



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA
INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA
OCEANOGRAFÍA FÍSICA

POSIBLES EFECTOS OCEANOGRÁFICOS POR LA OPERACIÓN DE UNA
PLANTA OTEC (OCEAN THERMAL ENERGY CONVERSION) EN LA ZONA DE
PUERTO ÁNGEL, OAXACA, MÉXICO.

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS DEL MAR

PRESENTA:
ALEJANDRO GARCÍA HUANTE

TUTOR PRINCIPAL
DR. MIGUEL ÁNGEL ALATORRE MENDIETA
INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA, UNAM

COMITÉ TUTOR
DR. MARTÍN MERINO IBARRA
INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA, UNAM
DR. RODOLFO SILVA CASARÍN
INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM
DRA. MARÍA ESTHER MEAVE DEL CASTILLO
INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA, UNAM
DR. FRANCISCO GUTIÉRREZ MENDIETA
INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA, UNAM
M. EN C. HÉCTOR MIGUEL AVIÑA JIMÉNEZ
INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

MÉXICO, D. F., NOVIEMBRE DE 2015



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.



POSIBLES EFECTOS OCEANOGRÁFICOS POR LA OPERACIÓN DE
UNA PLANTA OTEC (OCEAN THERMAL ENERGY CONVERSION) EN
LA ZONA DE PUERTO ÁNGEL, OAXACA, MÉXICO.

T E S I S

que, para obtener el grado académico de

Maestro en Ciencias
(Oceanografía Física)

p r e s e n t a

BIÓL. ALEJANDRO GARCÍA HUANTE

Director de tesis: Dr. Miguel Ángel Alatorre Mendieta

Comité tutorial: Dr. Martín Merino Ibarra
Dr. Rodolfo Silva Casarín
Dra. Ma. Esther Meave del Castillo
Dr. Francisco Gutiérrez Mendieta
M. en C. Héctor Miguel Aviña Jiménez

México, D. F., noviembre de 2015

AGRADECIMIENTOS

INSTITUCIONALES

A la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) por ser la casa de estudios que me dio la oportunidad a lo largo de estos años para superarme académica y profesionalmente. Hoy más que nunca, el lema “Orgullo Azul y Oro” está tatuado en mi corazón por siempre.

Al Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología (PCML) y al Instituto de Ciencias del Mar y Limnología (ICML) de la UNAM por brindarme el apoyo y la oportunidad de cursar mis estudios de maestría y poder especializarme en el campo de la Oceanografía Física.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por haberme otorgado la beca de estudios de posgrado.

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) por todas sus atenciones y enseñanzas académicas en las áreas de Mecánica de Fluidos y Métodos Matemáticos que me permitieron tener un mejor rendimiento para la realización de la tesis.

Al Korea Institute of Ocean Science & Technology (KIOST) y al Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering (KRISO) por todas sus atenciones durante mi estancia académica (tanto para conmigo como para mi tutor principal) así como por todas las sugerencias y comentarios realizados para el mejoramiento de la tesis.

A la Asociación de Oceanólogos de México (ASOCEAN) A. C. por haberme permitido exponer mi trabajo durante el XVII Congreso Nacional de Oceanografía, realizado en la ciudad de San Francisco de Campeche, Campeche; del 11 al 14 de septiembre del 2012.

Al Comité Oceanográfico Nacional de Cuba y a todas las instituciones de investigación marinas cubanas por permitirme exponer mi trabajo durante el IX Congreso Internacional de Ciencias del Mar “MARCUBA” realizado en la ciudad de La Habana, del 28 de octubre al 2 de noviembre de 2012.

A la Secretaría de Educación Pública (SEP) por haberme permitido exponer mi trabajo durante el XXI Congreso Nacional de Ciencia y Tecnología del Mar, realizado en la isla de Cozumel, Quintana Roo; del 8 al 11 de octubre del 2014.

A la Coordinación de Estudios de Posgrado y a la Coordinación de la Investigación Científica (CIC) de la UNAM por el apoyo económico brindado para la realización de mi estancia académica a Corea del Sur.

A la Universidad del Mar, campus Puerto Ángel, porque a pesar de haber tratado de detener mi desarrollo académico y profesional lograron exactamente lo contrario, les agradezco el hecho de haberme obstaculizado porque de esa manera confirmé que

las cosas deben hacerse con honestidad siempre y que cuando se quiere de verdad se pueden realizar tus objetivos con base en la tenacidad y el querer salir adelante.

ACADÉMICOS

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

Al Dr. Miguel Ángel Alatorre Mendieta (Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM), mi tutor principal, por el apoyo brindado desde un principio para la realización de este trabajo, sus inapreciables ideas y consejos pero, sobre todo, su enorme paciencia, dedicación e interés para ayudarme a realizar la tesis de manera satisfactoria así como el haberme trazado un rumbo que permitió mi mejor desarrollo profesional, académico y personal. Lo considero no solo un gran académico sino un gran amigo y compañero de trabajo.

Al Dr. Rodolfo Silva Casarín (Instituto de Ingeniería, UNAM) por su apoyo y asesoramiento en los aspectos de Ingeniería Hidráulica y por sus comentarios para el mejor desarrollo de este trabajo. También agradecerle mi inclusión en el megaproyecto nacional del Centro Mexicano de Innovación en Energía del Océano (CEMIE-O) lo que permitirá un mayor conocimiento y desarrollo técnico, tecnológico y metodológico de las plantas de gradiente térmico oceánico y acercarnos a la construcción y funcionamiento de la misma en el país a mediano plazo.

Al Dr. Martín Merino Ibarra (Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM) por ser incisivo en el tema de Oceanografía Química lo que permitió tener mayor claridad en muchos rubros del trabajo, por sus consejos y sus comentarios para el mejoramiento de la tesis y su interés para ser un mejor profesional e investigador.

A la Dra. María Esther Meave del Castillo (Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa) por su magnífico apoyo y asesoramiento en la parte biológica de este trabajo y su enorme interés por conocer más acerca de esta nueva tecnología alternativa para producción de energía lo que permitió una excelente interacción multidisciplinaria que se ve reflejado en esta tesis.

Al Dr. Francisco Gutiérrez Mendieta (Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa) por su valioso asesoramiento en la parte de Oceanografía Biológica y por sus excelentes explicaciones y comentarios que ayudaron a robustecer aún más el contenido de este trabajo.

Al M. en C. Héctor Miguel Aviña Jiménez (Instituto de Ingeniería, UNAM) por su valiosa asesoría en la parte del análisis de resultados, su tutoría para con las diversas herramientas de programación utilizadas y por sus ideas y consejos brindados al documento, los cuales permitieron de la mejor manera posible, culminar con la tesis.

Al Dr. Armando Trasviña Castro (CICESE, Unidad Foránea La Paz) por su enorme asesoría en la parte de la dinámica oceanográfica del Golfo de Tehuantepec además de sus consejos y comentarios para con el desarrollo del trabajo.

Al Dr. Luis A. Vega (Hawaii Natural Energy Institute & University of Hawaii) por su brillante asesoría acerca de las plantas de gradiente térmico oceánico, su interés para mejorar y enriquecer en gran medida la tesis en la parte metodológica y por la disposición para entregarme una gran cantidad de información de calidad con el fin de aclarar muchas de las dudas con respecto a esta tecnología.

Al Dr. Francisco Javier Ocampo Torres (CICESE, Unidad Ensenada) por sus amables atenciones durante mi estancia académica y por sus consejos y sugerencias para algunos rubros de la tesis, así como por permitirme trabajar en el Laboratorio de Oceanografía Física de dicha institución.

A la Dra. María Luisa Machaín Castillo (Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM) por permitirme participar en la Campaña Oceanográfica TEHUA X y tener el acceso a los datos de las diferentes estaciones de muestreo sin los cuales no hubiera podido realizar los análisis de velocidad geostrofica para la zona de estudio.

A los capitanes, oficiales y tripulación del B/O “El Puma” de la UNAM por las facilidades y apoyo otorgado para la toma de datos hidrológicos de la Campaña Oceanográfica TEHUA X en el año de 2012, los cuales fueron utilizados para la realización de este trabajo.

Al Dr. Hyeon Ju-Kim y a la M. en C. Hyeun Seo (KRISO) por su valiosa aportación para la realización de este trabajo y por todas sus magníficas atenciones durante mi estancia académica en Corea del Sur, lo que me permitió conocer en vivo el uso y desarrollo de la planta de gradiente térmico. Un reconocimiento muy grande porque me enseñaron que con esfuerzo, dedicación y cariño por su país se pueden conseguir grandes cosas en el menor tiempo posible.

A la Dra. Gloria Vilaclara Fatjó, Coordinadora del Posgrado de Ciencias del Mar y Limnología. Mi agradecimiento por su apoyo brindado para la realización de mis estudios de maestría, por su gran interés en mi progreso en el posgrado y por sus consejos e ideas para fortalecer el trabajo.

A la M. en C. Diana Juárez Bustos, Lic. Gabriela Almaraz Mejía, Lic. Guadalupe Godoy Medina y a la Mtra. Chantal Ruíz Guerrero por su invaluable ayuda y apoyo otorgado en los trámites de la beca, el apoyo financiero para la estancia académica y asesoría para todos los asuntos académicos y administrativos durante mi estadía como alumno en el instituto.

PERSONALES

A mis queridos padres: Lic. Fis. Mat. Marcos García Trujillo y M. en C. Yolanda Huante González. Tendría que escribir toda una tesis para agradecerles infinitamente su apoyo, sus valores, su educación, su manutención, su espíritu de lucha ante la adversidad y por ser ejemplo y motor de mi vida personal y profesional. Son mis ídolos por siempre y para siempre pues han soportado todos mis problemas y han recorrido junto conmigo muchos caminos llenos de obstáculos pero nunca dejándome solo y ayudándome con sus consejos en todos los aspectos. Mejores padres no pude haber tenido en mi vida.

A mis hermanas: M. en C. Lissette García Huante y C. a Dra. Yolanda Guadalupe García Huante por su apoyo durante los años que vivimos juntos, sus consejos y su personalidad que nos permite interactuar de forma cotidiana en casa. Las quiero y admiro mucho.

A los demás miembros de la familia García Huante; (abuelos, tíos, primos) por su apoyo, consejos y compañía pero muy en especial a mi tío Jorge Alberto Huante González (QEPD) “el güero”, por ser parte fundamental en mi vida y entregarme su amistad incondicional. Me duele no tenerte aquí para ser parte de este logro pero sé que me cuidas desde donde quiera que estés. Los quiero a todos.

A todos los profesores que he tenido durante mi vida académica, sus conocimientos, consejos, ideas y regaños. Mi respeto y admiración para todos ellos.

A todo los “Suckis” generación 1997-2001 de la carrera de Biología Marina de la Universidad del Mar, campus Puerto Ángel: Betzabeth, Héctor, Baruch, Miriam, Fabricio, Yúllica, Jaime, Norma, Ángel, José, Adriana, Josué, Benjamín, Tania, Luis Enrique, Zóe, Edgar Francisco y José Alberto; mejor grupo no pude haber tenido, su amistad, compañía y apoyo durante cinco años valieron mucho la pena. Espero en algún momento volverlos a ver.

A toda la generación 2005 de la Facultad de Ciencias de la UNAM; somos demasiados para nombrarlos a todos pero muchas gracias por el apoyo, compañía y ayuda durante las clases y las prácticas de campo además de la amistad de muchos de ustedes. ¡Cuatro años inolvidables!

A mis compañeros y amigos del Posgrado de Ciencias del Mar y Limnología: Joaquín “Tato”, Alex, Alba Nayeli, Ángela, Pamela, Liliana, José, Circe, Roxana, Tania, Laura, Dayenari y a muchos otros a las que considero personas muy valiosas en lo profesional y personal. Espero poder trabajar con ustedes en algún momento; mientras tanto, sigan adelante con sus sueños.

A mis compañeros de la Campaña Oceanográfica TEHUA X: Paola, Laura, Brenda, Hugo, Héctor, Josué, Carmen, Bárbara, Toño, Celso... espero que en otro momento podamos navegar de nueva cuenta, gracias por su amistad y cariño.

A mis compañeros y amigos del Laboratorio-Taller de Energía Oceánica: M. en C. Yandy Rodríguez Cueto, Ing. Víctor Luna Gómez, Biol. Ricardo Efraín Hernández

Contreras, Fis. Ebanibaldo Sánchez Zúñiga y Biol. Josué Daniel Cortés Solano por todo su apoyo incondicional, consejos y su gran amistad. El mejor grupo que ha tenido el taller sin duda alguna.

A mis mejores amigos (Héctor, Marco Antonio, Ángel, Ángela, Yúlita, Susana, Yuriria y Amelia).

A mi futura esposa, Amelia López Herrera, por todo su cariño, comprensión, amor y apoyo durante este tiempo en el que hemos estado juntos. Gracias de todo corazón. Te amo!!!

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

CONTENIDO

DEDICATORIAS	I
LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE TABLAS	XI
LISTA DE VARIABLES	XII
RESUMEN	XIII
ABSTRACT	XIV
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	5
2.1. Antecedentes mundiales.	5
2.1.1. Desarrollo tecnológico y metodológico.	5
2.1.2. Proyectos actuales.	9
2.2. Antecedentes nacionales.	13
2.3. Impactos ambientales mundiales.	15
2.4. Impactos ambientales nacionales.	16
2.5. Beneficios secundarios.	17
2.5.1. Producción de agua potable	17
2.5.2. Aire acondicionado	17
2.5.3. Acuicultura	18
2.5.4. Agricultura de agua fría	18
2.5.5. Producción de hidrógeno	19
2.5.6. Otros.	19
3. HIPÓTESIS	21
4. OBJETIVOS	23
4.1. Objetivo general.	23
4.2. Objetivos específicos.	23
5. ÁREA DE ESTUDIO	25
5.1. Golfo de Tehuantepec.	25
5.1.1. Descripción general.	25
5.1.2. Aspectos meteorológicos.	26
5.1.3. Hidrografía y masas de agua.	29
5.1.4. Corrientes.	32
5.1.5. Surgencias, giros y subducción frontal.	35
5.1.6. Geostrofia.	36
5.1.7. Temperatura.	38
5.1.8. Salinidad.	39
5.1.9. Oceanografía química.	39
5.1.9.1. Oxígeno disuelto	40
5.1.9.2. pH	41
5.1.9.3. Dióxido de carbono	41
5.1.9.4. Alcalinidad	42
5.1.9.5. Nitritos	43
5.1.9.6. Nitratos	44
5.1.9.7. Amonio	45
5.1.9.8. Ortofosfatos.	45
5.1.9.9. Silicatos.	46
5.1.9.10. Parámetros específicos poco medidos	47
5.1.9.10.1. Clorofila	47
5.1.10. Oceanografía biológica.	48
5.1.10.1. Antecedentes.	50
5.1.10.2. Pigmentos fotosintéticos.	51
5.1.10.3. Productividad primaria.	51
5.1.10.4. Composición y abundancia del fitoplancton.	53

5.1.10.5. Procesos de florecimiento fitoplanctónico perjudicial, sus efectos e investigaciones en México.	53
5.1.10.6. Productos tóxicos.	55
5.1.10.7. Especies de fitoplancton responsables de FAN en México	56
5.2. Puerto Ángel.	60
5.2.1. Localización.	60
5.2.2. Geomorfología.	61
5.2.3. Clima.	61
5.2.4. Dinámica oceanográfica.	61
5.2.5. Hidrología.	62
5.2.6. Actividades socioeconómicas.	62
5.2.7. Oceanografía (Parámetros fisicoquímicos).	63
5.2.7.1. Temperatura.	63
5.2.7.2. Salinidad.	63
5.2.7.3. Nutrimientos y otros parámetros.	63
5.2.7.3.1. Nitratos.	63
5.2.7.3.2. Fosfatos.	64
5.2.7.3.3. Silicatos.	64
5.2.7.3.4. Oxígeno disuelto.	64
5.2.8. Otros.	64
6. MATERIALES Y MÉTODO	65
6.1. Obtención de datos.	65
6.2. Representación gráfica y evaluación de parámetros fisicoquímicos en la zona de descarga.	65
6.3. Elaboración de la batimetría y definición de la distancia de la planta OTEC a la zona costera.	66
6.4. Determinación de velocidad y dirección de corrientes geostróficas.	66
6.5. Cálculo de pérdidas de energía y velocidades promedio en el tubo de descarga de la planta OTEC.	68
6.5.1. Factor Darcy-Weisbach.	69
6.5.2. Factor Manning.	70
6.6. Comparación entre la descarga de la planta OTEC y el enfriamiento superficial del Golfo de Tehuantepec.	70
6.7. Efecto biológico en la zona de descarga.	71
6.8. Determinación de la emisión de CO ₂ a la zona superficial, huella de carbono y porcentaje de eficiencia energética verde de la planta OTEC.	71
6.8.1. Cálculo de la potencia neta de la planta OTEC.	71
6.8.2. Cálculo de la emisión de CO ₂ generado por la planta.	71
6.8.3. Emisión de CO ₂ en fase operativa.	72
6.8.4. La emisión total de CO ₂ de las plantas OTEC contra otros sistemas de energía. Huella de carbono y eficiencia energética verde.	73
7. RESULTADOS	75
7.1. Distancia entre la zona costera de Puerto Ángel y la isolinéa de 1000 m de profundidad.	75
7.2. Parámetros fisicoquímicos y su comportamiento en la zona de descarga en verano e invierno.	78
7.2.1. Temperatura.	78
7.2.2. Salinidad.	79
7.2.3. Densidad.	79
7.2.4. Nitratos.	81
7.2.5. Fosfatos.	82
7.2.6. Silicatos.	84
7.2.7. Oxígeno disuelto.	85
7.2.8. Huella de carbono inorgánico y eficiencia energética verde.	85
7.2.8.1. Potencia neta.	85

7.2.8.2. Emisión de CO ₂ de la planta OTEC sin fases operativas.	85
7.2.8.3. Emisión de CO ₂ en fases operativas más emisión de amoníaco.	85
7.2.8.4. Eficiencia térmica verde (huella de carbono).	86
7.3. Velocidad y dirección de las corrientes geostróficas.	87
7.4. Pérdidas de energía y velocidad promedio.	88
7.5. Comparación entre la descarga de la planta OTEC y el enfriamiento superficial del Golfo de Tehuantepec.	89
7.6. Efecto ambiental para la zona de descarga.	89
7.6.1. Medición de concentración y dilución de nutrimentos en la zona de descarga	89
7.6.2. Efecto biológico del agua de descarga de la planta OTEC.	93
8. DISCUSIÓN	97
8.1. Parámetros fisicoquímicos.	97
8.2. Efecto por la operación de la planta OTEC	98
8.3. Ubicaciones tentativas de la planta OTEC	98
8.4. Aporte de nutrimentos, dinámica oceanográfica y comparación con la surgencia (esfuerzo eólico) de Tehuantepec.	100
8.5. Efecto biológico en el fitoplancton	102
9. CONCLUSIONES	107
10. RECOMENDACIONES	109
11. PROYECTOS A FUTURO	111
12. LITERATURA CITADA	113

LISTA DE FIGURAS.

Figura 1. Ciclo de Rankine en la planta OTEC.	2
Figura 2. Ougrée, Bélgica; lugar donde Georges Claude realizó la primera prueba de gradiente térmico para generación de energía eléctrica en 1928.	5
Figura 3. Tubería que se utilizó en la operación de la planta de gradiente térmico en Bahía Matanzas, Cuba.	6
Figura 4. Restos de la antigua planta OTEC de Bahía Matanzas, Cuba.	6
Figura 5. Buque "Tunisie" que utilizó el Dr. Claude para producir hielo con la utilización del gradiente térmico oceánico (Claude, 1935).	7
Figura 6. Planta OTEC on-shore de Okinawa, Japón (OTEC-Okinawa, 2014).	10
Figura 7. Planta OTEC on-shore de Goseong, Corea del Sur.	11
Figura 8. Productos y beneficios del agua profunda manejada en la planta OTEC on-shore de Goseong, Corea del Sur.	12
Figura 9. Ubicación de la planta on-shore OTEC Hawaii-II de 100 kW de generación	13
Figura 10. Proyectos de construcción y operación de plantas de gradiente térmico en el mundo (Departamento de Energía de Estados Unidos, 2014).	13
Figura 11. Antecedentes nacionales de propuesta para la instalación de una planta OTEC y gradiente térmico oceánico de México.	14
Figura 12. Golfo de Tehuantepec (del autor)	25
Figura 13. Gráfico T-S histórico para el Golfo de Tehuantepec (Wyrcki, 1967; Monreal-Salas, 1998; Fiedler y Talley, 2006 y Araico-González, 2012)	32
Figura 14. Patrón de corrientes superficiales para el Golfo de Tehuantepec, según Kessler (2006).	35
Figura 15. Diagrama T-S que muestra la presencia del giro anticiclónico durante los cruceros oceanográficos de 1986 a) y 1992 b) en las tres regiones del Golfo de Tehuantepec (modificado de Trasviña y Barton, 2008).	37
Figura 16. Perfil vertical de temperatura para el Golfo de Tehuantepec (NOAA 1923-2013).	38
Figura 17. Perfil vertical de salinidad para el Golfo de Tehuantepec (NOAA 1923-2013).	39
Figura 18. Perfil vertical de oxígeno disuelto para el Golfo de Tehuantepec (NOAA 1923-2013).	40
Figura 19. Perfil vertical de pH para el Golfo de Tehuantepec (NOAA 1923-2013).	41
Figura 20. Perfil vertical de TCO ₂ para el Golfo de Tehuantepec (Takahashi, 1998).	42
Figura 21. Perfil vertical de alcalinidad total para el Golfo de Tehuantepec (Tomado de Vázquez-Gutiérrez et al., 1998; modificado).	43
Figura 22. Perfil vertical de nitritos para el Golfo de Tehuantepec (Tomado de Vázquez-Gutiérrez et al., 1998; modificado).	44
Figura 23. Perfil vertical histórico de nitratos para el Golfo de Tehuantepec (NOAA 1923-2013).	45
Figura 24. Perfil vertical de fosfatos para el Golfo de Tehuantepec (NOAA 1923-2013).	46
Figura 25. Perfil vertical de silicatos para el Golfo de Tehuantepec (NOAA 1923-2013).	47
Figura 26. Perfil vertical de clorofila-a para el Golfo de Tehuantepec (NOAA 1923-2013).	48
Figura 27. Situación geográfica de Puerto Ángel, Oaxaca.	61
Figura 28. Posibles ubicaciones para la planta OTEC (onshore y offshore) en la zona de Puerto Ángel, Oaxaca.	75
Figura 29. Localización de los tres sitios más viables para la construcción de una planta OTEC on-shore en la zona de Puerto Ángel y alrededores	76
Figura 30. Mapa batimétrico lateral 3D para el área de estudio (Puerto Ángel representado por el círculo negro).	77
Figura 31. Cotas inferior y superior del gradiente térmico histórico para el Golfo de Tehuantepec.	77
Figura 32. Perfil vertical de temperatura para Puerto Ángel, a) sin operación de la planta OTEC en verano; b) con la operación de la planta OTEC en verano.	78

Figura 33. Perfil vertical de temperatura para Puerto Ángel, a) sin operación de la planta OTEC en invierno; b) con la operación de la planta OTEC en invierno.	79
Figura 34. Perfil vertical de salinidad para Puerto Ángel, a) sin operación de la planta OTEC en verano; b) con la operación de la planta OTEC en verano.	80
Figura 35. Perfil vertical de salinidad para Puerto Ángel, a) sin operación de la planta OTEC en invierno; b) con la operación de la planta OTEC en invierno.	80
Figura 36. Perfil vertical de densidad para Puerto Ángel, a) sin operación de la planta OTEC en verano; b) con la operación de la planta OTEC en verano.	81
Figura 37. Perfil vertical de densidad para Puerto Ángel, a) sin operación de la planta OTEC en invierno; b) con la operación de la planta OTEC en invierno.	81
Figura 38. Perfil vertical de nitratos para Puerto Ángel, a) sin operación de la planta OTEC en verano; b) con la operación de la planta OTEC en verano.	82
Figura 39. Perfil vertical de nitratos para Puerto Ángel, a) sin operación de la planta OTEC en invierno; b) con la operación de la planta OTEC en invierno.	82
Figura 40. Perfil vertical de fosfatos para Puerto Ángel, a) sin operación de la planta OTEC en verano; b) con la operación de la planta OTEC en verano	83
Figura 41. Perfil vertical de fosfatos para Puerto Ángel, a) sin operación de la planta OTEC en invierno; b) con la operación de la planta OTEC en invierno	84
Figura 42. Perfil vertical de silicatos para Puerto Ángel, a) sin operación de la planta OTEC en verano; b) con la operación de la planta OTEC en verano	84
Figura 43. Perfil vertical de silicatos para Puerto Ángel, a) sin operación de la planta OTEC en invierno; b) con la operación de la planta OTEC en invierno	84
Figura 44. Velocidades geostróficas relativas a 750 metros de profundidad para las estaciones monitorizadas en el Golfo de Tehuantepec [42a] (transecto seguido por el B/O "El Puma" durante la Campaña Oceanográfica TEHUA X del 6 al 12 de junio de 2012 [42b]).	87
Figura 45. Direcciones de la velocidad geostrófica para las profundidades analizadas [perpendiculares al transecto]. 43A) 80 m de profundidad, 43B) 150 m de profundidad, 43C) 400 m de profundidad y 43D) 750 m de profundidad.	88
Figura 46. Concentración final de nitratos en el agua de descarga de la planta OTEC.	90
Figura 47. Concentración final de fosfatos en el agua de descarga de la planta OTEC.	91
Figura 48. Concentración final de silicatos en el agua de descarga de la planta OTEC.	91
Figura 49. Comportamiento de la pluma de agua de descarga de la planta OTEC para los fosfatos.	92
Figura 50. Comportamiento de la pluma de agua de descarga de la planta OTEC para los silicatos.	92
Figura 51. Comportamiento de la pluma de agua de descarga de la planta OTEC para los nitratos.	93

LISTA DE TABLAS.

Tabla I. Emisión estimada de CO ₂ de una planta OTEC para 100 MW de generación de energía eléctrica.	85
Tabla II. Parámetros para medición de pérdidas por fricción y velocidad media para la zona de descarga y el tubo de agua fría de la planta OTEC de Puerto Ángel y otros sitios.	88
Tabla III. Parámetros y condiciones físicas de una planta OTEC y del enfriamiento superficial del Golfo de Tehuantepec.	89
Tabla IV. Concentraciones de los diferentes nutrimentos de acuerdo con la zona de descarga de agua en los diferentes procesos de afloramiento de agua.	93
Tabla V. Parámetros fisicoquímicos para la zona de descarga de la planta OTEC	94
Tabla VI. Requerimientos ambientales para el crecimiento óptimo de las especies FAN determinadas para el estudio.	94

LISTA DE VARIABLES.

$D_\delta(z+\Delta z)$	Alturas dinámicas (m)
g	Gravedad ($m\ s^{-2}$)
V_{rel}	Velocidad relativa ($m\ s^{-1}$)
f	Factor de Coriolis (s^{-1})
Δx	Distancia media entre estaciones (Km)
ρ	Densidad ($Kg\ m^{-3}$)
Re	Número de Reynolds
V	Velocidad media ($m\ s^{-1}$)
D	Diámetro del conducto (m)
ν	Viscosidad ($N*s/m^2$)
ε/D	Rugosidad relativa
h_f	Pérdida por fricción (m)
f	Factor de fricción
L	Longitud del tubo (m)
n	Factor de Manning
R_h	Radio hidráulico (m)
S_f	Pendiente de fricción

RESUMEN

El gradiente térmico oceánico está basado en la explotación de la diferencia de temperaturas entre las aguas superficiales y profundas, por este motivo las regiones ecuatoriales y subtropicales son las más adecuadas para el aprovechamiento de este tipo de energía. Una planta OTEC utiliza esta diferencia térmica (que preferentemente no debe ser menor de 20°C) para transformar el calor en energía eléctrica. Se han experimentado con prototipos durante décadas siendo Cuba y Estados Unidos (en Hawaii) pioneros en la operación y más recientemente Japón, la India y Corea del Sur. México recién comienza incipientemente a explorar el uso de plantas OTEC ya que el país presenta las condiciones oceanográficas ideales por lo que en este trabajo se analiza teóricamente el posible efecto a nivel fisicoquímico y biológico que la operación de la planta puede causar. Se estudió y detalló la batimetría aproximada de la zona de Puerto Ángel para determinar los mejores sitios para instalación y operación de la planta además de representar y analizar los perfiles verticales de temperatura, salinidad, oxígeno disuelto y nutrimentos de dicha área comparándose con los posibles efectos en dichos parámetros ocasionados por una planta OTEC. Se calculó la ganancia de temperatura al paso por la planta, la densidad del agua de descarga y se compararon con los parámetros normales del área de estudio para determinar diferencias significativas y determinar el posible tipo de efecto presente. Los resultados de los parámetros fisicoquímicos de la OTEC se compararon con los parámetros de la surgencia eólica de Tehuantepec para determinar el efecto a nivel biológico, poniendo mayor atención en los organismos pertenecientes a los florecimientos algales nocivo (FAN). En los casos de la temperatura, salinidad y densidad, el contraste de los datos nos indica que no se presentaría ningún tipo de afectación negativa. En cambio, para los nutrimentos, existe una diferencia notable en cuanto a su concentración, la cual es más elevada cuando la planta OTEC está en continuo funcionamiento, en comparación con las concentraciones naturales y las concentraciones producidas por la surgencia de Tehuantepec. Sin embargo, debido a la dinámica oceanográfica de la zona, la tasa de dilución de los nutrimentos y otros (reacciones entre elementos, tasa de consumo de nutrimentos y factores ambientales) sería poco probable que exista un efecto importante en los organismos fitoplanctónicos de la zona. Con esto se concluye que a pesar de que no existiría un efecto importante a gran escala en la zona de estudio, se recomienda seguir medidas de monitoreo y de seguridad frecuentes con lo cual, la operación de la planta será viable.

ABSTRACT

Ocean thermal gradient is based on exploitation of the temperature difference between surface and deep waters, for this reason the equatorial and subtropical regions are the most appropriate for the use of this type of energy. An OTEC plant uses this temperature difference (which preferably should not be less than 20 °C) to transform heat into electricity. They have experimented with prototypes for decades being Cuba and the United States (Hawaii) pioneers in the operation and more recently Japan, India and South Korea. Mexico begins incipiently to explore the use of OTEC plants because has oceanographic conditions ideal so in this paper we analyze theoretically the possible physicochemical and biological effects that the operation of the plant can cause. We studied and explained the approximate bathymetry of Puerto Angel to determine the best sites for installation and operation of the plant as well as the representation and analysis of the vertical profiles of temperature, salinity, dissolved oxygen and nutrients of this area comparing with the possible effects in these parameters caused by an OTEC plant. The temperature gain passage through the plant and the density of water discharge were calculated and compared with the normal parameters of the study area in order to determine significant differences and know the possible effect. The results of the physicochemical parameters of the OTEC were compared with the parameters of upwelling of Tehuantepec to determine the biological, paying greater attention in harmful algal phytoplankton (FAN). In the case of temperature, salinity and density, the contrast indicates that any negative involvement is not present. However, for nutrients, there is a noticeable difference in concentration, which is higher when the OTEC plant is in continuous operation, compared to the natural concentrations and concentrations produced by the upwelling of Tehuantepec. In spite of the oceanographic dynamics of the area, the rate of dilution of nutrients and other (reactions between elements, nutrient consumption rate and environmental factors) could don't have a significant effect on the phytoplankton organisms in the area. With this we conclude that there may be not a significant effect on a large scale in the study area, recommending further measures for monitoring and frequent security with which the operation of the plant will be viable.

1. INTRODUCCIÓN.

Los océanos funcionan como grandes colectores solares que recientemente el ser humano ha tenido el interés de estudiar y explotar. Actualmente, se aprovecha la fuerza de las olas (energía undimotriz), los vientos (energía eólica) y la fuerza de las mareas (energía mareomotriz); sin embargo, dentro de este grupo se encuentra la energía térmica oceánica con importantes gradientes, por medio del cual se puede extraer la energía existente entre las aguas superficiales cálidas y las aguas profundas frías (Avery y Wu, 1994).

Para el mejor aprovechamiento del gradiente térmico en el mar se requiere que tal diferencia sea del orden de 20°C o mayor -preferentemente- (Avery y Wu, 1994; Vega, 2007; Kim *et al.* 2013). Por este motivo las regiones ecuatoriales y subtropicales son las zonas más adecuadas para el aprovechamiento de este tipo de energía. Por ejemplo, la parte occidental y una porción de la zona oriental del Océano Pacífico (donde se encuentran las diferencias térmicas más grandes, incluido el litoral mexicano), regiones del este y oeste de Centroamérica y algunas áreas alejadas de la costa sur de los Estados Unidos y el oriente de la Florida (Fernández-Diez, 2007).

Sin embargo, no todas estas regiones son factibles para la utilización del gradiente térmico oceánico desde el punto de vista económico y técnico debido a la distancia existente entre la línea de costa y la profundidad a la que se puede obtener el gradiente mínimo pues si esta es mayor a 10 km ocurrirá una pérdida muy grande de energía eléctrica durante su transporte a la zona poblada (Avery y Wu, 1994).

Por otro lado, con los avances tecnológicos en algunos componentes, como lo son los intercambiadores de calor, los condensadores y los evaporadores (de fabricación japonesa en la mayoría) se ha logrado obtener energía eléctrica con un gradiente menor a 20°C (18°C en las regiones de Okinawa, Japón y Goseong, Corea del Sur) teniendo una eficiencia térmica importante (Kim *et al.* 2013).

Si se compara la energía térmica oceánica con el resto de las demás fuentes renovables, su investigación y proyectos todavía se encuentran en una fase preliminar, pero su potencial es muy alto. Un dato a tener en cuenta es que en un año, la energía solar absorbida por los océanos es de unas 4 mil veces la energía que actualmente consume la humanidad. Esto ha permitido a los investigadores en energías alternas la posibilidad de obtener dividendos importantes en ese rubro a partir de una técnica llamada OTEC (conversión de la energía térmica oceánica por sus siglas en inglés) (Beck, 1975).

Un motor térmico proporciona una mayor eficiencia y potencia cuando trabaja con una gran diferencia de temperatura, por lo que la planta OTEC tiene el potencial para ofrecer cantidades globales de energía que son de 10 a 100 veces mayores que otras opciones de energía del océano, tales como energía del oleaje y la energía de mareas. Las plantas OTEC pueden funcionar de forma continua, proporcionando un suministro de carga base para un sistema de generación de energía eléctrica (Berger y Berger, 1986).

El principal reto técnico de la OTEC es el de generar cantidades significativas de energía de manera eficiente a partir de pequeñas diferencias de temperatura por lo que todavía se considera una tecnología emergente. Los primeros sistemas OTEC tuvieron una eficiencia térmica de 1 a 3%, muy por debajo del máximo teórico para esta diferencia de temperatura (entre el 6 y el 8%) por lo que con los diseños actuales se espera que estén más cerca del máximo termodinámico posible. Los diseños modernos permiten un rendimiento que permite acercarse a la máxima eficiencia de Carnot (teórico) (Avery y Wu, 1994). Para el caso de las aguas del Pacífico Tropical Mexicano, el valor de eficiencia térmica ronda entre el 7.6 y el 8.2%, dependiendo la estacionalidad, el área geográfica y la profundidad en la que se realice el bombeo de agua fría.

El ciclo de calor termodinámico que se utiliza más comúnmente para el sistema OTEC es el ciclo de Rankine (Figura 1) con una turbina de baja presión. Los sistemas pueden ser de ciclo cerrado o de ciclo abierto. Para el ciclo cerrado, los motores utilizan fluidos de trabajo que suelen ser refrigerantes como el amoníaco, freón, propano, óxido de etileno y el R-134a, entre otros (Fernández-Diez, 2007). Para el ciclo abierto, los motores utilizan el vapor de la propia agua de mar como fluido de trabajo. También existen ciclos híbridos que utilizan algunos aspectos importantes de ambos ciclos, sin embargo se siguen haciendo investigaciones al respecto para poder reducir los costos ya que este es el aspecto más importante para la posible construcción de una planta OTEC. Por el momento, el uso del ciclo cerrado es la mejor opción para un proyecto de este tipo por su mayor eficiencia y bajo costo (Avery y Wu, 1994; Vega, 2007; Kim *et al.*, 2013).

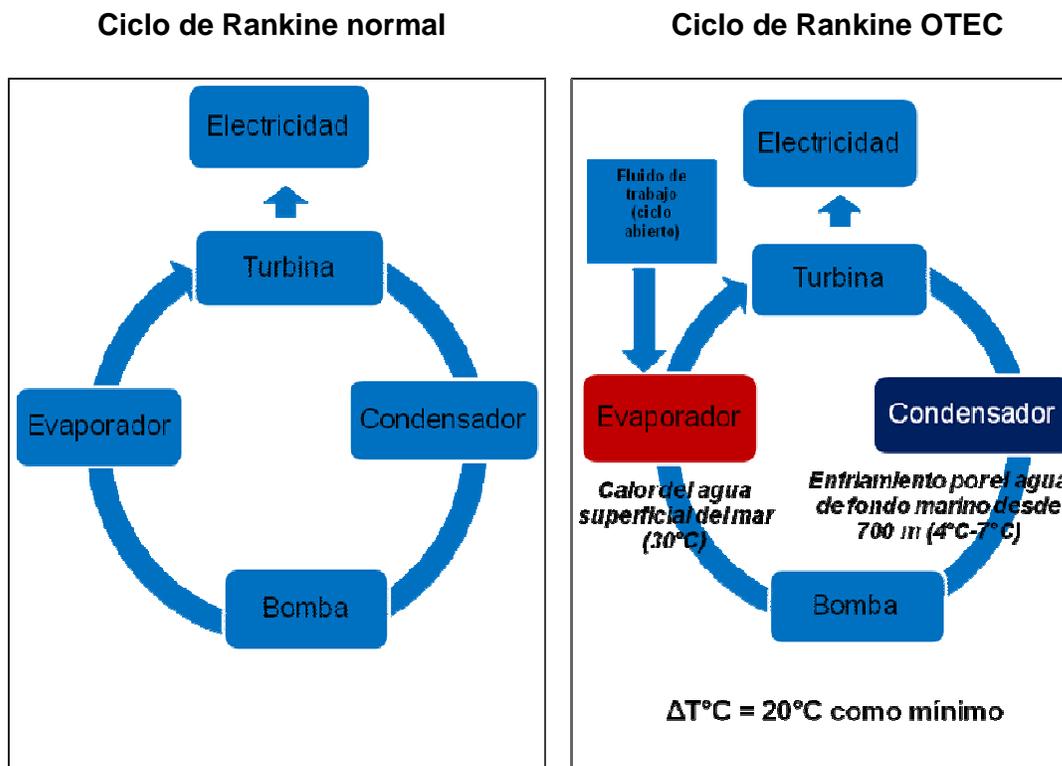


Figura 1. Ciclo de Rankine en la planta OTEC.

La OTEC también puede suministrar agua fría como un subproducto el cual puede ser empleado para la obtención de aire acondicionado y sistemas de refrigeración; el agua enriquecida (con nutrientes fundamentales como nitratos, fosfatos y otros) del océano profundo puede alimentar tecnologías biológicas (p. ej. agricultura de agua dulce, piscicultura) así como obtención de agua dulce destilada del mar a partir de la condensación del vapor de agua utilizado en el ciclo abierto, obteniéndose agua potable. También es posible obtener combustibles secundarios como el metanol, a partir de la utilización del dióxido de carbono (CO₂) que se desprende del bombeo de agua profunda y superficial utilizada en el proceso de obtención de energía eléctrica (Avery y Wu, 1994; Vega, 2007). Actualmente también se fabrican productos comestibles y cosméticos además de extracción de sal para cocina y fertilizantes (Kim *et al.*, 2013; folleto de la planta OTEC, 2015).

Existen diferentes tipos de plantas OTEC que se pueden construir, el cual dependerá de la zona geográfica, la distancia entre la línea de costa y la zona de mayor profundidad (batimetría), las condiciones climatológicas y oceanográficas. Entre los diversos tipos se encuentran: las de tipo flotante, la mini planta en barco oceanográfico, la de torre en la zona litoral y la de plataforma cuando la distancia entre la zona costera y la de profundidad máxima no excede los 10 kilómetros (Castellano, 1981; Vega, 2007).

2. ANTECEDENTES.

2.1. Antecedentes mundiales.

2.1.1. Desarrollo tecnológico y metodológico.

No obstante que los sistemas de OTEC están tecnológicamente en etapa de desarrollo, el concepto tiene una larga historia. Se han desarrollado diferentes tentativas con el fin de refinar este concepto que comenzó a permear durante la década de 1880.

Jacques Arsene d'Arsonval (1881), un físico francés, propuso la primera teoría conceptual acerca de la energía termal del océano, pero nunca pudo desarrollar en la práctica, en virtud que la tecnología con la que se contaba entonces era demasiado limitada para hacer experimentación.

George Claude (1926), estudiante de d'Arsonval, presentó ante la Academia de Ciencias de París un modelo a escala que demostraba la posibilidad de aprovechar prácticamente esta energía. El agua superficial se introducía continuamente en un estanque cerrado en el que se había generado un efecto de vacío suficiente para llevar el agua a la ebullición; el vapor inducido condensaba cuando entraba en contacto con la pared refrigerada con el agua de las profundidades y aspirada mediante una conducción. La corriente de vapor movía una turbina conectada a un generador el cual producía energía eléctrica.

El mismo Claude (1928) dirigió un experimento con aparatos de dimensiones reales realizado en Ougrée, Bélgica, donde el agua caliente la obtuvo de la descarga de hornos industriales y el agua fría de un lago cercano (Figura 2). El resultado (60 kW de energía eléctrica) le permitió perfeccionar aún más el diseño de ingeniería requerido y de esta manera, experimentar finalmente en el océano.



Figura 2. Ubicación de Ougrée, Bélgica; lugar donde Georges Claude realizó la primera prueba de gradiente térmico para generación de energía eléctrica en 1928 (Tomado de Belgicko Ltd., 2008).

En 1930, Claude finalmente construyó la primera planta OTEC en Bahía Matanzas, Cuba (Figura 3).

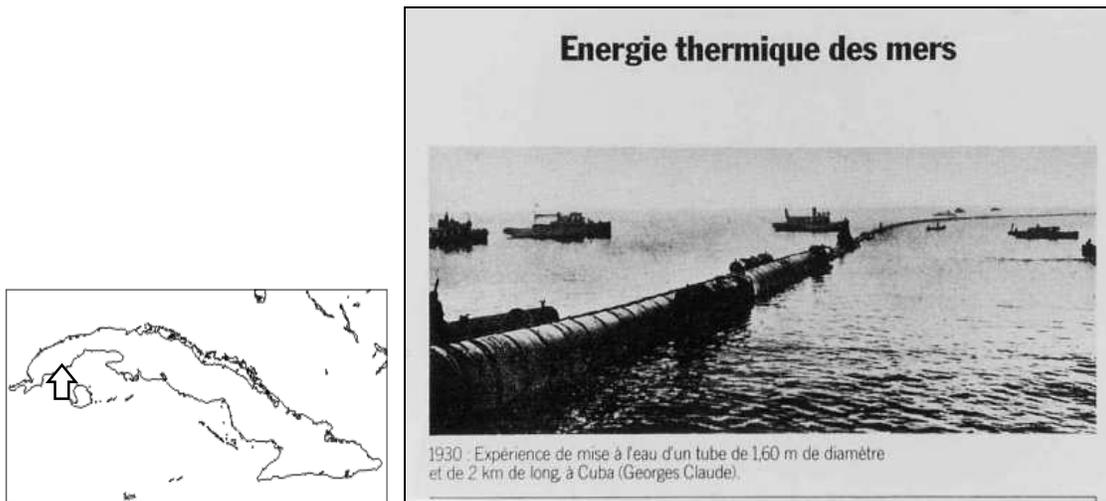


Figura 3. Tubería que se utilizó en la operación de la planta de gradiente térmico en Bahía de Matanzas, Cuba (Claude, 1930).

La planta fue capaz de producir 22 KW de electricidad (suficiente para alumbrar 200 lámparas), pero el mal tiempo destruyó la planta antes de que pudiera convertirse en un generador de potencia neta, lo que significa que podría producir más energía de la que estaba obligada a ejecutar la planta. Claude entonces propuso construir una central comercial en Santiago de Cuba para generar 25 MW netos, a un costo estimado de entre US\$3 y 4 millones de dólares, pero la crisis económica que aún imperaba por la gran depresión de 1929 le impidió obtener financiamiento de los inversionistas norteamericanos presentes en la demostración experimental de Matanzas. Actualmente en la zona sólo se encuentran las pozas de extracción de agua superficial y profunda y vestigios de la antigua tubería utilizada (Figura 4).



Figura 4. Restos de la antigua planta OTEC de Bahía Matanzas, Cuba (fotos del autor, 2012).

Nikola Tesla (1931) abordó conceptualmente lo que denominó “la energía motora del futuro” que involucraba un sistema de conversión termal de la energía del océano, sin embargo, al final tuvo que desistir debido a que la escala de la ingeniería que requería para el proyecto se le hizo impráctico para un desarrollo a gran escala debido al alto costo económico y energético involucrados.

Claude (1935) construyó una nueva planta (usando sus fondos personales), esta vez a bordo del buque *Tunisie* que contaba con un recipiente colector de agua de 10,000 toneladas de peso y que ancló cerca de la costa de Brasil con el objetivo de la producción y venta de hielo. Las condiciones climáticas, el mal tiempo y las olas destruyeron la tubería del agua fría y se vio obligado a retirarse por falta de financiamiento (Figura 5).

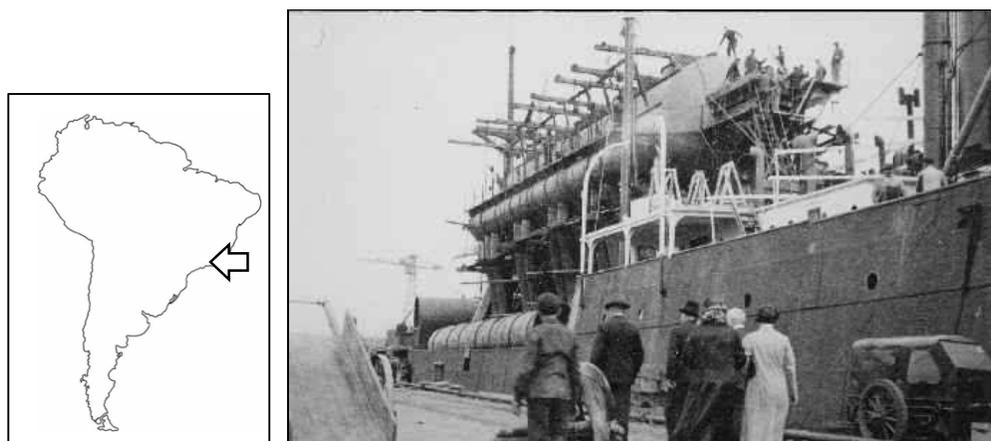


Figura 5. Buque “Tunisie” en Río de Janeiro (Claude, 1935).

El gobierno de Francia de Vichy (1941) (Martí *et al.* 2008) (ocupada por los nazis) desarrolló, con el consejo de Claude, la sociedad semi-oficial “Energie de Mers” para investigar y construir plantas OTEC. Su involucramiento en estos trabajos, llevó a Claude a ser acusado de colaboracionista al finalizar la guerra, lo cual le valió la expulsión de la Academia Francesa de Ciencias y una condena de reclusión perpetua, de la que fue indultado en 1950. Claude murió en el ostracismo, aunque su trabajo técnico es respetado.

En 1956, varios científicos franceses de esta misma sociedad diseñaron una planta OTEC de 3 MW para la zona de Abidjan, Costa de Marfil en África. La planta finalmente nunca pudo ser terminada porque los grandes volúmenes de aceite que requería la misma hacían incosteable su funcionamiento por lo que se abandonó el proyecto.

El ingeniero noruego Bryn Beors (1958) (Martí *et al.* 2008), que conocía de los trabajos franceses, emigró a Estados Unidos y junto con el profesor Everett Howe fundaron el Laboratorio de Conversión de Agua de Mar (Sea Water Conversion Laboratory) en la Universidad de California en Berkeley. Aunque obtuvieron fondos para investigación, particularmente sobre desalinización de agua de mar, no tuvieron éxito en construir una planta comercial OTEC, aunque el laboratorio se convirtió en uno de los principales centros de investigación sobre desalinización de agua.

J. Hilbert Anderson y James H. Anderson Jr. (1962) comenzaron a diseñar un nuevo prototipo para lograr lo que no pudo obtener Claude; de esta manera se centraron en fabricar nuevos diseños más eficientes de todos los componentes principales. Después de trabajar con algunos de los problemas de diseño de Claude patentaron su nuevo modelo llamado “diseño del ciclo cerrado” (Anderson, 1982).

A partir del aumento en los precios del petróleo por parte de la OPEP (Organización de Países Exportadores de Petróleo) y el conflicto árabe-israelí, los Estados Unidos volvieron a trabajar en este nuevo método de energía renovable hasta 1974, cuando se creó el Laboratorio de Energía Natural de Hawaii (NELHA) además de contar con el apoyo de empresas como APL, General Electric y Westinghouse. Dicho laboratorio fue establecido en el punto de Keahole en la costa de Kono en Hawaii.

En 1979, un consorcio de empresas privadas construyó en Hawaii la planta “Mini-OTEC”, a bordo de una barcaza militar habilitada para este fin, que generó finalmente 50 kW de energía eléctrica (Vega, 2007; Martí *et al.* 2008). Las empresas norteamericanas reclamaron en su momento que esta era la primera vez que un sistema OTEC produjo energía neta. Sin embargo, Claude reportó a diversas sociedades científicas en Francia y Cuba que tanto la planta de Ougrée en Bélgica como la de Matanzas en Cuba produjeron electricidad neta comprobada.

En 1980, el DOE (Departamento de Energía de los Estados Unidos) construyó la planta OTEC-1, de ciclo cerrado, a bordo de un buque tanque convertido (Martí *et al.* 2008). La misma sirvió de plataforma de pruebas para intercambiadores de calor de ciclo cerrado demostrando que los sistemas OTEC podían trabajar desde barcos en movimiento, y poniendo de manifiesto la viabilidad de los diseños para tuberías suspendidas de agua fría.

El Laboratorio de Energía Natural del estado de Hawaii, realizó diversos experimentos con tecnologías OTEC entre 1982 y 1999 bajo la dirección del Dr. Luis A. Vega. El proyecto culminó con la construcción y operación de una planta de ciclo abierto de 210 KW de capacidad bruta, la cual fue usada para diversos experimentos, hasta que fue demolida en 1999 porque el programa de investigación terminó (Martí *et al.* 2008).

Actualmente, la planta Hawaii-1 tiene una de las mejores instalaciones del mundo para el uso de la tecnología. Hawaii, se dice a menudo, es la mejor localización dentro de los Estados Unidos para una planta OTEC debido al agua superficial cálida, la accesibilidad a las aguas frías profundas y porque Hawaii tiene los costos más altos de electricidad.

La planta no está operando actualmente para la generación de energía eléctrica pero están llevando a cabo otras funciones secundarias como la agricultura de agua fría (ColdAg), la producción de agua potable, la generación de aire acondicionado para edificios costeros, la producción de organismos acuícolas, entre otros. Este desarrollo fue impulsado por los trabajos del oceanógrafo y mariner norteamericano John Piña Craven (1982-1999), quien obtuvo ganancias económicas debido a los diferentes productos que elaboró y mejoró con el paso de los años hasta su muerte.

Aunque Japón no tiene ningún sitio costero de importancia con el potencial OTEC, ha contribuido de manera importante al desarrollo de la tecnología, sobre todo para la exportación a otros países. Al comienzo de la década de 1970, la compañía de energía eléctrica de Tokio y la empresa Toshiba construyeron una planta OTEC con éxito en 1976, desplegando unos 100 kW a partir del sistema de ciclo cerrado en la isla de Nauru, en la Polinesia francesa.

La planta, que operó hasta el 14 de octubre de 1982, produjo cerca de 100 kW de electricidad; 90 kW fueron utilizados en el accionar de la planta y la electricidad restante fue utilizada para el accionar de una escuela y otros lugares en Nauru. Este sistema es una contribución tecnológica al mundo para la generación de energía de un sistema de OTEC donde la electricidad obtenida se utilizó para consumo humano; desafortunadamente la planta ha sido destruida por el paso del tiempo, pues nunca más se le dio mantenimiento.

En 1981, el doctor e ingeniero ruso Alexander Kalina desarrolló un nuevo ciclo para la operación de una planta OTEC denominada “ciclo Kalina” el cual utiliza una mezcla de amoníaco y agua para producir electricidad. Esta nueva mezcla de agua y amoníaco mejoró en gran medida la eficiencia de la potencia tanto del ciclo como de la generación final de energía eléctrica.

En 1994, la Universidad de Saga diseñó y construyó una planta de 4.5 kW con el propósito de poner a prueba un ciclo nuevo y recién inventado, conocido como “ciclo Uehara” debido al nombre de su inventor, el doctor Haruo Uehara. Este ciclo incluye los procesos de absorción y extracción que permiten que este sistema pueda superar el ciclo Kalina en un 1-2%. En la actualidad, el Instituto de Energía Oceánica de la Universidad de Saga es el líder en la investigación de la planta de energía OTEC y también se centra en muchos beneficios secundarios de la tecnología.

La India pilotó tres plantas flotantes OTEC de ciclo abierto de 1 MW cerca de la costa de Tamil Nadu durante los años 2011-2012, con el propósito principal de obtener agua potable, utilizando tubería de PVC reforzada con acero inoxidable y otros materiales importados de Japón y con asesoría de ingeniería hidráulica del gobierno británico; sin embargo en 2013 un tifón destruyó las instalaciones lo que hizo que el gobierno hindú dejará de patrocinar esta metodología (Kim, 2014).

2.1.2. Proyectos actuales.

Dentro de los proyectos que están en estudio y/o aceptado están los siguientes (Figura 10):

Puerto Rico en Punta Tuna, a 3 kilómetros aproximadamente de la costa de Maunabo (auspiciada por el gobierno norteamericano a través de la Secretaría de Marina) que se creía, pudiera generar unos 75 MW de electricidad a inicios del 2015. Sin embargo, el proyecto ha sido suspendido debido a falta de fondos por parte del gobierno puertorriqueño y el nulo compromiso por parte del Congreso de Estados Unidos para su realización.

En zonas del África Ecuatorial (donde se involucran los gobiernos de Alemania y Holanda) existe también la posibilidad de construir algunas plantas flotantes OTEC,

sobre todo, en las costas de Santo Tomé y Príncipe en el Golfo de Guinea y las costas de la República Democrática del Congo y la República del Congo. Éstas siguen en situación de investigación y su posible apertura se dice que podría ser para el año 2017. Existen estudios de proyección para construir plantas OTEC en Tanzania y Mozambique con ayuda de los gobiernos de Portugal, Reino Unido, Suecia, Estados Unidos, Alemania y Holanda para el año 2018 y 2019 (OTEC News Africa, 2013).

En Curaçao (Antillas Menores) se piensa instalar un ecoparque industrial cerca del aeropuerto Holding en Kòrsou; donde se utilizará esta metodología no sólo para generación de energía eléctrica, sino que combinará la utilización de la temperatura del agua profunda para la generación de aire acondicionado y producción de agua potable, proyecto que piensa terminarse en 2018 (OTEC News, 2013).

En el atolón polinesio de Tetiaora (propiedad del actor norteamericano Marlon Brando); se planea la construcción de un complejo turístico ecológico donde se implementaría una planta OTEC tipo flotante de hasta 1.5 MW de energía eléctrica y utilizar la metodología para producción de agua potable, maricultura y producción de aire acondicionado. Asimismo, en el atolón de Bora-Bora se piensa colocar un complejo ecoturístico donde se piensa emplear una planta OTEC de 2 MW (OTEC News, 2013).

También se tiene contemplada la construcción de una planta OTEC en la isla de Madagascar en la región conocida como Le Port y su operación comenzaría en el año 2017 con una producción de energía eléctrica inicial de 1.5 MW (OTEC News, 2013).

En Japón (en la isla Kumejima de la prefectura de Okinawa), 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). Trabaja por medio del ciclo Uehara y sólo opera en el verano pues opera con un gradiente máximo de 18°C y es una planta de tipo *on-shore* (en tierra firme) (Figura 6).



Figura 6. Ubicación de la planta OTEC de Okinawa, Japón (OTEC-Okinawa, 2014).

Corea del Sur proyectó una planta OTEC *on-shore* en la región de Goseong, la cual entró en funciones el 18 de noviembre de 2013, produciendo al inicio un total neto de 20 kW de energía eléctrica y al final del año 2018 tendrá una capacidad de generación de 100 MW. Debido a que funciona con un gradiente final de 18°C, sólo opera en el verano (OTEC News, 2013) (Figura 7).

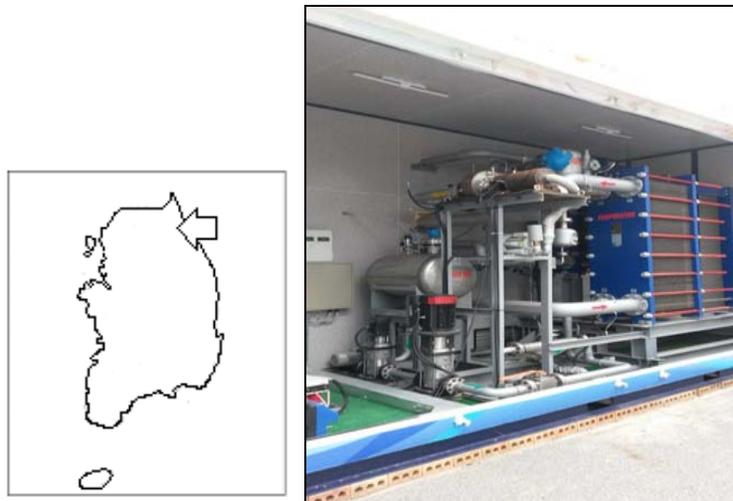


Figura 7. Ubicación de la planta OTEC on-shore de Goseong, Corea del Sur (foto del autor).

Por otro lado, el desarrollo de esta tecnología ha propiciado la investigación en otros rubros como la agricultura de 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; debido a esto se ha desarrollado un complejo industrial conocido como SUPRC (Seawater Utilization Plant Research Center of Korea) en la zona que ha venido a impulsar el desarrollo social de la población (Kim, 2014) (Figura 8).



Figura 8. Productos y beneficios del agua profunda manejada en la planta OTEC onshore de Goseong, Corea del Sur (fotos del autor, 2014) 8a) Producción de agua potable, 8b) Cosméticos, vinos y agua potable, 8c) Agricultura de agua fría con chile rojo y calabazas, 8d) Acuicultura de pepinos de mar, 8e) Producción de sal para cocina, 8f) Acuicultura de mejillones.

Makai Ocean Engineering, Inc. con sede en Kailua-Kona (Hawaii, Estados Unidos) diseñó e instaló una turbina-generator para la producción de 100 kW netos de energía eléctrica en la planta OTEC *on-shore* de ciclo cerrado construida en la misma zona donde operó la OTEC-I en 1979, conocida actualmente como Hawaii OTEC-II. 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. La inversión total fue de USD \$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 hawaianos con un costo de 19 centavos de dólar por kWh (Figura 9).

Un proyecto futuro, en colaboración con ingenieros de la planta OTEC de Okinawa, Japón es la construcción de una planta OTEC *off-shore* que genere 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 de 18 m y descargando agua a 100 m con una temperatura de 16°C. La planta podría comenzar operaciones en el año 2020, dos años después de que Corea del Sur habría logrado los 100 MW en la planta de Goseong.

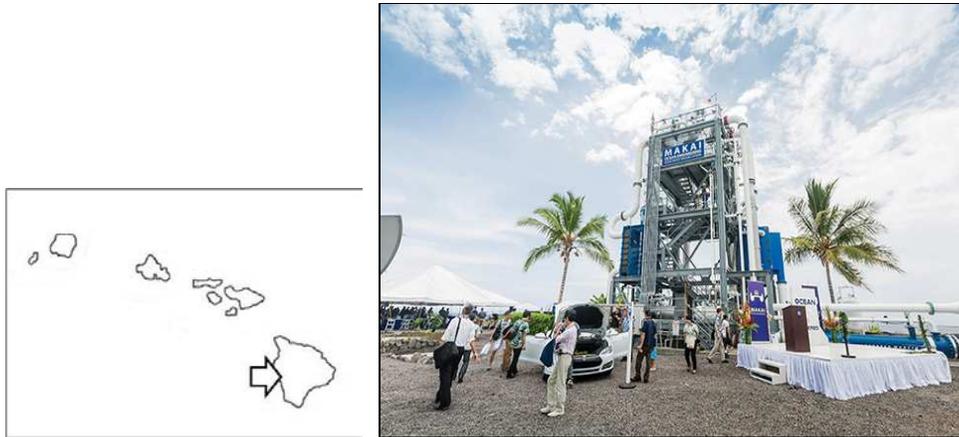


Figura 9. Ubicación de la planta on-shore OTEC Hawaii-II de 100 kW de generación (Power Journal, 2015).

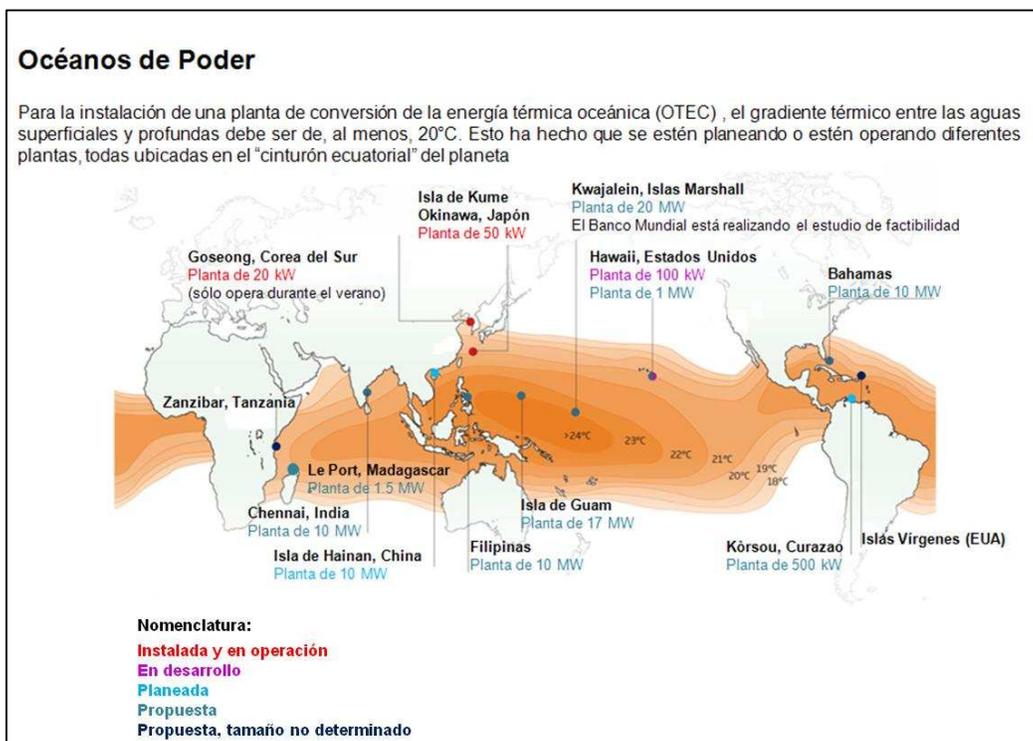


Figura 10. Proyectos de construcción y operación de plantas de gradiente térmico en el mundo (modificado del Departamento de Energía de Estados Unidos, 2014).

2.2. Antecedentes nacionales.

En México existen algunos antecedentes para la aplicación de esta forma de energía renovable, pero que no se llegaron a retomar de manera oficial; sin embargo, el país presenta características específicas de gradiente térmico en la zona del Pacífico Tropical mexicano (en la zona denominada "Alberca Cálida del Pacífico"), la zona

suroeste de la península de Baja California (Los Cabos) y el Mar Caribe para el posible involucramiento de esta nueva tecnología en el país (Figura 11).

Vázquez de la Cerda (1960), mencionó la posibilidad de utilizar este método de generación de energía pero para la obtención de aire acondicionado para los habitantes de Cozumel además de un proyecto alternativo para el archipiélago de las Revillagigedo, mientras que Löhnberg (1961) aconsejó de manera importante la utilización de esta técnica para obtener energía eléctrica, además de ser el primer trabajo publicado que ya consideraba las áreas oceanográficas más importantes del país para la construcción de una planta de gradiente térmico y las ventajas y desventajas del mismo (Figura 10).

Aviña-Jiménez (2007) realizó un estudio de factibilidad para la instalación de una planta OTEC en las costas mexicanas, concluyendo que dicha factibilidad va de la mano con los beneficios extra que se pueden producir del agua fría que se extrae de las profundidades y que este proceso será rentable ante el aumento del precio de los hidrocarburos y la falta de mayor cantidad de agua dulce.

Bárceñas-Graniel (2014) realizó un estudio en el que mostraba las posibles zonas del Caribe mexicano para la aplicación de energías marinas, considerando la zona de la isla de Cozumel, Quintana Roo como una de las más óptimas para instalar y operar una planta OTEC por sus condiciones batimétricas.

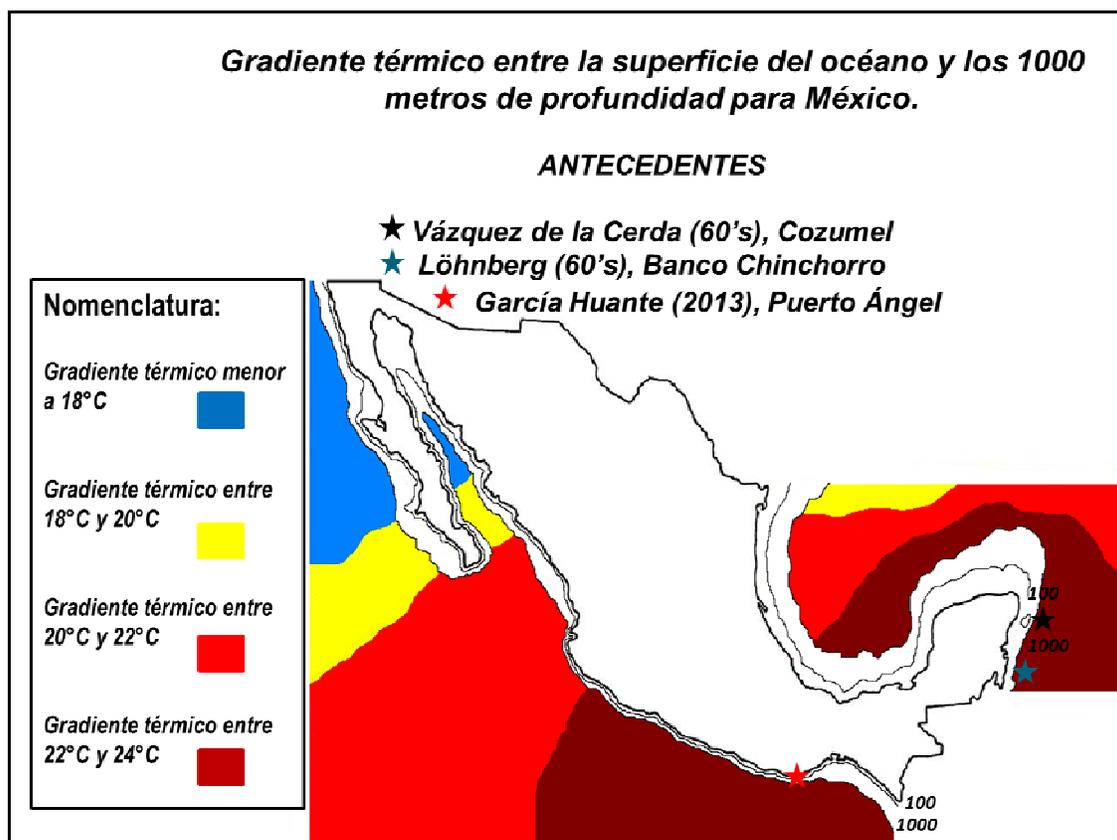


Figura 11. Antecedentes nacionales de propuesta para la instalación de una planta OTEC y gradiente térmico oceánico de México.

2.3. Impactos ambientales mundiales.

Green y Guenther (1990) determinaron el impacto de diferentes ciclos para una planta OTEC en la concentración de dióxido de carbono total (TCO₂) en comparación con otro tipo de industrias. Concluyen que el ciclo cerrado generaría menos de 1 g de CO₂ por kWh generado por la planta, mientras que el ciclo abierto generaría 32 g de CO₂ por kWh de energía eléctrica, valores bajos en comparación con las otras fuentes de energía basadas en combustibles a base de hidrocarburos.

Vega, L. en conjunto con la empresa Lockheed Martin Maritime Systems y Sensors (2009) modelaron el comportamiento del agua de descarga de manera preliminar en tres sitios distintos (Kahe, Hawaii; la isla de Guam en Oceanía y la isla Diego García en el Océano Índico) utilizando el software de programación CORMIX. Concluyeron que, para una planta de 10 MW en cualquiera de los tres ambientes se deben de tomar en cuenta la profundidad de la zona de descarga óptima y la configuración de la misma.

La National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) en colaboración con la Universidad de New Hampshire (New Hampshire University, 2010) determinaron los posibles impactos de la planta OTEC en las aguas hawaianas. Los resultados muestran que es probable que se presenten impactos biológicos en la oceanografía física y química durante la instalación y operación de una planta de OTEC en aguas hawaianas. Sin embargo, debido a la falta de datos de campo apropiados, la magnitud y el alcance de estos impactos no se conocen; además de que se requiere mínimo de un año de datos antes de la construcción y la instalación.

Comfort y Vega (2011) determinaron los datos necesarios para estudiar los posibles impactos de una planta OTEC en Hawaii. Concluyen que se requieren de un máximo de un año de monitoreo total de diferentes datos oceanográficos (centrándose primordialmente en aquellos que no han sido muy bien estudiados) para intentar estudiar el impacto del gradiente térmico en una zona determinada, en este caso, las islas hawaianas.

Rajagopalan y Nihous (2012) de la Universidad de Hawaii determinaron la aplicación sustentable de la OTEC para obtener diversos recursos a partir del gradiente térmico global usando el método numérico MIT-GCM. Determinaron que un total de 14 TW se pueden obtener de todo el océano además de que la máxima potencia de la planta es inversamente proporcional al área de aplicación y, finalmente, los posibles efectos ambientales radicarían en los cambios de temperatura tanto en la superficie como en diferentes capas de la columna de agua.

Rocheleau y Grandelli (2013) realizaron una simulación de la biopluma de una planta OTEC de 100 MW. Concluyen que, aunque habría un ligero aumento en la población del nano y fitoplancton, este no sería peligroso puesto que con un buen diseño en la instalación y la operación, tales crecimientos serían de tipo natural aunado al hecho de que las concentraciones de nutrientes en la zona son muy irregulares y muy dinámicas por la oceanografía en la zona de Makai, Hawaii.

Kelley y Berg (2013) estudiaron el posible impacto ambiental de la tubería para aire acondicionado a lo largo de la zona profunda de Honolulu, Hawaii; con especial

interés en la zona bentónica. Determinaron que los organismos que más se verían impactados por este tipo de obras de ingeniería serían las esponjas y algunas especies de equinodermos por lo que el siguiente paso sería el mejoramiento en las instalaciones para aminorar el impacto.

Comfort *et al.*, (2013) observaron los posibles cambios oceánicos debido a la operación del primer sistema de aire acondicionado utilizado en Hawaii, señalando que los resultados y las conclusiones finales se darían a conocer después de dos años de operación de la planta.

Karl *et al.* (2013) analizaron las posibles consecuencias de un efecto de surgencia artificial generado por una planta OTEC en el ambiente oceánico en Hawaii. Establecieron que se produciría un posible “florecimiento” de organismos fitoplanctónicos se produciría si hubiera un aumento importante de fósforo o nitrógeno en la zona superficial por lo que se está desarrollando un método (MAGIC) para remover cantidades extras de nutrientes de la capa superficial.

La Organización Marítima Internacional (OMI, 2013), realizó una convención en Londres, Inglaterra para determinar las acciones que regulen cualquier actividad de ingeniería que genere fertilización oceánica y estudió la posibilidad de prohibirlas de manera definitiva. Al final de la reunión, se estableció que la utilización del gradiente térmico oceánico no puede ser limitada debido a que sólo genera material de origen orgánico en forma natural.

Kim y Kim (2014) estudiaron el efecto del efluente térmico en las aguas de la zona costera de Kosrae, Micronesia. Buscaron mejorar la comprensión de las características de los flujos en las aguas costeras de la zona y observaron el posible efecto de la circulación global (HYCOM) y el modelo de la biopluma (EFDC Explorer o CFD). Al final, concluyen que el impacto de una planta OTEC dependerá del tamaño, la ubicación y el diseño.

2.4. Impactos ambientales nacionales.

En México no se tienen reportados ningún tipo de impacto de este tipo puesto que nunca se ha instalado una planta de gradiente térmico. Sin embargo, existe una legislación ambiental que puede controlar las operaciones de una planta OTEC en las áreas marítimas nacionales basado en el Convenio de Londres de la Organización Marítima Internacional que entró en vigor en marzo de 2006 y que México ratificó en 2013. Dentro de los lineamientos importantes están el monitorizar la descarga de agua de la planta continuamente y revisar los parámetros fisicoquímicos diariamente con el fin de detectar posibles anomalías debidas al funcionamiento de la OTEC.

Debido a esto, el presente trabajo es el primero en el país que estudiará los posibles impactos que se pueden generar por la operación de una planta OTEC en un punto del mar territorial mexicano (Puerto Ángel, Oaxaca).

2.5. Beneficios secundarios.

Las plantas OTEC usan fuentes naturales de energía, que son abundantes, limpias y renovables. El agua caliente de las superficies y el agua fría de las profundidades de los océanos reemplazan a los combustibles fósiles para generar electricidad.

Una de las innovaciones y de las ventajas principales en la generación de energía de OTEC es la obtención de subproductos secundarios que mejoran perceptiblemente la viabilidad económica de este sistema bajo condiciones financieras favorables. Los beneficios potenciales para las comunidades tropicales que se podrían aprovechar de la planta OTEC son: energía limpia, agua dulce limpia, aire acondicionado (SWAT), acuicultura, agricultura (ColdAg), producción de hidrógeno las cuales se pueden integrar usando tecnologías ya probadas (Aviña-Jiménez, 2007; Kim *et al.*, 2013). A continuación, se detallan algunos de estos beneficios.

2.5.1. Producción de agua potable.

La co-producción de cantidades grandes de agua dulce es una de las ventajas principales del proceso de OTEC. Hasta 2.6 millones de litros diarios de agua dulce (dotación suficiente para una población de 17 mil habitantes) se pueden producir por MW de capacidad bruta instalada de energía eléctrica (Aviña-Jiménez, 2007). El agua dulce es el resultado de la evaporación del agua superficial marina usada como fluido de trabajo (ciclo abierto). La evaporación ocurre porque el agua marina superficial se expone a un proceso de vacío parcial que disminuye su punto de ebullición a 23°C aproximadamente, obteniendo vapor de baja presión (Kim *et al.*, 2013).

En el ciclo abierto, este vapor se pasa a través de una turbina de baja presión (que acciona un generador para producir electricidad) y después el agua dulce líquida es condensada al transferir calor al agua de mar fría a través de un intercambiador de calor y finalmente se bombea para su mejor aprovechamiento (Aviña-Jiménez, 2007; Kim *et al.*, 2013).

2.5.2. Aire acondicionado (proceso SWAC).

El agua de mar fría obtenida de la profundidad puede proporcionar un gran caudal que permita su utilización para generar aire acondicionado, incluso después de que haya pasado a través de la planta OTEC.

Como regla general, se puede mencionar que por cada 10 MW generado de energía bruta en una planta OTEC se pueden producir 5 MW de aire acondicionado extra. En la zona costera se podrían tener las siguientes ventajas:

Para una comunidad que está suficientemente cerca de una fuente del agua de mar, la demanda total de aire acondicionado es grande, el costo total de energía local es alto, la utilización del aire acondicionado es grande (para la mayoría de la gente en las zonas costeras) y la distribución terrestre no es extensa (de fácil acceso a la carga de aire acondicionado). Bajo estas circunstancias y con el desarrollo y operación de la planta los ahorros de energía se han calculado teóricamente en un

90%, siendo la planta de Goseong la que más ha experimentado con este proceso al alcanzar un ahorro de un 45% manteniéndose en estudio (Aviña-Jiménez, 2007; Kim *et al.*, 2013; Kim, 2015 conversación personal).

2.5.3. Acuicultura.

El agua de mar de las profundidades que se extrae de una planta OTEC tiene aplicaciones secundarias muy importantes; para la acuicultura existen tres ventajas principales:

a) Enfriamiento; la baja temperatura constante del mar profundo no sólo permite el cultivo de organismos comerciales de agua fría en zonas tropicales sino que también proporciona (cuando está mezclado con agua superficial o al calentarse con el sol tropical) medios exactos del control de la temperatura, confiable y rentable sobre la gama de temperaturas completas de 6° a 25°C (Aviña-Jiménez, 2007; Kim *et al.*, 2013).

b) Alimento; (rico en nutrimentos) el mar profundo se enriquece con nitrógeno disuelto, fósforo, carbono y otros productos químicos que son esenciales para el crecimiento fitoplanctónico en el océano (Aviña-Jiménez, 2007; Kim *et al.*, 2013), y

c) Puro; debido a que existen organismos de tamaño pequeño en las profundidades del mar, de la cual se bombea el agua, esta presenta muy pocos patógenos o células viables de organismos fotosintéticos. Esto permite el cultivo -libre de enfermedades- de organismos sensibles y la producción de cultivos puros de organismos productores sin interferencia de especies competidoras (Aviña-Jiménez, 2007).

2.5.4. Agricultura de agua fría (ColdAg).

Otra de las aplicaciones es la conocida como “ColdAg” o agricultura de agua dulce; el agua fría se entuba y se desplaza por debajo del suelo cultivable para enfriarlo (de manera indirecta). Este proceso ayuda a que las raíces de las plantas se mantengan frías y genera condensación de la humedad presente cerca del suelo (aproximadamente con 10°C), produciendo temperaturas a nivel de suelo de entre 25 y 30°C. A medida que el agua continúa enfriándose penetra a través del suelo hasta que alcanza el punto más frío de la zona de la raíz. Mientras que el agua emigra a través del suelo, acumula los minerales y los nutrimentos esenciales. Fuera de la superficie de cultivo, el calor del sol (35-38°C en zonas tropicales) calienta la flor y el fruto y el calor se difunde debajo del vástago de la raíz, generando un gradiente térmico que resulta del frío de la raíz con el calor de las hojas.

Este proceso daría como resultado un fruto un tercio más grande en tamaño y un cuarto más dulce en comparación con un fruto cultivado en condiciones normales, además de que se podrían cultivar plantas de zonas templadas y semi-templadas en zonas tropicales. En Hawaii se han cultivado especies vegetales como fresa, uva, zanahoria, cebolla, manzana, durazno, entre otros, de 1993 a la fecha, con la dirección del Dr. John P. Craven en la NELHA (Natural Energy Laboratory of Hawaii Authority) y a la muerte de este, la Dra. Christina Comfort a partir del 2012. En Corea del Sur se experimenta con jitomate, chile rojo y calabaza utilizando agua fría

oceánica diluida (de 1:50 a 1:200 ppm) e invernaderos para aclimatar los cultivos a temperaturas mayores a 30°C en el interior además de la producción de fertilizantes para los mismos cultivos (Kim, 2014).

2.5.5. Producción de hidrógeno.

La energía obtenida en una planta OTEC es suficiente para producir hidrógeno (por medio de electrólisis) y licuarlo. Debido a que la planta trabaja las 24 horas del día durante todo el año, la producción de hidrógeno sería continua (Aviña-Jiménez, 2007).

2.5.6. Otros.

Se han buscado otras aplicaciones para una planta de gradiente térmico oceánico entre las que destacan: producción de hielo, producción de combustibles secundarios (metanol), obtención de minerales (litio, uranio), producción y manufactura de aluminio, producción de amoníaco, producción de sal de cocina, empleo de agua oceánica superficial diluida para lavado y sanitizado de productos alimenticios, etc.

3. HIPÓTESIS.

Se espera que los efectos potenciales de una planta offshore OTEC de 100 MW en la zona de Puerto Ángel sean positivos y que esta tecnología pueda ser implementada bajo los mismos criterios en otras zonas costeras del país.

4. OBJETIVOS.

4.1. Objetivo general.

Analizar de manera teórica el posible efecto oceanográfico teórico del funcionamiento de una planta OTEC offshore de 100 MW en la zona de Puerto Ángel, Oaxaca, México.

4.2. Objetivos específicos.

Obtener datos actualizados y analizar bases de datos históricos de los parámetros fisicoquímicos, tanto del Pacífico Tropical Mexicano como del área de estudio.

Analizar la información disponible y establecer los posibles cambios de los diferentes parámetros fisicoquímicos por la operación de una planta OTEC.

Establecer, a nivel teórico, la eficiencia energética de la planta OTEC para la zona de Puerto Ángel, Oaxaca y determinar la posible viabilidad de una planta offshore para el área de estudio.

Comparar el efecto del funcionamiento de la planta OTEC sobre la zona de estudio con el de la “Surgencia de Tehuantepec” y con los niveles normales en el golfo.

Analizar las velocidades y direcciones geostróficas del Golfo de Tehuantepec con el fin de establecer los patrones de movimiento y direccionalidad del agua de descarga de la planta OTEC.

Calcular las posibles pérdidas de energía cinética del agua de descarga y la velocidad promedio en el tubo de descarga de la planta OTEC de acuerdo con los factores Darcy-Weisbach y Manning.

Estimar la concentración del carbono inorgánico que aportará la planta OTEC a la zona superficial y calcular la huella de carbono para determinar la “eficiencia energética verde”.

Establecer los posibles efectos a nivel biológico del agua de descarga de la planta OTEC, con énfasis en el Fitoplancton Algal Nocivo (FAN) presente en la zona de estudio.

5. ÁREA DE ESTUDIO.

5.1. Golfo de Tehuantepec.

5.1.1. Descripción general.

El istmo y el Golfo de Tehuantepec son dos regiones del país muy interesantes desde los puntos de vista meteorológico, oceanográfico y pesquero. El istmo presenta un ancho de 200 Km entre el Golfo de México y el Golfo de Tehuantepec y se considera una discontinuidad (40 Km) de la cadena montañosa de la Sierra Madre del Sur que va de oeste a este (Monreal y Salas, 1998). Presenta una altitud máxima de 200 m y esta discontinuidad permite el paso de los vientos entre ambos golfos (“nortes”) que es una de las características físicas más importantes que presenta la región y que desencadenará una serie de eventos naturales (los vientos tehuanos) que la hacen muy especial con respecto a otras regiones del país y del mundo (Figura 12).

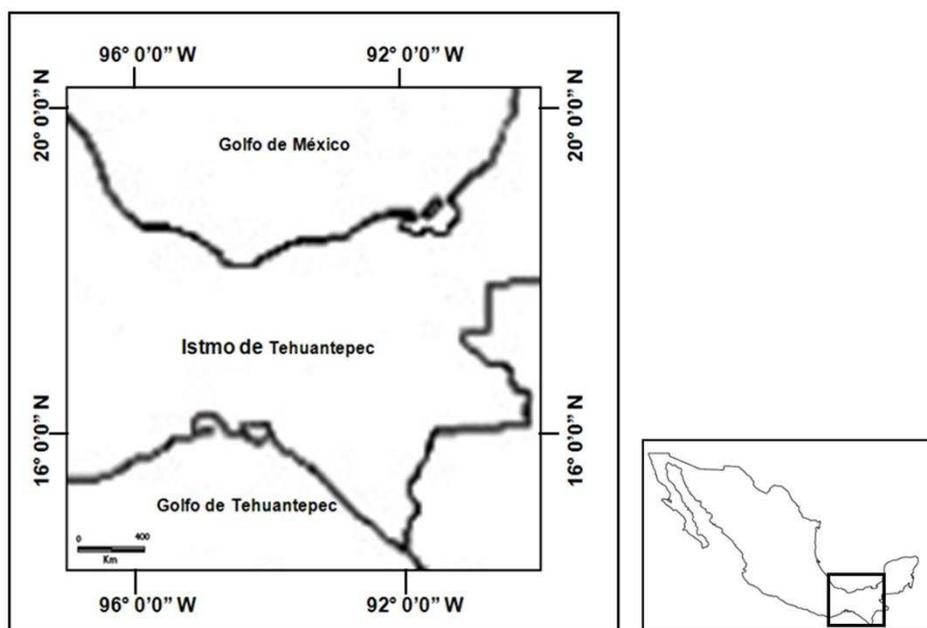


Figura 12. Golfo de Tehuantepec (del autor).

El aire frío proveniente del norte del continente baja y se desplaza hacia el sur, confinándose en la parte más sureña de la bahía de Campeche; en este lugar se reduce el área que circunda al continente por lo que también se reduce el área transversal sobre la cual pasa el viento y al entrar en contacto con una región de menor presión, aumenta considerablemente su velocidad, con lo cual, al cruzar el istmo, sale como un torrente intenso del lado del Golfo de Tehuantepec (llamados vientos “tehuantepecanos” o “tehuanos”).

Esta corriente de chorro induce la formación de una zona de mezcla turbulenta que provoca un área de enfriamiento costero -mal denominado surgencia eólica de acuerdo con Trasviña *et al.* (2002)- que gobierna la circulación y las características

termohalinas del golfo durante el invierno (Cromwell, 1958; Trasviña *et al.* 2002). La plataforma continental en la porción occidental del Golfo de Tehuantepec es muy estrecha (alcanzando una distancia entre la línea de costa y la isolínea del 1000 m de profundidad de 10.49 Km desde la comunidad de Puerto Ángel hasta la zona de Barra de la Cruz en el estado de Oaxaca) y se va haciendo cada vez más extensa conforme se aproxima a la parte oriental (Monreal y Salas, 1998)

A continuación, se describen las características más importantes del Golfo de Tehuantepec.

5.1.2. Aspectos meteorológicos.

De acuerdo con el criterio de Köeppen, modificado por García (1981), el clima de la región es de tipo Aw” que corresponde a un clima cálido subhúmedo, el más seco de los subhúmedos, con régimen de lluvias de verano y presencia de Canícula e Isotherma, con una marcha anual de la temperatura que lo sitúa dentro del tipo Ganges (Secretaría de Marina, 1988). Los giros atmosféricos anticiclónicos de origen polar que se forman en la región de Alaska y el noroeste de Canadá, al viajar hacia el sur se introducen en el Golfo de México produciendo el fenómeno conocido como “nortes”, los cuales son vientos fríos (Lavín *et al.* 1997; Monreal y Salas, 1998). Los anticiclones polares en su viaje hacia el sureste van precedidos por un frente frío atmosférico, el cual representa una zona baroclínica, separando una masa de aire frío de origen polar de otra masa más homogénea y barotrópica de características tropicales (DiMego *et al.* 1976).

El Golfo de Tehuantepec es influenciado por los vientos proveniente del norte, por las tormentas tropicales y por períodos de tiempo mayores de “El Niño” u Oscilación del Sur. Durante el verano uno o más ciclones tropicales de intensidad moderada pasan sobre él (Hurd, 1929; Trasviña *et al.* 2002). En el invierno el golfo responde a la presencia de los “Nortes”, que son vientos intensos procedentes del sur de los Estados Unidos los cuales posteriormente pasan sobre el Golfo de México, cruzan el Istmo de Tehuantepec y afectan más tarde la dinámica del Golfo de Tehuantepec. Por otro lado, durante los años Niño los centros de alta presión atmosférica se desplazan más al sur por lo que se debilita el esfuerzo del viento en la zona (Lavín *et al.* 1997).

Las ondas frías del norte que pasan a través del istmo llegan a una atmósfera más cálida, produciendo “vientos de descenso” de fuerte intensidad, los cuales se conocen como “tehuanos”, “tehuantepequeros” o “tehuantepecanos”. El mecanismo de generación de los tehuanos son los anticiclones polares que se originan en el noroeste de Canadá y que se mueven hacia el sureste, hacia el Golfo de México, llevando delante un frente frío, que frecuentemente toma la forma de una zona baroclínica y no de un verdadero frente (Mosiño-Alemán y García, 1974; Monreal y Salas, 1998; Trasviña *et al.* 2002).

La presión atmosférica sobre el Golfo de México es frecuentemente más alta que del lado del Océano Pacífico, resultando en un gradiente de presión que produce fuertes vientos hacia el sur (Clark, 1988). Por lo tanto, los tehuanos son de mayor intensidad que los nortes que soplan sobre el Golfo de México, la causa es que el fuerte viento al pasar a través de la discontinuidad de la cordillera de la Sierra Madre se

intensifica ya que disminuye el área transversal por la cual atraviesa (Monreal y Salas, 1998).

La intensidad de los tehuanos depende de la altitud del istmo, del espesor del viento frío y el aire caliente desplazado. Estos vientos se dejan sentir a varios cientos de kilómetros hacia el sur. En el Golfo de Tehuantepec la velocidad del viento disminuye lentamente hacia el sur y rápidamente hacia el oriente y occidente. En invierno y en primavera (siendo época de secas), se presentan los nortes, principalmente de octubre a abril, los cuales se manifiestan como vientos fríos en el Golfo de México. Por efecto de los anticiclones, estos vientos se mueven hacia el sur y atraviesan el Istmo de Tehuantepec, al pasar por la discontinuidad de la cordillera de la Sierra Madre del Sur aumentan su velocidad (Monreal y Salas, 1998; Steenburgh, 1998; Romero-Centeno *et al.* 2003).

Dicha discontinuidad tiene un ancho de 40 Km y una altitud de 200 m sobre el nivel del mar, cuando normalmente la altitud promedio de la Sierra Madre es de 2000 m. En la región un frente frío, o norte antecede a los centros de alta presión, los cuales son una importante fuente de precipitación en los trópicos, especialmente cuando son persistentes (Portig, 1965; Hastenrath, 1967; Monreal y Salas, 1998), produciendo aumento en la intensidad del viento y lluvias torrenciales esporádicas.

En general, a lo largo del año sobre el Golfo de Tehuantepec los vientos predominantes vienen del norte, como se mencionó anteriormente esto es más notorio de octubre a abril, su rapidez promedio es de 27 Km hora⁻¹. Sin embargo, también se presentan vientos del este, noreste, noroeste y oeste; esta última dirección con mayor frecuencia en los meses de primavera. El período de junio a agosto, excepto cuando pasan las tormentas tropicales, se caracteriza por vientos suaves con direcciones del norte, noreste y este. Los meses de mayo y septiembre son los meses de mayor variabilidad en los vientos debido a que es el tiempo de cambio entre las épocas de nortes y vientos suaves y viceversa (Blackburn, 1962; Romero-Centeno *et al.* 2003).

Estos vientos son provocados por los anticiclones atmosféricos que son centros de alta presión (alrededor de 1032 mb) que pueden ser de dos tipos: "calientes" o "fríos". Los primeros pueden ser creados por una convergencia de masa de aire, los segundos por enfriamiento mediante radiación local o por advección de aire más frío y denso (Wexler, 1951). El giro anticiclónico polar o frío se origina generalmente al norte de los vientos de deriva del oeste (westerlies) y es de poca altura y rápido desplazamiento. Mientras que el giro anticiclónico caliente se mueve lentamente y se encuentra a niveles más altos, al sur de la banda principal de los vientos de deriva del oeste (Monreal y Salas, 1998).

Ciertos anticiclones intensos combinan el aire superficial frío de un centro de alta presión polar, con el aire de la tropósfera, caliente; durante la transformación de un anticiclónico frío a un sistema caliente (Wexler, 1951; Ramage, 1971). En la anticiclogénesis pueden ocurrir dos casos: en uno de ellos el anticiclón frío se desvanece mientras se mueve hacia el sureste, hacia el Golfo de México, disipándose rápidamente sobre las aguas cálidas de éste, pero sin intensificarse ni desviarse, en ambos casos el aire frío se desplaza hacia latitudes más al sur (Dallavalle y Bosart, 1975), llegando a cruzar el Golfo de Tehuantepec.

Los centros de alta presión polar se mueven hacia el sur, si existen vientos de deriva del noroeste ininterrumpidamente el aire frío se desplaza hacia el Golfo de México como una depresión. Cuando el centro polar de alta presión se mueve hacia el sur, el aire frío se calienta debido al calentamiento en la superficie. Ya que la capa fría se contrae disminuyendo su espesor, esta cubre una mayor área y el anticiclón polar decae (Wexler, 1951).

La frecuencia y duración de los nortes aún no están bien determinadas. Sin embargo, DiMego *et al.* (1976) han encontrado que la actividad frontal en el Golfo de México y en el Golfo de Tehuantepec alcanza un máximo durante invierno y un mínimo en verano. La primavera y el otoño son períodos de transición de máximo a mínimo y de mínimo a máximo de la frecuencia de los frentes fríos, respectivamente (McCreary *et al.* 1989). La duración de los nortes es de 3 a 5 días (o de 2 a 6) y se presentan en intervalos de 10 a 15 días. La frecuencia y grado de penetración de los frentes fríos están directamente relacionados con las características topográficas y con la intensidad y amplitud de la circulación atmosférica en latitudes medias.

La rapidez del viento, durante los tehuanos, frecuentemente excede los 20 m s^{-1} , con un valor promedio de 10 m s^{-1} en la parte norte o cabeza del Golfo de Tehuantepec (Hill, 1969; Stumpf, 1975; Steenburgh *et al.* 1998; Romero-Centeno *et al.* 2003). Este viento tiene un área de influencia de aproximadamente 200 Km de ancho y 500 Km hacia mar adentro, presentando mayores velocidades en la cabeza del golfo (McCreary *et al.* 1989). La disminución de la velocidad hacia mar adentro, se debe a que los vientos se expanden en la horizontal y ceden energía al océano.

El paso de un frente frío modifica los “vientos alisios”, a lo largo de la costa mexicana estos vientos vienen del noroeste, es decir, paralelos a la costa. Sin embargo, la atmósfera sufre perturbaciones alrededor de 48 horas antes del paso de un frente frío, la estabilidad de la atmósfera decrece y los vientos alisios se invierten, se elevan hacia capas superiores y decrecen en intensidad. Después del paso del frente, la advección produce un abrupto cambio en las tendencias (Monreal y Salas, 1998).

Durante el invierno se presenta un mínimo de tiempo en el desarrollo de los frentes fríos a lo largo de la costa y un máximo de persistencia sobre el interior del Golfo de México. El paso de frentes fríos trae consigo un cambio drástico en el clima; grandes fluctuaciones de la temperatura en la Bahía de Campeche (Hill, 1969) y en el Golfo de Tehuantepec (Parmenter, 1970). La temperatura del agua en la superficie también desciende en ambos golfos, la temperatura mínima del agua frente a Coatzacoalcos desciende en promedio a 20°C , mientras que frente a Salina Cruz es de 16°C , cuatro grados más baja que frente a Coatzacoalcos. La disminución de la temperatura del aire, atribuible al paso de frentes, es de 2 a 3°C en Salina Cruz (Hill, 1969).

La intensidad de los vientos en la zona también dependen tanto de la regionalidad como la estacionalidad. Roden (1961) comparó la rapidez del viento en Coatzacoalcos y en Salina Cruz obteniendo que sólo en el verano los vientos son más débiles en Salina Cruz. El efecto de los nortes es diferente de uno y de otro lado del Istmo de Tehuantepec, en la Bahía de Campeche produce una gran mezcla y un hundimiento de la termoclina, mientras que en el Golfo de Tehuantepec se

produce una surgencia costera (o enfriamiento costero por la turbulencia superficial oceánica) provocando una elevación en la termoclina del lado este del eje del viento y un giro anticiclónico en su lado oeste.

Durante la época de mayo a octubre, cuando ocurren las lluvias, se presentan vientos pocos intensos. Esto significa que generalmente durante el verano los vientos que soplan de dirección este son débiles. Ocasionalmente se observan vientos intensos durante el paso de los huracanes. En esta época la región se ve afectada por la proximidad de la zona de Convergencia Intertropical, cuyo efecto es de estabilización en los movimientos verticales de las aguas, ocasionando baja productividad (Ritter-Ortíz y Guzmán-Ruíz, 1984).

Por otro lado, la trayectoria de máxima ocurrencia de las tormentas tropicales (de septiembre a noviembre) se encuentra aproximadamente a 300 Km de la costa de Salina Cruz (Thompson y Ellsberry, 1981). Las tormentas se mueven hacia los polos con velocidades de 400 a 600 Km día⁻¹, y eventualmente se desvían hacia el oeste, hacia el Océano Pacífico, arriba de los 20°N. Estas tormentas producen una actividad desorganizada sobre el Golfo de Tehuantepec (Enfield y Allen, 1983; Traviña *et al.* 2005). Su trayectoria y origen los asocian directamente con las características térmicas del golfo, ya que la mayoría de ellas tienen su origen en el área próxima a él.

Por último, cabe señalar que el fenómeno de “El Niño” u Oscilación del Sur que se manifiesta sobre todo en el Océano Pacífico Tropical, como una onda Kelvin hacia el norte y como una onda oceánica Rossby en la parte central, afecta la dinámica del Golfo de Tehuantepec. Cuando ocurre este fenómeno como el de los años 1982-1983 o el de 1997-1998, la respuesta se refleja en una mayor anomalía de la Temperatura Superficial del Océano (SST). Por ejemplo, de 1982 a 1984 las “surgencias” en el golfo se debilitaron fuertemente, mientras que en 1985 y 1986 se intensificaron. No obstante, en estos años la surgencia en el golfo fue relativamente débil respecto a las que ocurren en los Golfos de Panamá y Papagayo (Legeckis, 1986; Lluch-Cota *et al.* 1997). Lo anterior debido probablemente a que el sistema de alta presión atmosférica en el Mar Caribe se localizó más al sur de lo usual, resultando en el desplazamiento del máximo.

5.1.3. Hidrografía y masas de agua.

El Golfo de Tehuantepec se caracteriza por tener tres regímenes hidrográficos. El primero corresponde al giro anticiclónico en el oeste del golfo, el segundo o régimen central está afectado directamente por los nortes y es donde ocurre la mezcla turbulenta o el enfriamiento costero, y el tercero o régimen del este es menos afectado por los nortes; esta región presenta una superficie termohalina característica de las aguas del Pacífico Oriental Tropical del Este, menos salina y más cálida (Lavín *et al.* 1992; Robles-Jarero y Lara-Lara, 1993).

La termoclina permanente es muy somera, pues la profundidad de la capa de mezcla rara vez excede los 25 m (Wyrki, 1967). En el período de octubre a abril, la temperatura del agua superficial es varios grados menores a las aguas adyacentes. El área de agua fría se extiende desde la cabeza del Golfo de Tehuantepec hasta 650 Km en la dirección sur-suroeste, con un gradiente meridional de temperatura

muy notorio. El ancho del área de agua fría es mayor en el sur del golfo que dentro del mismo, lo que sugiere que el efecto del enfriamiento costero o surgencia está contrarrestado parcialmente por el arrastre lateral de agua caliente cerca de la costa (Monreal y Salas, 1998; Cromwell, 1958; Trasviña *et al.* 2002).

En invierno la distribución termohalina está dominada por el rotacional del esfuerzo del viento, por lo que las temperaturas superficiales más bajas no se producen donde el viento es más fuerte sino donde la picnoclina es más somera, y ésta no se produce donde la velocidad del viento es máxima, pues ahí el rotacional del esfuerzo del viento es cero (Monreal y Salas, 1998; Trasviña *et al.* 2002).

Con el paso de nortes se producen anomalías negativas de la temperatura superficial del océano, las cuales se extienden varios kilómetros hacia el mar. La temperatura superficial en el área de mezcla turbulenta (o surgencias) varía inversamente con la velocidad del viento y desciende hasta los 17 o 22°C, presentando una anomalía de la temperatura superficial del océano de 10°C. La capa de mezcla en el Golfo de Tehuantepec que tiene, en general, una profundidad de entre 10 y 30 m, disminuye de octubre a diciembre a profundidades menores a 10 m. La termoclina permanente es por lo tanto muy somera (Cromwell, 1958; Trasviña *et al.* 2002).

El comportamiento de la termoclina en la zona es influenciada por la dinámica oceanográfica del Pacífico Oriental Tropical. De esta manera, entre los meses de enero a marzo, las profundidades típicas de la termoclina costera oscilan alrededor de los 30 m, excepto en el Golfo de Tehuantepec y en el Domo de Costa Rica, donde la termoclina se acerca a los 10 m de la superficie; básicamente por la ocurrencia de los nortes. Lejos de la costa, hay una tendencia al aumento en la profundidad de la termoclina, alcanzando los 100 m en la entrada al Golfo de California (Trasviña *et al.* 2002).

De abril a junio la termoclina alcanza un mínimo de profundidad en el Golfo de Tehuantepec y en la zona del Domo de Costa Rica un nivel persistente mínimo de 10 m. Sin embargo, de julio a septiembre toda la zona costera presenta valores homogéneos de 30 m a lo largo de la línea de costa, incluyendo al golfo. En la región del Domo de Costa Rica persiste el mínimo de 10 m debido presumiblemente a la presencia de una capa de mezcla gruesa y cálida en los meses de verano. Finalmente, de octubre a diciembre las profundidades de la termoclina en el océano abierto se incrementan de norte a sur. En tanto que cerca de la costa se observa una vez más el mínimo de 10 m en el Golfo de Tehuantepec y el Domo de Costa Rica (Trasviña *et al.* 2002).

Durante el paso de un frente frío, se observa el principio de formación de un domo en el este del Golfo de Tehuantepec, similar al Domo de Costa Rica (Blackburn, 1962). Este domo está asociado a una corriente anticiclónica intensa que se forma en el oeste del golfo. En el principio del giro ciclónico, el agua fría superficial no coincide con el centro del domo y en la mayoría de los casos dicho giro no llega a formarse completamente. La formación de estos dos giros (cuando se forman ambos) genera una compensación de la depresión de la superficie oceánica por el viento y dichos eventos se forman durante la atenuación de los vientos tehuanos, es decir, en los meses de marzo a septiembre (Barton *et al.* 1993; Trasviña *et al.* 1995;

Trasviña *et al.* 2002; Ballester y Coen, 2004). Durante estos meses se llegan a observar estructuras termohalinas de tipo ciclónicas, las cuales se limitan a los primeros 50 m de profundidad (OFCF, 1993).

En cuanto al estudio de las masas de agua, Wyrski (1967) estudió las masas de agua del Pacífico Ecuatorial Este y analizó la circulación en la zona próxima al golfo y mediante diagramas T-S encontró que las masas de agua dentro del Golfo de Tehuantepec son: el Agua Tropical Superficial (ATS), que se localiza en la capa superficial y que se caracteriza por su alta temperatura ($T > 25^{\circ}\text{C}$) y salinidades menores a 34 ups. Su baja salinidad se debe en gran medida a la gran cantidad de agua de lluvia debida, en general, al exceso de precipitación sobre la evaporación que existe en el área de formación. Esta agua, al igual que el Agua Tropical Subtropical Superficial (ATSS) se introduce en el Golfo de Tehuantepec, principalmente en verano y otoño, a través de la Corriente Costera de Costa Rica (CCCR).

El ATSS tiene una alta salinidad, sus valores llegan hasta 35 y 36 ups y su temperatura varía entre 15 y 28°C , pero generalmente es agua cálida. Durante el invierno y la primavera, el agua de la Corriente de California, con baja salinidad ($S < 34$ ups) y baja temperatura (12 a 18°C) incursiona en la porción occidental del Golfo de Tehuantepec. Cerca de la cabeza del golfo, en la superficie, se encuentran aguas frías y salinas, las cuales han sido acarreadas hacia la superficie por efecto de la surgencia eólica o enfriamiento costero. En este proceso intervienen el ATS y el ATSS. Cuando el agua de la CC se encuentra con esta agua, se forma un frente oceánico (Monreal y Salas, 1998).

Los nortes inducen la formación de frentes oceánicos, en la parte suroeste del golfo y la formación de surgencias en la parte sureste. Esta dinámica sustenta una alta productividad biológica, la cual se refleja en los sedimentos, particularmente por la distribución de radiolarios (Molina-Cruz y Martínez-López, 1994). La Corriente de California (CC) interviene en el proceso de mezcla en la zona frontal, también deducida por la presencia de radiolarios en los sedimentos. A profundidades mayores se encuentra el Agua Intermedia del Pacífico (AIP), con salinidades de alrededor de 34.5 ups y temperaturas de aproximadamente 5°C . Desde los 2000 m hasta el fondo se encuentra el Agua Común del Pacífico (ACP) que tiene salinidades entre 34.6 y 34.7 ups y temperaturas entre 1 y 2°C (McMellan, 1968).

En trabajos recientes, Araico-González (2012) determinó las masas de agua para los meses de verano en la zona y encontró que en dicho período el Golfo de Tehuantepec se encontraba ocupada por el Agua Tropical Superficial (ATS) con temperaturas entre los 14 y 20°C y salinidades entre 34.5 y 34.78 ups entre los 60 y 100 m; Agua Subtropical Subsuperficial (ATSS) con temperaturas entre los 11 y 13°C y salinidades entre 34.7 y 34.8 ups entre los 125 y 300 m y Agua Intermedia del Antártico (AIA) con temperaturas entre los 6 y los 10°C y salinidades entre los 34.5 y 34.66 ups a profundidades mayores a los 350 m. También cabe mencionar que en la región Central-Occidental existe una zona de máximo termohalino (MaxTh) con temperaturas cercanas a los 29.6°C y salinidades de 34.63 ups por encima de los 40 m de profundidad, presente sólo durante los meses de mayo y junio durante algún evento de giro ciclónico.

Finalmente, Fiedler y Talley (2006) determinaron las mismas masas de agua que Wyrki (1965) y Monreal-Salas (1998) pero añadiendo el Agua Superficial Ecuatorial (ESW-ASE) debido posiblemente a que llegan aguas provenientes de la Corriente Subsuperficial Ecuatorial (CSSE) que posteriormente formarán parte de la Corriente Norecuatorial (CNE) (Figura 13).

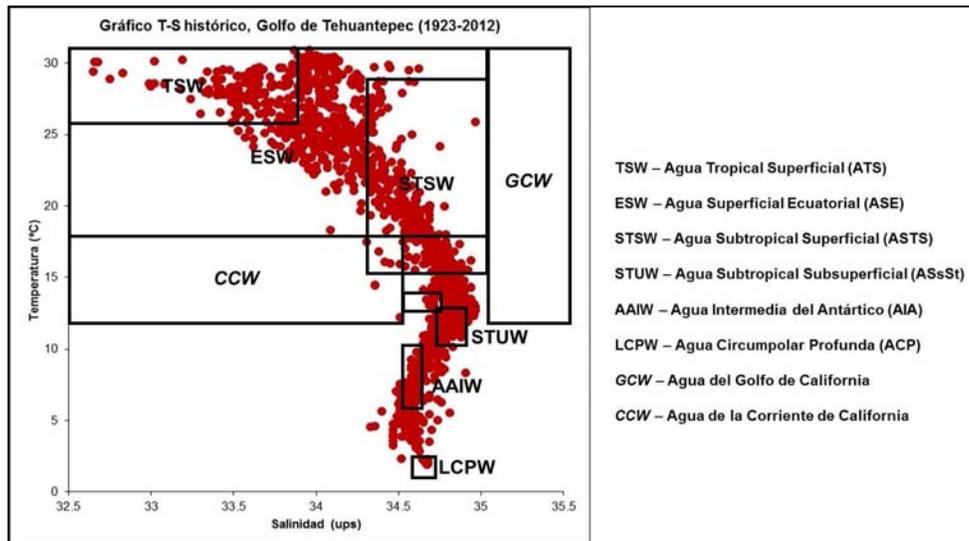


Figura 13. Gráfico T-S histórico para el Golfo de Tehuantepec (Wyrki, 1967; Monreal-Salas, 1998; Fiedler y Talley, 2006 y Araico-González, 2012)

5.1.4. Corrientes.

El patrón de circulación en el Pacífico Tropical Este es influenciado por los desplazamientos latitudinales del sistema de Vientos Alisios y de la Convergencia Intertropical. La variación de dicho patrón de circulación afecta la dinámica dentro del Golfo de Tehuantepec. Los tehuanos recorren varios cientos de kilómetros mar adentro (Roden, 1961; Strong *et al.* 1972). Estos vientos inducen un movimiento de agua superficial hacia el sur, causando un movimiento de masa de los lados y una surgencia del agua de las capas subsuperficiales, provocando un decaimiento de la temperatura superficial. Cuando los vientos del norte reducen su intensidad o cesan, las características normales de la circulación se restablecen, y el transporte hacia el sur cesa.

La circulación oceánica superficial en el Pacífico Tropical Este está dominada por la Corriente de California (CC), la Corriente Norecuatorial (CNE), la Contracorriente Norecuatorial (CCNE), la Corriente Surecuatorial (CSE), la Corriente Subsuperficial Ecuatorial (CSSE) y por la Corriente del Perú (CP). En invierno y primavera, los vientos Alisios del Este son intensos y su máxima velocidad se encuentra en su posición más al sur, en aproximadamente 9°N.

Debido a esto, la Convergencia Intertropical se encuentra prácticamente en el ecuador y la Contracorriente Ecuatorial no llega a la costa de América Central, debido a que los vientos van en sentido contrario a ella. La CCCR se desvía hacia el oeste debido a que los vientos Alisios soplan del noreste; esta desviación es

sustentada por un flujo hacia el sur, producto de los tehuanos. La CC llega al sur de los 15°N donde además de alimentar a la CNE entra al Golfo de Tehuantepec en las capas subsuperficiales. La incursión de esta agua es sólo en la parte oeste del golfo, aproximadamente a 95°W donde se encuentra el agua producto del enfriamiento costero, formando un frente oceánico (Figura 14) (Molina-Cruz y Martínez-López, 1994).

En verano y otoño, la velocidad máxima de los vientos Alisios del noreste se encuentra a los 18°N. Por lo tanto, la Convergencia Intertropical se localiza en su posición más al norte, la contracorriente llega aproximadamente a 90°W definiendo el Domo de Costa Rica como y alimentando la CCCR la cual fluye hacia el noroeste, a lo largo de la costa y entra al Golfo de Tehuantepec. Como la posición de los Alisios es muy al norte, la CC se desvía hacia el oeste en las proximidades de la punta de la Península de Baja California. Durante este período la CNE es alimentada por el agua de la CC y por la masa de agua tropical de la CCNE. A escala menor, la circulación superficial en el Golfo de Tehuantepec presenta cuatro patrones característicos a lo largo del año (Blackburn, 1962; Monreal y Salas, 1998).

Durante la temporada de nortes se tienen dos patrones de circulación muy similares entre sí. En el período de octubre a enero, el patrón es tal que muestran dos corrientes paralelas a la costa y en sentido contrario, las cuales se encuentran a la altura de Salina Cruz. La rapidez de la corriente en la parte alta del golfo es inferior a la de la región sur. Una vez que dichas corrientes convergen siguen una trayectoria hacia mar adentro con deflexiones hacia el suroeste (Monreal y Salas, 1998; Trasviña *et al.* 2002; Flores-Vidal *et al.* 2010).

A finales de la época de nortes de febrero a abril, se presenta un patrón de circulación similar al anterior, la diferencia es que la contribución noroeste es más importante que la contribución del norte y una vez que las corrientes convergen forman dos celdas, desarrollándose un dipolo; un giro anticiclónico en la porción oeste con su respectivo hundimiento de agua (subducción frontal) y un ciclónico en la parte oriental del golfo (Trasviña *et al.* 2002).

En el período de junio a agosto, época de lluvias y de huracanes, el patrón de circulación es muy sencillo, pues la corriente va hacia el noroeste. En los meses de mayo y junio, meses de transición de secas a lluvias y de lluvias a secas respectivamente, la corriente presenta una línea sinuosa con flujo de este a oeste, va hacia el norte con velocidades menores a 20 cm s^{-1} , menores a las correspondientes al período de junio a agosto. La teoría de Ekman, cuando se considera un viento normal a la costa, predice la formación de un sistema de circulación bipolar, pero las observaciones en el Golfo de Tehuantepec revelan que el patrón de circulación, por efecto de vientos del norte, consiste en un giro cálido anticiclónico de aproximadamente 200 Km de diámetro en el oeste del golfo, con una débil contraparte ciclónica en la parte este del golfo (Trasviña *et al.* 1995; Trasviña *et al.* 2002).

En diciembre el patrón de corrientes consiste de una circulación costera hacia el este y otra hacia el oeste las cuales convergen en la parte oeste del golfo donde cambian su trayectoria siguiendo hacia el mar adentro, hasta aproximadamente 200 Km de la costa donde la corriente cambia de dirección hacia el oeste. Las isotermas

se hundan en el oeste y se elevan en el este del eje del viento. Por esta razón, la termoclina presenta una pendiente y el movimiento de la picnoclina hacia arriba en el lado este del golfo es limitado por la intensa mezcla vertical (Stumpf, 1975). Generalmente en otras épocas las corrientes están en dirección opuesta. Los vientos generan fuertes corrientes superficiales y anomalías de temperatura superficial del océano, así como la formación de un giro anticiclónico (Clarke, 1988).

Algunos estudios como los de Álvarez *et al.* (1989) muestran que el flujo a lo largo del eje del viento es hacia fuera de la costa con velocidades entre 20 y 30 cm s^{-1} , el flujo hacia el este fue de 50 cm s^{-1} , a lo largo de la costa la velocidad fue de 50 a 80 cm s^{-1} . En la zona no influenciada por los vientos se registraron velocidades de alrededor de 15 cm s^{-1} . Cuando el viento cesa, el sistema tiene un relajamiento en pocas horas y resultan cambios en la configuración de la superficie del golfo. Los vientos en Salina Cruz mayores a 25 m s^{-1} con esfuerzo de 2 N m^{-2} producen corrientes costeras que alcanzan 1 m s^{-1} y que convergen hacia el eje del viento (McCreary *et al.* 1989; Monreal y Salas, 1998; Trasviña *et al.* 2002).

Aunque menos comunes que en invierno, los tehuanos de primavera pueden modificar la superficie oceánica al generar grandes remolinos ($\approx 50\text{--}200$ km de diámetro) ciclónicos y anticiclónicos. En ausencia de vientos tehuanos, la circulación oceánica reveló una corriente costera ($\approx 50 \text{ cm s}^{-1}$) casi permanente con dirección al oeste. No se observaron eventos tehuanos en verano, aunque sí remolinos ciclónicos que pudieran estar relacionados con la corriente costera que fluye hacia el oeste. Durante el otoño se observó un evento de viento del norte que, aunque no superó los $\approx 12 \text{ m s}^{-1}$ de magnitud, fue continuo y persistente durante casi 15 días.

Estas condiciones de otoño han permitido observar una competencia continua entre la circulación inducida por el viento y la corriente costera hacia el oeste en su etapa más intensa ($\approx 100 \text{ cm s}^{-1}$). Dicha corriente puede estar relacionada con un flujo de agua cálida y ligera, atrapada en la costa y compuesta por aguas tropicales y se ha discutido recientemente cómo se desplaza hacia el noroeste del golfo por medio de los criterios clásicos como la conservación de la vorticidad y el transporte de Ekman (Flores-Vidal *et al.* 2010).

En estudios más recientes, Kessler (2006) revisó lo publicado desde finales de la década de los cuarentas e hizo un diagnóstico adicional basado en datos obtenidos con diversos instrumentos oceanográficos de tecnología avanzada. De acuerdo con este autor, las alturas dinámicas promedio de la Región Occidental del Pacífico Tropical Oriental (PTO) presenta una depresión en la termoclina centrada a los 13°N y 105°O, el llamado Tazón de Tehuantepec (TB), y una elevación a los 9°N y 90°O que corresponde al Domo de Costa Rica (DCR). Este último, según Brenes *et al.* (2008), es un indicio notable que la Contracorriente Nor-Ecuatorial alcanza el límite Occidental del PTO.

De acuerdo con lo anterior, el TB y el DCR pudieran determinar la dirección del flujo geostrófico en la región E del PTO, dado que de abril a junio la circulación es influenciada por la intensificación del flujo anticiclónico generado por el TB, mientras que de julio a septiembre, la intensificación del DCR propicia que la CCCR se adentre hasta aproximadamente los 95° (Figura 6). Dicha corriente alcanza los 600 m de profundidad, salinidades superficiales de 33.6-34 ups y describe una

trayectoria ondulante debido a la presencia de giros de mesoescala (Araico-González, 2012) (Figura 14).

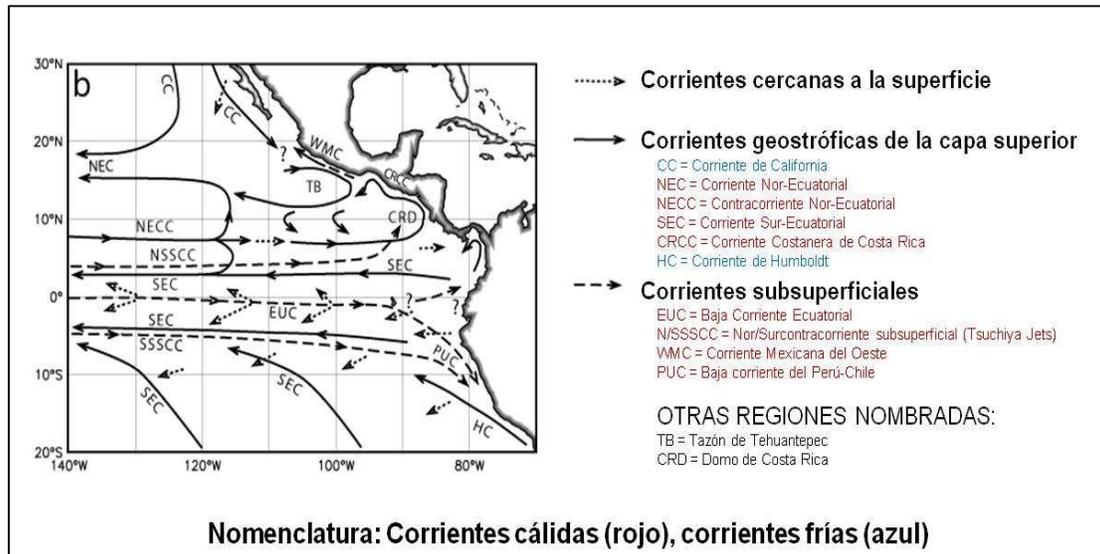


Figura 14. Patrón de corrientes superficiales para el Pacífico Tropical Oriental y el Golfo de Tehuantepec (modificado de Kessler, 2006).

5.1.5. Surgencias, giros y subducción frontal.

Los nortes y la circulación inducida por el viento se producen regularmente durante la temporada de otoño-invierno (septiembre a abril). Aunque hay una gran cantidad de variabilidad interanual (de hasta ± 27 nortes inductores de agua fría en 60 años) se tiene registro de que en el 2015 llegaron a 48 nortes y el promedio señalado de nortes inductores es de alrededor de 13 por temporada de frío (Servicio Meteorológico Nacional, 2015). Este fenómeno produce parches de superficie fría y remolinos que pueden diferir en tamaño, pero que dinámicamente son muy similares (Schultz *et al.* 1998).

De acuerdo con lo anterior, las surgencias ocurren cuando en el Golfo de México se eleva la presión atmosférica en niveles altos, y al mismo tiempo en el Pacífico se presenta una baja presión atmosférica. En estos casos la velocidad del viento se incrementa al penetrar el Paso Chivela (la parte más baja del istmo de Tehuantepec), produciendo un fuerte enfriamiento costero superficial, causada por aguas que emergen de la capa subsuperficial hacia la superficial. Como consecuencia se desarrolla un hundimiento de la piconclina y la termoclina en el lado oeste hasta los 100 m de profundidad, lo que genera una convergencia de Ekman. En el este se genera una divergencia que inhibe fuertes gradientes de densidad cerca de la superficie que debilita el flujo geostrofico superficial (Roden, 1961; Barton *et al.* 1993; Trasviña *et al.* 1995) además de un giro ciclónico y anticiclónico.

El giro ciclónico eventualmente se elimina o no aparece por la mezcla vertical mientras que la advección intensifica el giro anticiclónico y lo hace más circular (McCreary *et al.* 1989). Las corrientes en el giro anticiclónico tienen velocidades máximas del orden de 80 cm s^{-1} y un diámetro de entre 200 y 300 km y se forman

con agua que viene de fuera del golfo (Trasviña *et al.* 1995; Trasviña *et al.* 2002) propagándose hacia el oeste y representan una fuente significativa de calor y de transporte de masa en la región (Leben, 1990).

Las aguas frías de la surgencia reciente (debidas al giro ciclónico) se mueven en dirección de las manecillas del reloj, hacia las aguas adyacentes más calientes del norte con velocidades verticales de hasta 10 m día^{-1} , por lo que el giro redistribuye la temperatura cerca de la costa (Roden, 1961; Monreal y Salas, 1998; Trasviña *et al.* 1995) además de que existe una estructura baroclínica confinada en la capa de los 100 m (McCreary *et al.* 1989).

Dentro de los estudios más relevantes, Stumpf y Legeckis (1977) observaron aproximadamente a 40 Km de la costa, un giro anticiclónico de 280 Km de diámetro, con temperaturas en el centro de aproximadamente 3°C más bajas que las aguas adyacentes que tenían temperaturas superficiales de 25 a 30°C ; este giro representa el reajuste de la circulación cerca de la costa (Christensen *et al.* 1983). Entre el giro y el agua de la surgencia se presenta un gradiente térmico de $0.4^{\circ}\text{C Km}^{-1}$, el cual coincide con la posición de la Cordillera Submarina de Tehuantepec, por lo que se puede decir que la localización del frente no solamente depende de la posición de la incursión de la CC, sino que la batimetría controla los límites de la surgencia (Stumpf, 1975; Stumpf y Legeckis, 1977).

Para el caso de la subducción frontal que se observa debido al giro anticiclónico en la parte oeste del golfo, se observa por medio de una "lente" originada dentro del mismo giro con el apoyo del trabajo de modelado previo de S95. Trasviña y colaboradores en 2002 mencionan que la subducción frontal se caracteriza por la producción de una lente con un bajo potencial anómalo de vorticidad en la capa profunda superficial. No hay observaciones de la estructura frontal para confirmar que la capa de mezcla antes de la subducción era en realidad más gruesa que la parte delantera. Sin embargo, la presencia de una lente de estas características es coherente con la subducción a partir de esta condición.

5.1.6. Geostrofia.

En el caso del estudio de la intensidad y direccionalidad de las masas de agua de acuerdo con el perfil vertical de profundidad, se han realizado estudios al respecto pero siguen siendo muy escasos a pesar de que actualmente existe cierta controversia en el tema. Sin embargo, los antecedentes han podido precisar que las velocidades geostroficas en el Golfo de Tehuantepec varían estacional y regionalmente.

De acuerdo con estudios previos, Trasviña (2002) y Trasviña y Barton (2008) determinaron que durante los meses de verano (mayo-septiembre), los vientos locales son persistentes pero débiles por lo que existe cierto cambio en la velocidad geostrofica superficial (hasta los 50 m), demostrando la formación de un giro anticiclónico y ciclónico que al final, permite un desplazamiento del agua con una velocidad promedio de 3.5 km día^{-1} . Por otra parte, estudios realizados en 2012 (Araico-González, 2012) demuestran que las velocidades pueden ser superiores a los 6.9 km día^{-1} ($0.01\text{-}0.3 \text{ m s}^{-1}$) en dirección oeste con rumbo hacia el norte del país lo que demostraría la presencia de la CCCR en la zona en los meses de mayo, junio

y julio, referenciada a 400 m de profundidad. Dicha conclusión ha generado controversias debido a que en el estudio de Trasviña y Barton (2008) donde se montaron boyas oceanográficas ARGOS, se observó que su movimiento no correspondía a un posible desplazamiento de la CCCR sino a patrones completamente distintos.

Por otro lado, el estudio del 2012 (Araico-González, 2012) determinó que la CCCR es una corriente subsuperficial debajo de la termoclina (30-50 m) hasta los 480 m de profundidad y que presentaba la misma composición de masas de agua presentes en el GT, tal tesis apoyada en estudios previos (Kessler, 2006, Brenes *et al.* 2008 y Flores-Vidal *et al.* 2011) donde se demuestra el movimiento hacia el norte de dicha corriente para la formación de la Corriente Costera Mexicana o Corriente Costera del Oeste (CMO) que penetra hasta la parte noroeste del Pacífico Tropical Mexicano.

De acuerdo a la región, también existen cambios en las velocidades y direcciones de las corrientes. En la porción oriental existen dos flujos: uno hacia mar abierto ($0.1-0.3 \text{ m s}^{-1}$) y otro al extremo norte ($0.2-0.7 \text{ m s}^{-1}$) hasta los 70 m con dirección oeste y hasta los 480 m de profundidad existen máximas velocidades de hasta 0.3 m s^{-1} con dirección hacia el este (Araico-González, 2012).

En los meses de invierno, debido al efecto de los tehuanos, se calculan velocidades de hasta $17.28 \text{ km día}^{-1}$ con flujos hacia mar abierto y con movimiento ondulante debido a los giros anticiclónico y ciclónico, lo cual genera ageostrofia (debido a la influencia de los vientos, la geostrofia como método para calcular las velocidades de las masas de agua en la vertical no es funcional). El estudio hecho por Trasviña y Barton (2008) muestran flujos hacia mar adentro desde la cabeza del golfo con velocidades iniciales de 0.2 m s^{-1} y dirección este u oeste de acuerdo con la elevación y depresión de la picnoclina. Conforme los vientos son muy persistentes, la direccionalidad es hacia el este (Figura 15).

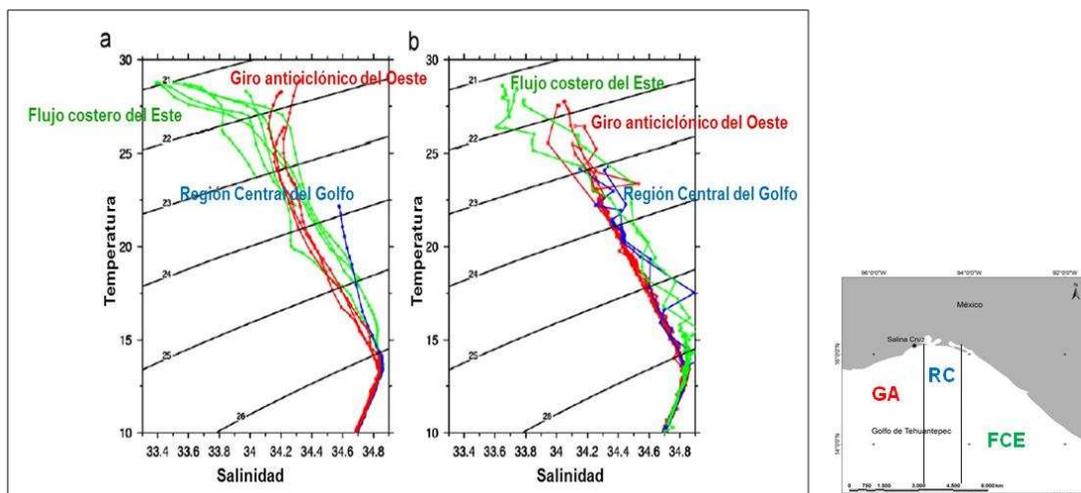


Figura 15. Diagrama T-S que muestra la presencia del giro anticiclónico durante los cruceros oceanográficos de 1986 a) y 1992 b) en las tres regiones del Golfo de Tehuantepec (GA giro anticiclónico del Oeste, RC región central y FCE flujo costero del Este) (modificado de Trasviña y Barton, 2008).

5.1.7. Temperatura.

Este parámetro presenta una heterogeneidad, debida principalmente al efecto de los vientos. En las estaciones de otoño e invierno los tehuanos mueven el agua hacia el sur, originando un arrastre de ella desde los lados y desde abajo, causando una mezcla considerable a lo largo del eje del viento (Roden, 1961). En el Golfo de Tehuantepec la velocidad del viento disminuye lentamente hacia el sur y rápidamente hacia el oriente y el occidente. En esas condiciones, la temperatura presenta un intervalo entre los 18° a 19°C para la parte central del golfo y del entre 25° y 30°C en mar abierto para las zonas este y oeste del golfo (Stumpf y Legeckis, 1977; Turner, 1992; Vázquez-Gutiérrez *et al.*, 1998).

Durante las estaciones de primavera y verano las temperaturas son más altas debidas a que la intensidad de los vientos es baja y debido a que en esta época ocurre la mayor intensidad luminosa (Roden, 1961; Salvador, 1993). De esta forma se observan valores altos de temperatura en la zona costera y en mar abierto los valores son ligeramente menores (Salvador, 1993; Vázquez-Gutiérrez *et al.*, 1998).

Los perfiles verticales presentan una termoclina entre los 50 y los 100 m de profundidad para la época del verano, no obstante durante la época de invierno o Tehuanos, la termoclina puede encontrarse cerca de la superficie, dependiendo de la intensidad de los vientos fríos (Turner, 1992; Salvador, 1993; Vázquez-Gutiérrez *et al.*, 1998). La presencia de ciclones, huracanes, etc., sin duda alguna generan cambios en las condiciones anteriormente descritas y por tanto, en las corrientes del Golfo (Enfield y Allen, 1983).

En cuanto a los datos históricos, el comportamiento de la temperatura en la zona a partir de registros obtenidos desde 1923 hasta el 2013 indica que han existido cambios en la temperatura entre los 0 y 200 m de profundidad, incluyendo la zona de la termoclina de la zona que puede variar entre los 50 y 100 m de profundidad (Figura 16).

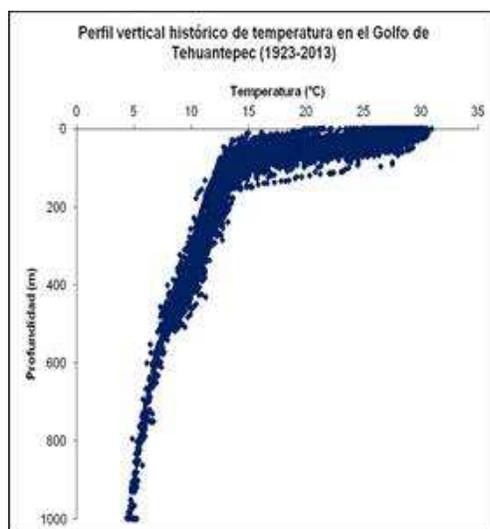


Figura 16. Perfil vertical de temperatura para el Golfo de Tehuantepec (NOAA 1923-2013).

5.1.8. Salinidad.

Los valores más bajos de salinidad se presentan en la zona costera al este del GT, la cual se encuentra influenciada por los ríos de Chiapas, además la época de lluvias coincide con la temporada de huracanes y la presencia de agua dulce genera una baja en la salinidad superficial. Los máximos valores de salinidad se obtuvieron durante la época de secas y se encuentran principalmente en la zona oeste del golfo. Este parámetro oscila entre los 33.2 y los 35 ups durante el año (Turner, 1992). Históricamente, presenta un comportamiento estable con modificaciones entre los 0 y 200 m de profundidad de hasta 1.5 ups (Figura 17).

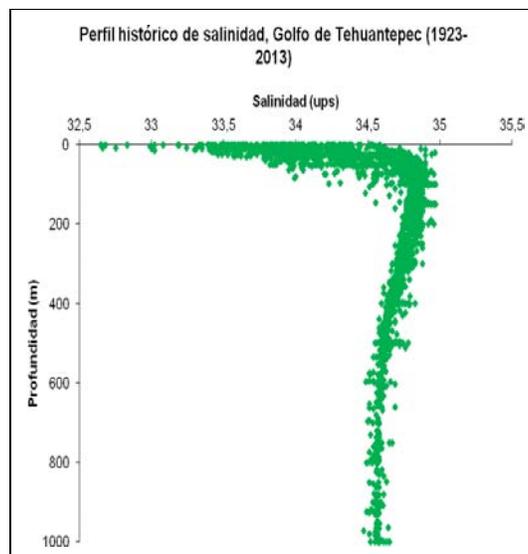


Figura 17. Perfil vertical de salinidad para el Golfo de Tehuantepec (NOAA 1923-2013).

5.1.9. Química oceanográfica.

Se han realizado diversas investigaciones oceanográficas en la zona desde 1962 a la fecha, pero muchos de los trabajos quedaron sin continuidad y eso no permite una descripción en forma detallada de los fenómenos físicos, químicos, geoquímicos y biológicos que suceden en esta área marítima. El tema químico, a pesar de contar con algunas investigaciones durante más de medio siglo es el menos desarrollado y se requiere tener un mayor conocimiento del mismo, por lo que para algunos parámetros se cuenta con ciertos datos que explican su comportamiento de acuerdo con la dinámica oceanográfica local y otros que se deben trabajar de forma más constante. Para esta sección, la mayor parte de los parámetros se muestran con datos históricos recopilados desde 1923, otros sólo se determinaron para cierta época debido a que fueron los únicos datos disponibles en las bases de datos nacionales e internacionales pero que son igualmente importantes para tener una descripción lo más general posible de la zona de estudio.

5.1.9.1. Oxígeno disuelto.

El oxígeno disuelto en el GT juega un papel muy importante dentro de la columna del agua, los procesos físicos y biológicos tienen gran influencia sobre este gas. Los valores de concentración mínimos de O_2 disuelto, se presentan por debajo de los 100 m de profundidad por lo que los altos valores del oxígeno disuelto en la superficie así como el elevado porcentaje de saturación son consecuencia de la actividad biológica (fotosíntesis) del fitoplancton. La profundidad histórica de oxígeno disuelto presenta un intervalo muy grande que va de los 40 a los 850 m (la cota superior varía de acuerdo con la temporalidad y la localidad).

La distribución vertical permite observar con mejor claridad la profundidad del mínimo de oxígeno y un incremento que existe después de los 500 m de profundidad. Los mínimos de oxígeno se encontraron asociados con los máximos de nitritos, nitratos, fosfatos y silicatos; también la oxiclina coincidió con la haloclina las cuales son someras (< 200 m).

La distribución horizontal (5 m) durante los tehuanos muestra un desplazamiento de aguas pobres en oxígeno hacia la zona de mar abierto y concentraciones altas en la parte este y oeste del golfo, lo cual es característico de la surgencia. En la zona costera se observan concentraciones bajas por lo que hace evidente el fenómeno de afloramiento o enfriamiento costero y común además de que permite comprobar que se presenta en casi toda la costa del Pacífico mexicano.

En cuanto al OD histórico para el GT, el valor máximo reportado fue de 7.22 mL L^{-1} a nivel superficial pero a partir de los 40 m de profundidad el valor desciende hasta 0 mL L^{-1} y se mantiene así hasta los 929 m donde vuelve a incrementarse hasta llegar a 1.29 mL L^{-1} a los 1000 m como se muestra en la figura 18.

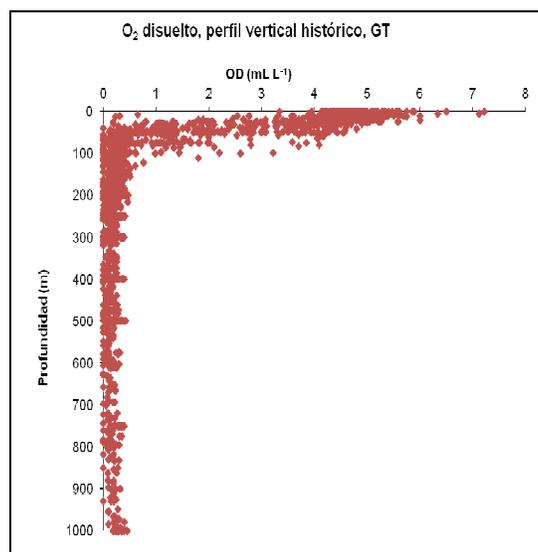


Figura 18. Perfil vertical histórico de oxígeno disuelto para el Golfo de Tehuantepec (NOAA 1923-2013).

5.1.9.2. pH

El intervalo normal para aguas marinas superficiales es de 8.1 a 8.3 (Millero y Sohn, 1992). Durante el invierno la distribución horizontal muestra valores ligeramente altos hacia la zona costera del GT (entre 7.8 a 8.2), principalmente en la parte central y este; hacia la parte oeste los valores son bajos (entre 7.5 y 7.7) y están estrechamente relacionados con una concentración baja de oxígeno disuelto. Durante los tehuanos, esta situación se invierte y los valores más altos (de aproximadamente 8.3) se encuentran en la región occidental, esto es debido al incremento del CO_2 en las aguas superficiales, motivado por la surgencia (Sverdrup *et al.*, 1970; Riley y Chester, 1989; Millero, 1996).

Los datos históricos muestran rangos amplios (desde 7.6 a 8.6; figura 19) pero Turner (1992) indica que este parámetro puede variar en la zona de acuerdo a la época del año.

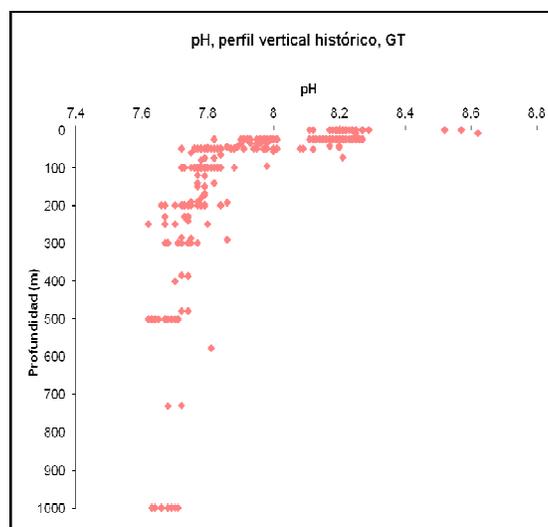


Figura 19. Perfil vertical de pH para el Golfo de Tehuantepec (NOAA 1923-2013).

5.1.9.3. Dióxido de carbono total.

En cuanto a datos de CO_2 total para la zona, se sabe que han realizado cruceros por parte de instituciones tanto nacionales como la UABC, el CICIMAR y extranjeras como el SCRIPPS; sin embargo la información no está fácilmente disponible lo cual limita el conocimiento del comportamiento en la zona.

Sin embargo, Takahashi (1998) determinó algunos valores para el caso del CO_2 total (TCO_2), el máximo valor medido en la zona del Golfo de Tehuantepec fue de $2365 \mu\text{mol kg}^{-1}$ a 1000 m de profundidad. No existe información disponible posterior a Takahashi (1998), para la zona; así como tampoco para la zona de Puerto Ángel por lo que no se pudo establecer un análisis comparativo (Figura 20).

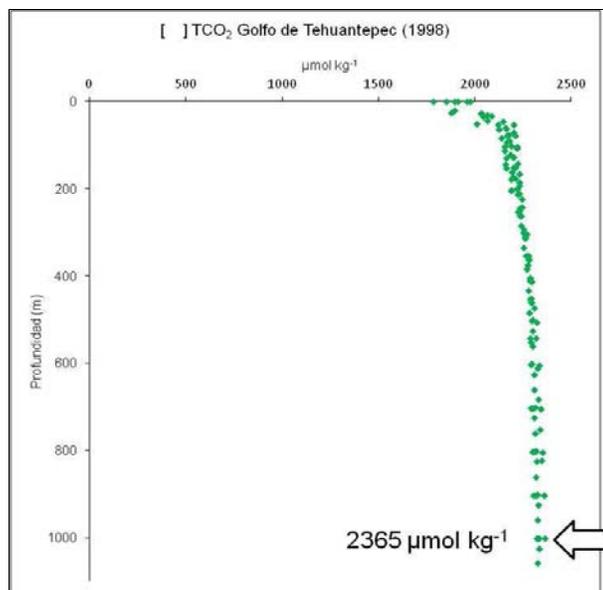


Figura 20. Perfil vertical de TCO_2 para el Golfo de Tehuantepec (Takahashi, 1998).

5.1.9.4. Alcalinidad total.

La interacción océano-atmósfera permite absorber a la superficie del océano una importante cantidad del CO_2 atmosférico, el cual durante los últimos 50 años se ha incrementado con gran celeridad (Vázquez-Gutiérrez *et al.*, 1998, Turner, 1992).

En cuanto al perfil vertical, la alcalinidad aumenta con respecto a la profundidad, comportamiento inverso al del pH y el oxígeno disuelto, debido principalmente a la oxidación de la materia orgánica; los valores bajos en la zona eufótica son debidos principalmente al consumo de CO_2 por parte de la fotosíntesis del fitoplancton.

El comportamiento horizontal (10 m) durante el verano permite observar que los valores más bajos (aproximadamente 8.5) se encuentran en la parte oeste del golfo, lo cual nos permite pensar que esto se debe a una gran actividad biológica muy marcada en esa área. También se observa que durante las secas hay una menor cantidad de la alcalinidad que durante los tehuanos, debido a la gran actividad fotosintética (Skirrow y Riley, 1975; Millero, 1996); durante la época de tehuanos los consumidores secundarios consumen una gran cantidad de oxígeno.

En la figura 21 se muestran únicamente datos de las Campañas Oceanográficas MIMAR-V (mayo, 1989) y FIQUIMBI-I (noviembre, 1989) a bordo del B/O “El Puma” de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) debido a la poca actualización de los datos en la zona y la nula información para tal nutriente en las bases de datos internacionales.

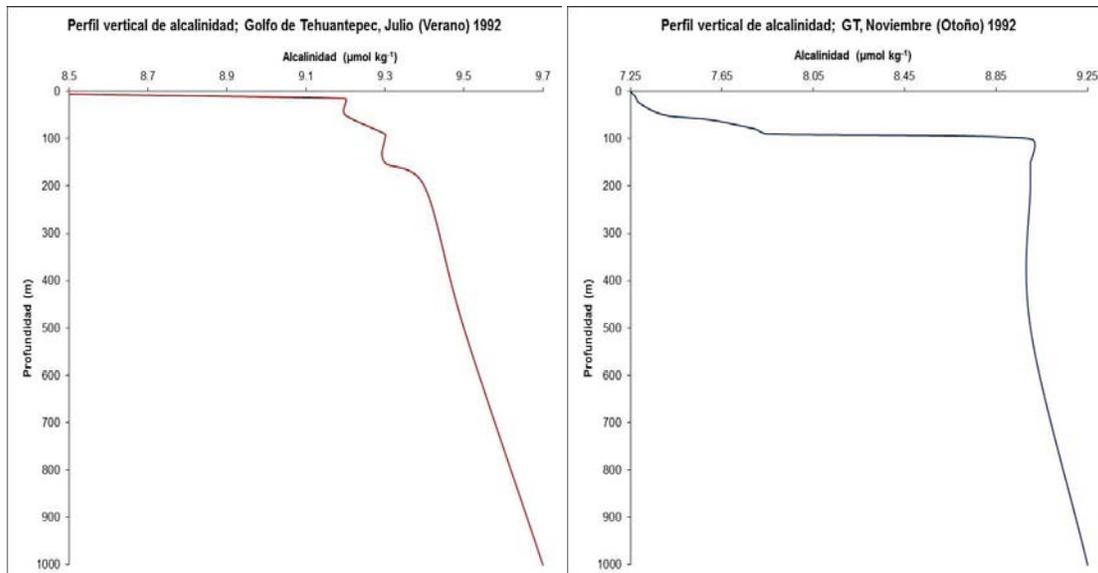


Figura 21. Perfil vertical de alcalinidad total para el Golfo de Tehuantepec (Tomado de Vázquez-Gutiérrez et al., 1998; modificado).

En el GT, su comportamiento es directamente proporcional con la oxidación de la materia orgánica. La alcalinidad en la zona eufótica es mucho menor debido principalmente a la fotosíntesis. En verano los valores son muy bajos en la zona oeste del golfo por la actividad biológica presente mientras que durante los “Tehuano” se observan concentraciones más bajas que durante las secas debido a que los consumidores secundarios consumen una gran cantidad de oxígeno (Turner, 1992).

Sin embargo, es importante mencionar que la zona, y especialmente la alcalinidad, no es monitorizada adecuada y continuamente por lo que futuras investigaciones deben centrarse en medir la alcalinidad, ya sea en cuanto a su distribución horizontal como vertical.

5.1.9.5. Nitritos.

La concentración de nitritos (NO_2) en el GT ha oscilado entre los 0.07 a 4.45 μM y no son similares respecto a otras zonas del Pacífico (Sverdrup *et al.*, 1970; Vázquez-Gutiérrez *et al.*, 1998, Turner, 1992). En la Figura 22, se muestran únicamente los datos disponibles de las Campañas Oceanográficas MIMAR-V (mayo, 1989) y FIQUIMBI-I (noviembre, 1989) a bordo del B/O “El Puma” de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

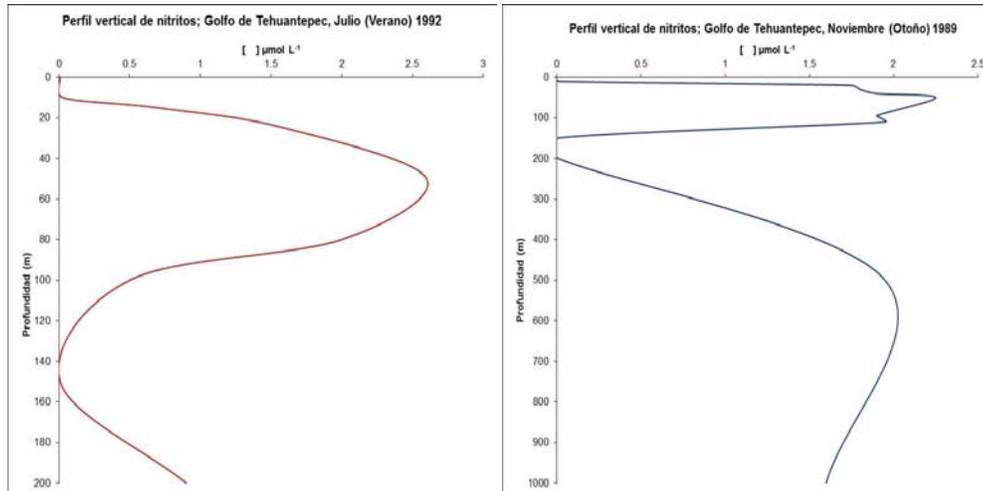


Figura 22. Perfil vertical de nitritos para el Golfo de Tehuantepec (Tomado de Vázquez-Gutiérrez et al., 1998; modificado).

En cuanto al perfil vertical, el ion nitrito está fuertemente influenciado por el mínimo de oxígeno en las capas superficiales del golfo, observándose dos mínimos, lo cual es característico de las aguas tropicales del Pacífico mexicano (Turner, 1992).

Debido a su inestabilidad química por ser un compuesto intermedio y porque las condiciones óxicas se restablecen en menos de 48 horas, la concentración de nitritos no alcanza valores altos como los reportados en otras zonas de surgencia (Codispoti y Packard, 1980; Millero, 1996). Asimismo, se han registrado diferencias en las concentraciones de los nitritos entra la época de secas y la época de tehuanos, alcanzando una diferencia de concentración de 6 μM .

5.1.9.6. Nitratos.

La concentración promedio de nitratos (NO_3) en la zona eufótica alcanza un máximo de 15.9 μM en el mes de noviembre (otoño) y un mínimo de 4.2 μM en julio (verano). Durante el otoño (época de Tehuanos) se rompe la termoclina que está cercana a la superficie lo cual origina un afloramiento de agua con alto contenido de nutrientes (Roden, 1961; Vázquez et al., 1990, Turner, 1992; Salvador, 1993; Vázquez-Gutiérrez, et al., 1998) y en los meses de primavera existen concentraciones entre 37.4 y 44.5 μM ; esto es porque la influencia de los vientos tehuanos se extiende en muchas ocasiones a los meses de primavera, con mayor aporte en el lado occidental del golfo (Millero y Sohn, 1992). La figura 23 muestra el promedio del perfil vertical histórico, sin hacer referencia a meses (primavera) o zonas (lado occidental del golfo).

En cuanto a la distribución horizontal en el GT se presentan dos distribuciones características. Durante la época de vientos Tehuanos las aguas profundas ricas en nutrientes provocan un enriquecimiento cerca de la superficie, desplazándolo hacia la parte oeste del golfo y en las lluvias se observa un gran aporte proveniente de la CCCR (Roden, 1961).

En la figura 23 se puede observar que la mayor concentración de nitratos para el GT es de $46.6 \mu\text{mol L}^{-1}$ a 1000 m de profundidad.

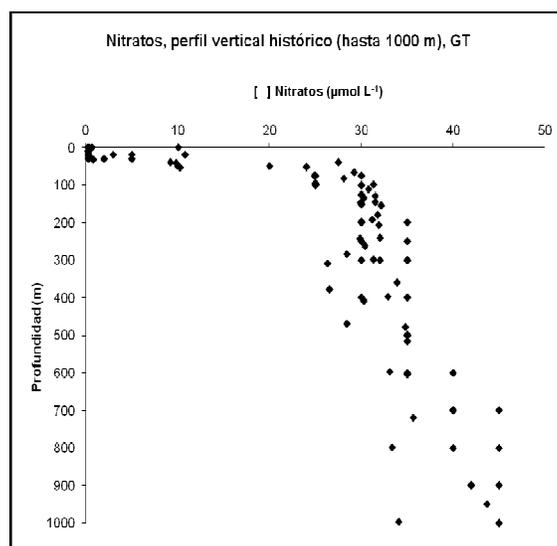


Figura 23. Perfil vertical histórico de nitratos para el Golfo de Tehuantepec (NOAA 1923-2013).

5.1.9.7. Amonio.

La distribución horizontal y vertical de este parámetro es difícil de describir debido a la dispersión de los datos reportados y al error analítico del método en el límite de detección (Turner, 1992); no obstante, se puede establecer que el intervalo de concentración para el GT es < 0.02 a $5.6 \mu\text{M}$. (Turner, 1992).

5.1.9.8. Ortofosfatos.

Los mayores promedios registrados se presentan durante la época de tehuanos al igual que en la época de secas. Dicho incremento se puede deber a la surgencia o enfriamiento costero que ocurre entre octubre y marzo, que permite un intercambio de agua entre el agua de superficie y la profunda y a la oxidación de la materia orgánica (Vázquez-Gutiérrez *et al.*, 1998; Millero y Sohn, 1992; Okuda, 1981; Riley y Chester, 1971).

La concentración del fósforo inorgánico respecto a la profundidad permite establecer que, durante los Tehuanos, la concentración en la superficie rápidamente alcanza valores mayores a $2 \mu\text{M}$ y se incrementa hasta $3.5 \mu\text{M}$ desde los 50 m a los 200 m de profundidad; mientras que durante las secas la concentración en la zona eufótica no alcanza valores mayores a $1.5 \mu\text{M}$, excepto cuando la dinámica oceanográfica es muy inestable y pudiendo presentar concentraciones entre 3.2 y $3.3 \mu\text{M}$. La concentración de los ortofosfatos por debajo de la termoclina alcanza valores mayores a $3 \mu\text{M}$ para la época de tehuanos, mientras que para la temporada de secas solamente alcanza valores mayores a $1 \mu\text{M}$. La concentración máxima de ortofosfatos coincide con el mínimo de oxígeno y la termoclina (Millero y Sohn, 1992; Millero, 1996)

La distribución horizontal del ortofosfato a 50 m de profundidad presenta más homogeneidad durante la época de lluvias mientras que durante la época de Tehuanos es menos homogénea; no obstante se ha observado un incremento de la concentración sobre el eje del viento y principalmente una mayor concentración hacia la parte oeste del golfo, motivada por la dirección de la corriente y los giros que la forman (Vázquez-Gutiérrez *et al.*, 1998; Lavín *et al.*, 1992; Roden, 1961). No se han observado en el área ningún aporte importante de ortofosfatos proveniente de ríos, lagunas, etc.

En el perfil histórico de fosfatos, se puede observar que la mayor cantidad de estos se observa a 750 m de profundidad con una concentración de $54.02 \mu\text{mol L}^{-1}$ (Figura 24).

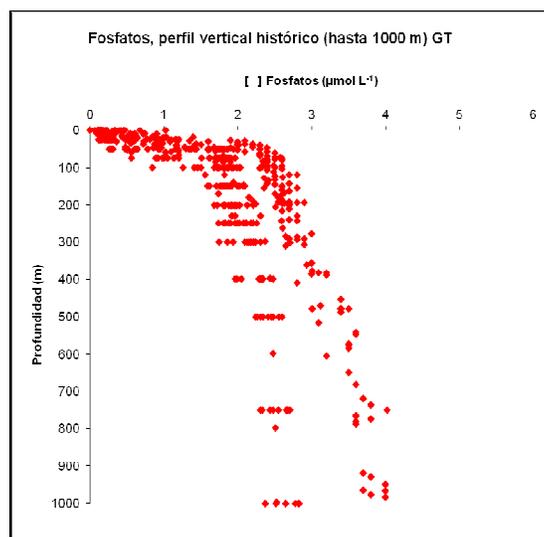


Figura 24. Perfil vertical histórico (hasta 1000 m) de fosfatos para el Golfo de Tehuantepec (NOAA 1923-2013).

5.1.9.9. Silicatos.

Las mayores concentraciones de Si_2O_3 se han observado durante la época de los Tehuanos y durante las lluvias. Durante la época de secas, las concentraciones son menores debido a la actividad del crecimiento de organismos (Vázquez-Gutiérrez, *et al.*, 1998; Millero, 1962; Turner, 1992).

La distribución vertical de los silicatos durante los vientos Tehuanos resulta ser mayor que durante el verano debido al enfriamiento superficial característico del golfo. La concentración en superficie fue semejante a la reportada para aguas del Pacífico (Burke *et al.*, 1983) mientras que el incremento con respecto a la profundidad se aprecia de manera significativa.

La distribución horizontal de los silicatos muestra un aporte claro de los ríos que drenan en las costas de Chiapas y que se desplaza por efecto de las corrientes hacia la parte oeste del golfo (Vázquez-Gutiérrez *et al.*, 1998).

En cuanto al nivel de silicatos para el GT, el máximo se observa a 517 m de profundidad con un valor de $389.6 \mu\text{mol L}^{-1}$ y se puede ver que existe una menor concentración de este compuesto en la zona superficial y fótica del lugar (Figura 25).

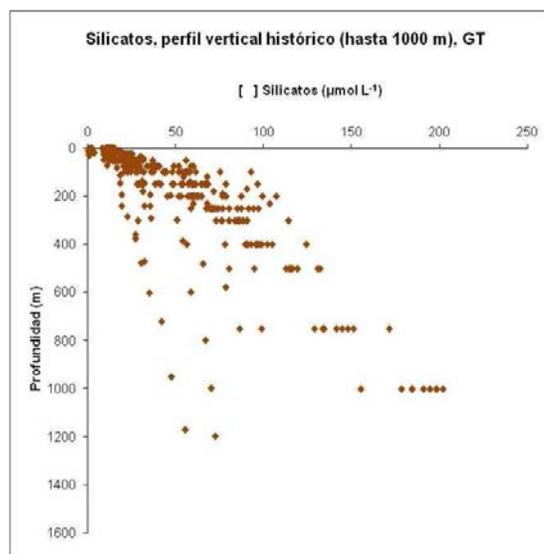


Figura 25. Perfil vertical de silicatos para el Golfo de Tehuantepec (NOAA 1923-2013).

5.1.9.10. Parámetros específicos poco medidos.

La continuidad en las mediciones es una de las características indispensables de los estudios oceanográficos y costeros ya que nos permite establecer los cambios que se presenten en cualquier ecosistema marino; sin embargo, en México esta no se sigue en la mayoría de los trabajos por lo que algunos fenómenos como el ENSO, la magnitud de la productividad nueva y la presencia de mareas rojas son difíciles de monitorizar así como generar una explicación a estos fenómenos.

La medición de parámetros más específicos como velocidad y dirección de la corriente, y de algunos elementos como la pCO_2 , el CO_2 total, el hierro (II), y de parámetros comunes como clorofila, oxígeno disuelto y pH con sensores, etc., se deben realizar rutinariamente en futuras investigaciones lo cual permitiría enriquecer los trabajos y, se deberá establecer el efecto del óxido de hierro sobre la productividad nueva del GT se debe de establecer para comprender de manera completa el Pacífico Oriental Tropical.

5.1.9.10.1. Clorofila.

Este parámetro ha sido monitorizado de manera limitada, tanto por cruceros internacionales como mexicanos. Sin embargo, los pocos datos históricos reportados permiten establecer que el máximo de concentración se presenta en aguas superficiales ($1.37 \mu\text{g L}^{-1}$) entre los 20 y 40 m de profundidad y observándose un descenso conforme aumenta la profundidad donde, a partir de los 200 m los valores son de $0 \mu\text{g L}^{-1}$ (Figura 26).

Algunos otros reportes indican que la clorofila *a* presenta distribución vertical diferenciada por fracciones de tamaño (microfitoplancton > 20 μm y nanofitoplancton < 20 μm) en el GT. Los valores máximos se observan en la zona oeste con la mayor contribución por parte del microfitoplancton; mientras tanto, en las regiones central y este el nanofitoplancton tiene la mayor contribución a la concentración total de clorofila *a*. Los valores se encuentran en un rango que se ha observado históricamente va de 0.04 a 11.1 mg m^{-3} , con un promedio de 1.42 mg m^{-3} (Turner, 1992).

Los valores del contenido de clorofila-*a* integrada a través de la zona eufótica son similares tanto en la zona central como en el este con valores de 41.1 y 35 mg m^{-3} , respectivamente, mientras que la región occidental registra valores máximos de hasta 90.3 mg m^{-3} .

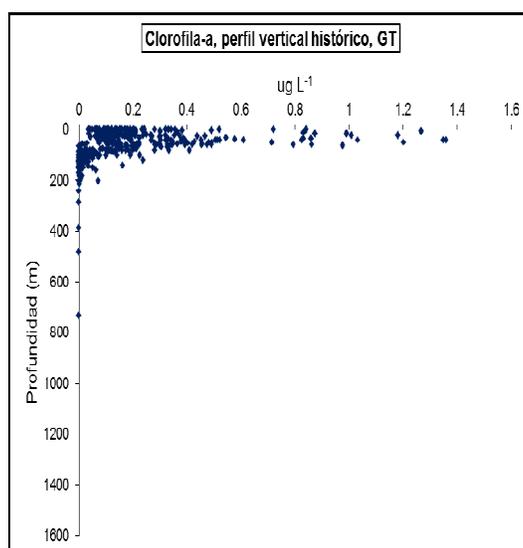


Figura 26. Perfil vertical histórico de clorofila *a* para el Golfo de Tehuantepec (NOAA 1923-2013).

5.1.10. Oceanografía biológica.

Debido a que la planta OTEC descarga tanto agua fría profunda como cálida superficial durante su operación, se considera que se produce una surgencia o afloramiento de tipo artificial y por lo tanto, se debe de comprender adecuadamente el funcionamiento del GT como un área de surgencia de tipo eólica lo cual permitirá analizar y comprender adecuadamente las posibles consecuencias o efectos que pueda tener la pluma de descarga de agua de la planta en la columna de agua. Por este motivo, a continuación se describen las características biológicas importantes de la zona.

Como se mencionó anteriormente, las surgencias representan una bomba de nutrientes y carbono fitoplanctónico que enriquecen las aguas adyacentes en el Pacífico oriental tropical y determinan una alta productividad (Robles-Jarero y Lara-Lara 1993). Como evidencia de la alta producción derivada de las surgencias se reportan dos áreas del fondo marino con altas concentraciones de fosforita.

Es por esta razón que la zona representa una de las principales zonas de pesca del país. Por ejemplo, tiene el cuarto lugar nacional en cuanto a la producción de camarón. Además, existen varios sistemas lagunares donde la actividad de pesca artesanal es intensa y está dirigida principalmente hacia el camarón. A pesar de todo ello, la producción pesquera se encuentra entre los 600,000 y 800,000 toneladas en peso vivo (entre 1971 y 2010) con un promedio anual de 345,789 toneladas; ocupando entre el 13avo. y el 16avo. lugar con respecto de la producción pesquera nacional (Tapia-García y Gutiérrez-Díaz, 1998; Secretaría de Pesca, 2010).

En la zona de la plataforma continental se ha observado una sensible caída en la producción pesquera y los estudios son insuficientes para entender o de explicar dicho comportamiento. A pesar de esto, se sabe que una de las principales causas es la sobreexplotación del stock de especies comerciales, principalmente el camarón, a pesar de que anualmente se aplica una veda temporal en la zona. Es por esto que deben añadirse a las investigaciones en la zona aquellas que tendientes a conocer la dinámica ecológica de los recursos existentes y sentar bases para futuras investigaciones y estrategias para el manejo de estos recursos bióticos.

Tapia-García (1998) realizó una evaluación ecológica de la ictiofauna demersal existente en la zona reportando un total de 178 especies, 103 géneros y 52 familias pero que aunado a otros reportes puede elevarse la cifra a 217 especies y en donde los altos valores de biomasa se encuentran entre la Boca de San Francisco y la Boca de Tonalá y disminuyen a mayor profundidad y con la estacionalidad pues en época de secas y de tehuanos existe la menor biomasa encontrada y la mayor se registra durante la época de lluvias y esto mismo aplica para la densidad. La mayor riqueza se presenta enfrente de los sistemas lagunares.

En cuanto a los recursos pesqueros, en el GT son características las especies tropicales, en su mayoría demersales como se explicó anteriormente y que tienen una fuerte influencia de los procesos continentales (costeros) y oceánicos, como la descarga de ríos y la surgencia eólica presente durante los meses de octubre a febrero. A pesar de esto, las pesquerías de los estados pertenecientes a esta región (Oaxaca y Chiapas) han sido poco estudiadas por lo que los esfuerzos iniciales es en el sentido de generar un inventario de recursos bióticos y trabajos de investigación sobre la dinámica de los mismos. La zona es principalmente camaronera pero existen pesquerías importantes como las de mojarra, tortuga, lisa y tiburón mientras que otras que no representan un gran volumen pesquero son las de barrilete, atún, pez vela, dorado, huachinango, corvina, pargo, robalo y bagre (Tapia-García y Gutiérrez-Díaz, 1998).

A pesar de lo anterior, los valores de productividad primaria reportados para la región del Golfo de Tehuantepec son muy escasos. No se conoce aún la variabilidad estacional de la productividad para esta región (Lara-Lara *et al.* 2003). Los procesos costeros tienen una fuerte influencia sobre la biología y ecología de las especies, por lo que se reconoce como una macrorregión ecológica marina donde confluyen dos provincias zoogeográficas marino-costeras (Mexicana y Panámica) de biodiversidad y endemismo característicos, con su límite entre ellas frente a Salina Cruz.

Dada la importancia biológica y ecológica del Golfo de Tehuantepec y la presión que existe sobre sus recursos naturales, asociada al acelerado crecimiento poblacional

en la zona costera, es necesario implementar medidas de desarrollo sostenible con base en el conocimiento de la dinámica ecológica de sus recursos, sin negar las condiciones ecológicas y termodinámicas que establecen límites a la apropiación y transformación de la naturaleza, límites que no son bien conocidos y en muchos casos ya han sido sobrepasados sin lograr el deseado desarrollo sostenible.

5.1.10.1. Antecedentes.

Las primeras evidencias de una alta fertilidad del GT fueron conocidas durante las expediciones EASTROPIC (1955) y EASTROPAC (1967-1968). Desafortunadamente, desde entonces se han realizado muy pocas investigaciones sobre las tasas de productividad primaria para esta región. Las escasas investigaciones realizadas en el GT sobre procesos planctónicos sugieren que al menos durante Nortes, el golfo actúa como una bomba de nutrientes y carbono fitoplanctónico, enriqueciendo las aguas adyacentes en el PTO. Durante el resto del año, el golfo se comporta como un ecosistema tropical con valores bajos de biomasa y productividad de fitoplancton (Lara-Lara *et al.*, 1998).

En este sentido, la composición de la comunidad planctónica del GT es prácticamente desconocida, a pesar de la importancia de esta región debido a su alta productividad marina, que ha llevado a estudiar de manera intensiva, los mecanismos que favorecen a esa característica. Los fuertes vientos, conocidos como Tehuanos, que soplan en el golfo de noviembre a febrero, se consideran un factor importante en los procesos de producción biológica porque producen surgencias que incrementan las concentraciones de nutrientes en las capas superficiales de la columna de agua.

Robles Jarero y Lara Lara (1993) estudiaron la fertilidad del golfo en invierno. Durante este período de estudios los vientos presentaron una intensidad máxima de 16 m s^{-1} generando una fuerte mezcla vertical a lo largo del eje central del golfo, causando una fuerte anomalía de temperatura superficial (hasta de 10°C), rodeada por frentes térmicos.

Los primeros valores de micronutrientes inorgánicos para el golfo fueron reportados por Love (1972) y Love y Allen (1975) con valores promedio de $0.8 \mu\text{M}$ para fosfatos y $0.2 \mu\text{M}$ para silicatos. Robles Jarero y Lara-Lara (1993) reportaron valores para la concentración de micronutrientes en el Golfo de Tehuantepec en invierno. Dividieron el golfo en tres regiones: la zona central presentó los valores promedios más altos ($1.2 \mu\text{M}$ para fosfatos y $10.2 \mu\text{M}$ para silicatos), seguido por la zona este ($1.1 \mu\text{M}$ para fosfatos y $9.2 \mu\text{M}$ para silicatos) y los valores más bajos para la zona oeste ($0.8 \mu\text{M}$ para fosfatos y $6.0 \mu\text{M}$ para silicatos). Las distribuciones verticales para ambos, fosfatos y silicatos, presentaron tendencias similares, incrementándose rápidamente con la profundidad. Las nutriclinas se registraron a profundidades muy superficiales dentro de la zona eufótica. Esta característica de termoclinas y nutriclinas muy superficiales permite que en estas regiones del golfo, aún con bajas intensidades del viento, se enriquezca la zona eufótica de los micronutrientes necesarios para la fotosíntesis del fitoplancton.

5.1.10.2. Pigmentos fotosintéticos.

Los primeros datos sobre la concentración de clorofila *a* en muestras superficiales fueron registrados en las campañas oceanográficas realizadas bajo los programas EASTROPIC y EASTROPAC (Blackburn, 1962; Owen y Zeitzschel, 1970). Por otra parte, Robles Jarero y Lara Lara (1993) realizaron una investigación más detallada sobre la distribución espacial (horizontal-vertical) de la clorofila *a*. Estos autores reportaron distribuciones verticales de clorofila *a* por fracciones de tamaño (microfitoplancton > 20 μm y nanofitoplancton < 20 μm) para el fitoplancton del golfo. Los valores máximos de clorofila *a* en la superficie se registraron en la región oeste del golfo con la mayor contribución por parte del microfitoplancton, por el contrario, en la región central y oriental, el nanofitoplancton tuvo la mayor contribución a la concentración de la clorofila total. La clorofila *a* total tuvo un rango de 0.04 a 11.1 mg m^{-3} , con un promedio de 1.42 mg m^{-3} .

Los valores del contenido de clorofila *a* integrada a través de la zona eufótica fueron similares tanto en la región central como en la región oriental, promediando 41.1 y 35 mg m^{-3} , respectivamente, mientras que la región occidental promedió datos de hasta 90.3 mg m^{-3} . Lluch-Cota *et al.* (1997) presentaron una descripción de las variaciones en la concentración de pigmentos fotosintéticos en la zona del Pacífico Tropical Mexicano a partir de imágenes de satélite del color del océano generadas por el "Coastal Zone Color Scanner". Basándose en la distribución de pigmentos, la zona de estudio la dividieron en cuatro regiones: a) La zona costera, con niveles de concentración altos, b) La zona oceánica con niveles bajos, c) El Golfo de Tehuantepec con niveles medios de concentración de pigmentos fotosintéticos y con los máximos entre los meses de noviembre a febrero y d) La zona sureste, influenciada durante el verano por las aguas productivas de la Corriente Costera de Costa Rica y en el invierno por el Golfo del Papagayo.

Aunque es difícil comparar los valores de concentración de pigmentos reportados por Lluch-Cota *et al.* (1997) con los anteriores, debido a las diferentes metodologías utilizadas, las tendencias espaciales y temporales de la distribución de pigmentos fotosintéticos son similares.

5.1.10.3. Productividad primaria.

Las primeras evidencias de una alta fertilidad en el Golfo de Tehuantepec fueron conocidas en la expedición EASTROPIC realizada en 1955. Con base en cartas hidrográficas trimestrales elaboradas bajo este programa, Cromwell (1956) señaló que la capa de mezcla en el Golfo de Tehuantepec presentaba una profundidad promedio de entre 10 y 30 m, siendo la más somera de octubre a diciembre. Por otra parte, Holmes *et al.* (1957) y Brandhorst (1958) reportaron los valores más altos para la biomasa del zooplancton en las estaciones del golfo, dentro de una extensa área estudiada en el Pacífico Tropical Oriental, indicando también una alta fertilidad planctónica.

Los primeros estudios de las tasas de productividad primaria en el golfo se realizaron en aguas superficiales en cuatro campañas oceanográficas durante 1958-1959 (Blackburn, 1962). Durante estas investigaciones se hicieron mediciones de 4

a 6 estaciones durante diferentes épocas del año. Los valores más altos se registraron en las campañas realizadas entre noviembre y febrero.

Entre 1967 y 1968 se efectuaron siete campañas oceanográficas al Océano Pacífico Tropical Oriental bajo el programa EASTROPAC. Durante este estudio se muestrearon dos estaciones en aguas oceánicas adyacentes al Golfo de Tehuantepec, los máximos valores para productividad primaria se registraron para febrero-marzo (Owen y Zeitzschel, 1970).

Los valores más recientes para las tasas de productividad del fitoplancton del golfo fueron reportados por Robles Jarero y Lara-Lara (1993) para 12 estaciones en un estudio realizado entre enero y febrero de 1989. La productividad primaria total promedio fue de $5.3 \text{ mg C m}^{-3}\text{h}^{-1}$ y varió de 0.20 a $40.4 \text{ mg C m}^{-3}\text{h}^{-1}$. Las tasas más altas se registraron en las estaciones de la región occidental del golfo. Con excepción de algunas estaciones en la región occidental, en general, el nanofitoplancton tuvo la mayor contribución a la productividad total. Las tasas de productividad primaria diaria presentaron un rango que van desde 69.1 hasta $142.64 \text{ mg C m}^{-2} \text{ día}^{-1}$. Las tasas de la región central y occidental fueron similares. Las tasas mínimas se registraron en la región oriental del golfo. Los valores de las tasas de productividad de las estaciones costeras fueron casi el doble de las estaciones fuera de la costa.

La naturaleza intermitente de los vientos introduce una fuerte dinámica de las propiedades químico-biológicas del golfo. Las imágenes de satélite muestran claramente las características de los giros anticiclónicos y el efecto del viento en la hidrografía. Trasviña (1991) y Lavín *et al.* (1992) han propuesto que la capa superior (150-200 m) del golfo puede ser clasificada en tres regímenes hidrográficos diferentes. Robles Jarero y Lara-Lara (1993) encontraron diferencias significativas en la biomasa y productividad del fitoplancton en sólo dos de los regímenes propuestos. En la región oeste, caracterizada por una mayor estratificación, se registraron los máximos valores de biomasa y productividad, mientras que en las regiones central y oriental, caracterizadas por una intensa mezcla, se determinaron valores menores de biomasa y productividad.

También reportaron los valores más altos para las razones de asimilación para la región central del golfo, esto indica un suplemento continuo de nutrientes en esta región. En comparación con otras regiones productivas del Océano Pacífico, en el Golfo de Tehuantepec se han registrado valores más bajos para las razones de asimilación, esto probablemente esté asociado a regímenes de menor irradiancia a los cuales el fitoplancton es expuesto debido a la intensa mezcla vertical durante los nortes.

Por otro lado, en ambientes tan variables como el golfo, cualquier cambio espacial o temporal aún con condiciones similares de nutrientes, provoca grandes cambios en las biomásas y tasas de productividad del fitoplancton. Cambios en la estructura y tamaño de las poblaciones del fitoplancton también influyen significativamente en determinar la biomasa y productividad de una región (Lara-Lara *et al.*, 1998).

Las escasas investigaciones realizadas en el Golfo de Tehuantepec sobre las tasas de productividad primaria del fitoplancton, sugieren que al menos durante la estación

de los nortes, el Golfo de Tehuantepec actúa como una bomba de nutrientes y carbono fitoplanctónico, enriqueciendo las aguas adyacentes en el Pacífico Oriental Tropical. Durante otras épocas, el golfo se comporta con valores bajos de biomasa y tasas de productividad.

5.1.10.4. Composición y abundancia del fitoplancton.

La composición y abundancia del fitoplancton del Golfo de Tehuantepec fueron reportadas por Robles Jarero (1991). Registró el grupo de nanoflagelados ($< 10 \mu\text{m}$) como el más abundante a través de todo el golfo, la siguió en orden de importancia numérica las diatomeas y por último el grupo menos abundante fue el de los dinoflagelados. En cuanto a distribución espacial, las diatomeas constituyeron el grupo dominante en la región oeste del golfo, sobresaliendo las especies *Nitzschia closterium*, *Chaetoceros* sp. y *Navicula* sp. En la región este dominaron los nanoflagelados ($< 10 \mu\text{m}$).

En cuanto a los estudios propiamente del fitoplancton, a pesar de que existen ciertos trabajos previos, ninguno corresponde a estudios continuados, abarcando todos los grupos y fracciones del fitoplancton, algunos incluso tienen poca importancia, debido a que la identificación de los taxa se hace al nivel de género y finalmente otros incluyen el estudio del fitoplancton de localidades puntuales. A pesar de esto, se destacan trabajos como los de la evaluación de los recientes casos de mareas rojas tóxicas producidas por el dinoflagelado *Pyrodinium bahamense* var. *compressum* en el golfo (Cortés-Altamirano *et al.* 1993) y Meave del Castillo *et al.* (2006) acerca de los florecimientos de esta misma especie a lo largo de la costa sur del Pacífico mexicano y Centroamérica; Aké-Castillo (1997) realizó un estudio morfológico-taxonómico de los taxa pertenecientes a los dos grupos de diatomeas centrales más importantes en el golfo; Aké-Castillo *et al.* (1999) trabajó sobre las especies del género *Thalassiosira* (Bacillariophyceae) del Golfo de Tehuantepec y Meave del Castillo y Hernández-Becerril (1998) dieron a conocer la composición y distribución fitoplanctónica a partir de la revisión de muestras colectadas con red de $54 \mu\text{m}$ durante tres cruceros oceanográficos, efectuados en enero, mayo y noviembre de 1989.

Con respecto a este último, se identificaron 238 taxa, correspondientes a 128 diatomeas (*Pseudonitzschia* spp.), 102 dinoflagelados (*Pyrodinium bahamense* var. *compressum* y *Gymnodinium catenatum* entre las más importantes) 5 cianofitas y 3 silicoflagelados, además de anexar otros 85 taxa de otras investigaciones, lo que muestra una rica comunidad fitoplanctónica presente en el golfo. Se encontraron asociaciones marcadas entre dinoflagelados y diatomeas, generando comunidades mezcladas además de que la distribución de los diferentes grupos se condiciona dependiendo de las características hidrográficas del golfo y las condiciones ambientales en las tres zonas geográficas en las que se divide.

5.1.10.5. Procesos de florecimiento fitoplanctónico perjudicial, sus efectos e investigaciones realizadas en México.

La importancia de las especies mencionadas en la sección anterior es debida a que se ha observado que forman parte de las floraciones algales nocivas (FAN), conocidas comúnmente como "marea roja". Este proceso natural se ha presentado a

lo largo de la historia pero en la actualidad, su presencia en diversas partes del mundo es cada vez más frecuente. Tal fenómeno se considera que se ha visto favorecido por los procesos de eutroficación, el uso de las zonas costeras para actividades de acuicultura, pesca e industriales, así como los cambios meteorológicos a gran escala (El Niño, efecto invernadero, entre otros) y el transporte de quistes en el lastre de embarcaciones (Hallegraeff, 1995; Morquecho y Lechuga, 2003).

El número de especies de fitoplancton perjudicial (excluyendo a aquellas que causan agotamiento o taponamiento de las agallas de los peces) incluyen 27 dinoflagelados, 5 cloromonadas, 2 chrysofitas, 5 prymnesioideas y 4 diatomeas (Taylor, 1990; Corrales y McLean, 1995). Otros listados incluyen otras especies de agua dulce y marina, otras especies tóxicas y aquellas asociadas con otros tipos de afectación en moluscos (Shumway, 1990); Carmichael *et al.* (1990) enlista 12 géneros de cianofitas implicados en el proceso letal agudo de las toxinas.

El principal impacto de las FAN se manifiesta con la transferencia de ficotoxinas a niveles tróficos superiores. Las toxinas se acumulan por pastoreo directo, iniciando su viaje a través de la red trófica y sus mecanismos de acción dependen de las cualidades toxicológicas. En la mayoría de los casos las toxinas actúan a nivel de las membranas excitables, alterando el flujo de iones en las células o inhibiendo reacciones enzimáticas (Hall, 1991; Turner, 1997) en organismos superiores como aves, peces, mamíferos marinos, e incluso el hombre.

Las toxinas producidas por microalgas (y por otra variedad de organismos marinos) tienen en común la propiedad de modificar las funciones de los canales iónicos a través de las membranas celulares y pueden clasificarse como activadores, estabilizadores y oclusoras (Strichartz y Castle, 1993). Aquellas que presentan un alto potencial de afectación son: las activadoras que causan el DSP (Diarrhetic Shellfish Poisoning) y la ciguatera (CFP) y las oclusoras que son causantes de la PSP (Paralytic Shellfish Poisoning) por saxitoxinas y la tetrodotoxina (Corrales y McLean, 1995).

Cabe aclarar que no todas las FAN son tóxicas; en algunos casos éstas pueden ocasionar daños físicos o mecánicos (oclusión de branquias y lisis en tejidos epiteliales de peces y moluscos), hambruna en el entorno afectado, liberación de metabolitos (amonio) o de sustancias alelopáticas, generación de barreras físicas (por sustancias viscosas o gelatinosas) y condiciones anóxicas (Smayda, 1997).

En México los FAN son eventos comunes, tanto en la costa Pacífica como del Golfo de México y el Caribe, los cuales se han incrementado sustancialmente en los últimos 20 años, en parte por el mayor número de investigadores trabajando en el tema, lo que permite ampliar el número de registros y zonas estudio, aunque también por los cambios en los ecosistemas de origen natural y/o antropogénico (eutrofización, calentamiento global, transporte de organismos, deterioro del ambiente costero, incremento de actividades de acuicultura, uso de fertilizantes para la agricultura, etc.).

Investigadores mexicanos han publicado al menos 13 revisiones relacionadas con los FAN. La mayoría de estos trabajos han abordado el registro de especies

responsables de FAN y la producción de toxinas detectadas en nuestras costas (Cortés- Altamirano *et al.*, 1996; Ochoa *et al.*, 1997, 1998, 2002; Cortés-Altamirano, 1998; Gómez-Aguirre, 1998a; Sierra-Beltrán *et al.*, 1998; Herrera-Silveira & Ojeda-Alayón, 1999; Ochoa, 2003; Hernández-Becerril *et al.*, 2007; Cortés-Altamirano & Sierra-Beltrán, 2008), el efecto de FAN en cultivos de camarón (Alonso-Rodríguez & Páez-Osuna, 2003) y en organismos silvestres (Núñez-Vázquez *et al.* 2011); también se han realizado análisis de trabajos específicos en especies responsables de FAN presentes en nuestras costas (Hernández-Becerril, 1998; Sierra-Beltrán *et al.* 2005a; Ramírez-Camarena *et al.* 2006; Band-Schmidt *et al.* 2010).

Estos trabajos evidencian el incremento de registros de FAN, así como el número de especies tóxicas/nocivas y ficotoxinas registradas en nuestro país, que va a la par del número de investigadores trabajando en el tema. La mayoría de esos autores coinciden en concluir en la importancia de implementar un programa de monitoreo en las costas mexicanas para el manejo adecuado de los recursos marinos, así como en realizar estudios multidisciplinarios para un mayor entendimiento de tales eventos (Band-Schmidt *et al.* 2011).

5.1.10.6. Productos tóxicos.

Envenenamiento y parálisis por consumo de moluscos (PSP)

Los venenos conocidos colectivamente como saxitoxinas causan PSP e incluye varios tipos como neosaxitoxinas, gonyautoxinas, decarbamoyl saxitoxinas y otras (Hall *et al.* 1990). Algunas especies que causan este efecto perjudicial son *Alexandrium* spp., *Gymnodinium catenatum* y *Pyrodinium bahamense*, principalmente la variedad *compressum*. Las toxinas han sido encontradas en diferente proporción en diferentes algas y sus consumidores. Los bivalvos filtradores y los gasterópodos (que se alimentan de estos) transfieren las toxinas a través de la cadena trófica hasta el último eslabón, el ser humano. Otras vías incluyen zooplancton hacia peces, mamíferos marinos y en algunos casos, aves. Algunos casos de envenenamiento en humanos se dan por consumo de peces fitoplanctívoros con reportes de síntomas respiratorios, neurológicos y gastrointestinales (Maclean, 1993).

Envenenamiento y efecto diarreico por consumo de moluscos (DSP)

La ingestión de moluscos que han acumulado toxinas de los dinoflagelados del género *Dinophysis* spp. pueden causar diarrea nonfatal (gastrointestinal) por envenenamiento por consumo de moluscos. Existen 11 toxinas que generan el DSP divididas en tres grupos: ácido okadáico y sus derivados; pectenotoxina y yessotoxina (Yasumoto y Murata, 1990).

Envenenamiento por ciguatera (CFP)

Gambierdicus toxicus, un alga bentónica y epífita de macroalgas, es la responsable del envenenamiento por ciguatera, causa enfermedades en los humanos a través del consumo de peces tropicales de arrecife, los cuales se alimentan de microalgas. Este envenenamiento ha sido reportado ampliamente en el Pacífico sur y también en

la zona del Golfo de México y Mar Caribe (*Bagnis et al.* 1990, *Cortés-Altamirano et al.* 1998).

Envenenamiento y efecto amnésico por consumo de moluscos (ASP)

Pérdida de memoria de corto plazo, desórdenes gastrointestinales y en algunos casos, la muerte, son características de la intoxicación en humanos por este efecto. El daño neurológico es permanente (*Smith et al.* 1990; *Todd*, 1990). El ácido domoico, un aminoácido neurotóxico es la causa del ASP. Este es producido por *Pseudonitzschia* (= *Nitzschia*) *pungens* y otras 14 especies del género.

Con el fin de entender las causas, predecir su ocurrencia y mitigar los efectos de las FAN, se han implementado programas educativos y de investigación, así como actividades operacionales como el programa Harmful Algal Blooms (HAB) de la Comisión Oceanográfica Intergubernamental (COI-UNESCO) el cual propone enfocar la investigación en temas relacionados con el registro de los eventos y su descripción; la identificación de especies y biodiversidad; definir los modelos de producción de toxinas, toxicidad y bioacumulación, así como profundizar en el estudio de los mecanismos ecofisiológicos que propician la presencia de las microalgas nocivas y conocer la influencia de actividades antropogénicas en la recurrencia de las FAN en las zonas costeras.

La investigación referente a las especies tóxicas y su biodiversidad ha logrado establecer que de las 3,400 especies que componen la diversidad fitoplanctónica de los océanos, sólo 300 (7%) desarrollan mareas rojas e incluyen diatomeas, dinoflagelados, silicoflagelados, prymnesiofitas y rafdofitas (*Sournia*, 1995); de éstas, entre 60 y 80 especies, el 2% son tóxicas (*Anderson*, 1989; *Smayda*, 1997).

5.1.10.7. Especies de fitoplancton responsables de FAN en el Pacífico mexicano.

En México existen varias especies microalgales que han sido responsables de FAN y que han impactado a diversos organismos causando intoxicaciones y muerte en el hombre. A continuación se detalla la información que se conoce de algunas de las especies responsables de FAN más estudiadas en México.

Gymnodinium catenatum Graham, es un dinoflagelado productor de toxinas paralizantes que se distribuye a lo largo del Pacífico Mexicano (*Band-Schmidt et al.*, 2010) y una de las especies formadoras de FAN de la cual se tiene mayor cantidad de información publicada por autores mexicanos que fue descrita por primera vez en el Golfo de California (*Graham*, 1943). Existen pocos registros sobre las condiciones físicas y químicas de los diversos ecosistemas relacionados con los FAN de *G. catenatum* en México, sin embargo, se ha concluido que esta especie tolera un amplio intervalo de temperatura, salinidad y proporciones de N:P, lo que probablemente ha permitido su amplia distribución en el Pacífico Mexicano (*Band-Schmidt et al.*, 2010).

Los análogos de saxitoxinas que comúnmente se presentan en cepas de *G. catenatum* del Pacífico Mexicano son: dcSTX, dcGTX2-3, C1 y C2 (*Band-Schmidt et al.*, 2005a). Se han publicado los efectos de estas toxinas en moluscos, ratones y

crustáceos (Alonso-Rodríguez *et al.*, 2004b; Estrada *et al.*, 2007, 2010; Pérez-Linares *et al.*, 2008, 2009; Núñez-Vázquez *et al.*, 2008a; Heredia-Tapia *et al.*, 2010). Sin embargo, en otros estudios realizados como en el copépodo *Acartia clausi* (Giesbrecht, 1889) no se encontraron efectos adversos a corto plazo (Palomares-García *et al.*, 2006). Recientemente se han reportado toxinas tipo benzoato (GC1, GC2 y GC3) en una cepa de *G. catenatum* del Golfo de California (Bustillos-Guzmán *et al.* 2011), aunque aún falta por comprender las implicaciones que puedan tener estas nuevas toxinas en la regulación sanitaria.

Pyrodinium bahamense Plate, otro dinoflagelado productor de toxinas paralizantes, es la especie que más intoxicaciones y muertes ha causado en México. Se ha reportado principalmente en la región del Golfo de Tehuantepec (Sotomayor-Navarro, 1994), las costas de Guerrero (Gárate-Lizárraga *et al.*, 2011), también en Michoacán (Orellana-Cepeda *et al.*, 1998), Golfo de México y el Caribe (Gómez-Aguirre & Licea-Durán, 1998), encontrándose elevadas concentraciones de toxinas paralizantes en moluscos (520-7309 µg equiv. STX 100 g⁻¹ de acuerdo con Gómez-Aguirre y Licea-Durán, 1998). Los eventos en el Golfo de Tehuantepec, Oaxaca, en las costas de Guerrero y Michoacán se debieron a la variedad *compressum* (Bohm) Steidinger, Tester *et Taylor* de *P. bahamense* (Orellana-Cepeda *et al.*, 1998; Ronsón-Paulín, 1999; Gárate-Lizárraga *et al.*, 2011). En el FAN de 1995 en las costas de Guerrero y Michoacán se registró una gran mortandad de tortugas y peces (Orellana-Cepeda *et al.*, 1998).

Recientemente esta especie se ha registrado en el sur del Golfo de California en abundancias de bajas a moderadas (100-110 × 10³ cel. L⁻¹), presentando una mayor similitud con la variedad *bahamense* (Martínez-López *et al.*, 2007; Morquecho, 2008a). Al igual que en el Golfo de México, los florecimientos se presentaron en lagunas costeras someras, rodeadas por manglares durante los meses cálidos (25-32°C), en temporada de lluvias y asociados con concentraciones relativamente elevadas de amonio y fosfatos (Morquecho *et al.*, 2010). Los efectos tóxicos las de toxinas paralizantes de moluscos bivalvos (PSP) asociados a FAN de *P. bahamense* var. *compressum* en el Pacífico Sur Mexicano, han sido evaluados en exposiciones agudas usando bioensayos en ratones (Núñez-Vázquez *et al.*, 2008a). Los perfiles cromatográficos de estas toxinas durante los eventos (1989, 1995, 2001 y 2010) que han tenido el mayor impacto en la salud pública en México estuvieron compuestos por STX, GTX2, dcSTX, dcGTX2, dcGTX3 y B1 en el ostión *Crassostrea iridescens* (Hanley, 1854) STX, NeoSTX, GTX2, GTX3 y B1 en la almeja *Donax gracilis* (Hanley, 1845) y STX, GTX2, GTX3 y B1 en el mejillón *Modiolus capax* (Conrad, 1837). En todos los perfiles predominaron las toxinas carbamatadas (Núñez-Vázquez *et al.*, 2007a), de mayor potencial tóxico. A la fecha, no existen estudios de laboratorio referentes a la influencia de factores físicos y químicos sobre la el potencial tóxico de cepas mexicanas de *P. bahamense*.

Especies de diatomeas del género *Pseudo-nitzschia* spp. se han reportado recientemente en diversos sitios del Pacífico Mexicano, desde Sinaloa hasta B. C. (Sierra-Beltrán *et al.*, 1997; Hernández-Becerril, 1998) y en el Golfo de México (Dortch *et al.*, 1997; Poot-Delgado & Guzmán-Noz, 2010). Varias especies de este género producen ácido domoico, una potente neurotoxina responsable del envenenamiento amnésico (ASP). La primera asociación en México de ácido domoico, producido por *Pseudonitzschia* spp., con muerte de aves fue reportada por

Sierra-Beltrán *et al.* (1997) en la parte sur de la península de Baja California. Se han reportado concentraciones de estos organismos en las cercanías de Puerto Ángel y zonas aledañas a partir del 2010 (Santiago-Morales, 2015; plática personal).

Las especies de Raphidophyceae han sido pobremente estudiadas en México, debido a que las células se desintegran con los fijadores tradicionalmente usados para la preservación de muestras de fitoplancton. Se han reportado varias especies en nuestras costas: *Fibrocapsa japonica* Toriumi *et Takano* (Cortés-Lara *et al.*, 2003; Band-Schmidt *et al.*, 2004a), *Heterosigma akashiwo* (Y. Hada) Y. Hada *ex* Y. Hada *et* M. Chihara (Band-Schmidt *et al.* 2004a), *Chattonella marina* (Subrahmanyam) Y. Hara *et* Chihara (Band-Schmidt *et al.*, 2004a, 2005b; Barraza-Guardado *et al.*, 2004; Cortés-Altamirano & Licea-Durán, 2004; Gárate-Lizárraga *et al.*, 2009b; López-Cortés *et al.*, 2011), *C. ovata* Y. Hara *et* Chihara (Barraza-Guardado *et al.*, 2004; Cortés-Altamirano *et al.*, 2006b) y *C. subsalsa* Biecheler (Martínez-López *et al.*, 2006). Estas especies producen un gran número de compuestos tóxicos, brevetoxinas y compuestos análogos (Khan *et al.*, 1995; 1996a, b, 1997; Bourdelais *et al.*, 2002) así como sustancias reactivas de oxígeno (Ishimatsu *et al.*, 1996), incluyendo peróxido de hidrógeno, anión superóxido y radicales hidroxilo (Oda *et al.*, 1994; Tanaka *et al.*, 1994; Twiner & Trick, 2000; Kim *et al.*, 2001), ácidos grasos poliinsaturados libres (Okaichi, 1987), hemaglutininas y hemolisinas (Ahmed *et al.*, 1995; Kuroda *et al.*, 2005). Se ha sugerido que varios de estos compuestos contribuyen a la muerte de peces, dañando los tejidos branquiales y ocasionando la muerte por asfixia (Kim *et al.*, 2001; Tiffany *et al.*, 2001).

En México, se han asociado FAN de *Chattonella* spp. a la mortandad de peces y especies bentónicas en la Bahía Kun Kaak, Sonora en abril de 2003 (Barraza-Guardado *et al.*, 2004) y en las costas de Sinaloa, en abril-mayo del 2006 (Cortés-Altamirano *et al.*, 2006b). En la Bahía de La Paz B.C.S. en el 2005, se reportó una FAN de *C. marina* ($1.9-3.5 \times 10^6$ cel L⁻¹) (Band-Schmidt *et al.*, 2005b) y en este mismo año en la Bahía de Navachiste, Sinaloa, hubo un FAN de *C. subsalsa*, con una abundancia entre 5.0×10^5 y 9.6×10^5 cel. L⁻¹ (Martínez-López *et al.*, 2006), si bien en ninguno de esos eventos se observó mortandad de peces. Poco se conoce sobre la ecología de estas especies en aguas mexicanas. Entre marzo y mayo de 2009 se encontró *C. marina* en la Bahía de La Paz, B.C.S., relacionándose las mayores abundancias con la relajación de los procesos de mezcla (López-Cortés *et al.*, 2011).

Dos especies de *Cochlodinium*, *C. catenatum* Okamura y *C. polykrikoides* Margalef (que se ha concluido por diversos estudios filogenéticos que son la misma especie) se han reportado en el Pacífico Mexicano desde B.C.S. hasta Colima (Figueroa-Torres & Zepeda-Esquivel, 2001; Cortés-Altamirano & Licea-Durán, 2004; Cortés-Lara *et al.* 2004; Gárate-Lizárraga *et al.*, 2004a; Ortiz-Lira & Jiménez-Quiroz, 2006; González-Chan *et al.*, 2007), causando la muerte de peces por asfixia (Cortés-Lara *et al.*, 2004; Gárate-Lizárraga *et al.*, 2004a; Ortiz-Lira & Jiménez-Quiroz, 2006). La toxicidad de un aislamiento obtenido de un FAN de *C. polykrikoides* de la Bahía de La Paz, B.C.S., se evaluó en condiciones experimentales en lisas (*Mugil* sp.), provocando una mortalidad del 33% (Núñez-Vázquez *et al.* 2003), posteriormente Dorantes-Aranda *et al.* (2009, 2010) evaluaron en detalle el efecto tóxico de una cepa obtenida de la Bahía de La Paz, B.C.S. de esta misma especie en pargos lunarejos (*Lutjanus guttatus* Steindachner, 1869) en cultivo, detectando un

importante efecto tóxico a corto plazo. Este dinoflagelado disminuyó la actividad catalasa en el hígado del pez y peroxidación de lípidos (Cortés-Lara *et al.*, 2004; Gárate-Lizárraga *et al.*, 2004a; Ortiz-Lira & Jiménez-Quiroz, 2006).

Los peces expuestos a los dinoflagelados, desarrollaron una secreción anormal de moco en las branquias, que estuvo directamente relacionada con la concentración algal. Así se presentó una inhibición de la catalasa hepática y un aumento en la secreción de moco en las branquias cuando se expusieron a 2×10^6 cel. L⁻¹ de *C. polykrikoides*. La peroxidación lipídica fue significativamente diferente en 4×10^6 cel. L⁻¹ y el índice de hepatosomático disminuido en 3×10^6 cel. L⁻¹. Concluyeron que estos resultados sugieren que el estrés oxidativo contribuye, al menos en parte, en la ictiotoxicidad de esta cepa de *C. polykrikoides* (Cortés-Lara *et al.*, 2004; Gárate-Lizárraga *et al.*, 2004a; Ortiz-Lira & Jiménez-Quiroz, 2006).

Adicionalmente, detectaron actividad hemolítica en eritrocitos de peces y humanos. La concentración de *C. polykrikoides* que causó hemólisis en un 50% (HE50) fue 4.88 y 5.27×10^6 cel. L⁻¹, para los peces y los eritrocitos humanos, respectivamente. Dado que los ácidos grasos se han asociado con la actividad hemolítica en *C. polykrikoides*, también se analizó la composición de los ácidos grasos de este dinoflagelado. Los ácidos grasos poliinsaturados: hexadecaenoico (16:0), docosaheptaenoico (22:6 n3) y octadecapentaenoico (18:5 n3), fueron encontrados en una abundancia de 62% del totales de ácidos grasos.

La toxicidad de *C. polykrikoides*, al igual que con las Raphidophyceae se ha relacionado con la presencia de sustancias reactivas de oxígeno (Kim *et al.*, 1999), toxinas hemolíticas (Kim *et al.*, 2001), ácidos grasos poliinsaturados libres (Lee, 1996), concluyéndose que su efecto se debe a una combinación de estos compuestos (Kim *et al.*, 2002). La mayor abundancia de *C. catenatum* en costas mexicanas se reportó en Bahía de Banderas, Jalisco, en julio-diciembre del 2000, con $10,841$ cel. mL⁻¹ (Cortés-Lara *et al.* 2004), en un rango de temperatura de 25 a 32°C y una salinidad entre 33 y 35 ups. En Bahía de La Paz, en el año 2000, la presencia *C. polykrikoides* se relacionó con las lluvias, la eutrofización y una temperatura entre 29 y 31°C (Gárate-Lizárraga *et al.*, 2004a).

Son pocas las diferencias taxonómicas entre *C. catenatum* y *C. polykrikoides*, dificultando su identificación a nivel de especie. El epicono de *C. catenatum* es subhemisférico en la parte anterior y el epicono de *C. polykrikoides* es cupuliforme. La principal diferencia entre ambas especies es la presencia de un estigma (Margalef, 1961). La identificación mediante la secuencias de la región D1-D3 de la LSUrDNA de una cepa aislada de la Bahía de La Paz confirmó su identificación como *C. polykrikoides* (Mikulski *et al.* 2008). Sin embargo, con estudios de filogenia recientes se ha demostrado que son la misma especie.

El efecto de algunas cepas aisladas del Golfo de California, tales como *Prorocentrum lima* (Ehrenberg) Dodge, *Prorocentrum minimum* (Pavillard) Schiller y *Amphidinium carterae* Hulbert han sido evaluados en ratones así como en levaduras, artemia, peces, camarones y almejas (Heredia-Tapia *et al.*, 2002; Núñez-Vázquez *et al.*, 2003, 2008a; Campa-Córdova *et al.*, 2009).

En *P. lima*, adicionalmente a la presencia de ácido okadaico, dinofisistoxina-1 y diolésteres (Heredia-Tapia *et al.*, 2002), se determinó la actividad para toxinas de acción rápida (FAT, tipo prorocontroluros) en extractos butanólicos (Núñez-Vázquez *et al.*, 2003), así como se determinó la activación de la enzima superóxido dismutasa (SOD) por estrés oxidativo en camarones y almejas expuestos a distintas concentraciones de esta alga bentónica (Campa-Córdova *et al.*, 2009).

En *P. minimum* no se presentó actividad por exposición aguda en ninguno de los organismos evaluados y en *A. carterae* solo en el caso del bioensayo en ratón se presentó mortalidad (Núñez-Vázquez *et al.*, 2003). En las costas mexicanas existen muchas más especies de microalgas tóxicas o nocivas como: *Akashiwo sanguinea* (Hirasaka) Hansen *et* Moestrup, *Ceratium furca* (Ehrenberg) Claparede *et* Lachman, *Chaetoceros* spp., *Gambierdiscus* spp. (bentónica), entre otras, que han causado diversos impactos en nuestras costas. De la mayoría de estas especies sólo existen registros puntuales sobre los que se tienen datos del lugar el evento, sus impactos y es sobre la base de literatura científica de otros países que se asume su potencial tóxico o nocivo.

Además de las especies que han causado algún impacto en las costas de México existen otras especies tóxicas como *Alexandrium* spp., *Ostreopsis* spp. (bentónica), *Dinophysis* spp., entre otras, que se han registrado en nuestras costas y que constituyen riesgos potenciales de formación de FAN. Varias de ellas son productoras de neurotoxinas, palitoxinas, toxinas diarreicas, toxinas amnésicas y ciguatoxinas, pudiendo llegar a causar diversos tipos de intoxicación en diversos organismos y en el hombre.

Además de las especies tóxicas existen especies como *Chaetoceros* spp., *Fibrocapsa japonica*, *Chattonella* spp., *Prorocentrum* spp., etc., productoras de metabolitos no considerados como toxinas, tales como las especies reactivas de oxígeno (ERO), ácidos grasos poliinsaturados libres, y mucílagos, pero que pueden causar efectos letales en otros organismos. Por ello es necesario considerar estas especies dentro de los planes de monitoreo nacionales.

ÁREA DE ESTUDIO.

5.2. Puerto Ángel, Oaxaca.

Dado que Puerto Ángel, Oaxaca presenta condiciones geológicas, climáticas y oceanográficas ideales, aunado a las características de sus condiciones sociales, el Dr. Richard Crews en 1997 junto con otros investigadores, propusieron la instalación de una planta OTEC en esa zona. Es por esto que se describen a continuación algunas de las características más importantes del área en cuestión.

5.2.1. Localización.

Puerto Ángel se encuentra ubicado en la franja de Barra de Tonameca-La Mina, situada geográficamente entre los paralelos 15° 39' y 15° 40' N y los meridianos 96° 26' 36" y 96° 37' W en el suroeste del estado de Oaxaca, México (Figura 27).

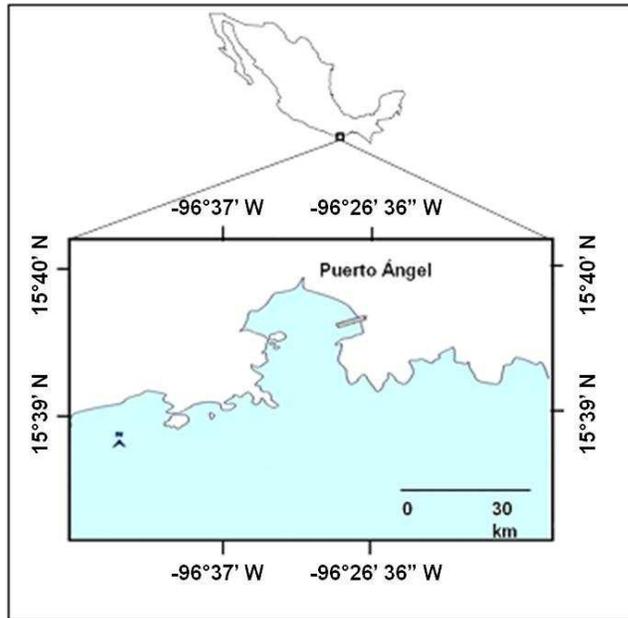


Figura 27. Situación geográfica de Puerto Ángel, Oaxaca.

5.2.2. Geomorfología.

La costa oaxaqueña se ubica dentro de la unidad morfotectónica VIII que comprende desde Puerto Vallarta hasta el istmo de Tehuantepec en la provincia fisiográfica de la zona montañosa de Guerrero y Oaxaca (Batolito de Oaxaca), formada por la sierra baja compleja desde Puerto Ángel al Este. Presenta una plataforma continental angosta y una línea costera paralela a la Trinchera Mesoamericana.

5.2.3. Clima.

La temperatura media anual registrada para la zona es de 28°C y las temperaturas extremas mínima y máxima registradas son 14° y 28°C . El clima de la región es del tipo Aw (w) ing que es un clima cálido subhúmedo con lluvias en verano, de acuerdo a la clasificación de Enriqueta García (1981). La precipitación media anual registrada es de 817.7 mm; es característica de la zona tener playas arenosas y rocosas predominando las rocas ígneas intrusivas ácidas con incrustaciones cristalinas.

5.2.4. Dinámica oceanográfica.

Las corrientes en esta zona son muy irregulares y fluctúan con los cambios de dirección del viento, estos se desplazan entre el Sureste y Este-Sureste en invierno, cambiando al Noroeste y al Oeste-Noroeste en el resto del año con una anchura de 360 millas y una contracorriente paralela a la costa.

Las características oceanográficas de la zona están determinadas por dos grandes corrientes, la de California que es fría, con bajas salinidades y alto contenido de oxígeno disuelto y la Nor-Ecuatorial caracterizada por ser caliente, con baja salinidad y bajo contenido de oxígeno disuelto; sin embargo, de manera estacional se ve afectada por otro tipo de corrientes como son la corriente costera de Costa Rica y la

corriente del Golfo de Tehuantepec. De noviembre a abril ocurren los nortes más intensos proporcionando el cambio de propiedades como la temperatura, concentración de nitratos y fosfatos, concentración de oxígeno disuelto, abundancia y composición del plancton, entre otros; entre la capa superficial mezclada por los vientos y las aguas profundas ricas en nutrientes.

Durante el invierno los intensos vientos del norte modifican sensiblemente la circulación, presentando de enero a marzo una componente del sur siendo los vientos dominantes regidos por los sistemas de brisas. La tasa de sedimentación es baja debido a la cercanía de la Trinchera Mesoamericana, el poco aporte terrígeno y la presencia de cañones submarinos.

La evotranspiración es de 900 mm en la zona costera. La evaporación registrada para Puerto Ángel es de 2036 mm. El área se localiza en la zona de influencia de la primera matriz generadora de huracanes, que corresponde al Golfo de Tehuantepec; esta se activa en la última semana de mayo marcando el inicio de la temporada de lluvias torrenciales en la costa de Oaxaca y coloca a la región en el semicírculo peligroso del huracán. Al Este de Puerto Ángel existen lomeríos con llanuras mientras que en la zona costera del Oeste se localizan llanuras con lomeríos que se asocian con pisos rocosos en el norte de Puerto Escondido.

5.2.5. Hidrología.

El área de estudio se encuentra en la región hidrológica número 21 denominada Costa de Oaxaca (CONAGUA, 2015); en la cuenca del río Copalita-Puerto Ángel, el río se origina en las partes altas del norte en el límite de la cuenca, sigue una trayectoria perpendicular a la costa, es perenne y lleva poco gasto en la época de estiaje pero descarga volúmenes importantes en la época de lluvias.

En el área se presentan escurrimientos intermitentes, siendo los más importantes el Aguaje y el Zipolite; estos escurrimientos se originan debido a las características geomorfológicas de la región. La falta de infraestructura ha originado que las aguas residuales de la población sean canalizadas hasta los escurrimientos, afectando al arroyo el Aguaje. Este último funciona como colector de los drenajes a cielo abierto y demás escurrimientos de la población lo que ha originado un acelerado deterioro del cauce y la contaminación de la bahía donde se descarga. Aunado a lo anterior se presenta el problema de la concentración de motores de botes de pesca, que por falta de mantenimiento vierten aceites y gasolina a la bahía.

5.2.6. Actividades socioeconómicas.

Las actividades prioritarias de la zona son la pesca, el turismo y el comercio. El incremento poblacional se ha efectuado sin un adecuado desarrollo de algunos servicios indispensables tales como las estructuras hidráulicas de agua potable y drenaje. El sistema de alcantarillado presenta una infraestructura muy limitada y deficiente ya que comprende tramos sin drenaje, lo cual obliga a concentrar las aguas negras, parte en fosas colectoras y parte en fosas sépticas individuales; además cabe señalar que una buena parte de la población descarga las aguas de desecho en las calles, lo que provoca la formación de arroyos de aguas negras que

desembocan finalmente en la bahía, contaminando lo que constituye el principal centro de atracción turística.

5.2.7. Oceanografía (Parámetros fisicoquímicos).

5.2.7.1. Temperatura.

Esta variable presenta cambios importantes de manera estacional. La temperatura más alta en la superficie se observa durante los meses de verano y la más fría en los meses de invierno, esto debido a la influencia de los vientos "Tehuano" que provienen de la parte central del Golfo de Tehuantepec sobre la superficie marina por la difusión de agua fría proveniente de aquella zona. El rango es de 26°-30°C pues en el GT existen cambios anuales de hasta 4°C (Roden, 1961).

5.2.7.2. Salinidad.

El comportamiento de este parámetro dependerá de factores meteorológicos la mayor parte del tiempo, sobre todo de la precipitación presente en la zona. Para el caso del año 2013, los datos muestran una mayor salinidad en los meses de invierno que en el verano; esto debido a los eventos ciclónicos generados en el Golfo de Tehuantepec y en zonas más hacia el sur lo que hace que exista un menor gradiente salino (De la Lanza-Espino, 1991) Los rangos observados son de 34 a 34.9 ups en océano abierto y de 27.2 a 38 ups en la región costera.

5.2.7.3. Nutrientes y otros parámetros.

5.2.7.3.1. Nitratos.

El comportamiento de este nutriente es prácticamente el mismo que se ha descrito para el Pacífico Tropical Oriental. Los nitratos generalmente son indetectables en los primeros 10 m de profundidad, y debido a este hecho, se ha catalogado al nitrógeno como elemento limitante de las aguas oligotróficas de la costa Occidental Tropical del país (Thomas y Dodson, 1972; De la Lanza-Espino, 1991).

El incremento de los nitratos (y en general de todas las especies nitrogenadas) se observa por debajo de los primeros 30 m de profundidad y en función de la localidad varían tales especies en cuanto a su concentración. En el caso de Puerto Ángel, se observa que existe un claro aumento en los primeros 25 m de profundidad ($15.49 \mu\text{mol L}^{-1}$) durante el verano, observándose también picos intermitentes conforme se aumenta la profundidad.

En el invierno, se observa un decremento en los nitratos en la misma capa ($3.64 \mu\text{mol L}^{-1}$) y esto se debe, particularmente, al balance dinámico por captación del fitoplancton y redistribución; así como advección y difusión entre las especies nitrogenadas, sobre todo nitritos-nitratos, generados por el ciclo de nitrificación-desnitrificación de las bacterias heterótrofas presentes en la zona (Anderson, 1982).

5.2.7.3.2. Fosfatos.

Los fosfatos varían entre 2.1 y 2.4 $\mu\text{mol L}^{-1}$ en los 100 m de profundidad de manera estacional y se incrementan con el aumento de la profundidad debido a la influencia de la masa de agua intermedia rica en fosfatos (Sverdrup, 1970; De la Lanza-Espino, 1991). Se observa también un incremento de este elemento en la zona de costa por la influencia del continente (en este caso, de los arroyos y fosas sépticas presentes en la zona) y se acentúa en la época de lluvias (verano).

5.2.7.3.3. Silicatos.

El contenido de este elemento aumenta con la profundidad, independientemente de la época del año. Para el caso de Puerto Ángel, se describe que los silicatos disminuyen de Norte a Sur e incrementa hacia la costa (De la Lanza-Espino, 1991).

5.2.7.3.4. Oxígeno disuelto.

La concentración de oxígeno disuelto es mayor en la zona superficial y baja constantemente hasta llegar a los 400 m donde varía la concentración hasta los 1000 m donde aumenta un poco más. En invierno existen las máximas concentraciones (4.75 mL L^{-1}) en superficie que en el verano (4.4 mL L^{-1}) debido a que en este último existe un mayor consumo por parte de los organismos planctónicos durante la respiración (De la Lanza-Espino, 1991).

En este trabajo se actualizan los valores de estos parámetros, a partir de la base de datos del NODC (National Oceanographic Data Center) de la página oficial de la National Oceanographic and Atmospheric Administration (NOAA) de los Estados Unidos y sus autores (World Ocean Atlas, 2013).

5.2.8. Otros parámetros.

En cuanto a otros referentes oceanográficos, Puerto Ángel presenta marea de tipo mixta semidiurna registrando una pleamar máxima de 1.53 m, un nivel de pleamar media superior de 1.023 m, un nivel de pleamar media de 0.918 m, un nivel medio del mar de 0.477 m, un nivel de marea media de 0.475 m, un nivel de bajamar media de 0.033 m, nivel de bajamar media inferior de 0 m y una bajamar mínima registrada de -0.446 m. Estos datos son relevantes al momento de definir el tipo de construcción marítima o costera (Secretaría de Marina, 1988).

6. MATERIALES Y MÉTODOS.

6.1. Obtención de datos.

Se compilaron datos históricos de los diferentes parámetros necesarios para su análisis (temperatura, salinidad, densidad, nutrimentos {nitratos, nitritos, amonio, fosfatos y silicatos}, oxígeno disuelto, pH, dióxido de carbono total, alcalinidad) en el Golfo de Tehuantepec. Esto con el objeto de determinar los posibles cambios que se presentaron a través del tiempo y evaluar la posible afectación teórica al momento de que la planta de gradiente térmico inicie operaciones. También se obtuvieron datos estacionales de distribución vertical promedio de parámetros fisicoquímicos de la zona de Puerto Ángel desde la zona superficial hasta los 1600 metros de profundidad.

La colecta de los datos se hizo de acuerdo a la información procedente de diferentes cruceros oceanográficos mexicanos, la base de datos de la Secretaría de Marina Armada de México y de la base de datos del NODC (National Oceanographic Data Center) de las páginas oficiales de la National Oceanographic and Atmospheric Administration (NOAA) de los Estados Unidos que está en formato .csv (para Excel) y depende del Atlas World Database del año 2013.

6.2. Representación gráfica y evaluación de parámetros fisicoquímicos en la zona de descarga.

Se representaron gráficamente los perfiles verticales correspondientes para las estaciones de verano (julio-septiembre) e invierno (enero-marzo) para todos los parámetros fisicoquímicos con el fin de analizar el comportamiento de los mismos durante los períodos estacionales mencionados. Los meses restantes también se representaron gráficamente pero sólo se hizo el análisis con las estaciones de mayor diferencia térmica.

Se calculó la densidad y, usando el rango de temperatura de salida de descarga del agua de una planta OTEC ($15.5^{\circ}\text{C} \pm 1.7^{\circ}\text{C}$), se determinaron los posibles cambios en la temperatura, salinidad y densidad en la columna de agua y la profundidad a la que la descarga de agua de la planta estaría interactuando por medio del método de promedios pesados (Benson y Golding, 1951) donde se buscó la salinidad final del agua de descarga, basando dicho cálculo con las salinidades y volúmenes iniciales y finales por medio de la siguiente la fórmula:

$$S = [S_f \times V_f + S_s \times V_s] / V_f + V_s \quad (1)$$

Donde:

S_f es la salinidad de fondo

S_s es la salinidad de superficie

V_f es el volumen bombeado de agua de fondo

V_s es el volumen bombeado de agua de superficie

Posteriormente, se representó gráficamente la densidad y se determinó el intervalo de profundidades, de acuerdo a la temperatura de la descarga, en la que la pluma de agua interaccionaría con el resto de la columna de agua.

Finalmente, se compararon las curvas de los parámetros iniciales con las curvas de comportamiento de los parámetros en la planta OTEC para observar si existen diferencias significativas y definir una postura inicial sobre el tipo de impacto presente.

Se consideró que la toma de agua fría se realizaría a los 1000 m de profundidad, debido a que se trata de una planta offshore de 100 MW de producción de energía eléctrica y que, de acuerdo a los procesos de ingeniería hidráulica para tal fin, la profundidad del bombeo de agua fría es la adecuada para el proceso (Fernández-Diez, 2007). Para determinar si tal profundidad es la adecuada, se representó gráficamente el comportamiento del gradiente térmico histórico del Golfo de Tehuantepec y se definieron las cotas inferior y superior donde se puede obtener el gradiente mínimo para el funcionamiento de la planta (20°C).

6.3. Elaboración de la batimetría y definición de la distancia de la planta OTEC a la zona costera.

Se utilizó el mapa digital del INEGI zona 1-05 del International Bathymetric Chart off the Caribbean Sea and the Gulf of Mexico y utilizando como apoyo dos puntos de referencia de los datos de batimetría de la base de datos de la National Geophysical Center (NGDC) (usando los 16° N, -97° W como referencia de la línea de costa) y el programa Surfer, se midió la distancia desde la línea de costa de Puerto Ángel hasta la zona de la isolínea de 1000 m de profundidad.

Asimismo, para comprobar el resultado anterior, se utilizó la carta batimétrica de la IBCCA de la General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO) y se compararon ambos resultados. Por otro lado, se utilizaron los datos para generar un mapa batimétrico 3D con ayuda del programa de interpolación georeferencial SURFER 11 (Golden Software Inc., 2012) y determinar las distancias de la línea de costa a las isolíneas de profundidad, utilizando el modelo de triangulación con interpolación lineal

También se midieron las distancias entre la línea de costa y las isolíneas de 250 m, 500 m y 600 m de profundidad, debido a que en estos tres puntos también se puede conseguir el gradiente térmico mínimo para la operación de la planta OTEC, dependiendo la época del año, en la zona de estudio. De esta manera, aunque los resultados sean aproximaciones a las distancias reales sirven como apoyo para otros estudios para determinar levantamientos batimétricos.

6.4. Determinación de dirección y velocidad de corrientes geostróficas.

Una estrategia de oceanografía observacional es medir la temperatura y la salinidad como una función de la profundidad, equivalente a espacios intercalados a lo largo del barco. Estas series de estaciones hidrográficas pueden ser compuestas para formar un campo de datos, $T(x, z)$ y $S(x, z)$, donde el sistema de coordenadas se alinea de tal manera que x está a lo largo del trayecto del barco.

Para el cálculo de la velocidad de la corriente geostrófica, se utilizaron datos de temperatura, salinidad, densidad calculada (expresada a través del σ_t y medida en Kg m^{-3}) y posición geográfica (expresadas en longitud y latitud y medidas en grados decimales) de 22 estaciones muestreadas durante la Campaña Oceanográfica TEHUA X del 6 al 14 de junio de 2012 hasta los 750 metros de profundidad. Los datos originales del crucero fueron tomados cada 0.20 metros por lo que, para su análisis, fue necesario promediarlos cada metro a fin de contar con una variación estándar de los mismos en la vertical. De acuerdo con esto, se creó un transecto horizontal con aquellas estaciones que cumplieran con dicha profundidad y escogiéndose las estaciones 3, 9, 11, 14, 16 y 22, abarcando las tres regiones del Golfo de Tehuantepec (Figura 42b). No se realizaron transectos verticales debido a que las estaciones presentaron profundidades someras menores a 70 m y no pueden ser tomadas en cuenta para el estudio.

El cálculo de corriente geostrófica se realizó a partir de la determinación de las superficies potenciales y con ellas las velocidades geostróficas en cada capa de agua definida por las profundidades correspondientes, por lo que hay que aclarar que para la utilización del método geostrófico se tomaron en cuenta únicamente el gradiente de presión (profundidad) y la fuerza de Coriolis por lo que los valores serán una aproximación. Para ello se trabajó con las fórmulas de Defant (1961; descritas por Mellor, 1996):

$$D_{(z+\Delta z)} = D_z - 10^{-3} \times g \times 0.5 \times [\delta_{\theta(z+\Delta z)} + \delta_{\theta(z)}] \times \Delta z \quad (2)$$

donde:

- D es la superficie potencial,
- z es la profundidad,
- Δz es el incremento de profundidad o la diferencia de profundidad entre la capa superior e inferior,
- δ_{θ} es la *Sigma-t* medida con el CTD, y
- g es la aceleración de la gravedad, que en este caso se utilizó el valor de 9.81 m s^{-2}

El cálculo de la velocidad geostrófica se realizó con el empleo de la ecuación:

$$V_{rel} = (D_i - D_{i-1} / \Delta x) / (2\omega \times \text{sen}\Phi) \quad (3)$$

donde:

- V_{rel} es la velocidad relativa entre una estación y otra para cada capa de agua,
- D es la superficie potencial para cada capa de agua de las estaciones i -ésimas,
- Δx es la distancia (en metros) entre estaciones,
- Φ es la latitud media entre estaciones, y
- ω es la constante de velocidad angular de la Tierra cuyo valor es $7.27 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$.

La velocidad absoluta de cada capa, entre estaciones, se calculó mediante la resta de la velocidad relativa de la última capa con respecto a las demás capas superiores. El sentido de la velocidad se determinó mediante la comparación de los valores de las densidades en cada estación. Esto último se hizo utilizando los paquetes Excel y MATLAB para crear el programa final.

Para determinar la dirección de las corrientes geostróficas se utilizó MATLAB para realizar el programa para tal acción.

6.5. Cálculo de pérdidas de energía y velocidades promedio en el tubo de descarga de la planta OTEC.

En estructuras largas (sobre todo, las tuberías de bombeo y descarga), la pérdida de energía por fricción es muy importante, por lo que ha sido objeto de investigaciones teórico-experimentales para llegar a soluciones satisfactorias de fácil aplicación. Para estudiar el problema de resistencia al flujo resulta necesario volver a la clasificación inicial de los flujos y considerar las grandes diferencias de su comportamiento entre los flujos laminar y turbulento.

Reynolds (1883) fue el primero que propuso un criterio para distinguir ambos tipos de flujo mediante el número que lleva su nombre, el cual permite evaluar la preponderancia de las fuerzas viscosas sobre las de inercia. En el caso de un conducto cilíndrico a presión, el número de Reynolds (R_e) se define como:

$$R_e = VD/\nu \quad (4) \quad (\text{Sotelo, 1997}).$$

Donde V es la velocidad media, D el diámetro del conducto y ν la viscosidad cinemática del fluido. Reynolds encontró que en un tubo el flujo laminar se vuelve inestable cuando R_e ha rebasado un valor crítico, para tornarse después en turbulento. De acuerdo con diferentes investigadores, el número crítico de Reynolds adquiere valores muy distintos que van desde 2000 (determinado por el mismo Reynolds) hasta 40000 (calculado por Ekman). De ello, se deduce que dicho valor depende en mucha medida, de los disturbios iniciales y define además un cierto límite, abajo del cual éstos se amortiguan, estabilizando al flujo laminar.

Tanto el flujo laminar como el turbulento resultan propiamente de la viscosidad del fluido por lo que, en ausencia de la misma, no habría distinción entre ambos. Es más, aún en flujo turbulento el esfuerzo tangencial o de fricción, producido por el intercambio en la cantidad de movimiento entre partículas que fluctúan lateralmente, en cierto modo es resultado de los efectos viscosos.

Cuando la superficie de la pared de un conducto se amplifica, se observa que se forman irregularidades o asperezas de diferentes alturas y con distribución irregular o aleatoria. Dicha característica es difícil de definir científicamente pues depende de factores como la altura media de las irregularidades de las superficies, la variación de la altura efectiva respecto de la altura media, la forma y distribución geométrica, la distancia entre dos irregularidades vecinas, etc.

Puesto que prácticamente es imposible tomar en consideración todos esos factores, se admite que la rugosidad puede expresarse por la altura media ϵ de las asperezas

(rugosidad absoluta), como un promedio obtenido del resultado de un cálculo con las características del flujo, mas no propiamente por el obtenido como la media de las alturas determinadas físicamente de la pared, en cada conducción. Es más importante la relación que la rugosidad absoluta guarda con el diámetro del tubo, esto es, la relación ε/D (5), que se conoce como rugosidad relativa.

Además, también está la cuestión del material y, debido a esto, la rugosidad en muchas ocasiones puede comportarse hidráulicamente como si fuera un tubo liso. Para el cálculo de las pérdidas por fricción y la velocidad promedio, se utilizan dos fórmulas que son, la fórmula de Darcy-Weisbach y la fórmula de Manning que se describen a continuación.

6.5.1. Factor Darcy-Weisbach.

Para un flujo permanente en un tubo de diámetro constante, la línea de cargas piezométricas es paralela a la línea de energía e inclinada en la dirección del movimiento. En 1850, Darcy, Weisbach y otros, dedujeron experimentalmente una fórmula para calcular en un tubo la pérdida por fricción:

$$h_f = f (L/D)(V^2/2g) \quad (6) \quad (\text{Sotelo, 1997}).$$

Donde f es el factor de fricción, sin dimensiones; g es la aceleración de la gravedad en $m\ s^{-2}$; h_f es la pérdida por fricción en m; D el diámetro en m del tubo; L la longitud del tubo en m y V la velocidad media en $m\ seg^{-1}$.

El factor de fricción es función de la rugosidad y el número de Reynolds en el tubo, esto es:

$$f = f(\varepsilon, R_e)$$

El factor de fricción se puede evaluar por medio de diferentes métodos pero uno de los más utilizados es el propuesto por Moody quien generó un diagrama donde se representa sobre una grafica el número de Reynolds y la rugosidad relativa, obteniendo curvas paramétricas relacionadas con base en experimentos realizados por él. Tanto f como R_e están representados en escalas logarítmicas debido al amplio intervalo de valores encontrados.

Otra forma de calcularlo es usando la fórmula de Schoder-Blasius para tubos lisos comerciales con flujo turbulento:

$$f = 0.3164/R_e^{1/4} \quad (7) \quad (\text{Sotelo, 1997}).$$

Para el caso de tubos rugosos para la zona turbulenta, el factor puede calcularse por medio de la fórmula propuesta por Kozeny:

$$f = 2g/(7.78 \times \log_{10}[R_e]-5.95)^2 \quad (8) \quad (\text{Sotelo, 1997}).$$

Además, derivando la ecuación se puede obtener la relación entre la pérdida de energía y la longitud del tubo en que ésta ocurre, con lo que se obtiene lo que se conoce como pendiente de fricción (S_f):

$$S_f = h_f/L = (f/D) \times (V^2/2g) \quad (9) \quad (\text{Sotelo, 1997}).$$

De acuerdo con lo anterior, para determinar la pérdida de energía en el tubo de descarga de la planta OTEC para Puerto Ángel se calculó el número de Reynolds (R_e) para determinar el tipo de flujo existente utilizando la fórmula (3) de la sección 6.5.

Posteriormente, se calculó la rugosidad relativa (ϵ/D), utilizando los coeficientes para tubería de plomería y concreto por medio de la relación (4) de la sección 6.5.

Teniendo los dos factores anteriores, se calculó el factor de fricción por medio de la ecuación de Shoder-Blasius (7), la fórmula de Kozeny (8) y el diagrama de Moody; la primera para el caso de la tubería de plomería y las dos siguientes para la tubería de concreto.

Finalmente, teniendo todos los resultados anteriores, se hizo el cálculo de la pérdida de energía por fricción para los tres casos, utilizando la ecuación de Darcy-Weisbach (6) en la tubería de descarga a los 60 m, utilizando el paquete Excel.

6.5.2. Factor Manning.

Para calcular la velocidad de flujo en el tubo de descarga, se utilizó la ecuación desarrollada por Robert Manning (la cual es más efectiva en canales abiertos pero también se utiliza para tuberías de diferentes estructuras) la cual es:

$$V = 1.00/n(R_h^{2/3}S_f^{1/2}) \quad (10) \quad (\text{Mott, 1996})$$

donde n es el factor de Manning, el cual depende del material descrito en el canal o tubería, R_h es el radio hidráulico del tubo ($R_h = \text{Área/Perímetro}$) y S_f es la pendiente de fricción que se calcula con la fórmula (9) de la sección 6.5.1.

Los cálculos se hicieron igualmente para los casos de tubería de plomería y de concreto, además de que se compararon los datos del tubo de descarga de la planta de Puerto Ángel con otros sitios donde se han instalado o se piensan instalar plantas de gradiente térmico.

6.6. Comparación entre la descarga de la planta OTEC y el enfriamiento superficial del Golfo de Tehuantepec.

Se compararon los resultados de los cambios en los parámetros fisicoquímicos de la OTEC con un evento natural como lo es la surgencia del Golfo de Tehuantepec y se observó el posible grado de impacto en Puerto Ángel.

Esta comparación se hizo debido a que el funcionamiento de la planta OTEC implica el bombeo de agua profunda y de agua superficial de manera artificial, por lo que se asocia con el suceso físico de una surgencia o afloramiento de agua profunda debida al efecto de velocidad y rozamiento del viento con respecto del agua superficial de una zona (en el caso del GT sería un enfriamiento costero superficial).

6.7. Efecto biológico en la zona de descarga.

Para evaluar el posible impacto de los nutrientes se realizó una simulación de acuerdo con el modelo analítico del programa CORMIX (MixZone Inc., 2014). De esta forma se determinaron si tales efectos eran locales o de mayor intensidad para observar los grados de dilución y concentración de los mismos, además de la distancia que recorrería la pluma de agua al momento de la descarga y por último, de acuerdo con la concentración final observar el posible efecto sobre el fitoplancton y qué organismos de este grupo se verían beneficiados, sobre todo para aquellos grupos que son considerados como productores de florecimientos algales nocivos (FAN).

6.8. Determinación de la emisión de CO₂ a la zona superficial, huella de carbono y porcentaje de eficiencia energética verde de la planta OTEC.

6.8.1. Cálculo de la potencia neta de la planta OTEC.

Para el cálculo de las tres variables de CO₂, primero debe evaluarse la potencia neta por la operación de una planta OTEC, la cual se considera que es alrededor del 65% de la energía bruta generada (Vega 1999). También es un hecho que el factor de capacidad de la tecnología OTEC es alrededor del 80%, incluso desde una estimación modesta de ella (Varley, 2013). Así, el cálculo de la energía neta anual generada a partir de la planta OTEC de 100 MW de plantas sería:

$$(\text{MW generados} \times 24 \text{ horas} \times 365 \text{ días} \times 0.8 \text{ (factor de capacidad tecnológica)} \times 0.65 \text{ (porcentaje de energía bruta generada)}) = \text{MWh generados por la planta OTEC (11)}$$

6.8.2. Cálculo de la emisión de CO₂ generado por la planta.

Para evaluar la emisión de CO₂ generada por la planta OTEC se toma en cuenta la siguiente ecuación:

$$\sum G_i \times M_i / PI + \text{emisión fase operativa en gCO}_2 \text{ kWh}^{-1}. \text{ (12)}$$

En la ecuación anterior, G_i representa la emisión de gases en kg kg⁻¹ de los artículos de inventario; M_i es la masa de los elementos del dispositivo en inventario; y PI es el tiempo de vida que tendrá el dispositivo para la generación de energía, expresado en kWh.

A diferencia de otros sistemas de energía renovable, en el caso de los sistemas de OTEC, para la fase operativa se requiere tomar en cuenta las emisiones en los estudios de LCV (Evaluación del Ciclo de Vida). Los estudios de LCV se llevan a cabo de acuerdo con la norma ISO 14040 con condiciones de frontera "de la cuna a la tumba" (*"from cradle to grave"*). Los datos de G_i nos dan las características de la emisión de los artículos del inventario en cuestión y se tomaron de la base de datos de la Universidad de Bath (Hammond & Jones 2008) y el inventario de los artículos son adaptados de un modelo hipotético japonés de una planta OTEC-CC 100 MW (Tahara *et al.* 2000).

La emisión de CO₂ (excepto su emisión en la etapa operacional) para las plantas OTEC de 100 MW se han estimado con base en los datos anteriores como por la ecuación (12). Los resultados se muestran en la sección 7.2.7 a partir de la ecuación siguiente:

$$\text{Total de emisión de CO}_2 \text{ estimado (kg)/Potencia neta de la planta OTEC (GWh) (13)}$$

6.8.3. Emisión de CO₂ en fase operativa.

En cuanto a las emisiones de CO₂ debidas a las fases operativas de la planta OTEC, existen dos fuentes posibles. La primera es de su formación a partir de agua de mar caliente durante la formación de vapor, junto con los gases permanentes como O₂ y N₂ donde se usa agua caliente como fluido de trabajo, como en el caso de la OC-OTEC. En plantas con ciclo híbrido donde se utiliza agua caliente para proporcionar agua potable, CO₂ (g) la emisión se produce durante la formación de vapor de agua de mar caliente. La segunda fuente de emisión de CO₂ (g) en el funcionamiento de la planta OTEC es a partir de su liberación en agua fría, cuando su temperatura se eleva en el condensador y se descarga en el mar, mezclándose con agua tibia.

De hecho, la solubilidad del CO₂ en el agua es inversamente proporcional a la temperatura y directamente proporcional a la presión en el océano (Tahara *et al.* 2000). Puede ser relevante, agregando, que a pesar del hecho de que la solubilidad de CO₂ (g) disminuye con la salinidad del agua, el papel del océano se considera bastante importante en el mantenimiento y el equilibrio en la concentración del CO₂ atmosférico (g) (Enrick y Scott 1990). De hecho, el CO₂ (g) del aire después de la disolución en agua del océano permanece en la forma de carbonatos solubles, bicarbonatos, así como en forma gaseosa, dependiendo de la temperatura y presión siguiendo la ley de Henry. El afloramiento de agua fría es probable que suelte este CO₂ gaseoso disuelto a partir del aumento de la temperatura además de bajar la presión del gas en el agua.

El papel de los organismos como el plancton debe tenerse en cuenta también al decidir el mantenimiento de la concentración de CO₂ en equilibrio con el agua del océano. Consumen CO₂ durante la fotosíntesis y también durante la formación de conchas además de la concentración por las células muertas de estos y las especies marinas que se alimentan de ellas a partir de entonces generan un contenido de carbonato enriquecido. En el caso del fitoplancton, este proceso puede ser por la formación de cocolitos de los cocolitofóridos (Haptophyta). Este fenómeno de secuestro de CO₂ a partir de los organismos muertos en el fondo del océano y el mantenimiento del CO₂ por este proceso se denomina *secuestro de CO₂* (Christopher y Barry 2008).

El movimiento turbulento del océano causado por la actividad de la planta OTEC, con el afloramiento artificial de agua fría, así como su descarga mixta (con agua caliente y fría) en la zona eufótica, puede afectar el balance de CO₂ del océano. Esto puede ser causado por las fluctuaciones de los siguientes tres factores:

1. Elevación y descenso de la temperatura
2. Liberación de presión.

3. Concentración del plancton marino.

Es de esperar que un aumento en la concentración de plancton en la capa superficial de la surgencia de agua fría ayudara a bajar el nivel de gas invernadero en la atmósfera, consumiendo más CO₂ en la superficie del océano. Por otro lado, una enorme cantidad de CO₂ disuelto (g) es probable que sea liberado por aumento de la temperatura y de la liberación de la presión de la surgencia agua fría.

Para el cálculo se utilizan los datos generados por Green y Guenther (1990) quienes observaron desde su experimentaciones en transferencia de masa y de calor con el aparato de prueba (HMTSTA), que la evolución del CO₂ de las operaciones en el caso de OC-OTEC se espera que sea 11.7 g kWh⁻¹ de agua caliente y 26.8 g kWh⁻¹ del fría agua; para un total de 38.5 g kWh⁻¹. En el caso de una planta híbrida OTEC se espera que sea inferior a 11.7 g kWh⁻¹, y un valor aún más bajo de < 1 g kWh⁻¹ para las operaciones con CC-OTEC (14). Sin embargo, argumentaron que si esta agua fría en vez de descargarla en el océano se utiliza para maricultura, sería emitir más CO₂ (g) por su exposición más larga. Pero utilizando macroalgas marinas cultivadas se puede absorber el CO₂ extra (g) y así neutralizarlo (Green & Guenther 1990).

Adicionalmente en la etapa operativa de la planta, la entrada de CO₂ a partir del fluido de trabajo (NH₃) debe ser tomado en cuenta; que se sabe es de 222, 000 kg (1.11 kg de CO₂ / kg de NH₃) por investigadores japoneses (Tahara *et al.* 2000). Por lo tanto, la emisión de NH₃ estimado por la planta está dada por la ecuación siguiente:

$$\text{Total de NH}_3 \text{ emitido (kg)/Potencia neta de la planta OTEC (GWh) (15)}$$

Los artículos de inventario de los diferentes tipos de plantas OTEC son distintos de acuerdo a sus especificaciones. La planta OC-OTEC requerirá un evaporador mucho más grande, que demanda una mayor cantidad de insumos. Por otro lado, el uso de un intercambiador de calor DCC generaría una menor entrada de material que el utilizado para intercambiadores de calor en superficie de metal que son utilizados en CC-OTEC. Por lo tanto, se puede considerar que las dos entradas de calor serían en equilibradas entre sí. Por lo tanto, las emisiones de CO₂ de las distintas plantas OTEC pueden ser consideradas más o menos similares.

6.8.4. La emisión total de CO₂ de las plantas OTEC contra otros sistemas de energía. Huella de carbono y eficiencia energética verde.

Con base en la relación de las ecuaciones (13), (14) y (15) se tiene que, en comparación con una central de carbón, el porcentaje de emisiones de CO₂ secuestrado de un dispositivo de energía renovable (RE) sería calculado por medio de la ecuación (**eficiencia energética verde**):

$$100-[Ce/900] \times 100 \text{ (16)}$$

Donde Ce es la emisión de CO₂ en g kWh⁻¹ del dispositivo RE al que se refiere. De este modo se calcularon las concentraciones de CO₂ emitidas a la atmósfera (huella

de carbono) y el porcentaje de secuestro para el mismo gas al momento de la operación de la planta.

7. RESULTADOS.

7.1. Distancia entre la zona costera de Puerto Ángel y la isolinéa de 1000 m de profundidad.

La distancia de la costa a la isolinéa de 1000 m de profundidad obtenida fue de 9.5 km (Figura 28), por lo que se cumple con uno de los requisitos fundamentales para la operación de una planta de gradiente térmico (distancia a la costa <10 Km). Comparando la distancia con la carta batimétrica de la IBCCA de la General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO), la distancia calculada con base en la escala del mapa fue de 9.5 km, lo que permite seguir considerando al sitio como lugar adecuado para la ubicación y operación de esta planta. Al mismo tiempo, el mapa batimétrico tipo 3D comprueba dichos resultados, sin embargo es imperativo realizar una batimetría a detalle con la precisión adecuada debido a que los resultados actuales son aproximaciones (Figura 30).

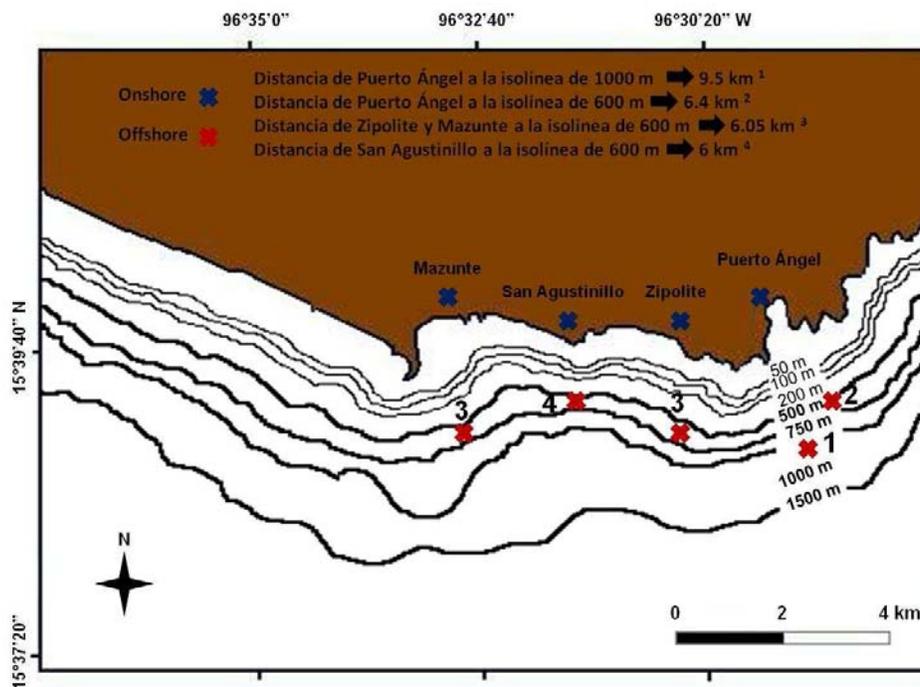


Figura 28. Posibles ubicaciones para la planta OTEC (onshore y offshore) en la zona de Puerto Ángel, Oaxaca.

Nomenclatura: cruces azules indican posibles sitios para la instalación de plantas OTEC de tierra firme (onshore); cruces rojas indican posibles sitios para la instalación de plantas OTEC de tipo plataforma (offshore).

Basado en el mapa anterior, se generó la figura 29 donde se tipifican los tres lugares más viables para la construcción de una planta OTEC. Tales lugares se determinaron de acuerdo al conocimiento del terreno para construcción y las distancias calculadas de la línea de costa a la isolinéa de 600 m de profundidad.

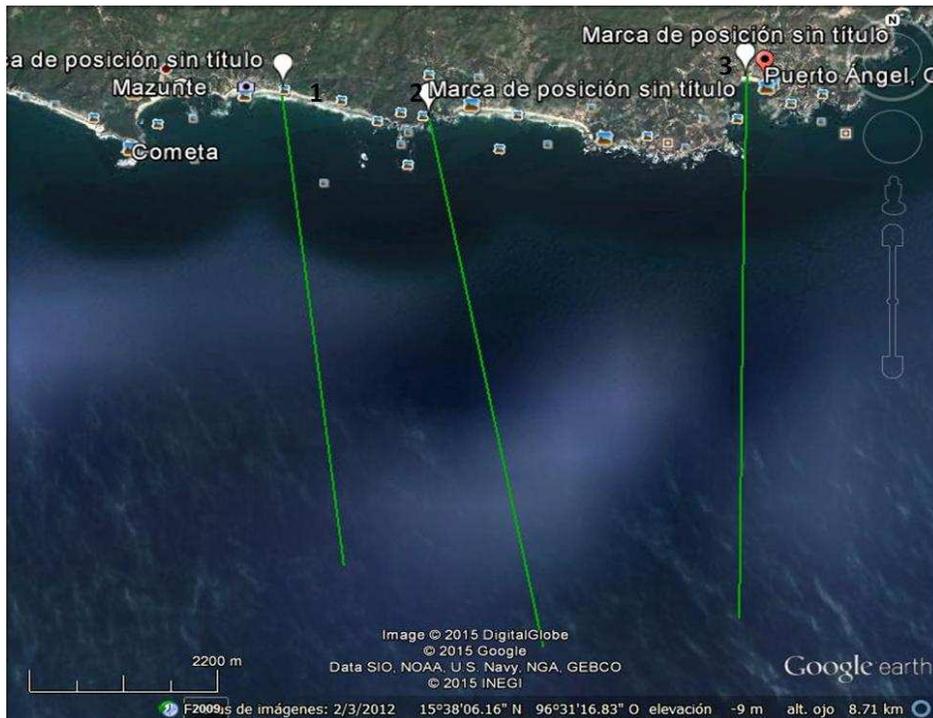


Figura 29. Localización de los tres sitios más viables para la construcción de una planta OTEC on-shore en la zona de Puerto Ángel y alrededores.

Nomenclatura: 1 San Agustínillo; 2 Bahía Camarón, Zipolite y 3 Bahía de Puerto Ángel. Las líneas verdes indican la distancia de la línea de costa a la isolinéa de 600 m de profundidad. La ubicación de las tuberías respectivas se determinará una vez que se haya realizado un estudio de batimetría más formal.

En cuanto a los resultados estacionales, para los meses de otoño e invierno, la zona de toma de agua profunda estaría a los 600 m, esto es una distancia aproximada de entre 6.05 y 6.4 km; para los meses de primavera, la toma estaría a 500 m cuya distancia a la línea de costa está a 5.7 km de distancia y en el verano, la toma estaría a los 250 m a una distancia de entre 4 y 5 km.

Estos datos indican que la zona presenta un gradiente térmico adecuado para su uso durante todo el año a partir de los 550 m de profundidad (600 m recomendado); esta ubicación reduciría los costos de la operación e instalación de la tubería general para el bombeo de agua fría.

De esta forma, en Puerto Ángel se podría construir ya sea una planta *offshore* en la zona de 1000 m de profundidad sin que existan pérdidas grandes por transmisión de energía eléctrica o una planta *onshore* en la zona de acantilados que está cercana a la isolinéa de 600 m sin perder el gradiente térmico mínimo de 20°C que permitiría trabajar durante 24 h todo el año.

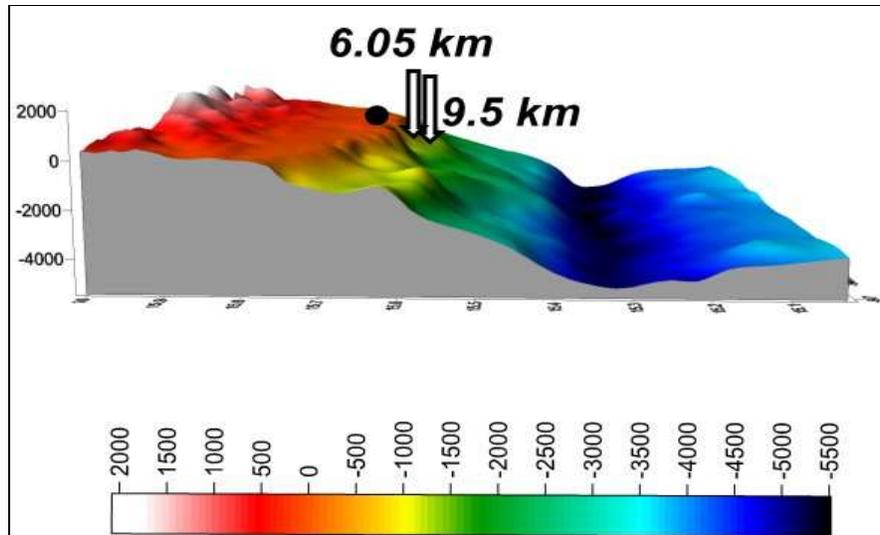


Figura 30. Mapa batimétrico lateral 3D para el área de estudio (Puerto Ángel representado por el círculo negro).

En cuanto al gradiente, los resultados históricos para el Golfo de Tehuantepec obtenidos arrojan como cota inferior para obtener los 20°C los 270 m de profundidad y como cota superior los 1084 m; en la figura 31 se presentan los porcentajes de eficiencia para la planta OTEC y se observa que a partir de los 600 m se obtiene una mejor operación de la instalación (88%) con un óptimo del 100% a partir de los 800 m de profundidad.

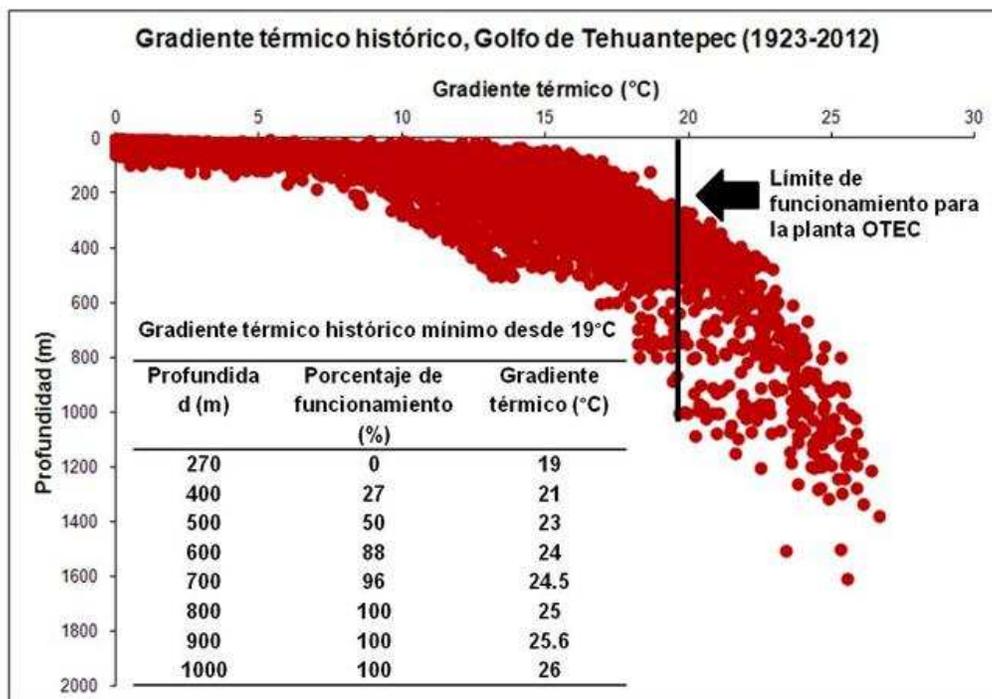


Figura 31. Cotas inferior y superior del gradiente térmico histórico para el Golfo de Tehuantepec.

7.2. Parámetros fisicoquímicos y su comportamiento en la zona de descarga en verano e invierno.

7.2.1. Temperatura.

De acuerdo con los datos obtenidos y después de su análisis (tomando como referencia los meses de verano e invierno), se considera que la operación de la planta OTEC posiblemente no genere contaminación térmica debido a que los perfiles verticales de temperatura, tanto sin operación como con la operación de la planta OTEC son similares, lo anterior implica que el agua de descarga (cuya temperatura de salida es de $15.5^{\circ}\text{C} \pm 1.7^{\circ}\text{C}$ cuando va mezclada) tenderá a ubicarse en la columna de agua, de acuerdo a su densidad; es por esto que se plantean dos posibles profundidades en las que la descarga se encontraría al final para ambas estaciones del año. Para el caso de la operación de la planta OTEC, se hizo un acercamiento a la zona de influencia hasta los 120 m de profundidad y se analizó el posible efecto térmico en la columna de agua (Figuras 32 y 33).

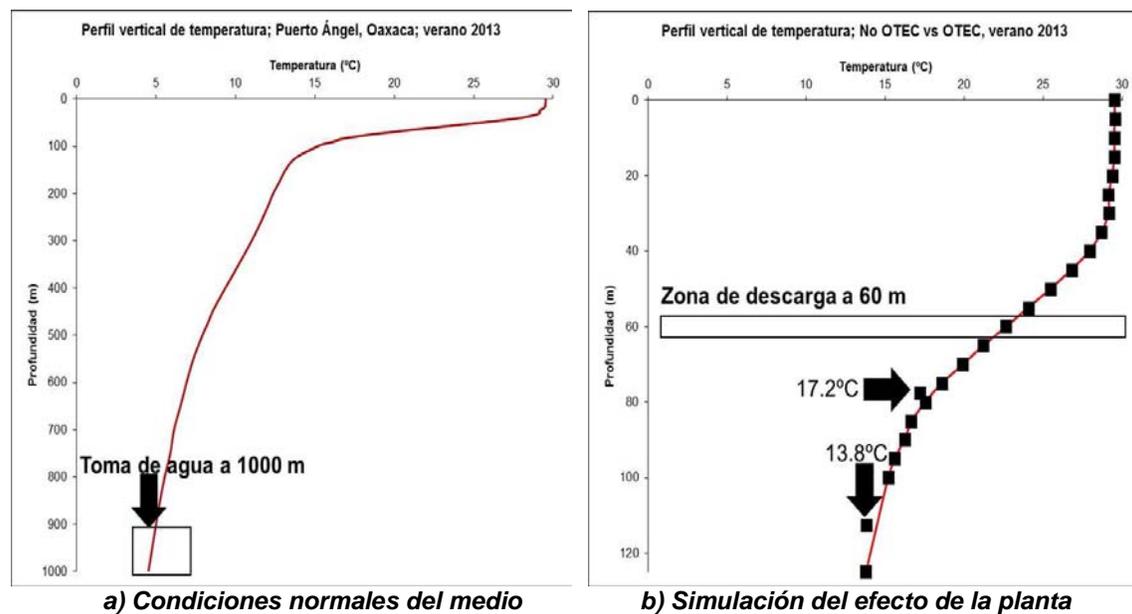


Figura 32. Perfil vertical de temperatura para Puerto Ángel, a) sin operación de la planta OTEC en verano; b) con la operación de la planta OTEC en verano.

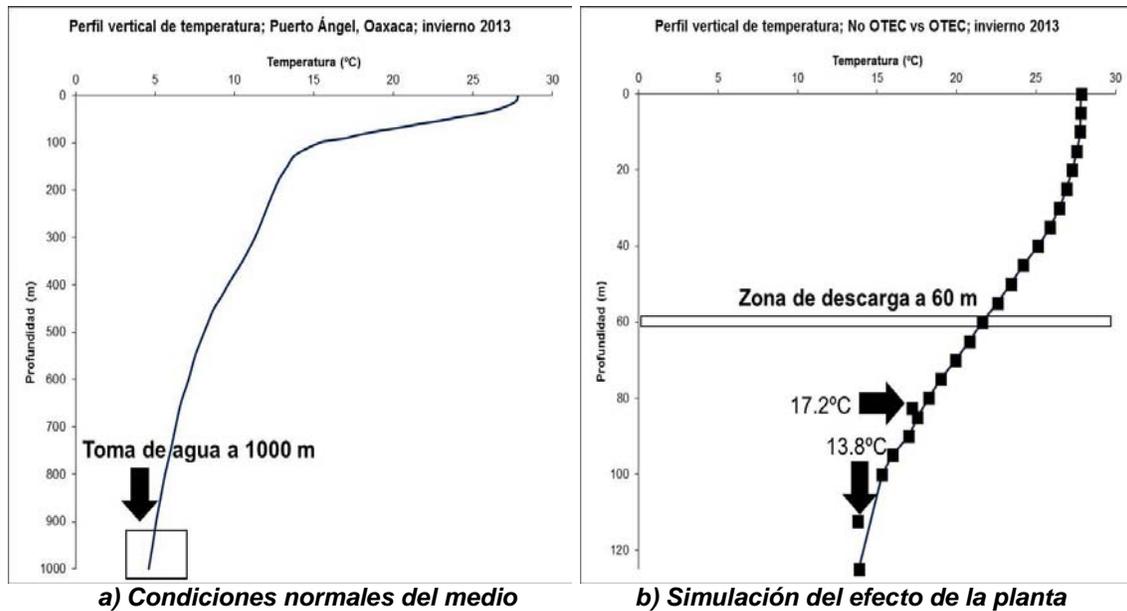


Figura 33. Perfil vertical de temperatura para Puerto Ángel, a) sin operación de la planta OTEC en invierno; b) con la operación de la planta OTEC en invierno.

7.2.2. Salinidad.

Este parámetro no tiene mucha relevancia durante la operación de una planta OTEC de ciclo cerrado, pero se le considera dado que tiene implicación en la densidad de las masas de agua. Lo que se observa en ambos casos (tanto sin operación como con la operación y funcionamiento de la planta OTEC) es que la variación de la salinidad es mínima (entre 0.1 y 0.2 UPS) y su tendencia es casi lineal a partir de los 200 m de profundidad (Figuras 34 y 35).

Lo anterior implica que el agua de descarga de la planta generaría pequeños cambios en la salinidad, siendo su densidad similar a las aguas circundantes a la zona de descarga por lo que su efecto sería limitado. Se observan dos posibles cambios debido a que existe un rango en la que el agua se acomodaría y este fenómeno se haría patente en ambas estaciones del año. Es por esto que se muestra un acercamiento en la zona de posible influencia del agua de descarga a los primeros 120 m de profundidad con el fin de hacer más notorio el posible efecto.

7.2.3. Densidad.

Para la determinación de una posible contaminación térmica, se muestran los resultados de densidad a nivel estacional (contrastando la curva normal contra la curva OTEC) donde se observa que el agua de descarga se distribuirá en la columna de agua dentro de la curva normal de densidad para Puerto Ángel por lo que, posiblemente, no existiría ningún tipo de problema a nivel de temperatura y salinidad (Figuras 36 y 37).

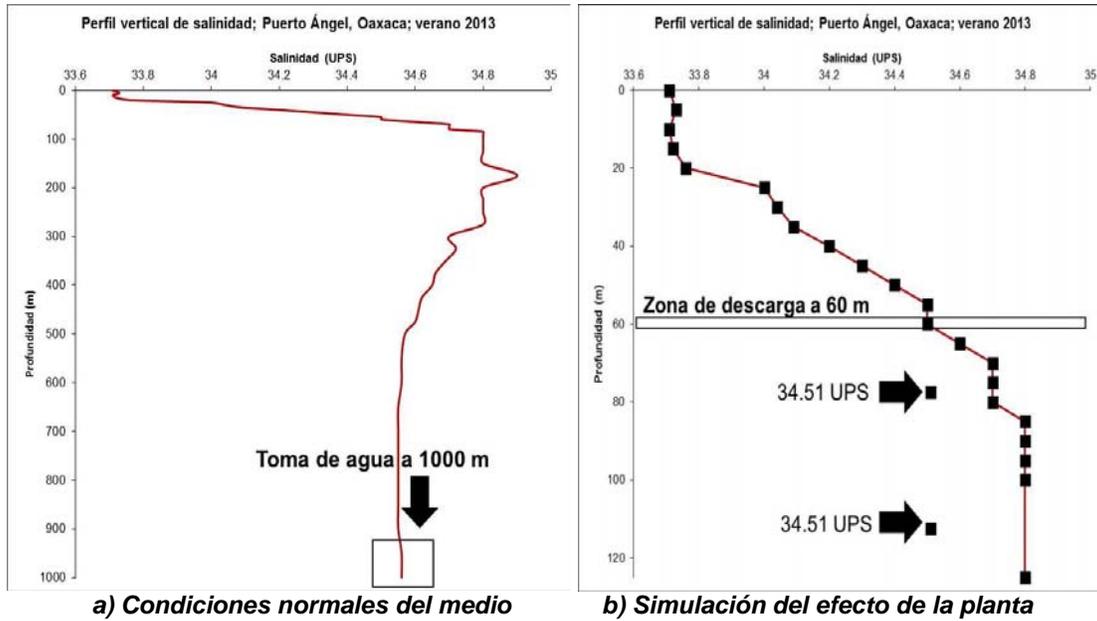


Figura 34. Perfil vertical de salinidad para Puerto Ángel, a) sin operación de la planta OTEC en verano; b) con la operación de la planta OTEC en verano

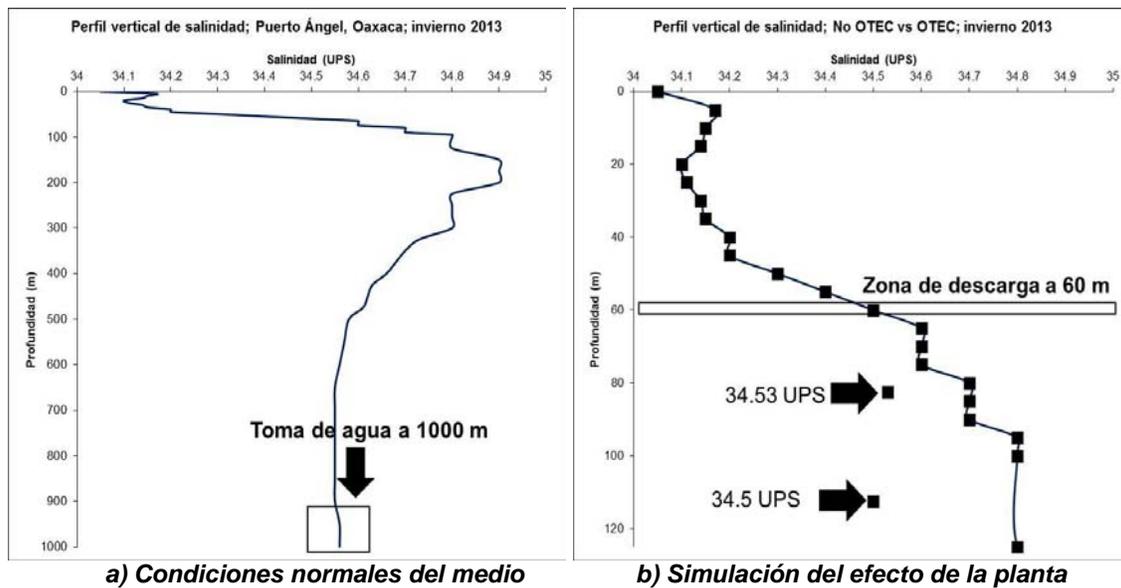


Figura 35. Perfil vertical de salinidad para Puerto Ángel, a) sin operación de la planta OTEC en invierno; b) con la operación de la planta OTEC en invierno.

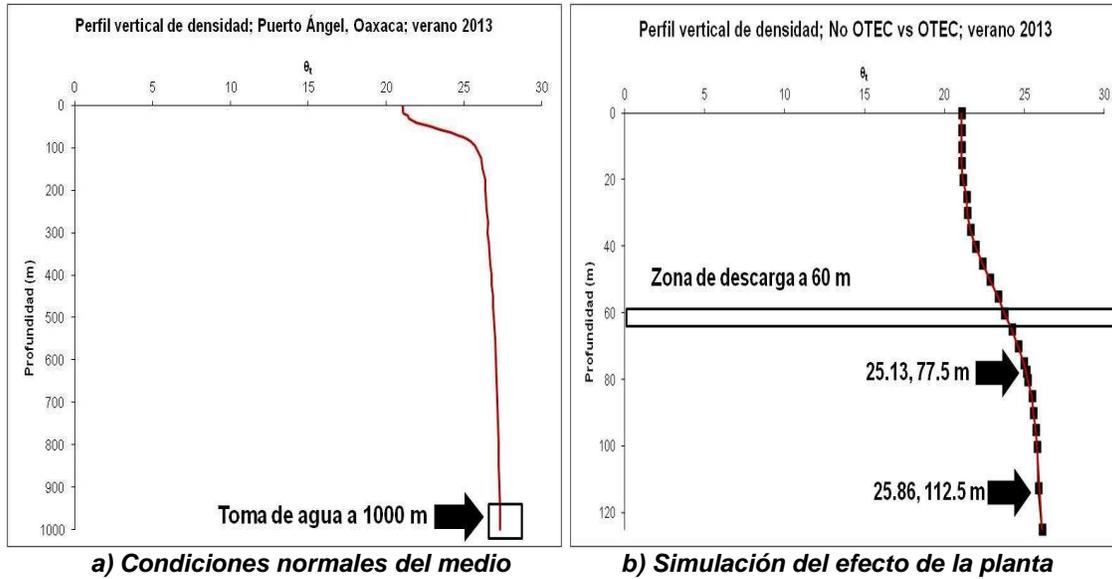


Figura 36. Perfil vertical de densidad para Puerto Ángel, a) sin operación de la planta OTEC en verano; b) con la operación de la planta OTEC en verano.

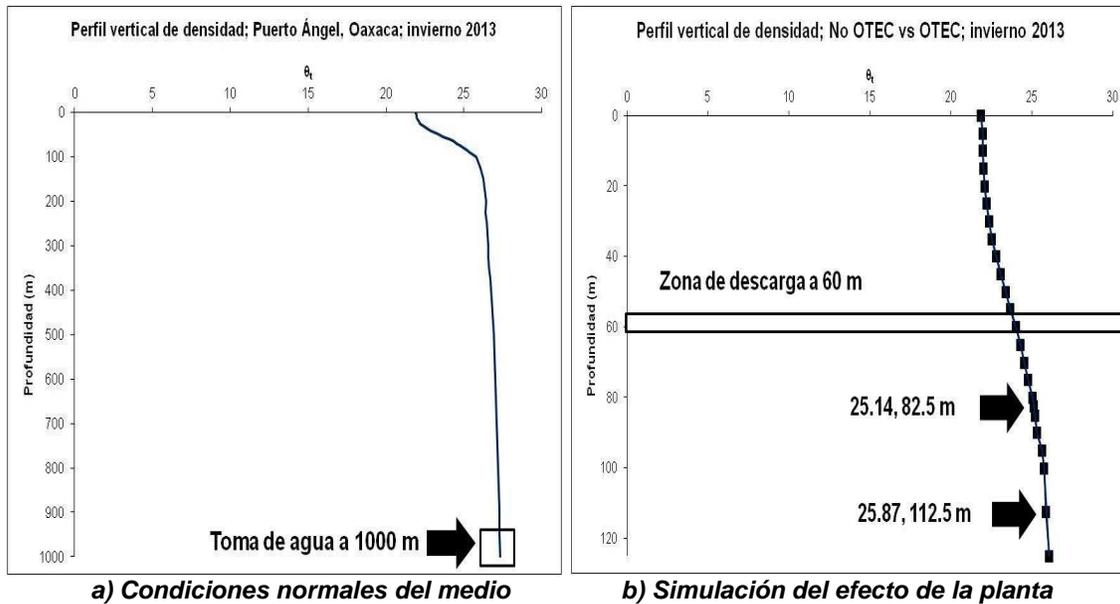


Figura 37. Perfil vertical de densidad para Puerto Ángel, a) sin operación de la planta OTEC en invierno; b) con la operación de la planta OTEC en invierno.

7.2.4 Nitratos.

Con la operación de una planta OTEC en la zona, se observan dos posibles aumentos de este nutrimento tanto en verano como en invierno (recordar que hay dos posibles zonas de acomodación del agua de descarga que lleva estos elementos). Para el verano, los nitratos aumentarían a $43.42 \mu\text{mol L}^{-1}$ entre los 77.5 y los 112.5 m de profundidad; en el invierno aumentarían a $40.3 \mu\text{mol L}^{-1}$ entre los 83.5 y 112.5 m de profundidad (Figuras 38 y 39), lo que podría implicar un efecto importante.

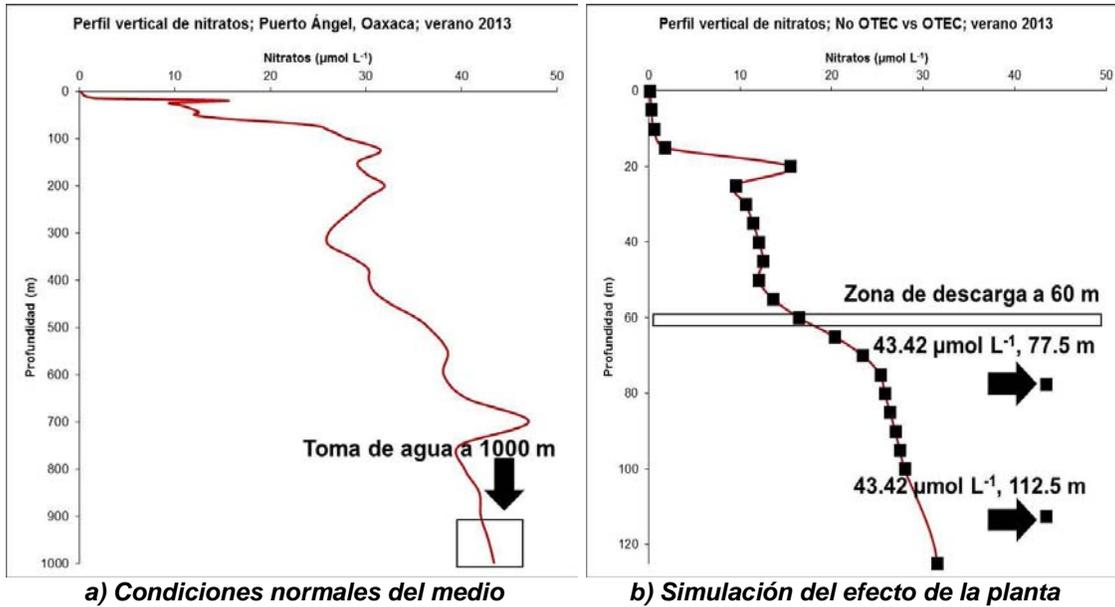


Figura 38. Perfil vertical de nitratos para Puerto Ángel, a) sin operación de la planta OTEC en verano; b) con la operación de la planta OTEC en verano

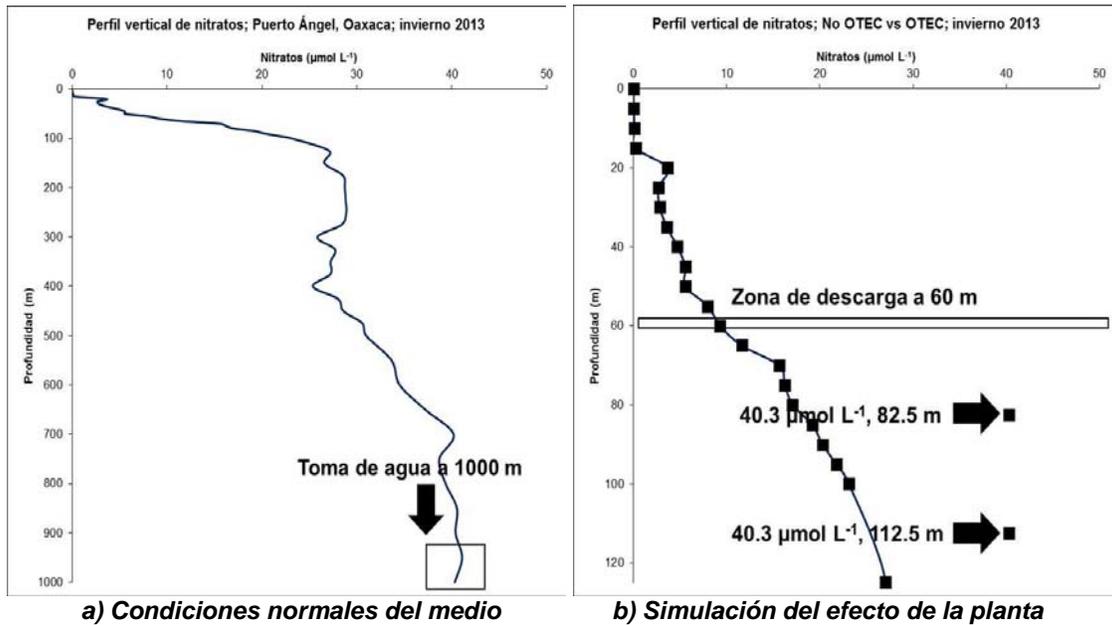


Figura 39. Perfil vertical de nitratos para Puerto Ángel, a) sin operación de la planta OTEC en invierno; b) con la operación de la planta OTEC en invierno

7.2.5. Fosfatos.

Con la operación de una planta OTEC también habría un posible aumento de las concentraciones de fosfato en un rango de profundidad entre 77.5 y 112.5 m desde 0.3 hasta 3.7 $\mu\text{mol L}^{-1}$ durante el verano; mientras tanto en invierno habría también

un aumento desde 0.3 a 3.8 $\mu\text{mol L}^{-1}$ entre los 82.5 y 112.5 m de profundidad por lo que el efecto podría ser elevado (Figuras 40 y 41).

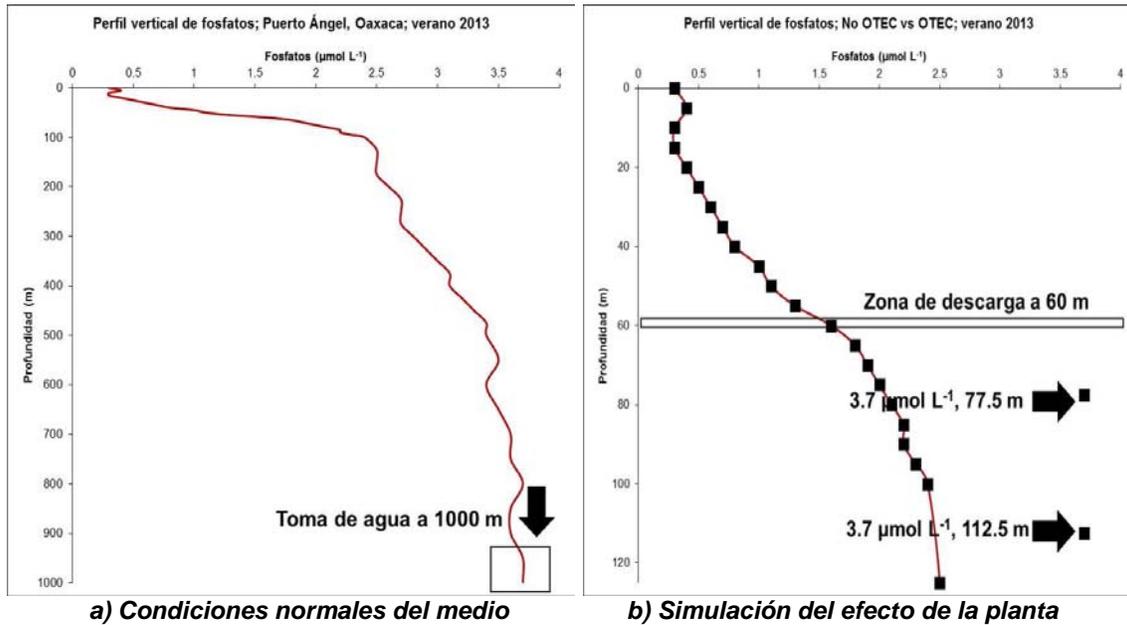


Figura 40. Perfil vertical de fosfatos para Puerto Ángel, a) sin operación de la planta OTEC en verano; b) con la operación de la planta OTEC en verano

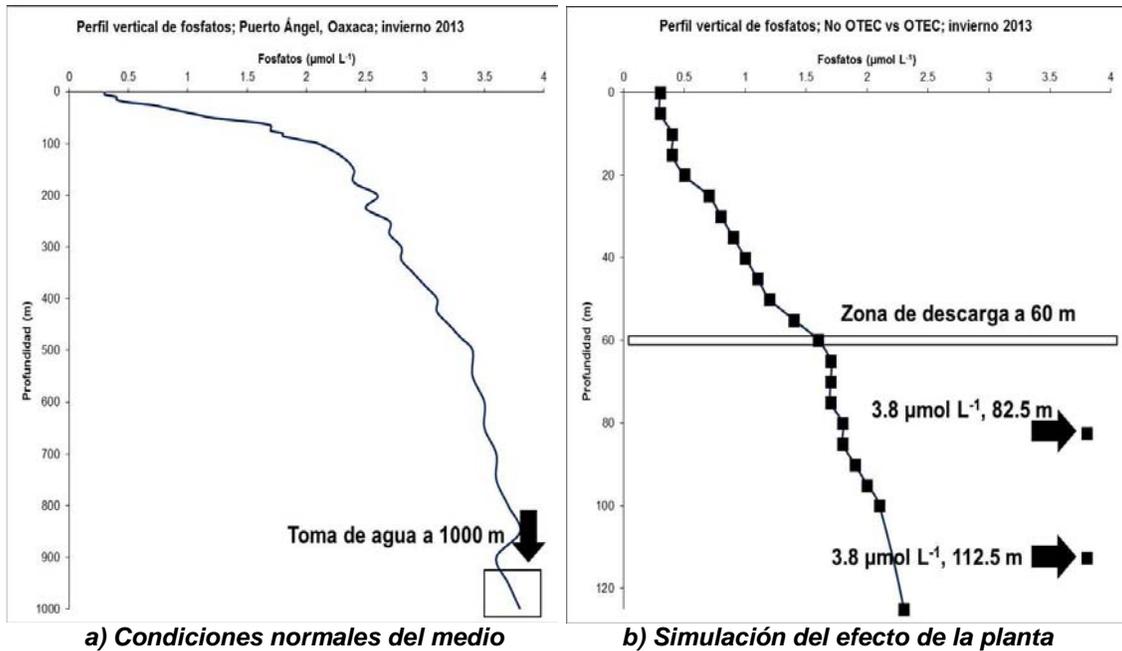


Figura 41. Perfil vertical de fosfatos para Puerto Ángel, a) sin operación de la planta OTEC en invierno; b) con la operación de la planta OTEC en invierno

7.2.6. Silicatos.

Durante la operación de la planta OTEC, se observa también dos posibles sitios donde la concentración de silicatos aumentaría, tanto en verano como en invierno. Para el primer caso, el incremento sería de $91.24 \mu\text{mol L}^{-1}$ ubicándose entre 77.5 y 112.5 m de profundidad; en invierno sería de $101.7 \mu\text{mol L}^{-1}$ a los 82.5 y 112.5 m de profundidad (Figuras 42y 43). El efecto, a partir de este incremento sería significativo.

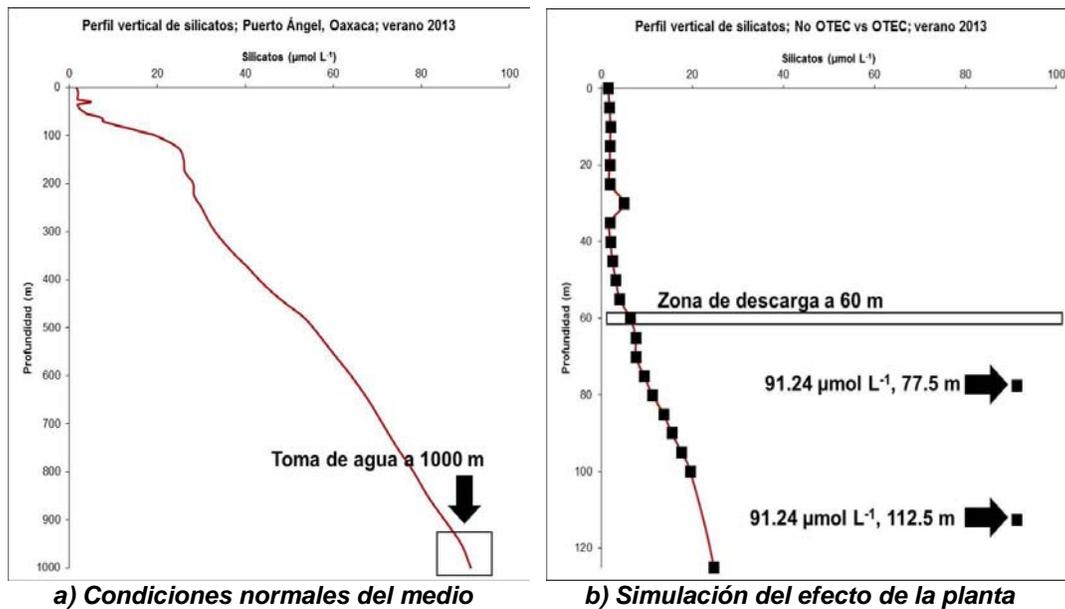


Figura 42. Perfil vertical de silicatos para Puerto Ángel, a) sin operación de la planta OTEC en verano; b) con la operación de la planta OTEC en verano

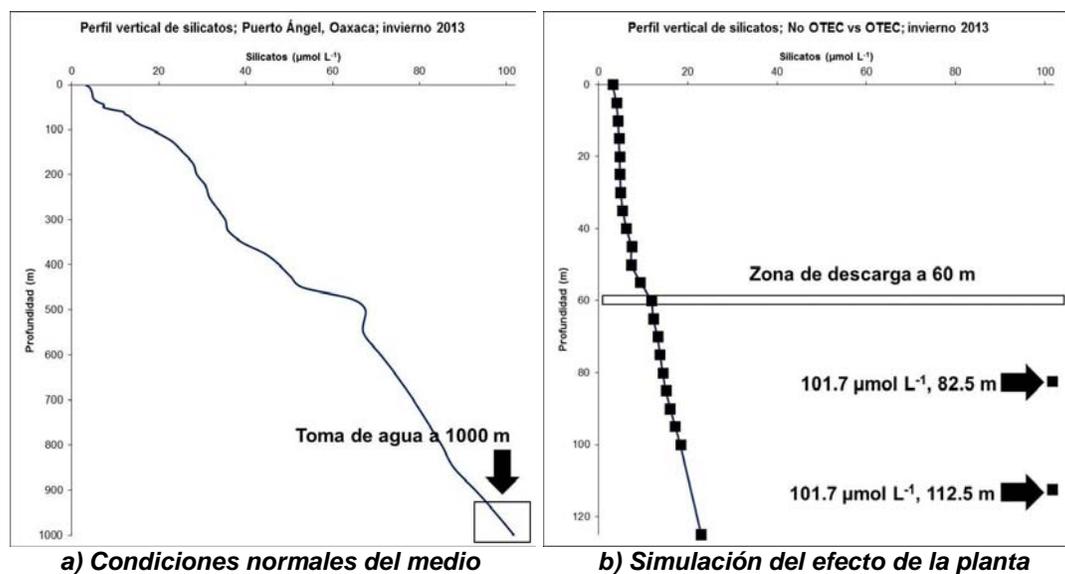


Figura 43. Perfil vertical de silicatos para Puerto Ángel, a) sin operación de la planta OTEC en invierno; b) con la operación de la planta OTEC en invierno

7.2.7. Oxígeno disuelto.

Para el caso de la operación de una planta OTEC, el oxígeno no tendría cambios negativos pues las aguas pobres del fondo, al momento de ser bombeadas, se oxigenarían por la acción de mezcla turbulenta tanto en la extracción como por el paso en las tuberías de la planta. Con base en estudios previos (Guenther y Green, 1990 y Vega, 1995), este parámetro no presentaría un efecto negativo en el ambiente.

7.2.8. Huella de carbono inorgánico y eficiencia energética verde.

7.2.8.1. Potencia neta.

Utilizando los datos para la fórmula (11) se tiene que:

$100 \text{ MW} \times 24 \text{ horas} \times 365 \text{ días} \times 0.8 \text{ (FCT)} \times 0.65 \text{ (EBG)} \text{ MWh} = 455,520 \text{ MWh} = 455.52 \text{ GWh}$, o una generación diaria de energía neta producida de 1.248 GWh y considerando una vida media de utilidad de la OTEC de unos 30 años, su producción de energía neta de por vida sería $455.52 \text{ GWh} \times 30 \text{ años} = \mathbf{13,666 \text{ GWh}}$

7.2.8.2. Emisión de CO₂ de la planta OTEC sin fases operativas.

Utilizando los datos de la Tabla I por parte de la Universidad de Bath, se obtuvo el resultado por medio de la fórmula (12):

Tabla I. Emisión estimada de CO₂ de una planta OTEC para 100 MW de generación de energía eléctrica

Materiales de inventario	Emisión de CO ₂ (kg kg ⁻¹) **	Peso de los materiales (kg) ***	Emisión total de CO ₂ estimado (kg)
Acero (diferentes tipos) *	6.15	4,157,000	25,565,550
Cobre	3	270,000	810,000
Hierro	1.91	16,817,000	32,120,470
Plásticos	2.53	14,216,000	35,966,480
Cemento	0.83	75,000,000	62,250,000
Gran total		110,460,000	156,712,500

Nomenclatura: *(valores promedio); **(Hammond y Jones, 2008); **(Tahara et al. 2000)

La emisión de CO₂ (excluyendo emisiones fase operativa) es de 156' 712, 500 kg/13,665.8 GWh = **11.46 gCO₂ kWh⁻¹**

7.2.8.3. Emisión de CO₂ en fases operativas más emisión de amoníaco.

En el presente estudio se utilizaron los datos de las emisiones de CO₂ durante la fase de trabajo, por CC-OTEC, OC-OTEC y tipos OTEC híbridos, estimadas a partir de los estudios de Green y Guenther (1990), junto con los experimentos con el aparato HMTSTA y que mostraron:

38.5 g kWh⁻¹ para OC-OTEC,
11.7 g kWh⁻¹ para el tipo híbrido, y
<1 g kWh⁻¹ para CC-OTEC (0.8 g kWh⁻¹)

Así, en términos de g kWh^{-1} la emisión de NH_3 para CC-OTEC sería $2' 220,000 \text{ kg}/13,665.8 \text{ GWh} = 0.16 \text{ g kWh}^{-1}$

7.2.8.4. Eficiencia térmica verde (huella de carbono).

Emisiones de CO_2 de una planta OTEC-CC 100 MW = $(11.46 + 0.8 + 0.16) \text{ g kWh}^{-1} = 12.42 \text{ g kWh}^{-1}$

Emisiones de CO_2 de una planta OTEC-OC 100 MW = $(11.46 + 38.5) \text{ g kWh}^{-1} = 49.96 \text{ g kWh}^{-1}$

Emisiones de CO_2 de una planta híbrida OTEC 100 MW = $(11.46 + 11.7 + 0.16) \text{ g kWh}^{-1} = 23.32 \text{ g kWh}^{-1}$

Sobre la base de estudios de LCV de una central eléctrica de carbón típica, las emisiones de CO_2 que tiene ha señalado que sobrepasa los 900 g kWh^{-1} (Odeh y Cockerill, 2008).

En consecuencia, **la eficiencia energética verde de la planta OTEC sería:**

Porcentaje de CO_2 ahorrado para una planta OTEC-CC 100 MW = $100 - (12.42/900) = 98.62\%$

Porcentaje de CO_2 ahorrado para una planta OTEC-OC 100 MW = $100 - (49.96/900) = 94.45\%$

Porcentaje de CO_2 ahorrado para una planta OTEC híbrido 100 MW = $100 - (23.32/900) = 97.41\%$

Por lo tanto, el ahorro de CO_2 de 100 MW OTEC varía entre 98.62 y 94.45%, dependiendo del tipo de ciclo utilizado por lo que las emisiones de este gas a la atmósfera sería entre el 1.38% y el 5.5% ($0.17 \text{ g CO}_2 \text{ kWh}^{-1}$ - $2.74 \text{ g CO}_2 \text{ kWh}^{-1}$).

7.3. Velocidad y Dirección de las corrientes geostróficas.

Los mayores valores de velocidad geostrófica se obtuvieron en las regiones Occidental y Central del golfo, entre las estaciones 3 y 9 de la Campaña Oceanográfica TEHUA X; realizada en el mes de junio de 2012, con magnitudes de hasta 0.2 m s^{-1} entre los 50 y 640 metros de profundidad con dirección sureste (SE), mientras que en la región Oriental, la máxima velocidad fue de 0.08 m s^{-1} hasta los 20 m con dirección noroeste (NW) (Figuras 44 y 45). Las direcciones se presentan de acuerdo a la profundidad (0-80 m, 80-150 m, 150-400 m y 400-750 m) (Figuras 43 A, 43 B, 43 C y 43 D) y son perpendiculares al transecto.

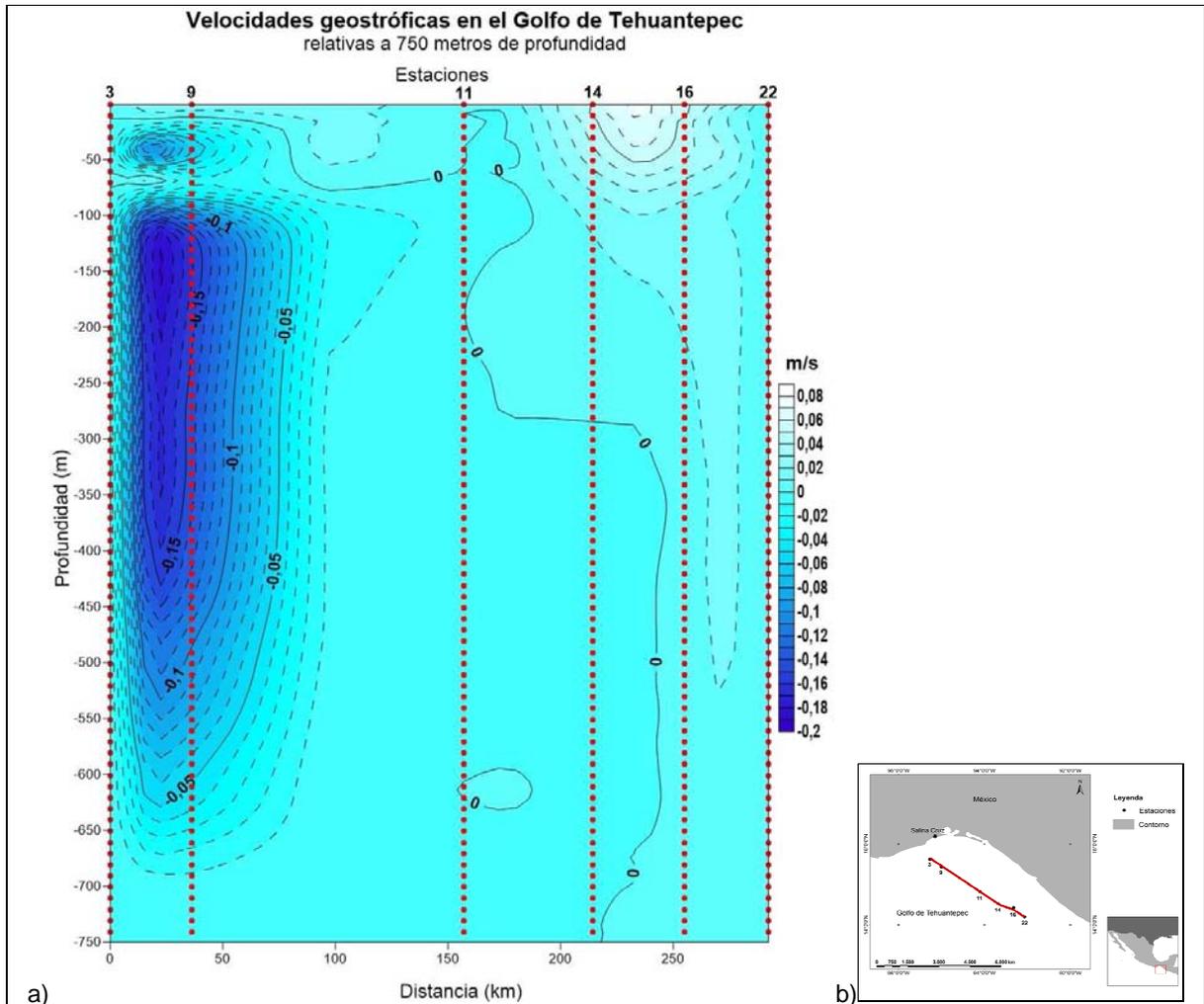


Figura 44. Velocidades geostróficas relativas en los primeros 750 metros de profundidad para las estaciones monitorizadas en el Golfo de Tehuantepec [42a] (transecto seguido por el B/O “El Puma” durante la Campaña Oceanográfica TEHUA X del 6 al 12 de junio de 2012 [42b]).

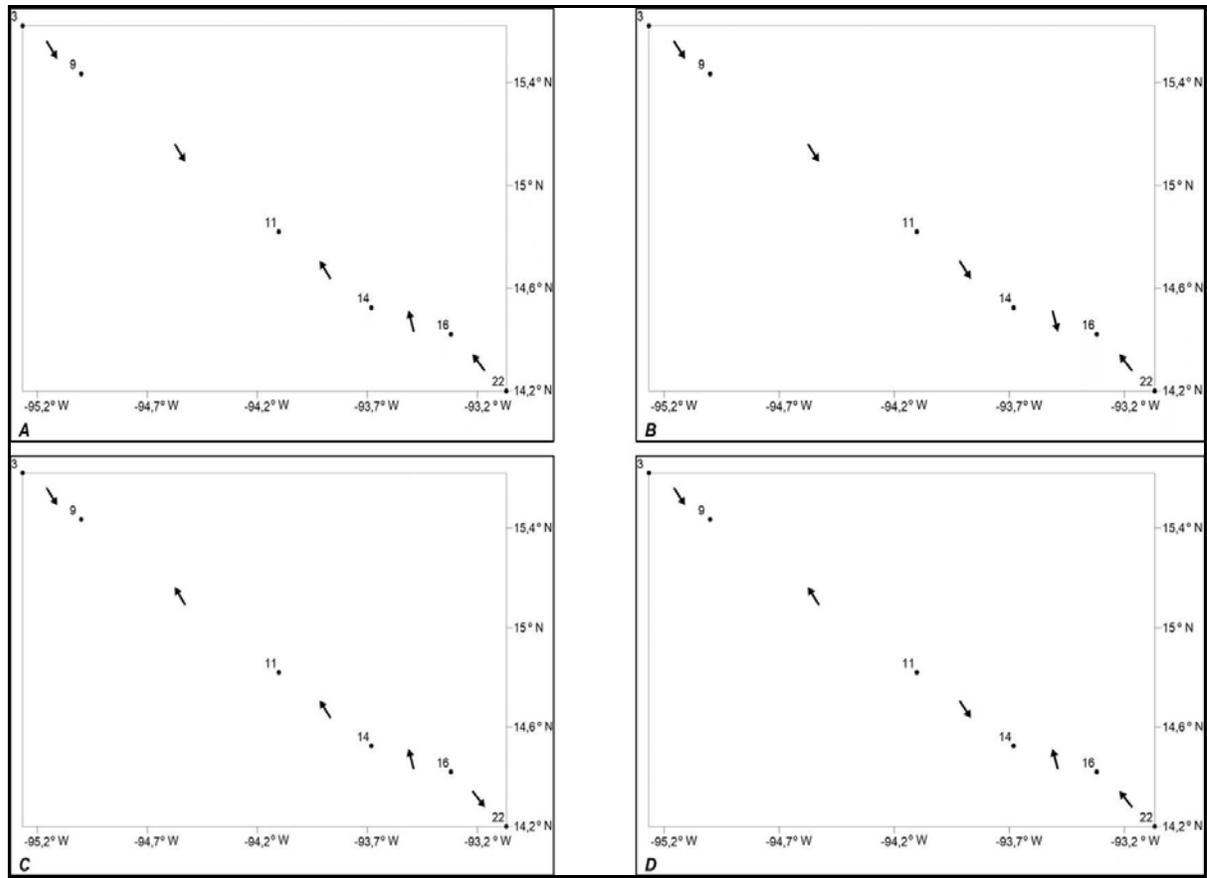


Figura 45. Direcciones de la velocidad geostrófica para las profundidades analizadas [perpendiculares al transecto]. A) 80 m de profundidad; B) 150 m de profundidad; C) 400 m de profundidad y D) 750 m de profundidad.

7.4. Pérdidas de energía y velocidad promedio.

Tabla II. Parámetros para medición de pérdidas por fricción y velocidad media para la zona de descarga y el tubo de agua fría de la planta OTEC de Puerto Ángel y otros sitios.

Planta	País	Potencia	Diámetro de la tubería (m)	Velocidad del agua de descarga ($m s^{-1}$)*	Pérdidas por fricción (m)	Profundidad (m)	Tipo de planta	Status
Goseong	Corea del Sur	20 kw	0.3	1.33	9.35	10	Onshore	F
Mini OTEC	USA	50 kw	0.61	2.10	5.94	ND	Offshore	I
NELHA	USA	210 kw	1	2.28	10.27	75	Onshore	D
Tamil Nadú	India	1 MW	0.9	2.24	6.86	ND	Offshore	D
Okinawa	Japón	50 kw	0.6	2.1	21.54	50	Onshore	F
Puerto Ángel	México	100 MW	0.38	1.94**	0.88***	60	Offshore	P

Nomenclatura: *dato promedio; **dato teórico calculado (Factor Manning); *dato teórico calculado (Factor Darcy-Weisbach); ND: no disponible; F: funcionando; I: inhabilitado; D: destruida/demolida; P: proyecto en estudio.**

(Fuente: Ryu, *et. al.* 1999, Kim, *et. al.* 2012)

Los resultados obtenidos sugieren que existirá una pérdida por fricción en una altura de 0.88 m por lo que el fluido recorrerá una longitud final en el tubo de descarga de 59.11 m, con una velocidad media de 1.94 m s^{-1} , en lugar del valor teórico de velocidad de descarga que es de 2.1 m s^{-1} , para el caso de la planta de Puerto Ángel.

7.5. Comparación entre la descarga de la planta OTEC y la surgencia del Golfo de Tehuantepec.

Los resultados se presentan en la siguiente tabla (Tabla III):

Tabla III. Parámetros y condiciones físicas de una planta OTEC y la surgencia del Golfo de Tehuantepec.

Parámetros y condiciones físicas	Surgencia Tehuantepec	Condiciones normales	OTEC (teóricas)
Fosfatos	0.84 μM	0.2 μM	3.5 μM
Silicatos	5.14 μM	0.6 μM	80 μM
Nitratos	5 μM	0.25 μM	45 μM
Velocidad	0.588 m s^{-1}		2.1 m s^{-1}
Gasto	185 000 $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$		133 $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$
Profundidad	entre 50 y 80 m		600 m

(Fuente: Walsh *et al.* 1977; Merino-Ibarra, 1992; Avery y Wu, 1994; De la Lanza, 1991).

Con base en lo anterior, se tiene que en cuanto a la velocidad de ascenso de agua, la de la planta OTEC es mayor a la de la surgencia natural pero el gasto final es mayor en esta última porque el área de influencia es mucho mayor que el área total de la planta. Se puede observar también que hay diferencias en cuanto a las concentraciones de nutrientes debidas a estos dos procesos, siendo más altos en la zona de influencia de la planta OTEC porque las aguas provienen desde zonas de más de 600 m de profundidad, mientras que las aguas de la surgencia en Tehuantepec provienen de profundidades entre 50 y 80 m, además de que éstas últimas no afloran completamente en superficie.

7.6. Efecto ambiental para la zona de descarga.

7.6.1. Medición de concentración y dilución de los nutrimentos en la zona de estudio.

De acuerdo al análisis realizado por el programa CORMIX y con base en la dinámica oceanográfica de la zona, se tiene que el agua de descarga (recordar que se descarga a 60 m de profundidad) se mantiene estacionariamente durante un lapso breve de tiempo (5 horas aproximadamente) en la columna de agua, sin embargo, posteriormente, dicha descarga recorre una distancia en línea recta de 700 m y durante el recorrido, los nutrimentos se van diluyendo conforme operan diferentes

mecanismos oceánicos como las corrientes superficiales, velocidades geostróficas, coeficientes de dilución, reacciones químicas, entre otras.

Debido a esto, en un lapso no mayor a una semana, las concentraciones de nutrientes del agua de descarga (nitratos, fosfatos, silicatos) son reducidas a una concentración final de 1.81 mg L^{-1} para nitratos (Figura 46), 0.22 mg L^{-1} para fosfatos (Figura 47) y 5 mg L^{-1} para los silicatos (Figura 48).

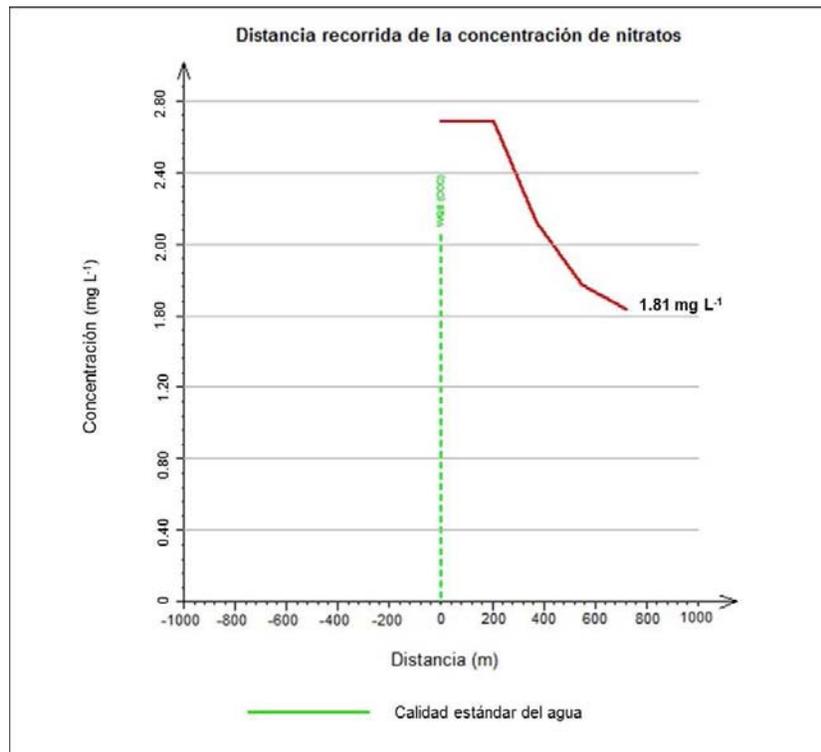


Figura 46. Concentración final de nitratos en el agua de descarga de la planta OTEC.

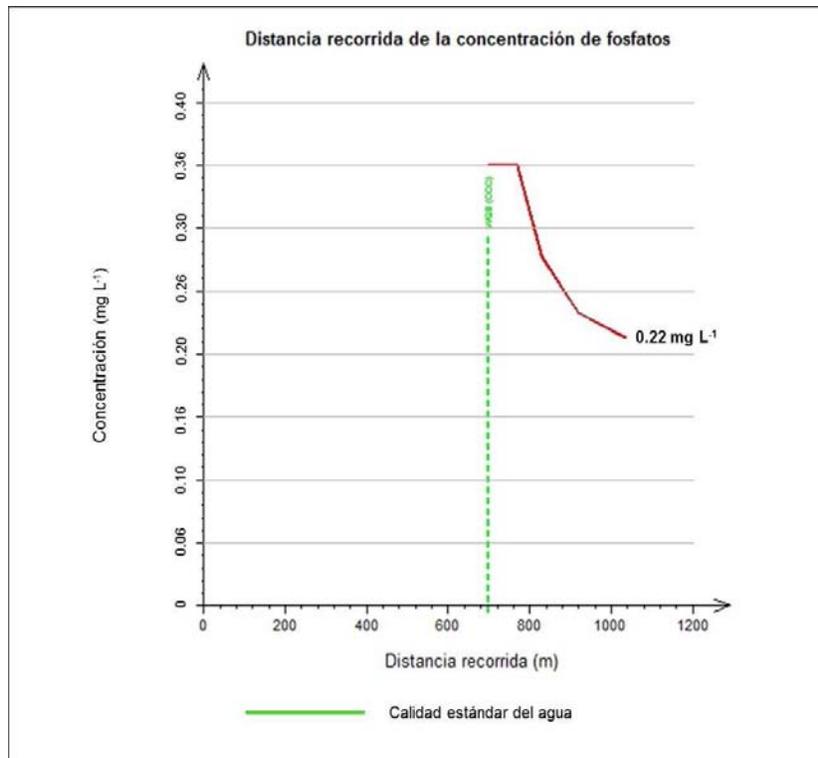


Figura 47. Concentración final de fosfatos en el agua de descarga de la planta OTEC.

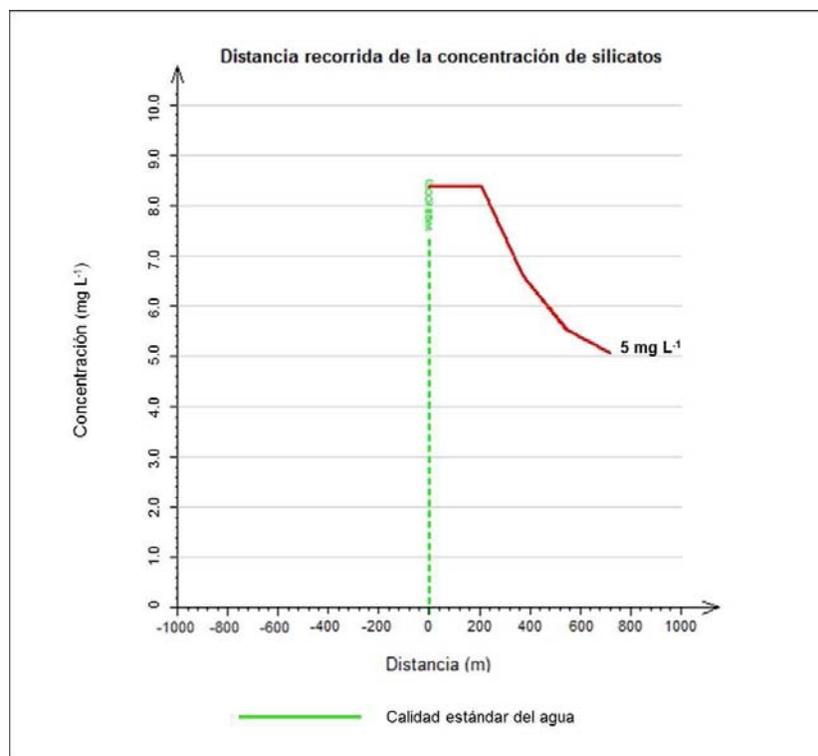


Figura 48. Concentración final de silicatos en el agua de descarga de la planta OTEC.

El comportamiento de la pluma de agua de descarga se observa en las siguientes figuras (49, 50 y 51) para cada uno de los nutrientes. Como ya se ha mencionado, la pluma del agua de descarga recorrerá una distancia no mayor a 700 m en línea recta y se irá diluyendo conforme pase el tiempo y siga recorriendo una mayor distancia además del accionar de la dinámica oceanográfica, química y biológica que se presente.

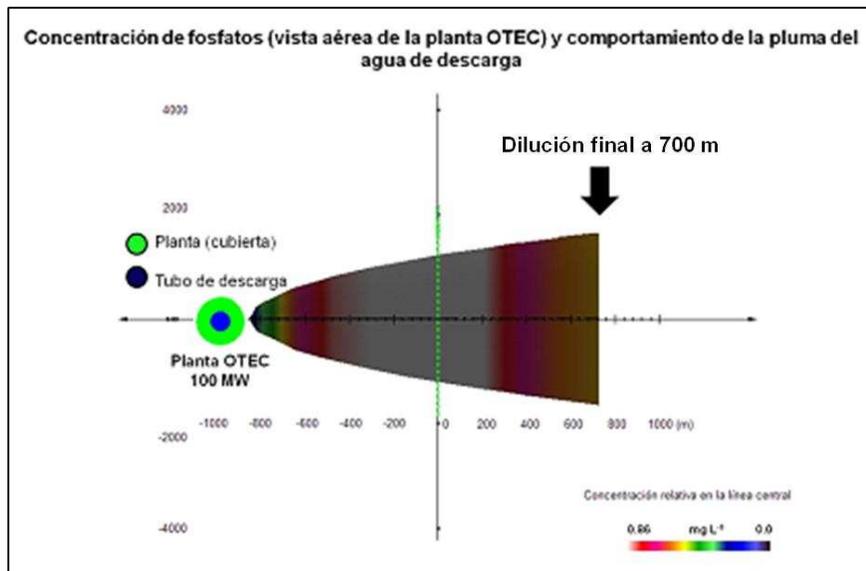


Figura 49. Comportamiento de la pluma de agua de descarga de la planta OTEC para los fosfatos.

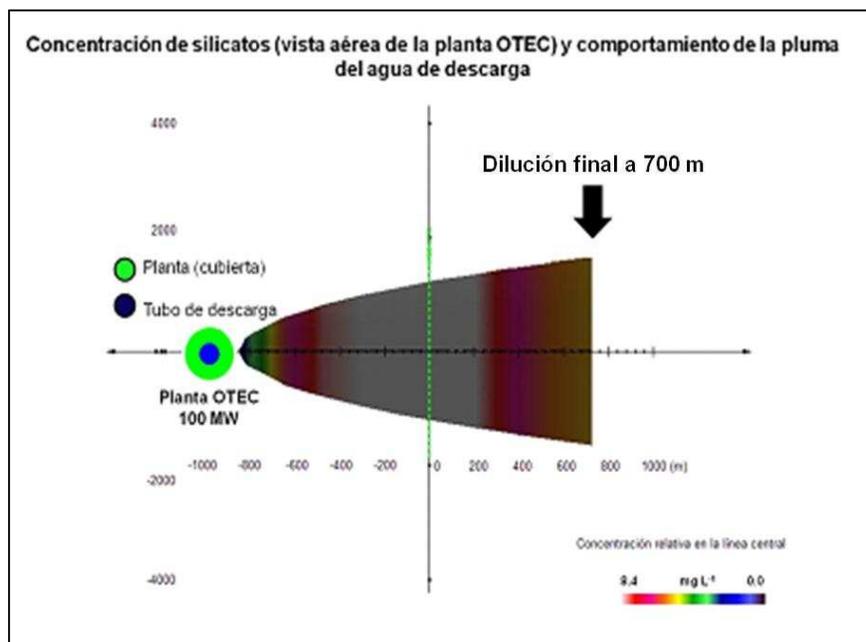


Figura 50. Comportamiento de la pluma de agua de descarga de la planta OTEC para los silicatos.

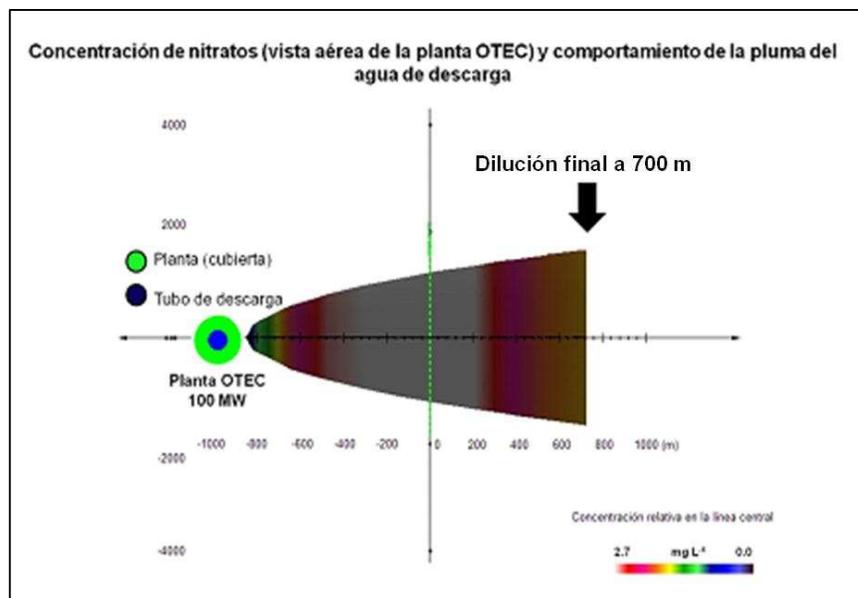


Figura 51. Comportamiento de la pluma de agua de descarga de la planta OTEC para los nitratos.

7.6.2. Efecto biológico del agua de descarga de la planta OTEC.

De acuerdo al último listado de especies FAN para el Pacífico Tropical Mexicano (Band-Schmidt *et al.* 2011), aquellas que potencialmente pueden generar un florecimiento en la zona de estudio del presente trabajo son:

- 1.- *Gymnodinium catenatum* (Graham).
- 2.- *Pyrodinium bahamense* (Plate) variedad *compressum* (Bohm) Steidinger.
- 3.- *Pseudo-nitzschia* spp. (Peragallo) (Especies tóxicas del Golfo de Tehuantepec: *P. delicatissima*, *P. fraudulenta*, *P. pseudodelicatissima*, *P. pungens* y *P. subfraudulenta*)
- 4.- *Cochlodinium polykrikoides* (Margalef)

De acuerdo con los resultados obtenidos por el programa CORMIX y la dinámica oceanográfica de la zona, la concentración de nutrientes presentes en la zona de descarga en comparación con los datos de surgencia en la zona del Golfo de Tehuantepec (previa conversión de unidades) son los siguientes (Tabla IV):

Tabla IV. Concentraciones de los diferentes nutrientes de acuerdo con la zona de descarga de agua en los diferentes procesos de afloramiento de agua

Parámetros	Zona de surgencia (esfuerzo eólico) GT	Zona de agua de descarga, OTEC
Fosfatos	0.84 $\mu\text{mol L}^{-1}$	2.31 $\mu\text{mol L}^{-1}$
Silicatos	5.14 $\mu\text{mol L}^{-1}$	83.33 $\mu\text{mol L}^{-1}$
Nitratos	5 $\mu\text{mol L}^{-1}$	29.19 $\mu\text{mol L}^{-1}$
Profundidad	50-80 m (subsUPERficial)	73-113 m (subsUPERficial); el agua fría se obtiene de 1000 m de profundidad

De acuerdo con estos datos y, añadiendo los datos de temperatura y salinidad para el agua de descarga de la planta OTEC se tendría lo siguiente (Tabla V):

Tabla V. Parámetros fisicoquímicos para la zona de descarga de la planta OTEC

Parámetro	Medición/Concentración
Temperatura	13.8-17.2°C
Salinidad	34.5 ups
Fosfatos	2.31 $\mu\text{mol L}^{-1}$
Silicatos	83.33 $\mu\text{mol L}^{-1}$
Nitratos	29.19 $\mu\text{mol L}^{-1}$

En función con estos datos, se observa que, debido a la dinámica oceanográfica presente en la zona (corrientes superficiales, corrientes geostróficas, dilución de los nutrientes en la columna de agua, etc.) las concentraciones de fosfatos, silicatos y nitratos para la pluma de agua de descarga son distintas a las aguas emergentes durante la surgencia en el Golfo de Tehuantepec. Para todos los casos, las concentraciones se elevan considerablemente con respecto a las concentraciones medidas durante el evento de surgencia, llegando ligeramente a los niveles teóricos previstos en la tabla III.

Debido a esto, se debe determinar si con estas concentraciones de nutrientes y los parámetros de temperatura y salinidad, ya descritos, se pueden formar florecimientos de las especies algales mencionadas anteriormente y para esto, se deben investigar los requerimientos ambientales de las mismas, las cuales se muestran en la siguiente tabla (Tabla VI):

Tabla VI. Requerimientos ambientales para el crecimiento óptimo de las especies FAN determinadas para el estudio

Especie	Temperatura	Salinidad	N:P:Si
<i>G. catenatum</i>	12°-30°C	28-32 ups	16:1
<i>P. bahamense</i>	31.3°C (óptimo)	30.9 ups	16:1
<i>C. polykrikoides</i>	25°-32°C	33-35 ups	16:1
<i>Pseudonitzschia delicatissima</i>	5°-30°C	6-48 ups	16:1:15
<i>P. fraudulenta</i>	5°-30°C	6-48 ups	16:1:15
<i>P. pseudodelicatissima</i>	5°-30°C	6-48 ups	16:1:15
<i>P. pungens</i>	5°-30°C	6-48 ups	16:1:15
<i>P. subfraudulenta</i>	5°-30°C	6-48 ups	16:1:15

Fuente: Cortés-Altamirano (1998), Romero-Gutiérrez (2008)

De acuerdo con los datos, *G. catenatum*, *P. bahamense* var. *compressum* y las cinco especies tóxicas de *Pseudonitzschia* spp. se verían beneficiados por todas las variables descritas; sin embargo, los nutrientes tendrían una relevancia muy importante pues la relación Reidfield teórica para la pluma de agua de descarga (considerando la dinámica oceanográfica de la zona) sería de 10:1:27 lo cual

generaría una limitación por nitrógeno y no permitiría el desarrollo óptimo de estas tres especies de FAN para que pudieran proliferar en la zona de estudio.

8. DISCUSIÓN.

8.1. Parámetros fisicoquímicos.

La temperatura es una variable que presenta cambios importantes de manera estacional en el Golfo de Tehuantepec y que afecta de manera directa a la zona de Puerto Ángel. De acuerdo con Roden *et al.* 1961, la temperatura más alta en la superficie se presenta durante los meses de verano (entre 28° y 30°C) y la más fría en los meses de invierno (27°C), debido a la influencia de los vientos tehuanos que provienen de la Región Central del Golfo de Tehuantepec y afectan sobre la superficie marina.

De acuerdo con De la Lanza-Espino (1991), también existen otros factores que influyen en las diferencias estacionales de la temperatura como lo son las corrientes superficiales que se ven afectadas en su velocidad por la propagación de los tehuanos. Incluso, de acuerdo con Flores-Vidal, *et al.* (2010), los vientos (por su gran intensidad) pueden generar afectaciones que persisten varios meses, generando corrientes superficiales locales las cuales cambian la dinámica oceanográfica de la zona y generan cambios en la temperatura superficial.

En cuanto a la salinidad, la mayor parte del tiempo su comportamiento depende de factores meteorológicos, sobre todo de la precipitación presente en la zona (Roden *et al.* 1961; De la Lanza-Espino, 1991). Como evidencia de lo anterior, el análisis de la información disponible muestra una mayor salinidad en los meses de invierno que durante el verano; esto debido a los eventos ciclónicos generados en el Golfo de Tehuantepec que provocan una mayor precipitación en zonas más hacia el sur lo que hace que exista un menor gradiente salino durante tales eventos.

En cuanto a los nutrimentos, los nitratos se comportan de manera similar al que se ha descrito para el Pacífico Tropical Oriental. Los nitratos generalmente son indetectables en los primeros 10 m de profundidad, y debido a este hecho, se ha catalogado al nitrógeno como el elemento limitante de las aguas oligotróficas de la costa Occidental Tropical de México, de acuerdo con Molina-Cruz y Martínez-López, 1994 y De la Lanza-Espino, 1991.

El incremento de los nitratos (y en general de todas las especies nitrogenadas) se observa por debajo de los primeros 30 m de profundidad y en función de la localidad varían tales formas nitrogenadas en cuanto a su concentración. En el caso de Puerto Ángel, se observa que existe un claro incremento de los nitratos en los primeros 25 m de profundidad de hasta 15.49 $\mu\text{mol L}^{-1}$ durante el verano, observándose también picos intermitentes conforme se aumenta la profundidad.

En el invierno, se observa un decremento en los nitratos en la misma capa superficial (3.64 $\mu\text{mol L}^{-1}$) y esto se debe, particularmente, al balance dinámico por captación del fitoplancton y su re-disposición, así como por la advección y difusión de las especies nitrogenadas, sobre todo los nitritos-nitratos, generados por el ciclo de nitrificación-desnitrificación de las bacterias heterótrofas presentes en la zona, de acuerdo con Anderson (1982).

Los fosfatos varían entre 2.1 y 2.4 $\mu\text{mol L}^{-1}$ a 100 m de profundidad de manera estacional y se incrementan a mayor profundidad debido a la influencia de la masa de agua intermedia, rica en fosfatos (Blackburn, 1962 y De la Lanza-Espino, 1991); en el caso de Puerto Ángel se puede esperar un incremento similar.

Se observa también un incremento de este elemento en la costa debido a los aportes continentales (arroyos y descargas urbanas presentes en la zona), acentuándose este proceso en la época de lluvias (verano). En el caso de los silicatos, la concentración aumenta con la profundidad, independientemente de la época del año (De la Lanza-Espino, 1991), Sin embargo, el comportamiento histórico muestra que las concentraciones en fondo y en superficie son diferentes con respecto a Puerto Ángel. Esto puede ser debido a errores o diferencias en las técnicas de medición, menor intensidad de muestreo (menor número de cruceros, horas del día muestreadas) o por la presencia de distintos procesos continentales (lluvias, sequías).

Para el caso de Puerto Ángel, los silicatos disminuyen de norte a sur y se incrementan hacia la costa debido a la entrada de aguas negras, sedimentos terrígenos, así como la resuspensión propia de la época de lluvias que genera una mayor entrada de este nutrimento en la superficie.

8.2. Efecto por la operación de la planta OTEC.

Para el caso de las emisiones generadas de CO_2 por el funcionamiento de la planta OTEC, Green y Guenther (1990) explican que dependiendo del tipo de ciclo que utilice la planta, será la emisión que esta tenga en la atmósfera, oscilando entre 0.8 y 38.5 $\text{g CO}_2 \text{ kWh}^{-1}$; Banerjee *et al.* (2015) mencionan las mismas cifras para megaplantas OTEC a partir de 100 MW de generación de energía eléctrica; las cuales son mucho menores a las de otras plantas que utilizan combustibles fósiles para producir energía (531 $\text{g CO}_2 \text{ kWh}^{-1}$ si son plantas con base en gas natural, 730 $\text{g CO}_2 \text{ kWh}^{-1}$ si son a base de petróleo y 934 $\text{g CO}_2 \text{ kWh}^{-1}$ si son con base en el carbón) por lo que en este caso, una planta OTEC, cualquiera que sea su dimensión y su capacidad de generación, tendrá una menor afectación sobre el ambiente lo cual es un beneficio muy importante. Sin embargo, queda patente que la mejor opción para no generar el mínimo de gases de efecto invernadero sería la planta OTEC con base en el ciclo cerrado (0.8 $\text{g CO}_2 \text{ kWh}^{-1}$), adicionalmente las emisiones en fase operativa estarán determinadas de acuerdo al tipo de fluido de trabajo que se utilice, pues según Banerjee *et al.* (2015) hay que calcular las emisiones generadas por dichos compuestos químicos. Sin embargo, cabe mencionar que será muy importante tomar en cuenta que se deberán hacer muestreos frecuentes de CO_2 y de secuestro del mismo gas pues son datos calculados basados en experimentos realizados en otras regiones del planeta y Puerto Ángel por su ubicación en una región tropical presenta concentraciones de CO_2 disuelto en el océano muy distintos.

8.3. Ubicaciones tentativas de la planta OTEC.

De acuerdo con Avery y Wu (1994) y Vega (2010), la distancia máxima a la que se puede ubicar una planta OTEC flotante con respecto a la línea de costa es de 10 km debido a que a esta distancia se presentan las menores pérdidas por transmisión de

la energía eléctrica generada y es menor el costo para colocar la tubería de agua fría. En este caso, la profundidad de la zona costera permitiría la colocación de la planta a una menor distancia por lo que no habría una pérdida importante en cuanto a la energía eléctrica generada y transportada para su utilización en la población. Incluso, la profundidad promedio que puede ser explotada para el bombeo de agua fría en la zona es de 600 m, manteniéndose el gradiente térmico mínimo necesario para el funcionamiento de la planta (20°C), permitiendo su operación durante los 365 días del año, las 24 horas del día, lo que abarataría los costos de instalación y operación.

Lo anterior hace que la zona de Puerto Ángel sea un sitio adecuado para la instalación y operación de la planta. Por otro lado, al ser una población pequeña (~45,000 habitantes) la energía eléctrica producida podría ser aprovechada en su totalidad en la zona, ya que de acuerdo con Vega (2010), la población que puede recibir beneficios en cuanto a energía eléctrica es de 50,000 habitantes. La población beneficiada estará en función de la capacidad generadora de electricidad, ya que por ejemplo, una planta OTEC de 100 MW generaría energía suficiente para electrificar una zona más amplia, lo que incrementa los beneficios de su operación (Kim, 2012). Además, la ventaja que tiene este lugar con respecto a otros que también presentan condiciones ideales para la operación de una planta en el país como lo son Los Cabos, B.C.S., Cabo Corrientes, Jalisco y Bahía Banderas, Nayarit es que no existen sitios que cuenten con un status de protección ambiental federal como lo son el arrecife de Cabo Pulmo en Los Cabos, el Santuario Playón de Mismaloya y el Santuario El Tuito pertenecientes al municipio de Cabo Corrientes y las islas Marietas pertenecientes al municipio de Bahía de Banderas, a pesar de que la zona presenta algunos sitios protegidos como la Playa La Escobilla, Playa Ventanilla y el Parque Nacional Bahías de Huatulco. Sin embargo, debido a la dirección de las corrientes y la distancia de estos sitios con respecto a Puerto Ángel, la planta OTEC no generaría efectos o impactos importantes en estos lugares. Adicionalmente, el gradiente térmico en Puerto Ángel permitiría la operación de la planta todo el año mientras que en Los Cabos sólo podría operar de tres a cuatro meses en el verano lo que limita la viabilidad económica de este sitio, de acuerdo con Crews (1997) y Vega (2010).

Por otro lado, los países que ya emplean esta nueva tecnología como Estados Unidos, Japón y Corea del Sur, ven viables las construcciones de plantas OTEC más grandes y de mayor generación de energía eléctrica (10-100 MW) de tal forma que el estudio del gradiente térmico en las zonas potenciales de instalación son muy importantes ya que nos permitirá saber la relación costo-beneficio de tales instalaciones, especialmente si México está preparado y cuenta con estudios para la instalación de este tipo.

Kim *et al.* (2012) hacen un estudio de factibilidad para plantas OTEC de gran dimensión (en su estudio menciona una planta tipo plataforma (offshore) generadora de 50 MW de energía eléctrica en Corea del Sur) y destacan que el gradiente requerido para tal fin sería de 21°C utilizando como fluido de trabajo el R-32 y que la primera inversión económica sería de USD\$359.3 millones de dólares en comparación de los USD\$451 millones de dólares que estableció Vega (1992; 2010) sin considerar los precios de amortización y el porcentaje de subsidio por parte del

gobierno además del costo por el porcentaje de eficiencia energética verde por la emisión de CO₂ al ambiente.

Si bien los precios se han modificado con el paso del tiempo y ha mejorado la tecnología de las plantas OTEC, México no competiría económicamente para construir plantas grandes, debido a que el objetivo gubernamental es el máximo aprovechamiento del recurso petrolero por ser la base de la economía, aunque con la nueva reforma energética que entró en vigor en 2014 esto podría cambiar radicalmente a favor de las energías alternativas al permitirle a la inversión privada la posibilidad de instalar y operar este tipo de plantas. Sin embargo, las ventajas de este estudio con respecto a las condiciones nacionales son interesantes pues con el gradiente propuesto por Kim (2012) se pueden utilizar plantas de menor generación eléctrica en las zonas costeras del país pues el mínimo gradiente permisible se encuentra a 550 m de profundidad (20°C) por lo que usando la diferencia térmica teórica se podrían construir plantas onshore de entre 1 y 10 MW, en donde la distancia de la línea costera a la isolínea de 600 m sea la menor posible y Puerto Ángel presenta esta opción junto con otras áreas aledañas como Zipolite, San Agustínillo y Mazunte (Crews, 1997) pues nuestros cálculos de distancia manejan un promedio final de 6 km, por lo que la mayor inversión sería la tubería de agua fría.

Por lo tanto, a pesar de que este estudio se hizo para una planta offshore de 100 MW de energía eléctrica (que es una cota superior), lo más conveniente son plantas onshore de menor capacidad (empezando con plantas experimentales y plantas piloto de entre 20 y 100 kW) con el fin de que los costos sean los más bajos posibles y conforme pase el tiempo las instalaciones puedan ir creciendo en cuanto a generación de energía se refiere.

8.4. Aporte de nutrimentos, dinámica oceanográfica y comparación con la surgencia (esfuerzo eólico) de Tehuantepec.

En este caso, existiría un aumento en la concentración de los diferentes nutrimentos con respecto a las concentraciones detectadas durante la surgencia de Tehuantepec (Robles-Jarero y Lara-Lara; 1993; Fernández-Álamo y Sanvicente-Añorve; 2005, Fernández-Álamo y Färber-Lorda, 2006) y se tendrían concentraciones similares a las teóricas, propuestas por Avery y Wu (1994) para una planta OTEC de 100 MW. En cuanto a la zona del Golfo de Tehuantepec (zona 1 Puerto Ángel-Bahías de Huatulco) y con base en los datos de la NODC/NOAA (2013) para Puerto Ángel, se puede establecer lo siguiente:

Para los nutrimentos, existe un incremento en cuanto a su concentración, la cual es mayor entre los 77.5 y 112.5 m de profundidad (en verano) y entre los 82.5 y 112.5 m (en invierno) cuando la planta OTEC está en continuo funcionamiento, en comparación con las concentraciones naturales y las concentraciones producidas por la surgencia de Tehuantepec (que se da durante los meses de invierno) pues mientras que para un evento de surgencia natural, las variaciones en las concentraciones son altas pero en pequeña escala, en el caso de una planta OTEC en funcionamiento, la elevación de los mismos es de 4 veces (como mínimo), lo que generaría un aumento en la producción primaria de la zona a un nivel mucho mayor a un impacto de tipo local, provocando con esto, una surgencia artificial. Sin

embargo, como se menciona a continuación, las condiciones oceanográficas de la zona inciden fuertemente en las concentraciones finales de tales elementos.

De acuerdo con Trasviña *et al.* (2002) y Monreal-Gómez y Salas De León (1998), la surgencia de Tehuantepec es subsuperficial ya que la acción del viento se transmite hasta los 80 m de profundidad, de ahí que las concentraciones serían menores durante la surgencia que con la operación de la planta OTEC. Sin embargo, tales concentraciones *disminuyen* por dilución como lo mencionan Scavia y Quenzer (1998) ya que de acuerdo con Trasviña *et al.* (2002) y Araico (2012) las velocidades geostroficadas que operan en el Golfo de Tehuantepec son muy *intensas* a lo largo del año y se vuelven más *veloces* durante los meses de invierno.

Durante los tehuanos, se observa que las velocidades ageostroficadas calculadas para la zona son del orden de 7 a 17 km día⁻¹ dependiendo de las regiones del golfo; esto implica que toda el agua de descarga de la planta se desplazaría una distancia final de 700 m en línea recta durante una semana donde terminan por diluirse los nutrientes que contiene, aunado al desplazamiento generado por las corrientes geostroficadas presentes a diferentes profundidades (en este caso, de 60 a 150 m que es la zona de descarga) así como a la tasa de dilución, el efecto de la fotosíntesis y la respiración en la zona eufótica (100 m). Adicionalmente, las reacciones químicas entre los diferentes nutrientes provocarían una fuerte disminución de las concentraciones de estos, sin embargo, siempre superiores a las concentraciones de la surgencia natural, como se observa en las tablas IV y V lo cual puede tener un efecto sobre las especies fitoplanctónicas, el cual se discute en la siguiente sección.

En este punto también hay que destacar que el instalar una planta OTEC en este sitio podría ayudar a entender más la oceanografía del Golfo de Tehuantepec en muchos aspectos. Un ejemplo de esto son las masas de agua que conforman dicha zona y las corrientes superficiales y subsuperficiales pues siguen existiendo discrepancias muy serias en muchos de estos temas. En el primer caso, existen diversos autores que determinan éstas masas de agua de acuerdo con límites de temperatura y salinidad pero no existe un acuerdo entre ellos, por lo que se generan distintas posturas que aún no son del todo comprobadas. Trasviña y Barton (1997) mencionan que de acuerdo a los archivos históricos de temperatura y salinidad para el GT (1955-1961) sólo se detectan las masas de agua ASsST (Agua Susuperficial Subtropical) y el AIA (Agua Intermedia del Antártico) mientras que Monreal y Salas (1998) determinan cuatro masas de agua: el ATS (Agua Tropical Superficial), el ASTS (Agua Subtropical Superficial), el AIP (Agua Intermedia del Pacífico) que es homóloga semánticamente al AIA (Agua Intermedia del Antártico) y el ACP (Agua Común del Pacífico) que es homóloga al Agua Circumpolar Profunda (ACPP). En dicho estudio se detalla que existe el paso del Agua de la Corriente de California pero en el diagrama T-S no se presenta pues utilizan límites de temperatura y salinidad distintos a los presentados por Torres-Orozco (1993) para la misma masa de agua, la cual en el diagrama T-S realizado si se encuentra utilizando los límites de Torres-Orozco.

En trabajos recientes, Araico-González (2012) determinó las masas de agua para los meses de verano en la zona y encontró que en dicho período, el Golfo de Tehuantepec se encontraba ocupado por el Agua Tropical Superficial (ATS) con temperaturas entre los 14 y 20°C y salinidades entre 34.5 y 34.78 ups entre los 60 y

100 m; Agua Subtropical Subsuperficial (ASTS) con temperaturas entre los 11 y 13°C y salinidades entre 34.7 y 34.8 ups entre los 125 y 300 m y Agua Intermedia del Antártico (AIA), con temperaturas entre los 6 y los 10°C y salinidades entre los 34.5 y 34.66 ups a profundidades mayores a los 350 m. También cabe mencionar que en la región Central-Occidental existe una zona de máximo termohalino (MaxTh) con temperaturas cercanas a los 29.6°C y salinidades de 34.63 ups por encima de los 40 m de profundidad, presente sólo durante los meses de mayo y junio durante algún evento de giro ciclónico. Sin embargo, tal máximo termohalino no fue detectado en el diagrama T-S histórico, por lo que se requeriría hacer un estudio con mayor detalle para determinar la aparición de esta pequeña masa de agua en futuros trabajos.

Finalmente, Fiedler y Talley (2006) determinaron las mismas masas de agua que Wyrski (1965) y Monreal-Salas (1998) añadiendo el Agua Superficial Ecuatorial (ASE), debido posiblemente a que llegan aguas provenientes de la Corriente Subsuperficial Ecuatorial (CSSE), que posteriormente formarán parte de la Corriente Norecuatorial (CNE). Esto implica que existen discrepancias en los mapas de corrientes superficiales del Pacífico Tropical Oriental, pues Trasviña (2002) menciona que hay aporte de Agua del Golfo de California por vientos locales procedentes del continente, hacia el Golfo de Tehuantepec; sin embargo en el diagrama T-S histórico (1923-2013), dicha masa de agua no aparece por lo que el aporte de corriente superficial hacia el sur, estaría implicando al ACC (Agua de la Corriente de California) la cual está presente en dicho diagrama por lo que, es necesario hacer estudios a mayor profundidad en este tema, tanto a nivel local como a nivel estacional para determinar con certeza las diferentes masas de agua que existen y también definir un patrón de límites de temperatura y salinidad en común, pues el uso de características de masas de agua de distintos autores pueden implicar errores muy serios a la hora de determinar las mismas.

8.5. Efecto biológico en el fitoplancton.

De acuerdo con los resultados obtenidos por medio de la simulación del programa CORMIX, el efecto sobre los organismos fitoplanctónicos debida a la descarga de la planta OTEC; sería importante de acuerdo con las concentraciones finales de los nutrientes analizados (nitratos, fosfatos y silicatos).

Heisler *et al.* (2008) mencionan que los cambios antropogénicos en el suministro de nutrientes influyen en la frecuencia y la toxicidad de los FAN a través de las limitaciones en el crecimiento de estos organismos debido al aumento en la concentración de nutrientes y a la proporción de los mismos. De acuerdo con esto, las concentraciones finales del agua de descarga podrían limitar la aparición y/o desarrollo de alguna de las especies nocivas de fitoplancton en la zona por lo que pueden influir en la composición fitoplanctónica; incluso los autores señalan que la concentración y proporción de nutrientes pueden influir en la producción de toxinas, de acuerdo con estudios de laboratorio. Esto significaría que las concentraciones del agua de descarga podrían no sólo ser una limitante en la composición fitoplanctónica sino influir en la toxicidad de estas especies. Sin embargo, existe poca evidencia y es muy difícil establecer que la alteración en los índices de nutrientes puedan limitar el FAN y promover la aparición de especies más benignas (Heisler *et al.* 2008).

Al igual que Heisler *et al.* (2008), Anderson (2009) sugiere que las actividades humanas más los fenómenos naturales (tormentas, corrientes y otras) pueden favorecer la aparición de diferentes tipos de FAN (tóxico y no tóxico). A pesar de esto, también sugiere que debe existir un estudio multidisciplinario, tanto de los fenómenos oceanográficos presentes en el área geográfica como el tener un mejor entendimiento de las fases nutricionales del FAN y su relación con dichos fenómenos, sobre todo, con los principales parámetros ambientales. De ahí la importancia de haber estudiado y analizado la dinámica oceanográfica en el Golfo de Tehuantepec y en Puerto Ángel, pues un mayor conocimiento del área de estudio nos puede ayudar en la comprensión del comportamiento de estos organismos durante los diferentes periodos estacionales.

Complementando esto último, estudios hechos por Olivos-Ortíz *et al.* (2013) determinaron que, de acuerdo a la estacionalidad y a la concentración de cierto grupo nutricional dará como resultado la aparición de ciertos grupos fitoplanctónicos pues detectaron que a mayor nivel de nitrógeno con respecto a fosfatos y silicatos se tendrán densidades más altas de dinoflagelados durante las temporadas cálidas mientras que si la concentración era inversa en época de frío, se tendría una mayor concentración de diatomeas pero que tales opciones se verán afectadas por los procesos oceánicos presentes en la zona y la dinámica natural de los nutrientes. En nuestro caso se tendría un mayor aporte de silicatos con respecto a los nitratos y fosfatos por lo que la planta OTEC podría promover florecimientos de diatomeas durante todo el ciclo anual. Sin embargo, se requieren estudios más especializados que nos permitan concluir que dichos patrones pueden ser reales conforme la planta esté operando.

De acuerdo con los estudios de Rocheleau y Grandelli (2013), los resultados de la simulación para el agua de descarga de una planta OTEC de 100 MW determinan que se deben realizar estudios con un enfoque multidisciplinario muy importantes debido a que las concentraciones tanto de nutrientes como de organismos fitoplanctónicos son muy dinámicas y se debe de considerar un diseño de la planta que permita que la perturbación en el medio sea la menor posible. En este caso, ante las concentraciones finales calculadas de nutrientes podemos recomendar que se realicen estudios previos a la construcción y operación de plantas OTEC basados en las normas regulatorias tanto nacionales como internacionales y un análisis orientado a todo lo concerniente a la ecología del fitoplancton. Esto permitirá conocer con mayor detalle el comportamiento fisiológico de tales organismos además de sus mecanismos de proliferación con el fin de tener mejores programas de monitoreo para prevenir y mitigar posibles efectos negativos.

Por otro lado, las concentraciones finales de nutrientes en el agua de descarga podrían favorecer la presencia de organismos fitoplanctónicos lo mismo para el caso de parámetros como la temperatura y salinidad. Gires-Usup *et al.* (2012) mencionan que para el caso de *Pyrodinium bahamense* var. *compressum* se tienen ciertas condiciones que permiten su crecimiento poblacional tales como una salinidad variable (30 ups; 10-45 ups o mayor a 28 ups), temperaturas con rangos de 25-31°C, con un óptimo de 28°C y una irradiancia de 50 $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y concentraciones de nutrientes por arriba de los 100 $\mu\text{mol L}^{-1}$ tanto para nitrógeno como fósforo. Por otra parte, esta especie requiere un hábitat dinámico con tiempos de residencia del agua muy cortos (patrón característico para la zona del GT) y que se presente en mar

abierto por lo que se requiere conocer la dinámica de los florecimientos de este organismo. El agua de descarga presenta temperaturas entre los 14 y 18°C y salinidades de 34.5 ups que en principio, no promoverían un posible florecimiento de este organismo, sin embargo, con las concentraciones finales de nutrientes (2.31 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de fosfatos, 29.19 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de nitratos y 83.33 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de silicatos) podría generarse un crecimiento importante aunado a que estas concentraciones se van a modificar debido a la dinámica oceanográfica, la cual ya fue analizada anteriormente.

Adicional a esto, dichas concentraciones podrían promover sustancialmente el nivel de toxicidad de las saxitoxinas de este organismo; sin embargo, estudios realizados con anterioridad (Cortés-Altamirano *et al.* 1993) mostraron que la toxicidad de *P. bahamense* var. *compressum* podría estar relacionado con la endosimbiosis con bacterias formadoras de saxitoxinas por lo que se tiene que estudiar más a fondo la biología y ecología de esta especie para tener una mayor certeza de lo que podría pasar con las posibles variaciones en toxicidad, que también se ha visto que tiene que ver con el perfil de toxinas de las poblaciones.

Para el caso de las especies tóxicas de *Pseudonitzschia* spp. se sabe que el ácido domoico presente en estos organismos está limitado a la concentración de nutrientes presentes en el medio, sobre todo para *P. delicatissima*, *P. fraudulenta*, *P. pseudodelicatissima*, *P. pungens* y *P. subfraudulenta* que se han reportado en la zona de estudio (Moreno-Gutiérrez, 2008; O’dea, 2012) pero no se conocen posibles rangos de nula, baja, media o alta toxicidad por lo que no podemos asegurar que con las concentraciones del agua de descarga de la planta OTEC, dichas diatomeas alterarían drásticamente su toxicidad. Sin embargo, las condiciones de temperatura y salinidad aunadas a un índice Redfield de 10:1:27 de N:Si beneficiarían su óptimo crecimiento (O’dea, 2012; Anderson *et al.* 2002). Habría que añadir que estas especies puede tener proliferaciones tanto costeras como oceánicas por lo que, los datos del agua de descarga de la planta podrían propiciar un florecimiento de este tipo de diatomeas en la zona de influencia, sobre todo por el mayor aporte de silicatos por el agua de descarga (Rivera-Vilarelle *et al.*, 2013).

En adición a lo anterior, Anderson *et al.* (2009) mencionan que de acuerdo con el índice de proporción de nutrientes, se presentan una determinada composición de especies pero que además, se deben incluir formas orgánicas de los nutrientes y analizar las proporciones de carbono orgánico disuelto a nitrógeno orgánico disuelto (DOC:DON) que se han presentado en florecimientos anteriores por lo que para complementar este trabajo, se deben realizar estudios a este nivel de formas orgánicas con el fin de tener un mejor conocimiento de la fisiología de estos organismos. De acuerdo con lo último, es importante conocer a profundidad las estrategias alimenticias de cada especie FAN y la relación entre nutrientes y toxicidad que aún se sigue estudiando. También hay que considerar estudios ecológicos en los que se determinen la aparición temporal y espacial de especies tóxicas y no tóxicas pues no existe alguna evidencia de que un alto índice en la relación N:Si promueve preferentemente especies de diatomeas más benignas (Anderson *et al.* 2009).

En cuanto a la calidad del agua en la zona de descarga de la planta OTEC, ésta no se encuentra dentro de los estándares de degradación o “contaminación” por

concentración de nutrimentos, lo cual no permitiría el desarrollo y persistencia de muchos organismos del FAN (Heisler *et al.* 2008). La simulación de lo que podría pasar en Puerto Ángel es muy importante para determinar los posibles efectos oceanográficos por lo que las herramientas y técnicas de programación diseñadas para este fin deben ser desarrolladas con el objetivo de detectar y predecir posibles florecimientos de FAN y sus concentraciones tóxicas para su posible control y mitigación (Anderson, 2009).

Para el caso de *G. catenatum*, algunos estudios mencionan que sus proliferaciones se dan en mayor medida cuando bajan las temperaturas además de un aumento en la concentración de fosfatos debidas a las surgencias naturales (Quijano-Scheggia *et al.*, 2013). En el caso del agua de descarga, se tendrían temperaturas bajas en comparación del ambiente circundante y una concentración alta de fosfatos y de amonio, lo que permitirían el posible florecimiento de esta especie. Sin embargo, hay que considerar que deben hacerse estudios ecológicos que permitan conocer cuál es el patrón de cadena trófica pues en estudios hechos por Gilbert *et al.* (2010) es imperativo conocer la plasticidad de las vías nutricionales y las tasas de consumo y de reciclamiento de los nutrientes de manera global para conocer con mayor precisión el posible aumento poblacional o no de este y otros organismos FAN.

Banerjee *et al.* (2015) mencionan que una planta de 100 MW podría generar en un 90% de posibilidades condiciones positivas para los organismos marinos presentes en la zona de descarga pero que dependerá de distintos factores (climáticos, ecológicos, oceanográficos y biológicos). Por otra parte, manejan la posibilidad de una obtención de más de 68,000 kg de moluscos de importancia comercial los cuales servirían para realizar el secuestro de CO₂ y evitar el escape de este gas a la atmósfera, sobre todo cuando dichos organismos hayan muerto y el gas quede enterrado en el océano profundo por lo que no se alteraría en ningún sentido el ciclo del CO₂ disuelto en el mar.

En este sentido, a pesar de que el programa CORMIX es una herramienta adecuada para determinar posibles efectos de descargas de agua, también hay que considerar que tiene algunas desventajas, por ejemplo, solamente es aplicable a sistemas de flujo sencillos por lo que puede haber sobreestimación de los datos y además de que no permite hacer análisis espacio-temporales de las variables de estudio (CTPRDM, 2014). En este caso, se tuvieron problemas al determinar los intervalos de interacción del programa para cada parámetro por lo que se utilizaron datos más altos permitidos lo cual generaría una sobreestimación importante. Por tal motivo, es necesario contar con software de apoyo de tipo numérico para realizar simulaciones multidisciplinarias que serían más convenientes para estimar posibles efectos y poder tomar acciones para controlar y mitigar estos efectos (CTPRDM, 2014).

Aunado a todo lo anterior, si bien es cierto que los FAN están asociados muy a menudo con la eutrofización de las aguas costeras y estuarios, la identificación de las relaciones cuantitativas entre la entrada de nutrientes y la proliferación de algas específicas es muy difícil y muy compleja. Sabiendo que algunos florecimientos ocurren en aguas oceánicas es de gran importancia el monitoreo de los parámetros y el análisis multidisciplinario de los estudios oceanográficos.

Gilbert *et al.* (2010) mencionan que se deben estudiar la diversidad de fuentes, formas y flujos de nutrientes (dentro y fuera del sistema), mecanismos de adquisición e interacción de la especie FAN con otras especies de la cadena trófica y se deben estudiar los distintos procesos de predicción de los florecimientos pues son muy difíciles de predecir a corto y largo plazo pero son necesarios para la prevención de estos efectos con el fin de mitigarlos por lo que se deben hacer modelaciones a partir de estudios multidisciplinarios. Esto debido a que tales flujos podrían motivar una mayor concentración de organismos pesqueros de importancia comercial y que en la región de estudio existen (atún, barrilete, pez vela, camarón, entre otros) por lo que se deben estudiar los posibles efectos tanto positivos como negativos de las plantas de gradiente térmico sobre las pesquerías. Es aquí que estudios como el de Confort (2009) promueven que se utilice la mayor cantidad de agua de descarga posible para el desarrollo de actividades como acuacultura y agricultura o como las observadas en Goseong, Corea del Sur donde se obtiene agua potable, sal y fertilizantes por lo que se vierte al océano al final es sólo el 10% de todo lo extraído. De esta manera se puede minimizar drásticamente cualquier tipo de efecto que pudiera llegar a ocurrir.

9. CONCLUSIONES.

- La batimetría y la distancia de la línea de costa con respecto a las diferentes isolíneas de profundidad son las adecuadas para la instalación y operación de una planta OTEC offshore de 100 MW de energía eléctrica. Además, si la construcción y operación de esta planta es viable con mayor razón una planta onshore de menor generación de energía eléctrica (10-20 kW) cuyos efectos serían menores en comparación con la planta de 100 MW.
- La batimetría de la zona permite la instalación y operación de una planta OTEC de 100 MW de energía eléctrica pero se sugiere que se inicien más estudios y se realicen evaluaciones con prototipos a escala tanto de laboratorio como de campo.
- El comportamiento de los diferentes parámetros fisicoquímicos entre el Golfo de Tehuantepec y Puerto Ángel es similar considerando sus cambios a nivel geográfico y estacional pero son mucho menores en cuanto a la concentración del agua de descarga de la planta OTEC.
- Dado que el impacto de la dinámica oceanográfica sobre los nutrientes del agua de descarga de la planta OTEC es determinante, es poco probable que exista una mayor actividad a nivel de cadena trófica. Por lo tanto, podría descartarse algún tipo de afectación tanto positivo como negativo a nivel biológico en el área de estudio.
- La concentración de CO₂ que emite la planta a la atmósfera es muy pequeña con respecto a otras instalaciones que funcionan con combustibles fósiles por lo que es una excelente alternativa de generación de energía sin alterar fuertemente el medio ambiente.
- La dinámica estacional de las masas de agua presentes en la zona de estudio, es mucho mayor que el efecto generado por la descarga de la planta OTEC, por lo que es poco probable que se produzcan cambios importantes a nivel de la cadena trófica, sin embargo se deben monitorear constantemente los procesos oceanográficos pues estos determinarán dichos cambios..
- Como el efecto a nivel de nutrientes es menor comparado con la surgencia que se presenta en la zona se puede considerar que es viable construir una planta OTEC para generar energía eléctrica a la población de Puerto Ángel y zonas aledañas pero con un monitoreo constante durante el tiempo de operación.
- Si bien, para especies como *G. catenatum*, *Pseudonitzschia* spp. y *C. polykrikoides* el agua de descarga podrían proporcionar ciertas condiciones de crecimiento en cuanto a temperatura y salinidad, la baja proporción nutrimental no permitiría un mayor desarrollo óptimo de estos grupos fitoplanctónicos aunque los monitoreos deben ser permanentes.
- Se deben realizar más y mejores estudios a nivel multidisciplinario para tener una mejor comprensión tanto de la dinámica oceanográfica de la zona de

estudio como de la biología y ecología del FAN y, de este modo, tener mejores herramientas de predicción, monitoreo, prevención y mitigación de los posibles efectos que genera la descarga de la planta OTEC.

- Por último, de acuerdo con todo lo anterior, es muy viable la construcción y operación de la planta OTEC offshore de 100 MW de generación de energía eléctrica en la zona de Puerto Ángel, Oaxaca.

10. RECOMENDACIONES.

Tales se determinan de acuerdo con el tipo de medición y la estrategia a seguir de acuerdo con los parámetros descritos. Por tal motivo, se recomienda seguir los siguientes pasos:

Estrategias de monitoreo.

Parámetros fisicoquímicos: Monitoreo espacial y temporal en la pluma del agua de descarga y áreas vecinas. Uso combinado de CTD's, supervisión constante en la zona de descarga. Frecuencia de muestreo variable.

Elementos traza y sustancias reguladas por las leyes mexicanas e internacionales (EPA e IMO): Monitoreo espacial y temporal de todos los elementos en la zona de descarga y áreas aledañas. Medición de concentraciones de acuerdo a los métodos de determinación establecidos. Frecuencia de muestreo; mensual al momento de la descarga y trimestral para las aguas receptoras.

Fitoplancton.

Estudios de composición de especies, abundancia y densidad poblacional; tres estaciones de muestreo en los alrededores de la planta OTEC, sobre todo en el inicio y en años ENSO. Frecuencia de muestreo: dependiendo de la información determinada durante la fase de construcción e instalación de la planta. Se recomiendan muestreos mensuales a diferentes profundidades (3, 5, 10, 20, 30 y 50 metros).

11. PROYECTOS A FUTURO.

De acuerdo a los alcances de este trabajo, se recomienda avanzar en lo siguiente:

- 1.- Estudiar a nivel teórico los efectos del agua de descarga de la planta OTEC en otros sitios del país, con plantas de menor tamaño (1-10 MW).
- 2.- Realizar estudios batimétricos detallados más finos en las zonas propuestas.
- 3.- Realización de prototipos de OTEC en laboratorio, automatización y generación de prototipo experimental para estudios en el océano.
- 4.- Estudios a nivel biológico, involucrando patrones fisiológicos y ecológicos. Estudios en toda la cadena trófica. Estudios de otros parámetros como clorofila, CO₂ total, pCO₂, hierro (II), selenio, pH con sensores e introducción de uso de tecnología de percepción remota para tener una mayor cobertura de los procesos oceanográficos que suceden en dichas áreas.
- 5.- Realización de simulaciones con otros tipos de software (métodos analíticos y/o métodos numéricos) que permiten tener una mejor predicción de posibles consecuencias por la operación de una planta OTEC. Modelados a partir de estudios multidisciplinarios.
- 6.- Estudios de dinámica oceanográfica en las zonas propuestas con mayor detalle, los cuales permitirán conocer con mayor y mejor detalle los patrones de circulación superficial y geostrófica en dichas áreas.
- 7.- Creación de leyes mexicanas para determinar las concentraciones mínimas y máximas permitidas para el agua de descarga de la planta OTEC. Estudios a nivel de química oceanográfica; desarrollo de modelos numéricos para tal fin.
- 8.- Estudios geológicos y de gradiente térmico para diferentes sitios del país donde se puedan instalar este tipo de plantas. Estudios multidisciplinarios con la intención de actualizar las bases de datos de diferentes parámetros utilizados en estos trabajos.
- 9.- Estudios de factibilidad y prefactibilidad para conocer los posibles costos-beneficios de diferentes tipos de plantas OTEC de acuerdo con la economía del país. Estudio de las zonas posibles de construcción.
- 10.- Mayor participación en simposios internacionales de OTEC (como asistentes o como participantes) y en eventos sobre energías renovables que se realicen en el país con el fin de dar a conocer esta tecnología. Mayor involucramiento de las dependencias universitarias y federales.
- 11.- Estudios de ingeniería hidráulica, eléctrica y electrónica, con el fin de desarrollar una tecnología propia, con el fin de abaratar costos que permitan el mejor y mayor crecimiento de las plantas OTEC.

12.- Estudios en colaboración con instituciones extranjeras que tengan un mayor avance en este tipo de tecnología como Estados Unidos, Corea del Sur y Japón. Estancias para los alumnos dedicados a trabajos de OTEC en dichos países.

12. LITERATURA CITADA.

- Ahmed, M. S., S. Khan, O. Arakawa & Y. Onoue. 1995. Properties of hemagglutinins newly separated from toxic phytoplankton. *Biochimica et Biophysica Acta* 1243: 509-512.
- Aké-Castillo, J. A. 1997. Sistemática y taxonomía de *Chaetoceros* Ehrenberg y *Thalassiosira* Cleve (Bacillariophyceae) del Golfo de Tehuantepec, México. Tesis de maestría. Instituto Politécnico Nacional, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados, Unidad Mérida. Mérida, Yucatán, México. 84 pp.
- Aké-Castillo, J. A., D. U. Hernández-Becerril & M. E. Meave-del Castillo. 1999. Species of the genus *Thalassiosira* (Bacillariophyta) from the Gulf of Tehuantepec, Mexico. *Bot. Mar.* 42: 487-503.
- Alonso-Rodríguez, R. & F. Páez-Osuna. 2003. Nutrients, phytoplankton and harmful algal blooms in shrimp ponds: a review with special reference to the situation in the Gulf of California. *Aquaculture* 219 (1-4): 317-336.
- Alonso-Rodríguez, R., I. Gárate-Lizárraga, B. Luckas, K. Reinhardt & J. J. Bustillos-Guzmán. 2004b. Mortalidad de larvas de camarón en cultivo en Sinaloa, México, asociado a mareas rojas de *Gymnodinium catenatum*. In: XIII Reunión Nacional de la Sociedad Mexicana de Planctología. 25-28 abril. Nuevo Vallarta, Jal., México. pp. 54-55 pp.
- Álvarez, L. G., A. Badán-Dangón y A. Valle. 1989. On coastal currents off Tehuantepec. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 29: 89-96 pp.
- Anderson, J. H. *Ocean Thermal Power, The Coming Revolution* (privately published) 1982.
- Anderson, D. M. 1989. Toxic algal blooms: A global perspective. In: Okaichi *et al.* (eds.), Red tides: Biology, environmental science and toxicology. Elsevier, New York: 11-16.
- Anderson, D. M., P. M. Glibert y J. M. Burkholder. 2002. Harmful Algal Blooms and Eutrophication Nutrient Sources, Composition, and Consequences. *Estuaries* Vol. 25, No. 4b. 704-726 pp.
- Anderson, D. M. 2009. Approaches to monitoring, control and management of harmful algal blooms (HABs). *Ocean & Coastal Management* 52: 342-347 pp.
- 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. y C. Wu. 1994. Renewable energy from the ocean. A guide to OTEC. Oxford University Press. New York. 446 pp.

- Bagnis, R., A. M. Legrand y A. Inoue. 1990. Follow-up of a bloom of the toxic dinoflagellate *Gambierdiscus toxicus* on a fringing reef of Tahiti. In Graneli, E., B. Sundstrom, L. Edler y D. M. Anderson (eds.), *Toxic Marine Phytoplankton*. Elsevier, New York: 98-103.
- Ballesteros, D. y J. E. Coen, 2004. Generation and propagation of anticyclonic rings in the Gulf of Papagayo. *INT. J. Remote Sensing*. 25 (11): 2217-2224.
- Band-Schmidt, C. J., L. Morquecho, D. U. Hernández-Becerril, A. Reyes-Salinas y E. Bravo-Sierra. 2004a. Raphidophyceans on the coasts of Mexico. *Hydrobiologia* 515: 79-89.
- Band-Schmidt, C. J., J. J. Bustillos-Guzmán, I. Gárate-Lizárraga, C. H. Lechuga-Devéze, K. Reinhard & B. Luckas. 2005a. Paralytic shellfish toxin profile in strains of the dinoflagellate *Gymnodinium catenatum* Graham and the scallop *Argopecten ventricosus* G. B. Sowerby II from Bahía Concepción, Gulf of California, Mexico. *Harmful Algae*. 4: 21-31 pp.
- Band-Schmidt, C. J., A. Martínez-López y I. Gárate-Lizárraga. 2005b. First record of *Chattonella marina* in Bahía de La Paz, Gulf of California. *Harmful Algae News, IOC Newsletter on toxic algae and algal blooms* 28: 6-7.
- Band-Schmidt, C. J., J. J. Bustillos-Guzmán, I. Gárate-Lizárraga, D. J. López-Cortés, E. J. Núñez-Vázquez & F. E. Hernández-Sandoval. 2010. Ecological and physiological studies of *Gymnodinium catenatum* in the Mexican Pacific: A review. *Marine Drugs* 8 (1): 1935-1961.
- Band-Schmidt C. J., J. J. Bustillos-Guzmán, D. J. López-Cortés, E. Núñez-Vázquez y F. E. Hernández-Sandoval. 2011. El estado actual del estudio de florecimientos algales nocivos en México. *Hidrobiológica* 21(3): 381-413.
- Banerjee, S., L. J. Duckers, R. E. Blanchard & B. K. Choudhury. 2015. Ocean Energy Systems: Economy Evaluation, *Encyclopedia of Energy Engineering and Technology*. (Taylor & Francis), 21st October 2011, 1-8 pp. ISBN 9780849338960 (online publication)
- Barraza-Guardado, R., R. Cortés-Altamirano & A. Sierra-Beltrán. 2004. Marine die-offs from *Chattonella marina* and *Ch. cf. ovata* in Kun Kaak Bay, Sonora in the Gulf of California. *Harmful Algae News, IOC Newsletter on toxic algae and algal blooms* 25: 7-8.
- Barton, E. D., M. L. Argote, J. Brown, P. M. Kosro, M. Lavín, J. M. Robles, R. L. Smith, A. Trasviña y H. S. Vélez. 1993. Super-squirt: Dynamics of the Gulf of Tehuantepec, Mexico. *Oceanography*, 6(1): 23-30 pp.
- Beck, E. J. 1975. Ocean thermal gradient power plant. *Science*. 189, 293 p.
- Benson, S. W. y R. A. Golding. 1951. *J. Chem. Phys.* (19), 1413 p.

- Berger, L. R. y J. A. Berger. 1986. Countermeasures to microbiofouling in simulated ocean thermal energy conversion heat exchanges with surface and deep water in Hawaii. *Solar Energy Update: Final Issue*, SFU-86-12, 31 p.
- Berger, M., 1973. *Oceanography*. San Francisco, W. H. Freeman and Company.
- Blackburn, M. 1962. An oceanographic study of the Gulf of Tehuantepec. *Special Scientific Report-Fisheries*. 404: 28 pp.
- Boelle, M. y B. Doyen, 1977. *La pesca en el mar*. Editorial Nueva Situación. España.
- Bourdelais, A. J., C. R. Tomas, J. Naar, J. Kubanek y D. G. Baden. 2002. New fish-killing algal in coastal Delaware produces neurotoxins. *Environmental Health Perspectives* 110(5): 465-470.
- Brandhorst, W. 1958. Thermocline topography, zooplankton standing crop and ocean condition in the Gulf of Tehuantepec, Mexico. *World Scientific Meeting on the Biology of Tunas and related Species*. 1391: 597-637 pp.
- Brenes, C., M. F. Lavín y A. Mascarenhas Jr. 2008. Geostrophic circulation between the Costa Rica Dome and Central America. *Deep-Sea Research I*, 55(5), 608-629.
- Bustillos-Guzmán, J. J., P. Vale & C. J. Band-Schmidt. 2011. Presence of benzoate-type toxins in *Gymnodinium catenatum* Graham isolated from the Mexican Pacific. *Toxicon* 57: 922-926.
- Campa-Córdova, A. I., E. J. Núñez-Vázquez, A. Luna-González, M. J. Romero-Geraldo y F. Ascencio-Valle. 2009. Superoxide dismutase activity in juvenile *Litopenaeus vannamei* and *Nodipecten subnodosus* exposed to the toxic dinoflagellate *Prorocentrum lima*. *Comparative Biochemical Physiology- Part C: Pharmacology & Toxicology* 149 (3): 317-322.
- Carmichael, W. W., Mahmood, N. A. y E. G. Hyde. 1990 Natural toxins from cyanobacteria (blue-green algae). In: S. Hall and G. Strichartz [Eds.] *Marine Toxins, Origin, Structure and Molecular Pharmacology*, Vol. 418, American Chemical Society, Washington D.C., 87-106.
- Carranza-Edwards, A., L. Rosales-Hoz y C. R. Lozano-Sante, 1998. Estudio sedimentológico de las playas del estado de Oaxaca. *An. Inst. C. Mar y Limn. UNAM, México* 15829:23-37.
- Castellano, C. C. 1981. Overall OTEC-1 status and accomplishments. *Proc. 8th Ocean Energy Conf.*, Washington, D. C. (2), 971 p.
- Chávez, G., 2005. *Elementos de oceanografía*, México, Compañía Editorial Continental, 355 p.
- Christensen, N. Jr., R. de la Paz V. y G. Gutiérrez V. 1983. A study of sub-inertial waves off the west coast of Mexico. *Deep-Sea Res.* 30(8): 835-850 pp.

- Christopher, D. & P. E. Barry. 2008. Ocean Thermal Energy Conversion and CO₂ Sequestration. Renewable Energy World. 1st July 2008, available from <<http://www.renewableenergyworld.com/rea/news/article/2008/07/ocean-thermalenergy-conversion-and-CO2-sequestration-52762>> [7th December 2011]
- Cifuentes, J. L. y P. Torres-García, 1983. *Recursos marinos*. México, Trillas.
- Clancy, E. P., 1969. *Las mareas*. Buenos Aires, Editorial Universitaria.
- Clarke, A. J. 1988. Inertial wind path and sea surface temperature patterns near the Gulf of Tehuantepec and Gulf of Papagayo. *J. Geophys. Res.* 15491-15501 pp.
- Coastal Response Research Center. 2012. Ocean Thermal Energy Conversion: Information Needs Assessment. University of New Hampshire, Durham, NH, 25 pp and appendices.
- Comfort, C. 2009. OTEC: Potential Environmental Impacts and Fisheries. Department of Oceanography. Hawaii Natural Energy Institute. 18 dp.
- Comfort, C. y L. Vega. 2011. Environmental Assessment of Ocean Thermal Energy Conversion in Hawaii. Hawaii Natural Energy Institute. Hawaii National Marine Renewable Energy Center. Hawaii, USA. 8 pp.
- Comfort, C., C. Ostrander, M. McManus, D. Karl, d. Luther y L. Vega. 2013. Observing ocean changes at the nation's first SWAC system. University of Hawaii SOEST. Symposium presentation. 9 dp.
- Comisión Técnica de Prevención y Reparación de Daños Medioambientales (CTPRDM) de la Secretaría de Estado de Medio Ambiente del Gobierno de España, 2014. Análisis de herramientas de evaluación de la difusión y comportamiento de agentes fisicoquímicos de acuerdo al marco normativo de responsabilidad medio ambiental. España. 85 pp.
- CONAGUA, 2015. En: www.conagua.gob.mx/atlas/mapa/09/index_svg.html
- Conrad, T. A. 1837. *Modiolus capax*. In: Bouchet, P.; M. Huber, S. Gofas; G. Rosenberg; R. A. Bank y R. Bieler. 2015. MolluscaBase.
- Cortés-Altamirano, R., L. Muñoz-Cabrera y O. Sotomayor-Navarro. 1993. Envenenamiento paralítico por mariscos (PSP) causado por el dinoflagelado *Pyrodinium bahamense* var. *compressum* en la costa suroeste de México. *An. Inst. Cienc. Del Mar y Limnol. Univ. Nal. Auton. México*. 20: 43-54 pp.
- Cortés-Altamirano, R., D. U. Hernández-Becerril y R. Luna-Soria. 1996. Red tide in Mexico: A review. In: T. Yasumoto, Y. Oshima & Y. Fukuyo (Eds.). *Harmful and Toxic Algal Blooms*. IOC-UNESCO. Sendai, Japón. pp. 101-104.
- Cortés-Altamirano, R. 1998. Las mareas rojas. AGT Editor. México, D. F. 161 pp.

- Cortés-Altamirano, R. y A. P. Sierra-Beltrán. 2008. Biotoxins from freshwater and marine harmful algal blooms occurring in Mexico. *Toxin Reviews* 27 (1): 27-77.
- Cortés-Altamirano, R., & S. Licea-Durán. 2004. Discoloration of microalgal blooms as a bioindicating parameter at Bahía de Mazatlán, México. *Biología Tropical* 52: 27-34.
- Cortés-Altamirano, R., I. Alonso-Rodríguez & A. Sierra-Beltrán. 2006b. Fish mortality associated with *Chattonella marina* and *C. cf. ovata* (Raphidophyceae) blooms in Sinaloa (Mexico). *Harmful Algae News, IOC Newsletter on toxic algae and algal blooms* 31: 7-8.
- Cortés-Lara, M. C., R. Cortés-Altamirano y A. C. Magaña. 2003. First record of *Fibrocapsa cf. japonica* in Matanchen Bay, Nayarit, Mexican Pacific coast. *Harmful Algae News IOC Newsletter on toxic algae and algal blooms* 24: 1-4.
- Cortés-Lara, M. C., R. Cortés-Altamirano & A. Sierra-Beltrán. 2004. Presencia de *Cochlodinium catenatum* (Gymnodinales: Gymnodinaceae) en mareas rojas de Bahía Banderas en el Pacífico Mexicano. *Revista Biología Tropical* 52 (Supl. 1): 35-50.
- Corrales, R. A. & McLean, J. L. Impacts of harmful algae on seafarming in Asia-Pacific areas. 1995. *J. Appl. Phycol.* 7: 151-162.
- Cousteau, J. Y. 1977. *Las regiones del océano. Mundo submarino*. Ediciones Urbion.
- Crews, R. 1997. OTEC Sites. En: http://www.trellis.demon.co.uk/reports/otec_sites.html
- Cromwell, T. 1958. Circulation in a meridional plane in the central equatorial Pacific. *Journal of Marine Research* 12 196-213 pp.
- Dallavalle, J. P. y L. F. Bosart, 1975. A synoptic investigation of anticyclonic outbreaks accompanying North American polar air outbreaks. *Mon. Weather Rev.* 103(11): 941-957 pp.
- De la Lanza, G. E., 1991. Oceanografía de mares mexicanos. Compiladora. AGT Editor. México, D. F. 569 pp.
- De la Lanza, G. E. y C. M. Cáceres, 1994. Lagunas costeras y el Litoral Mexicano. UABCS., La Paz, Baja California. 525 pp.
- DiMego, G. J., L. F. Bosart y G. W. Endersen. 1976. An examination of the frequency and mean conditions surrounding frontal incursions into the Gulf of Mexico and Caribbean Sea. *Mon. Weather. Rev.* 104: 709-717 pp.
- Dorantes-Aranda, J. J., L. M. García de la Parra, R. Alonso-Rodríguez & L. Morquecho. 2009. Hemolytic activity and fatty acids composition in the

- ichthyotoxic dinoflagellate *Cochlodinium polykrikoides* isolated from Bahía de La Paz, Gulf of California. *Marine Pollution Bulletin* 58 (9): 1401-1405.
- Dorantes-Aranda, J. J., L. M. García de la Parra, R. Alonso-Rodríguez, L. Morquecho & D. Voltolina. 2010. Toxic effect of the harmful dinoflagellate *Cochlodinium polykrikoides* on the spotted rose snapper *Lutjanus guttatus*. *Environmental Toxicology* 25 (4): 319-326.
- Dortch, Q. R. R. Robichaux, S. Pool, D. Milsted, G. Mire, N. N. Rabalais, T. M. Soniat, G. A. Fryxell, R. E. Turner & M. L. Parsons. 1997. Abundance and vertical flux of *Pseudo-nitzschia* in the northern Gulf of México. *Marine Ecology Progress Series* 146: 249-264.
- Duran-Dastes, F., 1972. *Climatología*. Barcelona, Ariel.
- Enfield, D. B. y J. S. Allen, 1983. The generation and propagation of sea level variability along the Pacific coast of Mexico. *J. Phys. Oceanogr.* 13: 1012-1033 pp.
- Enrick, M. R. & M. K. Scott. 1990. CO₂ solubility in water and brine under reservoir conditions, *Chemical Engineering communications*, 90(1), 23-33 pp.
- Estrada, N., M. J. Romero, A. Campa-Córdova & F. Ascencio. 2007. Effect of the toxic dinoflagellate, *Gymnodinium catenatum* on the hydrolytic and antioxidant enzymes, in tissues of the giant lion-paw scallop *Nodipecten subnodosus*. *Comparative Biochemical and Physiology, Part C*, 146: 502-510.
- Estrada, N., C. Rodríguez-Jaramillo, G. Contreras & F. Ascencio. 2010. Effects of induced paralysis on hemocytes and tissues of the giant lions-paw scallop by paralyzing shellfish poison. *Marine Biology* 157: 1401-1415.
- Fernández-Álamo, M. A. y J. Färber-Lorda. Zooplankton and the oceanography of the Eastern tropical Pacific: A review. *Oceanography* (2006) 69: 318-359 p.
- Fernández-Álamo, M. A. y L. San Vicente-Añorve. Holoplanktonic polychaetes from the Gulf of Tehuantepec, Mexico. *Cah. Biol. Mar.* (2005) 46: 227-239 p.
- Fernández-Díez, P. 2007. *Energía Maremotérmica*. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética. Universidad de Cantabria. España. 12 p.
- Figuroa-Torres, M. G. y M. A. Zepeda-Esquivel. 2001. Mareas rojas del puerto interior, Col., México. *Scientia Naturae* 3 (2): 39-52.
- Flores-Vidal, X., R. Durazo, C. Chavanne y P. Flament. 2010. Circulación costera en ausencia de viento en el Golfo de Tehuantepec, México: Observaciones con radares de alta frecuencia. *Ciencias Marinas*. 37(4A): 493-512.
- FONATUR, 2004. Estudio de ordenamiento ecológico de Bahías de Huatulco, Oaxaca., Vol. I y II. Inst. de Ecología, A. C., Jalapa, Veracruz, México. 158 pp.

- Gárate-Lizárraga, I., D. J. López-Cortés, J. J. Bustillos-Guzmán y F. E. Hernández-Sandoval. 2004a. Blooms of *Cochlodinium polykrikoides* (Gymnodiniaceae) in the Gulf of California, Mexico. *Revista de Biología Tropical* 52: Supl. (1): 51-58.
- Gárate-Lizárraga, I., C. J. Band-Schmidt, D. J. López-Cortés & J. J. Bustillos-Guzmán. 2009b. Raphidophytes in Bahía de La Paz, Gulf of California. *Harmful Algae News, IOC Newsletter on toxic algae and algal blooms* 40: 1-4.
- Gárate-Lizárraga, I., J. A. Díaz-Ortíz, B. Pérez-Cruz, M. A. Alarcón-Romero, L. A. Chávez-Almazán, J. L. García-Barbosa y S. López-Silva. 2011. A multi-species dinoflagellate bloom and shellfish toxicity in the Costa Grande, Guerrero, Mexico (December 2010). *CICIMAR Océánides* 26 (1): 67-71.
- García, E. (Ed.). 1981. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. UNAM. 3ª. Ed. México. 252 pp.
- García, E. 1973. Modificación al Sistema de Clasificación Climática de Köppen (adaptación a las condiciones de la República Mexicana). Inst. Geogr. UNAM. 264 pp.
- García, H. E., R. A. Locarnini, T. P. Boyer, J. I. Antonov, O.K. Baranova, M.M. Zweng, J.R. Reagan, D.R. Johnson, 2014. En: *World Ocean Atlas 2013, Volume 3: Dissolved Oxygen, Apparent Oxygen Utilization, and Oxygen Saturation*. S. Levitus, Ed., A. Mishonov Technical Ed.; NOAA Atlas NESDIS 75, 27 pp.
- García, H. E., R. A. Locarnini, T. P. Boyer, J. I. Antonov, O.K. Baranova, M.M. Zweng, J.R. Reagan, D.R. Johnson, 2014. *World Ocean Atlas 2013, Volume 4: Dissolved Inorganic Nutrients (phosphate, nitrate, silicate)*. S. Levitus, Ed., A. Mishonov Technical Ed.; NOAA Atlas NESDIS 76, 25 pp.
- Glibert, P., J. I. Allen, A. F. Bouwman, C. W. Brown, K. J. Flynn, A. J. Lewitus y C. J. Madden. 2010. Modeling of HABs and eutrofication: Status, advances, challenges. *Jour. Mar. Sc.* 83: 262-275 pp.
- Gómez-Aguirre, S. 1998a. First record of *Pyrodinium bahamense* (Dinoflagellata) in brackish waters of the Mexican Caribbean Coast. *Annales del Instituto de Biología de la UNAM Serie Zoología* 69 (1): 121-123.
- Gómez-Aguirre, S. & S. Licea. 1998. Blooms of *Pyrodinium bahamense* (Dinophyceae) in coastal lagoons of the southern Gulf of Mexico and Mexican Caribbean. In: Reguera, B., J. Blanco, M. L. Fernández y T. Wyatt (Eds.). *Harmful Algae*. Xunta de Galicia and Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO. pp. 61-62.
- González-Chan, R. B., Hernández-Silva, L., Navarro-Ornelas, J. G. y Blanco-Padilla, M. A. 2007. Proliferación algal nociva en las Bahías de Puerto de Manzanillo, Colima (marzo-mayo 2007). En: Recursos y Medio Ambiente: Memorias del XIV Congreso Nacional de Ciencia y Tecnología del Mar. 29-31 octubre del 2007, Nuevo Vallarta, México.

- Graham, H. W. 1943. *Gymnodinium catenatum*, a new dinoflagellate from the Gulf of California. *Transactions American Microscopical Society*. 62(3): 259-261.
- Green, H. y P. Gunther. 1990. Carbene Dioxide release from OTEC cycles. U. S. Department of Energy. SERI & Scripps Institute of Oceanography. Honolulu, Hawaii. USA. 14 pp.
- Hall, S., G. Strichartz, E. Moczydlowski, A. Ravindraw y P. B. Reichardt. 1990. The saxitoxins. Sources, chemistry and pharmacology. In Hall, S. y G. Strichartz (eds.), *Marine toxins. Origins, Structure and Pharmacology*. American Chemical Society, Washington, D. C.: 29-65.
- Hall, J. 1991. Long-term preservation of picophytoplankton for counting by fluorescence microscopy. *Br. Phycol. J.*, 26, 169–174.
- Hallegraeff, G. M. 1995. Harmful algal blooms: A global overview. *In*: Hallegraeff, G. M., Anderson, D. M., Cembella, A. D. (Eds.) *Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO*, París, pp.1-22.
- Hammond, G & C. Jones. 2008. Data on LCA & EA [Communication from Dept of Mechanical Engineering, University of Bath, UK] available from <www.bath.ac.uk/mech-eng/ser/embodied> [1st August 2009]
- Hanley, T. 1854. *Ostrea iridescens*, WoRMS Mollusca: World Marine Mollusca database in the Catalogue of Life in The Catalogue of Life Partnership: Catalogue of Life, 2015-02-13.
- Hastenrath, S. L. 1967. Rainfall distribution and regime in Central America. *Arch. Meteor. Geophys. Bioklim*. B15: 201-241 pp.
- Heisler, J., P. M. Glibert, J. M. Burkholder, D. M. Anderson, W. Cochlan, W. C. Dennison, Q. Dortch, C.J. Gobler, C. A. Heil, E. Humphries, A. Lewitus, R. Magnien, H. G. Marshall, K. Sellner, D. A. Stockwell, D. K. Stoecker y M. Suddleson. 2008. Eutrophication and harmful algal blooms: A scientific consensus. *Harmful Algae* 8: 3–13 pp.
- Hendrickx, M.E. y D. Serrano. 2010. Impacto de la zona de mínimo de oxígeno sobre los corredores pesqueros en el Pacífico mexicano. *Interciencia*. 35:12-18.
- Heredia-Tapia, A., B. O. Arredondo-Vega, E. J. Núñez-Vázquez, T. Yasumoto, M. Yasuda & J. L. Ochoa. 2002. Isolation of *Prorocentrum lima* (Syn. *Exuviaella lima*) and diarrhetic shellfish poisoning (DSP) risk assessment in the Gulf of California, Mexico. *Toxicon* 40 (8): 1121-1127.
- Heredia-Tapia, A., A. I. Campa-Córdova, C. J. Band-Schmidt, E. J. Núñez-Vázquez & J. J. Bustillos-Guzmán. 2010. Lipid peroxidation in the bivalve mollusks *Dosinia ponderosa* and *Crassostrea gigas* exposed to the toxic dinoflagellate *Gymnodinium catenatum*. *In*: XVI Reunión de la Sociedad Mexicana de

Planctología A.C. y IX International Meeting of the Mexican Society of Planktology, La Paz, B.C.S. México, p. 57.

- Hernández-Becerril, D. U. 1998. Species of the planktonic diatom *Pseudonitzschia* of the Pacific coasts of Mexico. *Hydrobiologia* 379 (1-3): 77-84.
- Hernández-Becerril, D. U., R. Alonso-Rodríguez, C. Álvarez-Góngora, S. A. Barón-Campis, G. Ceballos-Corona, J. Herrera-Silveira, M. E. Meave del Castillo, N. Juárez-Ruíz, F. Merino-Virgilio, A. Morales-Blake, J. L. Ochoa, E. Orellana-Cepeda, C. Ramírez-Camarena & S. Rodríguez-Raciél. 2007. Toxic and harmful marine phytoplankton microalgae (HABs) in Mexican coasts. *Journal of Environmental Science Health Part A* 42 (10): 1349-1363.
- Herrera-Silveira, J. A. & I. Ojeda-Alayón. 1999. Las mareas rojas. *Biodiversitas*. 5 (24): 7-11.
- Hill, J. B. 1969. Temperature variability and synoptic cold fronts in the winter climate of Mexico. Climatological Research Series, No. 4. McGill University. Dept. of Geography, Montreal, Canada. 71 pp.
- Holmes, R. W., M. B. Shaefer y B. M. Shimada. 1957. Producción primaria, clorofila y volúmenes del zooplancton en la zona tropical del Océano Pacífico Oriental. *Boletín de la Comisión Interamericana del atún tropical*. 4: 127-159 pp.
- Huante-González, Y. 2010. "Calidad Sanitaria del agua, detección de *Vibrio cholerae* y su sensibilidad antimicrobiana en la Bahía de Puerto Ángel y sitios cercanos". Tesis de maestría. UMAR. Puerto Ángel, Oaxaca., México. 76 p.
- Hurd, W. E. 1929. Northers of the Gulf of Tehuantepec. *Mon Weather Rev.* 57 (5): 192-194 pp.
- International Maritime Organization (IMO). 2013. Concerning the London Protocol Amedment. London, Great Britain. 2 pp.
- I. O. C., 1975 *Guide to International Marine Evironmental Data Series*. París, UNESCO.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 1992. Cartas Topográficas: D14b17, D14b18, D14b27 y D14b28. Esc. 1:50 000.
- J. Y. Cousteau, *El océano y el espacio. Mundo submarino*. Ediciones Urbión, 1977.
- Jeon, J. K., K. Miyazawa, T. Noguchi, H. Narita, S. Matsubara, M. Nara, K. Ito y K. Hashimoto. 1986. Occurrence of paralytic toxicity in marine flatworms. *Bull Japan. Soc. Sci. Fish.* 52: 1065-1069.
- Karl, D., D. Böttjer, T. Clemente, S. Poulos, S. Wilson, K. Björkman y S. Searson. 2013. Potential Environmental Consequences of Enhanced Ocean Upwelling. Manoa, University of Hawaii. SOEST. Simposium presentation. 11 dp.

- Kelley, C. y F. Berg. 2013. Submersible survey along of Honolulu Sea Water Air Aconditioning LLC Pipe Route to Provide Data for their environmental impact statement. Hawaii Undersea Research Laboratory, University of Hawaii; Honolulu Seawater Air Aconditioning LLC. Hawaii, USA. Simposium presentation. 9 dp.
- Kessler, W. S. 2006. The circulation of the eastern tropical Pacific: a review. *Prog. Oceanogr.* 69: 181-217 pp.
- Khan, S., M. S. Ahmed, O. Arakawa y Y. Onoue. 1995. Properties of neurotoxins separated from a harmful red tide organism *Chattonella marina*. *The Israeli Journal of Aquaculture-Bamidgeh* 47: 137-141.
- Khan, S., O. Arakawa y Y. Onoue. 1996a. A toxicological study of the marine phytoflagellate, *Chattonella antiqua* (Raphidophyceae). *Phycologia* 35: 239-244.
- Khan, S., O. Arakawa y Y. Onoue. 1996b. Neurotoxin production by a chloromonad *Fibrocapsa japonica* (Raphidophyceae). *Journal of the World Aquaculture Society* 27: 254-263.
- Khan, S., O. Arakawa y Y. Onoue. 1997. Neurotoxins in a toxic red tide of *Heterosigma akashiwo* (Raphidophyceae) in Kagoshima Bay, Japan. *Aquaculture Research* 28: 9-14.
- Kim, D. K., T. Okamoto, T. Oda, K. Tachibana, K. S. Lee, A. Ishimatsu, Y. Matsuyama y T. Homjo. 2001. Possible involvement if the glycocalyx in the ichthyotoxicity of *Chattonella marina* (Raphidophyceae): immunological approach using antiserum against cell surface structures of flagellate. *Marine Biology* 139: 625-632.
- Kim, D., T. Oda, D., Muramatsu, D. Kim, Y. Matsuyama & T. Honjo. 2002. Possible factors responsible for the toxicity of *Cochlodinium polykrikoides*, a red tide phytoplankton. *Comparative Biochemistry and Physiology. Part C.* 132, 415-423.
- Kim, H. J., H. S. Lee, Y. K. Jung, D. H. Jung, D. S. Moon y S. W. Hong. 2012. Feasibility study on the commercial plant of Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC K-50 MW). Proceedings of the Twenty-second (2012) International Offshore and Polar Engineering Conference. Greece. 6 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.
- Kuroda A., T. Nakashima, K. Yamaguchi y T. Oda. 2005. Isolation and characterization of light-dependent hemolytic cytotoxin from harmful red tide

- phytoplankton *Chattonella marina*. *Comparative Biochemistry and Physiology* Part C 141: 297-305.
- Lara-Lara, J. R., E. G. Robles Jarero, M. C. Bazan Guzman and E. Millan Nuñez, 1998. Phytoplankton productivity. *In*: M. Tapia-García (Ed.), *El Golfo de Tehuantepec: el ecosistema y sus recursos*, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, México, 51–58.
- Lara-Lara, J. R., E. Millán-Núñez, R. Millán-Núñez y C. Bazán-Guzmán. 2003. Producción primaria del fitoplancton en el Pacífico mexicano (1992-2000), en M.T. Barreiro-Güemes, M.E. Meave del Castillo, M. Signoret-Poillon, M.G. Figueroa-Torres (eds.), *Planctología Mexicana*. Sociedad Mexicana de Planctología, A.C., México, pp. 103-124.
- Lavín, M. F., J. M. Robles, M. L. Argote, E. D. Barton, R. Smith, J. Brown, M. Kosro, A. Transviña, H. S. Vélez y J. García. 1991. Física del Golfo de Tehuantepec. *Ciencia y Desarrollo*. 18 (103): 97-108 pp.
- Lavín, M. F., J. M. Robles, M. L. Argote, E. D. Barton, R. Smith, J. Brown, M. Kosro, A. Trasviña, H. S. Vélez y J. García. 1992. Física del Golfo de Tehuantepec. *Ciencia y Desarrollo*. Marzo/Abril 1992. 97-107 pp.
- Lavín, M. F., Durazo, R., Palacios, E., Argote, M. L., Carrillo, L., 1997. Lagrangian observations of the circulation in the northern Gulf of California: *Journal of Physical Oceanography*, 27, 2298–2305.
- Leben, R. R. 1990. Wind drive anticyclonic eddies in the Eastern Pacific. *EOS* 1990. Page 1364.
- Lee, J. S. 1996. Bioactive components from the red tide plankton *Cochlodinium polykrikoides*. *Journal of the Korean Fisheries Society*. 26,165-173.
- Legeckis, R. 1986. A satellite time series of sea surface temperatures in the Eastern Equatorial Pacific Ocean, 1982-1986. *J. Geophys. Res.* 91(C11): 12879-12886 pp.
- Lluch-Cota, D. B., S. Hernández-Vázquez y S. E. Lluch-Cota. 1997. Empirical investigations on the relationship between climate and small pelagic global regimes and El Niño-Southern Oscillation (ENSO). *FAO Fisheries Circular*. No. 934. Rome, FAO. 48 pp.
- Lobo, F., 2003. *Los océanos*. México, Salvat.
- Locarnini, R. A., A. V. Mishonov, J. I. Antonov, T. P. Boyer, H. E. Garcia, O. K. Baranova, M. M. Zweng, C. R. Paver, J. R. Reagan, D. R. Johnson, M. Hamilton, and D. Seidov, 2013. En: *World Ocean Atlas 2013, Volume 1: Temperature*. S. Levitus, Ed., A. Mishonov Technical Ed.; NOAA Atlas NESDIS 73, 40 pp.

- López-Cortés, D. J., C. J. Band-Schmidt, J. J. Bustillos-Guzmán, I. Gárate-Lizárraga, F. E. Hernández-Sandoval y E. J. Núñez-Vázquez. 2011. Concurrencia de *Chattonella marina* y *Gymnodinium catenatum* en la Bahía de La Paz, Golfo de California (primavera 2009). *Hidrobiológica* 21 (2): 185-196.
- Love, C. M. (ED.). 1972. EASTROPAC Atlas, Vol. 6, Circular 330, Washington, D. C.
- Love, C. M. y R. Allen (EDS.). 1975. EASTROPAC Atlas, Vol. 10, Circular 330, Washington, D. C.
- Maclean, J. L. 1993. Developing-country aquaculture and harmful algal blooms. In Pullin, R. S. V., H. Rosenthal y J. L. Maclean (eds.). Environment and aquaculture in developing countries. ICLARM Conf. Proc. 31: 252-284.
- Margalef, R. 1961. Hidrografía y fitoplancton de un área marina de la costa meridional de Puerto Rico. *Investigaciones Pesqueras* 18 (76): 78.
- Martí, J. A., Plocek, Thomas J. y M. A. J. Laboy. 2008. Implementación comercial de la conversión de energía termal: Aspectos ambientales e implicaciones socioeconómicas. Grupo Consultor de Infraestructura para zonas costeras. San Juan, Puerto Rico. 10 p.
- Martínez-López, A., C. J. Band-Schmidt, D. Escobedo-Urías & A. E. Ulloa-Pérez. 2006. Bloom of *Chattonella subsalsa* in an impacted coastal lagoon in the Gulf of California. *Harmful Algae News, IOC Newsletter on toxic algae and algal blooms* 31: 1-4-5.
- Martínez-López, A., A. E. Ulloa-Pérez & D. C. Escobedo-Urías. 2007. First record of vegetative cells of *Pyrodinium bahamense* (Gonyalucleales, Goniodomataceae) in the Gulf of California. *Pacific Science* 61 (2): 289-293.
- McDonald, J. 1952 "El efecto de Coriolis", en *Scientific American*. Madrid, Editorial H. Blume.
- McCreary, J. P. Jr., H. S. Lee y D. B. Enfield. 1989. The response of the coastal ocean to strong offshore winds: with application to circulations in the Gulfs of Tehuantepec and Papagayo. *J. Mar. Res.* 47(1): 81-109 pp.
- McLellan, H. J. 1968. Elements of physical oceanography. Pergamon Press. 151 pp.
- Meave-del Castillo, M. E. & D. U. Hernández-Becerril. 1998. 6. Fitoplancton. El Golfo de Tehuantepec: el ecosistema y sus recursos. In: Tapia García, M. Universidad Autónoma Metropolitana - Iztapalapa. México, D.F., México. pp. 59-74.
- Meave-del Castillo, M. E. 2006. Diatomeas (Bacillariophyta), Dinoflagelados (Dinophyta) y Silicoflagelados (Dictyochophyceae) Marinos del Pacífico Mexicano, con énfasis en la porción tropical. Informe final Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad de México-Comisión Nacional para el

- Conocimiento y Uso de la Biodiversidad; Proyecto BA008. México, D.F., México. 80 pp.
- Mellor, G. L. 1996. Introduction to Physical Oceanography. AIP Press & Springer. Princeton University. New Jersey, USA. 119-123 pp.
- Merino-Ibarra, M. 1992. Afloramiento en la plataforma de Yucatán: estructura y fertilización. México, D. F. Tesis de doctorado. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM.
- Molina-Cruz, A. y M. Martínez-López, 1994. Oceanography of the Gulf of Tehuantepec, Mexico, indicated by Radiolaria remains. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*. 110: 179-195 pp.
- Monreal-Gómez M. A. y D. A. Salas de León, 1998. Dinámica y estructura termohalina del Golfo de Tehuantepec. Cap. 2: 13-26. En: M. Tapia-García (Ed.) El Golfo de Tehuantepec: el ecosistema y sus recursos, 240 p. Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, México, 1998. ISBN 970-654-348-1.
- Morquecho, L. & C. H. Lechuga-Devéze. 2003. Dinoflagellate cysts in recent sediments from Bahía Concepción, Gulf of California. *Botanica Marina* 46: 132-141.
- Morquecho, L. 2008a. Morphology of *Pyrodinium bahamense* Plate (Dinoflagellata) near Isla San José, Gulf of California, Mexico. *Harmful Algae* 7: 664-670.
- Morquecho, L., R. Alonso-Rodríguez, J. A. Arreola-Lizárraga & A. Reyes-Salinas. 2010. Related factors during moderate blooms of *Pyrodinium bahamense* var. *bahamense* in two coastal lagoons from the southern Gulf of California. 14th International Conference on Harmful Algae. Hersonissos-Creta, Grecia. 1-5 Noviembre. p. 43.
- Mosiño-Alemán, P. A. y E. García, 1974. The climate of Mexico. World Survey of Climatology, Vol. 11. In: R. A. Bryson y F. K. Hare (Eds.). *Climates of North America*, Elsevier, Amsterdam. 345-404 pp.
- Mott, R. L. 1996. Mecánica de fluidos aplicada. 4a. edic. Prentice-Hall Hispanoamericana. México. 219-246; 351-356 pp.
- Municipio de San Pedro Pochutla, 1993. Plan de Centro de Población Municipal de Puerto Ángel-Zipolite. México-Oaxaca. 65 pp.
- Munk, N. 1955. "La circulación de los océanos", en *Scientific American*. Madrid, Editorial H. Blume.
- Narita, H., S. Matsubara, N. Miwa, S. Akahane, M. Murakani, T. Goto, M. Nara, T. Nogochi, T. Saito, Y. Ishida y K. Hashimoto. 1987. *Vibrio alginolyticus*, a TTX-producing bacterium isolated from the starfish *Astropecten polyacanthus*. *Nippon Suisan Gakkaishi*: 53: 617-621.

- Núñez-Vázquez, E. J., A. Heredia-Tapia, J. C. Pérez-Urbiola, R. Alonso-Rodríguez, J. Arellano-Blanco, A. Cordero-Tapia, J. Pérez-Linares & J. L. Ochoa. 2003. Evaluation of dinoflagellate toxicity implicated in recent HAB events in the Gulf of California, Mexico. *In: HABTech 2003 Workshop*. Nelson, New Zealand *Cawthron Report No. 906*. p. 90.
- Núñez-Vázquez, E. J., A. Cordero-Tapia y G. Arnaud. 2007a. Origen e Impacto de las Biotoxinas Marinas en la Salud de Tortugas Marinas-Salud Pública. 1er Encuentro Internacional de Medicina de la Conservación. 18-21 de julio. Vitoria, Brasil.
- Núñez-Vázquez, E. J., A. Cordero-Tapia, J. L. Ochoa y J.J. Bustillos-Guzmán. 2008a. Histopatología por exposición aguda a las biotoxinas marinas de importancia en Salud Pública en México. *In: XVII Congreso Nacional de Patología Veterinaria*. Candanosa-Aranda, E. (Ed.). *Sociedad Mexicana de Patólogos Veterinarios, A. C. Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia-Universidad Nacional Autónoma de México*. México. pp: 518-524.
- Núñez-Vázquez, E. J., I. Gárate-Lizárraga, C. J. Band-Schmidt, A. Cordero-Tapia, D. J. López-Cortés, F. E. Hernández-Sandoval, A. Heredia-Tapia y J. J. Bustillos-Guzmán. 2011. Impact of Harmful Algal Blooms on wild and culture animals in the Gulf of the California. *Journal of Environmental Biology* 32(4): 407-412 pp.
- Ochoa, J. L. 2003. *Mareas rojas. Proliferaciones Micro-algales Nocivas y Biotoxinas Marinas en México: Impacto en Salud Pública, Pesquerías, Acuacultura y Medio Ambiente*. Gobierno del Estado de B. C. S., SEP, CIBNOR. México. 84 p.
- Ochoa, J. L., A. Sánchez-Paz, A. Cruz-Villacorta, E. J. Núñez-Vázquez y A. Sierra-Beltrán. 1997. Toxic events in the North Pacific Coastline in Mexico during 1992-1995: origin and impact. *Hydrobiologia* 352: 195-200.
- Ochoa, J. L., A. Sierra-Beltrán, G. Alonso-Colmenares, H. Barrada-Sánchez, A. Cruz-Villacorta, E. Núñez-Vázquez y A. Sánchez-Paz. 1998. Biotoxins in the Pacific coasts of Mexico. *In: M. Miraglia, H. van Egmond, C. Brera & J. Gilbert (Eds.). Mycotoxins and Phycotoxins-Developments in Chemistry, Toxicology and Food Safety*. International Union Purity Analytical Chemistry (IUPAC). IX IUPAC International Symposium on Mycotoxins and Phycotoxins. Rome, Italy. *Alaken, Inc. Fort Collins Co. U. S.* pp: 441-448.
- Ochoa, J. L., D. U. Hernández-Becerril, S. E. Lluch-Cota, B. O. Arredondo-Vega, E. Núñez-Vázquez, A. Heredia-Tapia, J. Pérez-Linares y R. Alonso-Rodríguez. 2002. Marine biotoxins and harmful algal blooms in Mexico's Pacific litoral. *In: Taylor, M. F. J. R. & V. L. Trainer (Eds.). Harmful algal blooms in the PICES region of the North Pacific*. 10th Annual Meeting North Pacific Marine Science Organization (PICES). Victoria, B. C. Canadá. *PICES Scientific Report No. 23*, pp. 119-128.
- Oda, T., A. Ishimatsu, S. Takeshita y T. Muramatsu. 1994. Hydrogen peroxide production by the red tide flagellate *Chattonella marina*. *Bioscience, Biotechnology & Biochemistry* 58: 957-958.

- O'dea, S. 2012. Occurrence, Toxicity and Diversity of *Pseudonitzschia* spp. In Florida coastal waters. University of South Florida. Graduate School Theses and Dissertations.
- Odeh, N. A. & T. T. Cockerill. 2008. Life Cycle analysis of UK coal fired power plants. *Energy conversion and Management*, 49, 212-220 pp.
- OFCF, OVERSEAS FISHERY COOPERATION FOUNDATION. 1993. Integrated report for the Project to develop fishing grounds in the 200 nautical mile zone of the United Mexican States. Tokio, 175 pp.
- Okaichi, T. 1987. Red tides problems for aquaculture in Japan. *The problems of toxic red dinoflagellate blooms in aquaculture*. In: B. Dael, D.G. Baden, B., Barry Mck., L. Edler, S. Fraga, I. R. Jenkinson, G. M. Hallegraeff, T. Okaichi *et al.*, (Ed.) Sherkin, Island, Eire, pp. 50-51.
- Okinawa OTEC pamphlet. 2015. Ocean Thermal Energy Conversion. Demonstration Facility. Okinawa Prefecture, Japan. 2 pp.
- Olivos-Ortiz, A., S. I. Quijano-Schiggia, J. H. Gaviño-Rodríguez, M. G. Verduzco-Zapata, M. V. Rivera-Vilarelle y C. A. Zenteno-Palma. 2013. Variación estacional de la disponibilidad de N, P y Si y su relación con principales grupos del fitoplancton de Bahía de Manzanillo, México. Universidad de Colima. *VI Simposium sobre Investigaciones Marinas y Acuícolas del Pacífico Tropical Mexicano*. Resumen corto.
- Orellana-Cepeda, E., E. Martínez-Romero, L. Muñoz-Cabrera, P. López-Ramírez, E. Cabrera-Mancilla y C. Ramírez-Camarena. 1998. Toxicity associated with blooms of *Pyrodinium bahamense* var. *compressum* in Southwestern Mexico. In: Reguera, B., J. Blanco, M. L. Fernández & T. Wyatt (Eds.). *Harmful Algae*. Xunta de Galicia and Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO. p. 60.
- Ortíz-Lira, J. H. y Jiménez-Quiroz, M. del C. 2006. Registros de eventos de Marea Roja en Manzanillo, Colima (1986-2004). En: los Recursos Pesqueros y Acuícolas de Jalisco, Colima y Michoacán. Jiménez-Quiroz, M. del C. & Espino-Barr, E. (Eds). SAGARPA, INP, CRIP Manzanillo, México, pp: 324-334.
- Owen, R. W. y B. Zeitzschel. 1970. Phytoplankton production. Seasonal change in the oceanic eastern tropical Pacific. *Mar. Biol.*, 7: 32-36 pp.
- Palomares-García, R., J. J. Bustillos-Guzmán, C.J. Band-Schmidt, D. J. López-Cortés y B. Luckas. 2006. Effect of the toxic dinoflagellate *Gymnodinium catenatum* on the grazing, egg production, and hatching success of the copepod *Acartia clausi*. *Ciencias Marinas* 32: 97-119.
- Parmenter, F. C. 1970. Picture of the month-A "Tehuantepecer". *Mon. Wea. Rev.* 98, 479.

- Pepkin, B. *et al.* 1977. *Oceanography*. San Francisco, W.H. Freeman and Company.
- Pérez-Linares, J., J. L. Ochoa y A. Gago-Martínez. 2008. Effects of PSP toxins in white leg shrimp *Litopenaeus vannamei* Boone, 1931. *Journal of Food Science* 73 (4): 671-673.
- Pérez-Linares, J., J. L. Ochoa y A. Gago-Martínez. 2009. Retention and tissue damage of PSP and NSP toxins in shrimp: Is cultured shrimp a potential vector of toxins to human population? *Toxicon* 53: 185-195.
- Pickard, G. L., 1975 *Descriptive Physical Oceanography*. Nueva York, Pergamon Press.
- Poot-Delgado, C. A. y Y. A. Guzmán-Noz. 2010. Composición y abundancia del fitoplancton marino, con énfasis en las especies potencialmente tóxicas y/o nocivas, en la Bahía de Campeche, México. 3er Congreso Internacional de Investigación. Octubre, Parral, Chihuahua, pp. 437-444.
- Portig, W. H. 1965. Central America rainfall. *Geog. Rev.* 15. 68-90 pp.
- Quijano-Schiggia, S., Rivera-Vilarelle, M., A. Olivos-Ortiz, J. Gaviño-Rodríguez, M. C. Álvarez y R. Sosa-Ávalos. 2013. Distribución de *Gymnodinium catenatum* durante cinco años de monitoreo de fitoplancton en las bahías de Manzanillo y Santiago. Universidad de Colima. *VI Simposium sobre Investigaciones Marinas y Acuícolas del Pacífico Tropical Mexicano*. Resumen corto.
- Rajagopalan, L. y G. Nihous. 2012. An Assessment of global Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) resources under broad geographical constraints. School of Ocean and Earth Science & Technology. University of Hawaii. Symposium presentation. 8 dp.
- Ramage, C. S. 1971. *Monsoon meteorology*. New York, Academic Press, 27-33 pp.
- Ritter-Ortiz, W. y S. Guzmán-Ruíz, 1984. Modelo generalizado de producción pesquera con dependencia ambiental. Una aplicación al Golfo de Tehuantepec. *Revista Geofísica*, 20: 21-29 pp.
- Rivera-Vilarelle, M., S. I. Quijano-Schiggia, A. Olivos-Ortiz y J. H. Gaviño-Rodríguez. 2013. El género *Pseudo-nitzschia* y su relación con parámetros fisicoquímicos en las Bahías de Manzanillo de 2009-2013. Universidad de Colima. *VI Simposium sobre Investigaciones Marinas y Acuícolas del Pacífico Tropical Mexicano*. Resumen corto.
- Robles-Jarero, E, G. y J. R. Lara-Lara, 1993. Phytoplankton biomass and primary productivity by size classes in the Gulf of Tehuantepec, Mexico. *J. of Plankton Res.* 15 (12): 1341-1358 pp.
- Rocheleau, G. y P. Grandelli. Biochemical simulation of a 100 MW OTEC plume. Makai Ocean Engineering. Hawaii, USA. Symposium presentation. 8 dp.

- 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.
- Rodríguez-Palacios, C., 1989. Caracterización de dos comunidades asociadas a facies rocosas, en las Bahías El Maguey (Huatulco) y Puerto Ángel, Oaxaca. (Distribución, diversidad y abundancia). Tesis para obtener el título de Biólogo. UNAM, México, D. F. 94 pp.
- Romanovsky, V., 1961 *et al.*, *El mar*. México, Labor.
- Romanovsky, V., 1968. *Física del océano*. Barcelona, Ediciones Martínez Roca.
- Romero-Centeno, R., J. Zavala-Hidalgo, A. Gallegos y J. J. O'Brien. 2003. Isthmus of Tehuantepec Wind Climatology and ENSO Signal. *Journal of Climate*. Vol. 16(15): 2628-2639.
- Romero-Gutiérrez, S. P. 2008. Estudio morfológico y taxonómico de diatomeas planctónicas del género *Pseudonitzschia* Peragallo (Bacillariophyceae) en el Golfo de Tehuantepec, México. Tesis de licenciatura. FES-Zaragoza. 61 pp.
- Ronsón-Paulín, J. A. 1999. Análisis retrospectivo y posibles causas de mareas rojas tóxicas en el litoral del sureste mexicano (Guerrero, Oaxaca, Chiapas). *Ciencia y Mar. Universidad del Mar* 9: 49-55.
- Sandoval, D. G., 1988. Estudio de las comunidades bénticas de la zona rocosa litoral y sublitoral de localidades en Bahías de Huatulco, Oaxaca. Tesis para obtener el título de Biólogo. UNAM, México, D. F. 96 pp.
- Schultz, D. M., E. R. Bracken, and L. F. Bosart, 1998. Planetary and Synoptic Scale Signatures Associated with Central American Cold Surges. *Monthly Weath. Rev.*, 126, 5-27 pp.
- Scientific American. *Oceanografía*. Madrid, H. Blume Ediciones, 1975.
- Secretaría de Marina, 1988. Compendio de estudios oceanográficos. Secretaría de Marina, México. 191 pp.
- SEDUCOP, 1991. Padrón de usuario de agua potable y alcantarillado de Puerto Ángel, Oaxaca. Inédito. México.
- Shumway, S. E. 1990. A review of the effects of algal blooms on shellfish and aquaculture. *J. World Aquac. Soc.* 21:65-104.
- Sierra-Beltrán, A. P., M. Palafox-Uribe, J. Grajales-Montiel, A. Cruz-Villacorta y J. L. Ochoa. 1997. Sea bird mortality at Cabo San Lucas, Mexico: evidence that toxic *Pseudonitzschia* sp. is spreading. *Toxicon*. 35: 447-453.

- Sierra-Beltrán, A., A. Cruz, E. Núñez-Vázquez, L. M. Del Villar, J. Cerecero y J. L. Ochoa. 1998. An overview of the marine food poisoning in Mexico. *Toxicon* 36 (11): 1493-1502.
- Sierra-Beltrán, A., R. Cortés-Altamirano, J. P. Gallo-Reynoso, S. Licea y J. Egidio-Villareal. 2005a. Is *Pseudo-nitzschia pseudodelicatissima* toxin the principal cause of sardines, dolphins, sea lions and pelicans mortality in 2004 in Mexico. *Harmful Algae News, IOC Newsletter on toxic algae and algal blooms* 29: 6-8.
- Smayda, T. J. 1997. What is a bloom? A commentary. *Limnology Oceanography*. 42. 1132-1136.
- Smith, J. C., R. Cormier, J. Worms, C. J. Birds, M. A. Quilliam, R. Pocklington, R. Angus y L. Hanic. 1990. Toxic blooms of domoic acid containing diatom *Nitzschia pungens* in the Cardigan River, Prince Edward Island, in 1998. In Graneli, E., B. Sundstrom, L. Edler y D. M. Anderson (eds.), Toxic marine phytoplankton. Elsevier, New York: 227-232.
- Sotelo, G. 1997. Hidráulica general, volumen 1: Fundamentos. Limusa. México. 227-281 pp.
- Sotomayor-Navarro, O. 1994. Desarrollo de la marea roja tóxica producida por *Pyrodinium bahamense* var. *compressum* en el Golfo de Tehuantepec México. 1989-1990. Comp. Oceanog. Golfo de Tehuantepec. EIO. SC. DGON SM: 087-113 pp.
- Sournia, A. 1995. Red-tide and toxic marine phytoplankton of the world ocean: An inquiry into biodiversity. In Lassus *et al.* (eds.), Harmful Marine Algal Blooms. Proc. 6th Int. Conf. on Toxic Marine Phytoplankton, Lavoisier, Paris: 103-112.
- Steenburgh, W. J. 1998. Multiscale analysis of the 7 December 1998. Great salt lake-Effect snowstorm. *Mon Weather Rev.* 128, 709-727 pp.
- Steenburgh, W. J., D. M. Schultz, y B. A. Colle, 1998. The Structure and Evolution of Gap Outflow over the Gulf of Tehuantepec, Mexico. *Mon. Wea. Rev.*, 126, 2673-2691.
- Strong, A. E., R. J. De Rycke y H. G. Stumpf. 1972. Satellite detection of upwelling and cold water eddies. Proc. 8th Int. Symp. Rem. Sens. Envir. Environmental Research Institute of Michigan Ann Arbor. 1067-1081 pp.
- Stumpf, H. G. y R. V. Legeckis, 1977. Satellite observations of mesoscale eddy dynamics in the Eastern Tropical Pacific Ocean. *J. Phys. Oceanogr.* (7): 648-658 pp.
- Stumpf, H. G. 1975. Satellite detection of upwelling in the Gulf of Tehuantepec, Mexico. *J. Phys. Oceanogr.* (5): 383-388 pp.

- Strichartz, G. y N. Castle. 1993. Pharmacology of marine toxins. Effects on membrane channels. In Hall, S. y G. Strichartz (eds.), *Marine toxins. Origins, structure and molecular pharmacology*. American Chemical Society, Washington, D. C.: 2-20.
- Tahara, K., T. Kojima & A. Inaba. 2000. Estimation of Ocean Thermal Energy Conversion System by using LCA Methodology. *OTEC*, 8, 31-41 [In Japanese]
- Takahashi, T. 1998. The changing carbon cycle in the Southern Ocean. *Oceanography* 25(3): 26–37 pp.
- Tamplin, M. L. 1990. A bacterial source of tetrodotoxins and saxitoxinas. In Hall, S. y G. Strichartz (eds.), *Marine toxins. Origins, structure and molecular pharmacology*. American Chemical Society, Washington, D. C.: 2-20.
- Tanaka, K., Y. Muto & M. Chimada, 1994. Generation of superoxide anion radicals by the marine phytoplankton organism *Chattonella antiqua*. *Journal of Plankton Research* 16: 161-169.
- Tapia-García, M. 1998. Evaluación ecológica de la ictiofauna demersal. Cap. 10: 129-148 pp. En: Tapia-García, M. (Ed.) *El Golfo de Tehuantepec: el ecosistema y sus recursos*. 240 pp. Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa. México. ISBN 970-654-348-1.
- Tapia-García, M. y B. Gutiérrez-Díaz. 1998. Recursos pesqueros de los estados de Oaxaca y Chiapas. Cap. 11: 149-162. En: Tapia-García, M. (Ed.) *El Golfo de Tehuantepec: el ecosistema y sus recursos*. 240 pp. Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa. México. ISBN 970-654-348-1.
- Taylor, F. J. R. 1990. Red tides, brown tides and other harmful algal blooms: the view into the 1990's. In: Graneli E. Sundstrom B., Edler L. Anderson DM (eds.); *Toxic Marine Phytoplankton*. Elsevier, New York: 527-533 pp.
- Thompson, W. J. y R. L. Ellsberry, 1981. An analysis of Eastern North Pacific Tropical cyclone forecast errors. *Mar. Wea. Rev.* 109: 1930-1938 pp.
- Tiffany, M. A., S. B. Barlow, V. E. Matey y S. H. Hulbert, 2001. *Chattonella marina* (Raphidophyceae), a potentially toxic alga in the Salton Sea, California. *Hydrobiología* 466: 187-194.
- Todd, E. C. D. 1990. Amnesic shellfish poisoning -a new seafood toxin syndrome. In: Graneli E. Sundstrom B., Edler L. Anderson DM (eds.); *Toxic Marine Phytoplankton*. Elsevier, New York: 504-508.
- Torres-Orozco, E. 1993. Análisis volumétrico de las masas de agua del Golfo de California. Tesis de Maestría. CICESE, Ensenada, Baja California. 80 pp.
- Trasviña-Castro, A. 1991. Offshore wind forcing in a coastal ocean: observations and modelling of the Gulf of Tehuantepec, Mexico. Ph.D. thesis, University of Wales.

- 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. 2002. La circulación costera del Pacífico Tropical Oriental, con énfasis en la Alberca Cálida Mexicana (ACM). CICESE. Ensenada, Baja California. 20 pp.
- Trasviña, A., E. D. Barton, J. Brown, H. S. Vélez, M. Kosro and R. L. Smith. 1995. Offshore Wind Forcing in the Gulf of Tehuantepec, Mexico: the asymmetric circulation. *Journal of Geophysical Research*, OCEANS, Vol. 100. (C10). 20649-20663 pp.
- Trasviña, A. y E. D. Barton, 2005. Summer circulation in the Mexican tropical Pacific. *Deep-Sea Research I*. 55 (2008) 587–607.
- Turner, M. 1992. Estudio oceanográfico en algunos parámetros físicos y químicos de la zona de surgencia del Golfo de Tehuantepec, en los meses de mayo y noviembre de 1989. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México. 83 pp.
- Turner, J. T. y P. A. Tester. 1997. Toxic marine phytoplankton, zooplankton grazers and pelagic food webs. *Limnol. Oceanogr.* 42 (5 part 2): 1203-1214.
- Twiner, M. C. y C. G. Trick, 2000. Possible physiological mechanisms for production of hydrogen peroxide by the ichthyotoxic flagellate *Heterosigma akashiwo*. *Journal of Plankton Research* 22: 1961-1975.
- Updegraff, I y R. Updegradd, 2002. *Mares y océanos*. Barcelona, Teide.
- Usup, G., Asmat Ahmad, Kazumi Matsuoka, Po Teen Lim y Chui Pin Leaw. 2012. Biology, ecology and bloom dynamics of the toxic marine dinoflagellate *Pyrodinium bahamense*. *Harmful Algae* 14: 301–312 pp.
- Varley R. 2013. Lockheed Martin MS2 New Venture, E-mail. Communication with the 1st author, Dr. Subhashish Banerjee, (in 2013).
- Vega, L. A. 1992. Economics of Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) in R.J. Seymour, ed. *Ocean Energy Recovery: The State of the Art*, American Society of Civil Engineers, New York, USA. 65 pp.
- Vega, L. A. 1999. Ocean Thermal Energy Conversion. *OTEC*, 1-22 pp.
- 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. 2009. OTEC Environmental Impact: Historical Perspective. University of Hawaii. USA. HINMREC-HNEI-UH & Lockheed Martin Maritime Systems & Sensors. 57 pp.
- Vega, L. A. 2010. Economics of Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC): An Update. Offshore Infrastructure Associates, Inc. University of Hawaii. 78 p.
- Vetter, R., 2006. *Oceanografía*. Buenos Aires, El Ateneo.
- Walsh, J. J., T. E. Whitley, J. C. Kelley, S. A. Huntsman y R. D. Pillsbury. 1977. Further transition states of the Baja California upwelling ecosystem. *Limnol. Oceanog.* 22 (2): 264-280 pp.
- Weihaupt, J. 2004. *Exploración de los océanos*. México, Compañía Editorial Continental.
- Wexler, H. 1943. Some aspect of dynamic anticyclonogenesis. The University of Chicago Inst. Meteor., Misc. Rept. No. 8. 28 pp.
- Wexler, H. 1951. Anticyclons. *In: Compendium of Meteorology*, T. F. Malone (Ed.). Boston, *American Meteorological Society*. 621-628 pp.
- Wyrtki, K. 1967. Circulation and water masses in the Eastern Equatorial Pacific Ocean. *Int. J. Oceanol. And Limnol.* 1(2): 117-147 pp.
- Yasumoto, T. y M. Murata. 1990. Polyether toxins involved in seafood poisoning. In Hall, S. y G. Strichartz (eds.), *Marine Toxins. Origins, Structure and Molecular Pharmacology*. American Chemical Society, Washington, D. C.: 120-132.
- Zweng, M.M, J.R. Reagan, J.I. Antonov, R.A. Locarnini, A.V. Mishonov, T.P. Boyer, H.E. Garcia, O.K. Baranova, D.R. Johnson, D.Seidov, M.M. Biddle, 2013. En: *World Ocean Atlas 2013, Volume 2: Salinity*. S. Levitus, Ed., A. Mishonov Technical Ed.; NOAA Atlas NESDIS 74, 39 pp.