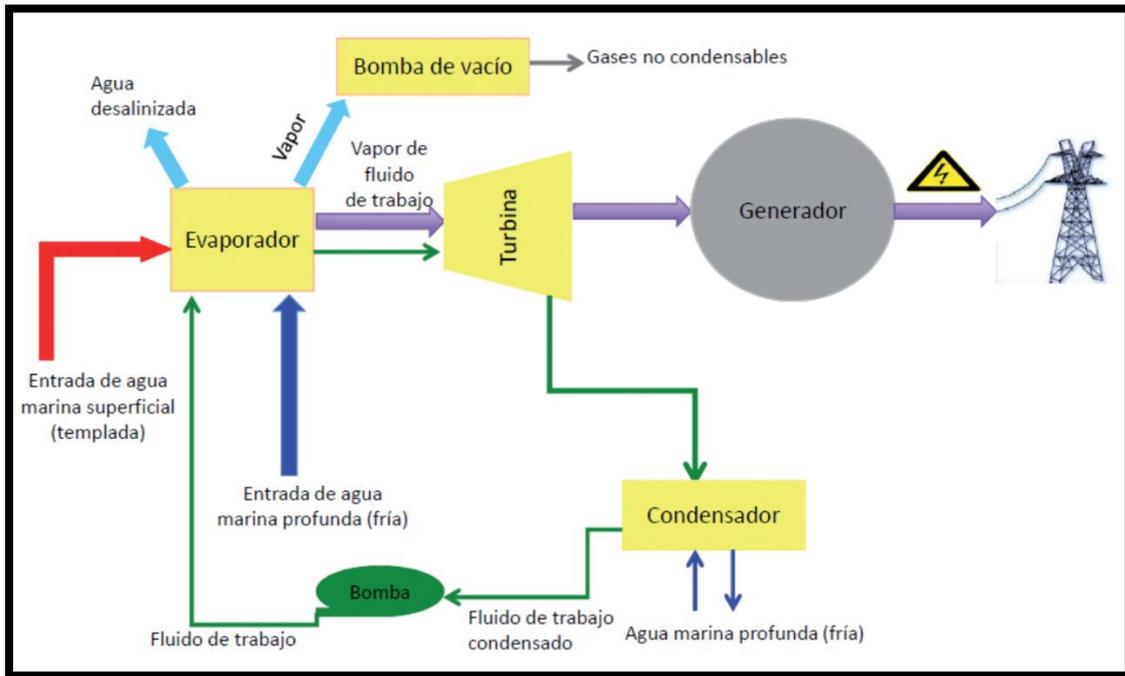
Este método genera más electricidad que el ciclo abierto, pero no genera agua dulce, el costo de mantenimiento es mínimo ya que el fluido de trabajo no corroe los equipos, a excepción del evaporador y el condensador; además pueden tener un menor tamaño de planta que los ciclos abiertos (Morales *et al.*, 2014; García-Huante, 2015; OTEC Matters, 2015; Bernal-Francisco, 2016).

### 1.1.3. Sistemas híbridos

Los sistemas híbridos combinan las características de los sistemas de ciclo abierto y de ciclo cerrado como medio de optimizar su funcionamiento. Con estos sistemas híbridos se persigue la producción de electricidad y la desalinización de agua de mar. En un sistema híbrido, el agua marina superficial entra en un evaporador donde el agua se transforma en vapor, de forma similar a lo que ocurre en un proceso de evaporación de ciclo abierto (Figura 4). El calor del vapor obtenido se utiliza para vaporizar el fluido de trabajo como el que se utiliza en el ciclo cerrado. El fluido vaporizado acciona una turbina que produce electricidad. El vapor obtenido del agua de mar se vuelve líquido (condensación) dentro de un intercambiador de calor proporcionando agua desalinizada, que puede ser utilizada para consumo humano, agrícola etc.

La desalinización mediante evaporación ha sido estudiada con especial atención en los últimos años, porque el sistema es efectivo para resolver problemas de energía y de agua de manera simultánea, mediante un proceso sustentable y amigable con el medio ambiente, dado que no requiere precalentar el flujo de agua. Se reconoce como uno de los métodos de desalinización térmica de baja temperatura (LTTD, por sus siglas en inglés) y resulta particularmente atractivo para islas y áreas remotas poco pobladas. Cabe mencionar que la desalinización por evaporación puede también ser aplicada por sí sola, es decir, sin el ciclo Rankine de generación de energía eléctrica. Una planta de este tipo fue desarrollada

por el Instituto Nacional de Tecnología Oceánica (NIOT, por sus siglas en inglés) en la India y produce agua dulce a una tasa de 100 toneladas por día (Soto, 2014).



**Figura 4. Esquema conceptual de una planta OTEC de ciclo híbrido (Garduño-Ruíz et al., 2017).**

#### 1.1.4. Otros ciclos

Dentro de los ciclos cerrados destaca el Ciclo Kalina el cual fue propuesto por el doctor ruso Alexander Kalina en 1985. Es un Ciclo Rankine mejorado, en el cual se utiliza como fluido de trabajo una mezcla de amoníaco y agua. El amoníaco es una de los fluidos con menor punto de ebullición lo que genera mayor eficiencia a temperaturas más bajas (Figura 5).

De este modo, la elevación de temperatura puede ser más alta y se minimiza la cantidad de agua de las profundidades necesaria para el condensador, reduciendo las dimensiones de la tubería de entrada y por tanto el capital invertido en la central, mientras aumenta la potencia energética de salida (Bernal-Francisco, 2016). Para sistemas OTEC, éste incrementa la eficiencia térmica teórica, sin embargo, al usar un fluido binario, se reduce el desempeño del evaporador y del condensador respecto el ciclo Rankine, además de ser más complejo en su arreglo (Soto, 2014).

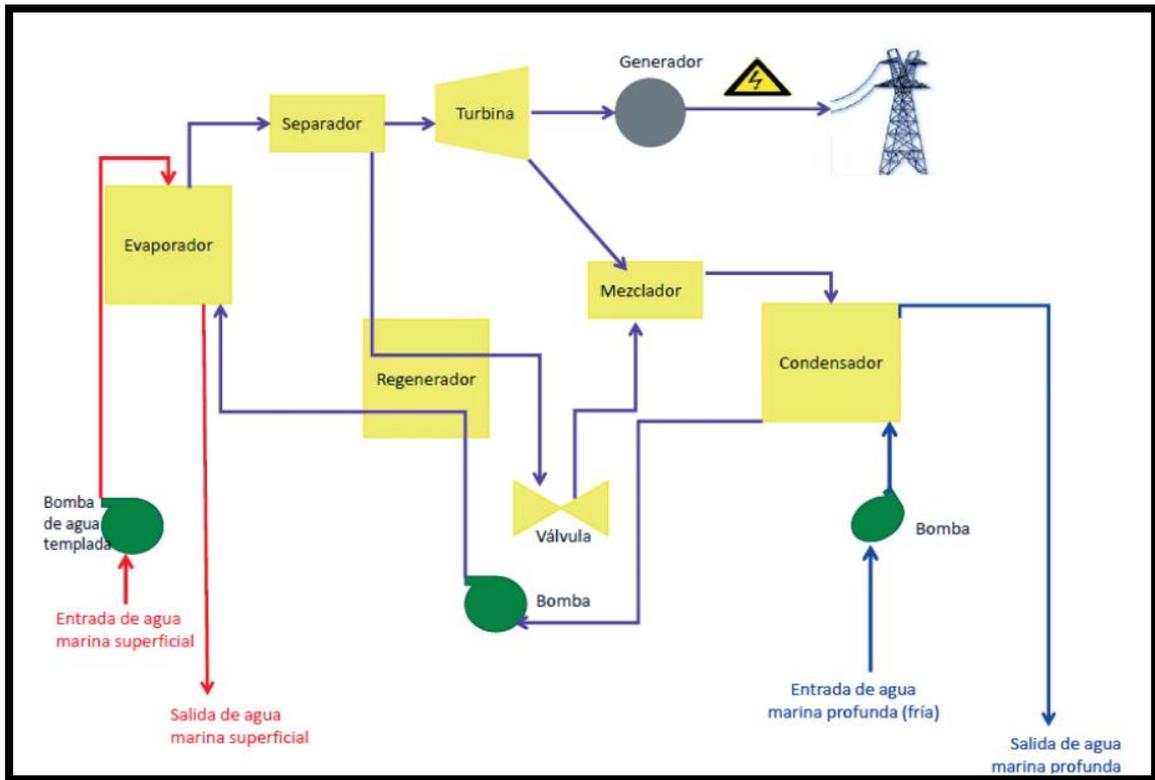


Figura 5. Representación esquemática del ciclo Kalina. (Garduño-Ruíz *et al.*, 2017).

Otro tipo de ciclo es el Ciclo Uehara, que fue inventado en 1994 por el ingeniero japonés Haruo Uehara de la Universidad de Saga. Se basa en la utilización de una mezcla de agua y amoníaco como fluido de trabajo y extrae parte del vapor de la turbina para reducir la carga del condensador siendo el ciclo termodinámico más complejo de todos (Figura 6).

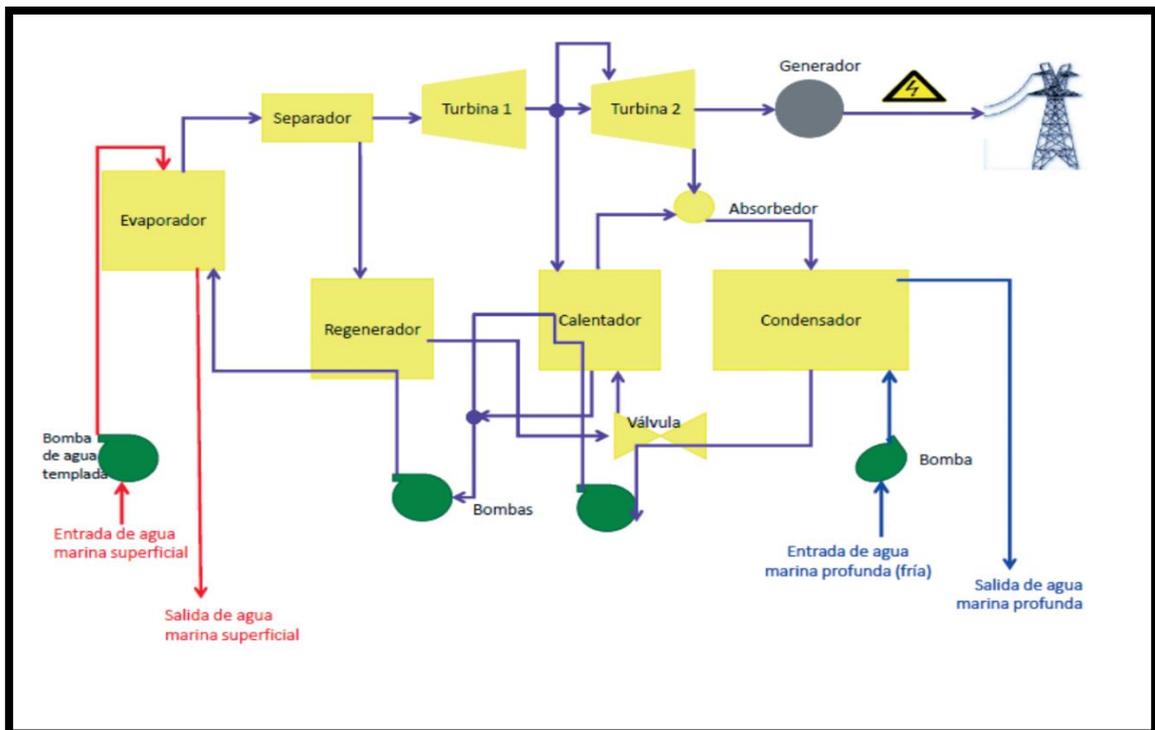


Figura 6. Representación esquemática del ciclo Uehara. (Garduño-Ruíz *et al.*, 2017).

## 1.2. Plantas

Existen diferentes clasificaciones de plantas OTEC como son: sobre la costa (*onshore*, por sus siglas en inglés) y fuera de la costa o sistema flotantes (*offshore*, por sus siglas en inglés).

### 1.2.1. Planta sobre la costa (*onshore*)

La planta se encuentra a una distancia cercana de la costa, disminuyendo las probabilidades de daños por desastres naturales. Las desventajas son que se necesitan tuberías muy largas para coleccionar el agua marina y consume mucha energía para bombear el agua a la planta, lo cual reduce la producción neta de electricidad y tiene un alto costo económico; sin embargo, el mantenimiento es sencillo, no se necesitan largos cables para transportar la energía generada, y provee agua para múltiples usos como agua potable, maricultura y aire acondicionado, haciéndola una atractiva alternativa (Figura 7). Otros parámetros a tomar en cuenta es que los sitios seleccionados tengan cerca mares con un buen gradiente térmico, el fondo marino debe presentar una pendiente muy grande para tener acceso a las aguas profundas y el terreno en la costa debe ser estable, amplio y plano (Morales *et al.*, 2014; OTEC Matters, 2015; Bernal-Francisco, 2016).

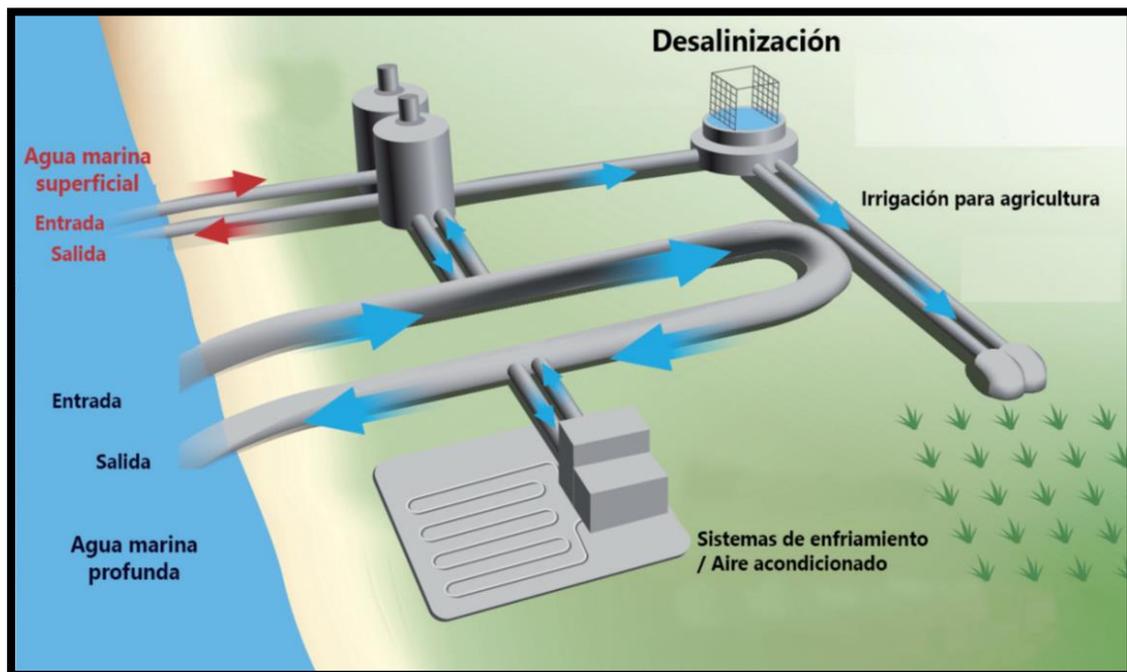


Figura 7. Esquema conceptual de una planta OTEC *onshore*. Fuente: Adaptada de Ocean Thermal Energy Corporation (2017).

### 1.2.2. Planta fuera de la costa o sistemas flotantes (*offshore*)

Las plantas construidas en sistemas flotantes se encuentran a pocos kilómetros de la costa y están construidas sobre grandes barcos o en plataformas de tipo petrolero, pueden estar ancladas al fondo marino o flotando (Figura 8). Tienen la ventaja de que la distancia para bombeo de agua fría del mar profundo es más corta, pero requieren cables submarinos largos para llevar la electricidad a la costa. Para que la planta pueda ser conectada a los cables de energía, necesita permanecer relativamente inmóvil y para ello necesitan estar

“amarradas” lo cual es muy complicado en aguas profundas. Por otra parte, este tipo de sistemas pueden ser más vulnerables a tormentas o algún otro tipo de desastres naturales (Bernal-Francisco, 2016, Fernández, 2008).

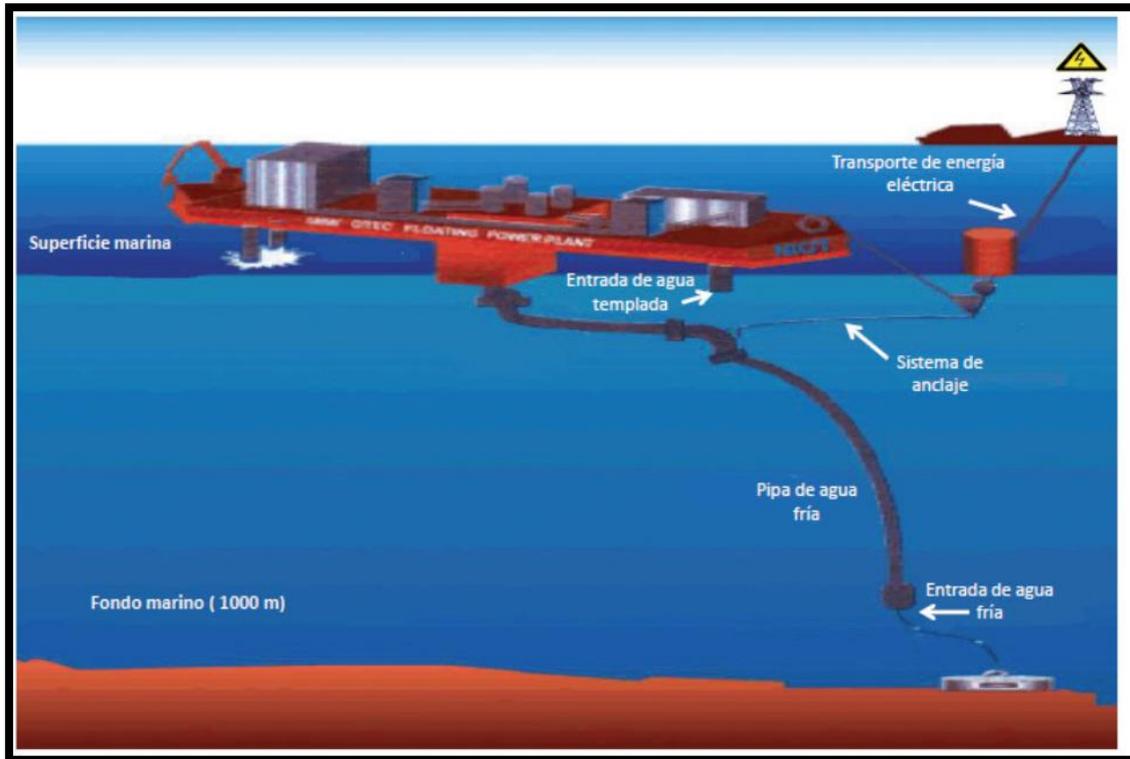


Figura 8. Esquema conceptual de una planta OTEC *offshore*. Fuente: Adaptado de McKinnon (2011).

### 1.3. Componentes del sistema

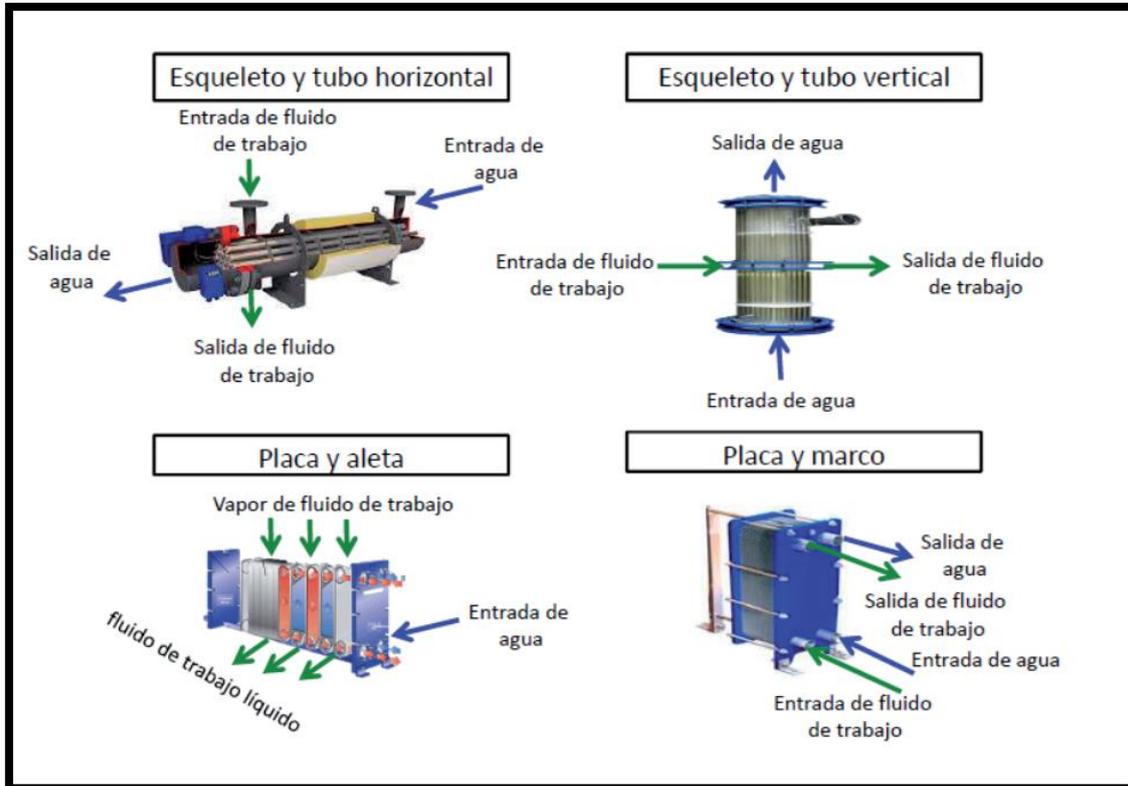
Los componentes fundamentales para la construcción de una planta OTEC son los siguientes:

- Evaporadores y Condensadores.
- Turbina, Tuberías y Bombas.
- Estructura fija o flotante.
- Sistema de anclaje.
- Cable submarino (si la central es flotante).

#### 1.3.1. Intercambiadores

Los intercambiadores de calor constituyen una parte importante del funcionamiento y del costo de los sistemas de ciclo cerrado, pues deben de disponer de una gran superficie para transferir suficiente calor en las plantas que operan con pequeño gradiente térmico. Los materiales comúnmente usados son titanio y aluminio. Existen diversos diseños, uno de ellos es el de esqueleto y tubos, en la que el agua de mar fluye a través de los tubos y el fluido de trabajo se evapora o condensa en el esqueleto alrededor de ellos (Figura 9). El material con el cual actualmente son fabricados es el aluminio por el menor costo, pero también son construidos con titanio (Fernández, 2008).

En un diseño de placas y aletas, el fluido de trabajo y el agua de mar fluyen a través de placas paralelas alternantes; las aletas entre las placas mejoran la transferencia del calor. Los intercambiadores de placas son los que tienen la mejor eficiencia en una planta OTEC, requiriendo menores áreas de transferencia por unidad de potencia neta del sistema (Soto, 2014).



**Figura 9. Diversos diseños de intercambiadores. Adaptado de Fernández-Díez (2008).**

Los condensadores pueden ser de contacto directo o indirecto, según como circulen las corrientes. Cuando el vapor que se utiliza es agua, se utiliza el de contacto directo, que no tiene pared sólida interpuesta, por tanto, proporcionan una condensación más efectiva. El Laboratorio Nacional de Energías Renovables de Estados Unidos (NREL, por sus siglas en inglés), diseñó un condensador de contacto directo (ADCC) de dos etapas donde el agua fría se distribuye a través de dos vasos de extremos abiertos rellenos de un material de protección disponible comercialmente.

El sistema ADCC reemplaza las placas tradicionales por una nueva placa que aumenta al área de la superficie de contacto entre el líquido de enfriamiento y el vapor, que lo hace más eficiente en un 5%. La capacidad de generación potencial aumento un 17% y el costo de reducción de emisiones se redujo a la mitad. Nakaoka y Uehara en 1988, determinaron que el evaporador y el condensador del ciclo representan entre 20 y 50% de los costos de una planta OTEC, considerando que ésta se encuentra sobre la costa.

### 1.3.2. Bombas

El diseño para bombear agua fría del mar profundo está acotado a los siguientes criterios:

- Número de tuberías: Depende de la capacidad eléctrica de la planta.

- Longitud: Depende de la profundidad de la columna de agua.
- Diámetro: Depende de la cantidad de agua que sea bombeada, sin embargo, un mayor diámetro de ésta genera mayor riesgo en términos de diseño, transporte e instalación.
- Material: Debe ser económicamente viable, fácil de instalar y resistente a condiciones marinas extremas.

Además, el sistema de bombeo debe ser diseñado para soportar condiciones climáticas como los ciclones, huracanes o tifones, tsunamis, inundaciones, tormentas eléctricas que puedan poner en riesgo el funcionamiento tanto el sistema de bombeo como las tuberías. Experiencias pasadas han mencionado que los primeros metros de tubería y conexión son críticos, pues puede existir una deformación de las tuberías, que conllevan a una pérdida total o parcial del sistema (Fernández, 2008; Lelarge *et al.*, 2013).

### 1.3.3. Turbinas

Las tecnologías de las turbinas son muy diferentes dependiendo el tipo de ciclo de la planta y al tipo de fluido que sea usado, por ejemplo, las turbinas usadas para un ciclo cerrado son de forma radial y más pequeñas. Las turbinas deben ser capaces de manejar grandes cantidades de flujo de vapor, necesarios para producir una importante cantidad de energía eléctrica. Uno de los mayores retos es mantener la turbina sellada para evitar fugas, y para tales motivos suele utilizarse nitrógeno porque no interfiere en el proceso de condensación (Nihous *et al.*, 2012).

Estudios realizados por la compañía Westinghouse Electric Corporation concluyeron que para producir 100 MW netos de potencia eléctrica, la turbina más económica y fiable será aquella que opere a baja velocidad (200 rpm) y tenga un diámetro de aproximadamente 44 metros. Sin embargo, esta turbina requiere de un mayor desarrollo (Fernández, 2008).

### 1.3.4. Fluido de trabajo

Independientemente del tipo de diseño y del tipo de ciclo que se utilice en una planta OTEC, es necesario el uso de un fluido de trabajo que hará que el gradiente térmico pueda ser aprovechado para la producción de energía.

El amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) es uno de los fluidos de trabajo más utilizados en los OTEC de tipo cerrado, esto debido a que sus propiedades hacen que el tamaño de la turbina y de los intercambiadores sea menor en comparación con otros refrigerantes (IRENA, 2014). Sin embargo, también se ha trabajado con el R22 (Clorodifluorometano (HCFC-22)), llamado freón, tal como la planta OTEC de Nauru; y se ha llegado a proponer el uso de hidrocarburos como fluidos de trabajo, como el metano, el butano y el propano (Universidad Nacional Méndez Pelayo, 1981). Pero, al ser, el freón y los hidrocarburos, disolventes de ciertas sustancias que se usan como lubricación en el sistema, los vapores que se generan en las turbinas o en las válvulas podrán causar daños al sistema (Avery y Wu, 1994).

Actualmente, Japón y Corea del Sur son los países que más han desarrollado la tecnología OTEC, así como los que han adaptado recubrimientos internos en las tuberías de la planta (biofouling) y la optimización de componentes como condensadores, evaporadores y las turbinas.

Actualmente, operan seis plantas OTEC en el mundo, las cuales se describen a continuación.

## 1.4. Plantas OTEC en operación

### 1.4.1. Saga

En la Universidad de Saga, en el Instituto de Energías Oceánicas (IOES), en territorio japonés, se implementó una planta OTEC experimental de ciclo cerrado en 1994 con una generación inicial de 4.5 kW pero gracias a las contribuciones del Dr. Uehara en el desarrollo y potencialización de los intercambiadores de calor y en el mejoramiento de la turbina se logró la generación de 28.7 kW (30 kW) netos lo que permitió la reconfiguración de la planta en 2005 y su reactivación en 2006 (Figura 10) (Garduño-Ruíz *et al.*, 2017). Su costo fue de 4.5 billones de yenes (aproximadamente \$250 billones de pesos mexicanos) y es la única actualmente que trabaja en el mejoramiento del ciclo Uehara, lo que ha permitido la producción de hasta 10 toneladas de agua dulce diarias.



**Figura 10. Ubicación del Instituto de Energías Oceánicas en la Universidad de Saga, Japón. Fuente: IOES**

### 1.4.2. Goseong

Corea del Sur proyectó y construyó una planta OTEC *onshore* de ciclo cerrado en la región de Goseong, la cual entró en funciones el 18 de noviembre de 2013, produciendo un total neto de 20 kW de energía eléctrica. Utiliza R2 (difluorometano, CH<sub>2</sub>F<sub>2</sub>) como fluido de trabajo y trabaja con temperaturas en los intercambiadores de calor de 26° y 5°C. Las tuberías son de titanio con recubrimiento interno para la eliminación de organismos marinos y la zona de bombeo de agua fría se localiza a 620 m de profundidad. El cuarto de bombeo se encuentra a 45 m debajo del nivel del mar con un total de 50 bombas hidráulicas de 20 HP cada una (Lee Ho-Saeng *et al.*, 2015). El costo total de la planta fue de US\$350,000 dólares (aproximadamente \$7,350,000 pesos mexicanos) y permitió el desarrollo social de la comunidad por medio del complejo industrial implementado por el Seawater Utilization Plant Research Center (SUPRC por sus siglas en inglés) del Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering (KRISO). Debido a que funciona con un gradiente final de 18°C, sólo opera en el verano (OTEC News, 2013; Kim, 2014; García-Huante, 2015) (Figura 11).



**Figura 11.** Ubicación de la planta OTEC *onshore* de Goseong, Corea del Sur (foto del autor)

Por otro lado, el desarrollo de esta tecnología ha propiciado la investigación para otras aplicaciones como la agricultura (jitomate, calabaza y chile); acuicultura de especies comerciales y propias de la región; producción de agua potable a partir del agua profunda por medio de ósmosis inversa; electrólisis y condensación- evaporación; producción de sal y de fertilizantes; utilización del agua profunda para lavado y secado de arroz empaquetado, entre otros.

#### 1.4.3. Kumejima, Okinawa

Posteriormente, en la isla Kumejima de la prefectura de Okinawa (Japón), el Instituto de Energía Oceánica construyó una mini planta OTEC experimental; que empezó su operación el 6 de febrero de 2014; con una producción neta de 50 kW, con la colaboración de la Universidad de Saga (OTEC News, 2013) que, con la producción de la primera planta creada en 1999 generan un total 100 kW. Trabaja por medio del ciclo cerrado por medio del fluido de trabajo R134a con condensadores y evaporadores de titanio y opera durante todo el año, pues se cuenta con un gradiente máximo de 20°C siendo una planta *onshore* (Figura 12).

El agua es bombeada desde una profundidad de 612 m y tiene diferentes usos como generación de energía, aire acondicionado, acuicultura, producción de agua potable, sales y cosméticos. Actualmente en la isla existe un nuevo mercado de agua profunda, dado que este tipo de agua es rica en nutrientes la hace ideal para mejorar la acuicultura de la región. Su principal uso es para la producción de langostinos (producen 250 toneladas de langostino al año), para producción de “Sake”, “Tofu”, cosméticos, agua mineralizada, etc. Este nuevo mercado genera 2 billones de yenes en ventas y se han creado 140 nuevos

empleos; su costo fue de US\$2.5 millones de dólares (Kobayashi *et al.*, 2001; Yasuyuki *et al.*, 2015).



**Figura 12. Ubicación de la planta *onshore* OTEC de Okinawa, Japón (OTEC-Okinawa, 2014)**

#### 1.4.4. Kailua-Kona

Makai Ocean Engineering, Inc. con sede en Kailua-Kona (Hawaii, Estados Unidos) diseñó e instaló una turbina-generador para la producción de 100 kW netos de energía eléctrica en la planta OTEC *onshore* de ciclo cerrado conocida como Hawaii OTEC-II, construida en la misma zona donde operó la OTEC-I en 1979 (actualmente genera 105 kW). También se optimizó el intercambiador de calor por medio de la reducción de costos y materiales con lo que se mejoró la vida media y la eficiencia térmica, además de una mayor resistencia a la corrosión (García-Huante, 2015). La inversión total fue de \$4.6 millones de dólares, iniciando las operaciones el 14 de agosto del 2015. Utiliza amoníaco como fluido de trabajo y distribuye electricidad a un aproximado de 120 hogares con un costo de 19 centavos de dólar por kWh (Figura 13).

Un proyecto futuro, en colaboración con ingenieros de la planta OTEC de Okinawa, Japón es la construcción de una planta OTEC *off-shore* que generará 100 MW de energía eléctrica, la cual se distribuirá a un aproximado de 120,000 hogares hawaianos, tomando agua de fondo de 1000 m de profundidad y agua superficial a 18 m y descargando agua a 100 m con una temperatura de 16°C.



**Figura 13. Ubicación de la planta *onshore* OTEC de Hawaii, Estados Unidos (García Huante, 2015)**

#### 1.4.5. Isla de la Reunión

La penúltima planta en funcionamiento se localiza en la Isla de La Reunión, perteneciente al Territorio de Ultramar francés, equipada para generar una potencia eléctrica de 15 kW. Sin embargo, en este momento no está operando pues los investigadores de la empresa Naval Group se están enfocando en mejorar la eficiencia de los intercambiadores de calor y de los ciclos de trabajo, por lo cual las tuberías para bombeo de agua superficial y profunda no son utilizadas. Se pronostica un crecimiento de la planta a mediano plazo para abastecer la demanda energética de la región (Figura 14) (Gautret *et al.*, 2009; Martins *et al.*, 2013).



**Figura 14.** Ubicación de la planta *onshore* OTEC (Naval Group) en la Isla de La Reunión, Francia (territorio de ultramar africano). (Garduño-Ruíz *et al.*, 2017)

#### 1.4.6. Tuticorin

La última planta en funcionamiento se encuentra en La India que tiene una capacidad de generación de 1 MW y que fue construida por la National Institute of Ocean Technology (NIOT) en el año 2000 (OES Annual Report, 2017). Es una planta OTEC de tipo offshore (flotante a partir de un buque) que se localiza a menos de 1 km de distancia con respecto de la ciudad de Tuticorin, en el estado de Tamil Nadu y suministraba energía eléctrica (hasta 2001 cuando un tifón destruyó parte de la instalación); actualmente la planta se utiliza para la producción de agua potable (Figura 15). Hasta este momento, es la planta OTEC de mayor generación eléctrica que ha operado en el mundo. Durante el VII Symposium OTEC del 2019, la directora Purnima Jalihal recibió el Premio OTEC Uehara por sus esfuerzos por mantener la tecnología vigente en su país y por su divulgación en todo el mundo.



**Figura 15. Planta flotante OTEC de la India (NIOT) cerca de la ciudad de Tuticorin (Nipponia, 2004)**

## **1.5. Proyectos en fase de construcción y en fase de diseño.**

El interés por el desarrollo de esta tecnología ha permitido la investigación para el mejoramiento de la eficiencia energética y el desarrollo de plantas de mayor capacidad de energía, aunque es importante señalar que se requiere más conocimiento en aspectos de seguridad y de vida media de las instalaciones, esto en virtud que se empiezan a proyectar plantas offshore de hasta 500 MW y existen riesgos debido a condiciones climatológicas (tales como huracanes, tifones o tormentas eléctricas) y oceanográficas (García-Huante, 2015).

### **1.5.1. Chennai, La India (NIOT)**

En el caso hindú, el proyecto es llevado a cabo por el National Institute of Ocean Technology (NIOT) para entrar en operaciones en 2020 en la costa de Tamil Nadu, cerca del puerto de Tuticorin, al sureste. La elección de este sitio se debe a que, en más de 40 años, ningún tifón ha azotado la zona, así como por el hecho de contar con las condiciones geográficas y oceanográficas pertinentes (Ravindran, 2018).

Como parte de las actividades relacionadas con la conversión de energía térmica oceánica, se ha establecido un laboratorio de última generación para llevar a cabo estudios sobre varios componentes de OTEC y desalinización térmica de baja temperatura (LTTD). Esta instalación está ubicada dentro del campus de NIOT en Chennai. La configuración de prueba está equipada con un sistema de bombeo y almacenamiento de agua de mar con una capacidad de 60 m<sup>3</sup>.

Las temperaturas requeridas de la superficie del mar y de las profundidades del mar se mantienen utilizando un calentador y enfriador de aceite. Los estudios sobre LTTD, OTEC de ciclo abierto y OTEC de ciclo cerrado se pueden llevar a cabo en esta configuración de prueba junto con combinaciones de ellos. El equipo de proceso para esta configuración ha sido desarrollado localmente, y eso incluye una turbina para ciclo cerrado que funciona con el fluido R134a y una turbina para ciclo abierto que funciona

con vapor flash. La instalación se inauguró el 13 de noviembre de 2017 al margen de la reunión del Comité Ejecutivo de la AIE-OES celebrada en Chennai (OES Annual Report, 2018) (ver figura 16).



**Figura 16. Laboratorio de Energía y Agua Potable del campus Chennai de la National Institute of Ocean Technology**

### 1.5.2. Chabahar, Omán

En el caso Omán, existe el proyecto para diseñar una planta de 5 MW aprovechando un diferencial térmico de  $22^{\circ}\text{C}$  en las costas del puerto de Chabahar a 33 km. Con esta planta en operación se espera tener una producción eléctrica neta de 3.52 MW con un costo de \$0.117 por kW, que es un precio aceptable en comparación con otras tecnologías. De esta manera, buscan abatir las carencias eléctricas además de exportar el excedente a la parte sur de la costa de Irán. De conseguirlo, sería la primera planta OTEC comercial en operación a nivel mundial (Sina Hamedi y Sadeghzadeh, 2017).

### 1.5.3. Yabucoa, Puerto Rico

Otro proyecto que se está llevando a cabo es en Yabucoa, Puerto Rico (sureste de la isla) donde se pretende construir una planta OTEC que genere 500 kW por medio de la iniciativa privada. El Departamento de Desarrollo Económico y Comercio del país caribeño reveló el 26 de febrero de 2020 un plan para desarrollar el Complejo

Tecnológico Oceánico de Puerto Rico (PROtech), un parque tecnológico para generar energía térmica oceánica y promover otras iniciativas ecológicas, a un precio de USD \$300 millones de dólares.

De acuerdo con el plan maestro y el plan de diseño de la planta, se cree que esta comience a operar en el 2025 por etapas de cinco años (2021-2025). De realizarse, Puerto Rico sería la primera en el Mar Caribe en implementar esta tecnología.

#### 1.5.4. República de Kiribati (KIOST, Corea del Sur)

Actualmente, el proyecto más ambicioso se desarrolla en Corea del Sur. Se presentó el nuevo prototipo OTEC en el muelle Wooam de la ciudad de Busan, el 28 de septiembre de 2019 que generará una potencia eléctrica bruta de 1 MW. Esto la convierte en la segunda planta offshore precomercial, la cual será trasladada a la República de Kiribati para su operación y convierte a Corea del Sur en líder indiscutible de esta tecnología (Ho Jung *et al.*, 2017) (ver Figura 17).

Finalmente, en la figura 18 se observan los diferentes proyectos mundiales a partir de esta tecnología.



Figura 17. Prototipo OTEC de 1 MW en el muelle Wooam, Busan, Corea del Sur (fotos del autor)

Las plantas OTEC también presentan innovaciones como la generación de subproductos secundarios que pueden mejorar perceptiblemente la viabilidad económica de este sistema bajo condiciones financieras favorables. Los beneficios potenciales para las comunidades tropicales que se pueden aprovechar son: agua potable a partir de diversos procesos previos al agua profunda oceánica, aire acondicionado a partir de la temperatura del agua fría, conocido como sistema SWAT, agricultura de agua fría (ColdAg) cuyo proceso consiste en aprovechar el gradiente térmico ambiental para cultivar y cosechar frutos y vegetales de zonas templadas en zonas sub y tropicales como se hace tanto en Hawaii como en Goseong, acuicultura de especies oceánicas de agua fría o de especies propias de la zona y la producción de hidrógeno, entre otras la producción de sal, sanitizado de productos alimentarios, producción de hielo, producción de metanol, etc. (Aviña-Jiménez, 2007; García-Huante, 2015).

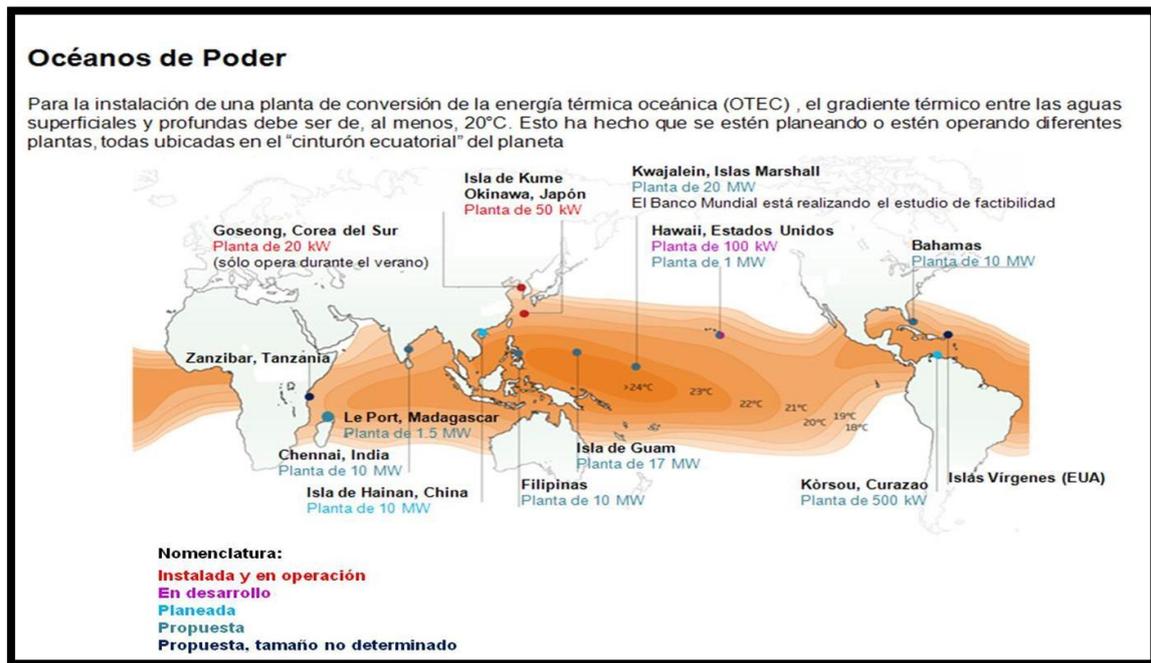


Figura 18. Proyectos actuales y en operación de plantas OTEC en el mundo (García-Huante, 2015)

## 1.6. OTEC en México

De acuerdo con los trabajos de Crews (1997), se determinó que el país tiene el potencial para que este recurso sea debidamente aprovechado con fines de generación de energía eléctrica y el aprovechamiento de beneficios secundarios, como generación de agua potable, aire acondicionado, acuicultura de especies de zonas frías y agricultura de agua fría; esto es debido a que se encuentra en una de las zonas donde el gradiente térmico no varía significativamente durante todo el año (la franja de 22°C, ubicada desde el puerto de Mazatlán hasta Puerto Chiapas), ubicando sitios como Puerto Vallarta, Jalisco, la zona sur de Guerrero y Puerto Ángel, Oaxaca.

Anteriormente a los trabajos de Crews, en México se realizaron investigaciones de OTEC gracias a los ingenieros Lönhberg (1960) y Vázquez de la Cerda (1970-1984). Los más importantes fueron los de este último, sobre todo en la zona del Mar Caribe, determinando los puntos de la isla de Cozumel y Banco Chinchorro como prioritarios para esta tecnología, además del proyecto ATL-KIU (agua-energía en lengua náhuatl) que tuvo

como objetivo la instalación de una planta en la isla Socorro del Archipiélago de las Revillagigedo por parte del Instituto Politécnico Nacional (IPN) (Garduño-Ruíz *et al.* 2017).

Posteriormente, a partir de retomar los trabajos del Dr. Vázquez de la Cerda en el 2003, el doctor Miguel Ángel Alatorre Mendieta realizó diversas investigaciones y experimentos a nivel laboratorio acerca de OTEC y colaboró en proyectos de tesis en el Instituto de Ciencias del Mar y Limnología (ICMyL) de la UNAM, donde Aviña-Jiménez (2007), Bárcenas-Graniel (2014) y García-Huante (2015) han confirmado que las condiciones geográficas de algunos sitios del Océano Pacífico mexicano y del Mar Caribe son favorables para la instalación de plantas OTEC. Desde ese momento se comenzó a integrar un equipo de trabajo para el estudio de esta tecnología en el país y su posible implementación, consolidándose en enero del 2017 con la creación del Centro Mexicano de Innovación en Energía Oceánica (CEMIE-Océano).

A partir de entonces, se han trabajado dos objetivos claros: el estudio del potencial de esta tecnología en los mares mexicanos, divididos en dos vertientes, el Pacífico mexicano (con el apoyo de la Universidad Autónoma de Baja California Sur, el Instituto de Ciencias del Mar y Limnología y el Instituto de Ingeniería de la UNAM), el Golfo de México y Mar Caribe (con el apoyo de la Universidad del Caribe y el Instituto de Ciencias del Mar y Limnología), así como la realización del primer prototipo OTEC mexicano de ciclo cerrado que producirá 1 kW el cual se está maquilando en las instalaciones de la Universidad del Caribe bajo la dirección de la Dra. Estela Cerezo Acevedo (Figura 19).

De esta manera, México da el primer paso para ser el segundo país de América (el primero a nivel continental) en probar esta tecnología a mediano plazo.





**Figura 19. Prototipo OTEC de 1 kW en el Laboratorio de Ingeniería de la Universidad del Caribe, Quintana Roo, México**

## **1.7. Objetivo general**

Evaluar el gradiente térmico oceánico en la vertiente del Pacífico mexicano y colaborar en la elaboración del Atlas Nacional de Gradiente Térmico para los mares mexicanos, con el fin de identificar los sitios más convenientes para la posible extracción de energía asociada a esta tecnología.

## **1.8. Objetivos particulares**

- ✓ En condiciones presentes, evaluar desde la zona superficial hasta los 1000 m de profundidad la temperatura del área de estudio.
- ✓ Caracterizar las variables asociadas a los cambios de la diferencia de temperatura en la zona del Pacífico mexicano, así como analizar los beneficios potenciales por la instalación y operación de una planta OTEC.
- ✓ Evaluar la variabilidad estacional de la diferencia de temperatura para la determinación de la eficiencia de una planta OTEC en el Pacífico mexicano y así poder identificar la ubicación de los sitios con mayor potencial en las que se pueden construir y operar dicha instalación.
- ✓ Obtener los sitios del Pacífico mexicano donde se cumpla la distancia mínima óptima a partir de la línea de costa (10 km), para la ubicación más conveniente para emplazar una planta OTEC.
- ✓ Evaluar la persistencia de la diferencia de temperatura en la vertiente del Pacífico mexicano anual y estacionalmente con el fin de obtener zonas prioritarias donde la variación sea mínima, con el fin de implementar el sistema OTEC.
- ✓ Establecer el potencial eléctrico de este sistema en el Pacífico mexicano, así como la posible producción de agua potable.
- ✓ Calcular el factor de planta de un sistema OTEC de 100 MW de generación eléctrica en áreas de interés del Pacífico mexicano.

## **1.9. Hipótesis**

México cuenta con zonas marinas no identificadas que cumplen con las condiciones de gradiente térmico y distancias susceptibles de ser aprovechadas para la generación de energía. El análisis de éstos nos permitirá localizar los sitios geográficos más adecuados para la instalación y operación de una o varias plantas OTEC en el Pacífico mexicano.

## 2. Metodología

A continuación, se hace una descripción del área de estudio, haciendo énfasis en parámetros como temperatura y salinidad.

### 2.1. Descripción del área de estudio

#### 2.1.1. Océano Pacífico Tropical mexicano

En el contexto del sistema OTEC, esta zona fue descrita con anterioridad por el doctor Vázquez de la Cerda, entre los años de 1970 a 1984 donde buscó implementar la tecnología en la isla Socorro del archipiélago de las Revillagigedo (Colima) pero únicamente realizó el informe técnico dentro del proyecto llamado ATL-KIU auspiciado por el Instituto Politécnico Nacional (IPN). Desde entonces el tema no fue retomado sino hasta el 2007 con la tesis del Dr. Aviña-Jiménez que planteó al Océano Pacífico mexicano como un sitio potencial para la implementación de esta tecnología, determinando dos zonas en particular: Los Cabos en Baja California Sur y Bahía Banderas en Jalisco.

Posteriormente, de acuerdo con el trabajo de García-Huante (2015) se determina que el estado de Oaxaca, en particular Puerto Ángel, es una zona potencial para este sistema además de ser el primero en generar la simulación de los posibles efectos oceanográficos y biológicos que pudiesen existir por la descarga de agua de una planta de alta generación de energía (100 MW) y, posteriormente, otros trabajos han confirmado estos resultados y ampliado los sitios potenciales por lo que el área se ha vuelto estratégica para la instalación y operación de una planta OTEC.

La importancia de esta zona para la implementación del sistema OTEC es porque comprende áreas donde la diferencia de temperatura entre la zona superficial y la profunda es mayor a los 20°C durante gran parte o todo el año, sitios potenciales donde la distancia de bombeo de agua profunda es menor a los 10 km, comunidades costeras donde existe un déficit eléctrico considerable además de un rezago social importante (Hernández-Fontes *et al.*, 2019).

Geográficamente, se extiende de 14° N a 32° N, abarcando el Golfo de California (GC) y las regiones de surgencia frente a las costas de Baja California, Jalisco y Colima y Oaxaca. La riqueza y singularidad de esta región es atribuible a su ubicación geográfica y la presencia de una variedad de climas atmosféricos y oceánicos (Chiappa-Carrera *et al.*, 2020). La costa del Pacífico de México forma el 68% de la costa del país y comprende varias ecorregiones diferentes a nivel local, a nivel regional y mundial, y por lo tanto una gama particularmente amplia de hábitats (Lara-Lara *et al.*, 2008). Es una subregión dinámica y compleja dentro del bien estudiado “Pacífico Tropical Oriental” (East Tropical Pacific).

Su oceanografía ha sido explorada desde principios del siglo XIX y se describen diversas características oceanográficas contrastantes. Tiene importantes regiones de surgencia costera, y está influenciado por las corrientes fronterizas del este y las condiciones variables del viento, particularmente en el sur donde los vientos extremadamente fuertes, canalizados entre las cordilleras del sur de México, modifican la dinámica oceánica. En

su sección media, las masas de agua distantes convergen en el Golfo de California donde el régimen de micromareas se intensifica.

La región presenta dinámicas muy variables tanto estacional como interanual, por lo que se le ha dividido en cuatro regiones, las cuales son: Noroeste del Pacífico, Golfo de California, Región Central del Pacífico Mexicano (en lo que se denomina “Alberca Cálida del Pacífico mexicano”) y Región Sur del Pacífico Mexicano (en la región del Golfo de Tehuantepec) (Chiappa-Carrera *et al.*, 2020) (Figura 20).



**Figura 20. Océano Pacífico mexicano (del autor)**

### 2.1.2. Temperatura y salinidad en el Océano Pacífico mexicano

Los parámetros en estudio son importantes para el funcionamiento del ciclo OTEC, pues depende de éstos para una buena eficiencia energética y para analizar un posible efecto de contaminación térmica asociado a modificaciones de la temperatura y la salinidad en la zona de descarga del agua de desecho. El Pacífico mexicano presenta diferencias significativas en estos parámetros, mismas que a continuación se abordan.

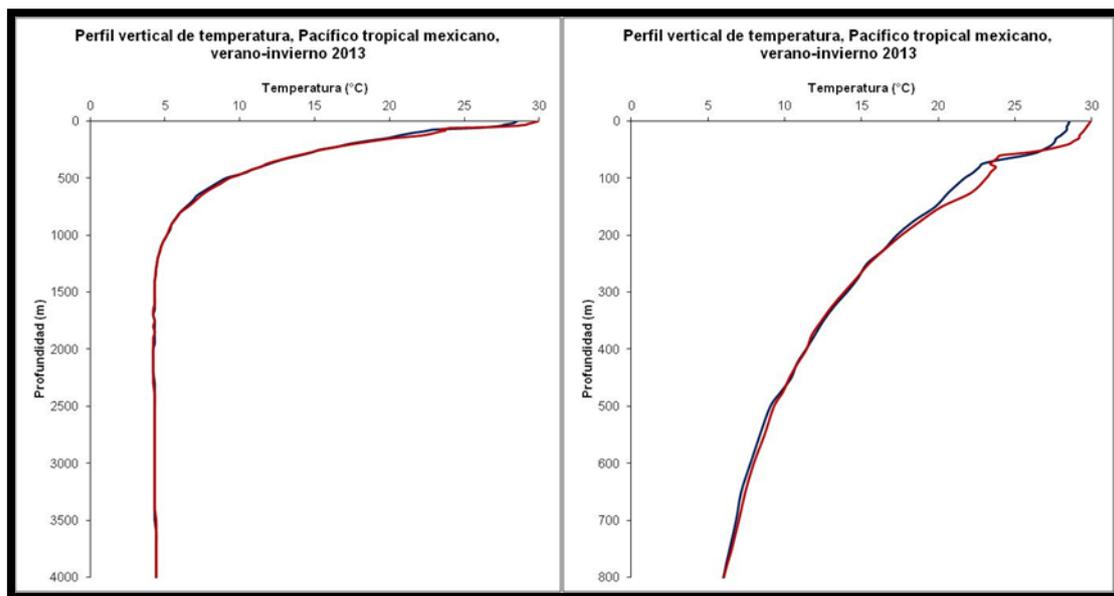
La estructura térmica del Pacífico Tropical Este (también conocida como Pacífico Oriental Tropical) se caracteriza por una capa de mezcla donde la temperatura es casi constante; una termoclina con un cambio térmico muy fuerte y una capa subsuperficial donde decrece, pero con intervalos mucho menores que en la termoclina (Tchernia, 1980; Amador *et al.* 2006; Fiedler y Talley, 2006).

Esta región no se define por una sola cuenca oceánica, masa de agua o ecosistema. Es un área entre los giros subtropicales del Pacífico Norte y Sur que contiene tanto el término “Este” del actual Sistema Ecuatorial del Pacífico (Kessler, 2006) y la “Alberca Cálida” de la parte del Pacífico Oriental, que forma la mitad de la “piscina” de agua caliente occidental en la región de Centroamérica (Fiedler y Talley, 2006).

Corrientes limítrofes orientales fluyen en la región desde el norte (Corriente de California) y sur (Corriente del Perú o de Humboldt). La parte oriental del Pacífico Tropical es importante por sus papeles en la variabilidad del clima debido al efecto de “El Niño” -o ENSO-, en la producción de peces, y en el ciclo global del carbono (Fiedler y Talley, 2006).

La variación anual de la temperatura superficial fluctúa entre 26 y 30°C (Fiedler y Talley, 2006). La intrusión de Agua Superficial Subtropical propicia cambios anuales de 5°C o más en el área cercana a Cabo Corrientes, mientras que en el Golfo de Tehuantepec oscilan entre 3 y 4°C. Las aguas cálidas del Pacífico Tropical están sujetas a un calentamiento superficial y promueve la convección, y consecuentemente, un proceso de mezcla constante con una extensión vertical de la capa de mezcla de 20 a 50 m. En relación con esta capa, se encuentra la termoclina que se caracteriza por ser somera y permanente (Wyrki, 1965; Fiedler y Talley, 2006; Araico-González, 2012).

Los datos graficados en la parte inferior (Figura 21), fueron obtenidos del World Ocean Atlas Database 2017 de la NOAA, teniendo mediciones desde 1955 hasta el 2017 en diferentes puntos geográficos del Océano Pacífico mexicano, desde la zona superficial hasta los 4000 m de profundidad.



*a) Perfil vertical a 4000 metros*

*b) Acercamiento a 800 metros*

**Figura 21. Perfil vertical de temperatura estacional promedio (verano-invierno) del Pacífico Tropical Oriental (Pacífico Tropical Mexicano) durante el año 2013.**

**Fuente: World Ocean Atlas Database 2013 de la NOAA**

**Nomenclatura: líneas rojas representan os valores de temperatura durante los meses de verano, líneas azules representan los valores de temperatura durante los meses de invierno.**

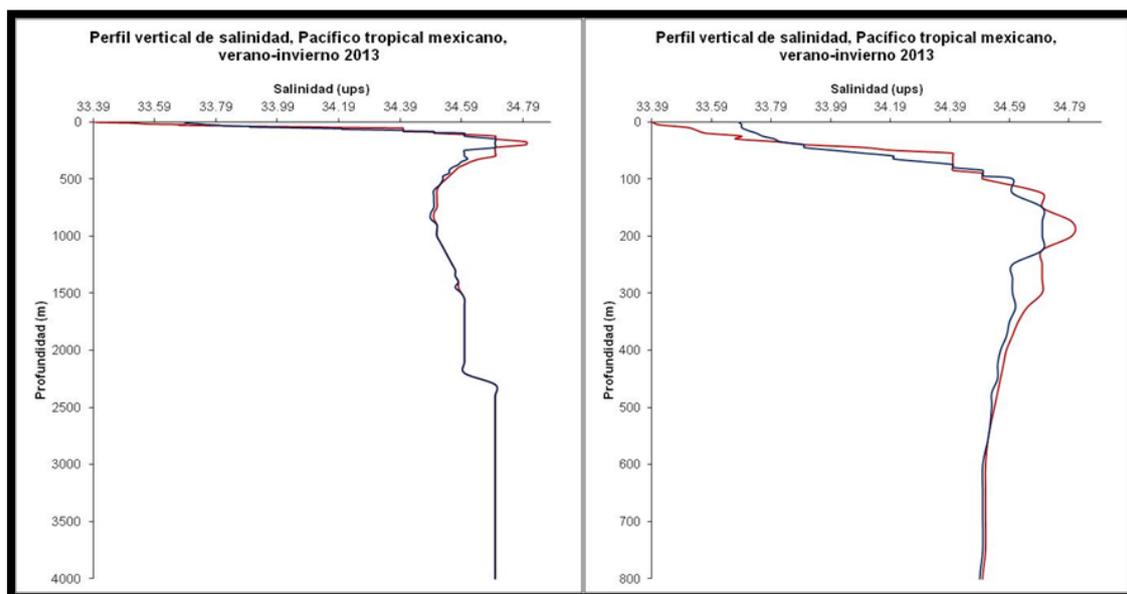
Para la distribución de temperatura y salinidad en el Pacífico, se observa de manera sensible el incremento de la primera hacia el sur y la diferencia de la siguiente con la latitud, las cuales se originan por la presencia de las corrientes oceánicas; esta variación horizontal es debida a las masas de agua. En el caso de la temperatura, las mediciones llegan en superficie entre los 30° y 31°C dándose a partir de las costas de Sinaloa hasta Chiapas en la parte sur del país. En cuanto a la salinidad, de acuerdo con autores como

Trasviña (2016), Araico-González (2012), Alatorre (2019), entre muchos otros, mencionan que este parámetro varía de acuerdo con la latitud.

En la parte sur se presentan salinidades más altas debido a que son zonas de mayor temperatura y, por lo tanto, de mayor evaporación en la zona superficial. A pesar de esto, cabe mencionar que estos cambios se dan mes con mes y que, debido a esto, no existe una haloclina vertical patrón de la salinidad en el Pacífico mexicano (De la Lanza, 1994).

En las costas del Pacífico Oriental Tropical la temperatura superficial en febrero es de 28°C y de 15°C a 100 m de profundidad; en abril varía de 28.5°C en superficie a 14°C a los 100 m. La termoclina es patente entre los primeros 10 a 20 m, con poca variación respecto de la profundidad (aproximadamente de 0.17°C m<sup>-1</sup>).

La salinidad se eleva de un mes a otro y con la profundidad desde los 34 ups en superficie a 34.7 ups a los 100 m y de 34.4 ups (superficie) a 34.9 ups (100 m), para febrero y abril respectivamente (De la Lanza, 1994; Araico-González, 2012) (Figura 22). Es por esto que la salinidad en el POT no presenta un perfil vertical normal de este parámetro pues existen altas y bajas mes a mes.



a) Perfil vertical a 4000 metros

b) Acercamiento a 800 metros

**Figura 22. Perfil vertical de salinidad estacional promedio (verano-invierno) del Pacífico Tropical Oriental (Pacífico Tropical Mexicano) durante el año 2013.**

**Fuente: World Ocean Atlas Database 2017 de la NOAA**

**Nomenclatura: líneas rojas representan los valores de salinidad durante los meses de verano, líneas azules representan los valores de salinidad durante los meses de invierno.**

Debido a la poca amplitud de la plataforma continental (12 km) y a la ausencia de descargas de ríos (a excepción del río Balsas), la estructura termohalina de las costas de Guerrero es similar a la de las aguas oceánicas. El Golfo de Tehuantepec se caracteriza por una distribución heterogénea de la temperatura superficial debida al efecto del viento. En invierno las temperaturas superficiales del mar son bajas donde las velocidades del viento son altas y también en las regiones inmediatamente adyacentes, lo cual indica que hay una difusión de agua fría hacia las áreas vecinas. Durante el verano los vientos son

generalmente débiles y soplan en una dirección oriental; las temperaturas varían entre 28 y 30°C (Roden, 1961; Trasviña *et al.* 2002; Fiedler y Talley, 2006; Araico-González; 2012).

En el verano, también es evidente el decremento de la temperatura de la costa hacia mar abierto, así como con la profundidad, con una termoclina entre 90 y 100 m de profundidad. La distribución vertical de la salinidad exhibe un máximo de 38 ups y un mínimo de 27.2 ups para la región costera (Fiedler y Talley, 2006).

## **2.2. Obtención de datos**

Para el estudio se utilizaron datos meteorológicos y oceanográficos, los cuales se dividieron en tres grandes grupos: datos tomados en campo (*in situ*) en dos localidades del océano Pacífico mexicano (Marina Cruz de Huanacastle, Nayarit y Puerto Ángel, Oaxaca); datos por teledetección satelital, obtenidos de la base de datos del Sistema de Información y Análisis Marino Costero de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (SIMAR-CONABIO) y datos climatológicos globales, a partir de las bases del World Ocean Atlas Database (WOA) de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).

Los detalles de cada uno a continuación.

### **2.2.1. Datos de campo**

Los datos tomados en campo se obtuvieron por medio de la colocación de termistores NTC (Thermally Sensitive Resistor, Negative Temperature Coefficient) HOBO Water Temp Pro v2 (OnSet HOBO Data Logger Manual, 2016) en sitios de interés, tanto en Bahía de Banderas, Jalisco, como en Puerto Ángel, Oaxaca. Este aparato registra la temperatura con una precisión de  $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ , midiendo este parámetro entre los  $-40$  y  $70^{\circ}\text{C}$  en aire y hasta  $50^{\circ}\text{C}$  en agua (hasta una profundidad de 120 m).

Las mediciones se realizaron tal como se muestra en la Tabla I en las dos zonas (Figuras 23 y 24). Los datos analizados fueron los promedios diarios nocturnos de temperatura superficial (NSST) para evitar los errores por luminosidad y tener datos comparables estadísticamente con las otras bases de datos analizadas. Esto con el fin de analizar el comportamiento de la temperatura en dichos sitios pues, de acuerdo con Rajagopalan y Nihous (2013), la mayor variabilidad de este parámetro se encuentra en la zona superficial.

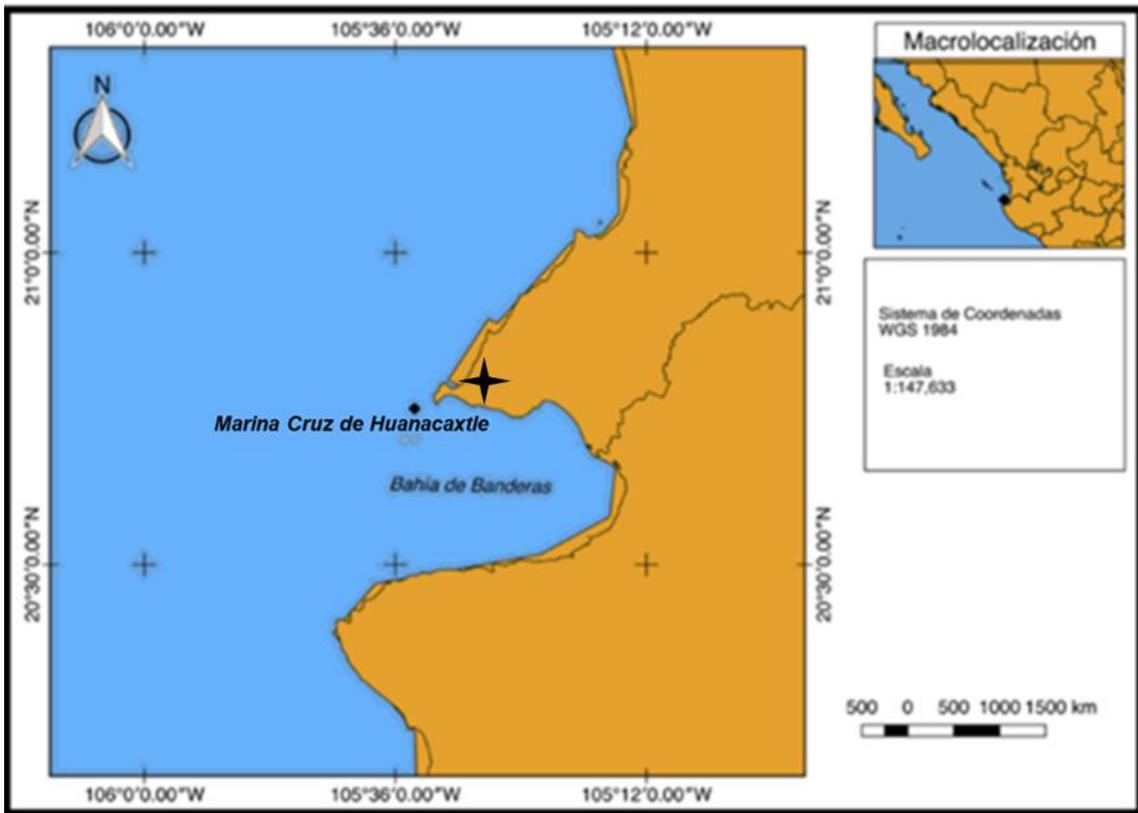


Figura 23. Localización de Marina Cruz de Huanacaxtle, Nayarit. El punto negro corresponde al sitio de medición ( $20^{\circ}44'57.9''N$   $105^{\circ}32'23.5''W$ ).

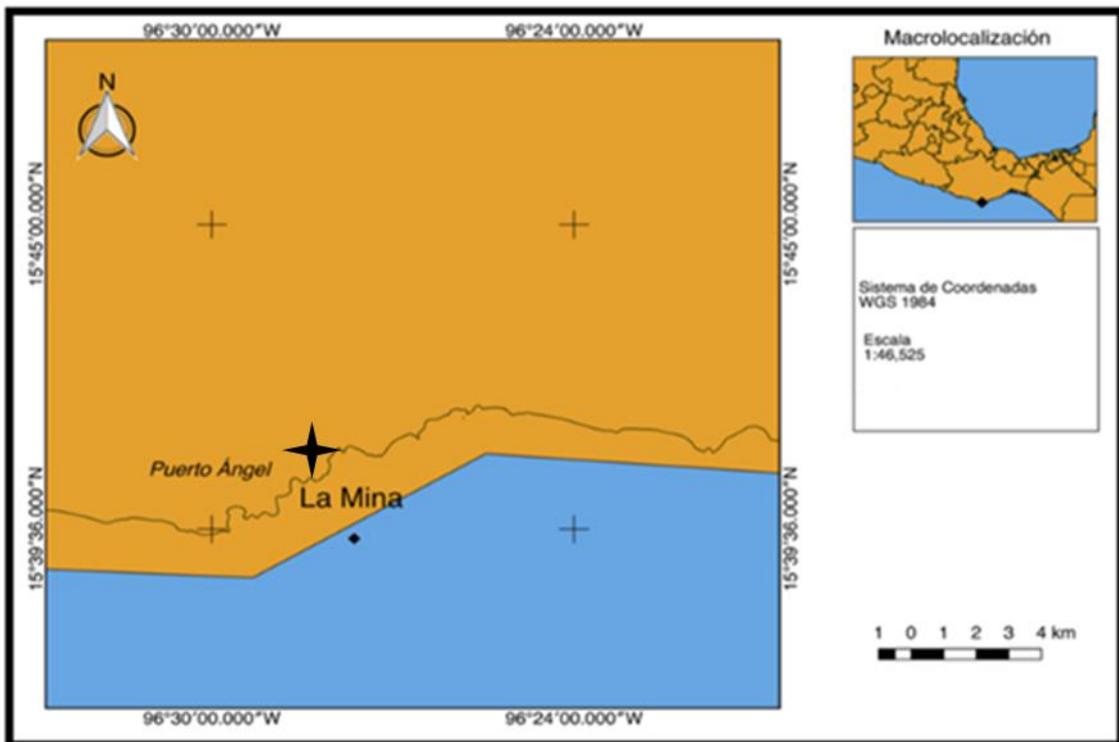


Figura 24. Localización de playa La Mina, en el poblado de Puerto Ángel, Oaxaca. El punto negro corresponde al sitio de medición ( $15^{\circ}40'11.2''N$   $96^{\circ}28'29.5''W$ ).

**Tabla I. Medición de temperatura superficial marina *in situ***

Sitio	Intervalo de tiempo	Ciclo	Profundidad
La Mina	10 minutos	6 meses	1-5 m
Marina Cruz de Huanacastle	10 minutos	1 año	4 m

### 2.2.2. Datos satelitales

El Sistema Satelital de Monitoreo Oceánico (SATMO) está integrado al Sistema de Información y Análisis de Ecosistemas Marinos de México (SIMAR) y es desarrollado por la Comisión Nacional para el Conocimiento y el Uso de la Biodiversidad (CONABIO) ([www.simar.conabio.gob.mx](http://www.simar.conabio.gob.mx)) de México.

Los datos que se utilizaron fueron los de Temperatura Superficial del Mar Nocturno diario (NSST), los cuales presentan una resolución espacial de entre 1 a 5 km ( $0.01^{\circ}$ - $0.05^{\circ}$ ) y una cobertura temporal diaria del 1 de enero de 1985 hasta la actualidad, divididos en datos a partir de teledetección satelital y datos *in situ* por medio de dos reanálisis denominados OSTIA y GHRSSST-MUR. Los motivos para el uso de estos datos fue la comparación estadística con los datos de los termistores, así como establecer si los satélites realmente contenían datos de temperatura superficial de los sitios de estudio.

El primero de los reanálisis (OSTIA) se basa en datos de campo del ICOADS, AVHRR Pathfinder y las series de multiemisión Along Track Scanning Radiometer (ATSR) con una resolución espacial de 5 km ( $0.05^{\circ}$ ) y una cobertura temporal diaria del 1 de enero de 1985 al 31 de mayo del 2002, donde se hace una interpolación óptima a múltiples escalas y los datos se filtran para evitar la variabilidad diurna. El corte de datos diurnos se efectuó con base en el horario de amanecer-atardecer de los dos sitios, en promedio entre las 6:45 o 7:45 de la mañana hasta las 6:45 o 7:45 de la tarde (dependiendo del huso horario que operara en ese momento).

El segundo (GHRSSST-MUR) se produce operacionalmente con datos de temperatura superficial del mar retrospectivos (de 4 días) y en tiempo casi real (de un día) desde el 1 de junio de 2002 hasta el último día nocturno registrado en el presente año y está basado en la interpolación optimizada para una rejilla de  $0.01^{\circ}$  sobre las observaciones de la temperatura nocturna de la superficie marina a partir de los siguientes sensores satelitales: NASA Advanced Microwave Scanning Radiometer-EOS (AMSR-E) del satélite Aqua de la NASA, Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) sobre los satélites Aqua y Terra de la NASA, US Navy Microwave WindSat Radiometer del satélite Coriolis, Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR-3) sobre el satélite NOAA-18, y de observaciones *in situ* de la temperatura del mar derivado del Proyecto NOAA iQuam.

### 2.2.3. Datos climatológicos globales

Se tomaron datos de temperatura superficial marina (TSM) con una resolución temporal mensual, estacional y anual. El World Ocean Atlas (WOA) presenta una resolución espacial de  $1^{\circ}$  (100 km) y  $\frac{1}{4}^{\circ}$  (25 km) y una cobertura temporal desde 1955 hasta 2017, teniendo como referencia la media climatológica y campos estadísticos como la media estadística, la desviación estándar, el error estándar de la media y el número de observaciones, entre otros.

En el caso particular, se obtuvieron datos de temperatura del mar mensuales, estacionales y anuales de toda la cuenca del Océano Pacífico mexicano para las distintas profundidades (hasta 5500 m), tomándose como base para la generación de los mapas.

### 2.3. Análisis estadístico y comparativo de bases de datos y datos *in situ*

Una vez obtenidos los datos, se hizo un análisis comparativo y estadístico entre los tres tipos de datos con el fin de comprobar si no existen diferencias significativas y definir cuál o cuáles pudieran ser los más viables para determinar sitios de interés para la implementación de OTEC en el Océano Pacífico mexicano (Tabla II).

En la figura 25 se observa en resumen los análisis realizados para las bases de datos utilizadas

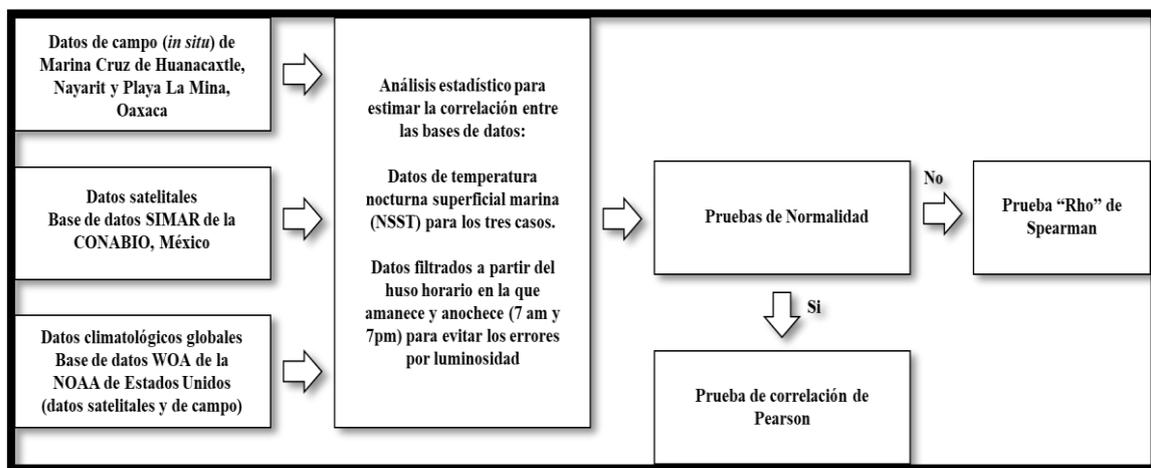


Figura 25. Diagrama de flujo del análisis estadístico para las bases de datos

Tabla II. Comparación de la Temperatura Superficial Marina

Base de datos	Sitios	Tipo de dato	Ciclo temporal	Temporalidad
SATMO- <i>in situ</i> -WOA	Marina Cruz de Nahuacastle/La Mina	Temperatura Superficial del Mar Nocturna (promedio de cuatro días)	Anual/cuatro meses	Abril 2017-2018/Junio - Septiembre 2018
SATMO-WOA	Pacífico mexicano	Temperatura Superficial Mensual Promedio	Multianual	2002-2017

Una vez que se hicieron las comparaciones, se realizó el análisis estadístico correspondiente, el cual, debido al tipo de datos comparables, se determinó que fuera un análisis de correlación múltiple.

De acuerdo con Díaz-Agero (1999), el análisis estadístico de correlación múltiple, también conocido como análisis de regresión múltiple, permite establecer la dependencia

de una variable (variable dependiente) de varias otras variables, también conocidas como variables independientes. Este análisis parece situaciones de análisis real debido al fenómeno, los hechos y los problemas biológicos y sociales son complejos por definición. En consecuencia, esos procesos deben explicarse por variables que influyen en ellos.

El análisis de correlación múltiple calcula las diferencias entre WOA, SATMO y las bases de datos *in situ*. Anteriormente, una prueba de normalidad con XLSTAT Excel 2016 (Addinsoft, 2017) determinó el método estadístico correcto para aplicar durante la correlación múltiple; esto es debido a que estas pruebas se aplican para visualizar si presentan un comportamiento de tipo Gaussiano o parecida a una distribución normal y, con ello, determinar la prueba de correlación para los datos analizados.

Finalmente, la prueba de correlación Spearman "rho" (Kenney y Keeping, 1951) se utilizó para el análisis de correlación múltiple.

Además, se calcularon los parámetros estadísticos para las tres bases de datos. Los tres grupos de datos se correlacionaron entre sí, como se muestra en la Tabla III, para estimar la diferencia entre los valores de TSM.

**Tabla III. Grupos de datos para el análisis de correlación múltiple**

Base de datos	Tipo de dato	Temporalidad
SATMO- <i>in situ</i>	Temperatura Superficial del Mar Nocturna	Diaria
SATMO-WOA	Temperatura Superficial Mensual Promedio	Mensual
WOA- <i>in situ</i>	Temperatura Superficial Mensual Promedio	Mensual

### **2.3. Representación gráfica de la temperatura, de acuerdo con el perfil vertical (0-1000 m de profundidad).**

Una vez compilados los datos y realizado el análisis comparativo, se analizaron los perfiles verticales correspondientes a la temperatura con el fin de observar las diferencias en la columna de agua de acuerdo con la profundidad y, calcular la diferencia de temperatura. Una vez calculado, se determinó el comportamiento histórico de este parámetro en el Pacífico mexicano.

### **2.4. Análisis e interpretación de datos por Sistemas de Información Geográfica (SIG).**

Para el análisis se ocupó el programa ArcGIS 10.3 (ESRI Inc., 2016) por medio del sistema de almacenamiento "raster", el cual funciona para datos de tipo continuo como lo es la distribución de temperaturas, análisis de nutrimentos, entre otros. Este tipo de representación es a manera de utilización de mallas pues divide el espacio en celdas regulares donde cada una de ella representa un valor único.

Con el propósito de hacer los estudios de ingeniería necesarios para la instalación de tuberías para extracción de agua fría y caracterizar la diferencia de temperaturas entre la

zona superficial y los 1000 m de profundidad, se utilizó la información de mapas topobatimétricos para la zona del Pacífico mexicano. Se utilizaron datos para referenciar topografía y batimetría de las zonas propuestas por medio del uso de la base de datos de la National Geophysical Center (NGDC) de los Estados Unidos y por medio de las cartas batimétricas digitales del “proyecto submarino” del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) de México. Una vez recopilada la base de datos, se procedió a utilizar el programa ArcGIS, con el fin de realizar la captura de la base de datos y su análisis por medio de la técnica de geometría analítica.

El primer raster generado fue el de distancias de los diferentes poblados costeros a las zonas de 500 m, 750 y 1000 m de profundidad por lo que, utilizando diferentes herramientas del ArcGIS, se hicieron los cálculos para determinar los perfiles batimétricos de los diferentes puntos o localidades (para esto, se generó un segundo raster con las bases de datos de batimetría del Pacífico mexicano) así como la distancia entre los diferentes poblados y los sitios donde potencialmente se puede extraer agua fría profunda (hasta 1000 m de profundidad) y que estén a 10 km máximo de la línea de costa.

El tercer raster fue la base de datos de las temperaturas a 250, 500, 600, 750, 800 y 1000 m de profundidad para diferentes sitios del Pacífico mexicano dividido en tres zonas: Golfo de Tehuantepec, Alberca cálida del Pacífico mexicano y el Golfo de California y Noroeste del Pacífico y se calculó el gradiente térmico histórico para estas regiones. Posteriormente, utilizando el ArcGIS se determinaron las zonas donde existe el gradiente térmico adecuado para el funcionamiento de una planta OTEC lo cual, posteriormente, se plasmarán en diferentes mapas.

## **2.5. Descripción y comportamiento por estación climática**

Se analizó el comportamiento de los perfiles verticales de cada parámetro de acuerdo con la estacionalidad y la zona de estudio en cuestión. Esto debido a que cada parámetro se comporta de manera distinta en diferentes épocas del año en la región del Pacífico Tropical Oriental por lo que, en el caso del gradiente térmico oceánico, se deben analizar los sitios en los cuales la diferencia entre las capas de agua superficial y profunda no varían de 20°C o más durante la mayor parte del año. Los datos se obtuvieron de las bases ya mencionadas con anterioridad.

## **2.6. Elaboración de mapas de temperatura superficial**

La base de datos elaborada se trabajó en el software ArcGIS con el fin de hacer el análisis del comportamiento de la temperatura y el gradiente térmico en el Pacífico mexicano, de manera estacional.

Para esto, se seleccionaron los puntos de interés a la profundidad deseada, en este caso la zona superficial. Posteriormente, se hizo una transformación de estos datos a un sistema “raster” (este tipo de representación es a manera de utilización de mallas que divide el espacio en celdas regulares donde cada una de ella representa un valor único) y con este último realizar una interpolación “kriging” para obtener los datos de temperatura superficial estacional.

Esta interpolación presupone que la distancia o la dirección entre los puntos de muestra reflejan una correlación espacial que puede utilizarse para explicar la variación en la

superficie. De esta manera, ajusta una función matemática a una cantidad especificada de puntos o a todos los puntos dentro de un radio específico para determinar el valor de salida para cada ubicación (ArcMap, 2020).

Este método está basado en un proceso que tiene varios pasos, entre los que se incluyen, el análisis estadístico exploratorio de los datos, el modelado de variogramas, la creación de la superficie y (opcionalmente) la exploración de la superficie de varianza. Este método es más adecuado cuando se sabe que hay una influencia direccional o de la distancia correlacionada espacialmente en los datos. Se utiliza a menudo en la ciencia del suelo, la geología y para datos temporales y espaciales como el caso de la temperatura del mar (ArcMap, 2020).

Con esto, se ponderan los valores medidos circundantes para calcular una predicción de una ubicación sin mediciones. La fórmula general para ambos interpoladores se forma como una suma ponderada de los datos:

$$\hat{Z}(s_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(s_i)$$

Donde:

$Z(s_i)$  = el valor medido en la ubicación  $i$

$\lambda_i$  = una ponderación desconocida para el valor medido en la ubicación  $i$

$S_0$  = la ubicación de la predicción

$N$  = la cantidad de valores medidos

Por definición, las ponderaciones están basadas no solo en la distancia entre los puntos medidos y la ubicación de la predicción, sino también en la disposición espacial general de los puntos medidos. Para utilizar la disposición espacial en las ponderaciones, la correlación espacial debe estar cuantificada. Por lo tanto, en un kriging ordinario, la ponderación,  $\lambda_i$ , depende de un modelo ajustado a los puntos medidos, la distancia a la ubicación de la predicción y las relaciones espaciales entre los valores medidos alrededor de la ubicación de la predicción (ArcMap, 2020).

Esto mismo se realizó para obtener los mapas de gradiente térmico para el Pacífico mexicano. Se seleccionaron los rasters ya elaborados para diferentes profundidades (superficie, 500 m y 1000 m) y se generó una interpolación Kriging; esto se realizó debido a que los datos obtenidos tienen una distancia espacial de  $0.0125^\circ$  por lo que la separación entre diferentes puntos es aproximadamente de 1.3 km. Una vez obtenido los rasters interpolados se utilizó la herramienta matemática “minus” para obtener la diferencia térmica entre dos zonas establecidas y de esta manera tener el cálculo del gradiente térmico y plasmarlo en los esquemas correspondientes, tanto anual como estacional.

## 2.7. Elaboración de mapas para sitios de interés

Para esto se realizó otro raster que contenía la información de los diferentes poblados costeros del Pacífico mexicano junto con las distancias calculadas desde la línea de costa a los 1000 m de profundidad. Dicho raster se obtuvo por medio de la herramienta matemática de georreferenciación e interpolación kriging. Una vez hecho esto, se procedió a realizar el mapa correspondiente.

## 2.8. Elaboración de mapas para batimetría

Para esto se realizó otro raster que contenía la información de las diferentes isobatas costeras del Pacífico mexicano. Dicho raster se obtuvo por medio de la herramienta matemática de georreferenciación y análisis espacial y se colocó en un esquema previo de la República Mexicana por medio de herramientas de cartografía. Una vez hecho esto, se procedió a elaborar el mapa correspondiente.

Los mapas en el ArcGIS se realizaron por medio de la herramienta Layout View y se procedió a colocar los diferentes distintivos cartográficos: escala, rosa de norte, marco georreferencial y el texto de acuerdo al tipo de parámetro analizado. Se obtuvieron un total de 45 mapas de los cuales se agregan 18 en este reporte pues son los más representativos para los objetivos planteados en este trabajo.

## 2.9. Implementación para la elección del sitio para construcción y operación de una planta OTEC en México

Se utilizaron diferentes parámetros (oceanográficos, medioambientales, sociales y de ingeniería) para generar una matriz de decisión la cual, con base en los criterios fundamentales que requiere una planta OTEC para su instalación y operación, determinaría el sitio más adecuado en México para su construcción.

Los criterios fueron determinados a partir de estudios realizados por Avery y Wu (1994), Vega (2002, 2007 y 2010), Kim (2013) y los trabajos realizados por Vázquez de la Cerda en México (1964-1980), así como los usados en las tesis de Aviña-Jiménez (2007), Bárcenas-Graniel (2014) y García-Huante (2015).

Estos fueron:

### a) Oceanográficos

Distancia a la isobata de 1000 m de profundidad para la toma de agua fría.

Atributo: < 10 km (para plantas onshore, la distancia desde el punto de toma de agua fría a la línea de costa debe ser menor para evitar las pérdidas por transmisión de energía eléctrica), de acuerdo con Vega (2010) y Nihous (2013).

Gradiente Térmico para todo el Pacífico mexicano.

Atributos: GT Min P  $\geq$  24.50°C

GT Max P  $\geq$  25.50°C

GT Min V  $\geq$  24.58°C

GT Max V  $\geq$  25.20°C

GT Min O  $\geq$  23.15°C

GT Max O  $\geq$  23.59°C

GT Min I  $\geq 22.40^{\circ}\text{C}$   
GT Max I  $\geq 22.85^{\circ}\text{C}$

Nomenclatura: P (Primavera), V (Verano), O (Otoño), I (Invierno)

b) Ingeniería y procesos eléctricos

Distancia al nodo de distribución eléctrica

Atributo: = 14 km (es la distancia máxima existente entre la subestación eléctrica más cercana en alguno de los sitios de interés para la implementación del sistema OTEC en el Pacífico mexicano. La distancia máxima debe ser de 15 km de acuerdo con las normas de la Comisión Federal de Electricidad (2020), siempre y cuando sean subestaciones no industriales).

Consumo de los poblados de interés

Atributo:  $\leq 211.94 \text{ MW año}^{-1}$  (es el dato de mayor producción eléctrica que se puede generar en el Pacífico mexicano con el sistema OTEC).

c) Poblacionales

Viviendas sin energía eléctrica

Atributo:  $< 32.30\%$  (Una planta OTEC de 100 MW puede dar energía a un total de 100,000 viviendas en promedio, el porcentaje corresponde a ese valor. En este caso, se tiene que el porcentaje de viviendas sin electricidad en la zona costera del Pacífico mexicano es del 13.28%).

Ocupación hotelera

Atributo:  $> 22.45\%$  (si el área de interés es de gran importancia hotelera, y por lo tanto turística, con una planta OTEC se puede obtener aire acondicionado para las instalaciones, así como proveer agua potable).

Índice de paz (estados más o menos violentos)

Atributo:  $\leq 19$  (De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), este valor implica si una zona presenta índices altos, medios o bajos de violencia. Instalar una planta OTEC en un área con índices altos de violencia podría alejar considerablemente a los posibles inversionistas).

Una vez que se tuvieron los datos de cada uno de los rubros, se hizo la tabla correspondiente para cada uno de los sitios seleccionados en el reporte semestral anterior.

La tabla fue codificada en el programa ArcGIS para generar la selección del sitio más adecuado por medio del **método de selección por atributos** (“*attribute selection*”) que es la herramienta que toma la decisión final de acuerdo con los criterios anteriormente descritos. Cabe destacar que sólo se eligieron atributos numéricos pues son los más importantes para el resultado, por lo que al final, se corrió el programa.

Se colocaron los atributos uno por uno hasta que el programa eligiera 1 sitio, en ese momento se terminaba el proceso.

## **2.10. Persistencia de temperatura superficial y diferencia de temperatura entre superficie y zona profunda.**

Debido a que se conoce que la temperatura superficial varía estacionalmente tanto espacial como temporalmente, se determinó realizar un análisis de persistencia de la temperatura superficial y, con ello, saber el porcentaje en el que la diferencia de temperatura se mantiene por encima de los 20°C como mínimo y valorar los sitios de interés.

Los datos analizados se obtuvieron del World Ocean Atlas Database (WOA) donde la información está clasificada por 7 rangos decadales, desde 1955 hasta el 2017. El parámetro térmico se analizó para cada uno de estos rangos, determinando la variación de la temperatura superficial a través de ese lapso de tiempo y determinar qué zonas del Océano Pacífico mexicano presentan temperaturas mayores a 25 °C, cuando en las zonas profundas (a partir de los 1000 m) se presentan temperaturas entre 4 y 5°C con los que tendría un diferencial entre 20 y 21 °C. Para este fin, también se analizó la persistencia de la temperatura a 500, 750 y 1000 m de profundidad y saber cuál es la variación a través del tiempo en esas zonas del perfil vertical.

De esta manera, al tener la persistencia de la temperatura superficial y de las temperaturas de las zonas profundas, se calculó la persistencia del diferencial térmico para las tres áreas y obtener así el porcentaje de tiempo en el que las áreas del Pacífico mexicano están por encima del 80% con un diferencial igual o mayor a 20°C. También se calcularon los estadísticos descriptivos (media, varianza, desviación estándar y moda) con el fin de hacer una valoración de estas áreas y determinar las mejores para la implementación de esta tecnología en nuestro país.

Por último, se obtuvieron mapas de persistencia tanto de la temperatura en diferentes profundidades (superficial, 500, 750 y 1000 m) como del diferencial térmico (superficial-500 m, superficial-750 m y superficial-1000 m) por décadas y, a partir de este análisis se determinaron cuatro sitios para calcular la potencia eléctrica neta que se obtendría en dichos lugares, así como la comparativa entre la demanda y la posible carga base que una planta OTEC podría otorgar.

## **2.11. Cálculo de la potencia neta media anual (GWh año<sup>-1</sup>) que se puede tener en el Océano Pacífico mexicano por medio del gradiente térmico**

Una vez analizada la persistencia del diferencial térmico, se realizaron los cálculos para determinar la potencia neta eléctrica que se puede tener en todo el Pacífico mexicano por medio del gradiente térmico.

Basados en un estudio teórico, se hizo el cálculo de la potencia neta por medio de las fórmulas de Rajagopalan y Nihous (2013) con la referencia de que estos primeros resultados se hacen para una planta OTEC de 100 MW, por lo que, para hacer los cálculos de una planta de menor generación, se deben adaptar algunas de las variables utilizadas en las ecuaciones matemáticas.

Se utilizaron las bases de datos del WOA que ya se habían empleado para el cálculo teórico del gradiente térmico oceánico en el Pacífico mexicano (1955-2017) para los parámetros de temperatura y salinidad.

Se realizó el cálculo de la diferencia térmica de todas las zonas del Pacífico mexicano, tomando en cuenta los datos de temperatura de agua superficial (0 m) y de agua profunda (1000 m). El resultado se mantuvo en las unidades de grados Celsius (°C).

El dato de temperatura superficial se utilizó como **temperatura absoluta** ( $K = °C + 273.15$ ) en unidades Kelvin pues así lo requiere el análisis. De esta manera, se toma en cuenta el ciclo de Carnot presente.

La primera ecuación utilizada fue la del cálculo de la potencia de bombeo, tomando como referencia el agua fría por lo que se tiene:

$$P_{\text{pump}} = Q_{\text{cw}} 0.30 \frac{\rho C_p \epsilon_{\text{tg}} v}{4(1+v)} \quad (1)$$

Donde:

$Q_{\text{cw}}$  es el gasto nominal de agua fría que se debe bombear para una planta de 100 MW ( $309.7174 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ )

$\rho$  es la densidad promedio del agua de mar ( $1025 \text{ Kg m}^{-3}$ )

$C_p$  es la entalpía específica (calor específico del agua de mar) que equivale a  $0.004 \text{ MJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$

$\epsilon_{\text{tg}}$  es la eficiencia del turbo-generator utilizada en la planta (0.75)

$v$  es el rango de flujo de agua de superficie sobre el de agua profunda (1.5 para sistemas flotantes).

El 0.30 corresponde al 30% de la densidad de bombeo definida, tomada en condiciones estándar de diferencia de temperatura y temperatura absoluta.

Posteriormente, se calculó la potencia neta eléctrica que se puede producir, de acuerdo con la segunda ecuación:

$$P_{\text{net}} = \frac{3\rho C_p \epsilon_{\text{tg}} v (\Delta T)^2}{16(1+v) * T} - P_{\text{pump}} \quad (2)$$

Donde:

$(\Delta T)^2$  es el valor de la diferencia de temperatura entre la zona superficial (0 m) y la zona profunda (1000 m), dada en grados Celsius (°C)

$T$  es el valor de la temperatura superficial en grados absolutos (Kelvin)

Una vez calculada la potencia neta, el dato (que está en MW) se convierte en GW (dividiendo el resultado entre 1000).

Por último, se calculó la potencia neta en GWh año<sup>-1</sup>, esto se hizo multiplicando el dato de GW obtenido anteriormente por 8760 horas que tiene 1 año y multiplicado por el

llamado factor de planta, que en el caso de la OTEC es de 0.8 (80% de funcionalidad durante un ciclo anual).

Una vez que se hicieron los cálculos, se elaboraron los mapas de potencia neta para la zona del Pacífico mexicano, tanto anual como estacionales y en una tabla anexa se observan los datos de potencia neta para los sitios de interés determinados con anterioridad.

Los datos obtenidos a su vez, fueron comparados con otros datos de potencia para otros tipos de energía (termoeléctricas, fotovoltaicas, eólicas, etc.) para contrastar el potencial energético con otras tecnologías.

Por último, utilizando los datos de persistencia del diferencial térmico, se calculó y analizó la persistencia de la potencia eléctrica en cinco sitios del Pacífico mexicano y se determinó cuál sería la carga base a utilizar dependiendo el sitio. Para ello, se utilizaron datos de consumo eléctrico para los diferentes municipios de México proporcionados por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) para los casos de 2017 y 2018 y se compararon con la energía que una planta OTEC puede generar a partir de su potencia neta eléctrica presente.

## **2.12. Cálculo del flujo volumétrico teórico de agua fría ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ), agua superficial ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ) y agua potable ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ )**

Una vez calculadas las diferencias de temperatura y la potencia eléctrica en la zona de estudio, se consideró evaluar el caudal o el gasto volumétrico de agua de mar empleada para el ciclo OTEC teórico. Si bien para casos de estudio se utiliza el valor operativo dependiendo de la potencia eléctrica (Vega, 2010) donde:

1 MW equivalen a **3  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$**  de agua de mar profunda requeridos

por otro lado, de acuerdo con Hamedy y Sadeghzadeh (2017), dependiendo del diseño de la planta (producción de electricidad), los intercambiadores de calor (evaporadores y condensadores) y el ciclo de trabajo, se pueden evaluar y calcular la cantidad de agua utilizada en el proceso, dividida en dos fases: el gasto de agua fría profunda que entra y sale por el condensador y el gasto de agua cálida superficial que entra y sale por el evaporador.

Esto se toma en consideración debido a que, en muchas ocasiones, la distancia al punto de extracción de agua fría profunda a la zona costera puede restringir la viabilidad de un proyecto para tecnología OTEC ya que se elevan los costos cuando la distancia entre los dos puntos es mayor a 10 km además de que con ello, la eficiencia energética del ciclo disminuye drásticamente. Cuando se elige el ciclo abierto para un proyecto OTEC entonces el agua en fase evaporítica que regresa al condensador puede utilizarse para la obtención de agua potable o su utilización en sistemas de refrigeración (SWAC o aire acondicionado).

Como se utilizó un diseño de planta OTEC para generación de potencia neta eléctrica de 100 MW, se ocuparon las siguientes fórmulas para la obtención del gasto tanto de agua fría (en este caso, 1000 m de profundidad) como de agua superficial utilizada durante el ciclo de trabajo de una planta de igual generación:

$$Q_{cw} = \frac{P}{\eta C \Delta T_{cw}}$$

Donde:

$P$  es la potencia eléctrica en  $\text{kJ s}^{-1}$

$\eta$  es la eficiencia de ciclo OTEC

$C$  es la capacidad calorífica del agua de mar en  $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$

$\Delta T_{cw}$  es la diferencia de temperatura del agua fría profunda en el condensador

$$Q_{ww} = \frac{P}{\eta C \Delta T_{ww}}$$

Donde:

$P$  es la potencia eléctrica en  $\text{kJ s}^{-1}$

$\eta$  es la eficiencia de ciclo OTEC

$C$  es la capacidad calorífica del agua de mar en  $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$

$\Delta T_{ww}$  es la diferencia de temperatura del agua superficial en el evaporador

Se deben considerar dos factores: en promedio, las diferencias de temperatura del agua a las entradas y salidas del condensador y evaporador son de  $3^\circ\text{C}$  que dependen, sobre todo, del material con que están fabricados estos equipos. En este caso, se utilizaron los datos de diseño para una planta OTEC de 100/150 MW, de acuerdo con su simulación de ciclo termodinámico a partir del modelo matemático MOTEM (Makai OTEC Thermodynamic and Economic Model) para optimización de plantas de Gradiente Térmico Oceánico (Rizea, 2012). Los cambios únicamente fueron los datos de entrada donde se utilizaron las temperaturas superficiales y profundas de los sitios de interés y la potencia eléctrica generada.

Por otro lado, para el cálculo de la eficiencia del ciclo de trabajo, se utilizó la fórmula desarrollada por Sadi Carnot (1824) para la evaluación del rendimiento termodinámico, utilizando los datos de temperatura superficial y profunda para cada sitio:

$$\eta = 1 - \sqrt{T_{cold}/T_{warm}}$$

Donde:

$T_{cold}$  es la temperatura de agua fría profunda en unidades absolutas (Kelvin)

$T_{warm}$  es la temperatura de agua caliente superficial en unidades absolutas (Kelvin)

Por último, se obtuvo la cantidad teórica de agua potable que potencialmente se puede producir en una planta de ciclo abierto anualmente, obteniendo el 0.55% del flujo final de vapor y condensarlo (Vega, 2010; Rajagopalan y Nihous, 2013; Hamedi y Sadeghzadeh 2017). Con esto se pretende estimar una de las posibles ventajas de esta tecnología para su implementación en el país.

### 2.13. Cálculo del factor de planta (%) para una planta OTEC de 100 MW de generación eléctrica para el Océano Pacífico mexicano

A partir del diferencial térmico y la potencia eléctrica neta de los sitios de interés (determinado por la persistencia hasta 10 km), se calculó el factor de planta considerando que en esas áreas se implementará una planta OTEC de 100 MW de generación.

Se calculó la potencia eléctrica real, a partir de los valores de flujo másico de agua superficial para una planta de 100 MW que es de 460,000 kg s<sup>-1</sup> (Doorga *et al.*, 2018), los datos de temperatura de entrada y salida en el evaporador que son 25.7°C y 23.1°C, respectivamente (Rizea, 2012), la capacidad calorífica (4186 J kg<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>) y la eficiencia energética de Carnot.

A continuación, se calculó el factor de planta a partir de la determinación de una ecuación de eficiencia energética utilizando el comportamiento de eficiencia de la planta de Goseong, Corea del Sur, por lo que se tiene:

$$\eta_{(\Delta T_m)} = -0.0286\Delta T_m^2 + 1.2149\Delta T_m - 10.973$$

Donde:

$\eta(\Delta T_m)$  es la eficiencia energética a partir del diferencial de temperatura  
 $\Delta T_m^2$  es el diferencial de temperatura del sitio analizado, elevado al cuadrado  
 $\Delta T_m$  es el diferencial de temperatura del sitio analizado

La ecuación se determinó a partir del comportamiento de la curva de eficiencia energética de la planta de Goseong, Corea del Sur, por medio de sus datos experimentales demostrando que, por cada grado centígrado de pérdida o ganancia del diferencial de temperatura, se pierde o se gana un 3% de eficiencia y se pierde o se gana un 33% del valor de la potencia eléctrica (Ho-Saeng Lee *et al.*, 2015).

El resultado se comparó con datos de la literatura que mencionan que las plantas OTEC a partir de 100 MW presentan factores de planta entre 95 y 97%, esto de acuerdo con el tamaño de la planta, tipo de ciclo de trabajo, equipo de intercambiadores de calor, entre otros.

### 3. Resultados iniciales

#### 3.1. Análisis estadístico de los datos

##### 3.1.1. Análisis comparativo

Una vez realizado el análisis de estadística descriptiva entre las tres bases numéricas con el programa XLSTAT de Excel, se registraron los resultados que aparecen en las siguientes tablas (Tablas IV, V y VI).

**Tabla IV. Estadística descriptiva para las bases de datos WOA y SATMO.**

Parámetro	WOA	SATMO
Observaciones	12	12
Mínimo	23.686	19.778
Máximo	28.386	26.347
Media	26.902	22.936
Varianza (n-1)	2.133	6.192
Desviación Estándar (n-1)	1.461	2.488

Los valores de la media son de 26.902 °C para la base del World Ocean Atlas Database y de 22.936 °C para la base de datos del SATMO. Los valores mínimos registrados para el promedio de temperatura superficial del mar desde el 2012 al 2017 son de 23.686 °C en enero para la WOA y de 19.778 °C en febrero para SATMO; los valores máximos son de 28.386°C en agosto para la WOA y de 26.347 °C en septiembre para SATMO.

La varianza en ambas bases de datos con respecto a la media de temperatura es alta (2.13 y 6.19, respectivamente), teniendo una mayor variación con respecto a la media la base SATMO (2.48), mientras que para la WOA se tiene una variación de 1.46.

**Tabla V. Estadística descriptiva para las bases de datos SATMO, WOA y el termistor de La Mina, Puerto Ángel.**

Parámetro	SATMO	Puerto Ángel	WOA
Observaciones	60	60	60
Mínimo	29.669	29.645	28.640
Máximo	30.280	30.904	30.563
Media	30.014	30.376	29.840
Varianza (n-1)	0.018	0.119	0.266
Desviación Estándar (n-1)	0.134	0.346	0.516

Los valores mínimos entre SATMO y los datos de campo son muy similares, ambos correspondientes al mes de Julio. En el primer caso, el valor mínimo ocurre entre los días 16 y 19, mientras que para los datos *in situ*, el valor mínimo ocurrió entre los días 20 y 23. Para la base WOA el valor mínimo se registró entre los días 4 y 7 (28.64°).

Los valores máximos para todas las bases de datos estuvieron en un rango entre los 30 y los 31 °C. El valor máximo para SATMO se registró entre los días 9 y 12 de agosto, para

los datos de campo se registró entre los días 24 y 27 y para WOA se registró entre los días 19 y 22.

**Tabla VI. Estadística descriptiva para valores promedio de 4 días para las diferentes bases de datos.**

Parámetro	WOA	SATMO	Cruz de Huanacaxtle
Observaciones	375	375	375
Mínimo	24	25.292	25.337
Máximo	31	30.852	30.873
Media	28.592	29.071	29.046
Varianza (n-1)	2.045	1.378	1.354
Desviación Estándar (n-1)	1.430	1.174	1.163

Los valores máximos para cada base correspondió alrededor de los 31 °C, 31 °C para WOA, 30.85°C para SATMO y 30.87°C para los datos de Marina Cruz de Huanacaxtle. La tendencia de las tres bases de datos es similar. Estos valores corresponden a los meses de Septiembre (WOA y SATMO) y Octubre (datos *in situ*). Los valores mínimos fueron de 24 °C para WOA, 25.2 °C para SATMO y 25.3 °C para los datos en campo.

La desviación estándar es muy similar (1 °C) para las tres bases de datos, por lo que los datos de temperatura presentan poca variabilidad. En cuanto a los valores de la media, estas fueron de 28.5°C, 29.7°C y 29.04 °C para WOA, SATMO y datos de campo, respectivamente.

### 3.1.2. Prueba de normalidad

De acuerdo con las cuatro pruebas realizadas, los datos presentan concordancia en los casos de las bases WOA y SATMO debido a que sus probabilidades son mayores al nivel de significancia (0.05). Para el caso de los datos de campo, Marina Cruz de Huanacaxtle presentó no normalidad para las cuatro pruebas estadísticas mientras que, para Puerto Ángel, en tres de las cuatro pruebas se tuvo el mismo resultado, a excepción de la prueba Jarque-Bera donde la probabilidad fue mayor a la del nivel de significancia. Debido a esto, se realizó un análisis de correlación múltiple no paramétrico “rho” de Spearman (Tabla VII).

**Tabla VII. Prueba de normalidad para las bases de datos SATMO, WOA and *in situ***

Variable	Shapiro-Wilk	Anderson-Darling	Lilliefors	Jarque-Bera
WOA	0.086	0.122	0.535	0.330
SATMO	0.166	0.264	0.488	0.558
Puerto Ángel	<b>0.003</b>	<b>0.001</b>	<b>0.002</b>	0.19
Marina Cruz de Huanacaxtle	<b>&lt; 0.0001</b>	<b>&lt; 0.0001</b>	<b>&lt; 0.0001</b>	<b>&lt; 0.0001</b>

Los resultados de la prueba de correlación Spearman se observan en la tabla VIII.

**Tabla VIII. Valores del factor de correlación múltiple (rho) para las tres bases de datos analizados.**

Datos correlacionados	rho-Spearman	Tipo de dato	p-Spearman	$\alpha$
SATMO vs WOA	<b>0.9790</b>	Promedio mensual	<b>&lt; 0.0001</b>	<b>0.05</b>
SATMO vs La Mina	<b>0.004</b>	Promedio de 4 días	<b>0.9780</b>	<b>0.05</b>
WOA vs La Mina	<b>-0.085</b>	Promedio mensual	<b>0.5070</b>	<b>0.05</b>
SATMO vs Marina La Cruz de Huanacaxtle	<b>0.9900</b>	Promedio de 4 días	<b>&lt; 0.0001</b>	<b>0.05</b>
WOA vs Marina La Cruz de Huanacaxtle	<b>0.9590</b>	Promedio mensual	<b>&lt; 0.0001</b>	<b>0.05</b>

Los resultados indican que, de acuerdo con el factor de correlación múltiple rho, las tres bases de datos presentan correlación. En los casos de SATMO vs WOA y SATMO/WOA vs Marina Cruz de Huanacaxtle, la correlación es muy alta (entre 0.95 y 0.97), mientras que para el caso SATMO/WOA vs La Mina, la correlación es muy baja (0.004) y en el caso del contraste con la base WOA es negativa (-0.085) pero la relación es existente.

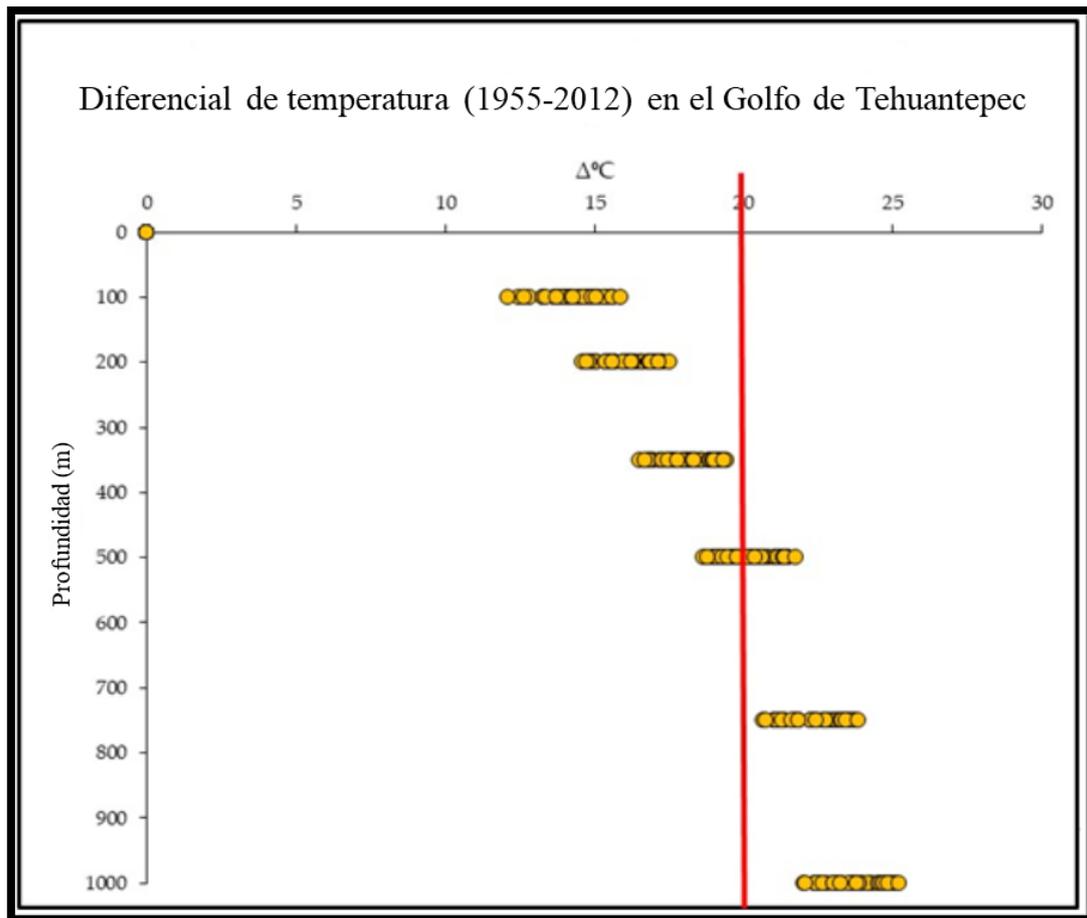
### **3.2. Comportamiento histórico de la diferencia de temperatura en el Océano Pacífico mexicano.**

El comportamiento histórico del diferencial de temperatura en el Pacífico mexicano es el siguiente, de acuerdo a las tres regiones de estudio:

#### **3.2.1. Golfo de Tehuantepec**

Los datos históricos muestran que en esta área se puede tener una diferencia de temperatura superior a los 26°C a los 1000 m de profundidad, pero pueden obtenerse diferencias superiores a los 20°C a los 500 m, por lo que esta área es adecuada para la utilización de este recurso (Figura 26).

Los puntos amarillos indican datos de diferencia de temperatura de acuerdo con la profundidad y el 80% coinciden o rebasan el límite de los 20°C de diferencia a partir de los 500 m. A partir de los 700 m, los puntos rebasan el límite de la diferencia de temperatura mínima para que opere una planta OTEC.



**Figura 26. Diferencia de temperatura histórica para el Golfo de Tehuantepec**

Asimismo, en esta región se determinaron varias localidades que cumplen con el requisito de la distancia máxima para la obtención del agua fría profunda, lo cual se observa en la tabla IX (Figura 27).

**Tabla IX. Localidades y sus distancias a las isolíneas de 500, 750 y 1000 m de profundidad en el Golfo de Tehuantepec en kilómetros**

Localidad	Estado	Distancia a los 250 m (km)	Distancia a los 750 m (km)	Distancia a los 1000 m (km)
Bahía Tangolunda	Oaxaca	2.7	5.4	10.1
San Agustín Huatulco	Oaxaca	2.3	3.3	4.5
Puerto Ángel	Oaxaca	2.6	3.6	7.5
Chacahua	Oaxaca	1.7	2.8	4.1
El Coyote	Oaxaca	1.5	2.2	6.3
El Azufre	Oaxaca	3	5	7



**Figura 27. Localidades de interés para la implementación de la tecnología OTEC en la zona del Golfo de Tehuantepec**

Chacahua pertenece al Parque Nacional de Lagunas de Chacahua-Pastoría por lo que no se podría hacer ningún tipo de instalación industrial de acuerdo con su plan de manejo. Para los casos de El Coyote y El Azufre, no existen las condiciones de infraestructura para acceder a la zona, además de contar con un número muy pequeño de habitantes por lo que la generación de energía sería suficiente, pero habría un excedente importante de energía.

No obstante que San Agustín Huatulco no cuenta con la infraestructura necesaria, sería muy interesante la potencial implementación de OTEC debido a que es una de las comunidades del estado que presentan un rezago industrial con dependencia del combustóleo para el suministro de energía eléctrica. Este tipo de proyectos pueden convertirse en punta de lanza industrial.

En cuanto a la zona de la Bahía de Tangolunda (en el área de las Bahías de Huatulco), también sería posible la implementación debida a que es una zona turística de gran importancia en el país, por lo que la industria hotelera podría gozar de otros beneficios, como el acceso al aire acondicionado (SWAC) y agua potable, así como a la obtención de energía eléctrica por medio de un medio más limpio. Por último, Puerto Ángel es una comunidad que puede beneficiarse con el aprovechamiento del recurso de gradiente térmico.

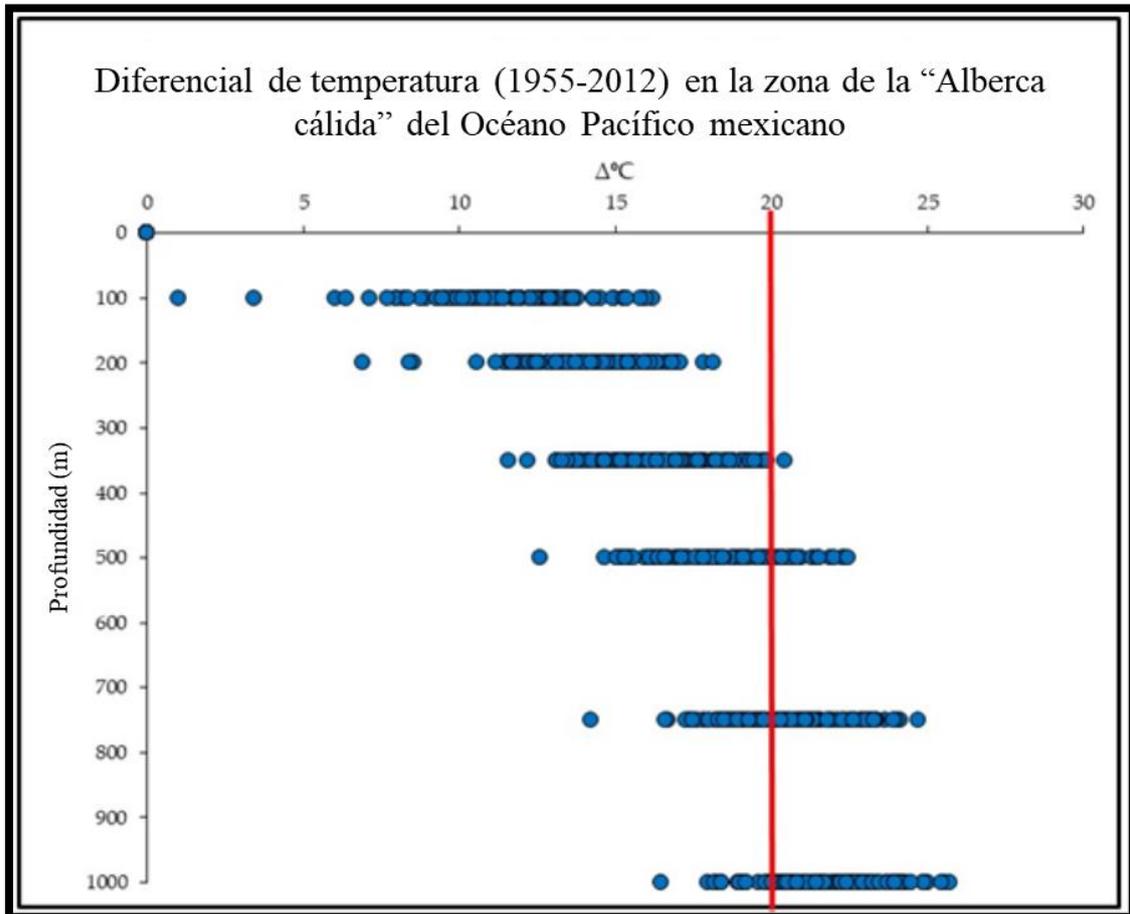
Con respecto a la zona este del Golfo de Tehuantepec, a pesar de que el diferencial de temperatura es adecuado para implementar esta tecnología, la distancia a la costa por su amplia extensión de la plataforma continental dificulta técnicamente su viabilidad. Sin embargo, dadas las instalaciones portuarias con las que cuenta, se convierte en el sitio más importante para la logística en la región. El estado de Chiapas también tiene una plataforma continental amplia, por lo cual en primera instancia no se considera como una zona apropiada para el despliegue de la tecnología OTEC, al menos para infraestructura en tierra.

### 3.2.2. Alberca Cálida del Pacífico mexicano

En esta zona, el máximo diferencial de temperatura registrado es de 26°C, pero la mayor parte del tiempo oscila entre 22 y 24°C (Figura 28); al haber interacciones de corrientes superficiales frías que recorren esta área, el diferencial puede disminuir fuera del rango mínimo para el ciclo OTEC. Particularmente en zonas de Jalisco, Colima, Michoacán y

Guerrero se pueden alcanzar diferencias de temperatura ideales durante gran parte del año (Figura 29).

Los puntos azules indican datos de diferencia de temperatura de acuerdo con la profundidad, la mayor parte de estos se encuentran fuera del rango de los 20°C de diferencia, aunque hay puntos cercanos o dentro de ese límite a partir de los 350 m de profundidad.

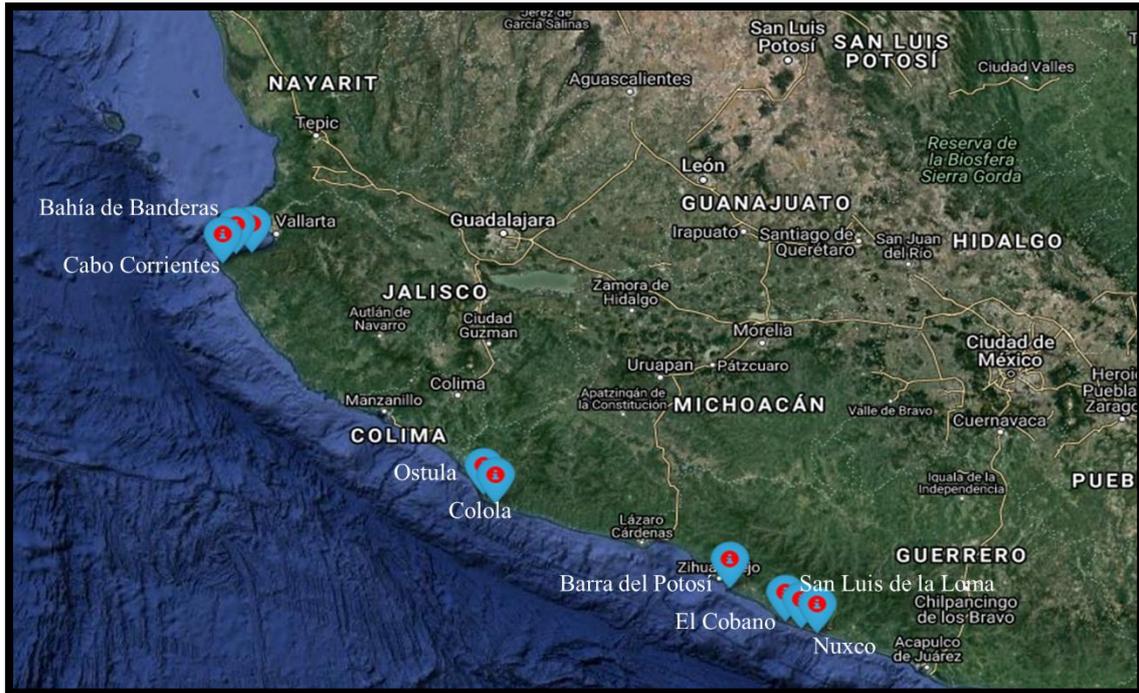


**Figura 28. Gradiente térmico histórico para la zona de la Alberca Cálida del Pacífico mexicano**

También existen otras localidades que cumplieron con la regla de la distancia máxima para implementar una planta OTEC onshore, la cual se observa en la siguiente tabla:

**Tabla X. Localidades y sus distancias a las isóneas de 500, 750 y 1000 m de profundidad en la Alberca Cálida del Pacífico mexicano en kilómetros**

Localidad	Estado	Distancia 250 m (km)	Distancia 750 m (km)	Distancia 1000 m (km)
Nuxco	Guerrero	5.3	7.4	9.3
San Luis de la Loma	Guerrero	6.8	8.2	9.6
El Cobano	Guerrero	6.7	8.2	9.6
Colola	Michoacán	4	4.8	5.5
Ostula	Michoacán	6.6	8.1	9.9
Yelapa	Jalisco	4.6	6.2	7.8



**Figura 29. Localidades de interés para la implementación de la tecnología OTEC en la zona del Pacífico Central mexicano (“Alberca cálida del Pacífico Tropical”)**

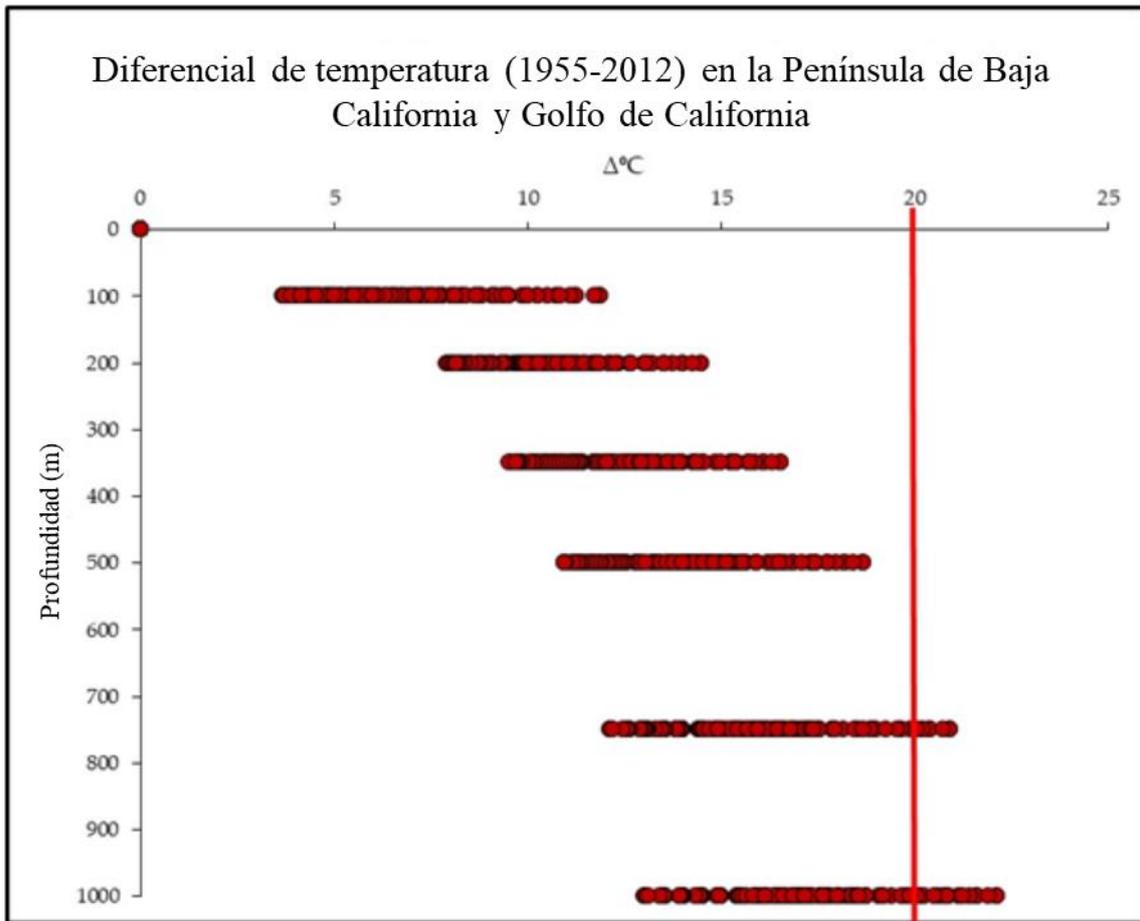
En este caso, todas las comunidades presentan condiciones óptimas para ser consideradas como áreas de interés para la implementación de la tecnología OTEC, sobre todo los casos de Nuxco, Colola y Yelapa. Sin embargo, la nula infraestructura y al ser centros de población muy pequeños puede ser una limitación importante.

Un caso particular es la zona de Cabo Corrientes y Bahía de Banderas (la zona de Puerto Vallarta y Marina Cruz de Huanacastle) que tienen zonas donde el diferencial de temperatura es ideal, sin embargo, existen otros factores, como ser áreas de conservación biológica, la nula infraestructura y ser centros de población pequeños que les impone restricciones muy particulares.

### 3.2.3. Golfo de California y Noroeste del Pacífico mexicano

En esta zona se presentaron muy pocos valores de diferencia de temperatura máximos o iguales a los 20°C, siendo el dato más alto 23°C por lo que, pudiera ser una zona de explotación del ciclo OTEC con la tecnología utilizada en Japón y Corea del Sur, sin embargo, sólo se podría generar durante los meses de verano (junio a septiembre) con lo que sólo se tendrían temperaturas adecuadas en aproximadamente el 17% del tiempo (Figura 30).

Los puntos rojos son datos de diferencia de temperatura para la zona donde sólo un 20% de estos están o rebasan la línea de los 20°C.

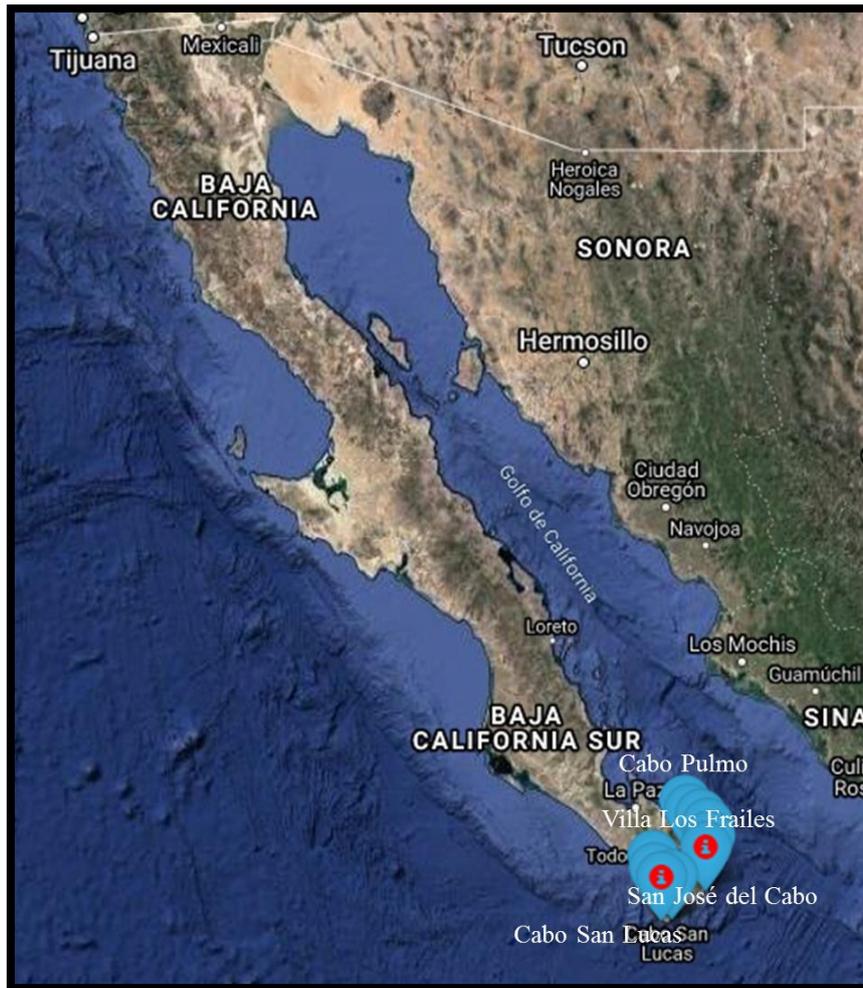


**Figura 30.** Diferencia de temperatura histórica para la zona del Golfo de California y el Noroeste del Pacífico mexicano

En esta área, existen localidades cuya distancia es la adecuada para la extracción de agua fría y generar ciclo OTEC durante los meses de verano y otoño (Figura 31), lo que se observa en la siguiente tabla:

**Tabla XI.** Localidades y sus distancias a las isolíneas de 500, 750 y 1000 m de profundidad en la zona del Golfo de California y el Noroeste del Pacífico mexicano en kilómetros

Localidad	Estado	Distancia 500 m	Distancia 750 m	Distancia 1000 m
Cabo San Lucas	BCS	1.1	1.5	2.3
Cabo Pulmo	BCS	5.4	6.1	6.8



**Figura 31. Localidades de interés para la implementación de la tecnología OTEC en la zona del Noroeste del Pacífico mexicano y el Golfo de California**

El caso de Cabo Pulmo es similar al de Chacahua, al ser una zona natural protegida existen restricciones legales (Capítulo IX, Plan de Manejo de Cabo Pulmo, 2006) para instalar una planta de este tipo, a pesar de que México no cuente con una reglamentación marina propia que lo prohíba. Por otro lado, existe el antecedente de protestas sociales y la cancelación de diversos proyectos en la zona asociados a proyectos de infraestructura.

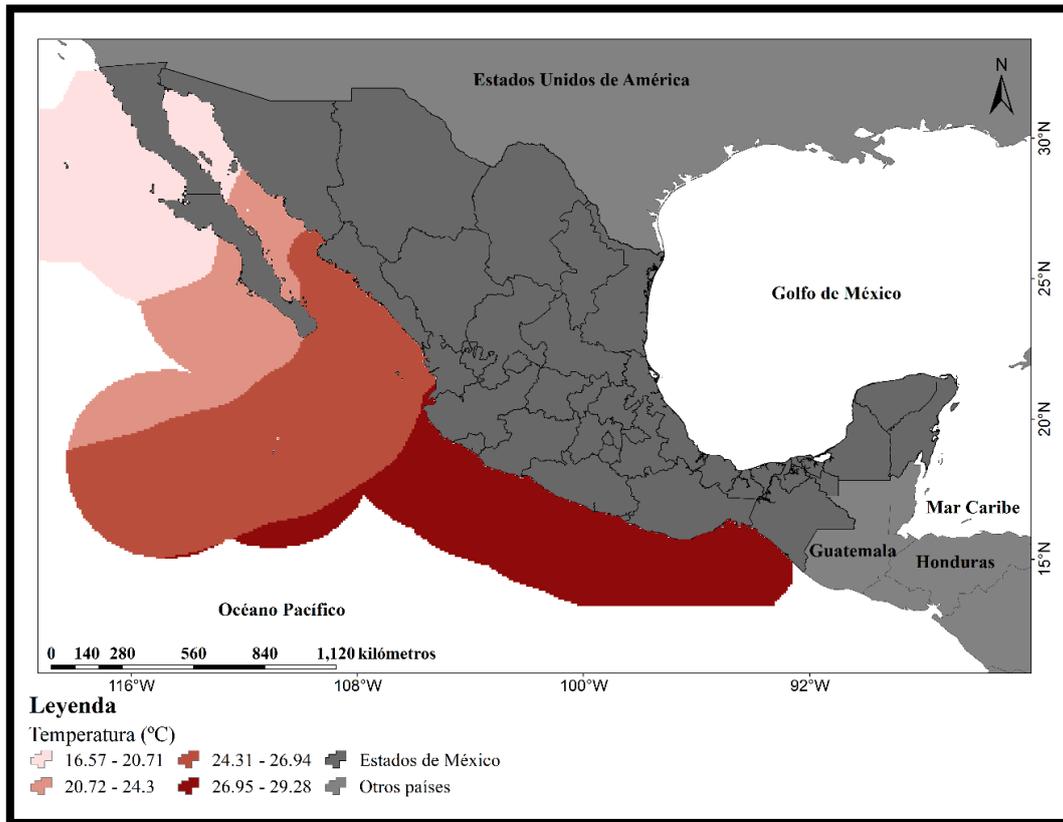
### **3.3. Distribución geográfica y estacional de la temperatura superficial histórica para el Pacífico mexicano**

Los mapas describen el comportamiento de este parámetro para dicha área de estudio. A partir de los datos registrados se obtuvieron el resto de los esquemas de trabajo para realizar los mapas correspondientes.

#### **3.3.1. Temperatura media anual del Océano Pacífico mexicano**

En la figura 32 se presenta el valor promedio de la temperatura superficial del Pacífico mexicano desde 1955 al 2018. Los registros más altos se encuentran en la parte sureste, desde Colima hasta Chiapas, de casi 30°C (29.28°C) como máxima y una mínima de 27°C (26.95°C). En la parte occidental del Pacífico mexicano, de Colima a Sinaloa, se

presentan temperaturas promedio anuales de entre 23°C y 27°C y en el noroeste se tienen temperaturas de entre 16 y 24°C.



**Figura 32. Datos de promedio anual de temperatura superficial para el Océano Pacífico mexicano**

### 3.3.2. Valores de temperatura superficial por medio de termistores

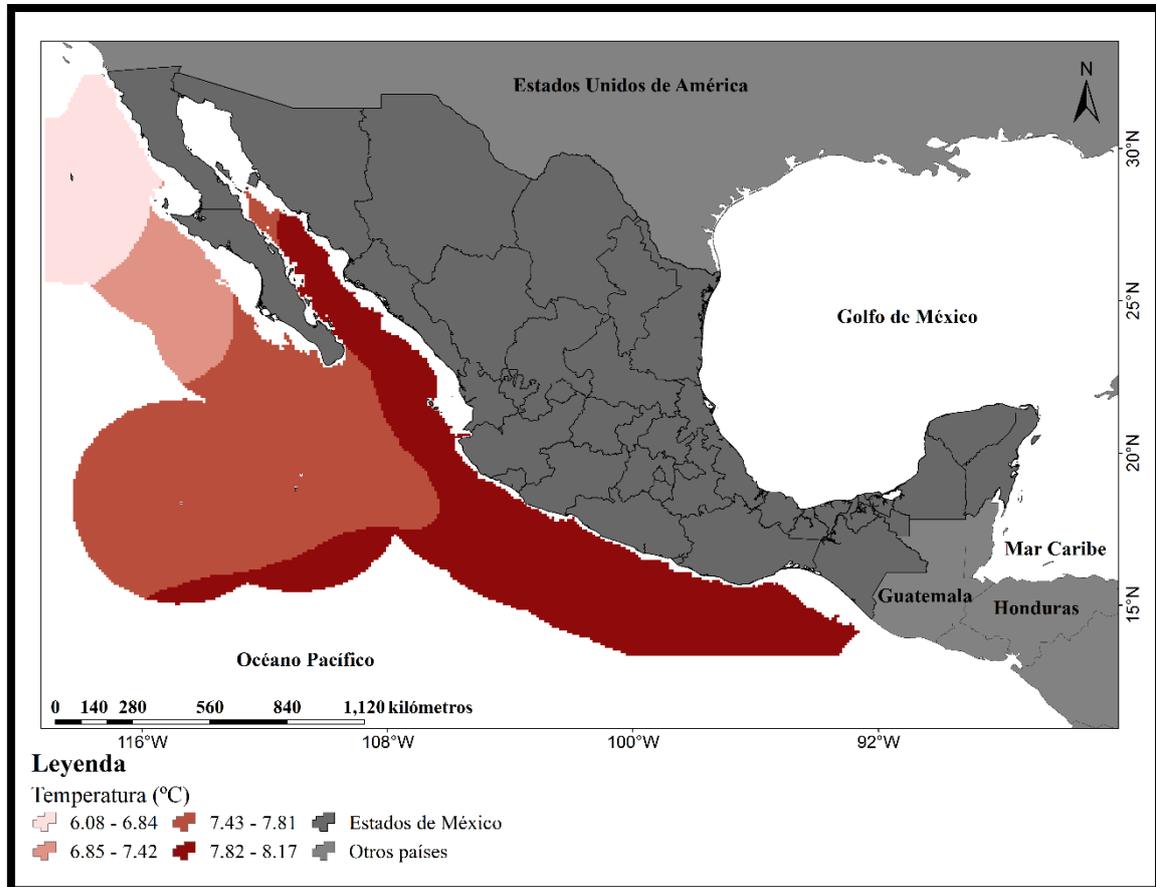
Por otro lado, de acuerdo con datos de termistores que se colocaron en sitios específicos, se tiene que los datos varían considerablemente, pero esto es debido a que se colocaron en zonas protegidas, como bahías y no en zonas abiertas debido al peligro que representa el colocarlos en esas áreas ya que las corrientes podrían remover los sensores o porque cualquier persona pueda sustraerlos. Sin embargo, son funcionales para la posible implementación.

En el caso de Puerto Ángel, en la zona de La Mina y en la bahía se obtuvieron temperaturas de entre 30 y 35°C (8 y 4 m de profundidad, respectivamente), mientras que en Marina de Huanacaxtle se tuvieron registros de hasta 31°C (8 m de profundidad). Por último, en la zona de Los Frailes se obtuvieron mediciones de entre 30 y 33°C en los meses de verano y otoño (a 5 m de profundidad).

Esto implica que en zonas más cerradas se pueden tener temperaturas más altas, pero en esas condiciones se tiene menos de 20 m de profundidad por lo que no se puede bombear agua superficial en esas zonas pues va mezclada con sedimento que puede alterar el OTEC, pero la importancia de estos valores es que, teniendo datos de mejor calidad y de mayor resolución temporal se pueden determinar otras zonas propicias para esta tecnología.

### 3.3.3. Temperatura anual promedio a 500 m de profundidad

Para el caso de la temperatura promedio a 500 m de profundidad, en la figura 33 se presenta la distribución espacial de la temperatura superficial media anual.



**Figura 33. Datos de promedio anual de temperatura para el Océano Pacífico mexicano a 500 m de profundidad**

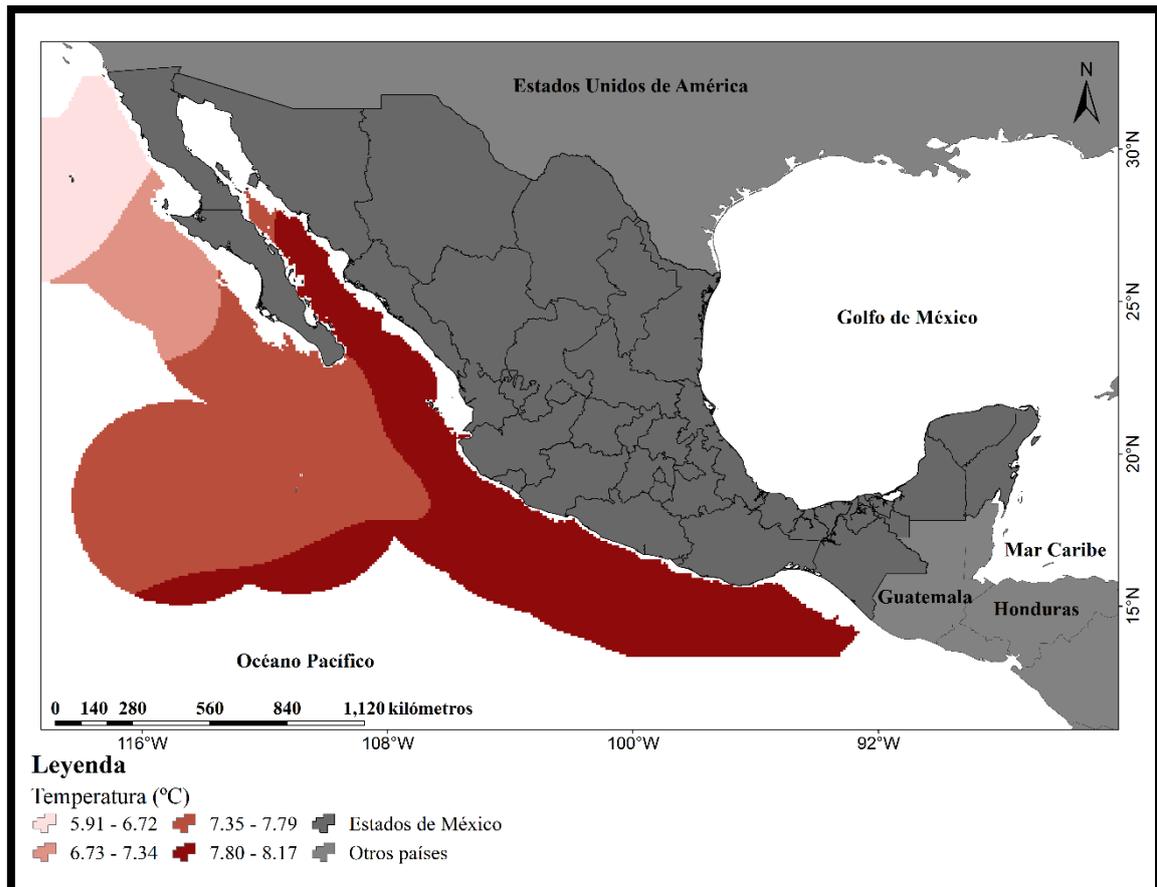
Se puede observar que desde el Golfo de California hasta la parte sur-sureste del Pacífico mexicano se presentan valores promedio entre 7.8 y 8.1°C, mientras que en el área correspondiente a las islas Revillagigedo y en la zona cercana al Alto Golfo de California se manifiestan valores entre 7.4 y 7.8°C. Por último, en la zona noroeste de la península de Baja California los valores oscilan entre 6 y 7.4°C.

De acuerdo con estos valores, existirían zonas donde el diferencial de temperatura con respecto a la temperatura superficial podría ser igual o mayor a 20°C (hasta 21.46°C de diferencia), sobre todo en la zona sur-sureste desde Nayarit hasta Chiapas. Sin embargo, al concebir plantas *onshore*, estas condiciones se limitan a una distancia máxima de 10 km con respecto de la línea de costa, por lo que se reduce el número de regiones probables a sólo dos estados, que son Guerrero y Oaxaca. En el caso de las plantas *offshore*, el número de estados aumenta a cuatro: Michoacán, Guerrero, Oaxaca y Chiapas.

Debido a que la variación de la temperatura profunda no oscila de manera significativa, la distancia al posible punto de conexión en la costa es un factor importante debido a que impacta el costo de tubería.

### 3.3.4. Temperatura promedio a 750 m de profundidad

Para el caso de la temperatura promedio anual a 750 m de profundidad, en la figura 34 se presenta su distribución espacial. Se puede observar que desde el Golfo de California hasta la parte sur-sureste del Pacífico mexicano se presentan valores promedio entre 7.8 y 8.17 °C, mientras que en el área correspondiente a las islas Revillagigedo y en la zona cercana al Alto Golfo de California oscilan entre 7.35 y 7.79°C. Por último, en la zona noroeste de la península de Baja California los valores oscilan entre 5.91 y 7.79°C. Este último valor considerando sólo la parte sur de la península, específicamente la zona de Cabo San Lucas.



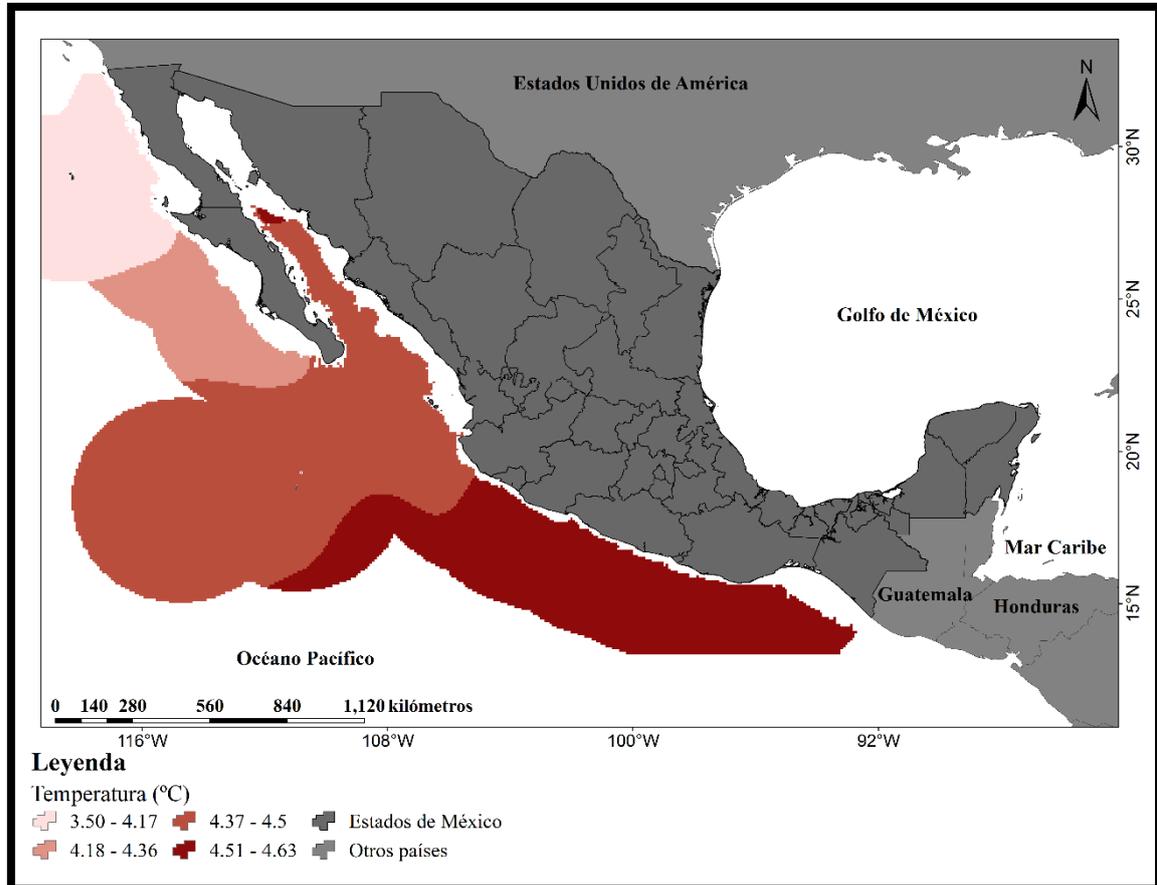
**Figura 34. Datos de promedio anual de temperatura para el Océano Pacífico mexicano a 750 m de profundidad**

Al igual que en el caso de las temperaturas a 500 m de profundidad, es importante determinar el comportamiento de los valores a 750 m debido a que, la diferencia de temperatura entre el agua de fondo con el agua superficial permite tener opciones de implementar esta tecnología desde Nayarit hasta Chiapas; en el caso de plantas *onshore*, se tienen opciones desde Jalisco hasta Oaxaca, misma tendencia que se mantiene para plantas *offshore*.

### 3.3.5. Temperatura promedio a 1000 m de profundidad

Para el caso de la temperatura promedio anual a 1000 m de profundidad, en la figura 35 se presenta su distribución espacial. Se puede observar que desde el Golfo de California hasta la parte sur de Jalisco se presentan valores entre 4.3 y 4.5°C, a medida que se

desplaza hacia el sur-sureste del Pacífico mexicano se presentan valores promedio entre 4.5 y 4.6°C, mientras que en el área correspondiente a las islas Revillagigedo y en la zona del Golfo de California se encuentran valores entre 4.18 y 4.3°C. Por último, en la zona noroeste de la península de Baja California los valores de temperatura oscilan entre 3.5 y 4.5°C.



**Figura 35. Datos de promedio anual de temperatura para el Océano Pacífico mexicano a 1000 m de profundidad**

Considerando los valores de temperatura superficial, a los 1000 m de profundidad se puede tener una alta probabilidad de cumplir con la diferencia de 20°C en la mayor parte del Océano Pacífico mexicano, desde la zona de Los Cabos en Baja California Sur (con una operación temporal de la planta de 6 meses) hasta Puerto Ángel, Oaxaca (considerando los 10 km de distancia máxima entre la línea de costa y la zona de bombeo de agua profunda).

### 3.3.6. Temperaturas promedio estacionales en el Océano Pacífico mexicano

En el caso de las temperaturas estacionales, se observan cambios significativos en toda la zona de estudio (ver mapas en anexo, figuras A, B, C y D).

#### 3.3.6.1. Primavera

Las temperaturas más frías se encuentran en la parte occidental de la Península de Baja California hasta la zona sur de la misma (14-18°C), aumentando conforme se avanza hacia el sur.

En la parte del Golfo de California se tienen temperaturas que oscilan entre los 18 y 24°C hasta la parte de Mazatlán, con algunos puntos de temperatura mayores a los 25°C. Conforme se avanza hacia el sur se tienen temperaturas más cálidas, entre la zona de la “Alberca Cálida del Pacífico” y el Golfo de Tehuantepec, teniendo datos de entre 25 hasta los 30°C.

#### 3.3.6.2. Verano

En la parte occidental de la península de Baja California se registraron aguas menos cálidas con respecto a las otras zonas del Pacífico mexicano. Se tienen datos que oscilan entre los 17° y los 21°C hasta la zona de Guerrero Negro.

Hacia el sur se tiene una distribución de datos que va desde los 21° hasta los 28°C hasta la zona de Cabo del Este (Los Cabos, Cabo San Lucas y San José del Cabo).

Hacia el interior del Golfo de California se presentan temperaturas mucho más cálidas, que van desde los 28 a los 30°C con algunos puntos donde se tienen temperaturas más frías.

Finalmente, a partir de la zona de entrada del Golfo de California se presentan temperaturas más elevadas, que van desde los 28 a los 32°C hasta el Golfo de Tehuantepec.

#### 3.3.6.3. Otoño

En el otoño, las aguas se tornan más frías en el norte y noroeste del Pacífico mexicano. Las aguas más frías se encuentran también en la parte Occidental de la península de Baja California, con registros que van desde los 16 a los 20°C. En otras zonas de la península y dentro del Golfo de California se presentan temperaturas que van desde los 20 a los 27°C hasta la zona costera de Nayarit.

En la zona de la “Alberca Cálida del Pacífico” y en parte del Golfo de Tehuantepec se tienen temperaturas más elevadas, de hasta 29°C mientras que del lado occidental del GT hay una zona donde las temperaturas oscilan entre los 25 y los 27°C.

#### 3.3.6.4. Invierno

En el invierno, el Pacífico mexicano se torna más frío en las zonas del norte y del noroeste. En la parte occidental de la península de Baja California se registran temperaturas que oscilan entre los 14 y los 16°C. Cuando hay una mayor dominancia de la corriente de California, se pueden tener temperaturas más bajas (alrededor de los 10°C).

A partir de la zona de La Paz hasta la zona de Cabo San Lucas y Los Cabos, las temperaturas presentan una mayor variabilidad, que van desde los 16 a los 23°C, las cuales también se encuentran en el interior del Golfo de California. En la parte sur del Pacífico se registran temperaturas más cálidas, que van desde 24 a los 28°C, siendo las zonas más cálidas los estados de Guerrero y Oaxaca.

Finalmente, en el Golfo de Tehuantepec se registran temperaturas que oscilan entre los 25 y los 28°C, con las zonas más cálidas al occidente de Bahías de Huatulco en Oaxaca y en la zona sureste de Chiapas.

### **3.4. Distribución geográfica de la diferencia de temperatura anual y estacional históricos continentales**

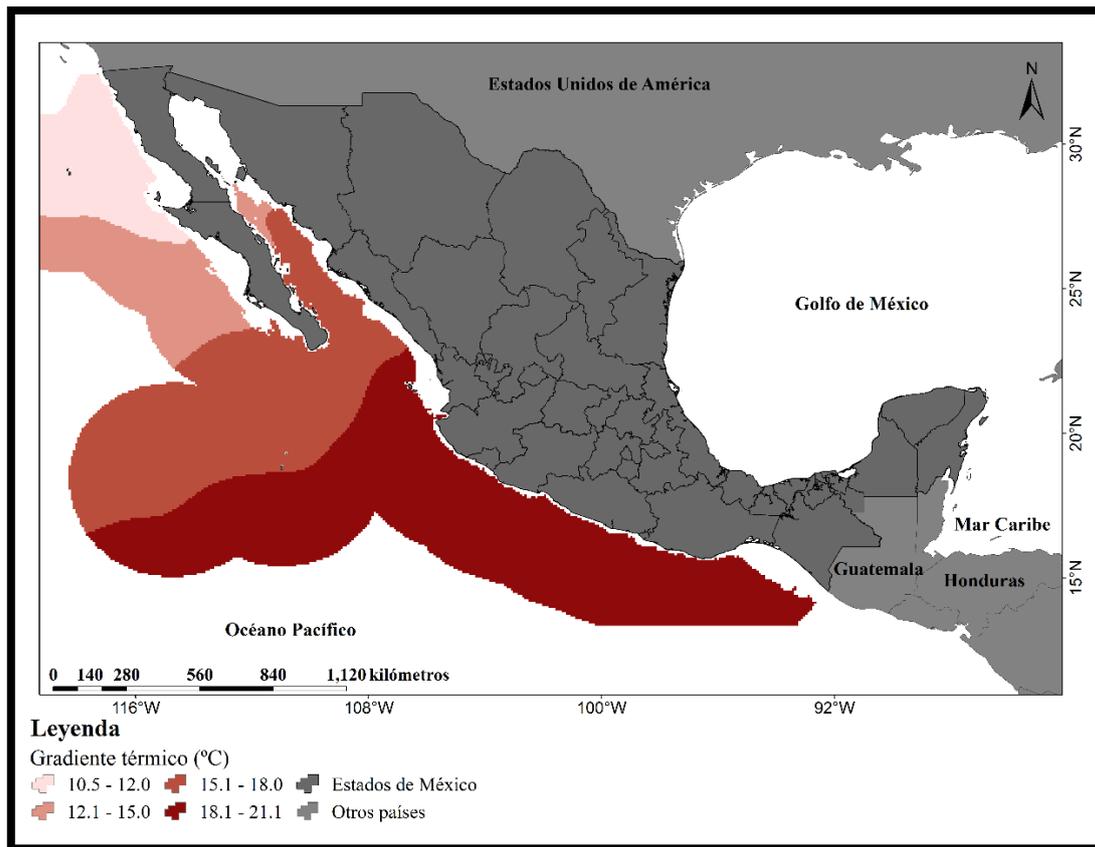
A continuación, se describen los mapas de gradiente térmico para diferentes zonas del Pacífico mexicano.

#### **3.4.1. Diferencia térmica anual promedio en el Océano Pacífico mexicano (500 m)**

Históricamente, la diferencia de temperatura igual o mayor de 20°C, considerando los 500 m de profundidad, se encuentra limitada a un área que va desde Michoacán hasta Chiapas, con una zona en el Golfo de Tehuantepec que es menor a esta diferencia (entre 18 y 19°C). Desde Colima hasta Sinaloa se tienen valores de diferencia térmica entre 18 hasta 19.7°C.

En esta región, el gradiente térmico más bajo se encuentra entre algunas zonas de Michoacán y el Golfo de Tehuantepec (20.04°-20.13°C), mientras que el más alto se presenta en un “isloté” de la zona de la Alberca Cálida del Pacífico (20.91°-21.13°C). Existe una pequeña zona dentro de Chiapas que presenta un GT de hasta 21.45°C.

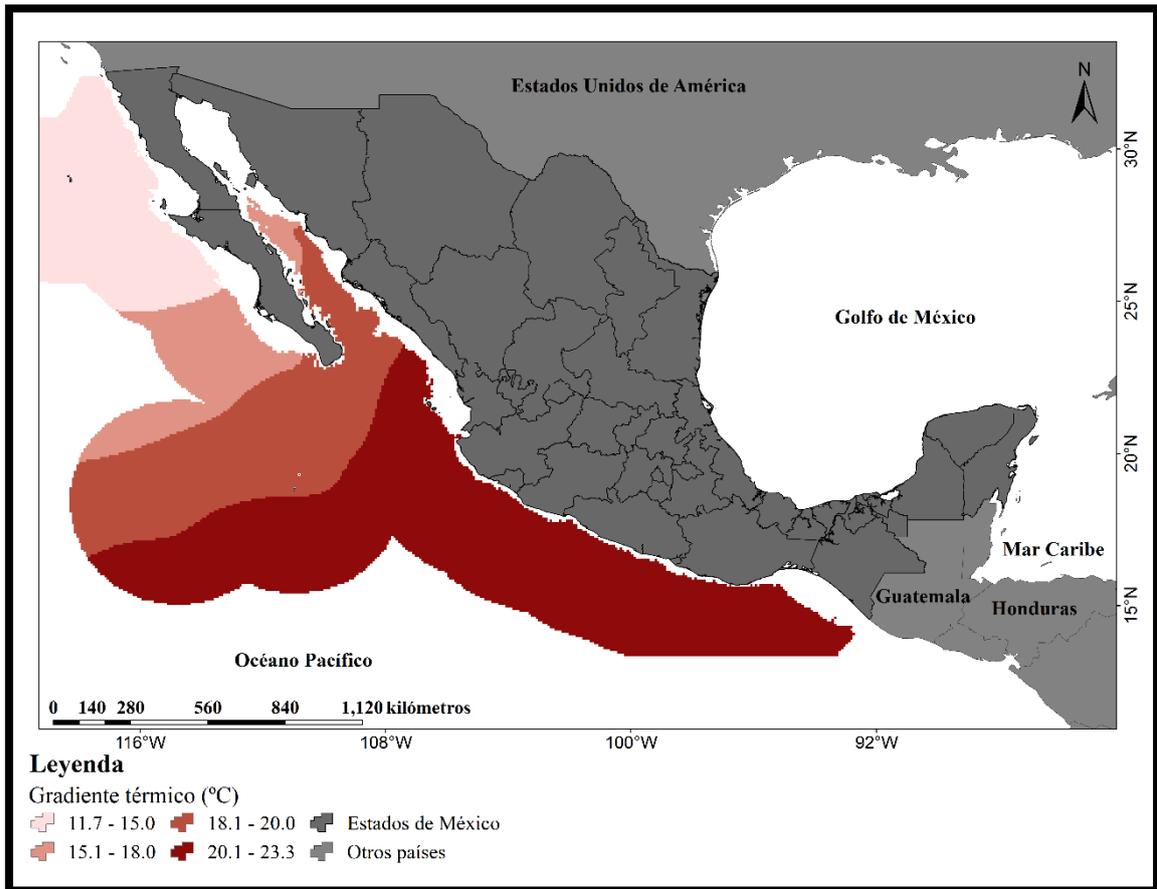
Por lo tanto, utilizando una profundidad de extracción de agua fría a los 500 m de profundidad, los estados de Michoacán, Guerrero, Oaxaca y Chiapas son los más adecuados pues presentan un GT igual o mayor a 20°C (Figura 36).



**Figura 36. Diferencia de temperatura anual histórica entre la superficie y 500 m de profundidad para el Pacífico mexicano.**

### 3.4.2. Diferencia térmica anual promedio en el Océano Pacífico mexicano (750 m)

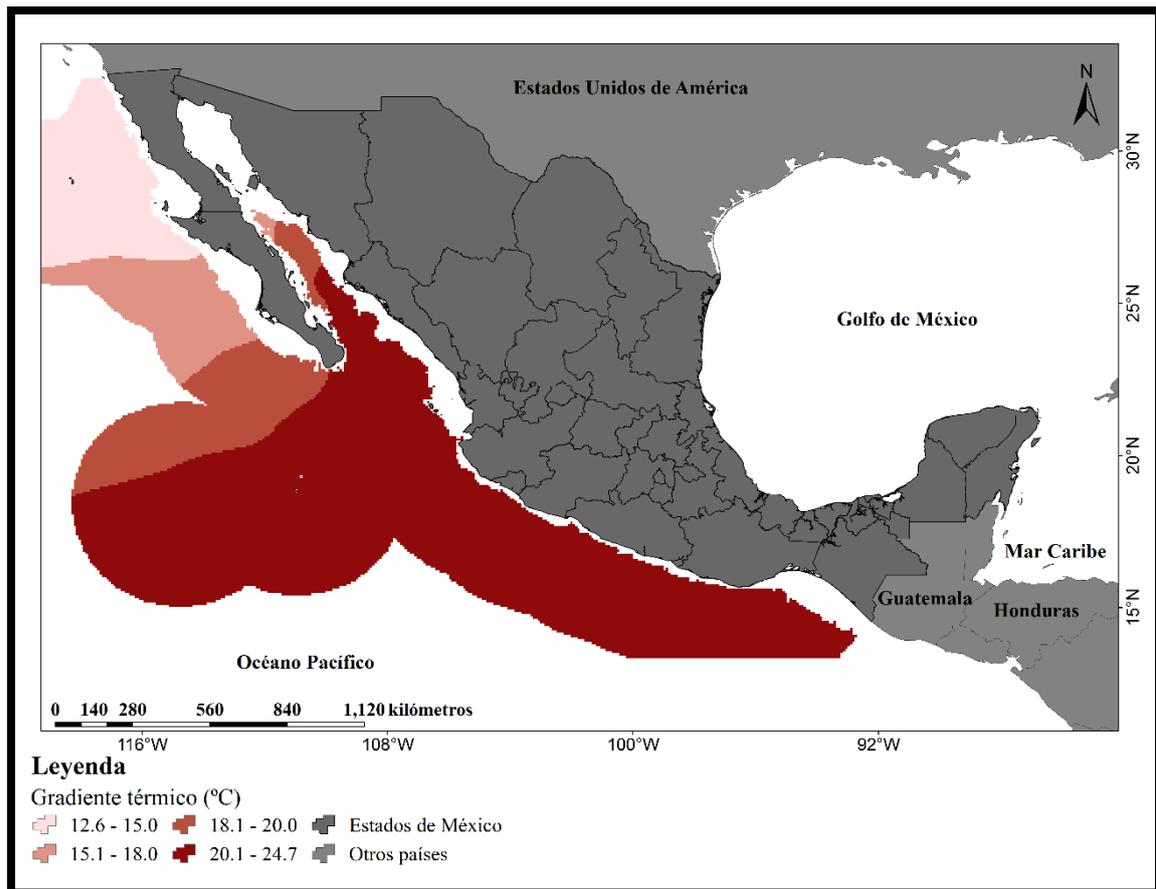
Tomando como referencia las temperaturas a 750 m de profundidad, se observa que se tienen diferencias de entre 20 a 23°C desde Sinaloa hasta Chiapas; los valores máximos se presentan entre los estados de Michoacán a Oaxaca (entre 21 a 23°). Entre la zona de las islas Revillagigedo hasta la zona media del Golfo de California, así como en la parte sur de la península los valores oscilan entre los 18 y 20°C y en la parte occidental de la península se presentan valores entre los 11 a los 18°C (Figura 37).



**Figura 37. Diferencia de temperatura anual histórica entre la superficie y los 750 m de profundidad para el Pacífico mexicano.**

**3.4.3. Diferencia térmico anual promedio en el Océano Pacífico mexicano (1000 m)**

Al tomar como referencia las zonas con una profundidad de 1000 m, se observa que las regiones de interés se extienden hacia el norte. La zona de menor diferencia se localiza en Baja California Sur, incluyendo la isla Cerralvo (20°-20.4°C) y en la zona de Nayarit y Jalisco se tiene una diferencia entre 22 a los 23.5°C. A partir de Michoacán se registran diferencias más grandes (hasta 23.9°C) y en las zonas de Guerrero y Oaxaca se presentan los valores máximos que van de los 23.9°C a los 25°C (24.7°) (Figura 38).



**Figura 38. Diferencia térmica anual histórica entre la superficie y los 1 000 m de profundidad para el Pacífico mexicano**

### 3.4.4. Diferencia térmica estacional promedio en el Océano Pacífico mexicano

A continuación, se describe el comportamiento del diferencial térmico oceánico estacional (ver mapas en anexo, figuras E, F, G y H) de acuerdo con la profundidad de extracción de agua fría.

#### 3.4.4.1. Primavera (500 m)

Para los meses de primavera en México (marzo a junio) y tomando como referencia las zonas con 500 m de profundidad, se observa que el diferencial suficiente para la generación de energía se distribuye en una pequeña área que va desde Guerrero a Chiapas. Las zonas de mayor diferencia de temperatura se encuentran en Chiapas, con registros de hasta los 21.8°C, mientras que para Guerrero y Oaxaca se tienen diferencias de entre 20 y los 21°C, particularmente en la zona de Puerto Ángel, Oaxaca.

#### 3.4.4.2. Primavera (1000 m)

Tomando la referencia de los 1000 m de profundidad, se puede observar que para la primavera la diferencia aprovechable se extiende hasta los estados de Sinaloa y Sonora, presentando los registros más bajos (20.47°C). A medida que se está más hacia el sur del Pacífico se obtienen diferencias más altas.

En la zona de Bahía de Banderas y Cabo Corrientes (Nayarit y Jalisco) se encuentran diferencias térmicas de entre 21° y 22°C. Michoacán presenta diferencias de entre 22° y 23°C mientras que en Guerrero, Oaxaca y Chiapas se presentan los valores máximos donde la diferencia varía entre los 23.7 a los 25.3°C. En la zona en Lagunas de Chacahua-Pastoría y Puerto Ángel se presentan diferencias de hasta 24.7°C.

#### **3.4.4.3. Verano (500 m)**

Tomando como referencia los 500 m de profundidad, se registra una diferencia térmica que se extiende desde la mitad norte del Golfo de California hasta el Golfo de Tehuantepec. Para el caso de Baja California se tiene una diferencia de hasta 20.43°C en la zona de la isla Cerralvo y Cabo San Lucas, pasando por Cabo Pulmo. En la región de Cabo Corrientes y Bahía de Banderas se obtuvo una diferencia de hasta 22°C al igual que en las regiones de Michoacán, Guerrero, Oaxaca y Chiapas. Los GT más altos se encuentran en la zona de Sinaloa y Sonora que van desde los 24°C a los 25°C, pero no es recomendado porque la distancia a los 1000 m de profundidad es mayor de 10 km, pero podrían ser utilizados si su marco de referencia es de 500 m de profundidad (mismo caso para Chiapas).

Con esto, las regiones de Baja California Sur, Nayarit, Jalisco, Michoacán, Guerrero y Oaxaca son las que presentan mejores condiciones para la explotación de la diferencia de temperatura.

#### **3.4.4.4. Verano (1000 m)**

A los 1000 m de profundidad, se observa que la diferencia aumenta considerablemente.

Baja California Sur presenta zonas de diferencia que van desde los 20 a los 23°C, mismos que incluyen la parte occidental sur de la península como algunas zonas del golfo.

Sonora y Sinaloa presentan las diferencias más altas, de hasta 27°C, aun así, no tienen la distancia requerida hacia la línea de costa. La zona de Cabo Corrientes y Bahía de Banderas y los estados de Michoacán, Guerrero, Oaxaca y Chiapas presentan diferencias de entre 24 a 26°C.

En Chiapas se presentan diferencias que van desde los 23 a los 26.8°C, mientras que las condiciones más óptimas para la explotación se encuentran en Oaxaca, Guerrero, Michoacán y Jalisco.

#### **3.4.3.5. Otoño (500 m)**

A los 500 m de profundidad, el diferencial en el Pacífico mexicano se extiende desde Baja California Sur hasta Chiapas, sin embargo, los 20°C y superiores se obtienen desde el estado de Michoacán hasta Oaxaca y parcialmente en Chiapas.

Baja California Sur presenta diferencias de temperatura de entre 18° a 19°C, mientras que para la zona de Cabo Corrientes y Bahía de Banderas se tienen diferencias de 20.23°C, con oscilaciones que llegan hasta los 19.9°C.

Michoacán presenta diferencias de hasta 21°C, lo mismo que Guerrero (con diferencias de hasta 21.6°C) y parte de Chiapas. Oaxaca, bajo la influencia de los “tehuanos”, presenta zonas propicias de explotación de 20.2 a 20.5°C en la zona de Puerto Ángel.

#### **3.4.4.5. Otoño (1000 m)**

A los 1000 m de profundidad, desde la zona de la península sur de BC y el Golfo de California hasta el Golfo de Tehuantepec se encontraron diferencias térmicas muy variables. En la parte sur de BCS se tienen regiones con diferencias que van desde los 20 a los 22°C, incluyendo la isla Cerralvo.

En las zonas de Bahía de Banderas y Cabo Corrientes se encontraron diferencias que van de 23 a 23.99°C, mientras que para Michoacán, Guerrero, Oaxaca y Chiapas las diferencias térmicas son de hasta los 25.17°C.

De todos estos estados, Guerrero y Oaxaca presentan el valor de diferencia más alto explotable, desde Barra de Potosí y Nuxco, en territorio guerrerense, hasta la zona de Los Naranjos en Oaxaca. Puerto Ángel presenta diferencias térmicas de hasta 24°C, que también puede ser altamente aprovechable.

#### **3.4.4.6. Invierno (500 m)**

Tomando como referencia la cota batimétrica de 500 m de profundidad, en el invierno el diferencial en el Pacífico mexicano se reduce a una zona que va desde Michoacán (Colola y Ostula) hasta el Golfo de Tehuantepec, con excepción de la región central cuyo diferencial es menor a 18°C.

La zona de menor diferencial se encuentra entre Michoacán y Guerrero, con diferencias de entre 18° y 19°C, mientras que para la región desde Nuxco, Guerrero, hasta la bahía de Puerto Ángel, en Oaxaca, se presentan diferencias que van entre los 19.4 y 20.3°C. Chiapas tiene una zona pequeña en la que presenta estos mismos gradientes, sobretodo cerca de la frontera con Guatemala.

En cuanto a una posible explotabilidad del recurso, las regiones de Guerrero y Oaxaca son las que presentan condiciones más ventajosas.

#### **3.4.4.7. Invierno (1000 m)**

Considerando la zona delimitada con 1000 m de profundidad, la diferencia térmica utilizable en el Pacífico se extiende desde Jalisco hasta la zona de Nayarit y Sinaloa, pero con valores bajos. Entre dichas áreas y las zonas de Cabo Corrientes y Bahía de Banderas se obtuvieron diferencias térmicas que oscilan entre los 18 y 20.8°C.

Más hacia el sur, Michoacán presenta gradientes de entre 21 y 22°C, mientras que Guerrero y Oaxaca presentan las diferencias térmicas más altas; los gradientes en estas zonas van de los 22.4 a los 24.1°C, considerando que el límite de explotación serían aquellas zonas que se encuentran en regiones cuya diferencia es del orden de los 23.3°C.

Chiapas también presenta estas mismas diferencias, pero tomando en cuenta las características de la su plataforma continental, sólo serían explotables considerando plantas OTEC de tipo plataforma (*offshore*).

### 3.5. Distribución geográfica de la diferencia de temperatura anual y estacional históricos insulares

En esta sección se presentan los resultados obtenidos al evaluar la diferencia de temperatura en algunas de las islas del Pacífico mexicano. No se realizó la evaluación en las islas del occidente de la península de Baja California y las interiores del Golfo de California, localizadas más al norte de Mazatlán, ya que no cumplen con los requisitos predefinidos para OTEC en cuanto a la diferencia de temperatura y de distancia a la isolinia de 1000 m de profundidad. En algunos casos, estas islas no están habitadas pues su extensión territorial y las condiciones de las aguas circundantes hacen muy complejo su acceso.

A continuación, se presenta la valorización realizada para aquellas islas donde el GT puede ser aprovechable.

#### 3.5.1. Diferencia térmica anual promedio insular a 500 m de profundidad

Tomando en cuenta la región de los 500 m de profundidad, ninguna isla mexicana del Pacífico mexicano tendría las condiciones para explotar el diferencial térmico, pues la profundidad de toma de agua sería insuficiente para lograr el mínimo valor de diferencia térmica establecida de 20°C, sin embargo, podría tomarse en cuenta el diferencial de 18°C como en el caso de Corea del Sur en las zonas cercanas a Baja California Sur. (Figura 39).

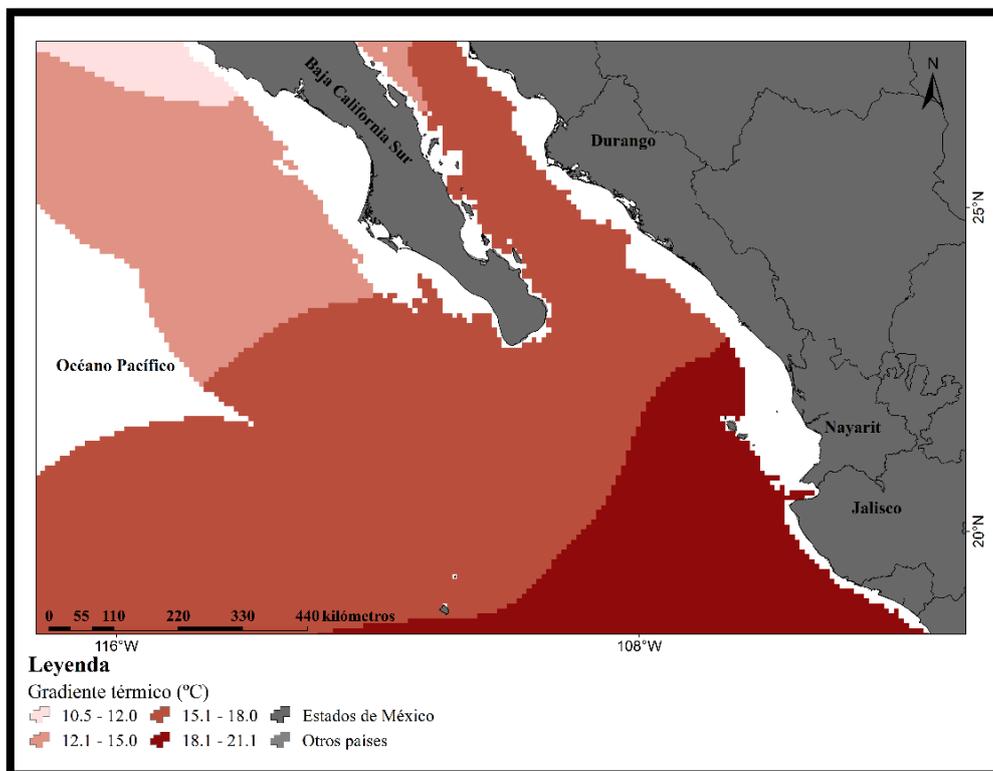


Figura 39. Diferencia térmica de temperatura anual insular histórica entre la superficie y los 500 m de profundidad para el Pacífico mexicano

### 3.5.2. Diferencial térmico anual promedio insular a 750 m de profundidad

En relación a la región de los 750 m de profundidad, las islas Marías presentan un valor de diferencia de temperatura entre los 20 y 23°C. Actualmente, se le ha decretado como un centro recreativo (cultural, deportivo) y medioambiental por lo que es factible la implementación de esta tecnología. En el caso de las islas Revillagigedo y las existentes en la parte sur de la península de Baja California, tendrían valores entre los 18 y 20°C lo que también les permitiría tomarlas en cuenta para la implementación del sistema OTEC (Figura 40).

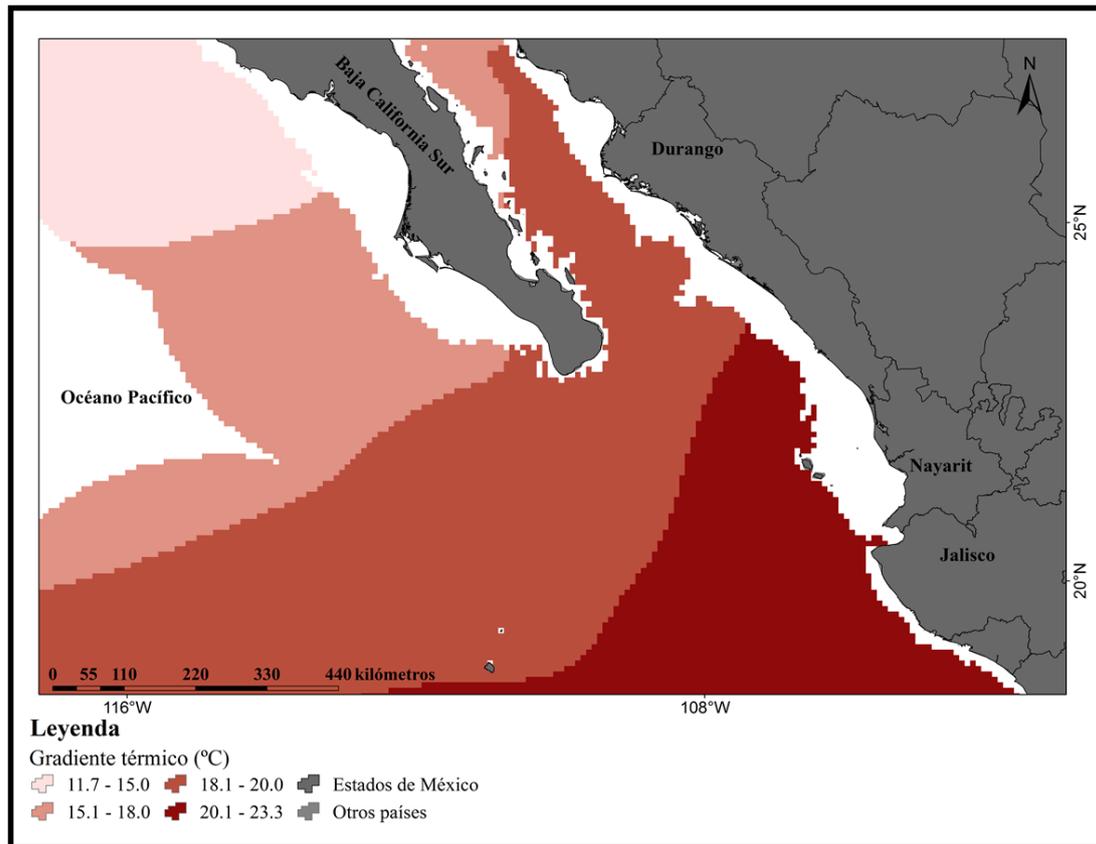


Figura 40. Diferencia de temperatura anual insular histórica entre la superficie y los 750 m de profundidad para el Pacífico mexicano

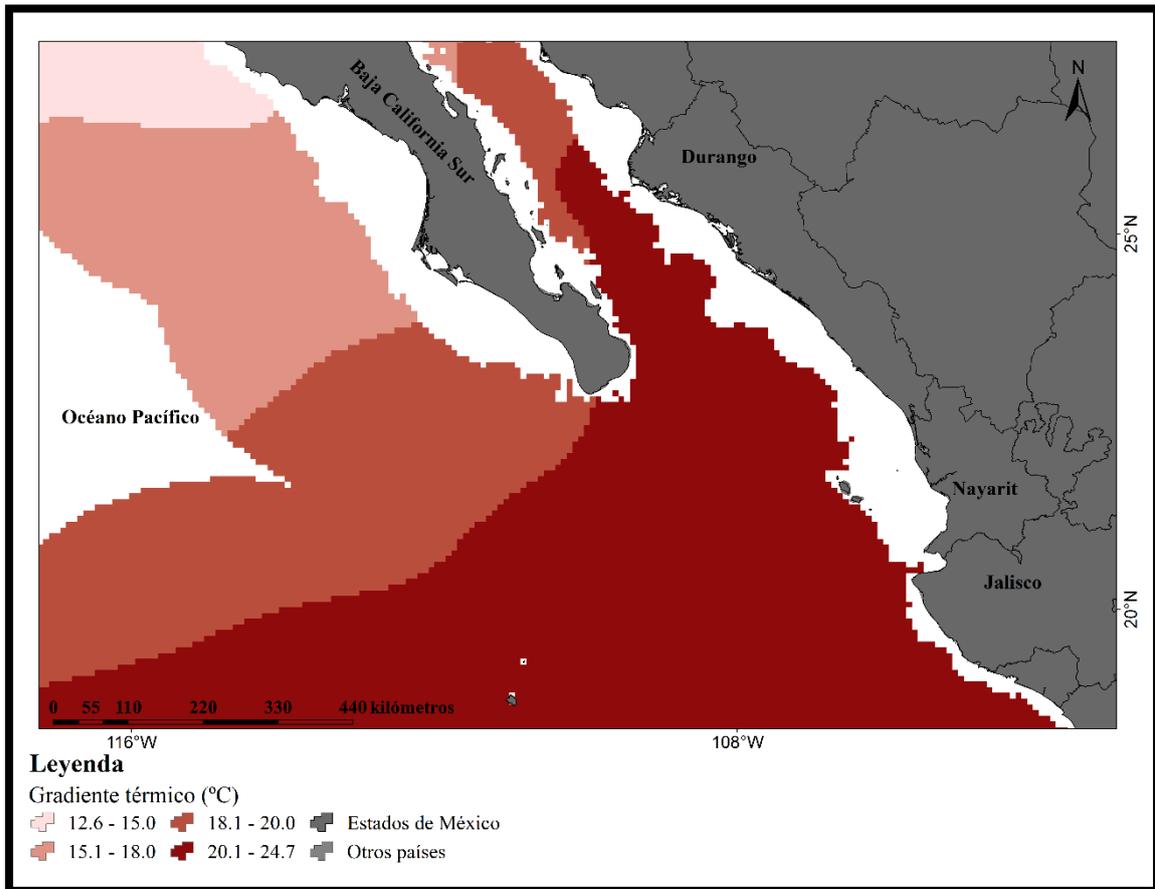
### 3.5.3. Diferencia térmica anual promedio insular a 1000 m de profundidad

A los 1000 m de profundidad, se encontró que el diferencial térmico para las zonas insulares se extiende desde Chiapas hasta la parte sur de la península de Baja California, dentro del Golfo de California. En estas zonas se presentan diferencias térmicas de 20°C que pueden ser aprovechables para la zona de las islas San José y Cerralvo, aunque no existe población en ninguna de las dos.

Para la zona del Archipiélago de las Revillagigedo, en las cuatro islas que la conforman se presentan valores de diferencia térmica entre los 20 y los 21°C. En este caso la isolínea de 1000 m de profundidad está entre los 2 y 6 km de distancia a la costa.

Por último, en la zona de Bahía de Banderas, particularmente en las Islas Marías y las islas Marietas; ambas tienen valores de diferencia térmica superiores a los 22°C. Los

inconvenientes son que estas islas han sido declaradas áreas naturales protegidas, por lo que difícilmente se podría explotar el recurso (Figura 41).



**Figura 41. Diferencia de temperatura anual insular histórica entre la superficie y los 1000 m de profundidad para el Pacífico mexicano**

### 3.5.3. Diferencial térmico insular estacional a 500 m de profundidad

- Tomando en cuenta las zonas con 500 m de profundidad, durante la primavera ninguna isla mexicana del Pacífico mexicano tendría las condiciones ideales (20°C) para explotar las diferencias de temperatura.
- Durante el verano las únicas zonas donde se podría explotar el recurso son las áreas de las Islas Marías, las Islas Marietas y las islas al este de la península de Baja California Sur (isla San José, isla Partida e isla Cerralvo). En las islas del este de BCS se tiene un gradiente que va de los 20.02 a los 20.4°C mientras que en la zona de las islas Marías y Marietas existe un gradiente que va de los 20.8° a los 21.9°C.
- Para el otoño, considerando valores de 18°C de diferencia térmica, se pueden considerar la zona que comprende desde la isla Cerralvo hasta la zona de influencia de las Revillagigedo. En la isla Cerralvo se encontraron diferencias térmicas de hasta 18.2°C, mientras que en la zona de las Revillagigedo las diferencias registradas fueron de entre 18.2 y 18.5°C en la isla Clarión; de entre 18.5 y 18.9°C en Roca Partida y de entre 18.9 y 19.2°C en las islas San Benedicto

y Socorro. En las islas Marías y las islas Marietas las diferencias térmicas oscilaron entre 19.6 y 19.9° y de entre 19.9 y 20.2°C, respectivamente.

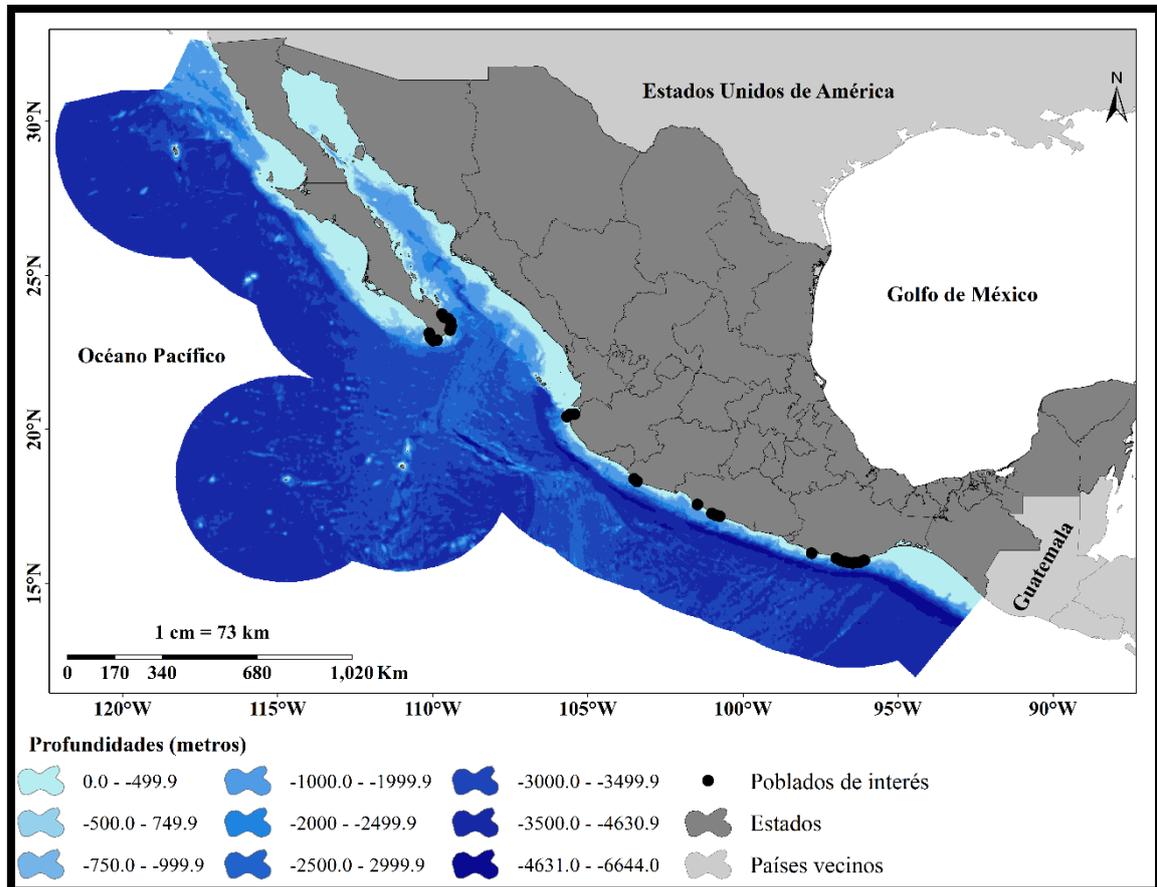
- Durante el invierno, ninguna de las islas mexicanas del Pacífico presenta condiciones adecuadas para explotar el diferencial de temperatura, ya que la profundidad de toma de agua sería insuficiente para lograr el mínimo establecido (20°C).

Ahora, considerando la cota batimétrica de 1000 m:

- Para la primavera sólo las áreas de las Islas Marías y las Islas Marietas presentan valores de diferencias térmicas iguales o mayores a los 20°C. En el caso de las Islas Marías, presentan diferencias térmicas que van de los 21.3 a los 21.7°C; mientras para el caso de las Islas Marietas las diferencias van de los 20.9 a los 21.3°C.
- Durante el verano, la diferencia térmica se extiende desde la parte sur-occidente de la Península y el Golfo de California hasta el sur del Pacífico, entre las islas Marías, Marietas y el Archipiélago de las Revillagigedo. Para el primer caso, las islas San José, Partida y Cerralvo presentan diferencias térmicas de entre 22.6 y 23.9°C, siendo la isla Cerralvo la que tendría el valor máximo. También se tiene la opción para la isla de María Magdalena, en el occidente de la península sur de Baja California, con diferencias entre 20.06 y 20.8°C. En las Revillagigedo se encontraron valores de 21.7 y 23.3°C, siendo las islas Socorro y Clarión las que presentan las mejores condiciones para la explotación del recurso ya que además están habitadas. Las diferencias térmicas mayores se encuentran en las áreas de las islas Marías y Marietas, con valores de entre los 24.6 y los 25.9°C.
- Para el otoño, los valores de diferencias térmicas aumentan. En la zona este de la península de Baja California Sur, las islas San José, Partida y Cerralvo presentan diferencias de entre los 20.04 y 20.98°C, siendo la isla Cerralvo la que presenta el valor máximo para la zona. Mientras que en las Revillagigedo se tienen diferencias de entre 21.3 y 21.8°C. En las islas Clarión y Socorro se presentan valores que oscilan entre 21.8 y 22.2°C. Finalmente, en las islas Marías y Marietas se presentan diferencias térmicas más altas, con valores entre 23.1 y 23.5°C.
- Durante el invierno, tan solo en las zonas de las Revillagigedo, las islas Marías y las Marietas se presentan condiciones adecuadas. De todas las islas estudiadas, sólo las Marietas, las islas Socorro y Roca Partida presentan diferencias de entre 19.6 y 20.2°C mientras que en las demás zonas insulares del Pacífico mexicano tenemos diferencias de entre 18 y 18.5°C.

### 3.6. Predeterminación de sitios adecuados para el aprovechamiento del diferencial de temperatura

De acuerdo con las condiciones de profundidad marina y considerando el diferencial de temperatura a los 20°C, se localizan los sitios más adecuados para plantas OTEC en tierra (*onshore*) o de plataforma (*offshore*) (Figura 42).



**Figura 42. Batimetría del Pacífico mexicano y las localidades continentales que tienen una distancia no mayor de 10 km a estas zonas**

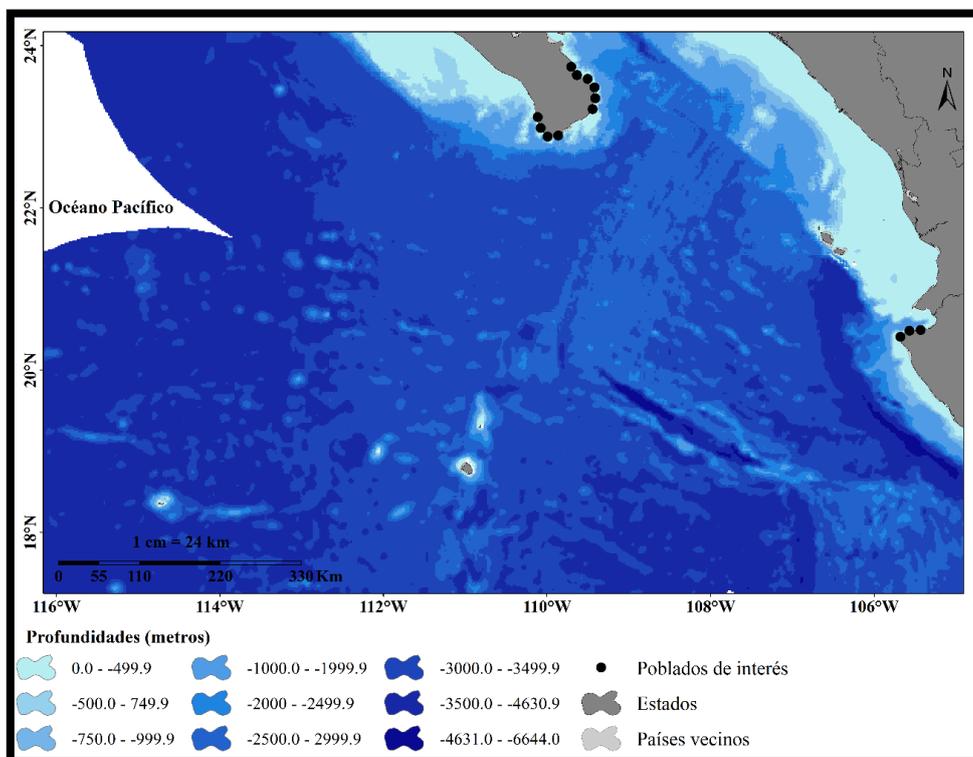
Las isolíneas de 500 y 1000 m de profundidad en el del Pacífico mexicano se observan en las figuras 42 y 43, esta última para la zona insular. La configuración del fondo marino del Pacífico mexicano es muy variable; la máxima profundidad se encuentra frente a las costas de Chiapas y Oaxaca, en la fosa de Tehuantepec, con más de 6 000 m. En la mayor parte de la zona económica exclusiva (más de 80%), el fondo sobrepasa 2 000 m. Del resto, aproximadamente 6% se ubica entre 1 000 y 2 000 metros, 6% entre 200 y 500 m, y sólo 6.5% a menos de 200 m.

Los lugares de interés a nivel continental que cumplen con tener valores de diferencia de temperatura igual o mayor de 20°C y sus distancias con respecto de la línea de costa a las zonas de bombeo de agua fría (500 y 1000 m) menores a los 10 km, se pueden observar en la tabla XII.

**Tabla XII. Distancias de los sitios de interés en zona continental hacia la isolínea de 500 y 1000 m de profundidad para el Pacífico mexicano**

Localidad	Dist. 500 m (km)	Dist. 1000 m (km)
Tangolunda, Oaxaca	2.77	10.15
<b>San Agustín Huatulco, Oaxaca</b>	<b>2.31</b>	<b>4.5</b>
<b>Puerto Ángel, Oaxaca</b>	<b>2.59</b>	<b>7.5</b>
<b>El Coyote, Oaxaca</b>	<b>1.51</b>	<b>6.29</b>
Agua Blanca, Oaxaca	5.42	9.33
Los Naranjos, Oaxaca	6.10	8.67
<b>El Azufre, Oaxaca</b>	<b>3.03</b>	<b>6.91</b>
<b>Nuxco, Guerrero</b>	<b>5.28</b>	<b>9.37</b>
San Luis de la Loma, Guerrero	6.78	9.57
El Cobano, Guerrero	6.67	9.62
Barra de Potosí, Guerrero	7.69	10.91
<b>Colola, Michoacán</b>	<b>4.03</b>	<b>5.5</b>
Ostula, Michoacán	6.63	9.94
<b>Cabo Corrientes, Jalisco</b>	<b>6.02</b>	<b>8.9</b>
<b>Yelapa, Jalisco</b>	<b>3.91</b>	<b>5.52</b>
<b>Cabo San Lucas, BCS</b>	<b>1.1</b>	<b>2.34</b>
<b>Diamante Cabo San Lucas, BCS</b>	<b>3.41</b>	<b>6.13</b>
<b>Cabo Pulmo, BCS</b>	<b>5.42</b>	<b>6.86</b>

De la tabla anterior, se puede observar que las localidades marcadas en rojo presentan las distancias más cortas para su utilización. Otros factores que se deben tomar en cuenta son la infraestructura disponible, red eléctrica, densidad poblacional, economía municipal, entre otros.



**Figura 43. Batimetría para las localidades insulares del Pacífico mexicano, que tienen una distancia no mayor de 10 km a estas zonas**

En cuanto a las islas del Pacífico mexicano, las islas ubicadas hacia el sur de la península de Baja California (las islas Marías, las islas Marietas y el Archipiélago de las Revillagigedo) cuentan con zonas donde las distancias a las isóneas de 500 y 1000 m de profundidad son menores a 10 km (ver tabla XIII).

**Tabla XIII. Distancias de los sitios de interés en zona insular hacia la isónea de 500 y 1000 m de profundidad para el Pacífico mexicano**

Localidad	Dist. 500 m (km)	Dist. 1000 m (km)
Isla San José, BCS	6.2	14.9
Isla Partida, BCS	5.4	9.7
Isla Cerralvo, BCS	1.28	5
Islas Marías, Nayarit	Entre 2 y 3 km	Entre 1 y 3 km
Islas Marietas, Nayarit	Entre 1 y 2 km	Entre 2 y 4 km
Isla Clarión, Colima	2.3	3.5
Isla Roca Partida, Colima	3	7.6
Isla Socorro, Colima	1	3.2
Isla San Benedicto, Colima	1.5	4

De la Tabla XIII se observa que las islas Cerralvo, Marías, Marietas, Clarión y Socorro presentan las distancias más cortas. Como se mencionó anteriormente, el posible despliegue está condicionado a los estatus que tengan estas zonas y otros factores, sobre todo en el caso del Archipiélago de las Revillagigedo que está catalogada como Reserva de la Biósfera, adicionado a que no existe un número importante de población concentrada por lo que en principio no sería factible implementar una planta OTEC.

En el caso de la isla San José, su posible explotación sería a los 750 m de profundidad, dado que la distancia desde la costa hasta la cota batimétrica de 1000 m es mayor a los 10 km recomendados para implementar una planta OTEC *onshore*. Sin embargo, puede operar una planta offshore en esa zona para abastecer de energía eléctrica a una ciudad aledaña, como La Paz.

### 3.7. Implementación del sitio de interés

Bajo los criterios establecidos y sin tomar en cuenta las condiciones de las subestaciones eléctricas existentes, el análisis de matriz de decisión arrojó que el sitio más indicado para la implementación de una planta OTEC en el Pacífico mexicano es Puerto Ángel, Oaxaca (Tablas XIV y XV, Figura 44).

**Tabla XIV. Resultado final del análisis de matriz de decisión**

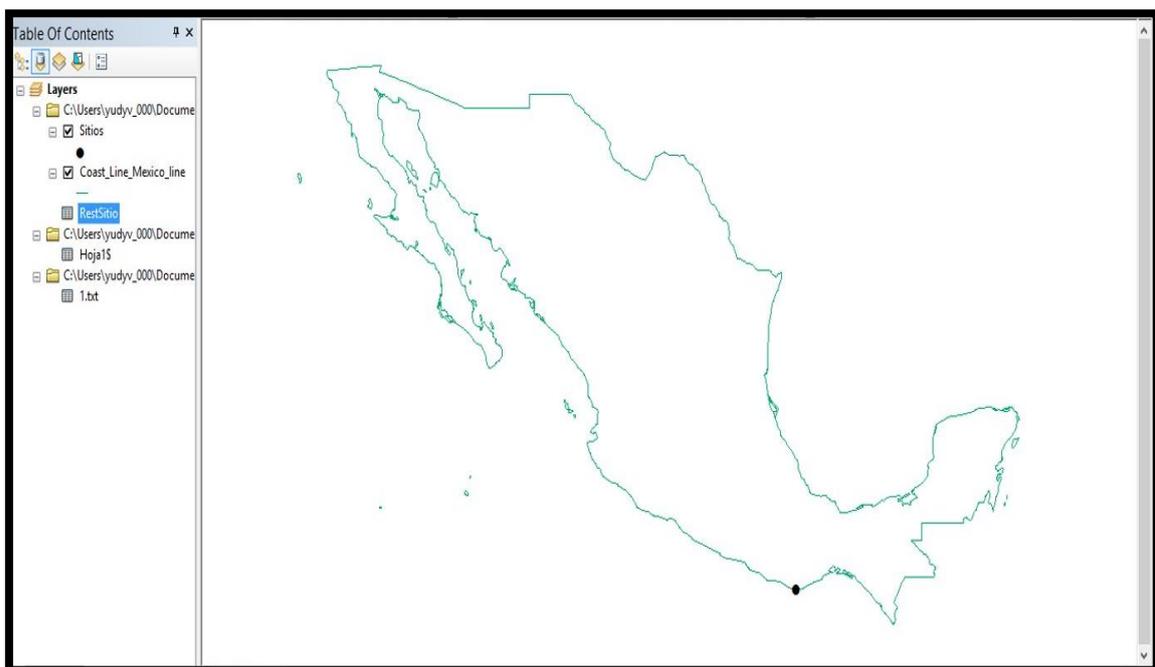
Sitio	Distancia a los 1000 m (km)	Distancia al nodo eléctrico (km)	Consumo eléctrico (kWh año <sup>-1</sup> )	Viviendas sin energía eléctrica	Ocupación	Índice de paz
Puerto Ángel	7.5	8.13	1165.64	28.37	30.24	19

**Tabla XV. Resultado final del análisis de matriz de decisión (diferencia de temperatura)**

DT Min Primavera	DT Max Primavera	DT Min Verano	DT Max Verano	DT Min Otoño	DT Max Otoño	DT Min Invierno	DT Max Invierno
24.5	25.5	24.58	25.2	23.15	23.59	22.4	22.85

Como se puede observar en la tabla XV, los valores de diferencia de temperatura entre superficie y los 1000 m de profundidad oscilan entre los 22.4 y los 25.5°C, es un sitio donde el recurso se encuentra disponible todo el año.

En cuanto a la tabla XIV, el sitio presenta una distancia de 7.5 km hacia la zona de bombeo de agua fría (menor a los 10 km), la distancia al nodo de la subestación eléctrica de Pochutla es de 8 km (incluso la distancia a la subestación eléctrica de Quatode está a 14 km de distancia por lo que está en el rango de transmisión eléctrica permitida), el consumo eléctrico permite la instalación de una planta de 100 MW o mínimo de 10 MW (corroborando la información de la empresa BlueRise de 2018) y un índice de paz de 19 puntos, lo que equivale a ser una zona tranquila sin casos de extrema violencia, de acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) para el año 2018.



**Figura 44. Sitio seleccionado a partir del método de selección por atributos y matriz de decisión (Puerto Ángel, Oaxaca)**

La elección del sitio se obtuvo después de analizar un total de 10 iteraciones con tres tipos de matrices diferentes, además de filtrar información que no era útil o que no podía ser analizada por no ser numérica. Este resultado refuerza la teoría de Crews (1997), García-Huante (2015) y Vega (2017, Curso-Taller OTEC CDMX) que este sitio en particular es potencialmente adecuado para la construcción y operación de una planta OTEC.

Sin embargo, se debe precisar que no es el único donde se puede implementar esta tecnología. Con base en los análisis y resultados de diferencias térmicas y batimetría, se pueden destacar varios sitios continentales adicionales en el Océano Pacífico mexicano donde se puede implementar una planta OTEC *onshore*: Cabo San Lucas, Baja California Sur (con funcionamiento de la planta para generación eléctrica de entre 4 a 6 meses, pero, si la planta es de ciclo abierto, puede generar otros beneficios importantes para la comunidad como lo son el agua potable y el aire acondicionado), Bahía de Banderas (en la zona de Yelapa) entre los estados de Nayarit y Jalisco y Cabo Corrientes en Jalisco; Colola en el estado de Michoacán y Nuxco en el estado de Guerrero.

En cuanto a los sitios insulares, las islas Marías, las islas Marietas (en Nayarit) y las islas Clarión y Socorro del Archipiélago de las Revillagigedo (en Colima) pueden ser tomadas en cuenta para la implementación de OTEC, sin embargo, sus estatus actuales limitan la posible construcción de una planta de gradiente térmico.

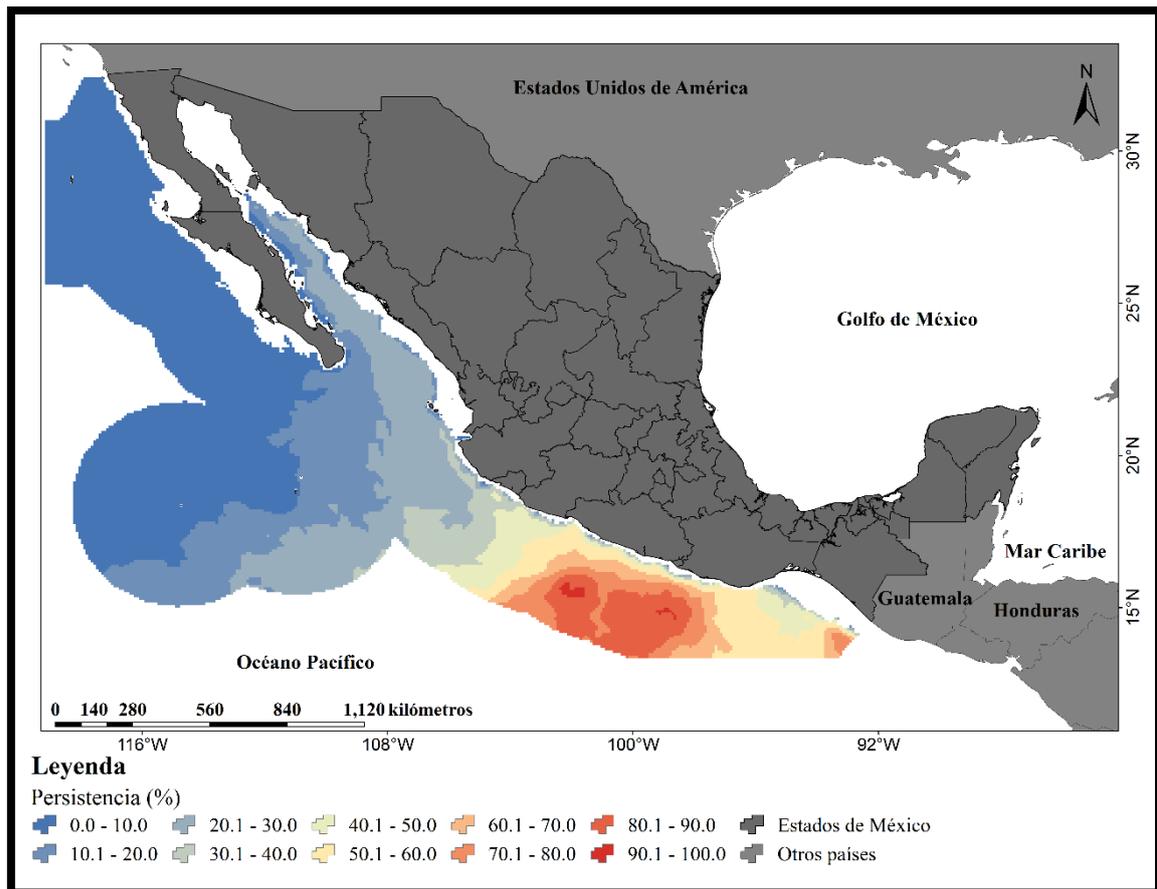
Para plantas *offshore*, prácticamente todo el Pacífico mexicano, desde la zona norte de Nayarit hasta Chiapas, incluyendo las islas cercanas a la península de Baja California Sur, cumplen con los criterios establecidos aquí para la instalación de una planta OTEC, ya que de acuerdo a los especialistas la distancia de 10 km no es impedimento tecnológico.

### **3.8. Porcentaje de persistencia del diferencial térmico a 500, 750 y 1000 m de profundidad**

De acuerdo con los resultados, se observa que el porcentaje de persistencia es directamente proporcional con la profundidad y con la estacionalidad. Los datos del World Ocean Database (WOA) demuestran que, los sitios donde podría implementarse la tecnología de OTEC en el Océano Pacífico mexicano se encuentran en mayor medida en los estados de Guerrero y Oaxaca, sin embargo, las áreas se diversifican dependiendo de la profundidad a la que se debería colocar el tubo de agua fría.

#### **3.8.1. Porcentaje de persistencia del diferencial térmico entre superficie y 500 m de profundidad**

El análisis muestra que, existe en mayor medida un porcentaje entre el 60-100% de persistencia de la diferencia de temperatura en los estados de Guerrero y Oaxaca. En ambos estados se localizan dos puntos donde el gradiente se encuentra por encima del 90% para todo el registro anual, desde 1955 a 2017. La persistencia varía entre el 60 y 90%. Misma condición se encuentra en la parte sur de Chiapas donde la persistencia oscila entre el 70 y 80% para este periodo, mientras que para la zona occidente, norte y noroeste se tienen porcentajes de persistencia menores al 50%, por lo que la implementación de OTEC en estas condiciones sería más viable en los tres estados antes mencionados. Dado que las zonas con mayor persistencia se encuentran a más de 10 km de distancia con respecto a la línea de costa, las plantas podrían ser de tipo flotante (*offshore*) (Figura 45).



**Figura 45. Porcentaje de persistencia de diferencia térmica de 20 °C para el Océano Pacífico mexicano entre la zona superficial y 500 m de profundidad**

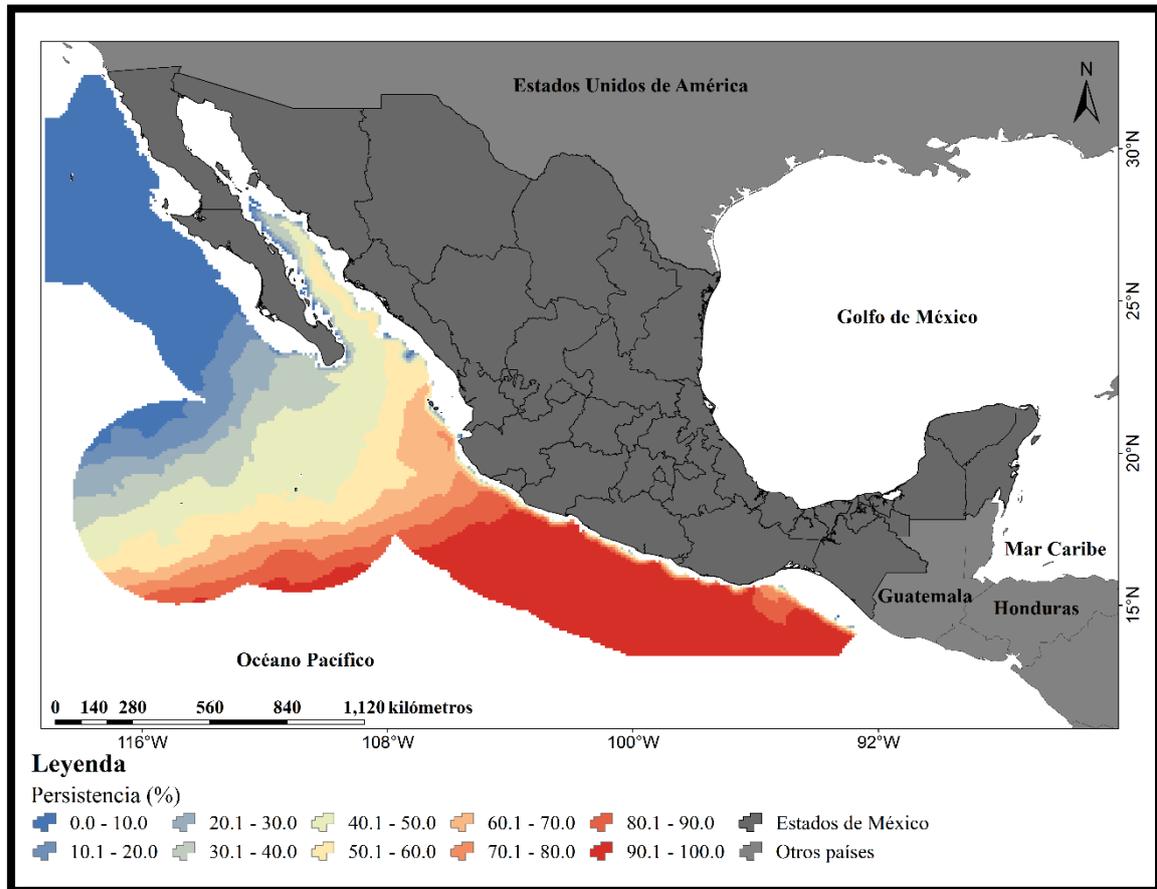
En promedio, el valor de diferencia térmica a 500 m varía entre 0° y 21°C (entre 20.73° y 20.96°C en Guerrero, Oaxaca y Chiapas), con una variación mínima de 0.25°C y máxima de 46.68°C para toda la zona. Esto es debido a que las temperaturas encontradas a esa profundidad con respecto a la superficie no son tan frías por lo que nos permite tener valores mayores a los 20°C de diferencia. Esto se debe a factores tanto oceanográficos como climatológicos asociados a las corrientes superficiales (que se sabe también pueden tener injerencia a profundidades mayores y provocar advección térmica), la zona de mezcla, los huracanes, la estacionalidad, procesos locales como la descarga de ríos, entre otros procesos.

### 3.8.2. Porcentaje de persistencia del diferencial térmico entre superficie y 750 m de profundidad

El análisis muestra que, las zonas con mayor porcentaje de persistencia del diferencial térmico se extienden desde Chiapas hasta Michoacán, entre el 90 y 100% (ver figura 46) y posteriormente este porcentaje disminuye hacia el norte del Pacífico mexicano. Entre los estados de Colima y Sinaloa se presentan porcentajes de persistencia entre 60 y 90% y en la zona sur de la península de Baja California en porcentajes del 30 y 50%.

Al tener como referencia los 750 m de profundidad, se tiene agua profunda mucho más fría, lo que permite que el diferencial térmico sea igual a 20°C o mayor. También es relevante porque se pueden instalar plantas *onshore* o en tierra considerando que las zonas con un porcentaje de persistencia alto se encuentran próximas a los 10 km de distancia

con respecto a la línea de costa. Sin embargo, también pueden colocarse plantas OTEC *offshore* en dichas áreas.



**Figura 46. Porcentaje de persistencia de diferencia térmica para el Océano Pacífico mexicano entre la zona superficial y 750 m de profundidad**

En promedio, el valor de diferencia térmica a 750 m de profundidad y la superficie del mar varía entre 0° y 23°C (entre 21.6° y 23.33°C desde Michoacán hasta Chiapas), con una variación mínima de 0.30°C y máxima de 32.5°C para toda la zona. Esto se debe a que las temperaturas encontradas a esa profundidad son más frías que las encontradas a 500 m por lo que se asegura que la mayor parte del tiempo la persistencia del diferencial térmico sea igual o mayor a 20°C.

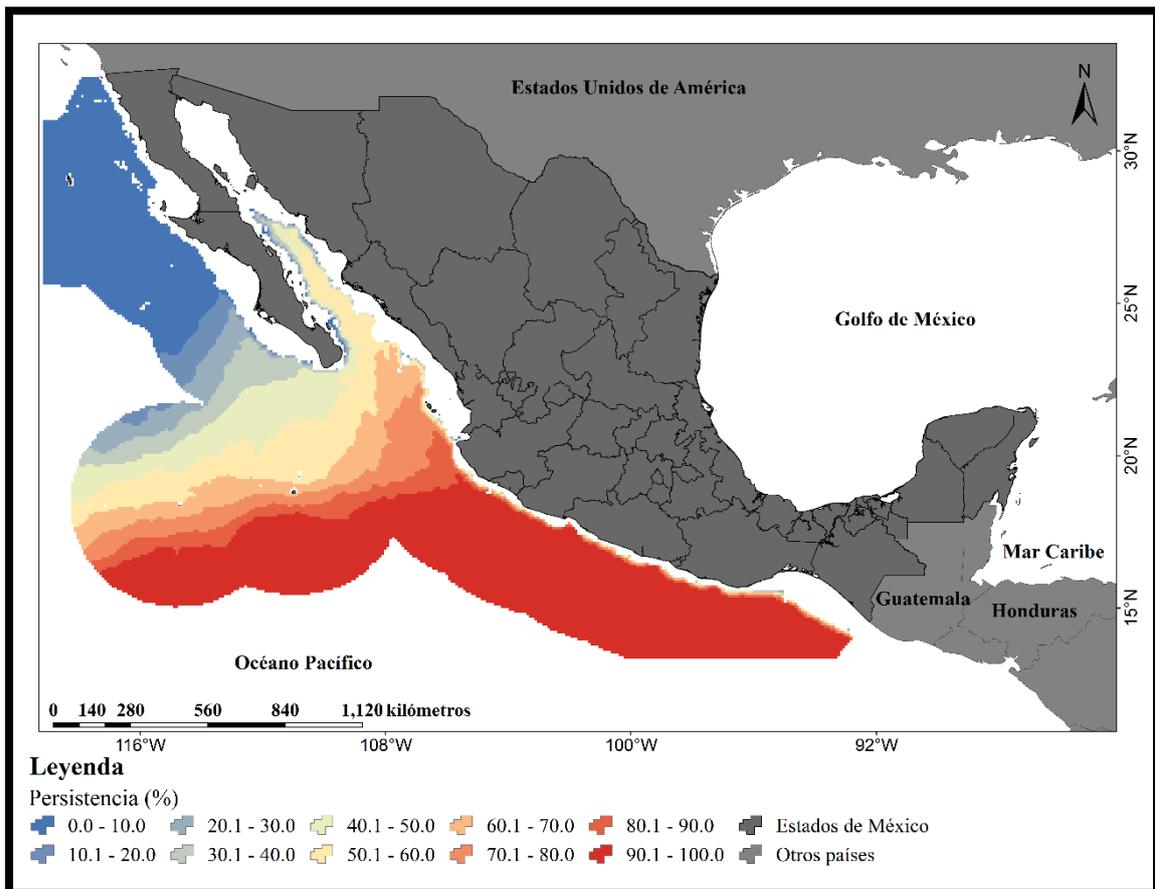
En la parte central de la zona costera de Oaxaca se observa que la persistencia varía entre el 70 y 90%. Esto se puede explicar debido a la presencia de dos fenómenos que ocurren en el estado: los vientos “tehuanos” que generan un enfriamiento de la zona superficial, así como una surgencia subsuperficial que hace que exista una baja de temperatura y, por otro lado, la corriente costanera de Costa Rica que es una corriente fría que podría estar generando un declive en el diferencial térmico.

### 3.8.3. Porcentaje de persistencia del diferencial térmico entre superficie y 1000 m de profundidad

El análisis muestra que las zonas de mayor persistencia a esta profundidad se extienden desde Chiapas hasta Jalisco, con un porcentaje de entre el 80 y 100% para después bajar conforme se avanza al norte del país. Jalisco y Nayarit presentan porcentajes entre 60 y

80%, Sinaloa entre 60 y 70% y la parte sur de la península de Baja California con porcentajes entre el 40 y 60%.

Esto se debe a que a 1000 m de profundidad las temperaturas del agua fría sufren de muy poca variación (entre 4° y 5°C), lo cual permite tener diferenciales iguales o mayores a 20°C. Recordar que este análisis se hizo con el porcentaje de persistencia en superficie para temperaturas iguales o mayores a 25°C, es por esto que si México decide implementar plantas OTEC deberá considerar el costo de las tuberías. La importancia de este estudio es que, a 1000 m de profundidad se pueden tener más opciones para colocar plantas en la mayor parte del Pacífico mexicano, sobre todo considerando las plantas *offshore* (Figura 47). Para las plantas *onshore*, lo indicado es hacer una valoración con más detalle para determinar las zonas de interés con menos incertidumbre.



**Figura 47. Porcentaje de persistencia de diferencia térmica para el Océano Pacífico mexicano entre la zona superficial y 1000 m de profundidad.**

En promedio, el diferencial térmico a una profundidad de 1000 m varía entre 0° y 24.63°C (entre 23.4° y 25.8° C) desde Chiapas hasta la parte sur de Jalisco, con una variación mínima de 0.28°C y una máxima de 32.58° C para toda la zona. La consistencia en el porcentaje de persistencia es debida a que la temperatura de las aguas profundas tiene muy poca variación a través del tiempo y genera diferenciales térmicos iguales o mayores a 20°C.

Las condiciones en el sur sureste del Pacífico mexicano son idóneas para implementar la tecnología OTEC, pues tanto pueden colocarse plantas *offshore* como plantas *onshore*.

### 3.9. Porcentaje de persistencia del diferencial térmico a 500, 750 y 1000 m de profundidad a una distancia máxima de 10 km

El análisis se realizó para determinar las áreas de interés que cumplieran con el diferencial térmico igual o mayor a 20°C para una distancia máxima de 10 km y con ello, definir las zonas más apropiadas para la implementación de esta tecnología.

#### 3.9.1. Persistencia a 500 m y menos de 10 km de distancia a la costa

Tomando como base profundidades de 500 m, de acuerdo a su persistencia, se tendrían sitios prioritarios en los estados de Michoacán, Guerrero y Oaxaca, con porcentajes de hasta el 50%, que aparentemente no serían rentables para implementar una OTEC. Sin embargo, para fines de investigación se podría replicar plantas como la que opera en Corea del Sur (Figura 48).



Figura 48. Porcentaje de persistencia de la diferencia térmica para el Océano Pacífico mexicano entre la zona superficial y 500 m de profundidad a 10 km de distancia

#### 3.9.2. Persistencia a 750 m y menos de 10 km de distancia a la costa

Para profundidades de 750 m, la persistencia es mayor en Michoacán, Guerrero, Oaxaca y en zonas insulares como las Islas Marías y el Archipiélago de las Revillagigedo. El porcentaje oscila entre el 50 y 90%, donde los estados de mayor persistencia son Guerrero y Oaxaca con porcentaje del 90 y 100% (Figura 49).



**Figura 49. Porcentaje de persistencia de la diferencia térmica para el Océano Pacífico mexicano entre la zona superficial y 750 m de profundidad a 10 km de distancia**

### 3.9.3. Persistencia a 1000 m y menos de 10 km de distancia a la costa

Por último, para el caso de profundidades de 1000 m, el análisis determina que los estados que cuentan con sitios más apropiados son Michoacán, Guerrero y Oaxaca con un porcentaje de persistencia entre el 90 y 100%. En el caso de Oaxaca inclusive, no sería sólo un sitio en específico sino toda una franja en la parte sur del estado, por lo que lo convierte en un área para el estudio y posible implementación de OTEC (Figura 50).

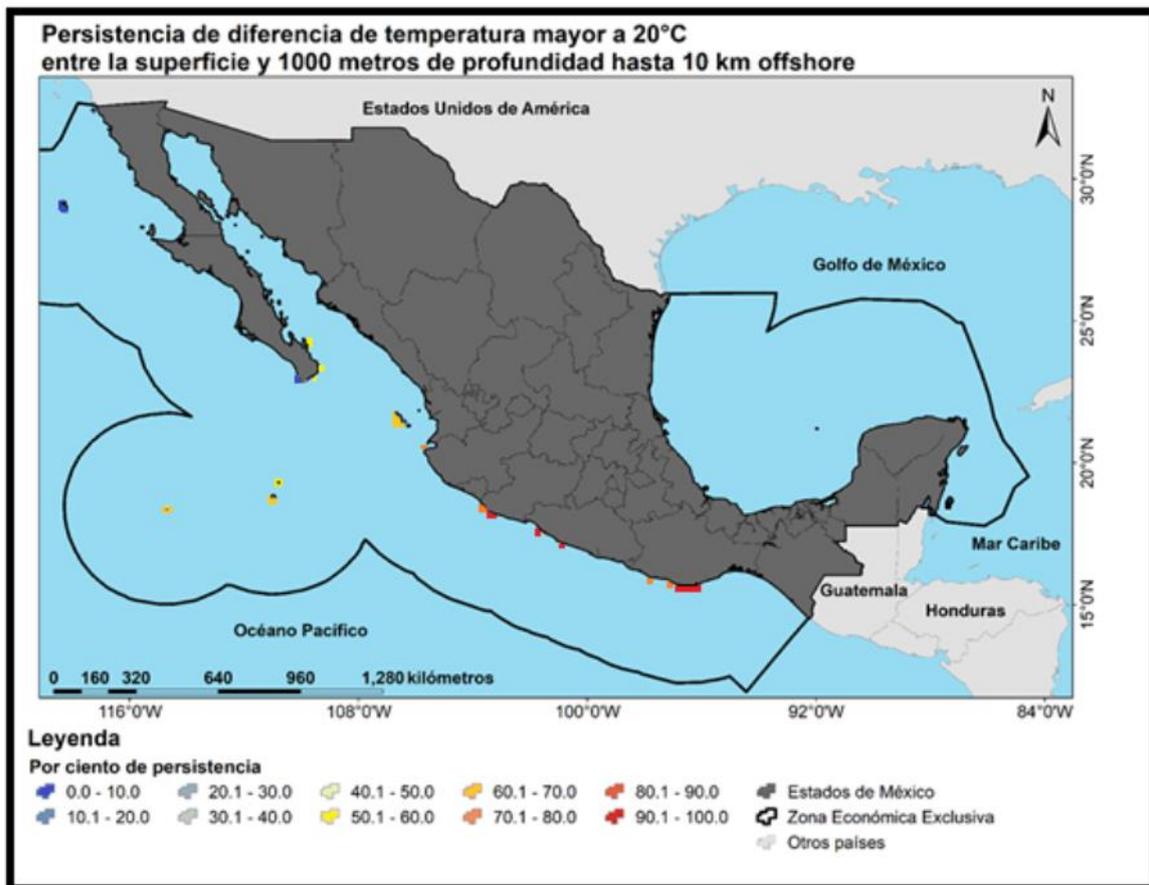


Figura 50. Porcentaje de persistencia de la diferencia térmica para el Océano Pacífico mexicano entre la zona superficial y 1000 m de profundidad a 10 km de distancia

### 3.10. Potencia eléctrica

Los resultados de los cálculos teóricos de potencia eléctrica del ciclo OTEC para sitios en el Pacífico mexicano se resumen en las siguientes tablas y gráficas.

Tabla XVI. Potencia neta anual promedio en los sitios de interés utilizando el ciclo OTEC para zonas del Pacífico mexicano

Sitio	Estado	Distancia a la isolínea de 1000 m (km)	Potencia neta (GWh año <sup>-1</sup> )	Potencia neta (MW)
Puerto Ángel	Oaxaca	7.5	1404	160.27
<b>Nuxco</b>	<b>Guerrero</b>	<b>9.1</b>	<b>1437</b>	<b>164.04</b>
Colola	Michoacán	2.2	1364	155.71
Puerto Vallarta	Jalisco	12.9	1270	144.98
Cabo San Lucas	Baja California Sur	1.3	1008	115.07

De la Tabla XVI se observa que las zonas que ofrecen mayor potencia neta para generación de energía eléctrica utilizando OTEC sería el sur-sureste del país (Guerrero y Oaxaca, específicamente). El poblado de Nuxco, en promedio, anualmente generaría la mayor cantidad, pero con la limitante que es una comunidad que no cuenta con la

infraestructura necesaria y que tiene asentamientos humanos con poca población. En contraste, es posible que para los tomadores de decisiones sea más atractivo los sitios donde sí existe, como son los casos de Puerto Vallarta o Cabo San Lucas (con 6 o 7 meses de operación). Sin embargo, la energía generada no sería capaz de alimentar en su totalidad a los dos lugares debido a la alta demanda y consumo de energía, pero la planta podría establecer un “base load” (carga base) que se podría utilizar en ciertos momentos.

El caso de Puerto Ángel (Oaxaca) es interesante por su gran conveniencia de ubicación del recurso, pero al no contar con un desarrollo alto en infraestructura sectorial la inversión sería más alta para desplegar una planta OTEC, pero no por ello deja de ser una opción importante.

**Tabla XVII. Potencia neta estacional (primavera) en los sitios de interés utilizando el ciclo OTEC para zonas del Pacífico mexicano**

Sitio	Estado	Distancia a la isolinéa de 1000 m (km)	Potencia neta (GWh año <sup>-1</sup> )	Potencia neta (MW)
<b>Puerto Ángel</b>	<b>Oaxaca</b>	<b>7.5</b>	<b>1486</b>	<b>169.63</b>
Nuxco	Guerrero	9.1	1384	157.99
Colola	Michoacán	2.2	1278	145.89
Puerto Vallarta	Jalisco	12.9	1153	131.62
Cabo San Lucas	Baja California Sur	1.3	781	89.16

De la Tabla XVII, se puede observar que, durante la primavera, la zona sureste mantiene una muy buena potencia neta, teniendo a Puerto Ángel como el sitio principal con casi 1500 GWh año<sup>-1</sup>, seguido de la comunidad de El Coyote, Oaxaca con 1470 GWh año<sup>-1</sup>.

**Tabla XVIII. Potencia neta estacional (verano) en los sitios de interés utilizando el ciclo OTEC para zonas del Pacífico mexicano**

Sitio	Estado	Distancia a la isolinéa de 1000 m (km)	Potencia neta (GWh año <sup>-1</sup> )	Potencia neta (MW)
Puerto Ángel	Oaxaca	7.5	1529	174.54
<b>Nuxco</b>	<b>Guerrero</b>	<b>9.1</b>	<b>1562</b>	<b>178.31</b>
Colola	Michoacán	2.2	1512	172.60
Puerto Vallarta	Jalisco	12.9	1552	177.17
Cabo San Lucas	Baja California Sur	1.3	1339	152.85

En el verano, la potencia neta se extendería hacía el occidente del país (Yelapa). Cabe destacar que el sur-sureste seguiría siendo la zona más importante ya que se pueden obtener hasta 1562 GWh año<sup>-1</sup>, con la limitante de acceso a infraestructura adecuada.

Dejando de un lado el tema de la infraestructura, Puerto Ángel es la segunda mejor opción en ese sentido. En general, todas las zonas propuestas presentan un aumento en el potencial eléctrico generado por OTEC.

**Tabla XIX. Potencia neta estacional (otoño) en los sitios de interés utilizando el ciclo OTEC para zonas del Pacífico mexicano**

Sitio	Estado	Distancia a la isolínea de 1000 m (km)	Potencia neta (GWh año <sup>-1</sup> )	Potencia neta (MW)
Puerto Ángel	Oaxaca	7.4	1364	155.71
<b>Nuxco</b>	<b>Guerrero</b>	<b>9.1</b>	<b>1493</b>	<b>170.43</b>
Colola	Michoacán	2.2	1459	166.55
Puerto Vallarta	Jalisco	12.9	1383	157.88
Cabo San Lucas	Baja California Sur	1.3	1213	138.47

De la Tabla XIX, se observa que la zona sur-sureste sigue siendo la región con una mayor generación de potencia neta eléctrica, pero sería en los poblados guerrerenses donde se obtendría la mayor cantidad. Colola (Michoacán) también tendría una producción muy respetable. En este sentido, Puerto Ángel no destaca tanto, pero sigue manteniendo valores de potencia muy atractivos. Para las zonas de Cabo San Lucas y Puerto Vallarta se observa un incremento para el verano, ya que en estos meses el diferencial térmico puede permitir la generación de un potencial eléctrico alto.

**Tabla XX. Potencia neta estacional (invierno) en los sitios de interés utilizando el ciclo OTEC para zonas del Pacífico mexicano**

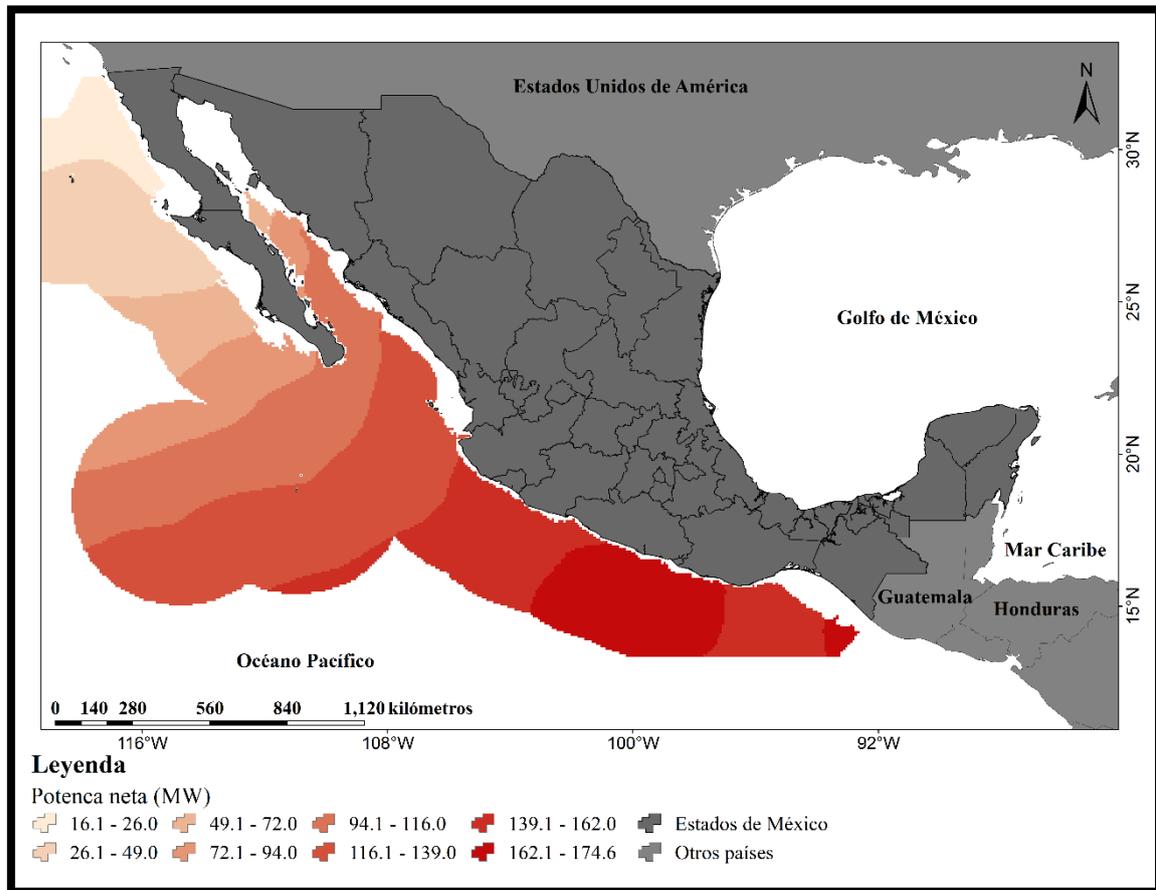
Sitio	Estado	Distancia a la isolínea de 1000 m (km)	Potencia neta (GWh año <sup>-1</sup> )	Potencia neta (MW)
Puerto Ángel	Oaxaca	7.4	1238	141.32
<b>Nuxco</b>	<b>Guerrero</b>	<b>9.1</b>	<b>1313</b>	<b>149.89</b>
Colola	Michoacán	2.2	1215	138.70
Puerto Vallarta	Jalisco	12.9	1009	115.18
Cabo San Lucas	Baja California Sur	1.3	757	86.42

De la Tabla XX se observa que, en invierno, la producción baja considerablemente, pero mantiene valores de 1000 o más GWh año<sup>-1</sup>. La zona del estado de Guerrero presenta los valores más altos seguido de Oaxaca. Se observa también que las zonas de Cabo San Lucas y Puerto Vallarta presentan un descenso en el potencial eléctrico, particularmente debido a que la diferencia térmica disminuye de manera importante (entre 4° y 5°C) lo que se traduce en una disminución de un 15% por cada grado centígrado del potencial eléctrico.

Considerando el análisis previo, se determinó que el diferencial de temperatura mínimo para generar al menos una potencia eléctrica de 0.008 MW es de 10.732°C. Mientras que el porcentaje de variación de la potencia eléctrica con respecto al valor de diferencia de temperatura es del 7.8%, es decir que, por cada variación en 1°C en el diferencial, se tiene una variación del 7.8% en el valor de la potencia eléctrica neta. Esto se refleja en la tabla XXI.

### 3.10.1. Mapas de potencia eléctrica neta teórica

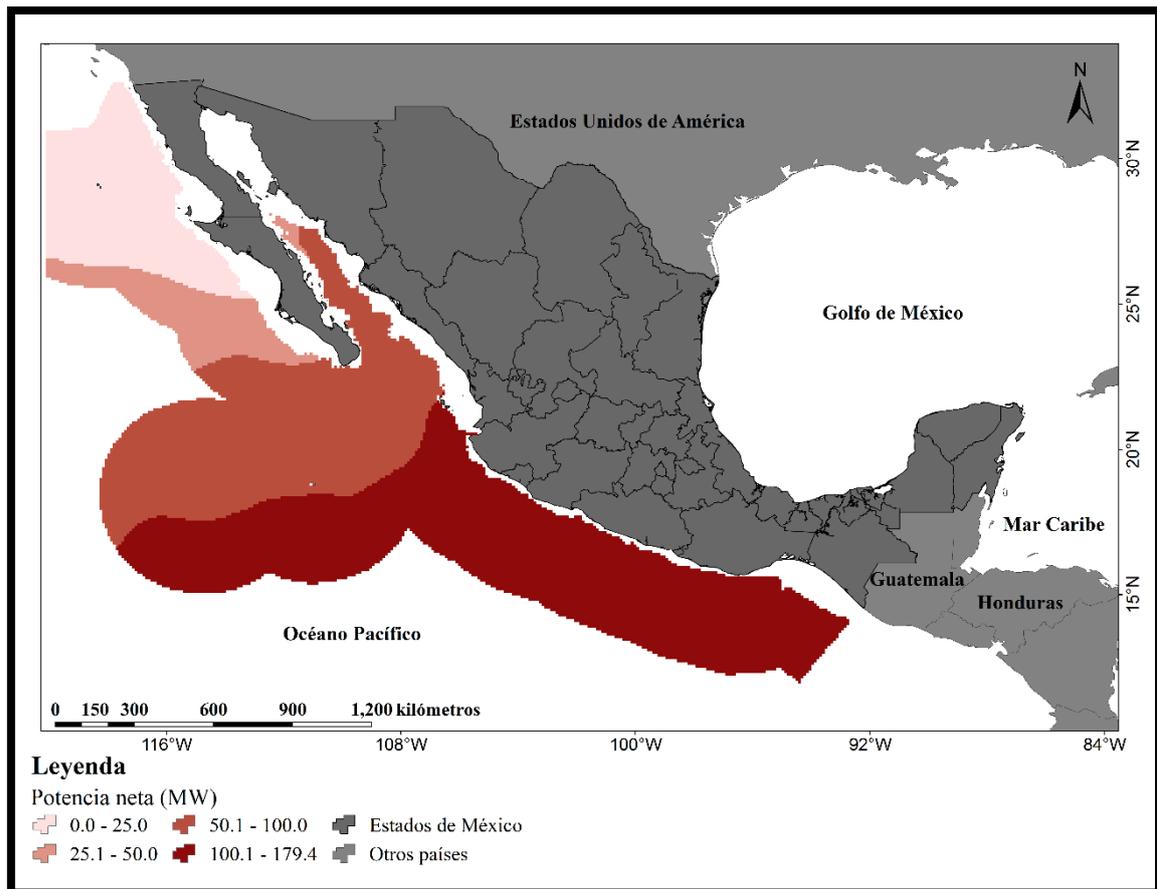
En las figuras 51 a la 55 se presenta la potencia neta eléctrica teórica que puede generarse en el Océano Pacífico mexicano tanto la media anual como la media estacional.



**Figura 51. Potencia neta media anual generada mediante OTEC en el Pacífico mexicano**

La franja de mayor cantidad de potencia neta se encuentra entre los estados de Guerrero y Oaxaca (162-174 MW) que se traducen en valores que oscilan entre 1135-1219 GWh año<sup>-1</sup>(Figura 51). Se puede apreciar también que, en el Pacífico mexicano, las zonas con más potencial para una posible explotación de las diferencias térmicas oceánicas se dan desde la parte occidental hasta el sur de la costa, desde Nayarit hasta Chiapas.

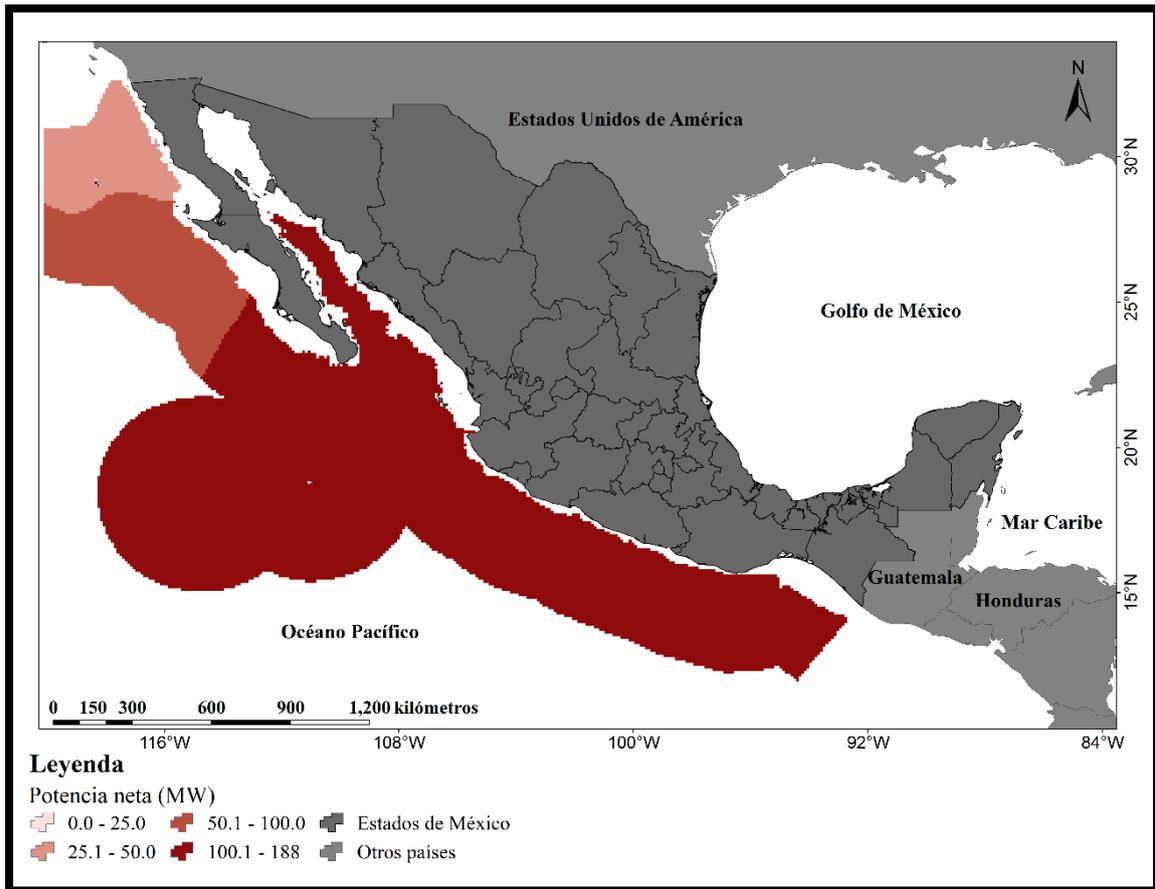
De los sitios descritos en las tablas anteriores, Puerto Ángel y El Coyote tendrían una potencia neta anual promedio entre 139-162 MW (1404 GWh año<sup>-1</sup>), Nuxco y San Luis de la Loma entre 162-174 MW (1437 GWh año<sup>-1</sup>), Colola entre 139-162 MW (1364 GWh año<sup>-1</sup>), Puerto Vallarta y Yelapa entre 116-139 MW (1270 GWh año<sup>-1</sup>) y Cabo San Lucas entre 94 y 116 MW (1008 GWh año<sup>-1</sup>), de acuerdo con el diferencial térmico presente.



**Figura 52. Potencia neta media estacional (primavera) generada mediante OTEC en el Pacífico mexicano**

Estacionalmente, la potencia neta varía al igual que la diferencia de temperatura. En primavera (Figura 52), la zona con una mayor potencia teórica se encuentra en la región sur-sureste del país, Guerrero y Oaxaca, con un rango de entre 1372 y 1483 GWh año<sup>-1</sup> (140-179 MW). La zona occidente del Pacífico, Jalisco-Michoacán, presenta un rango entre los 1150 y 1372 GWh año<sup>-1</sup> (100-140 MW) y en la zona sur de la Península de Baja California presenta una potencia neta teórica de entre 707 y 817 GWh año<sup>-1</sup> (60-80 MW).

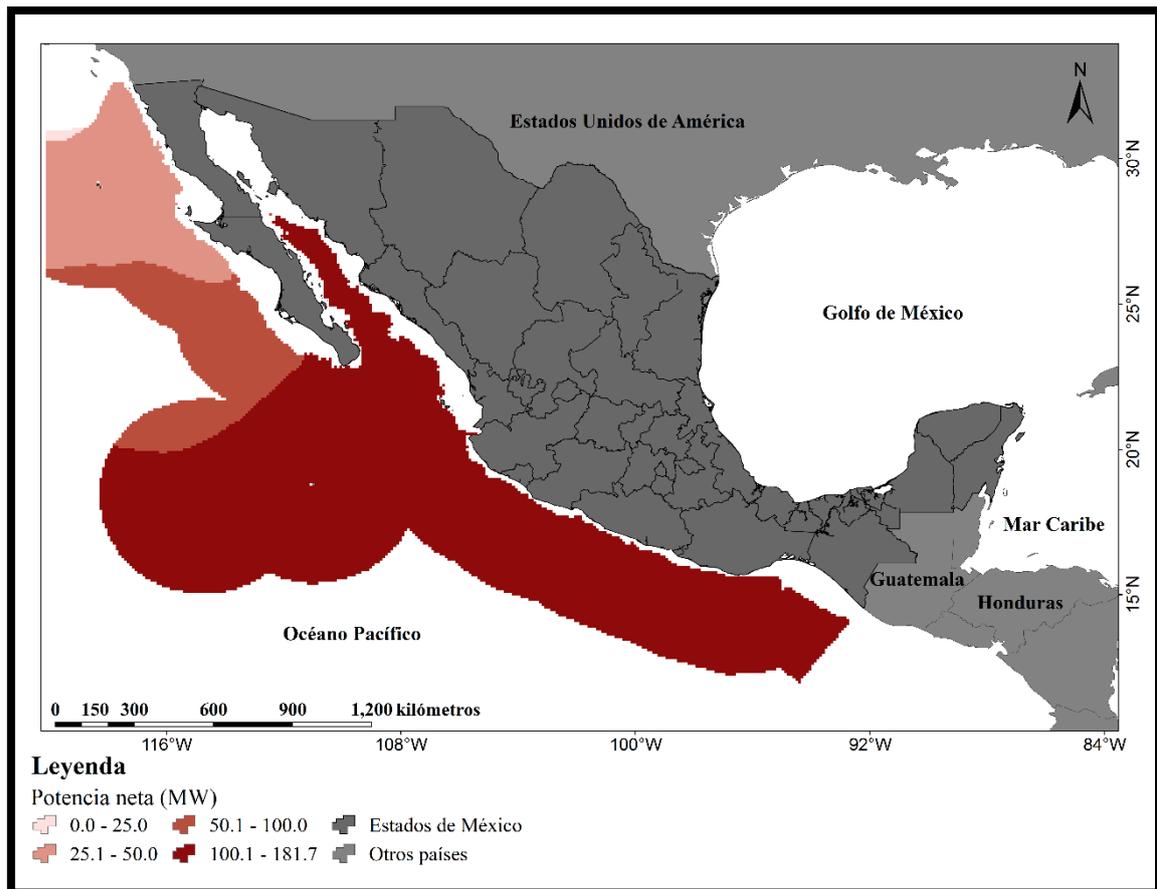
De los sitios descritos, Puerto Ángel y El Coyote tendrían una potencia de entre 140-179 MW (1483 GWh año<sup>-1</sup>) durante aproximadamente 4 meses (marzo a junio) al igual que Nuxco y San Luis de la Loma. En el caso de Colola, tendría una potencia de entre 120-140 MW (1372 GWh año<sup>-1</sup>), Puerto Vallarta y Yelapa entre 100 y 120 MW (1150 GWh año<sup>-1</sup>) y Cabo San Lucas entre 60 y 80 MW (817 GWh año<sup>-1</sup>).



**Figura 53. Potencia neta media estacional (verano) generada mediante OTEC en el Pacífico mexicano**

Durante el verano (Figura 53), el Pacífico mexicano presenta los máximos valores de potencia neta estacional teórica. Las regiones occidental, sur y sureste cuentan con valores de entre los 1501-1603 GWh año<sup>-1</sup> (160-188 MW) mientras que en el sur de la Península de Baja California se tendrían valores potenciales de entre 1297 y 1399 GWh año<sup>-1</sup> (100-120 MW). Esto obedece a una mayor diferencia térmica estacional en el Pacífico mexicano que, de igual forma, se da en el verano

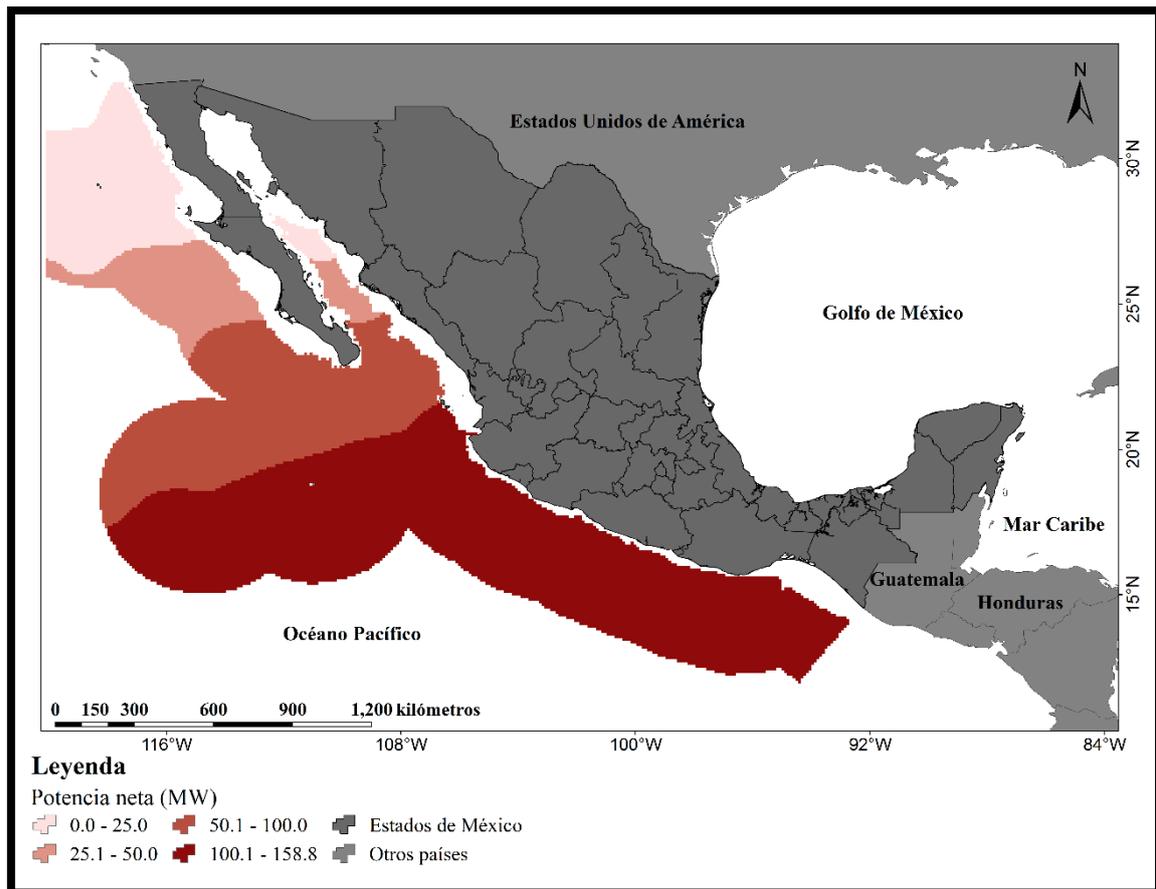
De los sitios descritos, los poblados que van desde Puerto Ángel hasta Yelapa tendrían una potencia eléctrica entre 160-181 MW (hasta 1603 GWh año<sup>-1</sup>), mientras que Cabo San Lucas oscilaría entre los 120-140 MW (hasta 1399 GWh año<sup>-1</sup>).



**Figura 54. Potencia neta media estacional (otoño) generada mediante OTEC en el Pacífico mexicano**

Durante el otoño (Figura 54), las regiones del sur-sureste y parte del occidente del Pacífico mexicano tienen los valores más altos de potencia neta que oscilan entre los 1454-1508 GWh año<sup>-1</sup> (160-181 MW) mientras que en áreas de Oaxaca, Colima y Jalisco se tendrían valores de entre 1265 y 1359 GWh año<sup>-1</sup>. La Península de Baja California presenta valores entre 1170 y 1265 GWh año<sup>-1</sup>. Esto quizás es debido a la influencia de corrientes antagónicas presentes en la zona, como lo son las corrientes de California y Costanera de Costa Rica (Corriente Costera Mexicana o del Oeste).

De los sitios descritos, los poblados que van desde Puerto Ángel hasta Yelapa tendrían una potencia eléctrica entre 160-180 MW (hasta 1508 GWh año<sup>-1</sup>), mientras que Cabo San Lucas oscilaría entre los 120-140 MW (hasta 1265 GWh año<sup>-1</sup>).



**Figura 55. Potencia neta media estacional (invierno) generada mediante OTEC en el Pacífico mexicano**

En el invierno (Figura 55), la potencia neta disminuye considerablemente, pero sigue siendo la región sur-sureste la que presenta los valores más altos. Guerrero y Oaxaca son los estados con mayor potencial, con un intervalo de potencia de entre 1236 y 1336 GWh año<sup>-1</sup>, mientras que en la región occidental del Pacífico (Michoacán-Colima) se tienen valores de entre 1135-1236 GWh año<sup>-1</sup> y entre 934-1035 GWh año<sup>-1</sup>. La zona del sur de la Península de Baja California presenta los valores más bajos de potencia, entre 733-834 GWh año<sup>-1</sup>.

De los sitios descritos, Puerto Ángel y El Coyote presentan potencias entre 120-140 MW (hasta 1236 GWh año<sup>-1</sup>), Nuxco, San Luis de la Loma y Colola entre 140-160 MW (hasta 1336 GWh año<sup>-1</sup>), Puerto Vallarta y Yelapa entre 100 y 120 MW (hasta los 1035 GWh año<sup>-1</sup>) y Cabo San Lucas entre 60 y 80 MW (hasta 834 GWh año<sup>-1</sup>).

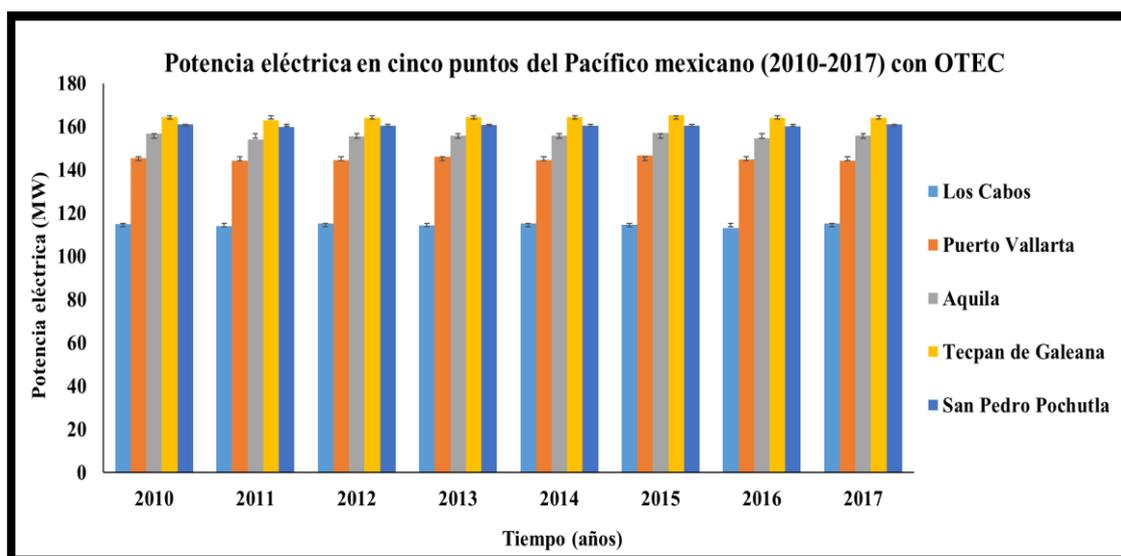
Cabe destacar que los resultados son consistentes con los calculados por Rajagopalan y Nihous en su ejercicio de obtener la potencia neta a nivel global.

**Tabla XXI. Porcentaje de variación de la potencia neta eléctrica con respecto a la diferencia de temperatura en el Pacífico mexicano**

Diferencia de temperatura (°C)	Temperatura superficial máxima (anual promedio) °C	Temperatura profunda mínima (anual promedio) °C	$\Delta T^2$ (°C)	Porcentaje de variación en la potencia neta eléctrica (%)
24.973	29.405	4.432	623.65	7.84

### 3.10.2. Consumo eléctrico para cinco sitios de interés para implementación de OTEC en el Océano Pacífico mexicano

De acuerdo con el análisis de generación eléctrica y datos demográficos a nivel municipal para el Océano Pacífico mexicano, se determinaron cinco lugares potenciales donde OTEC puede ser implementado. La elección incluyó Cabo San Lucas, Puerto Vallarta, Colola, Nuxco y Puerto Ángel. Para su elección se tomó en cuenta al mismo tiempo los porcentajes de persistencia teóricos a una distancia de 10 km y a 1000 m de profundidad del diferencial térmico. Para el periodo 2010-2017, los resultados se presentan en la figura 40 de acuerdo con los datos del World Ocean Atlas Database y la ecuación de potencia neta eléctrica de Nihous (2013) (Figura 56).



**Figura 56. Potencia eléctrica para cinco puntos del Océano Pacífico mexicano, tomando en cuenta la ecuación de Nihous para la implementación de OTEC (2010-2017)**

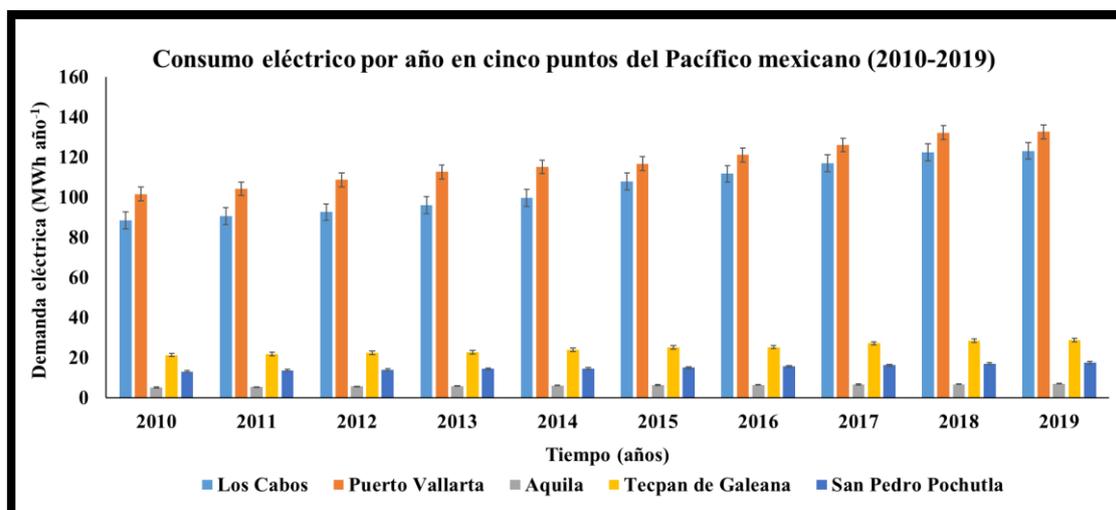
Posteriormente, se hizo la comparación entre lo que teóricamente se puede explotar (promedio anual) y el consumo eléctrico anual de los municipios elegidos, esto debido a que no existen datos específicos de los sitios. El resultado puede observarse en la tabla XXII.

**Tabla XXII. Comparativa entre la potencia eléctrica teórica por medio de OTEC y el consumo eléctrico de los municipios elegidos (promedio del intervalo 2010-2019)**

Municipio	Potencia eléctrica neta promedio (MW)	Consumo eléctrico promedio (MWh año <sup>-1</sup> )*	Porcentaje de persistencia anual (1000 m de profundidad)
Los Cabos, BCS.	115.07	104.81	40-50%
Puerto Vallarta, Jal.	144.98	116.98	70-80%
Aguila, Mich.	155.71	6.04	80-90%
Tecpán, Gro.	164.04	24.59	90-99%
Pochutla, Oax.	160.27	15.04	90-99%

\*Fuente: Centro Nacional de Control de Energía (CENACE)

De la Tabla XXII, se puede observar que, aunque se tiene un potencial teórico anual promedio superior al consumo eléctrico promedio de los cinco municipios analizados, el porcentaje de persistencia no permitiría un suministro que permita satisfacer el consumo eléctrico de Los Cabos, BCS, pues la persistencia del diferencial térmico a 1000 m de profundidad es de, máximo 50%. Los municipios que pueden satisfacer su demanda y tener la posibilidad de exportar energía son los que presentan un porcentaje de persistencia del diferencial térmico entre el 80% y 99%, como los casos de Puerto Vallarta, Colola, Nuxco y Puerto Ángel. Simplemente destacar que Colola y Nuxco al contar con una población muy pequeña implican un reto más grande por las condiciones de la infraestructura disponible.



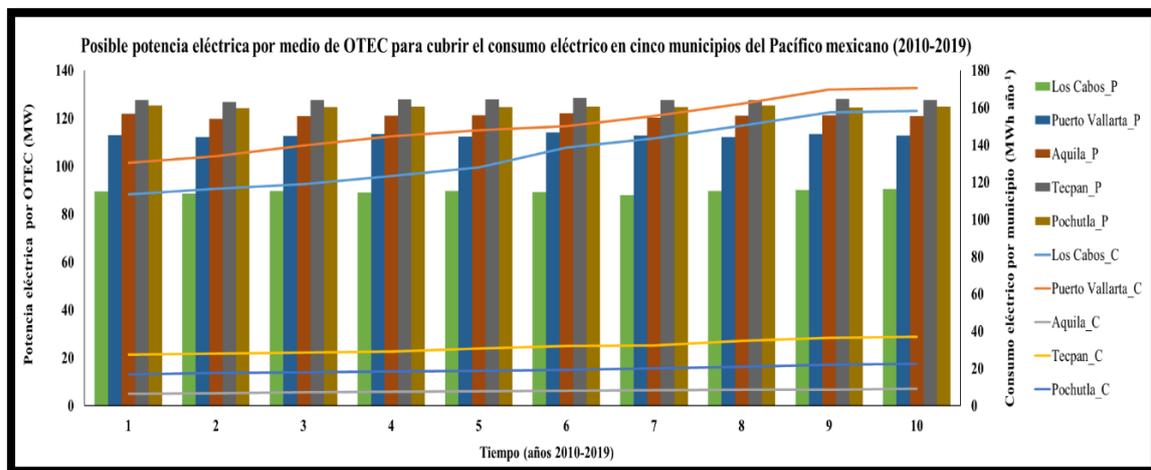
**Figura 57. Consumo anual promedio de cinco puntos del Pacífico mexicano. Fuente: CENACE (2020)**

De la figura 57 se puede observar que, en los municipios de Los Cabos y Puerto Vallarta, a partir de 2010 se ha presentado un aumento más acelerado en el consumo eléctrico que en los otros tres municipios. La planta OTEC podría cubrir la demanda eléctrica en un 100% en las áreas donde el consumo eléctrico es más bajo (Aguila, Tecpán y Pochutla) e inclusive, lograr exportar electricidad a comunidades costeras aledañas con el fin de cubrir el consumo eléctrico costero. Con una planta de 100 MW, la costa oaxaqueña quedaría cubierta en un 55% mientras que en las costas de Guerrero y Michoacán habría una cobertura del consumo costero de 67% y 59% respectivamente, esto sin la necesidad

que se conecten a la red nacional eléctrica y con una persistencia entre el 90 y el 100% del diferencial.

En el caso de los municipios de mayor consumo, se podría fijar un porcentaje con base en la persistencia del diferencial térmico presente, es decir, en Puerto Vallarta se podría tener esta producción como un “base load” o consumo inicial eléctrico y el restante por medio de la red eléctrica nacional a determinadas horas. Lo mismo en el caso de Los Cabos cuya producción eléctrica podría utilizarse para suministrarse a los ciudadanos del municipio en algunos meses del año en los cuales se tiene el diferencial térmico adecuado (hasta un 66% en verano y otoño) pero sin considerarse en invierno y primavera por la reducción de la temperatura superficial.

Posteriormente, se realizó un gráfico donde se muestra el potencial OTEC en dichos municipios contra el consumo eléctrico de cada uno (Figura 58).



**Figura 58. Potencia eléctrica por OTEC y consumo eléctrico de cinco municipios del Pacífico mexicano**

De la figura 57, se observa claramente que, en los casos de Los Cabos y Puerto Vallarta, una planta de 100 MW puede ser utilizada para generar una “base load eléctrico” y el resto por medio de la red eléctrica nacional. El consumo se explica a que estos son municipios con poblaciones de más de 100,000 habitantes, así como por ser municipios de amplia demanda turística. Otra opción, en el caso de Los Cabos sería que la planta se utilizara para generación de agua potable y aire acondicionado, más que para generar electricidad.

En el resto de los municipios, una planta de esa potencia cubre significativamente todo el consumo eléctrico por ser áreas de pequeñas poblaciones por lo que, se puede optar por tener una planta de menor potencia eléctrica o mantener la misma capacidad para exportar a diferentes municipios aledaños.

Por último, se hizo una evaluación comparativa de la tecnología OTEC con respecto de otras energías renovables y convencionales (combustible fósil). Estos resultados se presentan en la tabla XXIII.

**Tabla XXIII. Capacidad efectiva instalada (MW) de plantas de energías renovables y convencionales<sup>1</sup> comparada con la teórica de ciclo OTEC, producción neta anual promedio, factor de planta y horas netas de producción**

Tipo de energía	Total (MW)	Factor de planta	Producción neta anual promedio (GWh año <sup>-1</sup> )	Horas netas de producción anual
<b>Ciclo OTEC<sup>2</sup></b>	<b>100</b>	<b>0.8</b>	<b>1562.5</b>	<b>8760</b>
Hidroeléctrica	2400	0.41	3498.1	3555
Solar/Fotovoltaica	30	0.46	19.5	1415
Eólica	251.1	0.32	225	2801
Geotérmica	225	0.77	1172.3	6767
Bioenergía	53	0.24	26.7	2100
Carboeléctrica	2778	0.73	12897.6	6360
Termoeléctrica	2100	0.37	2488.7	3203
Dual	367	0.64	1145.5	4877
Turbogas	393	0.28	274.4	2494
Nucleoeléctrica	1608	0.75	7925.8	6572
Combustión interna	210	0.25	113.5	2162
Frenos regenerativos	290	0.56	1071.1	6596
Ciclo combinado	1454	0.67	5650.2	5800

<sup>1</sup>Fuente: SENER (elaborado con datos de la CFE, CRE, CENACE, SEMARNAT y la Secretaría de Planeación y Transición Energética, 2016). En azul, energías renovables. En rojo, energías convencionales. <sup>2</sup>Teórico.

De acuerdo con la Tabla XXIII, una planta OTEC podría tener una generación neta promedio de electricidad más alta que la mayoría de las energías renovables, exceptuando las hidroeléctricas que tienen el doble de producción neta. Esto se debe al factor de planta en la que el ciclo OTEC es mucho mejor, así como por el hecho de trabajar los 365 días del año y las 24 horas del día, exceptuando el tiempo necesario para el mantenimiento requerido.

En una comparativa general con las energías convencionales, en algunas circunstancias OTEC es competitiva en cuanto a la producción. Sin embargo, esta fuente de energía debe servir para ampliar las posibilidades de la matriz energética nacional y con ello lograr una menor huella de carbono. Por la localización de estas fuentes, OTEC ofrece una gran oportunidad para las poblaciones costeras, garantizando con ello el poder tener acceso a la electricidad de calidad.

Es preciso señalar que en 2011 la capacidad efectiva instalada de muchas de estas plantas era mucho mayor que en el 2016; esto se debe a que el tiempo de vida de muchas de estas ya no les permite trabajar al 100%. Sin embargo, a finales del 2018 el Gobierno Federal decidió darles mantenimiento a las 60 centrales hidroeléctricas del país en convenio con la empresa gubernamental canadiense Hydro-Québec -firmado el mes de marzo de 2019- por lo que se espera que esto genere el doble de producción eléctrica, aunado con un factor de planta mayor al actual (0.6-0.7 en promedio). Lo mismo en el caso de la tecnología nuclear con la firma en el 2019 del convenio binacional entre México y Estados Unidos en el cual se considera la posibilidad de aumentar la generación eléctrica de Laguna Verde y valorar la posibilidad de construir centrales nucleares en Chihuahua, Durango y Sonora.

### 3.11. Flujo volumétrico teórico

De acuerdo con el análisis realizado por medio de las fórmulas de optimización de plantas OTEC, a nivel anual y estacional se obtuvieron los siguientes resultados de los flujos volumétricos de agua superficial y agua profunda, así como el volumen teórico de agua potable (Tablas XXIV a la XXVIII). Existe una relación directamente proporcional entre la producción de energía eléctrica generada y la cantidad de volumen de agua de mar necesaria para su generación, siempre y cuando la generación energética y de agua sea a partir de 1 MW.

En la Tabla XXIV, se observa la cantidad de flujo volumétrico de agua fría ( $Q_{cw}$ ) que se pueden obtener en diferentes sitios de interés, el flujo de agua superficial ( $Q_{ww}$ ) y la producción de agua potable que se puede obtener si la planta OTEC fuese de ciclo abierto.

**Tabla XXIV. Flujo volumétrico promedio anual de agua fría y superficial para diferentes sitios de interés y producción de agua potable**

Sitio	Potencia eléctrica promedio (GWh año <sup>-1</sup> , MW)	( $Q_{cw}$ ) ( $m^3 s^{-1}$ )	( $Q_{ww}$ ) ( $m^3 s^{-1}$ )	Agua potable ( $m^3 s^{-1}$ )
Puerto Ángel	1404 (160.27)	331.51	358.29	1.97
<b>Nuxco</b>	1437 (164.04)	<b>341.44</b>	<b>370.33</b>	<b>2.03</b>
Colola	1364 (155.71)	331.79	359.86	1.97
Puerto Vallarta	1270 (144.98)	298.26	347.58	1.91
Cabo San Lucas	1008 (115.07)	257.78	297.44	1.63

De los sitios descritos, Nuxco tendría un gasto total de  $711.77 m^3 s^{-1}$  ( $341.44 m^3 s^{-1}$  de agua profunda y  $370.33 m^3 s^{-1}$  de agua superficial) lo cual produciría  $2.03 m^3 s^{-1}$  de agua potable, equivalentes a 175,392  $m^3$  diarios que permitirían el desarrollo de la región costera guerrerense. En el caso de Cabo San Lucas (el lugar con menor producción eléctrica) se producirían más de 140 mil  $m^3$  diarios de agua potable, lo que abre la posibilidad de una implementación de esta tecnología en este sitio, pero con el objetivo de obtener este subproducto más que electricidad. En general, todos los sitios se verían beneficiados con este proceso.

Por otro lado, de acuerdo con el análisis estacional se tiene que, durante la primavera, se tiene que en la zona sur-sureste del país el gasto es superior que, en otras zonas del Pacífico mexicano, principalmente los estados de Guerrero y Oaxaca. De acuerdo con la tabla XXV los datos de gasto volumétrico serían los siguientes:

**Tabla XXV. Flujo volumétrico estacional de agua fría y superficial para diferentes sitios de interés y producción de agua potable (primavera)**

Sitio	Potencia eléctrica primavera (GWh año <sup>-1</sup> , MW)	(Q <sub>cw</sub> ) (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	(Q <sub>ww</sub> ) (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	Agua potable (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )
<b>Puerto Ángel</b>	<b>1486 (169.63)</b>	<b>358.57</b>	<b>387.53</b>	<b>2.13</b>
Nuxco	1384 (157.99)	346.86	376.20	2.06
Colola	1278 (145.89)	327.66	355.39	1.95
Puerto Vallarta	1153 (131.62)	272.94	317.55	1.74
Cabo San Lucas	781 (89.16)	312.26	360.30	1.98

Una planta OTEC de ciclo abierto en Puerto Ángel generaría en primavera un bombeo total de agua de mar de **746.10 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>** y una producción de agua potable de 2.13 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> que podrían potenciar el desarrollo de toda la región costera oaxaqueña pues la producción de agua sería superior que el valor del consumo de la población de los municipios costeros del estado, lo cual permitiría la extracción del agua para otras actividades, como agricultura y acuicultura. De esta forma, sería muy posible el establecimiento de diferentes industrias en el municipio como sucede países como Corea del Sur y Japón.

En Guerrero (Nuxco), se producirían más de los 177 millones de litros diarios de agua potable, mientras que en Michoacán (Colola) y Jalisco (Puerto Vallarta) se generarían entre 168 y 150 millones de litros diarios de agua potable, respectivamente. Por último, en la zona de Cabo San Lucas, la generación de agua potable estaría próximo a los 171 millones de litros diarios. En lo particular, Cabo San Lucas dado el déficit de agua dulce, con la implementación de OTEC quizás genere más beneficios la producción de agua dulce que la generación de electricidad.

Para el verano, con el incremento de la diferencia de temperatura (y, por lo tanto, incremento de la potencia eléctrica), aumenta el caudal utilizado. Los datos se muestran la tabla XXVI.

**Tabla XXVI. Flujo volumétrico estacional de agua fría y superficial para diferentes sitios de interés y producción de agua potable (verano)**

Sitio	Potencia eléctrica verano (GWh año <sup>-1</sup> , MW)	(Q <sub>cw</sub> ) (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	(Q <sub>ww</sub> ) (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	Agua potable (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )
Puerto Ángel	1529 (174.54)	305.35	352.33	1.93
Nuxco	1562 (178.31)	342.32	371.28	2.04
Colola	1512 (172.60)	347.31	376.69	2.07
<b>Puerto Vallarta</b>	<b>1552 (177.17)</b>	<b>339.51</b>	<b>395.66</b>	<b>2.17</b>
Cabo San Lucas	1339 (152.85)	305.35	352.33	1.93

De acuerdo con estos datos, Nuxco produciría un total de **713.6 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>** de agua de mar y se obtendrían 2.04 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> de agua potable en el verano que pueden detonar el desarrollo regional de los municipios costeros de ese estado, En general, todos los sitios de interés se verían beneficiados con este aumento en el caudal de agua dulce, pues las actividades de tipo industrial podrían desarrollarse y con esto, un aumento en el bienestar social. Uno

de los retos importantes es la construcción de la infraestructura requerida que a la fecha no se tiene desplegada.

Durante el otoño, el caudal máximo se mantiene desde Jalisco hasta Oaxaca, pero hay una disminución en la zona del Golfo de Tehuantepec. En el sur de la península de Baja California se incrementa el gasto, particularmente en el área de isla Cerralvo, ver tabla XXVII. Esto concuerda con los resultados de potencia eléctrica.

**Tabla XXVII. Flujo volumétrico estacional de agua fría y superficial para diferentes sitios de interés y producción de agua potable (otoño)**

Sitio	Potencia eléctrica otoño (GWh año <sup>-1</sup> , MW)	(Q <sub>cw</sub> ) (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	(Q <sub>ww</sub> ) (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	Agua potable (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )
Puerto Ángel	1364 (155.71)	335.68	362.80	1.99
Nuxco	1493 (170.43)	340.75	369.59	2.03
<b>Colola</b>	<b>1459 (166.55)</b>	<b>351.49</b>	<b>381.24</b>	<b>2.09</b>
Puerto Vallarta	1383 (157.88)	322.36	375.67	2.06
Cabo San Lucas	1213 (138.47)	306.73	353.93	1.94

Asociado a procesos oceanográficos, durante los meses de otoño (septiembre-diciembre) la diferencia de temperatura disminuye y por lo tanto en la potencia eléctrica como en el caudal generado es menor. Aun así, el caudal de agua que se puede generar en todos los sitios es muy favorable para incrementar el desarrollo, particularmente en Puerto Vallarta y Cabo San Lucas.

En Michoacán se podrían producir la mayor cantidad de agua potable (180 millones de litros diarios), seguido de Jalisco (177 millones de litros diarios), Guerrero (175 millones de litros diarios), Oaxaca (171 millones de litros diarios) y Baja California Sur (167 millones de litros diarios).

En invierno, al disminuir el diferencial de temperatura -y por tanto la potencia eléctrica-, también desciende el caudal requerido. Las condiciones oceanográficas y climatológicas que generan un enfriamiento superficial del mar inducen esta baja, tanto en el caudal como en la potencia. Los resultados de esta evaluación se presentan en la tabla XXVIII.

**Tabla XXVIII. Flujo volumétrico estacional de agua fría y superficial para diferentes sitios de interés y producción de agua potable (invierno)**

Sitio	Potencia eléctrica invierno (GWh año <sup>-1</sup> , MW)	(Q <sub>cw</sub> ) (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	(Q <sub>ww</sub> ) (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	Agua potable (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )
Puerto Ángel	1238 (141.32)	314.91	340.35	1.87
Nuxco	1313 (149.89)	325.42	352.95	1.94
Colola	1215 (138.70)	330.94	358.94	1.97
Puerto Vallarta	1009 (115.18)	268.50	312.90	1.72
<b>Cabo San Lucas</b>	<b>757 (86.42)</b>	<b>317.04</b>	<b>365.81</b>	<b>2.01</b>

Debido a que en la zona del Golfo de Tehuantepec se presentan los vientos “tehuanos” (diciembre-febrero) y a que en la parte occidental del noroeste mexicano la corriente de

California se desplaza al este, hasta la zona de Cabo Corrientes donde cambia de dirección, el diferencial de temperatura disminuye considerablemente y con esto se reducen tanto el potencial de electricidad como el caudal generado.

En esta estación del año, la producción de agua potable es importante en algunas zonas, como los que se presentan en los sitios de Guerrero (167 millones de litros diarios). A pesar que en Cabo San Lucas existe una disminución importante en la producción eléctrica, la generación de agua potable es importante (173 millones de litros diarios) con lo que se refuerza la factibilidad de implementar la tecnología de OTEC para este fin.

Los resultados aquí obtenidos deben tomarse como orientativos en virtud que se han obtenido de manera teórica con información extrapolada de otras plantas OTEC. Es recomendable realizar estudios específicos para valorar más realísticamente las pérdidas de energía por fricción en diferentes componentes de la planta como en las tuberías, los intercambiadores de calor, los evaporadores, condensadores, turbina, así como las pérdidas por velocidad en diferentes secciones de las tuberías.

También se determinó que, de acuerdo con el valor de equilibrio en el diferencial de temperatura ( $10.732^{\circ}\text{C}$ ) el gasto volumétrico es de  $0.025\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$ , por lo que, para generar 1 MW de electricidad con OTEC se requieren  $2.975\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$  extras a partir del volumen de agua profunda requerido para el punto de equilibrio.

Por último, se sabe que teóricamente, una planta de 100 MW requiere bombear  $309.7174\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$  de agua fría para operar, sin embargo, no contempla las pérdidas por velocidad y por energía, así como las pérdidas en los intercambiadores de calor por lo que los valores obtenidos por las fórmulas generales de MOTEM son muy similares a los obtenidos por Nihous en 2013.

### 3.12. Factor de planta

De acuerdo con el análisis realizado en las secciones previas, un resumen de los resultados se presenta en la tabla XXIX.

**Tabla XXIX. Factor de planta para una instalación OTEC de 100 MW para los sitios de interés por medio de la eficiencia de la planta de Goseong**

Sitios	Promedio Anual SST ( $^{\circ}\text{C}$ )	Promedio anual 1000 m ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\Delta T$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\eta_{(\Delta T_m)}$	(MWe) REAL	(MWe) NOMINAL	Horas año	FP
<b>Cabo San Lucas</b>	<b>25.16</b>	<b>4.4</b>	<b>20.76</b>	<b>1.9224</b>	<b>96.24</b>	<b>100</b>	<b>8760</b>	<b>0.962</b>
Colola	27.97	4.58	23.39	1.7967	89.95	100	8760	0.899
Nuxco	28.56	4.58	23.98	1.7141	85.82	100	8760	0.858
<b>Puerto Vallarta</b>	<b>26.85</b>	<b>4.37</b>	<b>22.48</b>	<b>1.8849</b>	<b>94.37</b>	<b>100</b>	<b>8760</b>	<b>0.944</b>
Puerto Ángel	28.82	4.59	24.23	1.6727	83.74	100	8760	0.837

De acuerdo con estos resultados, el mayor factor de planta se encontraría también en Cabo San Lucas (0.962), seguido por Puerto Vallarta (0.944). Los demás sitios tendrían un FP entre 0.83 y 0.89 que, de acuerdo con las experiencias prácticas desde 1979 son muy aceptables en virtud que hoy en día el máximo FP de una planta OTEC no supera 0.8

(Okinawa). Vale la pena señalar que esta variable depende, entre otros, del tipo de material, velocidad del fluido, tipo de intercambiador, tipo de evaporador, turbina, etc.

Para el caso de Cabo San Lucas, se requirió recalcular las temperaturas de entrada y salida del agua al evaporador pues el promedio anual de temperatura superficial no puede ser igual o similar a la temperatura de entrada para una planta OTEC de 100 MW, esto debido a las pérdidas por fricción, velocidad y energía al momento en el que el agua superficial llega al evaporador.

Los datos se aproximan a los valores para plantas comerciales que se han evaluado desde 2015 (0.80-0.97) como lo indica Langer *et al.*, 2020. Sin embargo, de acuerdo con Nihous, no es posible determinar un FP confiable debido a que no existen en la actualidad plantas OTEC comerciales de gran generación.

## 4. Discusión

Tomando como base la evaluación teórica de los niveles de potencia disponibles que se pueden extraer a partir de la tecnología OTEC en la zona marina del Pacífico mexicano, a partir de criterios preestablecidos, se identificaron zonas con el mayor potencial para la utilización del gradiente térmico como fuente de energía. A continuación, se puntualizan algunos aspectos de relevancia particular.

### 4.1. Análisis estadístico de los datos

De acuerdo con este estudio, la utilización de diferentes bases de datos siempre conlleva un riesgo para determinar zonas prioritarias. En el caso de la World Ocean Atlas Database (WOA), la resolución espacial de las celdas de análisis puede variar entre 25 y 100 km, por lo que el riesgo de interpolación es muy grande y eso puede generar el descartar áreas dentro del Pacífico mexicano que pudieran ser importantes para la implementación de OTEC, como lo es la zona sur de la Península de Baja California donde, de acuerdo con otros autores, mencionan que esta área presentan temperaturas superficiales más altas por lo que el diferencial térmico podría ser relevante.

Autores como Garduño-Ruíz (2020), Hernández-Fontes *et al.* (2019) y Posada-Vanegas *et al.* (2019) analizaron el diferencial térmico en los mares mexicanos con otras bases de datos, como por ejemplo SATMO (herramienta utilizada también por la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, CONABIO), que presenta resoluciones espaciales más pequeñas (entre 1-5 km), por lo que en relación a trabajos previos, los errores inducidos por interpolación son menores y los resultados más confiables. Además, la temporalidad diaria que presenta es ideal por lo que es muy deseable para monitorear la operatividad de la planta, como lo menciona Nihous (2007).

Otra fue HYCOM-NCODA Global que presenta una distancia entre puntos de temperatura de 12 km, lo que permite una menor interpolación de datos a diferencia de la base WOA y debido a estas diferencias en resolución, áreas en el Pacífico mexicano como Baja California Sur pueden representar una opción real para implementar OTEC pues los datos de temperatura superficial permiten calcular una persistencia del diferencial térmico de hasta el 66%, siendo factibles los meses de verano y otoño para operar la planta, como lo menciona Garduño-Ruíz (2020).

La misma tendencia ocurre de acuerdo con Posada-Vanegas *et al.*, (2019), pues con el uso de la base de datos de HYCOM-NCODA Global se observan persistencias de hasta 90% en algunas zonas como Los Frailes y Cabo Pulmo mientras que en otras zonas se alcanza hasta 80% como en Cabo San Lucas. Aun así, la conclusión es que los estados de Michoacán, Guerrero, Oaxaca y Chiapas son los estados prioritarios para implementar OTEC en el Pacífico mexicano, conclusión a la que se llega en todos los trabajos realizados en el país desde 1960.

A pesar de esto, existen inconvenientes como en el caso de SATMO donde sólo cuenta con datos de temperatura superficial por lo que los análisis se deben compensar con datos de temperatura profunda de la base WOA, aprovechando la baja variación de las temperaturas a 750 y 1000 m de profundidad, mientras que en el caso de HYCOM su resolución, aunque menor con respecto a WOA, es mayor con respecto a SATMO por lo que la interpolación de datos es significativa. Sin embargo, es importante señalar que la buena correlación entre las bases en cuanto a los datos de superficie permite determinar áreas de implementación tanto a nivel global como específicas a nivel país o estado, como lo menciona Chalkiadikis (2017).

Otro de los inconvenientes de las bases de datos es que no cuenta con datos en las zonas prioritarias debido a que el barrido de los satélites no generan lectura por diversos factores como la profundidad y el factor de resolución del dispositivo satelital, como por ejemplo en las zonas costeras de la parte sur-sureste del Pacífico mexicano y zonas del occidente y noroeste; esta es muy posiblemente la causa de la correlación entre las bases de datos y los datos de los termistores que son más específicos y con los que se pueden obtener datos por segundo, minuto u horas, y esto permite tener conocimiento de ciertos procesos oceanográficos que pueden modificar la temperatura superficial que en muchos casos no se presentan en los datos satelitales de acuerdo con Chalkiadikis (2017) por lo que es necesario implementar la colocación de dispositivos de medición de temperatura tanto superficial como profunda en todas las áreas de interés para obtener una mayor precisión y poder realizar mejores análisis tanto de implementación como de operatividad, de acuerdo con Nihous (2007).

El inconveniente de colocar aparatos de medición como los termistores va desde el robo de dichos dispositivos hasta la pérdida debida a las corrientes superficiales o por factores climáticos como las fuertes tormentas que pueden provocar su desplazamiento dificultando su ubicación; así como el bajo poder de medición (hasta los 180 m de profundidad) por su baja resistencia a la alta presión por lo que no se puede analizar en su totalidad la columna de agua, mientras que utilizar aparatos más novedosos como los CTD generan una mayor inversión debido a que se deben de utilizar embarcaciones para su utilización por lo que son pocos los estudios realizados para OTEC. Sin embargo, la importancia de la colocación de estos dispositivos es relevante por lo que, a pesar de las dificultades técnicas deben prevalecer.

Esto último es importante pues, de acuerdo con Garcés-Vargas (2005), los dispositivos como boyas, termistores y las calas oceanográficas (CTD) así como los datos satelitales con una resolución espacial muy baja son muy confiables en este sentido, sobre todo porque pueden detectar mejor los procesos de variabilidad anual, interanual y estacional de los parámetros como la temperatura superficial del mar. Por ejemplo, las condiciones oceanográficas de los mares mexicanos son principalmente determinadas por la

variabilidad climática propia de regiones de transición entre subtropical y templada y eso ha podido resolverse mediante análisis satelitales y dispositivos de medición.

#### **4.2. Temperatura superficial del Pacífico mexicano**

De acuerdo con García-Huante *et al* (2018) y de acuerdo con los datos del WOA (2018), la TSM del Pacífico mexicano anualmente varía de norte a sur, con temperaturas que van desde los 27°C a los 31°C desde la zona costera de Colima hasta Puerto Ángel, Oaxaca y desde la parte sur de Oaxaca (en el distrito de Juchitán) hasta Chiapas, con una pequeña depresión en la parte del Golfo de Tehuantepec donde existen valores entre los 26 y 27°C debida a los vientos “tehuanos” que llegan desde el norte del continente (sur de Estados Unidos) y penetran la zona del Istmo de Tehuantepec, saliendo por la parte sur de Oaxaca (distrito de Tehuantepec) en la zona de Salina Cruz. Es por ello que a esta zona se le conoce como “Alberca Cálida del Pacífico mexicano”.

A partir de la parte norte de Colima hacia Nayarit tenemos que las temperaturas han disminuido con respecto a la parte sur-sureste del Pacífico, encontrando valores de entre 26 y 28°C, esto debido a la influencia de la corriente del Golfo de California (conocida como Agua del Golfo de California o AGC) que tiene influencia de la Corriente de California (CC) que es fría. Acercándose al Golfo de California y a la península, se tienen valores térmicos de entre 25 y 26°C y, en la zona del golfo y de la península encontramos valores más bajos (15°C) por las condiciones oceanográficas de la zona.

Esto concuerda con el estudio que realiza la Comisión Nacional de la Pesca (CONAPESCA) en el año de 2010 donde confirma dichas características de la TSM en el Pacífico mexicano a partir de un análisis mensual con datos derivados del sensor AVHRR, de enero de 1985 a diciembre de 2009. Las imágenes obtenidas muestran que los mares mexicanos presentaron temperaturas superficiales >25°C, a excepción del Océano Pacífico frente a Baja California, lugar donde la temperatura superficial del mar disminuyó de 20° a 15°C conforme aumentó la latitud.

El Golfo de California presentó valores promedios de 25°C en la entrada disminuyendo a 22°C en la parte alta. En la región del Pacífico al sur de 20°N se presentó una región con los mayores valores promedio (30°C) en la temperatura superficial del mar, zona conocida como la alberca cálida, en la cual se observó un núcleo con un mínimo relativo (28°C) en la región de influencia del Golfo de Tehuantepec.

Sin embargo, una vez que se hacen análisis en sitios específicos y se realizan análisis mensuales o estacionales, se observan variaciones significativas dependiendo la base de datos y el análisis realizado para determinar la temperatura superficial. Para los datos del WOA, los valores de temperaturas más altas se encuentran durante los meses de verano y otoño con sus variaciones dependiendo la zona de interés. Por ejemplo, en el caso del noroeste y la parte del Golfo de California, se tienen registros mínimos de 16 a 17°C y máximos de entre 27 y 28°C en dichas estaciones mientras que en invierno y primavera existen valores muchos menores (hasta 10 °C) y el máximo entre 23 y 24°C.

Por otro lado, de acuerdo con el informe final de CONAPESCA (2010), el registro de la base de datos SATMO (2018) y los registros de termistores colocados en zonas como Los Frailes y La Paz, BCS presentan tendencias distintas con respecto al WOA.

Para el caso de CONAPESCA, en los meses de verano (de junio a septiembre) se evidenció un incremento de temperatura en los mares mexicanos. El Océano Pacífico mantuvo un marcado gradiente latitudinal perpendicular a la costa, con valores altos  $\sim 31^{\circ}\text{C}$  desde Cabo Corrientes hacia el sur, que disminuyeron a  $\sim 15^{\circ}\text{C}$  a mayores latitudes ( $>30^{\circ}\text{N}$ ). Destaca el avance hacia el norte de agua de  $21^{\circ}\text{C}$  que alcanzó  $28^{\circ}\text{N}$  frente a Baja California en la parte más oceánica. En el Golfo de California se obtuvo un marcado incremento en la temperatura con valores entre  $28$  y  $30^{\circ}\text{C}$ , que abarcó la región de las grandes islas, con temperaturas menores de  $26^{\circ}\text{C}$  hacia el norte, además de que en el Golfo de California en el mes de septiembre se tuvieron temperaturas de  $30^{\circ}\text{C}$  en superficie. Esto indica una diferencia notable con lo observado en la base de datos del WOA en al menos  $4^{\circ}$  o  $5^{\circ}\text{C}$ .

En cuanto a SATMO, los datos para la misma zona oscilan entre los  $28^{\circ}$  y  $30^{\circ}$  durante los meses de verano y otoño por lo que concuerdan en mayor medida con el reporte realizado por CONAPESCA, existiendo de esta manera una variabilidad notable con respecto a los datos del WOA. Carrillo-Aguilar (2018) también determinó la variabilidad de la temperatura superficial del mar en Cabo Pulmo, BCS y determinó que entre los meses de junio a noviembre se tienen dos periodos de transición donde la temperatura alcanza valores máximos del  $30^{\circ}\text{C}$  tanto en la zona como en la boca del Golfo de California con lo que corrobora los datos mostrados por CONAPESCA y por SATMO.

Finalmente, los termistores colocados en sitios como Los Frailes y La Paz, BCS, también se observó que para los meses de verano y otoño las temperaturas variaron entre  $28^{\circ}$  y  $36^{\circ}\text{C}$ , sin embargo, en este caso los medidores se colocaron en zonas protegidas y bahías cerradas donde la temperatura puede conservarse por mayor tiempo. Los datos del WOA no presentan datos similares a la de los termistores debido a que no se cuentan con datos para estas áreas en particular.

Esta variabilidad en los resultados del WOA con respecto a las demás fuentes de datos registradas se deben indudablemente al tipo de resolución espacial de cada uno pues mientras el primero tiene una resolución de entre 25 y 100 km de distancia entre cada punto de medición, en el caso de SATMO se tiene una resolución de entre 1 y 5 km de distancia y, en los casos de CONAPESCA y Carrillo-Aguilar (2018), los satélites con los que se hizo la medición mostraron una resolución espacial de 1 km, por lo que la interpolación matemática en el caso del WOA es mucho mayor que en los demás e implica un mayor arrastre de error estadístico.

A pesar de ello, la tendencia es muy similar en cuanto al patrón de temperatura superficial y su comportamiento por lo que el WOA puede ser utilizado para localización de áreas grandes para OTEC y las demás bases junto con los termistores pueden ser utilizados para determinar zonas específicas o prioritarias para la implementación de esta tecnología. De hecho, los sitios determinados con la base del WOA (Cabo Pulmo y Cabo San Lucas) se mantienen como opciones para ello.

### **4.3. Diferencia térmica y persistencia**

En este caso, también existen diferencias significativas puesto que, al tener variaciones en la temperatura superficial del mar es incuestionable que existen contrastes en el diferencial térmico, en específico, la zona del Golfo y la Península de Baja California y el Golfo de Tehuantepec. García-Huante *et al.*, (2018) menciona que el gradiente térmico

histórico para esa zona sobrepasa los 20°C (24.9°C) en los meses de verano y otoño, pero únicamente si se consideran los 1000 m de profundidad con respecto a la superficie pues, a 500 m y 750 m es muy poco probable que exista un diferencial similar.

De acuerdo con Nihous (2013) esta misma zona presentaría las mismas condiciones de diferencial térmico en promedio al año (20°-21°C) lo mismo que para la National Renewable Energy Laboratory (NREL) quienes calculan que el diferencial térmico anual promedio para esta zona está entre 19° y 21°C, mismo caso para la compañía holandesa BlueRise, ahora filial de All Seas (2018). Sin embargo, para los casos de SATMO (2018), Hernández-Fontes *et al.*, (2019) y Posada-Vanegas *et al.*, (2019) esta zona en particular tendería a tener diferenciales térmicos mayores a los señalados anteriormente además de que los valores de los termistores colocados en Los Frailes y La Paz tenderían a mostrar un diferencial mayor a 24°C durante 8 o 9 meses del año (hasta 26°C). Esto implica que la persistencia del diferencial térmico por encima de 20°C también varía, esto es, para la zona de interés se tiene un porcentaje de persistencia del diferencial térmico de entre el 50-60% pero con los otros análisis se tiene una persistencia de entre el 81-90% por lo que se tendría un trimestre en la que la planta OTEC no podría operar en dicha área.

Estas variaciones son debidas a la resolución espacial de las bases de datos puesto que, por ejemplo, BlueRise trabaja utilizando los datos del WOA (2013 y 2018) al igual que García-Huante *et al.*, (2018) que tienen una resolución espacial de 25 km (un cuarto de grado) lo que implica que entre cada valor de temperatura o de gradiente térmico existe una distancia considerable y los valores intermedios se interpolan estadísticamente y eso genera mucha variación con relación a otras bases de datos; en los casos de SATMO (1-5 km de resolución) y Posada-Vanegas *et al.*, (12 km) existen menos interpolaciones y se tienen datos más válidos y cercanos a lo que sucede. Nihous (2019) menciona en una conversación personal que lo importante es tener datos con menores rangos de interpolación para conocer la realidad del proceso oceanográfico y de esa manera operar la planta OTEC con objetividad, a pesar de que Vega (2010) reconoce que cuando existen variaciones de temperatura superficial la planta puede adaptarse al medio y seguir operando con normalidad por lo que, de acuerdo con su análisis no es necesario tener una resolución más pequeña para la operación de la planta.

En el caso de NREL, su resolución espacial es de 7 km por lo que, a pesar de que existe una disminución importante en la distancia entre los puntos de temperatura superficial, aún presentan variaciones térmicas en superficie parecidas más al WOA que a las anteriores, eso implica que tanto los análisis de persistencia, diferencial térmico y temperatura superficial sean muy distintos igualmente. En ese sentido, Chalkiadikis (2017) menciona que para tener mejores resultados en los cálculos teóricos para OTEC, las bases de datos deben tener una menor resolución espacial tanto para la temperatura superficial como para la profunda y de esa manera tener un buen parámetro de diferencial térmico; en su trabajo utilizó la base de HYCOM que cuenta con una resolución de 2 km por lo que sus resultados son muy parecidos a las obtenidos por Posada-Vanegas *et al.* (2019) y Hernández-Fontes *et al.* (2019).

Es por esto que, se puede integrar una zona OTEC en el Pacífico mexicano desde la Península de Baja California (sobre todo la parte sur desde Cabo Pulmo, pasando por La Paz, Los Cabos y Cabo San Lucas) hasta Chiapas, considerando los datos que presentan tanto una menor resolución espacial en cuanto a distancia entre puntos de temperatura y que representan una mayor persistencia del diferencial térmico.

#### 4.4. Potencia eléctrica

De acuerdo con el Consejo Nacional de Población (CONAPO), para 2030 México tendrá un total aproximado de 132.5 millones de habitantes, los cuales estarán consumiendo 445,301.8 GWh de energía eléctrica, es decir, un aumento del 47% con respecto a lo consumido en 2017, de acuerdo con datos de la Secretaría de Energía (SENER, 2018). Esto implicará que también aumentarán tanto el consumo per cápita de electricidad y los contaminantes generados del propio sector, que hasta el año pasado contemplaba en un 81% de tecnologías que requieren fuentes no renovables para la obtención de energía eléctrica, tales como las termoeléctricas (69%), tecnología carboeléctrica (6%) y dual (6%). El 18% restante lo engloban las tecnologías mal llamadas “limpias o verdes” que provienen de fuentes renovables como las hidroeléctricas (11% y con opción de incrementar su porcentaje debido al acuerdo del gobierno mexicano con Canadá [Gobierno de México, 2019]), nuclear (5% y con opción de incrementar su porcentaje debido al acuerdo firmado en 2019 entre los gobiernos mexicano y estadounidense donde se pretende instalar plantas nucleares en Chihuahua, Durango y ampliar la que opera en Laguna Verde, Veracruz [Gobierno de México, 2019]), geotérmica (2%) y eólica-solar (1%).

En cuestión de las energías marinas, tanto en México como en el mundo, la producción comercial de energía del océano está en una fase incipiente “debido a que la mayoría de las tecnologías para su explotación se encuentran en etapa de prototipo y, en algunos casos, en etapa de demostración (ProyectoFSE, 2018), tales son los casos de las plantas OTEC donde todas son experimentales, incluso la planta de la isla Reunión no opera sino que hacen experimentos con los intercambiadores de calor y con los ciclos de trabajo. Sin embargo, existe ya el Mapa de Ruta Tecnológica (MRT) donde se explican los posibles proyectos futuros, las necesidades tecnológicas y la visión de México en el 2030 con respecto a las energías oceánicas.

Asimismo, la Secretaría de Energía ha manifestado que quieren implementar tecnologías para aprovechar la energía oceánica en nuestro país, como lo mencionó la I. P.Q. Rocío Nahle García, -secretaria de energía del Gobierno Federal- en el caso de la energía maremotérmica el 15 de octubre de 2019 (Canal Once TV, 2019) además de visualizar que se podría tener una capacidad de instalación para generar hasta 1000 MW en 10 años, sobre todo utilizando OTEC y de corrientes marinas, que desde mi punto de vista es muy poco probable debido a que la madurez de la tecnología sólo ha generado hasta el momento plantas de 1 MW y que están en fase de prueba por lo que pensar en plantas de mayor generación en ese lapso de tiempo es muy aventurado.

Otro aspecto es el alto costo en el desarrollo de plantas comerciales que, de acuerdo con Luis Vega (2007) es de USD\$750 millones de dólares por lo que el panorama actual pareciera ser desalentador, pero se siguen trabajando en aquellos componentes que pudieran en su momento abaratar el costo y mejorar sustancialmente la eficiencia energética, así como en darle mayor peso a los subproductos secundarios que se pueden obtener por medio del sistema OTEC.

Teóricamente, si México implementara en el Pacífico mexicano cinco plantas OTEC (Baja California Sur, Jalisco, Michoacán, Guerrero y Oaxaca) estaría generando una producción de entre 500-1000 MW anuales, sin considerar que la planta de Baja California Sur sólo funcionaría entre 6 y 7 meses por la variación del diferencial térmico

en la zona y asumiendo que en este momento se tuviera la tecnología para montar plantas OTEC de producción comercial. Tal producción, de acuerdo con García-Huante *et al.* (2018), Hernández-Fontes *et al.* (2019) y Garduño-Ruíz *et al.* (2020) podría cubrir la demanda de las zonas costeras de los estados enlistados entre un 50% al 95%, por ejemplo, una planta de 100 MW en Oaxaca cubriría la demanda de las zonas costeras en un 55% y en Guerrero un 67%. De acuerdo con Hernández-Fontes *et al.* (2019), incluso existen opciones de generar una producción anual promedio mayor a 250 MW lo que equivaldría a cubrir la demanda de los municipios costeros de Oaxaca, Guerrero y Chiapas en su totalidad, pero sólo lo haría en un 60% del tiempo debido a que el gradiente o diferencial térmico en la zona no permite producir tal cantidad de electricidad en un año. Esto implicaría utilizar esta producción en los meses de primavera, verano y parte del otoño para después usarla como “base load” el tiempo restante.

Posada-Vanegas *et al.* (2019) maneja que la disponibilidad del recurso va de entre un 91-100% en la mayor parte del Pacífico mexicano mientras que en la zona de Baja California Sur se tendría hasta un 90% en promedio, sin tomar en cuenta el gradiente estacional lo cual es importante a la hora de analizar los números finales. Sin embargo, este análisis da comprobación de los resultados anteriores y consideraría las zonas del sur-sureste como las altamente potenciales para la implementación de esta tecnología. Lo mismo ocurre con los análisis de Nihous (2013) donde se observa que la zona sur del Pacífico mexicano es la prioritaria con números muy parecidos a los de García-Huante *et al.* (2018) donde la mayor producción podría llegar hasta los 174 MW anuales promedio que podrían ser manejados en un 100% todo el año. Las diferencias de potencial eléctrico se deben a las mismas implicaciones sobre los datos de temperatura, sobre todo la superficial que ya se analizaron con anterioridad: a mayor interpolación en los datos térmicos de superficie, mayor incertidumbre en la diferencial térmica.

Una vez descrito el posible panorama, el objetivo es qué hacer con esa energía. México se ha caracterizado por generar electricidad con cualquier tipo de tecnología existente, pero toda la producción es para estabilizar a las grandes metrópolis con las que contamos (Ciudad de México y su Zona Metropolitana en particular, Guadalajara, Monterrey, San Luis Potosí, Puebla, etc.) por lo que las comunidades que se encuentran en las zonas de generación siguen con déficit eléctrico como las zonas costeras y montañosas de Oaxaca, Guerrero, Chiapas y Michoacán como ejemplos claros de lo anterior.

En el caso particular de Oaxaca, comunidades como San Agustín Huatulco, Ventanilla, El Coyote y Los Naranjos todavía utilizan diésel para generar electricidad mientras que las presas hidroeléctricas del estado mandan su producción al centro del país, en ese sentido, la CFE (2018) describe que la energía eléctrica del sur de Oaxaca proviene de las hidroeléctricas situadas en el centro del estado como la de Temascal que envía el 80% de su producción al centro de la República y el resto se almacena en la subestación eléctrica de Quatode que se encuentra a 14 km de Puerto Ángel por lo que no existe la suficiente electricidad para conectar a todas las comunidades costeras. Esto mismo ocurre en Chiapas, Guerrero y Michoacán por lo que existen muchas poblaciones costeras sin el beneficio de contar con este servicio, lo cual en pleno 2020 es inconcebible.

Considerando esta situación, México no puede darse el lujo de enviar una hipotética producción eléctrica con OTEC al centro del país por lo que debe priorizarse su utilización en las áreas de producción, pero al mismo tiempo, con la infraestructura

generada, poder conectarse a la Red Eléctrica Nacional ante cualquier situación de riesgo que pudiese existir.

Para entender mejor el punto anterior, pongamos un ejemplo numérico: México actualmente genera 52 TWh año<sup>-1</sup> de electricidad con fuentes renovables (Ocampo-Téllez, 2018) sin considerar obviamente las fuentes marinas pues no existe ninguna tecnología actual en el país que genere por esa vía. Según las estimaciones de la SENER, las renovables tienen un potencial de crecimiento entre los 400 y 600 TWh año<sup>-1</sup> (SENER, 2016); esto implica que México no puede llegar a un 100% de energía por medio de las renovables puesto que para alcanzarlo requiere producir anualmente alrededor de 1400 TWh año<sup>-1</sup> (Ocampo-Téllez, 2018) lo cual no conseguiría tampoco con la tecnología OTEC pues una planta de 250 MW generaría cerca de 2 TW por lo que 5 plantas no generarían más allá de 13 TW, por lo que aspirar a un cambio de esta magnitud implicaría que la energía producida con OTEC se quede en las zonas de producción además de que será un cambio radical sobre el pensamiento consumista de la población que tendrá que adaptarse al nuevo *modus vivendi* cuando la tecnología fósil llegue a su fin.

Por lo tanto, para que México logre alcanzar la transición a fuentes renovables tendrá que restringirse a aquel consumo eléctrico o aquel consumo que se pueda volver eléctrico en el futuro; lo que se resume en que el país debe colocar fuentes renovables, en este caso OTEC, *donde realmente existen las condiciones naturales para implementarlo* como lo menciona Ocampo-Téllez (2018).

Por otro lado, también vale la pena analizar cómo hacer crecer la eficiencia energética de la OTEC con el fin de generar una mayor producción eléctrica. En ese sentido existe una tecnología en fase de investigación que se conoce como SOLTEC en la que se busca la implementación de la planta OTEC en adición con paneles solares con lo que se obtendría una mayor generación eléctrica en un 35% (SOLTEC, 2020; XPRT Energy, 2020) debido a que aumenta la eficiencia energética hasta en un 9% de acuerdo con sus diseños por lo que podrían estar generando continuamente un “base load” en las zonas de interés.

Otra posibilidad es la implementación de tecnología ya probada y generar una especie de ciclo combinado. Actualmente la Línea Estratégica de Gradiente Térmico del CeMIE-O está en pláticas con el Dr. Carlos Díaz Díaz de la empresa de turbinas DTMI en la ciudad de Querétaro donde ya se construyen turbinas patentadas para generación de energía eléctrica con base en CO<sub>2</sub> secundario (ciclo Bryton); el objetivo planteado es hacer el análisis de colocar una turbina de estas características en una planta OTEC donde ya no estaría involucrado como tal el ciclo de Carnot más que para la producción de productos secundarios (ciclo abierto) y con la obtención del CO<sub>2</sub> de las profundidades generar energía eléctrica con una eficiencia energética de hasta un 70% lo que colocaría a la tecnología OTEC al mismo nivel de las plantas de fuentes no renovables y generaría una nueva opción dentro de la misma tecnología (un ciclo combinado entre el ciclo de Carnot para los subproductos y el ciclo Bryton para producir electricidad), colocando a México en líder metodológico (de llegarse a realizar).

Con este nuevo esquema, ya no importaría la diferencia térmica más que para la colocación de plantas *onshore* de ciclo abierto para generar subproductos secundarios. Con esto también se abatirían costos en componentes como turbina-generador y la parte de las tuberías pues ya no sería necesario llegar a altas profundidades (500 m como máximo en lugar de los 1000 m propuestos). Esto equivaldría a generar con una planta

OTEC de 100 MW un total de aproximadamente 2200 GWh año<sup>-1</sup> (con el 70% de eficiencia ya considerado) y con una planta de 250 MW un total de aproximadamente 7,182 GWh año<sup>-1</sup> lo que implica acabar con la demanda eléctrica de las zonas costeras de Michoacán, Guerrero y Oaxaca en su conjunto, además de que se implementaría una medida radical en contra de las concentraciones de CO<sub>2</sub> en el océano que cada año se elevan debido a las concentraciones de este compuesto a la atmósfera por parte de las industrias.

Otra opción planteada es la del aprovechamiento de las descargas de las plantas termoeléctricas cuyas aguas salen con temperaturas mayores a los 60°C por lo que para lograr el gradiente mínimo de 20°C bastaría con colocar la tubería de “agua fría” en la zona superficial (29°C) a 20 o 30 m de profundidad con lo que se abarataría el costo de tubería además de que implica una solución al impacto ambiental que generan las aguas descargadas. Actualmente, CeMIE-O y la Comisión Federal de Electricidad consideran la implementación de una planta experimental OTEC en la zona de Petacalco, Guerrero donde se encuentra la termoeléctrica “Plutarco Elías Calles” que genera actualmente 2,278 MW de electricidad con base en carbón y petróleo (CFE, 2011); de conseguirse se lograría abatir costos en tubería y con un diferencial térmico cercano a los 32°C obtener una generación eléctrica de hasta 2000 GWh año<sup>-1</sup>, en comparación con los 1562 GWh año<sup>-1</sup> que se pueden obtener con una planta OTEC convencional. Es una opción a todas luces interesante a considerar.

El detalle ahora es cómo transmitir esa energía eléctrica a los territorios costeros y la continuidad de la misma pues en un país que no ha dado mantenimiento a su red nacional en más de 45 años, las intermitencias son muy peligrosas, aunque en el caso de OTEC el mantenimiento de la producción de electricidad se basa en aumentar o disminuir el bombeo de agua superficial y profunda.

#### **4.5. Flujo volumétrico teórico**

Pensar en casi 900 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> de agua dulce en promedio con una planta OTEC de 100 MW (sin considerar las pérdidas por energía en diversos puntos de la planta y en las tuberías por fricción) que, de acuerdo con García-Huante (2015) serían de hasta un 10%, es tener el 0.009% de los recursos de agua renovable del país, de acuerdo con CONAGUA (2018), esto considerando las regiones hidrológicas administrativas (RHA) y los números por estado, los cuales están calculados en hectómetros cúbicos al año. Sin embargo, cuando desmenuzamos los inconvenientes de obtener agua en las diferentes regiones costeras del país nos damos cuenta de que existen varios puntos a considerar importantes:

De acuerdo con la CONAGUA, la región sur-sureste es donde existe la mayor concentración de agua dulce en el país debido a la mayor precipitación y a que cuenta con cuerpos de agua superficiales de gran volumen como los son los ríos Grijalva y Usumacinta que son los ríos más caudalosos del país (2750 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> y 5250 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>); sin embargo, de acuerdo con las estadísticas oficiales, las regiones costeras del Pacífico mexicano obtienen el agua potable de los mantos freáticos y ante la baja infraestructura se construyen pozos de almacenamiento los cuales tienden a contaminarse con las aguas de drenaje de las poblaciones aledañas (de ahí que se tengan en estos lugares altas concentraciones de coliformes totales y fecales), en los casos particulares de Michoacán, Jalisco, Guerrero y Oaxaca (43% del agua potable en su totalidad está contaminada).

En el caso de Baja California Sur, se tiene contaminación por intrusión de agua marina y salinización de los suelos como en el caso de La Paz lo que al final no garantiza tener agua potable de calidad, debido principalmente a la baja precipitación y, por ende, a la alta evotranspiración presente en la zona además de material de fácil disolución como los minerales evaporíticos. De acuerdo con este panorama, actualmente se tiene listo el proyecto de una planta desalinizadora de agua marina con una inversión de \$1000 millones de pesos a partir del Fondo Nacional de Infraestructura (FONADIN) que dirige el Gobierno Federal y la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Con esto, se garantizaría el abasto de agua potable de la ciudad (generación de  $200 \text{ L s}^{-1}$  por medio de ósmosis inversa) y el que se dejen de utilizar los mantos freáticos que están sobreexplotados. Sin embargo, esto podría traer como consecuencia contaminación salina en el océano pues no se sabe cuál será el destino de la salmuera generada y que, muy seguramente, será desechada lo que podría traer consecuencias en el medio ambiente.

Es por ello que al tener una planta OTEC de ciclo abierto es tener una cantidad considerable de agua potable por el proceso de evaporación-condensación donde las sales del agua marina se separan y el agua condensada queda libre de estas por lo que puede ser aprovechada tanto para consumo humano como para actividades como acuicultura y agricultura. Las sales separadas pueden ser utilizadas tanto para la fabricación de fertilizantes como para la elaboración de sal para consumo humano.

De acuerdo con el Gobierno de México (2020), una persona requiere de 100 L diarios de agua para su consumo e higiene, pero en nuestro país cada persona consume 280 L diarios con un gran desperdicio. Para los municipios analizados en este trabajo, hay que considerar que existe un volumen natural disponible entre 100 y  $700 \text{ Hm}^3 \text{ km}^{-2} \text{ año}^{-1}$  y una densidad poblacional de entre 10 a 99 habitantes por  $\text{km}^2$  (Cotler, 2010).

Con una planta OTEC de gran generación (hasta 250 MW) se generarían  $750 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  (es decir que en un día tendríamos alrededor de  $750,000 \text{ L s}^{-1}$  de agua profunda y  $1,125,000 \text{ L s}^{-1}$  de agua superficial) y con una planta OTEC de 100 MW se generarían  $300 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  (unos  $300,000 \text{ L s}^{-1}$  de agua profunda y  $450,000 \text{ L s}^{-1}$  de agua superficial) de acuerdo con Vega (2010) y el 0.55% del agua superficial se puede ocupar como agua potable después del proceso de evaporación-condensación del fluido de trabajo en una planta de ciclo abierto.

Por lo tanto, se obtendrían alrededor de 38,880,000,000 L diarios de agua superficial con una planta de 100 MW y 97,200,000,000 L diarios de agua superficial con una planta de 250 MW; con el proceso de evaporación-condensación del ciclo abierto se obtendrían alrededor de 213,840,000 L diarios de agua potable con una planta de 100 MW y hasta 534,600,000 L diarios de agua potable con una planta de 250 MW. Ante este panorama y con los datos provistos por Cotler (2010) y el Gobierno de México (2020), utilizando los sitios analizados en este trabajo tendríamos lo siguiente:

La Paz-Los Cabos: 200,000 habitantes (56000000 L diarios para abatir el consumo)

Puerto Vallarta: 100,000 habitantes (28000000 L diarios)

Colola: 15,000 habitantes (4200000 L diarios)

Tecpán: 15,000 habitantes (4200000 L diarios)

Pochutla: 50,000 habitantes (14000000 L diarios)

Es decir, con una planta de 100 MW en cualquiera de los 5 municipios, se lograría abatir en un 100% el consumo humano por lo que los excedentes se podrían utilizar para otras actividades de tipo agrícola, pesquera, o incluso, industrial permitiendo un mayor desarrollo social que incluiría el tener otros sectores económicos de importancia como el terciario y lograr el crecimiento de estas zonas.

El problema en el corto y mediano plazo es que, de acuerdo con la CONAPO, entre 2012 y 2030 la población del país se incrementará en 20.4 millones de personas. Además, para 2030, aproximadamente 75% de la población estará en localidades urbanas. El incremento de la población ocasionará la disminución del agua renovable *per cápita* a nivel nacional (Cotler, 2010); esto quiere decir que la planta OTEC se verá rebasada en cuanto a la disponibilidad de agua potable para los municipios costeros con una elevada concentración poblacional como las zonas turísticas a mediano plazo, lo mismo que ocurre con el consumo eléctrico por lo que urge que existe un mejor plan de ordenamiento territorial en el país.

Sin embargo, OTEC funcionaría como una forma de reducir la demanda de las poblaciones costeras con el beneficio de dejar de sobreexplotar los mantos acuíferos que cada vez se están contaminando más en las zonas costeras de acuerdo con Huante-González (1997).

Como se mencionó en el párrafo anterior, el obtener agua de las profundidades puede generar una industria que cada vez toma mayor fuerza, sobre todo en países como Japón y Corea del Sur donde las plantas OTEC de Okinawa y Goseong han generado centros industriales donde se producen alimentos, agua potable, cosméticos, medicamentos, sal, fertilizantes, entre otros lo que ha permitido el crecimiento de estos sectores en sus mercados nacionales. Y en el caso de la planta de Hawaii existe el desarrollo de un tipo de método agrícola denominado “ColdAg” o agricultura de agua fría donde por medio del estrés hídrico y térmico, en zonas tropicales se pueden cultivar y cosechar plantas y frutos de zonas templadas; en un caso específico en Hawaii se producen actualmente fresas, uvas, manzanas, ciruelas y otros productos agrícolas que naturalmente no se podrían dar en la isla (la llamada “Revolución Azul”). Se obtienen hasta 4 cosechas al año por hectárea, lo cual ayudaría a abatir costos de producción y de venta de estos productos en las zonas tropicales y darían un mayor acceso a este tipo de alimentos por lo que se contribuiría satisfactoriamente con una mejor alimentación de las poblaciones costeras de México. Además, el no descargar el agua mezclada de la planta al mar elimina cualquier situación de posibles impactos ambientales en la columna de agua, lo que nos lleva a analizar cuál sería la presión hídrica en ese punto específico donde existiría un bombeo constante de agua sin reponer algún porcentaje al océano.

## 5. Conclusiones

México tiene áreas de interés con muy buenas opciones para implementar la tecnología OTEC, sobre todo la parte sur-sureste (Michoacán, Guerrero, Oaxaca y Chiapas). En los primeros tres estados hay opciones tanto para colocar una planta *onshore* como plantas *offshore*, en Chiapas únicamente podría ser una planta *offshore*. En la zona occidental, Jalisco y Nayarit son sitios prioritarios, pero con un menor diferencial térmico que en la parte sur-sureste. Prácticamente todo el Pacífico mexicano es ideal para plantas de plataforma o en mar abierto mayores a 10 km de distancia. Los sitios de Nuxco, Puerto

Ángel, Cabo San Lucas, Colola y Bahía de Banderas permiten la presencia de plantas en tierra firme.

En la parte sur de la Península de Baja California, con los datos del WOA, existen opciones de tener una planta OTEC que operaría hasta 7 meses al año, la importancia de la planta no sería realmente la producción de electricidad sino el tener acceso al agua potable con una planta de ciclo abierto.

La mayor persistencia del diferencial térmico (por arriba de los 24°C) se presenta en la región sur-sureste y utilizando el acercamiento hasta 10 km de distancia de la línea de costa, la parte de Puerto Ángel, Nuxco y Colola tendría persistencia de hasta el 100%, Puerto Vallarta de hasta 80% y Cabo San Lucas de hasta el 20%, sin embargo, los datos térmicos con una resolución espacial de 1 km tal como SATMO nos permite considerar esta zona con una persistencia de hasta un 67%.

La mayor producción de energía eléctrica se genera en la parte sur-sureste, se pueden implementar plantas de hasta 178 MW con una persistencia del diferencial térmico de hasta un 60%. Con plantas de 50 y 100 MW tendríamos zonas con persistencia del diferencial térmico del 100% lo que le permitiría operar todo el ciclo anual. Con una planta de 100 MW se abaten los consumos de municipios como Tecpán, Colola y Pochutla; para las zonas costeras de mayor población sirve como un “base load” para las actividades de dichas áreas.

El mayor diferencial térmico en el Pacífico mexicano es de entre 25 y 26°C que se da en toda la vertiente, pero se reduce conforme nos alejamos del sur-sureste y conforme dejamos de tener una profundidad de bombeo de agua fría igual a 1000 m.

La producción de agua potable de una planta OTEC de 100 MW abatiría la demanda de las zonas costeras mayores a 50,000 habitantes (hasta 400,000), esto reduciría de manera importante la presión sobre los mantos freáticos. Un porcentaje importante podría generar un sector industrial en esas áreas, así como activar actividades agrícolas y de acuacultura lo que permitiría un mayor desarrollo social y territorial en dichos municipios.

La tecnología OTEC aún es incipiente, pero en constante investigación y desarrollo. México tiene las posibilidades naturales (en el medio) y de recursos humanos para su explotación e implementación.

## 6. Literatura citada

Addison Co. 2017. XLSTAT for Excel. Paris, France. In: [www.xlstat.com](http://www.xlstat.com)

Alatorre Mendieta, M. Á., Hernández Contreras R.E., García Huante A., y Rodríguez Cueto Y. (2017). Atlas de Potencial Energético del Océano en México por Gradiente Térmico. Línea Estratégica de Energía por Gradiente Térmico del Centro Mexicano en Innovación de Energías del Océano. Instituto de Ingeniería, UNAM. México.

Amador, J., Rivera, E., Durán-Quesada, A., Mora, G., Sáenz, F., Calderón, B., & Mora, N. (2016). The easternmost tropical Pacific. Part I: A climate review. *Revista De Biología Tropical*, 64(1), 1. doi: **10.15517/rbt.v64i1.23407**

Araico-González, C. I. (2012). Hidrografía y circulación geostrofica del Golfo de Tehuantepec en condiciones de verano. Tesis de licenciatura. Universidad del Mar campus Puerto Ángel. Puerto Ángel, Pochutla, Oaxaca. 66 pp.

Avery, W. H. y C. Wu (1994). Renewable energy from the ocean: a guide to OTEC. U.S.A.: Oxford University Press. Research Triangle Institute.

Aviña-Jiménez, H. (2007). Factibilidad de instalar una planta OTEC (Conversión de la energía térmica del océano) en las costas de México. Tesis de licenciatura. Facultad de Ingeniería. UNAM. Ciudad de México. 75 pp.

Bárceñas Graniel, J. F. (2014). Evaluación del potencial energético renovable del Caribe Mexicano. Tesis de maestría no publicada, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM, Ciudad de México, CDMX. México.

Bernal Francisco, M. (2016). Estudio Técnico y económicos de una planta OTEC y sus usos secundarios en México. (Tesis de Maestría). Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología. Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F.

BlueRise, (2018). En: <https://allseas.com/>

Canal Once XE-IPN, (2019). John y Sabina: Soberanía energética, ¿será posible? Con Rocío Nahle García. En: <https://www.youtube.com/watch?v=d1ELgJr3kW8>

Carrillo Aguilar, L. A. (2018). Señales interanuales de Temperatura Superficial de Mar y su efecto en la hidrografía en el parque nacional Cabo Pulmo. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de Baja California Sur. La Paz, México. 37 pp.

Cerdeira-Estrada, S., R. Martell-Dubois, J. Valdéz, R. Ressler. 2018. Satellite-based ocean monitoring system (SATMO). Information & Analysis System of Marine Ecosystem of Mexico (SIMAR). CONABIO. México. <https://simar.conabio.gob.mx>

CFE. Estadísticas año (2011). Comisión Federal de Electricidad, Subdirección de Generación, 2011. Disponible en World Wide Web: [www.cfe.gob.mx](http://www.cfe.gob.mx).

CFE. Programa de Obras e Inversiones del Sector Eléctrico. POISE (2011-2025). Ciudad de México, CDMX: Comisión Federal de Electricidad, 2018.

Chalkiadikis, C. (2017). OTEC Resource Potential Mapping. A Spatial assessment including “state of the art” practicable criterio by using geo-information systems (GIS). Thesis. Delft University of Technology. Netherlands. 115 p.

Claude, G. (1930). Power from the tropical seas. *Mechanical Engineering*, 52 (12) (1930), pp. 1039-1044.

CONAGUA, (2018). Estadísticas de lagua en México. Consultado el 05-04-2020. En: Cotler, H. y R. Pineda, (2010). Manejo integral de cuencas en México ¿hacia dónde vamos? *Archivo Histórico del Agua* 39:16-21.

Crews, J. (1997). OTEC Sites. En: [www.trellis.demon.co.uk/reports/otec\\_sites.html](http://www.trellis.demon.co.uk/reports/otec_sites.html)

d'Arsonval, A. (1881). “Utilisation des Forces Naturelles. Avenir de L'Électricité”, *Rev. Sci.*, 17, p. 370–372.

De la Lanza, G. E., (1991). *Oceanografía de mares mexicanos*. Compiladora. AGT Editor. México, D. F. 569 pp.

Díaz-Agero. (1999). “Indicadores sintéticos”, (en línea) Consultado el día 12 de junio de 2019. <http://festadisticas.fguam.es/indicadores/iae.html>  
**doi:10.1016/j.oceaneng.2007.06.004**

Doorga, J., Gooroochurn, O., Motah, B., Ramchandur, V., & Sunassee, S. (2018). A novel modelling approach to the identification of optimum sites for the placement of ocean thermal energy conversion (OTEC) power plant: application to the tropical island climate of Mauritius. *International Journal Of Energy And Environmental Engineering*, 9(4), 363-382. **doi:10.1007/s40095-018-0278-4**

Fernández Díez Pedro. (2008). Conversión de energía térmica del océano. *Energías Oceánicas*. Disponible en: <https://goo.gl/R6kqGp>

Fiedler, P. C. & L. D. Talley, (2006). Hydrography of the eastern tropical Pacific: a review. *Progress in Oceanography*, 69, 143-180 pp.

Garcés-Vargas, J., Schneider, W., Abarca del Río, R., Martínez, R., & Zambrano, E. (2005). Inter-annual variability in the thermal structure of an oceanic time series station off Ecuador (1990–2003) associated with El Niño events. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 52(10), 1789-1805. **doi:10.1016/j.dsr.2005.05.008**

García Huante, A. (2015). Posibles efectos oceanográficos por la operación de una planta OTEC (Ocean Thermal Energy Conversion) en la zona de Puerto Ángel, Oaxaca, México. Tesis de maestría. Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología unidad Ciudad Universitaria. UNAM. Ciudad de México. 133 pp.

García Huante, A., Rodríguez Cueto, Y., Silva, R., Mendoza, E., & L. Vega. (2018). Determination of the Potential Thermal Gradient for the Mexican Pacific Ocean. *Journal of Marine Science and Engineering*, 6(1), 20. **doi: 10.3390/jmse6010020**

Garduño Ruíz, E. P. 2020. Criteria for optimal sites selection for the installation of Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) plants in the Mexican Ocean Pacific. En proceso de terminación.

Garduño Ruíz, E. P., A. García Huante, Y. Rodríguez Cueto, J. F. Bárcenas Graniel, M. A. Alatorre Mendieta, E. Cerezo Acevedo, J. Guadalupe Tobal Cupul, V. M. Romero Medina y R. Silva Casarín (2017). Conversión de Energía Térmica Oceánica (OTEC) Estado del Arte. Cemie-Océano, Universidad Autónoma de Campeche. 123 p.

Gautret, L. & M. Corre-Labat. (2009). Reunion Island/Indian Ocean, a French experimental key laboratory for Ocean Energy. 3rd International Conference on Ocean Energy, 6 October, Bilbao.

Gaxiola Castro, G., Parés Sierra, A. Nájera Martínez, S., Cepeda Morales, J. y A. L. Flores Morales, CONAPESCA, (2010). Caracterización oceanográfica y pronóstico de la variabilidad de los mares mexicanos y de algunas regiones marinas y su aplicación a la pesca y acuicultura. Informe final. Mazatlán, Sinaloa, México. 83 p.

Gobierno de México. (2019). Consultado el 23-12-2019. En: [www.gob.mx](http://www.gob.mx)

Gobierno de México. (2020). Consultado el 05-04-2020. En: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/554702/DSAPAS\\_1-20.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/554702/DSAPAS_1-20.pdf)

Hamedi, A., & Sadeghzadeh, S. (2017). Conceptual design of a 5 MW OTEC power plant in the Oman Sea. *Journal Of Marine Engineering & Technology*, 16(2), 94-102. doi: **10.1080/20464177.2017.1320839**

Hernández-Fontes, J.V.; Félix, A.; Mendoza, E.; Rodríguez Cueto, Y. & R. Silva. (2019). On the Marine Energy Resources of Mexico. *J. Mar. Sci. Eng.* 7, 191.

Huante González Yolanda. (1997). Contaminación biológica en la bahía de Puerto Ángel, Oaxaca. *Ciencia y Mar*. Vol. 2: (1). Universidad del Mar, México. 5 p. Consultado el 07-05-2017 En: <http://www.umar.mx/revistas/2/contaminacion.pdf>

HYCOM, 2019. HYCOM + NCODA Global 1/12° Analysis. Consultado el 9 de enero de 2019. <https://www.hycom.org/dataserver/gofs-3pt0/analysis>.

IRENA (2014) OCEAN THERMAL TECHNOLOGY CONVERSION. Consultado el 18 May 2017, en: [http://www.irena.org/documentdownloads/Publications/Ocean\\_Thermal\\_Energy\\_V4\\_web.pdf](http://www.irena.org/documentdownloads/Publications/Ocean_Thermal_Energy_V4_web.pdf)

Kenney, J. F. and Keeping, E. S., *Mathematics of Statistics*, Pt. 2, 2nd ed. Princeton, NJ: Kessler, W. S. (2006). The circulation of the eastern tropical Pacific: a review. *Prog. Oceanogr.* 69: 181-217 pp.

Kim, H. J., D. H. Jung, S. Y. Hong y H. S. Lee. (2013). Offshore structure of OTEC. *Journal of the Korea Society for Power System Engineering*. 17 (3).

Kim, J. and H. J. Kim. (2014). "Numerical Modeling of OTEC Thermal Discharges In Coastal Waters". *International Conference on Hydroinformatics*. Paper 277. 7 pp.

Kobayashi H; Jitsuhara S; Uehara H. (2001). The Present Status and Features of OTEC and Recent Aspects of Thermal Energy Conversion Technologies, 24 th Meet. UJNR Mar. Panel, pp 1 – 8. Disponible en: <https://goo.gl/eKW8F9>

Lee, H., Yoon, J., Son, C., Ha, S., Seol, S., & Ye, B. (2015). Efficiency enhancement of the ocean thermal energy conversion system with a vapor–vapor ejector. *Advances In Mechanical Engineering*, 7(3). doi: **10.1177/1687814015571036**

Löhnberg, A. (1960). Energía térmica del mar Banco Chinchorro (Quintana Roo, México). Archivo Histórico del Agua. Ciudad de México. 40 pp.

Martins, M., Sinama, F. y F. Lucas. (2013). Equivalent Gibbs systems for modelling an onshore OTEC experimental plant on Reunion Island. *International Journal of Energy Research*, 37, 1112 – 1121.

Morales Devis Andrea; Montoya Sánchez Raúl; Osorio Andrés; Oterto Días Luis. (2014). Ocean thermal energy resources in Colombia. *Renewable Energy*, 66, 759-769.

Nihous Gerard; Gauthier Michel. (2012). Ocean Thermal Energy Conversion: A Historical Perspective. In *Marine Renewable Energy Handbook*. Londres UK. Britisj Library Cataloguing in Publication Data.

Nihous, G. (2007). An estimate of Atlantic Ocean thermal energy conversion (OTEC) resources. *Ocean Engineering*, 34(17-18), 2210-2221.

Nihous, G. (2019). Conversación personal el día 30-02-2019 acerca de la importancia de tener datos diarios de temperatura superficial para la operatividad de la planta OTEC.

Nipponia, (2004). Consultado el 18-05-2019. En: <https://web-japan.org/nipponia/nipponia28/es/feature/feature08.html>

NOAA. (2017). National Oceanic and Atmospheric Administration. Ocean Thermal Energy Conversion. Disponible en: <https://goo.gl/AE0034>

Ocampo-Téllez, E. (2018). Desafíos del futuro energético para México. Potencial de las energías renovables. En: *Desarrollo industrial 2050, hacia una industria del futuro*. Instituto para el Desarrollo Industrial y el Crecimiento Económico, A.C. ISBN: 978-607-97629-5-7. 325-357 pp.

Ocean Energy Systems (OES) (2019). Ocean Energy Systems Annual Report 2019. Report by Ocean Energy Systems (OES). En: <https://tethys.pnnl.gov/publications/ocean-energy-systems-annual-report-2019>

Ocean Energy Systems (OES), 2018. [https:// www.ocean-energy-systems.org/](https://www.ocean-energy-systems.org/)

OnSet HOB0 Data Logger Manual, 2016. In: [www.onsetcomp.com](http://www.onsetcomp.com) (consultado el día 29 de mayo de 2019).

OTEC News, 2013. En: [www.otecnews.org](http://www.otecnews.org)

OTEC Okinawa, 2014. En: <http://otecokinawa.com/en/Project/History.html>

Posada Vanegas, G., V. Chávez Cerón, J.V. Hernández Fontes, Y. Rodríguez Cueto, G. Cadena Sánchez, A. Félix Delgado, R. González Huerta, E. López Honorato y R. Silva Casarín. (2019). El Futuro de las Energías Marinas en México. p. 255-274. En: Rivera-Arriaga, E., P. Sánchez-Gil, y J. Gutiérrez (eds.). Tópicos de Agenda para la Sostenibilidad de Costas y Mares Mexicanos. Universidad Autónoma de Campeche. Red ricomar. 334 p. ISBN 978-607-8444-57-1. **doi: 10.26359/epomex.0519**

Proyecto Fondo de Sustentabilidad Energética. (2018). En: <http://www.proyectofse.mx/>  
Rajagopalan, K., & Nihous, G. (2013). An Assessment of Global Ocean Thermal Energy Conversion Resources with a High-Resolution Ocean General Circulation Model. *Journal Of Energy Resources Technology*, 135(4). **doi: 10.1115/1.4023868**

Ravindran, M., Abraham, R. (2018). The Indian 1 MW demonstration OTEC plant and the development activities. In OCEANS'02 MTS/IEEE, vol. 3, pp. 1622–1628. IEEE.

Rizea, Steven Emanuel. (2012). "Optimization of Ocean Thermal Energy Conversion Power Plants". Electronic Theses and Dissertations, 2004-2019. 2368.

Roden, G. I. (1961). Sobre la circulación producida por el viento en el Golfo de Tehuantepec y sus efectos sobre las temperaturas superficiales. *Geofísica Internacional*. 55-76 pp.

SENER. (2018). Prospectivas de Energías Renovables 2012- 2026. Gobierno de la República. México. Disponible en: <https://goo.gl/avnHa2>

SOLTEC, (2020). Consultado el 05-05-2020. En: <https://soltec.com/es/nosotros/>

Soto Rodrigo; Vergara Julio. (2014). Thermal power plant efficiency enhancement with Ocean Thermal Energy Conversion. *Applied Thermal Engineering*, 62, 105-112.

Sverdrup, H. V., M. W. Johnson y R. H. Fleming. (1970). The oceans: Their physics chemistry and general biology). Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey. 1088 pp.

Tchernia, P. (1980). Descriptive Regional Oceanography. C. D. Densmore (traductor) 253 pp. Pergamon Marine Series Vol. 3. Pergamon Press, Oxford.

Trasviña, A., Barton, E. D., Vélez, H. S. y J. Brown. (2002). Frontal subduction of a cool surface water mass in the Gulf of Tehuantepec, Mexico (eddies within eddies). *Geofísica Internacional*. En prensa.

Trasviña, A., Portela, E., Beier, E., Barton, E., Castro, R., Godínez, V., & Palacios-Hernández, E. (2016). Water Masses and Circulation in the Tropical Pacific off Central Mexico and Surrounding Areas. *Journal Of Physical Oceanography*, 46(10), 3069-3081. **doi:10.1175/jpo-d-16-0068.1**

Universidad Internacional Menéndez Pelayo. (1981). Opciones energéticas: energías tradicionales y energías alternativas, Volumen 2. España: Ministerio de educación, p.10. [https://books.google.com.mx/books?id=RuM9CgAAQBAJ&pg=PA12&dq=fluido+de+trabajo+men%C3%A9ndez+pelayo&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwj7i\\_2DhZbUAhUMTCYKHXSbBnMQ6AEIJjAA#v=onepage&q=butano&f=false](https://books.google.com.mx/books?id=RuM9CgAAQBAJ&pg=PA12&dq=fluido+de+trabajo+men%C3%A9ndez+pelayo&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwj7i_2DhZbUAhUMTCYKHXSbBnMQ6AEIJjAA#v=onepage&q=butano&f=false)

Van Nostrand, 1951. [http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM\\_2018.pdf](http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2018.pdf)

Vázquez de la Cerda, R. (1984) Boletín Informativo, ESIA-IPN. Mayo-Junio, Ciudad de México, México.

Vega, L. A. (2002). Ocean Thermal Energy Conversion Primer. Marine Technology Society Journal, 6(4), 25-35.

Vega, L. A. (2002). Ocean Thermal Energy Conversion Primer. Marine Technology Society Journal, 6(4), 25-35.

Vega, L. A. (2007). Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC): Electricity and Desalinated water production. Offshore Infrastructure Associates, Inc. University of Hawaii. 60 p.

Vega, L. A. (2010). First generation 50 MW OTEC plantship for the production of electricity and desalinated water. Offshore Technology Conference, pp. 1 -17.

Wyrski, K. (1965). Circulation and water masses in the Eastern Equatorial Pacific Ocean. *Int. J. Oceanol. And Limnol.* 1(2): 117-147 pp.

XPRT Energy. (2020). Consultado el 14-04-2020. En: <https://www.energy-xprt.com/>

Yasuyuki. (2009). Performance Simulation of Solar-boosted Ocean Thermal Energy Conversion Plant. *Renewable Energy*, 34 (7), 1752-1758.

Yoon, J., Seol, S., Son, C., Jung, S., Kim, Y., & Lee, H. et al. (2017). Analysis of the high-efficiency EP-OTEC cycle using R152a. *Renewable Energy*, 105, 366-373. doi: **10.1016/j.renene.2016.12.019**

## 7. Anexo

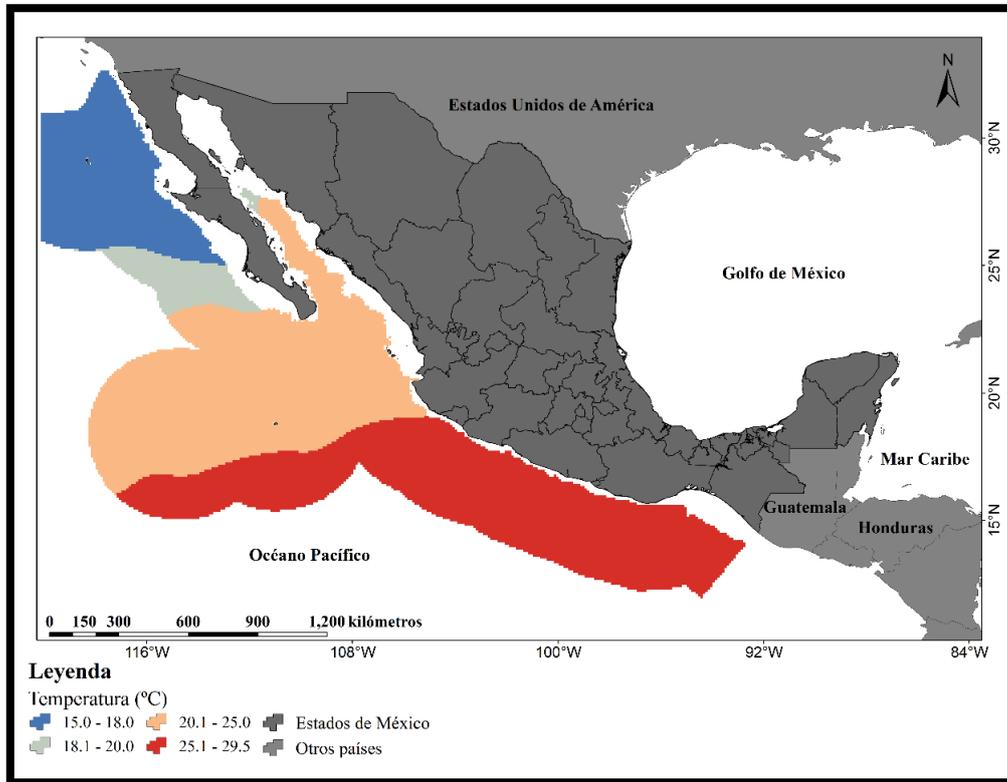


Figura A. Temperatura media estacional promedio para el Océano Pacífico mexicano (primavera), periodos: 1955-2017 (World Ocean Atlas 2018)

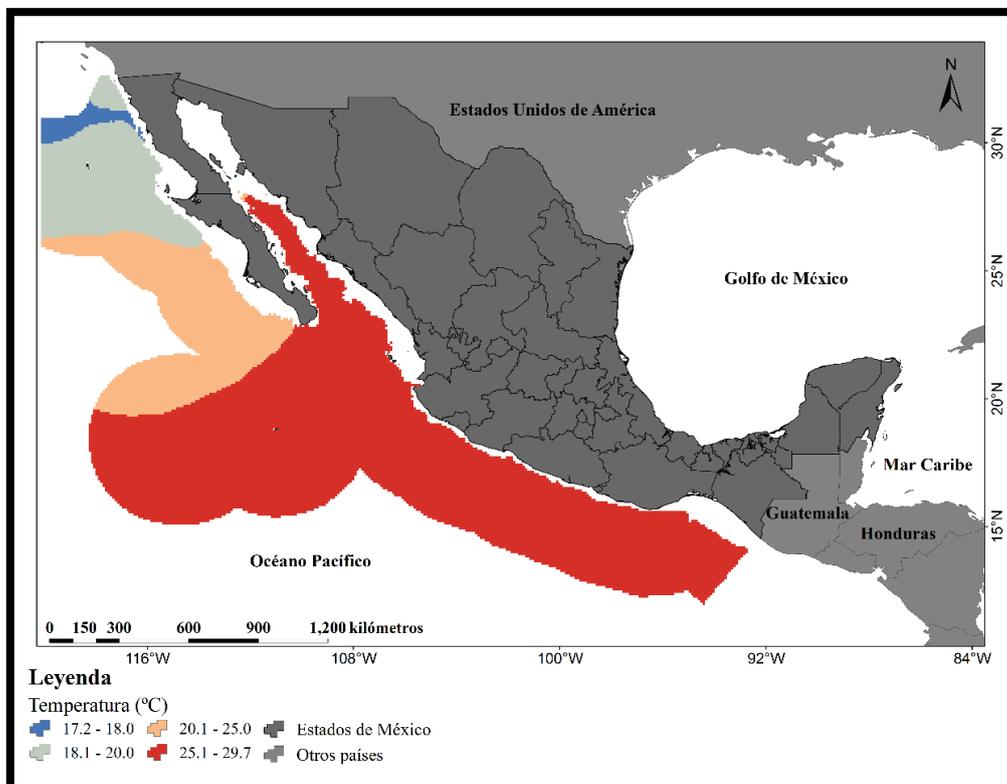


Figura B. Temperatura media estacional promedio para el Océano Pacífico mexicano (verano), periodos: 1955-2017 (World Ocean Atlas 2018)

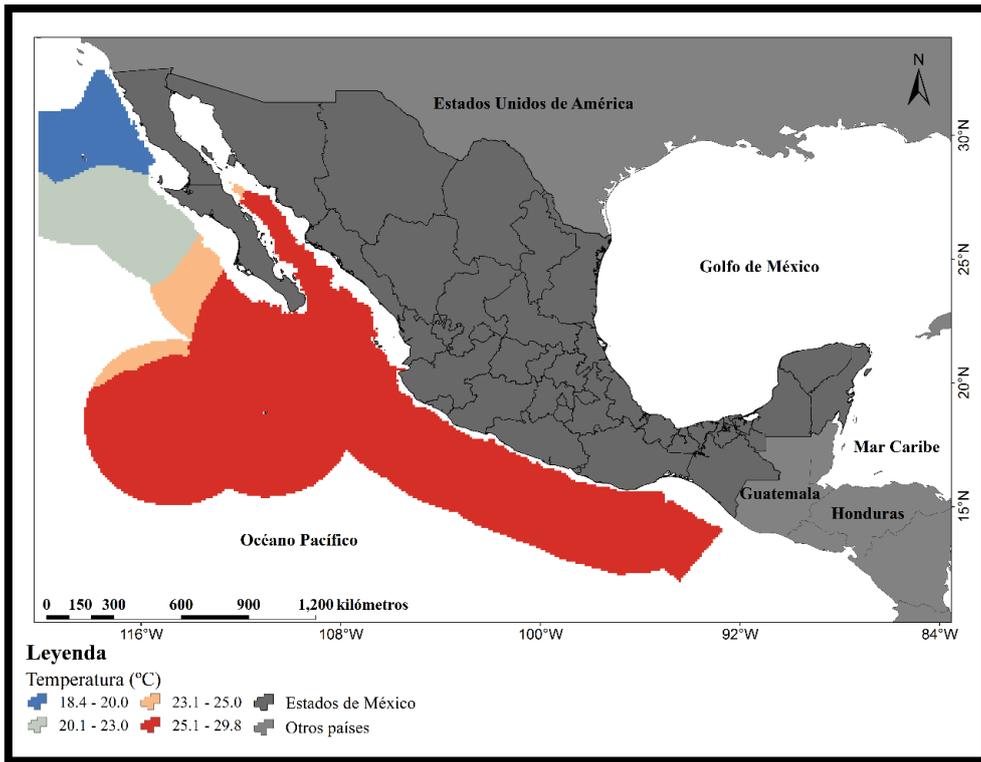


Figura C. Temperatura media estacional promedio para el Océano Pacífico mexicano (otoño), periodos: 1955-2017 (World Ocean Atlas 2018)

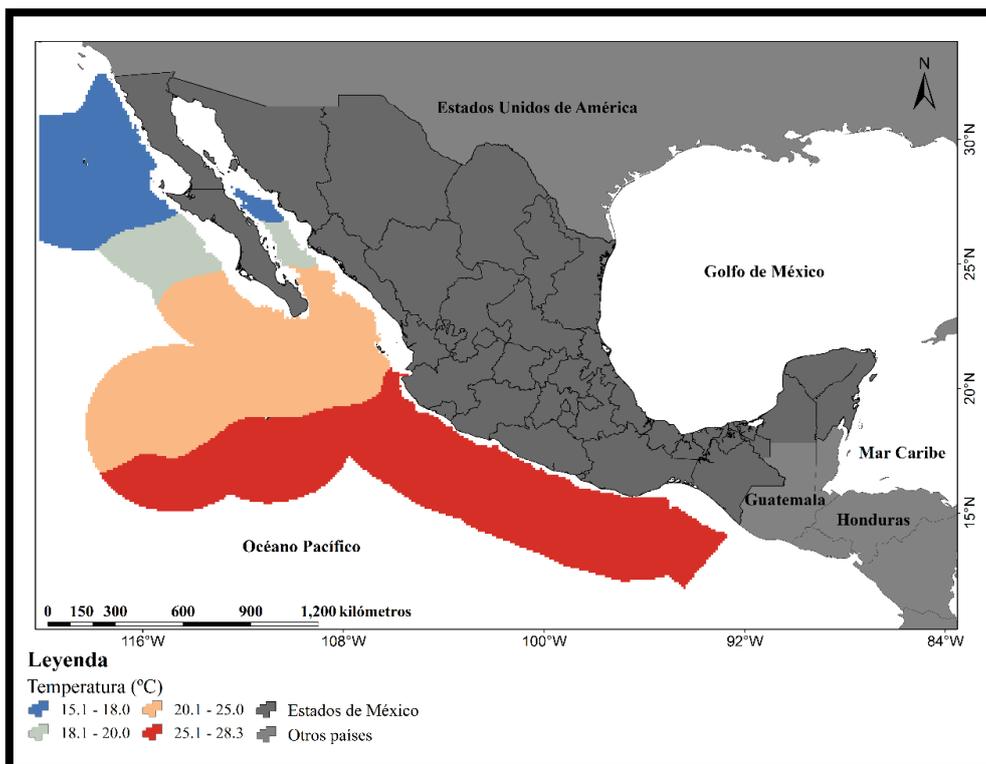


Figura D. Temperatura media estacional promedio para el Océano Pacífico mexicano (invierno), periodos: 1955-2017 (World Ocean Atlas 2018)

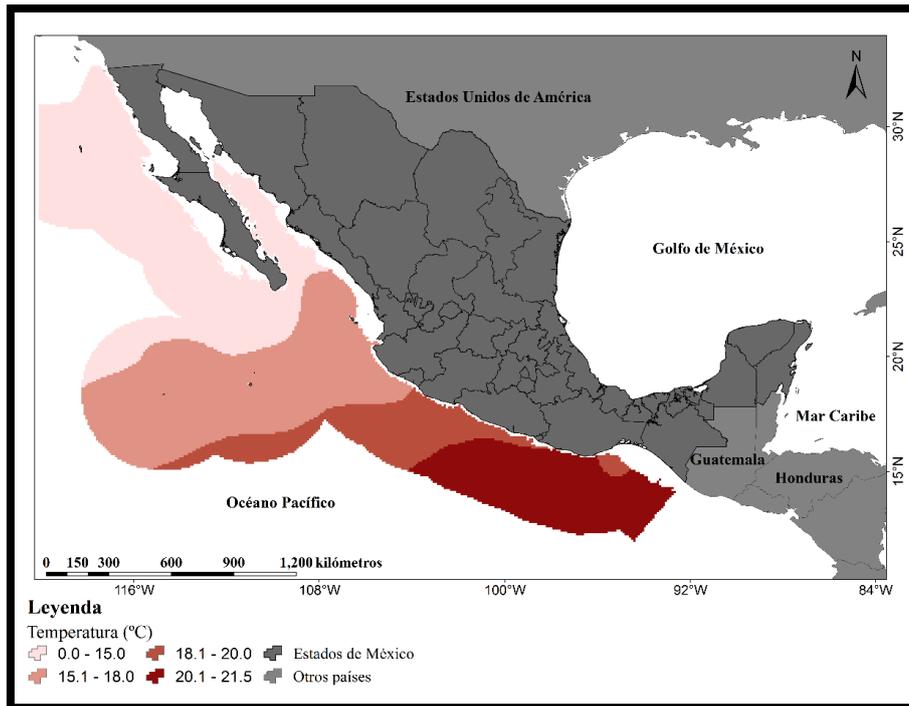


Figura E. Diferencial térmico estacional (primavera) para el Océano Pacífico mexicano entre superficie y 500 m de profundidad

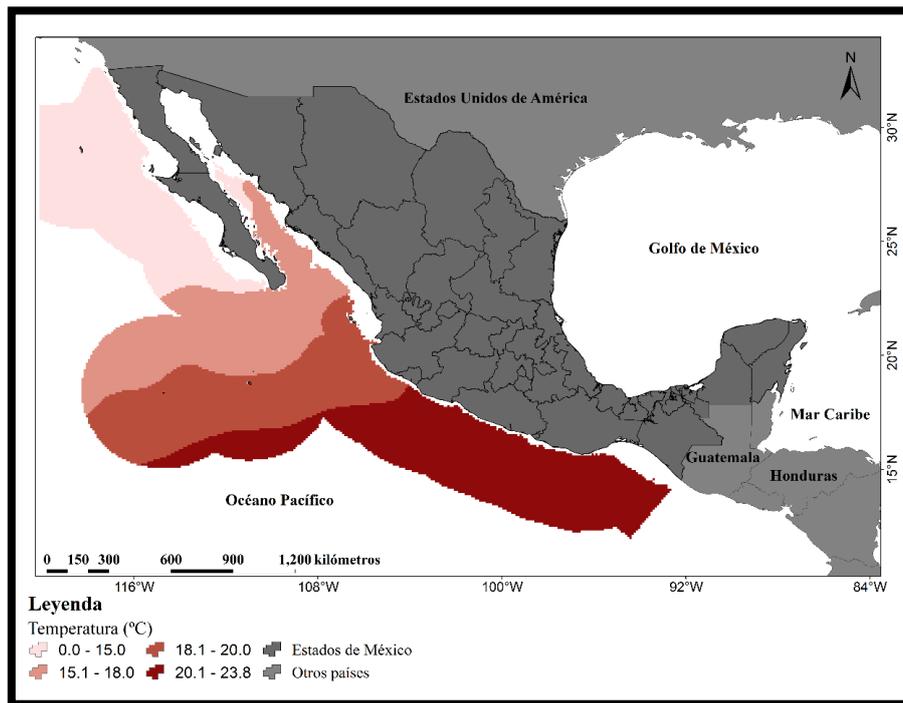


Figura F. Diferencial térmico estacional (primavera) para el Océano Pacífico mexicano entre superficie y 750 m de profundidad

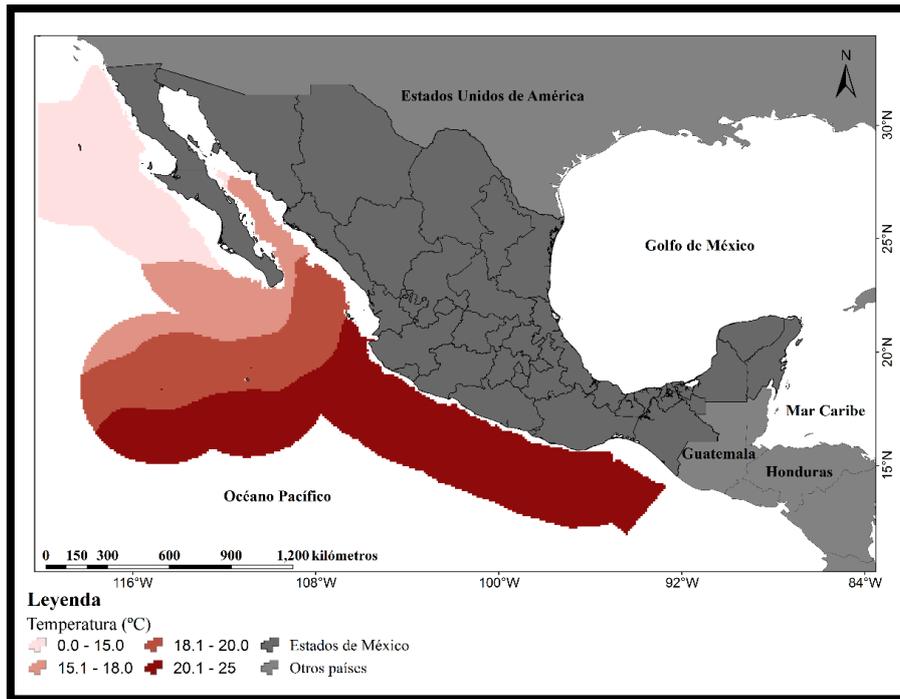


Figura G. Diferencial térmico estacional (primavera) para el Océano Pacífico mexicano entre superficie y 1000 m de profundidad

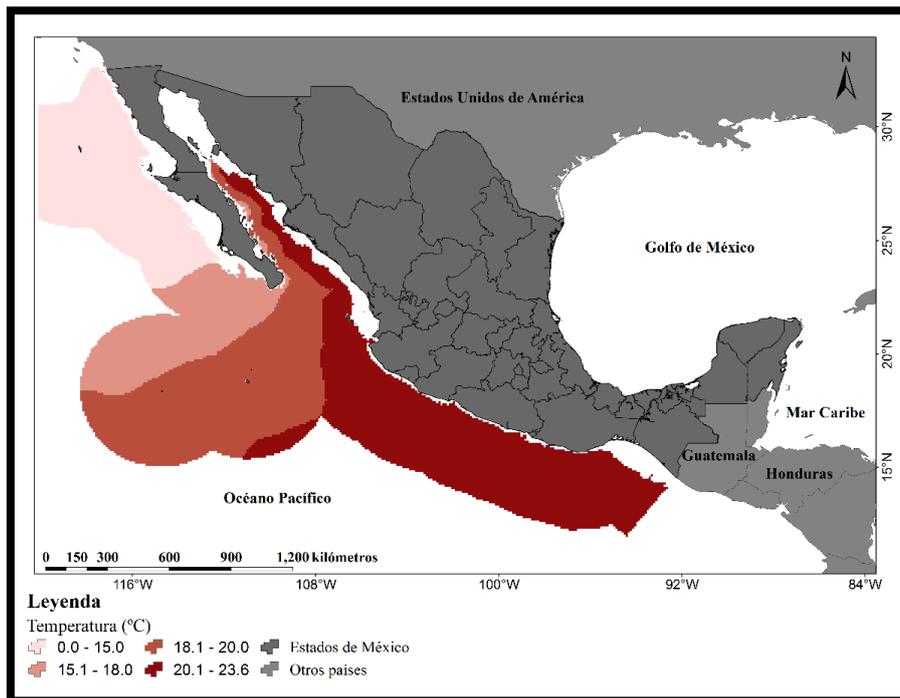


Figura H. Diferencial térmico estacional (verano) para el Océano Pacífico mexicano entre superficie y 500 m de profundidad

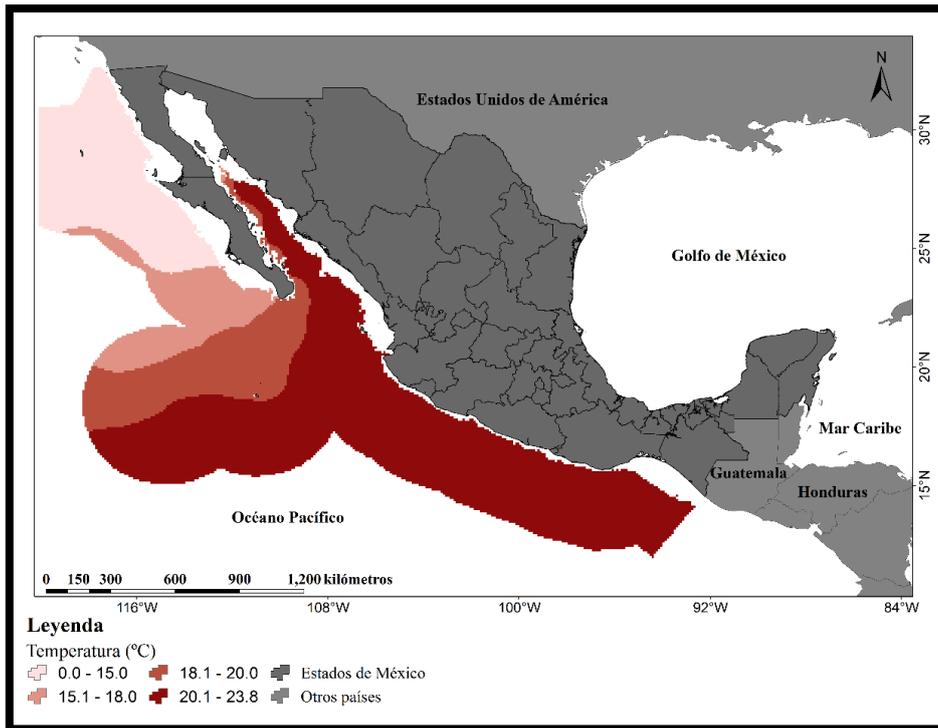


Figura I. Diferencial térmico estacional (verano) para el Océano Pacífico mexicano entre superficie y 750 m de profundidad

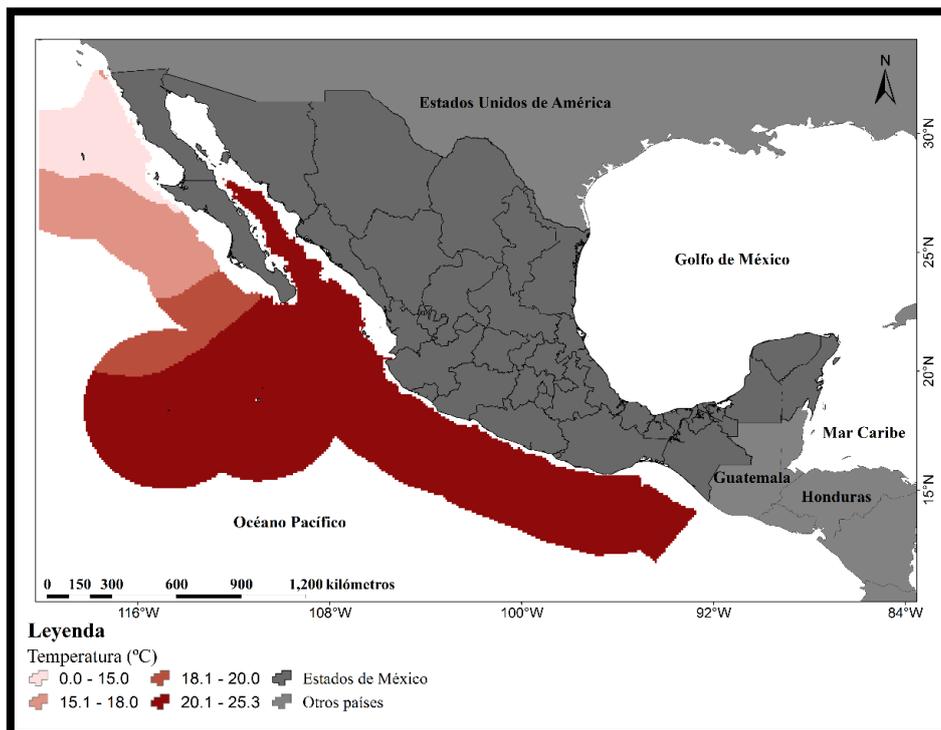


Figura J. Diferencial térmico estacional (verano) para el Océano Pacífico mexicano entre superficie y 1000 m de profundidad

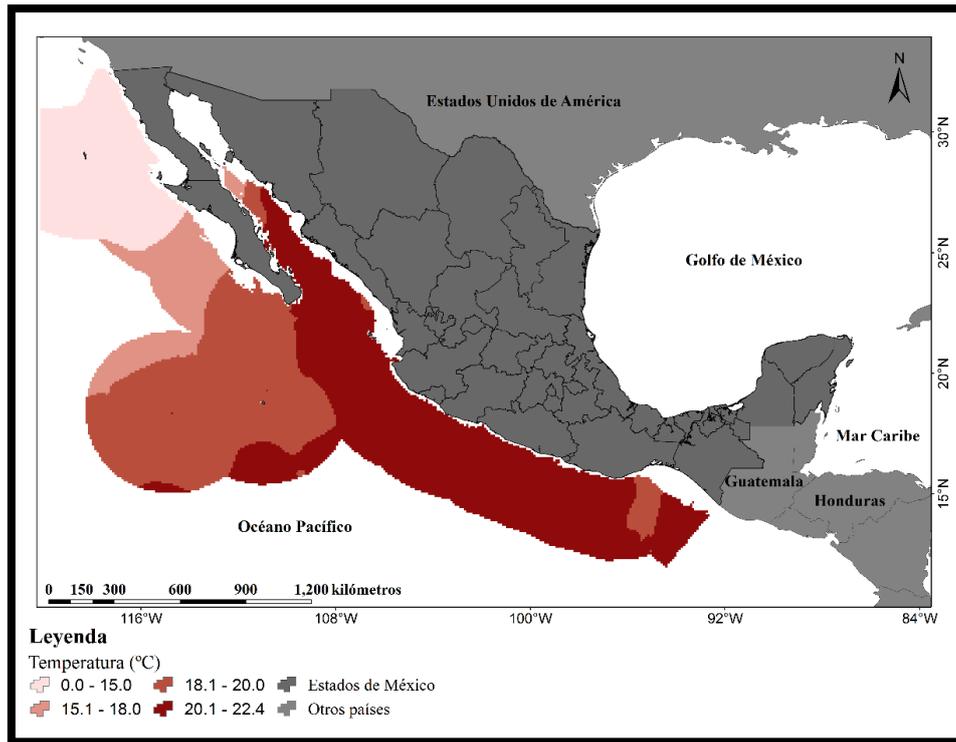


Figura K. Diferencial térmico estacional (otoño) para el Océano Pacífico mexicano entre superficie y 500 m de profundidad

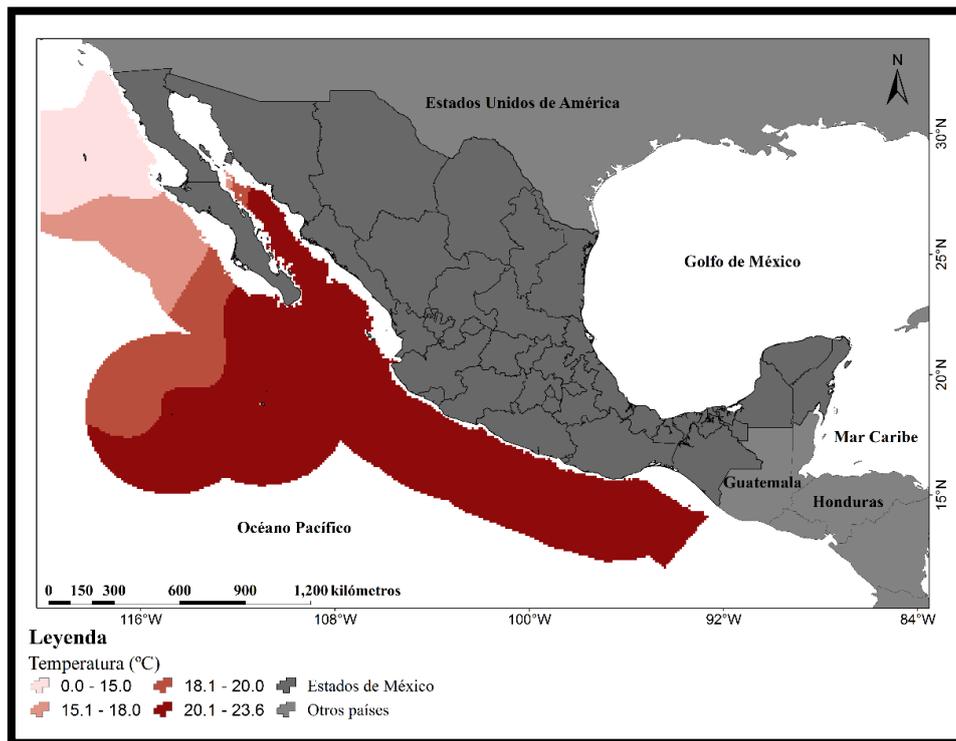


Figura L. Diferencial térmico estacional (otoño) para el Océano Pacífico mexicano entre superficie y 750 m de profundidad

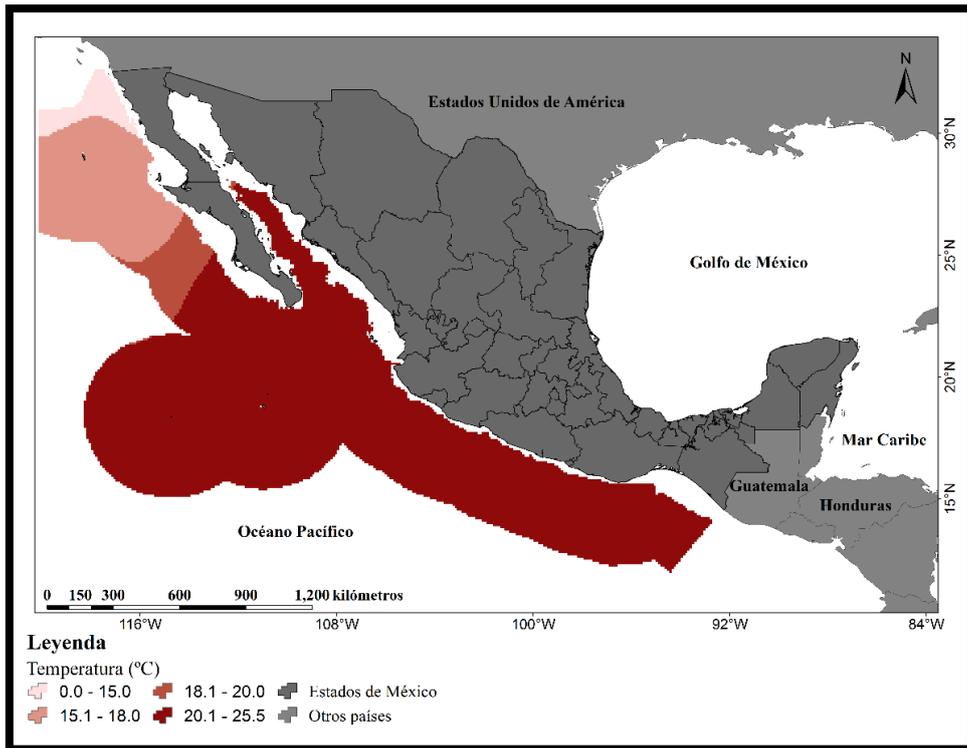


Figura M. Diferencial térmico estacional (otoño) para el Océano Pacífico mexicano entre superficie y 1000 m de profundidad

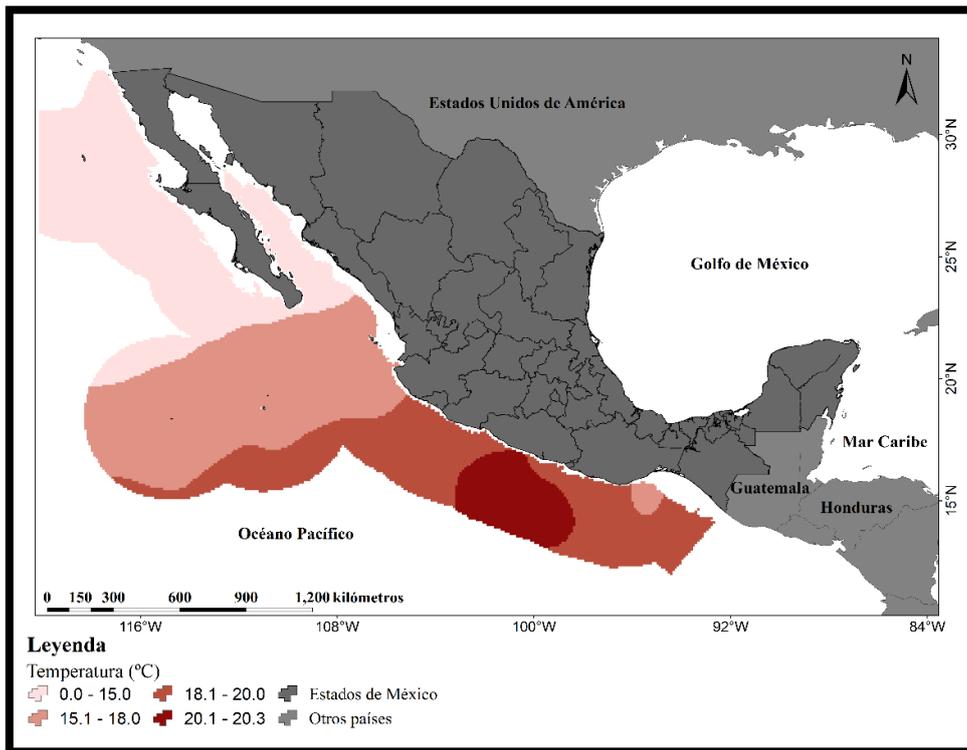
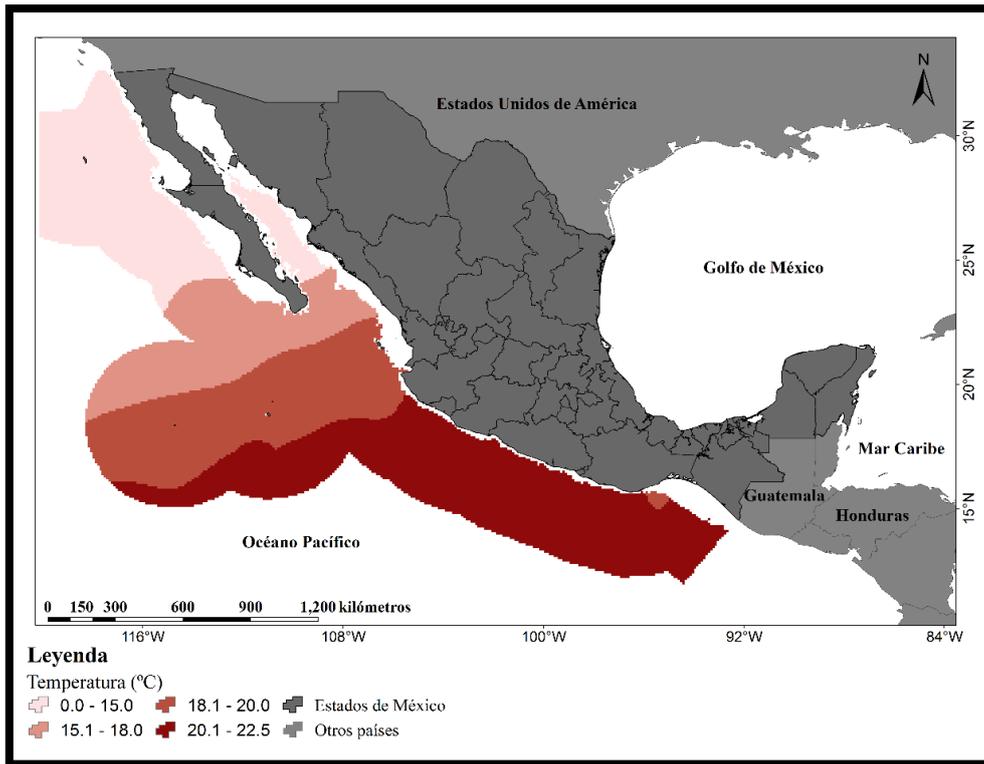
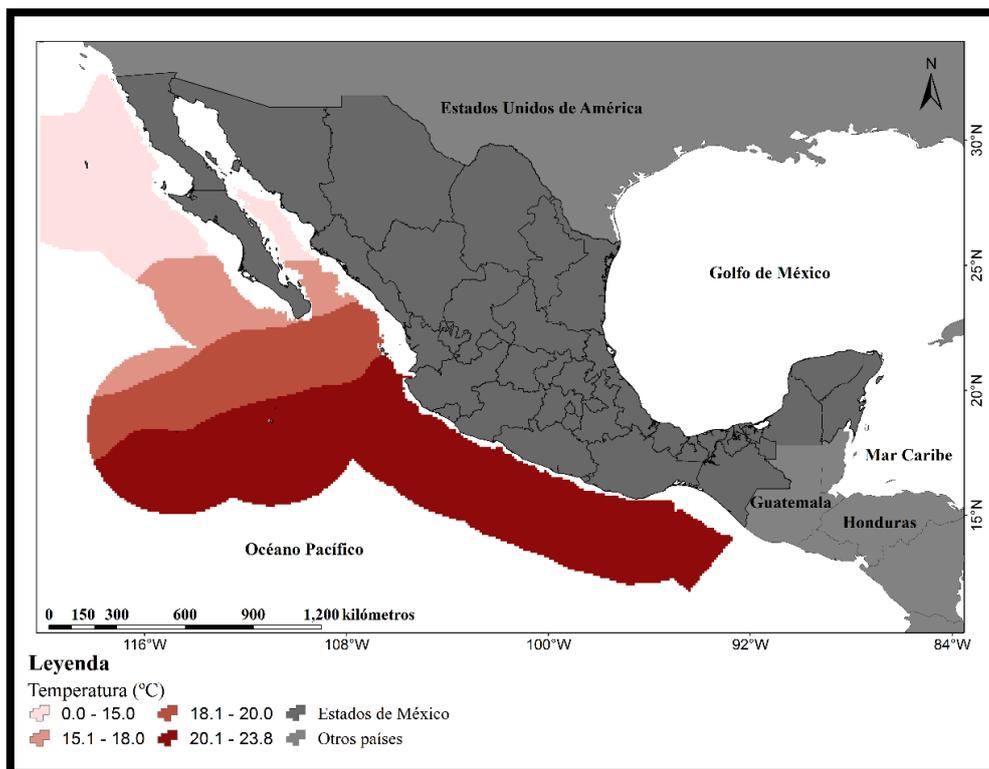


Figura N. Diferencial térmico estacional (invierno) para el Océano Pacífico mexicano entre superficie y 500 m de profundidad



**Figura O. Diferencial térmico estacional (invierno) para el Océano Pacífico mexicano entre superficie y 750 m de profundidad**



**Figura P. Diferencial térmico estacional (invierno) para el Océano Pacífico mexicano entre superficie y 1000 m de profundidad**

**Tabla XXX. Consumo eléctrico de cinco municipios del Pacífico mexicano (MWh año<sup>-1</sup>)**

<b>Municipio</b>	<b>2010</b>	<b>2011</b>	<b>2012</b>	<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>	<b>2018</b>	<b>2019</b>
Los Cabos_C	88.293	90.561	92.482	95.85	99.501	107.732	111.548	116.788	122.362	122.997
Puerto Vallarta_C	101.463	104.109	108.572	112.524	115.009	116.63	120.972	125.931	132.056	132.534
<b>Aquila_C</b>	5.051	5.259	5.538	5.705	6.025	6.239	6.389	6.556	6.691	6.988
<b>Tecpan de Galeana_C</b>	21.229	21.637	22.244	22.676	23.871	24.943	25.164	27.006	28.413	28.733
<b>San Pedro Pochutla_C</b>	13.039	13.558	13.881	14.373	14.508	14.949	15.597	16.153	16.962	17.45

**Tabla XXXI. Potencia eléctrica promedio por OTEC para cinco municipios del Pacífico mexicano (MW)**

<b>Municipio</b>	<b>2010</b>	<b>2011</b>	<b>2012</b>	<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>	<b>2018</b>	<b>2019</b>
Los Cabos_P	114.89	113.77	115.2	114.32	115.07	114.52	113.09	115.11	115.66	116.31
Puerto Vallarta_P	145.33	144.2	144.57	145.89	144.45	146.52	144.9	144.12	145.66	144.99
<b>Aquila_P</b>	156.71	154.04	155.33	155.67	155.82	156.9	154.48	155.6	155.76	155.26
<b>Tecpan de Galeana_P</b>	164.14	162.88	163.95	164.44	164.37	165.21	164.03	164.11	164.74	164.14
<b>San Pedro Pochutla_P</b>	161.04	159.66	160.33	160.54	160.37	160.45	160.11	161.03	160.09	160.46