

**UNIVERSIDAD DEL MAR**



**Hidrografía y circulación geostrófica del Golfo de Tehuantepec en  
condiciones de verano.**

**TESIS**

**que para obtener el título de Licenciado en Oceanología**

**PRESENTA:**

**Araico González Claudia Ivette**

Director de Tesis: Ocean. Miguel Ángel Ahumada Sempoal

Puerto Ángel Oaxaca, 2012.

Puerto Ángel Oaxaca, Diciembre de 2012.

M. en C. Francisco Javier Ulises Becerril Bobadilla  
JEFE DE LA CARRERA DE OCEANOLOGÍA  
UNIVERSIDAD DEL MAR  
P R E S E N T E

Después de haber analizado y evaluado la tesis “Hidrografía y circulación geostrofica del Golfo de Tehuantepec en condiciones de verano” que presenta la C. Claudia Ivette Araico González, le comunicamos que dicho documento cumple con los requisitos académicos para su impresión y defensa en el examen profesional correspondiente.

A t e n t a m e n t e

---

Ocean. Miguel Ángel Ahumada Sempoal  
Director

---

Dr. Austreberto Cristóbal Reyes Hernández  
Revisor

---

M. en C. Jorge Castro López  
Revisor

---

Dra. María Auxilio Esparza Álvarez  
Revisor

---

Dr. Roberto Esteban Martínez López  
Revisor

## **DEDICATORIA**

*Sin el apoyo incondicional de mis padres, hermanos y sobrinitos, otra hubiera sido la historia... es de ustedes este trabajo.*

## AGRADECIMIENTOS

A la Secretaría de Marina Armada de México, por permitirnos usar los datos de CTD de los cruceros oceanográficos SC-OCVER-0208 y SC-COYVER-0209 realizados del 25 de mayo al 08 de junio de 2008 y del 20 al 31 de julio de 2009, respectivamente.

A la Secretaría de Educación Pública, quien con su programa BECANET superior me otorgó una beca para realizar el trámite de titulación.

A mi Director de Tesis Miguel Ángel Ahumada Sempoal, por guiar con dedicación, entusiasmo y canas verdes a esta alumna.

Al Dr. Cristóbal Reyes Hernández, por sus asesorías, sus pláticas, su tiempo y su disposición.

A los revisores M. en C. Jorge Castro López, Dr. Roberto Esteban Martínez López y Dra. María Auxilio Esparza Álvarez por sus comentarios y sugerencias que contribuyeron a mejorar el documento.

A todos mis amigos de la UABC y CICESE, Reginaldo Durazo, Xavier Flores, Rafael Hernández, Jushiro Cepeda, que me enseñaron a programar en MATLAB, y sobre todo a *Don Erasmo*, quien además de ser mi amigo me enseñó a elaborar un súper código que me sirvió como base para elaborar la mayoría de los cálculos requeridos en esta tesis.

A mis amigos del área de Red en la uni, Alberto y Alí, por revivir, arreglar y procurar a mi sofisticado equipo de cómputo *texa* ¡quién sabe qué hubiera pasado sin ustedes!

A Marcelo, Javier y Paco, por darme trabajo a lo largo de mi estancia en Puerto Ángel.

Por último, no puedo dejar de agradecer a Jaime, Ana Betsabé y a mis profes Yolanda y Marcos todo el apoyo que me han brindado.

## RESUMEN

Se estudió la estructura hidrográfica y la circulación geostrofica del Golfo de Tehuantepec (GT) durante los cruceros oceanográficos SC-OCVER-0208 y SC-COYVER-0209, realizados en mayo-junio de 2008 y julio de 2009 respectivamente, a bordo del Buque de Investigación Oceanográfica BI-03 "Altair" de la Secretaría de Marina-Armada de México. Por primera vez se utilizó un método cuantitativo para estimar la profundidad de la capa mezclada (PCM) y se calcularon los porcentajes de mezcla de las masas de agua presentes. La profundidad promedio de la capa mezclada fue de 29.72 ( $\pm 6.28$ ) m y de 36.12 ( $\pm 10.73$ ) m. Las características termohalinas para la PCM fueron densidad promedio de 21.44 ( $\pm 0.35$ ) kg/m<sup>3</sup>, temperatura promedio de 28.35 ( $\pm 0.45$ )° C y salinidad promedio de 34.05 ( $\pm 0.49$ ) ups durante el crucero SC-OCVER-0208 y densidad promedio de 20.82 ( $\pm 0.32$ ) kg/m<sup>3</sup>, temperatura promedio de 29.65 ( $\pm 0.45$ )° C y salinidad promedio de 33.82 ( $\pm 0.33$ ) ups durante el crucero SC-COYVER-0209. Las masas de agua reconocidas fueron: Agua Tropical Superficial (TSW) caracterizada por temperaturas y salinidades entre 13.92-30.4° C y 33.18-34.78 ups, Agua Subtropical Subsuperficial (STUW) con temperaturas y salinidades entre 10.89-17.15° C y 34.65-34.8 ups, y Agua Intermedia del Antártico (AAIW) caracterizada por temperaturas y salinidades entre 6.3-10.4° C y 34.54-34.66 ups. Los porcentajes de mezcla indicaron que a 100 m de profundidad predominó el Agua Subtropical Superficial con valores entre 74.07-90.88 % mientras que a 400 m predominó el Agua Intermedia del Antártico con valores entre 54.32-65.8 %. Durante el crucero SC-OCVER-0208, se detectó un máximo de salinidad de 34.63 ups por arriba de los 40 m en la Región Occidental del golfo, el cual no ha sido reportado en trabajos previos. De acuerdo con los mapas de alturas dinámicas y de corrientes geostroficas obtenidas de AVISO, se piensa que dicho máximo de salinidad es

resultado de la presencia de un giro ciclónico y su posterior desplazamiento hacia el O. Por otro lado, la topografía dinámica inferida de los campos de densidad muestra que los giros ciclónico y anticiclónico observados dentro de la Región Occidental durante los cruceros SC-OCVER-0208 y SC-COYVER-0209 presentaron radios cercanos a 200 km y son de naturaleza geostrófica, mientras que un giro ciclónico observado en la Región Central durante el crucero SC-COYVER-0209 presentó un radio aproximado de 46 km y es de naturaleza ageostrófica. Se encontró evidencia de la Corriente Costera de Costa Rica (CCCR) desde superficie hasta por lo menos 380 m de profundidad. En su fracción subsuperficial presentó temperaturas de 10.89-17.15° C y salinidades de 34.65-34.8 ups. La CCCR se adentra en el GT al sur de los 15° N y en lugar de seguir la línea de costa, sigue la batimetría de la pendiente continental hasta alcanzar la Región Occidental del golfo, donde su cercanía (lejanía) a la costa depende de la presencia de giros ciclónicos (anticiclónicos).

# ÍNDICE

	<b>Pag.</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Antecedentes</b>	<b>6</b>
<b>3. Hipótesis</b>	<b>10</b>
3.1. <i>Hidrografía</i>	<i>10</i>
3.2. <i>Circulación Geostrófica</i>	<i>10</i>
<b>4. Objetivo</b>	<b>11</b>
4.1. <i>Objetivos particulares</i>	<i>11</i>
<b>5. Área de Estudio</b>	<b>12</b>
<b>6. Materiales y Método</b>	<b>13</b>
6.1. <i>Generación de datos</i>	<i>13</i>
6.2. <i>Procesamiento de datos</i>	<i>13</i>
6.3. <i>Cálculo de la Profundidad de la Capa Mezclada (PCM)</i>	<i>14</i>
6.4. <i>Reconocimiento de masas de agua y cálculo de porcentajes de mezcla</i>	<i>15</i>
6.4.1. <i>Masas de agua</i>	<i>15</i>
6.4.2. <i>Porcentaje de mezcla</i>	<i>15</i>
6.5. <i>Cálculo de velocidad de corrientes geostroficas</i>	<i>16</i>
6.6. <i>Elaboración de gráficos</i>	<i>18</i>
<b>7. Resultados</b>	<b>20</b>
7.1. <i>Crucero SC-OCVER-0208 del 25 de mayo al 8 de junio de 2008</i>	<i>20</i>
7.1.1. <i>Profundidad de la Capa Mezclada y estructura termohalina</i>	<i>20</i>
7.1.2. <i>Masas de agua</i>	<i>25</i>
7.1.3. <i>Circulación geostrofica</i>	<i>26</i>

	<b>Pag.</b>
<i>7.1.3.1. Alturas dinámicas</i>	26
<i>7.1.3.2. Velocidades geostróficas</i>	28
<b>7.2. Crucero SC-COYVER-0209 del 20 al 31 de julio de 2009</b>	<b>30</b>
<i>7.2.1. Profundidad de la Capa Mezclada y estructura termohalina</i>	30
<i>7.2.2. Masas de agua</i>	36
<i>7.2.3. Circulación geostrófica</i>	37
<i>7.2.3.1. Alturas dinámicas</i>	37
<i>7.2.3.2. Velocidades geostróficas</i>	39
<b>8. Discusiones</b>	<b>41</b>
<b>9. Conclusiones</b>	<b>48</b>
<b>10. Anexos</b>	<b>50</b>
<i>A. Desarrollo matemático para calcular la velocidad de un flujo geostrófico a partir de la función geopotencial</i>	50
<i>B. Diagramas de cajas y bigotes para la PCM durante los cruceros SC-OCVER-0208 y SC-COYVER-0209</i>	56
<i>C. Tablas de estado del mar y diagramas de vientos durante los cruceros SC-OCVER-0208 y SC-COYVER-0209</i>	57
<i>D. Datos de precipitación total para los estados de Oaxaca y Chiapas durante los años 2008 y 2009</i>	61
<b>11. Literatura citada</b>	<b>63</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Pag.</b>
<b>Figura 1.1</b>	Pacífico Tropical Oriental, PTO (Fuente Coastline Stractor, www.ngdc.noaa.gov). <span style="float: right;"><b>1</b></span>
<b>Figura 5.1</b>	Área de estudio, topografía del fondo en metros (Fuente ETOPO2, www.ngdc.noaa.gov) y estaciones de muestreo. Línea de contorno negra indica el límite de la plataforma continental (es decir, la isóbata de los 200 m). <span style="float: right;"><b>12</b></span>
<b>Figura 6.1</b>	Geometría usada para calcular corrientes geostróficas a partir de datos hidrográficos (modificado de Stewart, 2008). Donde $\beta$ es la inclinación de la isóbata P con respecto a una superficie geopotencial $\Phi$ , $\Phi_A - \Phi_B$ es la diferencia de $\Phi$ entre dos isóbatas (P, P <sub>1</sub> ), L es la distancia entre estaciones (A, B) y z es la profundidad. <span style="float: right;"><b>17</b></span>
<b>Figura 7.1</b>	Profundidad de la capa mezclada (PCM) durante el crucero SC-OCVER-0208. El intervalo de contorno es de 5 m. TI (Región Occidental), TII (Región Central) y TIII (Región Oriental). La línea de contorno gruesa indica la posición de la isóbata de los 200 m. <span style="float: right;"><b>21</b></span>
<b>Figura 7.2</b>	Secciones perpendiculares a la costa de $\sigma_\theta$ durante el crucero SC-OCVER-0208 a partir de datos de CTD. Los intervalos de contorno son de 0.1 y de 1 kg/m <sup>3</sup> por debajo y por arriba de los 21 kg/m <sup>3</sup> , respectivamente. Nota: se aumentó la resolución vertical en los primeros 100 m de profundidad. <span style="float: right;"><b>22</b></span>
<b>Figura 7.3</b>	Secciones perpendiculares a la costa de $\theta$ durante el crucero SC-OCVER-0208 a partir de datos de CTD. Los intervalos de contornos son de 0.5° C y de 1° C por arriba y por debajo de 28° C. Nota: se aumentó la resolución vertical en los primeros 100 m de profundidad. <span style="float: right;"><b>23</b></span>
<b>Figura 7.4</b>	Secciones perpendiculares a la costa de Salinidad durante el crucero SC-OCVER-0208 a partir de datos de CTD, donde el mínimo es de 32.0 y el máximo de 34.8 ups. Nota: se aumentó la resolución vertical en los primeros 100 m de profundidad. <span style="float: right;"><b>24</b></span>
<b>Figura 7.5</b>	Diagrama $\theta$ -S construido con los datos del crucero SC-OCVER-0208, puntos verdes corresponden a la Región Occidental (TI), amarillos a la Región Central (TII) y azules a la Región Oriental (TIII). <span style="float: right;"><b>25</b></span>
<b>Figura 7.6</b>	Mapa de alturas dinámicas a 0 m relativas a 400 m durante el crucero SC-OCVER-0208. El intervalo de contorno es de 0.2 din/m. TI (Región Occidental), TII (Región Central) y TIII (Región Oriental). La línea de contorno gruesa indica la posición de la isóbata de los 200 m. <span style="float: right;"><b>27</b></span>
<b>Figura 7.7</b>	Mapa de alturas dinámicas a 100 m relativas a 400 m durante el crucero SC-OCVER-0208. El intervalo de contorno es de 0.1 din/m. TI (Región Occidental), TII (Región Central) y TIII (Región Oriental). ). La línea de contorno gruesa indica la posición de la isóbata de los 200 m. <span style="float: right;"><b>28</b></span>

	<b>Pag.</b>	
<b>Figura 7.8</b>	Secciones perpendiculares a la costa de Velocidad Geostrófica relativa a 400 m durante el crucero SC-OCVER-0208, el máximo de velocidad en dirección Este es 0.5 m/s y en dirección Oeste es 0.7 m/s. Valores positivos (negativos) indican dirección Este (Oeste) hacia afuera (adentro) de la imagen. a) Región Occidental, b) Región Central, c) Región Oriental y d) Representación esquemática de circulación zonal en superficie (flechas rellenas) y a 100 m (flecha de contorno), nótese que las flechas no son proporcionales a la magnitud del flujo. La línea de contorno gruesa indica la posición de la isóbata de los 200 m.	<b>29</b>
<b>Figura 7.9</b>	Distribución horizontal de la profundidad de la capa mezclada (PCM) durante el crucero SC-COYVER-0209. El intervalo de contorno es de 5 m. TI (Región Occidental), TII (Región Central) y TIII (Región Oriental). La línea de contorno gruesa indica la posición de la isóbata de los 200 m.	<b>31</b>
<b>Figura 7.10</b>	Secciones perpendiculares a la costa de $\sigma_\theta$ para el crucero SC-COYVER-0209 a partir de datos de CTD. El intervalo de contorno es de 0.1 y 1 kg/m <sup>3</sup> por arriba y por debajo de 21 kg/m <sup>3</sup> . Nota: se aumentó la resolución vertical en los primeros 100 m de profundidad.	<b>33</b>
<b>Figura 7.11</b>	Secciones perpendiculares a la costa de $\theta$ durante el crucero SC-COYVER-0209 a partir de datos de CTD. El intervalo de contorno es de 0.5 y 1° C para temperaturas por arriba y por debajo de 28° C respectivamente. Nota: se aumentó la resolución vertical en los primeros 100 m de profundidad.	<b>34</b>
<b>Figura 7.12</b>	Secciones perpendiculares a la costa de Salinidad durante el crucero SC-COYVER-0209 a partir de datos de CTD. El intervalo de contorno es de 0.1 y 0.22 por debajo y por arriba de 34. Nota: se aumentó la resolución vertical en los primeros 100 m de profundidad.	<b>35</b>
<b>Figura 7.13</b>	Diagrama $\theta$ -S construido con los datos del crucero SC-COYVER-0209, puntos verdes corresponden a la Región Occidental (TI), amarillos a la Región Central (TII) y azules a la Región Oriental (TIII).	<b>36</b>
<b>Figura 7.14</b>	Mapa de alturas dinámicas a 0 m relativas a 400 m durante el crucero SC-COYVER-0209. El intervalo de contorno es de 0.05 din/m. TI (Región Occidental), TII (Región Central) y TIII (Región Oriental). La línea de contorno gruesa indica la posición de la isóbata de los 200 m.	<b>38</b>
<b>Figura 7.15</b>	Mapa de alturas dinámicas a 100 m relativas a 400 m durante el crucero SC-COYVER-0209. El intervalo de contorno es de 0.05 din/m. TI (Región Occidental), TII (Región Central) y TIII (Región Oriental). La línea de contorno gruesa indica la posición de la isóbata de los 200 m.	<b>38</b>

	<b>Pag</b>	
<b>Figura 7.16</b>	Secciones perpendiculares a la costa de Velocidad Geostrófica relativa a 400 m para el crucero SC-COYVER-0209, el máximo de velocidad en dirección Este es 0.71 m/s y en dirección Oeste es 0.68 m/s. Valores positivos (negativos) indican dirección Este (Oeste) (hacia afuera (adentro) de la imagen). a) Región Occidental, b) Región Central, c) Región Oriental y d) Representación esquemática de la circulación zonal en superficie (flechas rellenas) y a 100 m (flechas de contorno), nótese que las flechas no son proporcionales a la magnitud del flujo. La línea de contorno gruesa indica la posición de la isóbata de los 200 m.	<b>40</b>
<b>Figura 8.1</b>	Promedios diarios de topografía dinámica y velocidad geostrófica del 25 al 30 de mayo de 2008 (Fuente de datos: AVISO).	<b>44</b>
<b>Figura 8.2</b>	Promedios diarios de topografía dinámica y velocidad geostrófica del 31 de mayo al 05 de junio de 2008 (Fuente de datos: AVISO).	<b>45</b>
<b>Figura 8.3</b>	Promedios diarios de topografía dinámica y velocidad geostrófica del 06 al 08 de junio de 2008 (Fuente de datos: AVISO).	<b>46</b>
<b>Figura A.1</b>	Definición de $\zeta$ y $r$ para calcular la presión justo debajo de la superficie del mar (después de Stewart 2008).	<b>52</b>
<b>Figura A.2</b>	Condición barotrópica en la columna de agua (Modificada de Stewart 2008).	<b>53</b>
<b>Figura A.3</b>	Condición baroclínica en la columna de agua (Modificada de Stewart 2008).	<b>53</b>
<b>Figura B.1</b>	Diagrama de cajas y bigotes de la PCM durante los cruceros SC-OCVER-0208 y SC-COYVER-0209.	<b>56</b>
<b>Figura C.1</b>	Diagramas de astillas (convención oceanográfica) para el periodo del 15 de mayo al 08 de junio de 2008. Datos obtenidos de la Estación Meteorológica de Puerto Ángel, Oaxaca.	<b>60</b>
<b>Figura C.2</b>	Diagramas de astillas (convención oceanográfica) para el periodo del 08 al 31 de julio de 2009. Datos obtenidos de la Estación Meteorológica de Puerto Ángel, Oaxaca.	<b>60</b>
<b>Figura D.1</b>	Precipitación total mensual en los estados de Chiapas y Oaxaca obtenidos de los datos históricos de la Comisión Nacional del Agua.	<b>61</b>
<b>Figura D.2</b>	Precipitación total mensual en los estados de Chiapas y Oaxaca obtenidos de los datos históricos de la Comisión Nacional del Agua.	<b>62</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Pag.</b>
<b>Tabla 1.1</b> Índices termohalinos de las masas de agua reconocidas por Wyrcki (1965, 1966) en el Pacífico Tropical Oriental. Note que los acrónimos son dados en inglés.	<b>2</b>
<b>Tabla 1.2</b> Masas de agua reconocidas por Fiedler y Talley (2006) en el Pacífico Tropical Oriental.	<b>3</b>
<b>Tabla 6.1</b> Especificación de los sensores del CTD SBE 19-01.	<b>13</b>
<b>Tabla 7.1</b> Índices termohalinos para las masas de agua presentes en el Golfo de Tehuantepec durante el crucero SC-OCVER-0208. Z representa el intervalo de profundidad de cada masa de agua.	<b>26</b>
<b>Tabla 7.2</b> Índices termohalinos para las masas de agua presentes en el Golfo de Tehuantepec durante el crucero SC-COYVER-0209. Z representa el intervalo de profundidad de cada masa de agua.	<b>36</b>
<b>Tabla C.1</b> Estado del mar dentro de la escala de Beaufort (EB) obtenido de la bitácora de campo del crucero SC-OCVER-0208.	<b>57</b>
<b>Tabla C.2</b> Estado del mar dentro de la escala de Beaufort (EB) obtenido de la bitácora de campo del crucero SC-COYVER-0209.	<b>58</b>