

Tesis defendida por  
**Angelica Solorio Salazar**  
y aprobada por el siguiente Comité

---

Dr. Victor Manuel Godínez Sandoval  
Codirector del Comité

---

Dr. Miguel Fernando Lavín Peregrina  
Codirector del Comité

---

Dr. Juan Carlos Herguera García  
Miembro del Comité

---

Dr. Juan Manuel López Mariscal  
Miembro del Comité

---

Dr. Francisco Javier Ocampo Torres  
Coordinador  
del Posgrado en Oceanografía Física

---

Dr. Jesús Favela Vara  
Director de la Dirección de Estudios  
de Posgrado

*Febrero de 2014*

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR  
DE ENSENADA, BAJA CALIFORNIA**



---

**Programa de Posgrado en Ciencias  
en Oceanografía Física**

---

Características y variabilidad de la capa superficial  
mezclada del Golfo de California

Tesis

para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de

Maestro en Ciencias

Presenta:

Angelica Solorio Salazar

Ensenada, Baja California, México  
2014

Resumen de la tesis de Angelica Solorio Salazar, presenta como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Oceanografía Física.

Características y variabilidad de la capa superficial  
Mezclada del Golfo de California

Resumen aprobado por:

---

Dr. Victor Manuel Godínez Sandoval  
Codirector del Comité

---

Dr. Miguel Fernando Lavín Peregrina  
Codirector del Comité

Usando información de 84 campañas oceanográficas en el Golfo de California entre los años 1939 y 2011, y un modelo unidimensional de la capa mezcla, se discute la variabilidad estacional de las características termohalinas (temperatura y salinidad) y del espesor de la capa de mezcla que fueron calculados usando un criterio basado en densidad que tiene una diferencia de temperatura constante ( $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) y salinidad variable.

En el Golfo de California, el espesor de la capa de mezcla aumenta de la boca hacia la cabeza y de verano a invierno. La región donde se presentan los máximos espesores es en la zona de las grandes islas, por el contrario, en la Cuenca Pescadero se encuentran los mínimos espesores de la capa de mezcla. El análisis armónico de la variabilidad del espesor, temperatura y salinidad de la capa de mezcla, revela que tienen principalmente un comportamiento anual y la amplitud aumenta de la boca a la cabeza. Mientras que en la Cuenca Guaymas el armónico anual y el semianual de la salinidad tienen la misma amplitud (0.05 ups).

Al hacer la comparación entre los promedio mensuales del espesor y temperatura de los datos hidrográficos contra los del modelo unidimensional, se encuentran las mayores diferencias en invierno en la Región Norte. La magnitud del viento aumenta de la Región Norte a la Cuenca pescadero (de 2.5 a 5 m/s) durante el invierno y en verano de 0.5 a 1 m/s.

Palabras clave: **Capa mezclada, Golfo de California, flujos de calor, anual y semianual**

Abstract of the thesis presented by Angelica Solorio Salazar as a partial requirement to obtain the master of Science in degree in Oceanografía física.

Características y variabilidad de la capa superficial  
Mezclada del Golfo de California

Abstract approved by:

---

Dr. Victor Manuel Godínez Sandoval

---

Dr. Miguel Fernando Lavín Peregrina

By using information from 84 oceanographic cruises in the Gulf of California from 1939 to 2011, we discuss the seasonal variability of the thermohaline characteristics (depth, temperature and salinity) of the mixed layer calculated using a density-based criterion which has a constant temperature difference of 0.8 °C and variable salinity. In the Gulf of California, the depth of the mixed layer increases from the mouth to the head and from summer to winter. The region where the maximum depth occurs is in the area of the big islands; however the minimum depth of the mixed layer is found in Pescadero Basin. We performed harmonic analysis to the depth, temperature and salinity of the mixed layer; it was found to have mainly an annual behavior whose amplitude increases from the mouth to the head. While in Guaymas Basin the annual and semiannual harmonics have the same amplitude in the salinity (0.05 psu). The largest differences between the one-dimensional model results and the monthly averages of the thickness and temperature from hydrographic data were found in winter in the northern region. The magnitude of the wind increases from the Northern Region to the Pescadero Basin from 2.5 to 5 m/s during the winter and from 0.5 to 1 m/s during summer.

Keywords: **Mixed layer, Gulf of California, heat fluxes, annual and semiannual**

## **Dedicatorias**

A Jesús Manuel Beltrán y Valentín Lizárraga Solorio que me ayudaron a empezar un sueño en mi vida que nunca imagine que se podría cumplir.

A mi papá por comprenderme que esto era lo que yo quería en mi vida, aunque se que fue difícil al principio aceptarlo y entenderlo cuando me vine, eres una de las personas más importante en mi vida.

A mi mamá, a mi hermana, hermanos y a mi sobrina por apoyarme y estar siempre conmigo.

A mis amigos que siempre están allí para apoyarme y ellos saben que siempre cuentan conmigo.

## **Agradecimientos**

Al Dr. Miguel F. Lavín Peregrina gracias por la oportunidad brindada para desarrollar este trabajo de la tesis, su enseñanza, paciencia y apoyo lo cual le agradezco muchísimo ya que aprendido muchas cosas de usted.

Al Dr. Victor M. Godínez Sandoval por su ayuda en el desarrollo de la tesis.

Al Dr. Juan Carlos Herguera García y Dr. Juan Manuel López Mariscal por ser parte del comité de la tesis.

Al CONACYT por su apoyo en el financiamiento de mi beca para el posgrado en Oceanografía Física.

Al departamento de Oceanografía Física del CICESE por todo su apoyo logística y el apoyo económico recibido.

A Jorge Manuel Montes Aréchiga, Yesenia González, Minerva Padilla, Cristina Quezada, Samuel Villareal, Roció Zavala y Hilham Palafox.

A mis compañeros y amigos de la maestría y de otros departamentos, por haberlos conocido.

## Contenido

	Pagina
Resumen español .....	i
Resumen ingles .....	ii
Dedicatoria .....	iii
Agradecimientos .....	iv
Lista de figuras .....	vi
Lista de tablas .....	x
1. Introducción .....	1
1.1 Área de estudio.....	4
2. Objetivo General .....	6
2.1 Objetivo Específicos .....	6
3. Datos y métodos .....	7
3.1 Datos .....	8
3.2 Metodología .....	9
3.3 Análisis armónico .....	11
3.4 Modelo unidimensional.....	12
4. Resultados .....	16
4.1 Análisis armónico.....	19
4.2 Modelo unidimensional.....	24
4.2.1 Variables meteorológicas.....	24
4.2.1.1 Zona 1 o Región Norte.....	25
4.2.1.2 Zona 3 o Cuenca Guaymas.....	31
4.2.1.3 Zona 4 o Cuenca Farallón.....	38
4.2.1.4 Zona 5 o Cuenca Pescadero.....	43
5. Discusiones .....	49
Conclusiones .....	52
Referencias bibliográficas.....	53
Anexo .....	57

## Lista de figuras

Figura		Pagina
1	Localización del Área de estudio: el Golfo de California. Se muestran las divisiones que se hicieron al Golfo de California para realizar los cálculos. Adaptado de la "Estructura Hidrografica y Circulación del Golfo de California: Escalas Estacional e Interanual" de Lavín <i>et al.</i> , 1997, p. 140).	5
2	Ilustración esquemática de la determinación del espesor de la capa mezclada utilizando los perfiles de temperatura y anomalía de densidad. (Tomada de "An optimal definition for ocean mixed layer depth" de Kara <i>et al.</i> , 2000, p. 16,808).	10
3	Comparación del espesor de la capa mezclada entre los criterios utilizados y el espesor de la capa mezclada obtenida visualmente.	17
4	Análisis armónico del a) espesor (m), b) temperatura (°C) y c) salinidad (ups) para la zona 1 (Región Norte). Se presenta la serie de tiempo, el ajuste y su error.	19
5	Análisis armónico del a) espesor (m), b) temperatura (°C) y c) salinidad (ups) para la zona 3 (Cuenca Guaymas). Se presenta la serie de tiempo, el ajuste y su error.	20
6	Análisis armónico del a) espesor (m), b) temperatura (°C) y c) salinidad (ups) para la zona 5 (Cuenca Pescadero ). Se presenta la serie de tiempo, el ajuste y su error.	21
7	El comportamiento de las variables del a) espesor (m), b) temperatura (°C) y c) salinidad (ups) promedio y su error de todas las zonas.	22
8	Amplitud de los armónicos anual y semianual del espesor (m), temperatura (°C) y salinidad (ups) promedio y su error de todas la zonas.	23
9	Fase de los armónicos anual y semianual del espesor (m), temperatura (°C) y salinidad (ups) promedio y su error de todas la zonas.	24
10	Promedio cada 6 horas para los datos atmosféricos entre 1988 y 2010 de la zona 2: a) temperatura del aire (°C), b) humedad relativa (%), c) presión atmosférica (mb), d) nubosidad (octas) y e) viento (m/s).	25

11	Promedio cada 6 horas para los datos atmosféricos entre 1988 y 2010 de la zona 1: a) temperatura del aire ( $^{\circ}\text{C}$ ), b) humedad relativa (%), c) presión atmosférica (mb), d) nubosidad (octas) y e) viento (m/s).	26
12	Resultados con el modelo unidimensional para la temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) en la capa mezclada de la zona 1 para el mes de: a) febrero (invierno), b) mayo (primavera), c) agosto (verano) y d) noviembre (otoño).	27
13	Resultados con el modelo unidimensional para la salinidad (ups) en la capa mezclada de la zona 1 para el mes de: a) febrero (invierno), b) mayo (primavera), c) agosto (verano) y d) noviembre(otoño).	28
14	Promedio del a) espesor (m), b) temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) y c) salinidad (ups) obtenidos con el modelo unidimensional para la zona 1 comparados con los datos hidrográficos.	30
15	Los flujos de a) onda corta ( $Q_s$ ), b) onda larga ( $Q_b$ ), c) calor latente ( $Q_e$ ), d) calor sensible ( $Q_h$ ) y e) el flujo neto de calor a través de la superficie ( $Q_f$ ) para la zona 1 o Región Norte, estimaciones realizadas con datos del NARR y CCMP además una comparación con Castro <i>et al.</i> , (1994).	31
16	Promedio cada 6 horas para los datos atmosféricos entre 1988 y 2010 de la zona 3: a) temperatura del aire ( $^{\circ}\text{C}$ ), b) humedad relativa (%), c) presión atmosférica (mb), d) nubosidad (octas) y e) viento (m/s).	32
17	Resultados con el modelo unidimensional para la temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) en la capa mezclada de la zona 3 para el mes de: a) febrero (invierno), b) mayo (primavera), c) agosto (verano) y d) octubre (otoño).	33
18	Resultados con el modelo unidimensional para la salinidad (ups) en la capa mezclada de la zona 3 para el mes de: a) febrero (invierno), b) mayo (primavera), c) agosto (verano) y d) noviembre(otoño).	34
19	Promedio de a) espesor (m), b) temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) y c) salinidad (ups) obtenidos con el modelo unidimensional (color rojo), y datos hidrográficos (azul) para la zona 3.	36
20	Los flujos de a) onda corta ( $Q_s$ ), b) onda larga ( $Q_b$ ), c) calor latente ( $Q_e$ ), d) calor sensible ( $Q_h$ ) y e) el flujo neto de calor a través de la superficie ( $Q_f$ ) para la zona 3 o Cuenca Guaymas, estimaciones realizadas con datos del NARR y CCMP además una comparación con Castro <i>et al.</i> , (1994).	37

21	Promedio cada 6 horas para los datos atmosféricos entre 1988 y 2010 de la zona 4: a) temperatura del aire ( $^{\circ}\text{C}$ ), b) humedad relativa (%), c) presión atmosférica (mb), d) nubosidad (octas) y e) viento (m/s).	38
22	Resultados con el modelo unidimensional para la temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) en la capa mezclada de la zona 4 para el mes de: a) febrero (invierno), b) mayo (primavera), c) agosto (verano) y d) octubre (otoño). El intervalo de contornos en la figura (d) es de $1^{\circ}\text{C}$ cerca de la superficie y de $2^{\circ}\text{C}$ a mayor profundidad.	39
23	Resultados con el modelo unidimensional para la salinidad (ups) en la capa mezclada de la zona 4 para el mes de: a) febrero (invierno), b) mayo (primavera), c) agosto (verano) y d) noviembre(otoño). El intervalo de contornos en la figura (d) es de $1^{\circ}\text{C}$ cerca de la superficie y de $2^{\circ}\text{C}$ a mayor profundidad.	40
24	Promedio de a) espesor (m), b) temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) y c) salinidad (ups) obtenidos con el modelo unidimensional (color rojo), y datos hidrográficos (azul) para la zona 4.	41
25	Los flujos de a) onda corta ( $Q_s$ ), b) onda larga ( $Q_b$ ), c) calor latente ( $Q_e$ ), d) calor sensible ( $Q_h$ ) y e) el flujo neto de calor a través de la superficie ( $Q_f$ ) para la zona 4 o Cuenca Farallon, estimaciones realizadas con datos del NARR y CCMP.	42
26	Promedio cada 6 horas para los datos atmosféricos entre 1988 y 2010 de la zona 5: a) temperatura del aire ( $^{\circ}\text{C}$ ), b) humedad relativa (%), c) presión atmosférica (mb), d) nubosidad (octas) y e) viento (m/s).	43
27	Resultados con el modelo unidimensional para la temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) en la capa mezclada de la zona 5 para el mes de: a) febrero (invierno), b) mayo (primavera), c) agosto (verano) y d) octubre (otoño).	44
28	Resultados con el modelo unidimensional para la salinidad (ups) en la capa mezclada de la zona 5 para el mes de: a) febrero (invierno), b) mayo (primavera), c) agosto (verano) y d) noviembre(otoño).	45
29	Promedio de a) espesor (m), b) temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) y c) salinidad (ups) obtenidos con el modelo unidimensional (color rojo), y datos hidrográficos (azul) para la zona 5.	46

30	Los flujos de a) onda corta ( $Q_s$ ), b) onda larga ( $Q_b$ ), c) calor latente ( $Q_e$ ), d) calor sensible ( $Q_h$ ) y e) el flujo neto de calor a través de la superficie ( $Q_f$ ) para la zona 5 o Cuenca Pescadero, estimaciones realizadas con datos del NARR y CCMP haciendo una comparación con Zuidema <i>et al.</i> , (2006) para el mes de Julio y Agosto.	48
1A	Análisis armónico del a) espesor (m), b) temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) y c) salinidad (ups) para la zona 1 (Región Norte). Se presenta la serie de tiempo, el ajuste y su error.	59
2A	Análisis armónico del a) espesor (m), b) temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) y c) salinidad (ups) para la zona 2 (Región Islas). Se presenta la serie de tiempo, el ajuste y su error.	60
3A	Análisis armónico del a) espesor (m), b) temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) y c) salinidad (ups) para la zona 3 (Cuenca Guaymas). Se presenta la serie de tiempo, el ajuste y su error.	61
4A	Análisis armónico del a) espesor (m), b) temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) y c) salinidad (ups) para la zona 4 (Cuenca Farallón). Se presenta la serie de tiempo, el ajuste y su error.	62
5A	Análisis armónico del a) espesor (m), b) temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) y c) salinidad (ups) para la zona 5 (Cuenca Pescadero). Se presenta la serie de tiempo, el ajuste y su error.	63

### Lista de tablas

Tabla		Pagina
1	Tabla 1. Criterios usados para definir el espesor de la capa mezclada (Tomada de Clement <i>et al.</i> , 2004, p. 2).	7
2	Numero de campañas oceanográficas y lances realizados mensualmente desde 1939 al 2011 en el Golfo de California. (La información proviene de 84 campañas oceanográficas que se realizaron en el Golfo de California durante 1939 al 2011).	8
3	Promedios mensual $\pm$ desviación estándar del espesor (m) de la capa de mezcla en cada zona. El numero entre paréntesis son los perfiles hidrográficos usados en el promedio.	18
4	Promedios mensual $\pm$ desviación estándar de la temperatura ( $^{\circ}$ C) de la capa de mezcla en cada zona. El numero entre paréntesis son los perfiles hidrográficos usados en el promedio.	18
5	Promedios mensual $\pm$ desviación estándar de la salinidad (ups) de la capa de mezcla en cada zona. El numero entre paréntesis son los perfiles hidrográficos usados en el promedio.	18
6	Promedio del espesor (m), temperatura ( $^{\circ}$ C) y salinidad (ups) obtenidos con el modelo unidimensional para la zona 1, los números entre paréntesis son los resultados de los datos hidrográficos.	29
7	Promedio del espesor (m), temperatura ( $^{\circ}$ C) y salinidad (ups) obtenidos con el modelo unidimensional para la zona 3, los números entre paréntesis son los resultados de los datos hidrográficos.	35
8	Promedio del espesor (m), temperatura ( $^{\circ}$ C) y salinidad (ups) obtenidos con el modelo unidimensional para la zona 4, los números entre paréntesis son los resultados de los datos hidrográficos.	41
9	Promedio del espesor (m), temperatura ( $^{\circ}$ C) y salinidad (ups) obtenidos con el modelo unidimensional para la zona 5, los números entre paréntesis son los resultados de los datos hidrográficos.	46

1A	La amplitud y fase del armónico del espesor (m) junto con el error.	64
2A	La amplitud y fase del armónico de temperatura (°C) junto con el error.	64
3A	La amplitud y fase del armónico de salinidad (ups) junto con el error.	65

## 1. Introducción

La capa superficial mezclada o capa de mezcla es la capa superior del océano caracterizada por ser casi verticalmente homogénea en sus propiedades hidrológicas, como son la temperatura, la salinidad y el oxígeno disuelto, entre otras propiedades. Esta capa es la región del océano que interactúa directamente con la atmósfera mediante la transferencia de gases, de calor y de momento. Conocer el espesor de la capa de mezcla es de gran importancia porque de este espesor depende en gran parte el intercambio de calor entre el océano y la atmósfera (Chen *et al.*, 1994). En particular, en este trabajo nos interesa conocer el comportamiento de la capa de mezcla en el Golfo de California que se forma como consecuencia de la radiación solar, del esfuerzo del viento y de la convección vertical.

Las causas principales que originan la mezcla vertical de la columna de agua en mar abierto son el esfuerzo del viento y la convección vertical debida a la inestabilidad causada por la pérdida de calor y masa en la superficie del océano. Sin embargo, en zonas de particular configuración topográfica, como en las zonas costeras someras, en los canales y en las regiones cercanas a las islas, las corrientes de marea, las surgencias (corrientes divergentes o convergentes), las ondas internas y los giros de gran escala, contribuyen sustancialmente para mezclar la columna de agua (Martínez-Sepúlveda, 1994). Cabe mencionar que para este estudio en particular, la profundidad y la temperatura de la capa de mezcla son variables muy importantes para determinar la cantidad de calor en esta capa tanto en regiones oceánicas como costeras. La profundidad de esta capa es también una variable importante para estimar la intensidad de la luz que aprovechan los organismos marinos y para entender la dinámica de las especies planctónicas.

Uno de los primeros estudios para caracterizar la capa mezclada del océano fue realizado por Kraus y Turner (1967), donde encontraron que los cambios de espesor y temperatura en la capa de mezcla durante el invierno son originados principalmente por enfriamiento de la superficie. Enfriamiento causado principalmente por la disminución de la radiación solar y por la evaporación o flujo de calor latente inducido por el viento.

Monterrey y Levitus (1997), emplearon como indicador una diferencia vertical de densidad de  $0.125 \text{ kg/m}^3$  para determinar el espesor de la capa mezclada, utilizando la climatología de World Ocean Atlas 1994 (Levitus *et al.*, 1994, Levitus y Boyer, 1994). Mientras que Sprintall y Roemmich (1999), propusieron una diferencia de temperatura de  $0.1^\circ\text{C}$  con la superficie como criterio para determinar la profundidad de la capa mezclada. Ellos encontraron que tanto las regiones ecuatoriales como subpolares del Océano Pacífico están fuertemente influenciadas por la estratificación debido al efecto de la salinidad. Recientemente, Kara *et al.* (2000), propusieron una diferencia vertical de temperatura de  $0.8^\circ\text{C}$  con respecto a la temperatura de referencia para determinar el espesor de la capa de mezcla, denominándola capa isoterma, así mismo usaron los perfiles de densidad para determinar el espesor de la capa mezclada incluyendo el efecto de la salinidad. Este valor promedio de  $0.8^\circ\text{C}$  fue obtenido a través de comparaciones estadísticas usando la climatología mensual en las observaciones oceánicas de estaciones meteorológicas de 1959 a 1980 (Tabata y Weichselbaumer, 1992) y de la climatología mensual del World Ocean Atlas 1994 (Levitus *et al.*, 1994). El método tiene una precisión de 20 m en el 85 % de los casos para obtener el espesor de la capa de mezcla en el océano.

El primer intento de cuantificar y caracterizar la capa mezclada en el Golfo de California lo realizó Robinson (1973), utilizando datos de botellas Niskin y termómetros reversibles. Para determinar la profundidad de la capa mezclada usó el inicio de la termoclina como  $2^\circ\text{F}$  de diferencia con respecto a la temperatura superficial; encontró que el espesor de la capa se incrementa hacia la cabeza con máximos de 130 m en la parte norte del Golfo durante invierno. Las profundidades mínimas estimadas fueron de 15 m en casi todo el Golfo excepto en la isla Ángel de la Guarda y en algunas zonas de las costas del sur del Golfo. Estos resultados tienen la limitante de que había muy pocos datos disponibles.

El trabajo mas reciente es el de Martínez-Sepúlveda (1994) donde estimó el espesor de la capa de mezcla de forma visual, directamente de los perfiles de temperatura. Sus resultados muestran que la capa mezclada cambia con respecto a las estaciones del año; en verano las profundidades son aproximadamente de 10 m en el sur y 20 m en el norte, mientras que en el invierno la profundidad de la capa en la parte norte es de 90 m

y en el sur de 70 m. Para finales de verano y otoño la profundidad de la capa se incrementa gradualmente en todo el Golfo, además reportó que el espesor de la capa de mezcla durante el invierno es relativamente profunda debido que la superficie se enfría por el viento que proviene de la masa continental de Norteamérica (es frío y más seco). Por el contrario, en verano la capa de mezcla es más delgada y cálida por que el viento proviene de la zona marítima tropical (viento húmedo y tibio).

Es necesario estimar el calor almacenado en la columna de agua y los flujos de calor a través de la interfase aire-mar, para determinar los procesos que causan un incremento o pérdida de calor en la columna de agua. Los primeros en hacer estimaciones de los flujos de calor a través de la interfase aire-mar en el Golfo de California fueron Roden y Emilson (1979). Encontraron que el flujo neto de calor debido a la radiación solar sin considerar nubosidad varía de 200 a 380  $W/m^2$  de invierno a verano. Además que la tasa de evaporación en la región central del Golfo de California es de 1.3 m/año, con un mínimo en verano y un máximo en invierno. Lavín y Organista (1988), evaluaron el ciclo estacional de los flujos de calor a través de la interfase aire-mar en la región norte del Golfo de California con datos meteorológicos de 8 años. Encontraron una ganancia de calor promedio anual de 69  $W/m^2$  en regiones costeras y 83  $W/m^2$  en zonas profundas, con una evaporación promedio de 0.9 m/año.

Bray (1988), analizó la circulación termohalina con 14 cruceros oceanográficos, desde la cabeza hasta la línea de Guaymas y Santa Rosalia. Encontró que el Golfo de California es una cuenca de evaporación con un promedio anual de evaporación de 0.9 m/año. Además encontró un promedio anual de 20 a 50  $W/m^2$  de ganancia neta de calor del Golfo a partir de la atmosfera. También encuentra que la capa superficial (0 a 50 m) fluye hacia el sur en invierno, mientras en verano al norte, de acuerdo a los vientos dominantes.

Paden (1990), encontró que la parte norte del Golfo de California gana calor con un promedio anual de 71  $W/m^2$ , con una máxima ganancia en el Canal de Ballenas, donde la temperatura superficial es consistentemente más fría. Además, la fuerte mezcla por marea transfiere calor hacia abajo de la columna de agua, manteniendo temperaturas bajas en la superficie. Castro *et al.*, (1994), reportaron que la evaporación en la parte

norte es de 1.0 m/año y en el sur de 0.6 m/año. Mas recientemente Berón-Vera y Ripa (2002) mencionaron que la máxima evaporación es de 1.1 m/año.

### **1.1 Área de estudio**

El Golfo de California (GC), también conocido como Mar de Cortés, está limitado por la península de Baja California y por los estados de Sonora y Sinaloa. Tiene una longitud aproximada de 1500 km, con orientación noroeste-sureste, mientras que su ancho varía de 70 a 222 km. En su extremo norte se encuentra la desembocadura del Rio Colorado, y en su extremo sur, en la boca, tiene comunicación con el Océano Pacífico (García y Marinone, 1997). La parte norte del Golfo es relativamente somera, el clima es muy seco y la evaporación puede exceder 1 m/año. La temperatura en la superficie del mar es mayor a los 12 °C en invierno y en verano puede exceder los 30 °C. El rango de marea en la parte norte llega a superar los 6 m (Marinone y Lavín, 1997). La parte sur del Golfo está fuertemente influenciada por las aguas del Océano Pacífico, debido a que se establece un vigoroso intercambio de masas de agua. En esta región se exceden profundidades de 3000 m y el rango de marea es de aproximadamente 3 m (Marinone y Lavín, 1997).

Para estudiar mejor la variabilidad de la capa de mezcla en el Golfo de California lo dividiremos en 5 zonas que son: (1) Región Norte, es la región más somera del Golfo de California donde se tienen profundidades menores a 200 m y la mayor parte del fondo marino puede clasificarse como parte de la plataforma continental; (2) Región de las grandes Islas, se encuentra entre la parte norte y la parte central del Golfo y actúa como punto de generación de mezcla intensa por las fuertes corrientes que se presentan y las surgencias que ocurren todo el año; (3) Cuenca de Guaymas, es la parte central del Golfo de California y alcanza profundidades de 2000 m; (4) Cuenca Farallón, en estas cuencas la plataforma continental es casi inexistente del lado de la península pero del lado continental la plataforma es de unos 30 km de ancho y finalmente; (5) Cuenca Pescadero, esta región se encuentra en contacto directo con el Océano Pacífico y alcanza profundidades mayores a los 3000 m (Figura 1) (Lavín *et al.*, 1997).

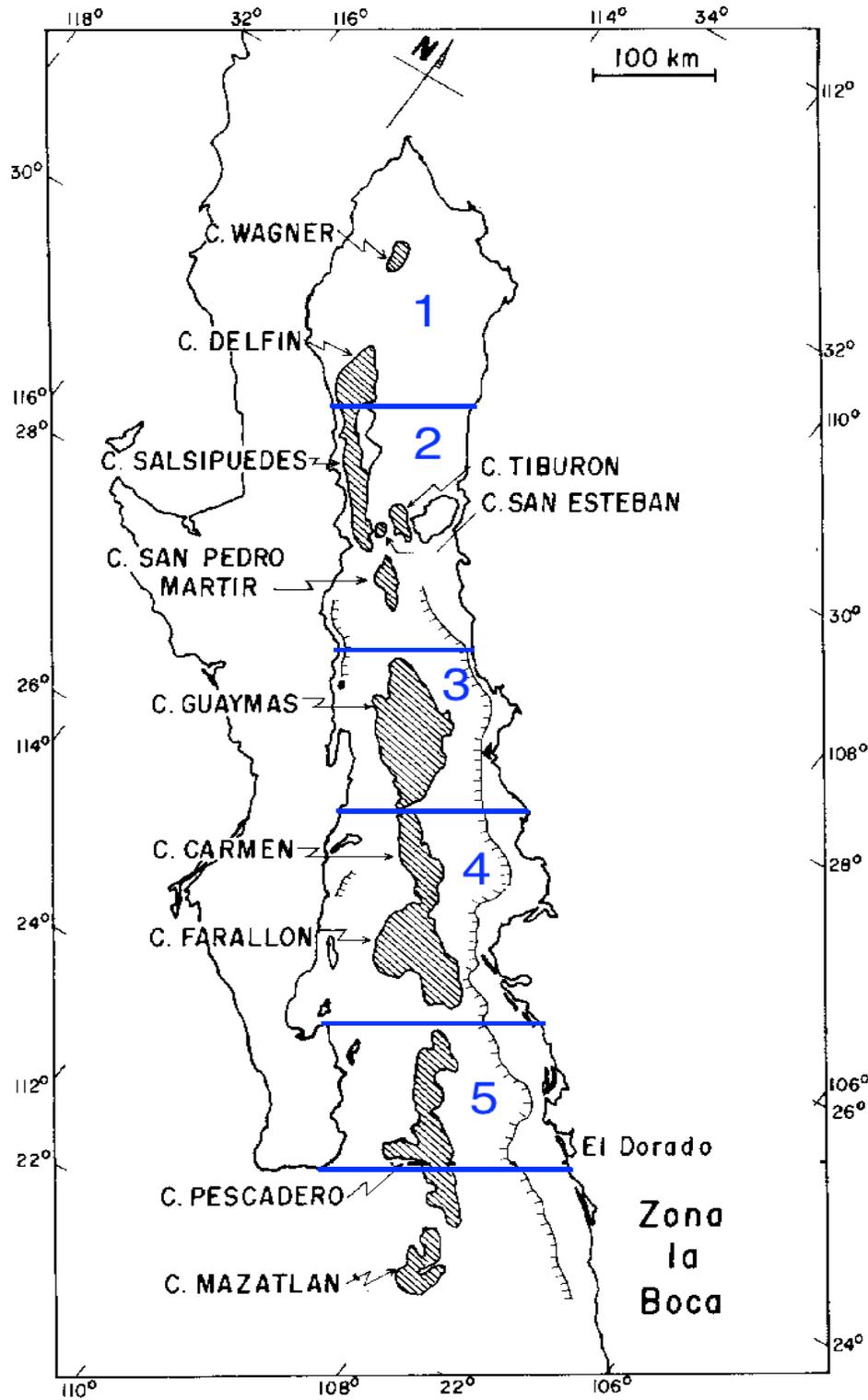


Figura 1. Localización del Área de estudio: el Golfo de California. Se muestran las divisiones que se hicieron al Golfo de California para realizar los cálculos. (Adaptado de la "Estructura Hidrográfica y Circulación del Golfo de California: Escalas Estacional e Interanual" de Lavín *et al.*, 1997, p. 140).

## **2. Objetivo general**

El propósito de este trabajo es describir y explicar la variabilidad estacional de las características termohalinas de la capa mezclada superficial en las distintas regiones del Golfo de California usando una base de datos hidrográficos actualizados al 2011.

### **2.1 Objetivos específicos**

- Encontrar un criterio para estimar el espesor de la capa mezclada que funcione mejor para el Golfo de California y obtener las estimaciones del espesor de la capa mezclada superficial.
- Describir el ciclo estacional del espesor de la capa de mezcla y sus propiedades termohalinas para las diferentes regiones del Golfo de California.
- Explicar el comportamiento estacional de la capa mezclada y sus propiedades termohalinas usando un modelo sencillo unidimensional forzado con estimaciones de flujos de calor y viento, sin considerar el efecto de la advección horizontal.

### 3. Datos y métodos

Existen diferentes criterios para encontrar el espesor de la capa mezclada, pero la mayoría utilizan la temperatura o densidad, ya sea de una forma visual en los perfiles verticales o usando un valor numérico. Además, cada autor toma su propia profundidad de referencia como se aprecia en la Tabla 1, esto depende de las condiciones meteorológicas e hidrográficas típicas de la zona que se esté investigando. El espesor de la capa mezclada se expresa como MLD (*Mixed Layer Depth* por sus siglas en Inglés), mientras el cambio de temperatura como  $\Delta T$ .

**Tabla 1. Criterios usados para definir el espesor de la capa mezclada (Tomada de Clement *et al.*, 2004, p. 2).**

Autor	Área de estudio	Criterio de la MLD	Tipo de criterio	Profundidad de referencia
<b>Sprintall y Roemmich (1999)</b>	Océano Pacífico	$\Delta T = 0.1 \text{ } ^\circ\text{C}$ $\Delta\sigma_\theta = \frac{\partial\sigma_\theta}{\partial T} \Delta T$ con un $\Delta T = 0.1 \text{ } ^\circ\text{C}$	Densidad	10 m
<b>Kara <i>et al.</i> (2000)</b>	Océano Global	$\Delta T = 0.8 \text{ } ^\circ\text{C}$ $\Delta\sigma_\theta = \sigma_\theta(T + \Delta T, S) - \sigma_\theta(T, S)$ con $\Delta T = 0.8 \text{ } ^\circ\text{C}$	Densidad y temperatura	10 m
<b>Monterey y Levitus (1997)</b>	Océano Global	$\Delta T = 0.5 \text{ } ^\circ\text{C}$ $\Delta\sigma_\theta = 0.125 \text{ kgm}^{-3}$	Densidad y temperatura	0 m
<b>Brained y Gregg (1995)</b>	Océano Pacífico.	$\Delta\sigma_\theta = 0.05$ a $0.5 \text{ kgm}^{-3}$	Densidad	0 m
<b>Suga <i>et al.</i> (2004)</b>	Pacífico Norte	$\Delta\sigma_\theta = 0.125 \text{ kgm}^{-3}$	Densidad	10 m
<b>Thomson y Fine (2003)</b>	Pacífico Norte	$\Delta\sigma_\theta = 0.01$ a $0.03 \text{ kgm}^{-3}$	Densidad	2.5 m
<b>Well y Plueddemann (1990)</b>	Pacífico Norte	$\Delta\sigma_\theta = 0.03 \text{ kgm}^{-3}$	Densidad	10 m
<b>Schneider y Muller (1990)</b>	Pacífico Tropical	$\Delta\sigma_\theta = 0.01$ a $0.03 \text{ kgm}^{-3}$	Densidad	2.5 m
<b>Obata <i>et al.</i> (1996)</b>	Océano global	$\Delta T = 0.5 \text{ } ^\circ\text{C}$	Temperatura	0 m
<b>Thompson (1976)</b>	Pacífico Norte	$\Delta T = 0.2 \text{ } ^\circ\text{C}$	Temperatura	3 m
<b>Spall <i>et al.</i> (2000)</b>	Atlántico Norte	$\Delta T = 0.5 \text{ } ^\circ\text{C}$	Temperatura	0 m
<b>Foltz <i>et al.</i> (2003)</b>	Atlántico Tropical	$\Delta T = 0.5 \text{ } ^\circ\text{C}$	Temperatura	0 m

### 3.1 Datos

La información hidrográfica que se utilizará proviene de 84 campañas oceanográficas en el Golfo de California obtenidas entre 1939 y 2011 (Tabla 2), con un total de 4832 lances hidrográficos. Los muestreos se realizaron con botellas y termómetros reversibles hasta el año 1983 y posteriormente usando sensores continuos en la vertical (CTD). Las variables meteorológicas utilizadas (temperatura del aire, humedad relativa, presión atmosférica y nubosidad) son datos cada 6 horas desde 1988 a 2010 obtenidos del NCEP North American Regional Reanalysis (NARR <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.narr.monolevel.html>) y para la velocidad del viento del Cross-Calibrated Multi-Platform Ocean Surface Wind Vector (CCMP [http://podaac.jpl.nasa.gov/dataset/CCMP\\_MEASURES\\_ATLAS\\_L4\\_OW\\_L3\\_0\\_WIND\\_VECTORS\\_FLK?ids=&values](http://podaac.jpl.nasa.gov/dataset/CCMP_MEASURES_ATLAS_L4_OW_L3_0_WIND_VECTORS_FLK?ids=&values)).

**Tabla 2. Número de campañas oceanográficas y lances realizados mensualmente desde 1939 al 2011 en el Golfo de California. (La información proviene de 84 campañas oceanográficas que se realizaron en el Golfo de California durante 1939 al 2011).**

Meses	Años	Lances
<b>Enero</b>	1984;1989;1990;1995	325
<b>Febrero</b>	1956;1957;1977;1990;1999;2000;2006;2007	459
<b>Marzo</b>	1939;1973;1979;1983;1984;1985;1988;1995;2011	599
<b>Abril</b>	1956;1957;1970;1974;1993	170
<b>Mayo</b>	1954;1960;1965;1967;1973;1984;1995;1999;2003	372
<b>Junio</b>	1957;1969;1982;1995;2002;2004;2005;2006;2008 2010	557
<b>Julio</b>	1967;1973;1979;1990;1998;1999;2002;2010;2011	442
<b>Agosto</b>	1957;1969;1973;1977;1990;1995;1998;1999;2000 2002;2003;2004;2005	921
<b>Septiembre</b>	1971;1978;1986	178
<b>Octubre</b>	1974;1981;1983;2007	104
<b>Noviembre</b>	1961;1967;1972;1984;1985;1998	299
<b>Diciembre</b>	1956;1986;1994;2002	406
<b>Total</b>		4832

### 3.2 Metodología

Utilizaremos la evaluación visual de los perfiles hidrográficos de una campaña oceanográfica para hacer una comparación con los criterios de Sprintall y Roemmich (1999) y Kara *et al.* (2000) y encontrar el criterio que mejor estime el espesor de la capa mezclada en el Golfo de California. Una de las ventajas que se tiene al obtener numéricamente el espesor de la capa mezclada es que disminuye la ocurrencia de errores presentes en los procedimientos subjetivos, además de que es posible analizar gran cantidad de datos. Se analizó la campaña oceanográfica (Enero 1995) usando la metodología descrita por Martínez-Sepúlveda (1994) que consiste en analizar visualmente cada perfil de temperatura para encontrar el espesor de la capa de mezcla, después se compararon los espesores con los criterios de (a) Kara *et al.*, (2000) y (b) Sprintall y Roemmich (1999).

El método propuesto por Kara *et al.*, (2000) para estimar el espesor de la capa mezclada conocido como MLD, se basa en encontrar el espesor a la cual el valor de la densidad de referencia cambia un determinado valor  $\Delta\sigma_t$  ( $\sigma_t = \rho(s, t) - 1000$  es la anomalía de densidad en  $\text{kgm}^{-3}$ ). Normalmente se toma como densidad de referencia el valor a 10 m de profundidad, esta profundidad es elegida para eliminar cualquier posible tendencia en los datos del perfil debido a los procesos de muy alta frecuencia que ocurren en la superficie del océano (para evitar las variaciones debidas a ciclos diurnos u otras fluctuaciones que no sean producidas por cambios estacionales). En la figura 2 se muestra un esquema para la determinación del espesor de la capa de mezcla usando como criterio la temperatura o la densidad.

Al tomar como criterio la temperatura (capa isotérmica) se hace una búsqueda en el perfil de temperatura para encontrar la región de temperatura uniforme, que se obtiene cuando el decremento de temperatura supera cierto umbral con respecto a la temperatura de referencia. En caso de que no se encuentre la profundidad a la cual la temperatura cambie de acuerdo a lo indicado por el criterio, se toma la profundidad del fondo marino como el espesor de la capa mezclada.

Para determinar el espesor de la capa mezclada a partir de la densidad se sigue el mismo procedimiento que se realizó con la temperatura pero, en este caso, se utiliza

una variación de la densidad determinada por la ecuación de estado, producido por la diferencia de temperatura ( $\Delta T$ ) con respecto a la capa de referencia como lo muestra la siguiente relación:

$$\Delta\sigma_t = \sigma_t(T + \Delta T, S, P) - \sigma_t(T, S, P) \quad (1)$$

donde S es la salinidad, T es la temperatura y P la presión.

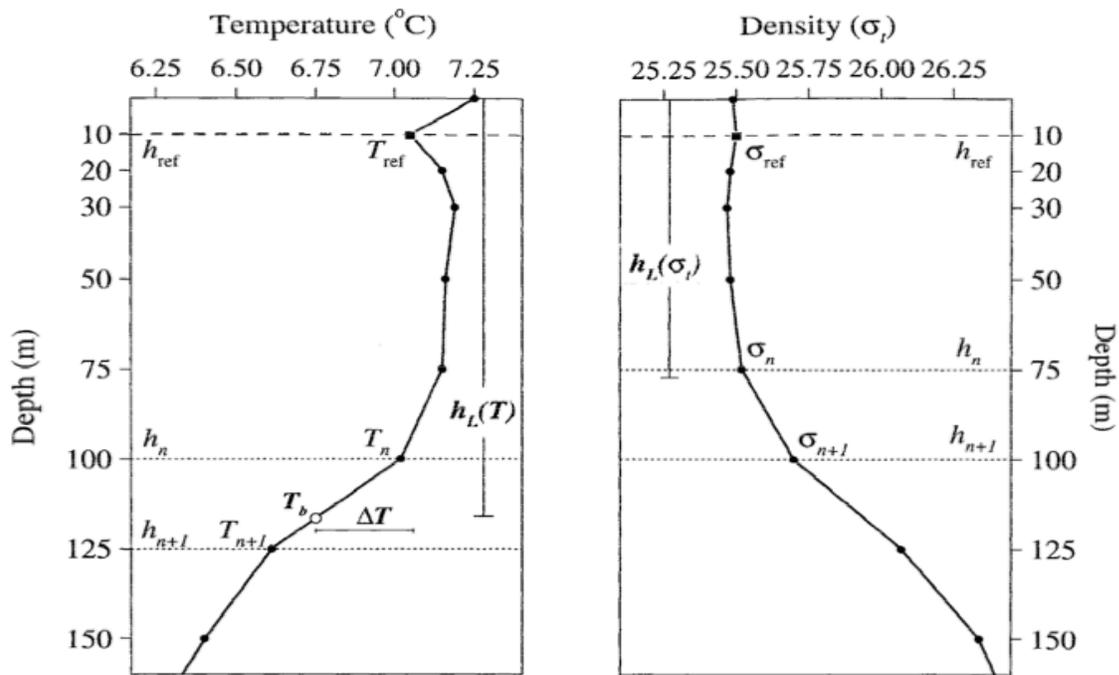


Figura 2. Ilustración esquemática de la determinación del espesor de la capa mezclada utilizando los perfiles de temperatura y anomalía de densidad. (Tomada de “An optimal definition for ocean mixed layer depth” de Kara *et al.*, 2000, p.16,808).

El método propuesto por Sprintall y Roemmich (1999) identifica la capa de mezcla donde la temperatura cambia 0.1 °C sobre cualquier intervalo de la profundidad; se toma como referencia la temperatura a 10 m de profundidad. También el espesor de la capa mezclada se puede definir en términos de densidad de una manera que es consistente con la definición sobre la temperatura solamente que la densidad de referencia de la capa de mezcla es la profundidad a la cual se obtiene con esta ecuación:

$$\rho = \rho(z = z_{ref}) + \Delta T \frac{\partial \rho}{\partial T} \quad (2)$$

donde el coeficiente de expansión térmica ( $\frac{\partial \rho}{\partial T}$ ) se calcula a partir de los valores de temperatura y salinidad en la profundidad de referencia, y  $\Delta T$  es el cambio de temperatura de 0.1 °C.

Mediante la selección del  $\Delta T$  de 0.1 °C tal como se utiliza en la capa mezclada determinada por la temperatura: Si el criterio de la densidad de la ecuación (2) produce profundidades similares de la capa de mezcla que las determinadas por el criterio de temperatura, los cambios en la salinidad son insignificantes. En las regiones donde la influencia de la salinidad es importante, por ejemplo, cuando existen capas de barreras de salinidad, esta estructura será revelada por las diferentes profundidades de la capa de mezcla determinada por la temperatura y densidad.

### 3.3 Análisis armónico

En las diferentes regiones del Golfo de California se estimaron los promedios mensuales tanto del espesor, como de la temperatura y de la salinidad, a través de la información hidrográfica, que fue separada por meses para así obtener los promedios mensuales. Después se realizó un ajuste armónico de componentes anual y semianual, para así obtener el ciclo estacional:

$$B_{est}(t) = B_0 + B_a \cos(\omega t - F_a) + B_s \cos(2\omega t - F_s) \quad (3)$$

$w$  es la frecuencia anual= $2\pi/365.25$  en radianes/día,  $B_{est}$  es la señal estacional,  $B_0$  es el promedio temporal,  $B_a$  y  $B_s$  son las amplitudes anual y semianual, y  $F_a$  y  $F_s$  son las fases anual y semianual, respectivamente.

### 3.4 Modelo unidimensional

Para investigar cuantitativamente los procesos que causan la variabilidad observada de las características de la capa mezclada se utilizará un modelo unidimensional que se basa en la energía potencial de la columna de agua relativa al estado de mezcla y se expresa como:

$$\phi = \frac{1}{h} \int_h^0 gz (\bar{\rho} - \rho(z)) dz \quad (4)$$

donde h es la profundidad, g la aceleración gravitacional,  $\rho(z)$  es el perfil de densidad y  $\bar{\rho}$  es el perfil de densidad promedio.

$$\bar{\rho} = \frac{1}{h} \int_h^0 \rho(z) dz \quad (5)$$

La energía potencial de la columna de agua ( $\phi$ ) es la cantidad de energía necesaria para mezclar verticalmente la columna de agua a una profundidad (h). Cuando  $\phi = 0$  la columna de agua está bien mezclada, cuando  $\phi > 0$  es estable y cuando  $\phi < 0$  se dice que la columna es inestable.

El uso de la energía potencial de la columna de agua tiene ventajas: se puede modelar directamente desde las entradas de energía, sin tener que modelar la estructura vertical, es fácil de medir y la comparación con otros modelos es sencilla y el término  $\bar{\rho}$  está relacionado con el contenido de calor (o contenido de sal) de la columna de agua.

El modelo se basa en las ecuaciones de conservación de calor y de sal, bajo la suposición de que es posible considerar la capa superior del océano como estadísticamente homogénea a lo largo de la horizontal. Si la distribución de la densidad es controlada por la temperatura y salinidad, es deseable expresar  $\phi$  en estos términos. Donde el cambio local de la densidad ( $\text{kg/m}^3\text{s}$ ) se expresa como:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\rho_o \alpha \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_o \beta \frac{\partial S}{\partial t} \quad (6)$$

donde  $\alpha$  ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ) es el coeficiente de expansión térmica y se estima de acuerdo a la siguiente relación:  $\alpha = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial T}$  y  $\beta$  ( $\text{ups}^{-1}$ ) es el coeficiente de contracción salina y se calcula como:  $\beta = \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial S}$ . Como ya se mencionó anteriormente el modelo se basa en las ecuaciones de conservación de calor:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} (\overline{W'T'}) = \frac{1}{\rho_0 C_p} \frac{\partial I}{\partial z} \quad (7)$$

donde  $I = Q_s e^{\gamma z}$  es la fracción penetrativa de la radiación solar total,  $Q_s$  es la parte que llega a la superficie del agua y que decae exponencialmente en función de la profundidad ( $z$ )  $\gamma$  es el coeficiente de atenuación,  $\rho_0$  densidad de referencia,  $C_p = 1.0046(1 + 0.8375q_a)$  es el calor específico del aire a presión constante,  $q_a$  es la humedad específica del aire y  $\overline{W'T'}$  es el promedio vertical del flujo turbulento de la temperatura.

Y en la ecuación de conservación de sal:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} (\overline{W'S'}) = 0 \quad (8)$$

donde  $\overline{W'S'}$  es el promedio vertical del flujo turbulento de la salinidad.

La suposición de que la distribución vertical de la temperatura y salinidad es uniforme dentro de la columna de agua, permite integrar las ecuaciones de conservación de calor y la ecuación de conservación de sal desde el fondo de la capa de mezcla  $z=-h$  hasta la superficie  $z=0$ , dejando la evolución temporal en función de los flujos turbulentos a través de la superficie y el fondo:

$$\frac{\partial T_o}{\partial t} h + \overline{W'T'}_{z=0} - \overline{W'T'}_{z=-h} - \frac{Q_s}{\rho_0 C_p} (1 - e^{-\gamma h}) = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial S_o}{\partial t} h + \overline{W'S'}_{z=0} - \overline{W'S'}_{z=-h} = 0 \quad (10)$$

Los flujos turbulentos en la superficie pueden ser expresados en función de los flujos de calor a través de la superficie ( $W/m^2$ ), así para la temperatura:

$$\overline{W'T'}_{z=0} = -\frac{1}{\rho_o c_p} (Q_b + Q_e + Q_h) \quad (11)$$

mientras, para la salinidad, quedan expresadas en función de la precipitación (P) y evaporación (E) ( $kg/m^2s$ ) de la siguiente manera:

$$\overline{W'S'}_{z=0} = \frac{1}{\rho} (E - P) S_o \quad (12)$$

Donde  $Q_s$ ,  $Q_e$ ,  $Q_b$  y  $Q_h$  son los flujos de radiación de onda corta (radiación solar neta), radiación de onda larga, calor latente, los cuales se consideran negativos del mar a la atmosfera. Si se considera que no habrá incremento en el espesor de la capa mezclada, entonces  $h$  permanece constante, las condiciones del flujo turbulento en el fondo de la capa son cero, es decir la ecuación del flujo turbulento a través de la superficie y el fondo (ecuación 9 y 10) se reducen a :

$$\frac{\partial T_o}{\partial t} h + \frac{1}{\rho_o c_p} (Q_b + Q_e + Q_h) - \frac{Q_s}{\rho_o c_p} (1 - e^{-\gamma h}) = 0 \quad (13)$$

$$\frac{\partial S_o}{\partial t} h + \frac{1}{\rho_o} (E - P) S_o = 0 \quad (14)$$

La anomalía de energía potencial de una columna de agua tiende a ser incrementada por el flujo superficial de calor y a disminuir por la mezcla vertical proveniente de la fricción de la marea en el fondo y por el esfuerzo del viento sobre la superficie, estos procesos locales son importantes. El balance total de energía potencial puede ser representado de la siguiente manera:

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{g\alpha}{2c_p} Q_f - \varepsilon C_D \rho \langle U \rangle^3 - \delta \gamma C_D \rho_a \langle W \rangle^3 \quad (15)$$

lo cual, permite estudiar la importancia relativa de los procesos que causan la mezcla vertical que son el viento, corrientes de marea y enfriamiento superficial; estos procesos

son los que controlan la formación y desarrollo de la capa de mezcla. Entonces la evolución temporal de  $\phi$  es regulada por la ganancia de calor como agente estratificante y por la mezcla debida a la energía cinética turbulenta y a la convección.

El segundo término del lado derecho de la ecuación 15 se refiere a la mezcla por marea y será omitida en este trabajo por que solo se trabaja aproximadamente en los 100 m superiores del océano. La ecuación 15 se reduce a:

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{g\alpha}{2c_p} Q_f - \delta\gamma C_D \rho_a \langle W \rangle^3 \quad (16)$$

donde  $\gamma$  es la razón de corriente superficial inducida por el viento referida a la rapidez del viento medida a 10 m,  $\delta$  es la fracción de la energía de viento disponible para la mezcla (números de Richardson),  $\langle W \rangle^3$  es el cubo de la rapidez del viento y  $C_D$  es el coeficiente de arrastre superficial,  $Q_f$  es el flujo neto de calor a través de la superficie.

El primer término de la derecha en la ecuación 16 se conoce como agente estratificante ( $A_e$ ): si existe flotabilidad positiva la columna es estable y hay una disminución de la capa de mezcla por efecto de estratificación, por el contrario si el flujo neto de flotabilidad es negativo la estructura de densidad es inestable y produce mezcla por convección. Se emplea convección penetrativa para mezclar la capa superior con las subyacentes, hasta que la inestabilidad desaparece. El flujo neto de calor a través de la superficie (ganancia de calor y evaporación) esta dado por:

$$Q_f = Q_s + Q_b + Q_e + Q_h \quad (17)$$

En el Anexo se amplía la descripción de la forma cómo se han parametrizado los flujos de calor.

El segundo término de la ecuación (16) es la contribución de mezcla por viento, donde este término se obtuvo de la presión ejercida por el viento sobre la superficie, y es usualmente parametrizado en términos de la velocidad del viento a una determinada altura de 10 m ( $W$ ):

$$E_v = \delta\gamma C_{10} \rho_a \langle W \rangle^3 \quad (18)$$

Se calcula la energía potencial de la columna de agua y la fracción de energía cinética turbulenta del viento disponible para mezcla. Las condiciones de intercambio turbulento en la superficie son: la radiación que llega a la superficie del océano se reparte en toda la columna y el flujo turbulento en el fondo de la capa es cero.

El perfil inicial de densidad (Ecuación (4)) es modificado en cada paso de tiempo por las siguientes condiciones:

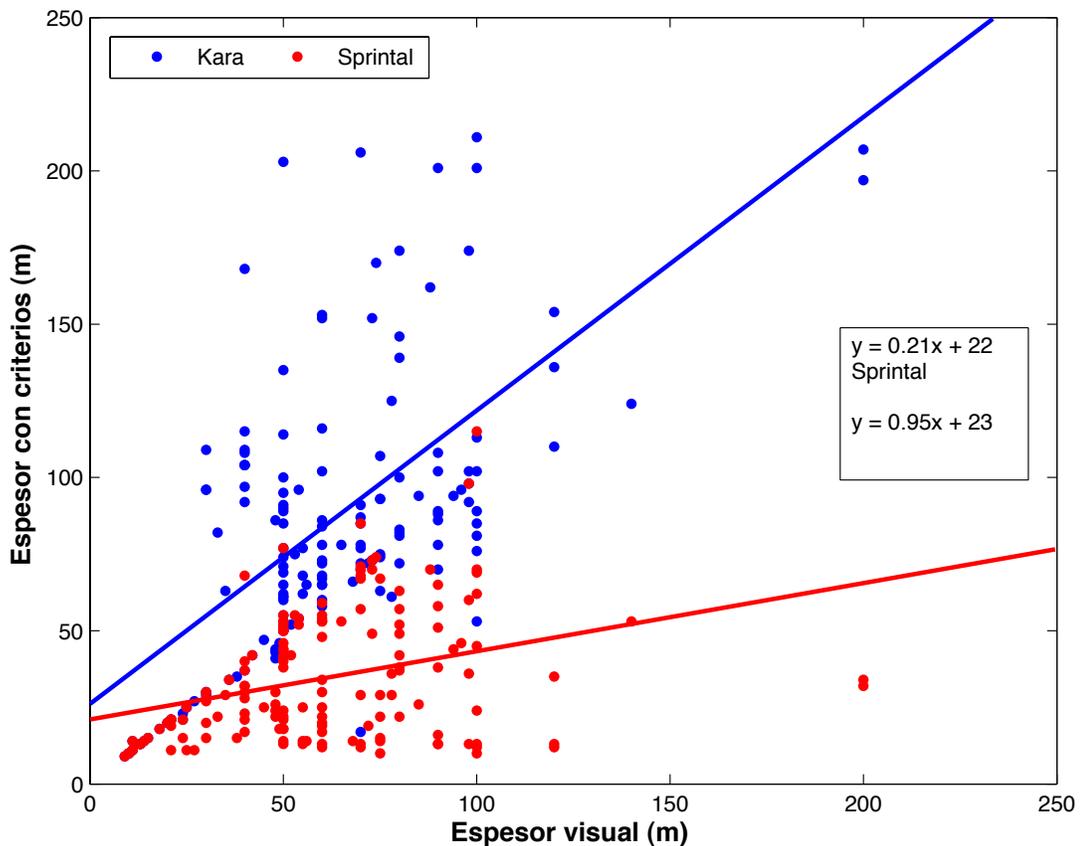
Ganancia de calor y evaporación: donde el flujo de calor es calculado en cada paso de tiempo usando los datos atmosféricos y la temperatura superficial que se encuentran a cada 6 horas. Si el flujo neto de flotabilidad es negativo (pérdida), entonces la estructura de densidad es inestable por mezcla convectiva y se emplea convección penetrativa para mezclar la capa superior con las siguientes capas, hasta que la inestabilidad desaparece y también se utiliza mezcla por viento.

Al final de cada paso se obtiene la temperatura, salinidad, el espesor de la capa mezclada superficial, la energía potencial y el contenido de calor de la columna de agua. El modelo inicia a partir de un perfil inicial de temperatura y salinidad del mes anterior al que se va analizar y con los datos meteorológicos de la región.

#### 4. Resultados

En este capítulo se muestran los resultados que se obtuvieron tras aplicar la metodología descrita en el capítulo 3.2. Para determinar el criterio que mejor estime el espesor de la capa de mezcla en el Golfo de California, se analizó la campaña oceanográfica 9501 usando la metodología propuesta por Martínez-Sepúlveda (1994) para determinar el espesor de forma visual en cada lance hidrográfico. Para esta misma campaña oceanográfica también se estimó la capa de mezcla usando los criterios de Kara *et al.* (2000) y Sprintall y Roemmich (1999) para determinar el espesor de la capa de mezcla (ver figura 3). Se hizo un ajuste lineal entre las estimaciones visuales y el criterio propuesto por Kara *et al.* (2000) obteniendo una pendiente de 0.95 y una ordenada al origen de 23 m. Se hizo el mismo ajuste para el criterio propuesto por Sprintall y Roemmich (1999) donde se obtuvo una pendiente muy pequeña (0.21).

Similarmente el coeficiente de correlación entre las series fue mayor para el criterio de Kara et al. (2000) que Sprintall y Roemmich (1999), con 0.64 y 0.30, respectivamente. Por lo que se considera que el criterio propuesto por Kara *et al.* (2000) se aplica mejor en el Golfo de California (figura 3). Una vez establecido el criterio, se obtuvieron los promedios mensuales del espesor de la capa mezclada (Tabla 3), de la temperatura promedio en la capa mezclada (Tabla 4) y de la salinidad promedio de la capa mezclada (Tabla 5) de las cinco zonas establecidas anteriormente. En la tabla 3 se puede observar que el crecimiento de la capa mezclada se inicia a finales del otoño, mientras que en primavera se observa un adelgazamiento de la capa mezclada.



**Figura 3. Comparación del espesor de la capa mezclada entre los criterios utilizados y el espesor de la capa mezclada obtenida visualmente.**

**Tabla 3. Promedios mensual  $\pm$  desviación estándar del espesor (m) de la capa de mezcla en cada zona. El número entre paréntesis son el número de perfiles hidrográficos usados en el promedio.**

Zonas	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1	78.20 $\pm 42.48$ (171)	54.98 $\pm 34.09$ (60)	33.88 $\pm 21.34$ (253)	28.60 $\pm 18.41$ (24)	17.80 $\pm 6.90$ (148)	15.99 $\pm 5.37$ (191)	16.17 $\pm 5.29$ (14)	19.09 $\pm 5.73$ (131)	24.61 $\pm 7.40$ (96)	28.15 $\pm 9.00$ (10)	42.14 $\pm 11.37$ (15)	50.84 $\pm 22.70$ (201)
2	88.53 $\pm 31.41$ (84)	94.93 $\pm 51.96$ (171)	49.26 $\pm 26.16$ (66)	29.73 $\pm 26.08$ (19)	29.33 $\pm 20.10$ (118)	18.71 $\pm 8.60$ (135)	21.07 $\pm 7.34$ (184)	20.66 $\pm 7.17$ (133)	21.67 $\pm 4.07$ (9)	28.23 $\pm 13.61$ (43)	32.60 $\pm 22.74$ (41)	48.19 $\pm 16.08$ (119)
3	59.75 $\pm 22.66$ (16)	45.14 $\pm 16.88$ (51)	29.52 $\pm 15.61$ (59)	23.54 $\pm 11.65$ (18)	14.95 $\pm 5.84$ (40)	15.06 $\pm 4.12$ (11)	14.10 $\pm 3.06$ (23)	18.40 $\pm 6.74$ (31)	13.67 $\pm 6.90$ (18)	22.31 $\pm 8.84$ (7)	27.70 $\pm 10.75$ (143)	32.81 $\pm 10.99$ (17)
4	46.58 $\pm 20.63$ (17)	37.12 $\pm 27.22$ (35)	31.87 $\pm 20.08$ (61)	22.09 $\pm 18.50$ (20)	13.96 $\pm 3.42$ (3)	13.27 $\pm 2.63$ (32)	17.77 $\pm 4.91$ (85)	17.44 $\pm 5.13$ (84)	14.68 $\pm 6.73$ (21)	35.39 $\pm 10.28$ (37)	36.46 $\pm 11.18$ (46)	--
5	44.74 $\pm 16.39$ (11)	30.18 $\pm 22.15$ (19)	27.72 $\pm 9.56$ (43)	20.33 $\pm 8.61$ (29)	13.35 $\pm 1.91$ (6)	14.65 $\pm 3.56$ (122)	14.14 $\pm 3.18$ (47)	17.16 $\pm 4.21$ (105)	16.76 $\pm 3.34$ (6)	28.56 $\pm 18.52$ (5)	29.06 $\pm 11.39$ (24)	32.97 $\pm 9.83$ (8)

**Tabla 4. Promedios mensual  $\pm$  desviación estándar de la temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) de la capa de mezcla en cada zona. El número entre paréntesis son el número de perfiles hidrográficos usados en el promedio.**

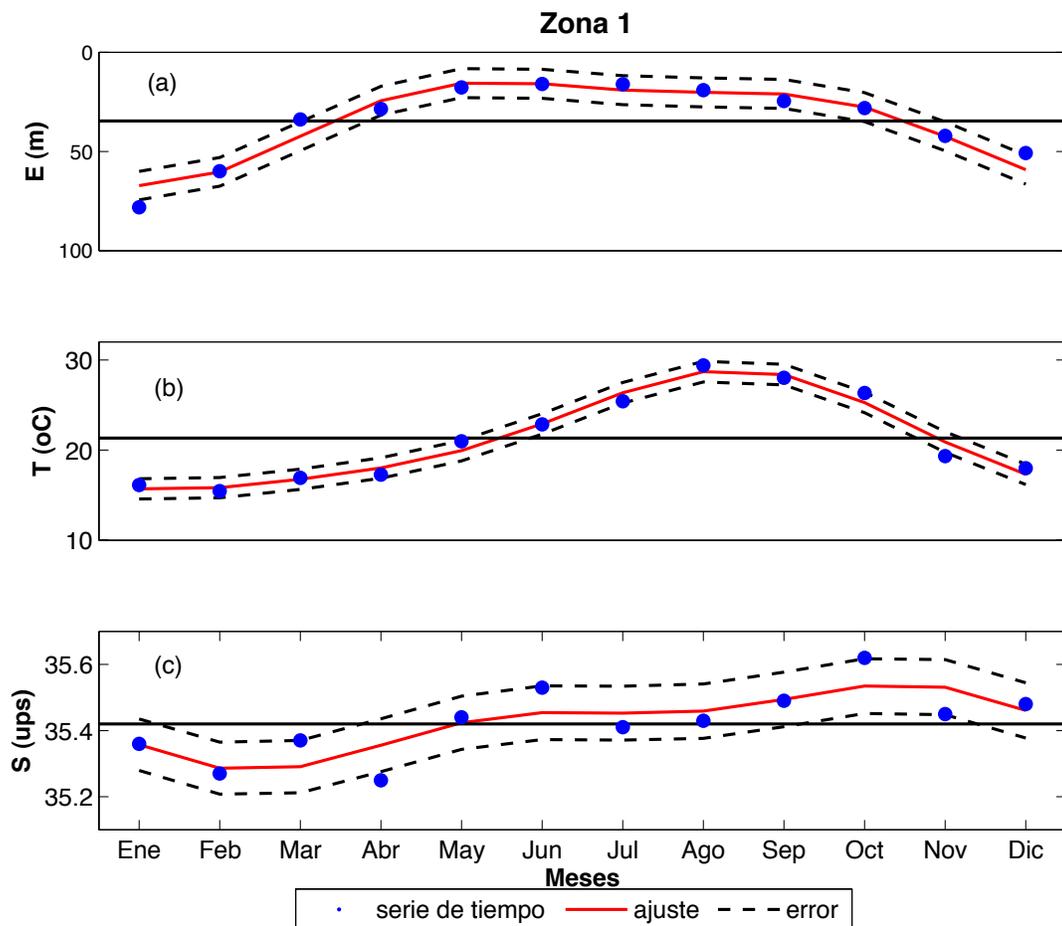
Zonas	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1	16.11 $\pm .49$ (171)	15.46 $\pm .95$ (60)	16.91 $\pm 1.12$ (253)	17.28 $\pm 1.88$ (24)	20.47 $\pm 1.33$ (148)	22.86 $\pm 1.22$ (191)	25.43 $\pm 1.44$ (14)	29.38 $\pm .80$ (131)	28.02 $\pm 1.07$ (96)	26.34 $\pm 1.12$ (10)	19.33 $\pm .79$ (15)	17.99 $\pm .97$ (201)
2	14.77 $\pm .55$ (84)	14.06 $\pm .85$ (171)	15.72 $\pm 1.79$ (66)	17.53 $\pm 2.68$ (19)	16.79 $\pm 2.43$ (118)	21.95 $\pm 2.60$ (135)	26.49 $\pm .82$ (184)	28.04 $\pm 1.41$ (133)	27.11 $\pm 1.21$ (9)	24.73 $\pm 1.70$ (43)	20.08 $\pm .15$ (41)	17.65 $\pm .91$ (119)
3	18.30 $\pm 2.70$ (16)	16.00 $\pm .56$ (51)	18.40 $\pm 2.26$ (59)	17.87 $\pm 1.92$ (18)	21.57 $\pm 2.05$ (40)	23.27 $\pm 1.88$ (11)	29.28 $\pm 1.14$ (23)	28.94 $\pm 1.26$ (31)	28.12 $\pm .71$ (18)	26.48 $\pm 2.45$ (7)	23.04 $\pm 1.80$ (143)	19.40 $\pm 1.03$ (17)
4	21.16 $\pm 2.01$ (17)	16.69 $\pm 1.33$ (35)	19.56 $\pm 2.70$ (61)	17.95 $\pm 1.76$ (20)	24.78 $\pm 1.31$ (3)	24.40 $\pm 1.62$ (32)	28.82 $\pm 1.30$ (85)	29.40 $\pm 1.20$ (84)	28.42 $\pm .86$ (21)	28.14 $\pm .54$ (37)	24.06 $\pm 2.28$ (46)	--
5	22.80 $\pm 1.09$ (11)	18.13 $\pm 2.49$ (19)	20.41 $\pm 2.58$ (43)	19.37 $\pm 1.72$ (29)	23.89 $\pm 1.25$ (6)	25.86 $\pm 1.86$ (122)	26.52 $\pm 2.46$ (47)	29.45 $\pm .97$ (105)	28.93 $\pm .57$ (6)	27.55 $\pm .86$ (5)	26.16 $\pm 1.13$ (24)	23.92 $\pm .48$ (8)

**Tabla 5. Promedios mensual  $\pm$  desviación estándar de la salinidad (ups) de la capa de mezcla en cada zona. El número entre paréntesis son el número de perfiles hidrográficos usados en el promedio.**

Zonas	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1	35.36 $\pm .15$ (171)	35.27 $\pm .23$ (60)	35.37 $\pm .15$ (253)	35.25 $\pm .20$ (24)	35.44 $\pm .14$ (148)	35.53 $\pm .26$ (191)	35.41 $\pm .05$ (14)	35.43 $\pm .16$ (131)	35.49 $\pm .14$ (96)	35.62 $\pm .08$ (10)	35.46 $\pm .09$ (15)	35.48 $\pm .29$ (201)
2	35.09 $\pm .07$ (84)	35.05 $\pm .08$ (171)	35.13 $\pm .15$ (66)	35.22 $\pm .26$ (19)	35.11 $\pm .11$ (118)	35.33 $\pm .17$ (135)	35.15 $\pm .09$ (184)	35.28 $\pm .12$ (133)	35.38 $\pm .10$ (9)	35.34 $\pm .17$ (43)	35.28 $\pm .15$ (41)	35.22 $\pm .10$ (119)
3	35.06 $\pm .19$ (16)	35.11 $\pm .05$ (51)	35.09 $\pm .14$ (59)	35.28 $\pm .07$ (18)	35.28 $\pm .09$ (40)	35.16 $\pm .14$ (11)	35.16 $\pm .09$ (23)	35.14 $\pm .30$ (31)	35.48 $\pm .11$ (18)	34.99 $\pm .18$ (7)	35.26 $\pm .09$ (143)	35.22 $\pm .07$ (17)
4	34.97 $\pm .25$ (17)	35.08 $\pm .41$ (35)	35.00 $\pm .20$ (61)	35.15 $\pm .19$ (20)	35.27 $\pm .02$ (3)	35.13 $\pm .16$ (32)	35.21 $\pm .22$ (85)	35.11 $\pm .14$ (84)	35.21 $\pm .25$ (21)	34.88 $\pm .11$ (37)	35.16 $\pm .17$ (46)	--
5	34.83 $\pm .18$ (11)	35.08 $\pm .11$ (19)	34.83 $\pm .29$ (43)	35.06 $\pm .27$ (29)	35.12 $\pm .07$ (6)	34.86 $\pm .27$ (122)	34.87 $\pm .27$ (47)	34.97 $\pm .17$ (107)	34.86 $\pm .29$ (6)	34.90 $\pm .34$ (5)	34.80 $\pm .18$ (24)	34.98 $\pm .08$ (8)

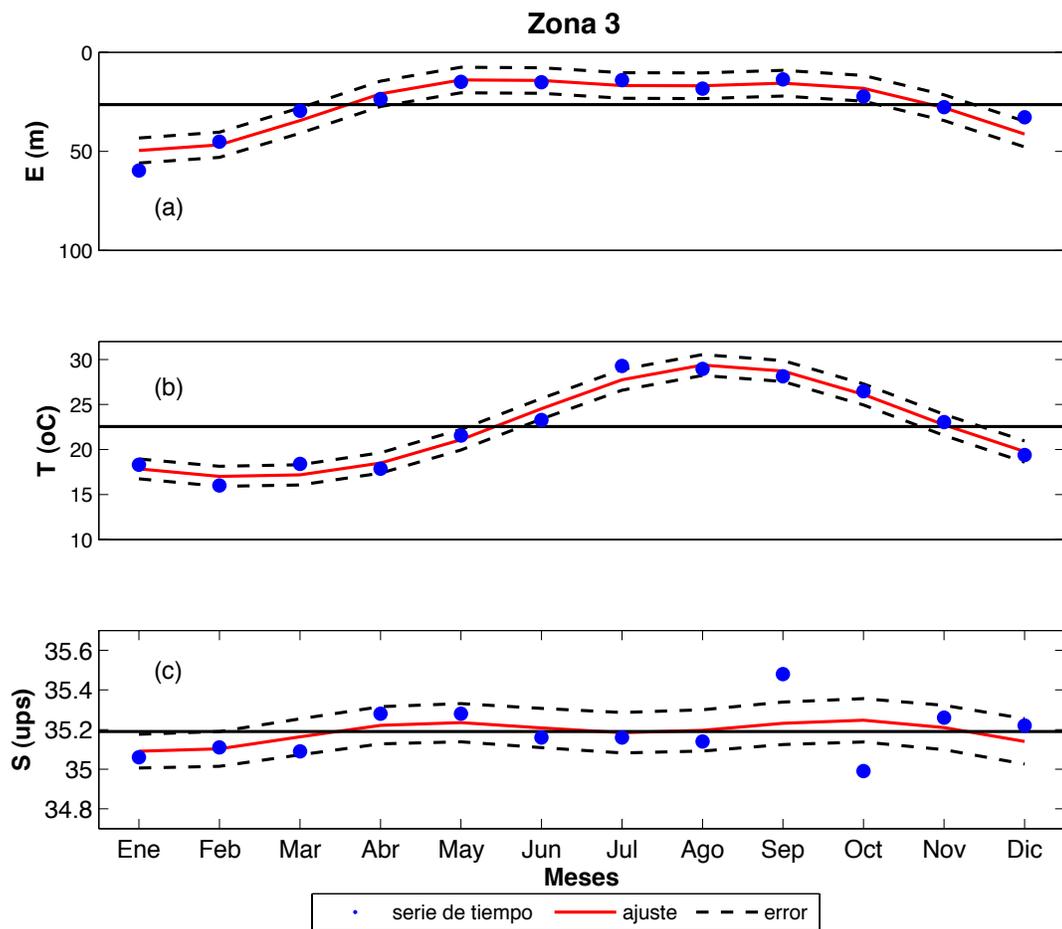
#### 4.1 Análisis armónico

Usando los valores promedios mensuales de cada variable (tabla 3, 4 y 5), se calculó el ajuste armónico por cuadrados mínimos para extraer la señal estacional (componente anual y semianual) y obtener la amplitud, fase y sus errores como se describen en Berón-Vera y Ripa (2002). En la figura 4, se muestran los resultados del ajuste en la zona 1 o Región Norte. El máximo espesor se presenta en enero y su mínimo espesor en junio. La máxima temperatura ocurre en agosto y la mínima en febrero. Por último, la salinidad máxima ocurre en octubre y la mínima en abril. También se pudo observar en esta zona que la amplitud anual es más importante para el espesor, temperatura y salinidad, y además la amplitud de la componente anual es mayor que la amplitud de la componente semianual (en la figura 8a, 8c y 8e).



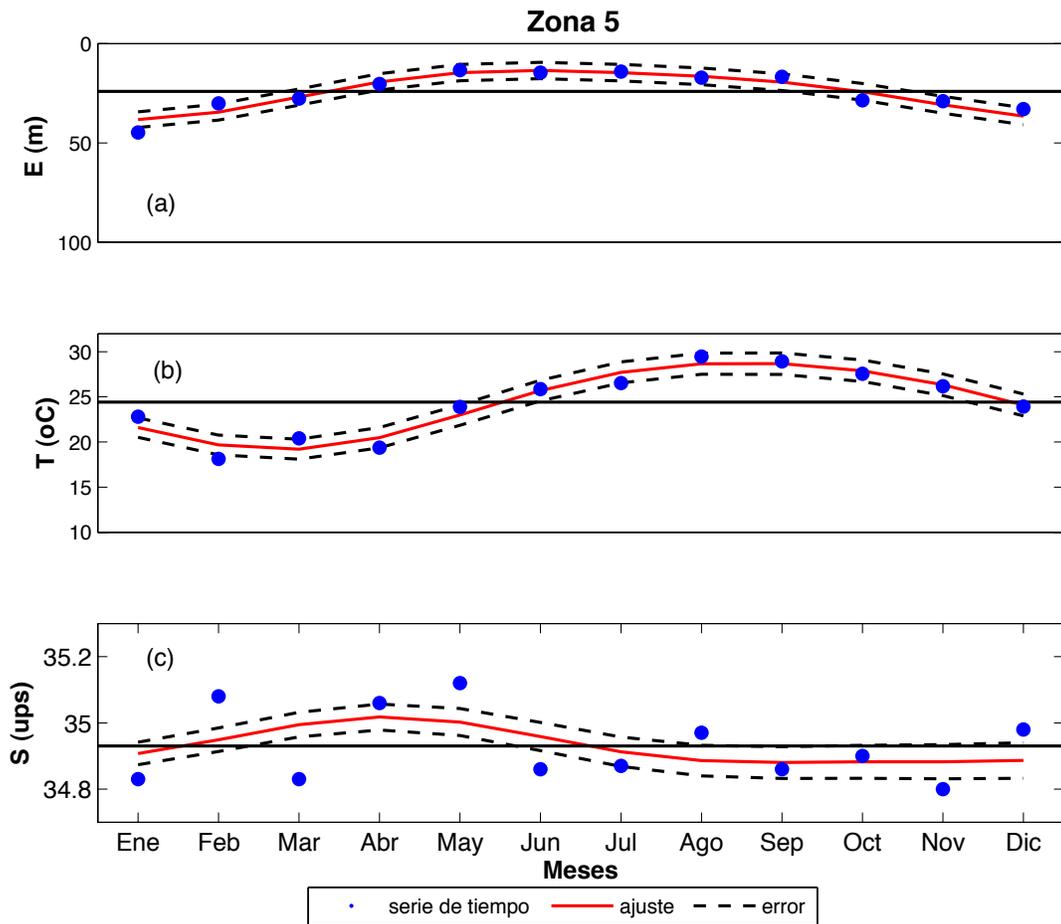
**Figura 4. Análisis armónico del a) espesor (m), b) temperatura (°C) y c) salinidad (ups) para la zona 1 (Región Norte). Se presenta la serie de tiempo, el ajuste y su error.**

La Cuenca de Guaymas se encuentra en la parte central del Golfo de California y ésta corresponde a la zona 3. En esta región se presentan surgencias costeras generadas por el viento y además hay evidencias de la formación de giros de mesoescala (Marinone y Lavín, 1997). En la figura 5 se observa que el máximo espesor ocurre en enero y el mínimo en julio. También se observa que la temperatura máxima se alcanza en agosto y la mínima en febrero. Mientras que en la salinidad ocurre la máxima en septiembre y la mínima en enero. Para esta región se presenta principalmente un comportamiento anual tanto en la temperatura como en el espesor de la capa de mezcla. Al contrario en la salinidad donde se tiene una importante semianualidad. De hecho ambas componentes, anual y semianual, tienen la misma amplitud (figura 8a, 8c y 8e).



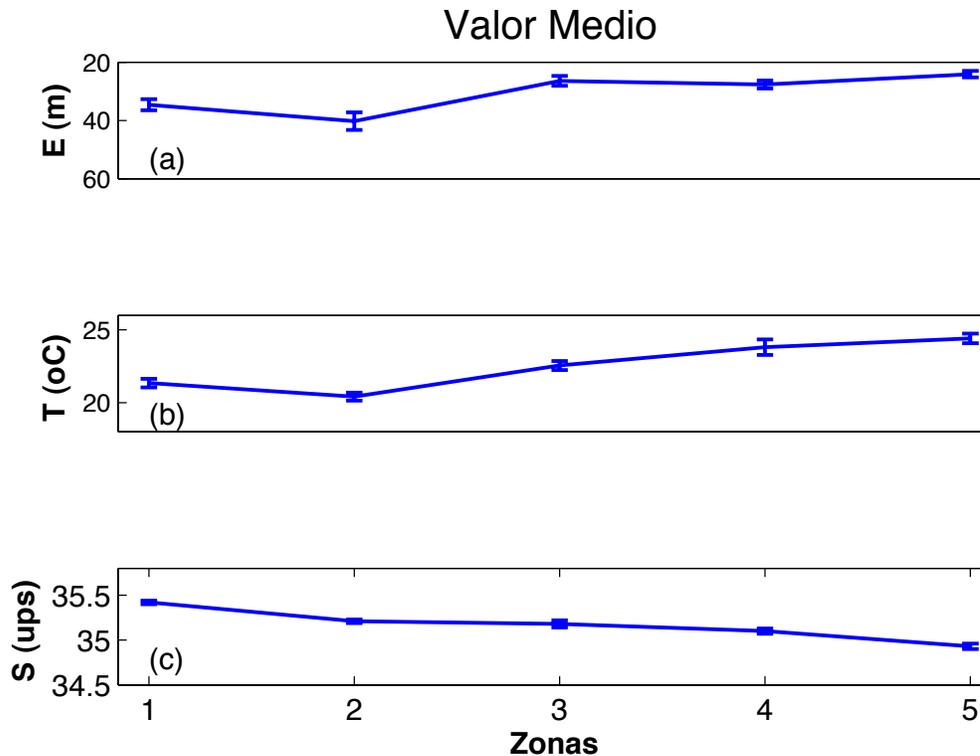
**Figura 5. Análisis armónico del a) espesor (m), b) temperatura (°C) y c) salinidad (ups) para la zona 3 (Cuenca Guaymas). Se presenta la serie de tiempo, el ajuste y su error.**

La región de la boca del Golfo corresponde a la Zona 5. Es una región con profundidades mayores a los 3000 metros. En la figura 6 se observa que el máximo espesor de la capa de mezcla se alcanza en enero y el mínimo en mayo. Mientras que en la temperatura, la máxima se alcanza en agosto y la mínima en febrero. Por último, la salinidad máxima se tiene en mayo y la mínima en enero. Para esta región, la componente anual domina la variabilidad tanto del espesor de la capa de mezcla, como de la temperatura y la salinidad.



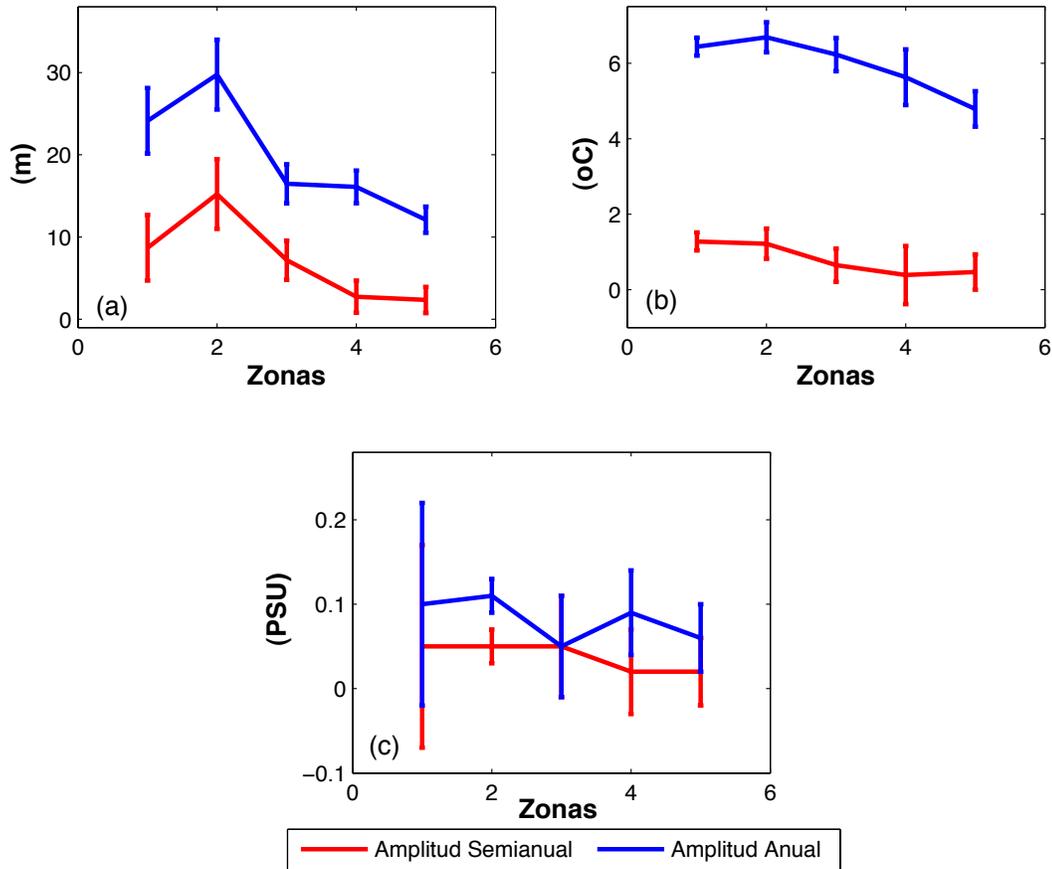
**Figura 6. Análisis armónico del a) espesor (m), b) temperatura (°C) y c) salinidad (ups) para la zona 5 (Cuenca Pescadero). Se presenta la serie de tiempo, el ajuste y su error.**

El comportamiento del valor medio anual de las 3 variables (espesor, temperatura y salinidad) para las diferentes zonas en el Golfo de California se muestra en la figura 7. Donde la mayor temperatura y menor espesor ocurren en la Cuenca Pescadero (Zona 5), ocurriendo lo opuesto en la Región de las Islas (Zona 2) donde se tienen las temperaturas más frías y el espesor mayor. La región que tiene la mayor salinidad es la Región Norte.



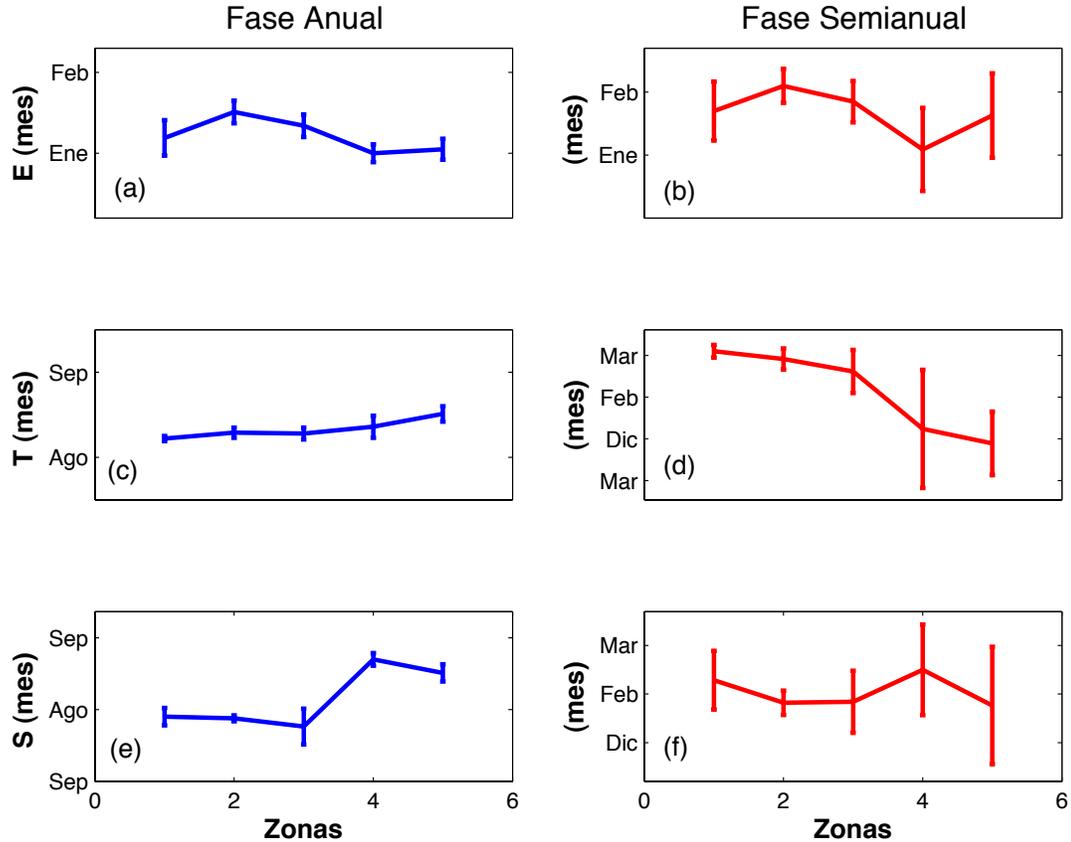
**Figura 7. El comportamiento de las variables del a) espesor (m), b) temperatura (°C) y c) salinidad (ups) promedio y su error de todas las zonas.**

Para las tres variables (espesor, temperatura y salinidad) la amplitud se incrementa de la boca a la cabeza pasando por un máximo en la zona de las islas para el espesor y temperatura como se puede observar en las figuras 8a y 8b. Para la salinidad también aumenta la amplitud de la boca a la cabeza, solo en la zona 3 tienen la misma amplitud las dos componentes (anual y semianual) de valor 0.05 ups. Los valores correspondientes a esta figura también se pueden ver en las tablas 1A, 2A y 3A que se encuentran en el Anexo.



**Figura 8. Amplitud de los armónicos anual y semianual del espesor (m), temperatura (°C) y salinidad (ups) promedio y su error de todas la zonas.**

La fase indica que el máximo valor de la componente anual del espesor ocurre en invierno y la semianual en verano/invierno (figura 9a y 9b), mientras que la fase de la componente anual en la temperatura indica que el máximo valor ocurre en verano y el máximo valor de la componente semianual ocurre en invierno/verano (figura 9c y 9d). Para la salinidad, la fase de la componente anual indica que sus máximos valores ocurren en primavera en la región de la boca; en el centro (zona 3) en verano y otoño en la cabeza, mientras el máximo de la componente semianual ocurre en otoño en todo el Golfo (figura 9e y 9f). Los valores correspondientes a la figura 9 también se pueden ver en las tablas 1A, 2A y 3A que se encuentran en el Anexo.



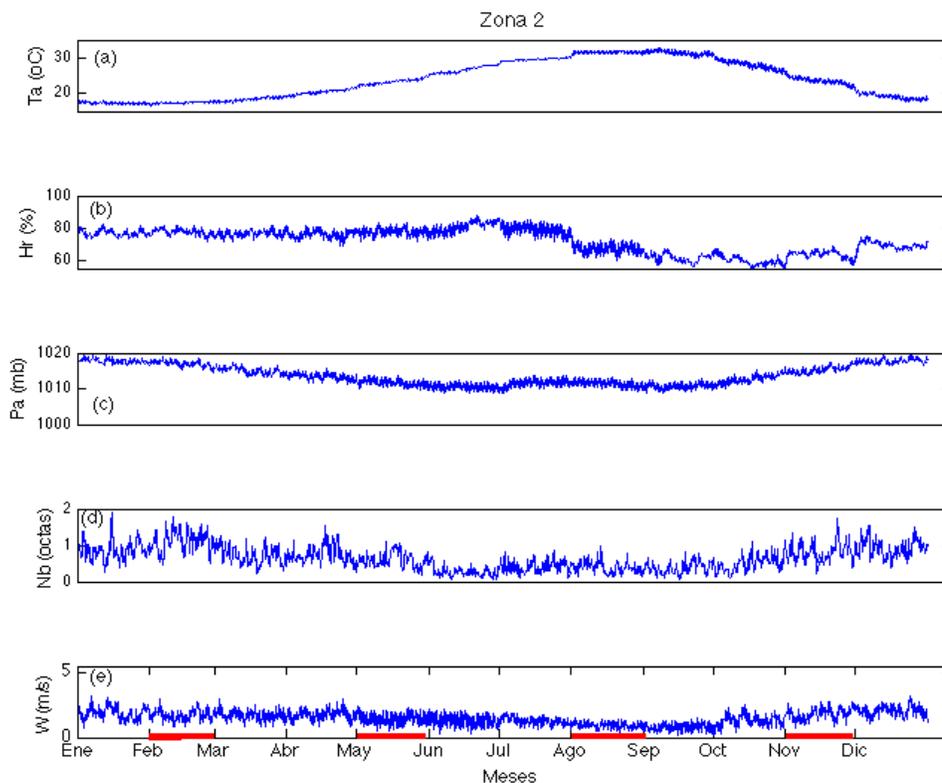
**Figura 9. Fase de los armónicos anual y semianual del espesor (m), temperatura (°C) y salinidad (ups) promedio y su error de todas la zonas.**

## 4.2 Modelo unidimensional

### 4.2.1 Variables meteorológicas

Usando la base de datos del *NARR* y *CCPM* se obtuvieron las variables atmosféricas (temperatura del aire, humedad relativa, presión atmosférica, nubosidad y la magnitud del viento) necesarias para forzar el modelo unidimensional y para calcular los flujos de calor a través de la superficie. Se presenta el año promedio para los datos cada 6 horas desde 1988 al 2010 para la zona 2 (figura 10) y para las diferentes zonas en las figuras 11, 16, 21 y 26. En la figura 10, se observa que la temperatura del aire varía de 16 °C en invierno a 32 °C en verano, mientras que la humedad relativa es mayor de enero a julio estando entre los 80 % de saturación y de agosto a septiembre disminuye a 65 %. La presión atmosférica es mayor en diciembre y enero con 1019 mb y la menor se presenta en junio. La nubosidad es mayor de diciembre a marzo y la menor se da en

junio. Por último, la mayor magnitud del viento se da de noviembre a enero alcanzando valores de 2.5 m/s, mientras que en agosto y septiembre se da la menor magnitud.

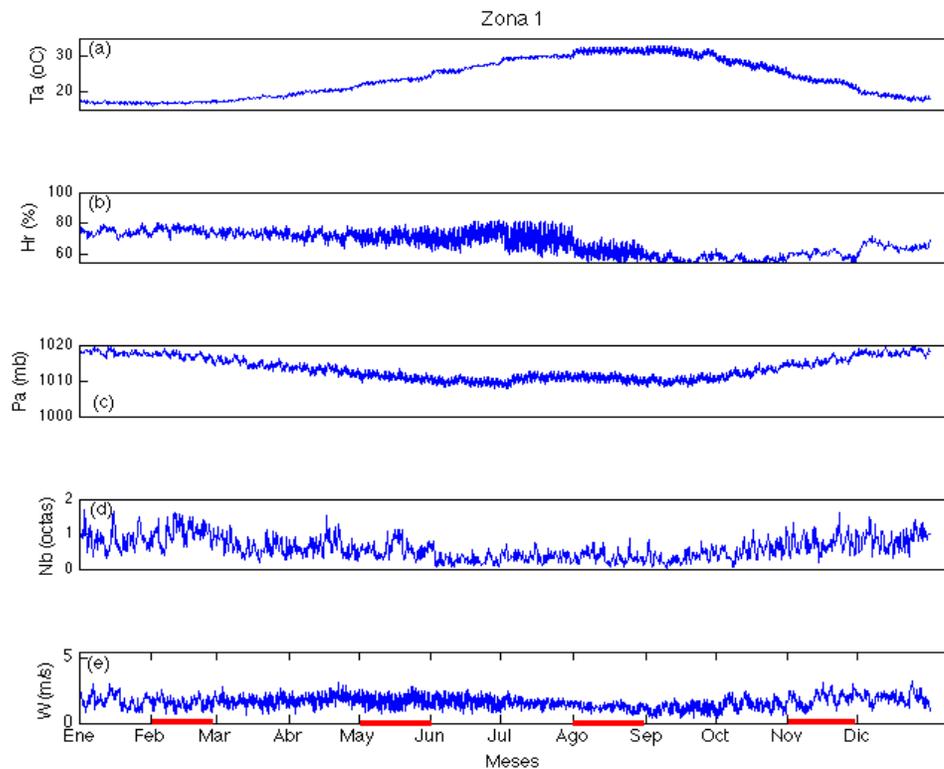


**Figura 10. Promedio cada 6 horas para los datos atmosféricos entre 1988 y 2010 en la zona 2: a) temperatura del aire ( $^{\circ}\text{C}$ ), b) humedad relativa (%), c) presión atmosférica (mb), d) nubosidad (octas) y e) viento (m/s).**

#### 4.2.1.1 Zona 1 o Región Norte

Las variables atmosféricas para esta zona se muestran en la figura 11. Donde la temperatura del aire es menor en enero y diciembre llegando a los  $19^{\circ}\text{C}$ , y en agosto y septiembre alcanza los  $32^{\circ}\text{C}$ . Mientras que la humedad relativa es mayor de enero a julio estando entre los 70 y 80 % de humedad y en octubre se da la menor humedad (60%). La presión atmosférica es mayor en enero y diciembre y es menor de junio a septiembre. La nubosidad es mayor en febrero (1.3 octa) y menor en junio (0.5 octa). La magnitud del viento es más fuerte en los meses de invierno (aprox 2.5 m/s) y es más débil en verano (0.5 m/s). Los meses que tienen una línea roja en las variables meteorológicas (Fig. 11), son los forzantes que se utilizaron en el modelo

unidimensional para obtener el comportamiento de la temperatura y salinidad de las figuras 12 y 13.



**Figura 11. Promedio cada 6 horas para los datos atmosféricos entre 1988 y 2010 en la zona 1: a) temperatura del aire ( $^{\circ}\text{C}$ ), b) humedad relativa (%), c) presión atmosférica (mb), d) nubosidad (octas) y e) viento (m/s).**

En la figura 12 se muestra el comportamiento de la temperatura para cada una de las estaciones del año, para invierno (a), primavera (b), verano (c) y otoño (d), los resultados fueron obtenidos del modelo unidimensional al igual que los mostrados en la figura 13 donde se muestra el comportamiento de la salinidad, el primer perfil de las figuras 12 y 13 es la condición inicial, son valores típicos de la región para el mes requerido de acuerdo a cada profundidad. Este perfil fue obtenido de los datos hidrográficos. Se observa que las mayores temperaturas de  $28^{\circ}\text{C}$  ocurren en verano y las menores en invierno con  $17^{\circ}\text{C}$ .

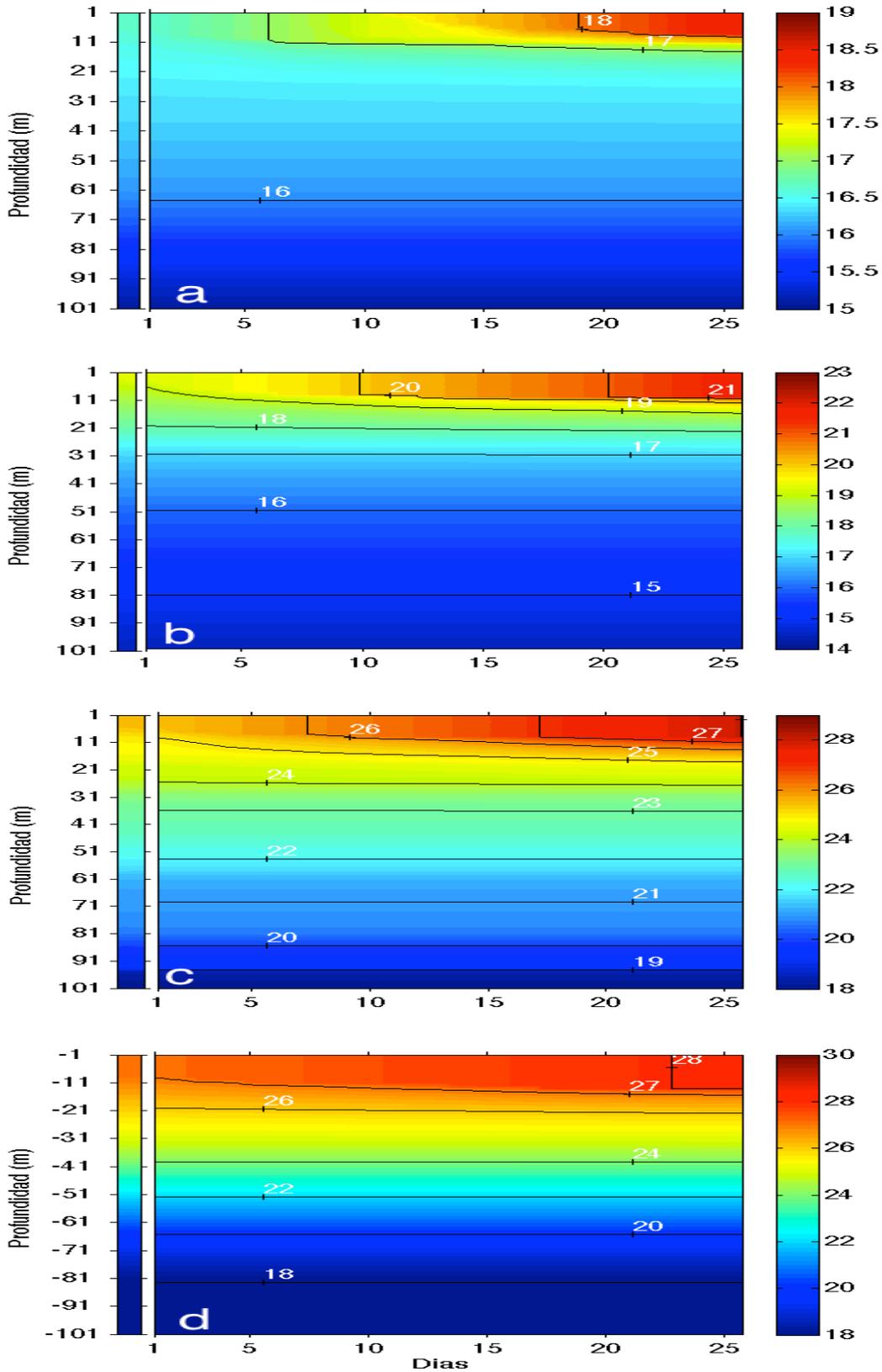


Figura 12. Resultados con el modelo unidimensional para la temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) en la capa mezclada de la zona 1 para el mes de: a) febrero (invierno), b) mayo (primavera), c) agosto (verano) y d) noviembre (otoño).

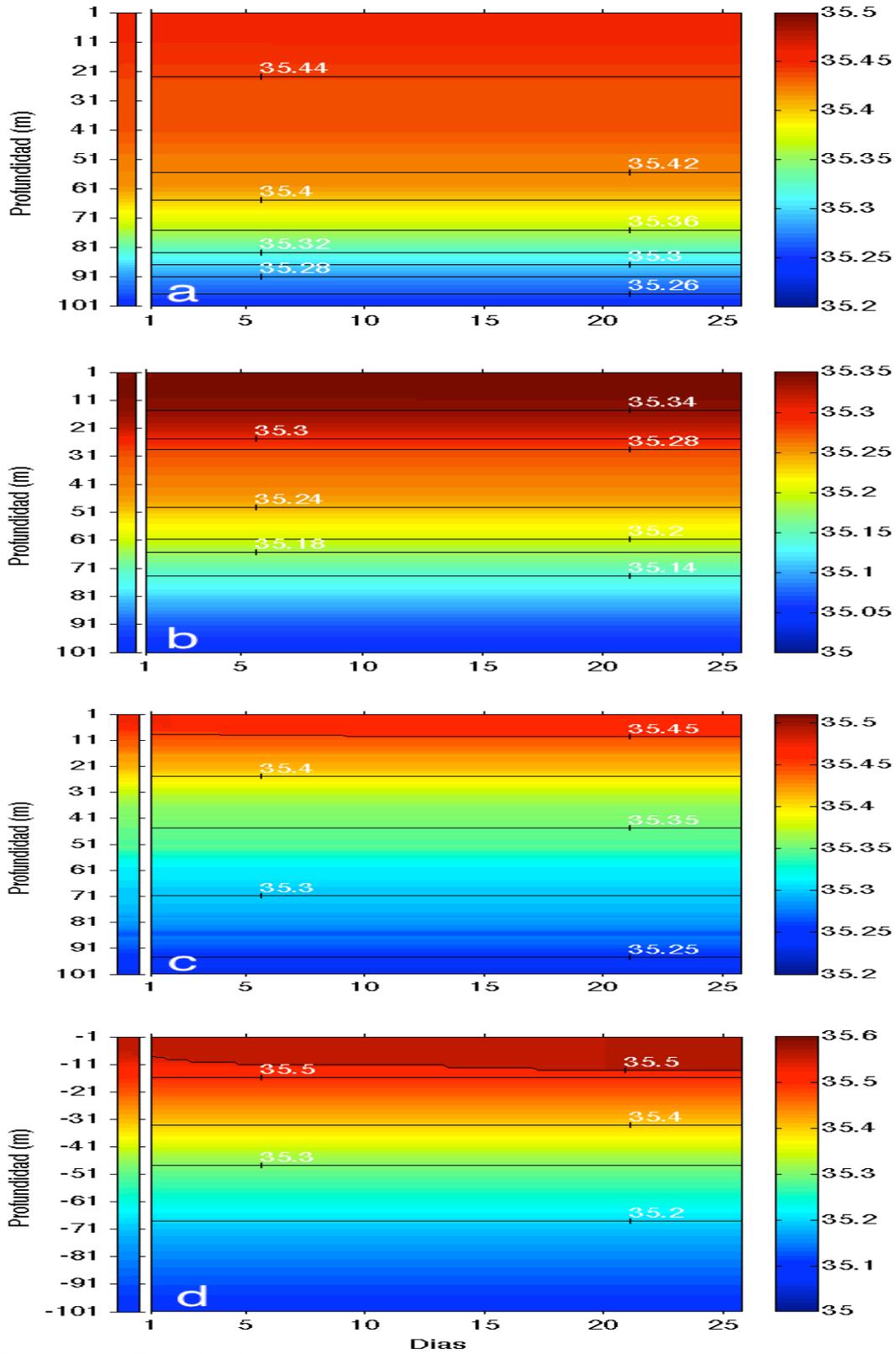
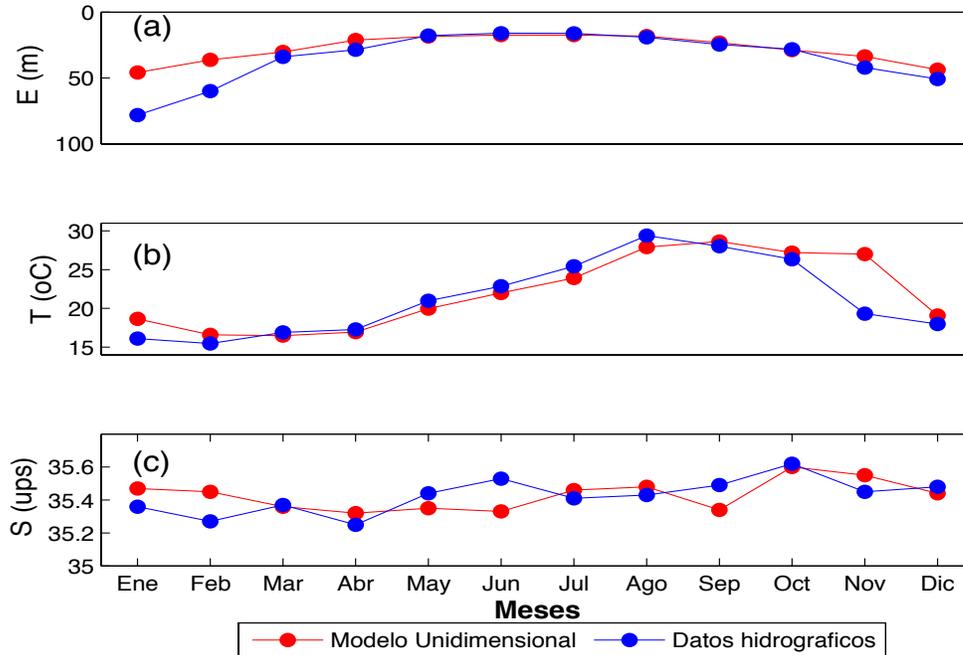


Figura 13. Resultados con el modelo unidimensional para la salinidad (ups) en la capa mezclada de la zona 1 para el mes de: a) febrero (invierno), b) mayo (primavera), c) agosto (verano) y d) noviembre(otoño).

Se hizo una comparación de los promedios mensuales de los datos hidrográficos del espesor (figura 14a), la temperatura (figura 14b) y la salinidad (figura 14c) contra los promedios mensuales obtenidos con el modelo unidimensional (tabla 6). Se encontró que a principios de otoño y durante primavera la capa mezclada tiene una diferencia de espesor aproximada de 1 m (esta diferencia es mayor en otoño), los meses que presentan una diferencia mayor de 18 m son enero y febrero, con un error estándar y máximo en enero, entre los datos hidrográficos y el modelo unidimensional de 3.09 m y 32m, respectivamente. Mientras en la temperatura de finales de invierno al inicio del otoño se tiene una diferencia de casi 1.5 °C (solo en noviembre esta diferencia es mayor de 8 °C), con un error estándar de 0.71 °C. Los valores calculados con el modelo durante los meses de invierno para la salinidad son más altos que los observados, y lo contrario ocurre durante el verano y el otoño (el error estándar es de 0.03 ups).

**Tabla 6. Promedio de espesor (m), temperatura (°C) y salinidad (ups) obtenidos con el modelo unidimensional para la zona 1, los números entre paréntesis son los resultados de los datos hidrográficos.**

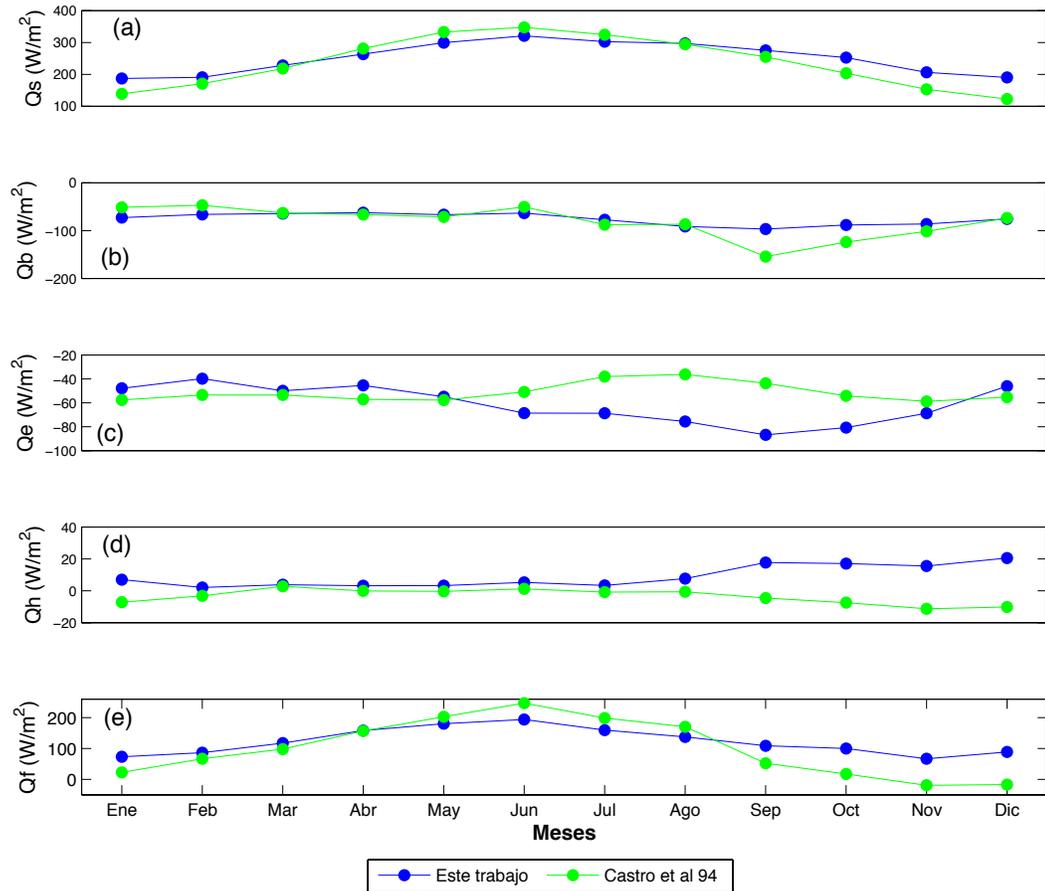
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
<b>Espesor (m)</b>	45.80 (78.20)	36.26 (54.98)	30.26 (33.88)	21.21 (28.60)	18.47 (17.80)	17.48 (15.99)	17.50 (16.17)	18.20 (19.09)	23.15 (24.61)	28.80 (28.15)	33.70 (42.14)	43.60 (50.84)
<b>Temperatura (°C)</b>	18.65 (16.11)	16.58 (15.46)	16.49 (16.91)	16.94 (17.28)	19.66 (20.97)	22.00 (22.86)	23.91 (25.43)	27.90 (29.38)	28.62 (28.02)	27.19 (26.34)	27.00 (19.33)	19.08 (17.99)
<b>Salinidad (ups)</b>	35.47 (35.36)	35.45 (35.27)	35.36 (35.37)	35.32 (35.25)	35.35 (35.44)	35.33 (35.53)	35.46 (35.41)	35.48 (35.43)	35.34 (35.49)	35.60 (35.62)	35.55 (35.46)	35.44 (35.48)



**Figura 14. Promedio del a) espesor (m), b) temperatura (°C) y c) salinidad (ups) obtenidos con el modelo unidimensional para la zona 1 comparados con los datos hidrográficos.**

El promedio mensual de los flujos de calor se muestra en la figura 15, donde consideramos el flujo entrante al océano como positivo, así el flujo de onda corta siempre es positivo, el flujo de onda larga y latente son negativos y el flujo de calor sensible puede ser positivo o negativo dependiendo de la diferencia de temperatura entre el aire y la superficie del mar. Estos cálculos fueron obtenidos con las fórmulas empíricas que se dan en el Anexo utilizando las variables meteorológicas de temperatura del aire, humedad relativa, presión atmosférica, nubosidad y el viento. Se encontró que el flujo de onda corta tiene el mismo comportamiento que lo reportado por Castro *et al.*, (1994), donde reportan que el flujo es mayor en junio con aproximadamente  $300 \text{ W/m}^2$  y menor en enero y diciembre con aproximadamente  $200 \text{ W/m}^2$ . El flujo de onda larga estimado en este trabajo es menor a finales de verano y durante el otoño a lo que fue reportado por Castro *et al.*, (1994). Al contrario en invierno donde son menores los valores de Castro *et al.*, (1994). Se tiene una mayor pérdida de calor latente de junio a octubre en este trabajo que en el de Castro *et al.*, (1994). El flujo de calor sensible estimado es mayor de agosto a enero con una diferencia de casi  $25 \text{ W/m}^2$ , de febrero a julio esta diferencia es de casi  $5 \text{ W/m}^2$  entre lo estimado y los

valores de Castro *et al.*, (1994). Por último, el flujo neto de calor es mayor con las estimaciones que se hicieron para este trabajo de finales de verano a invierno, ocurre lo opuesto de primavera a inicio de verano donde son mayores los valores de Castro *et al.*, (1994), no se encontró una pérdida del flujo neto de calor en ninguna de las épocas.

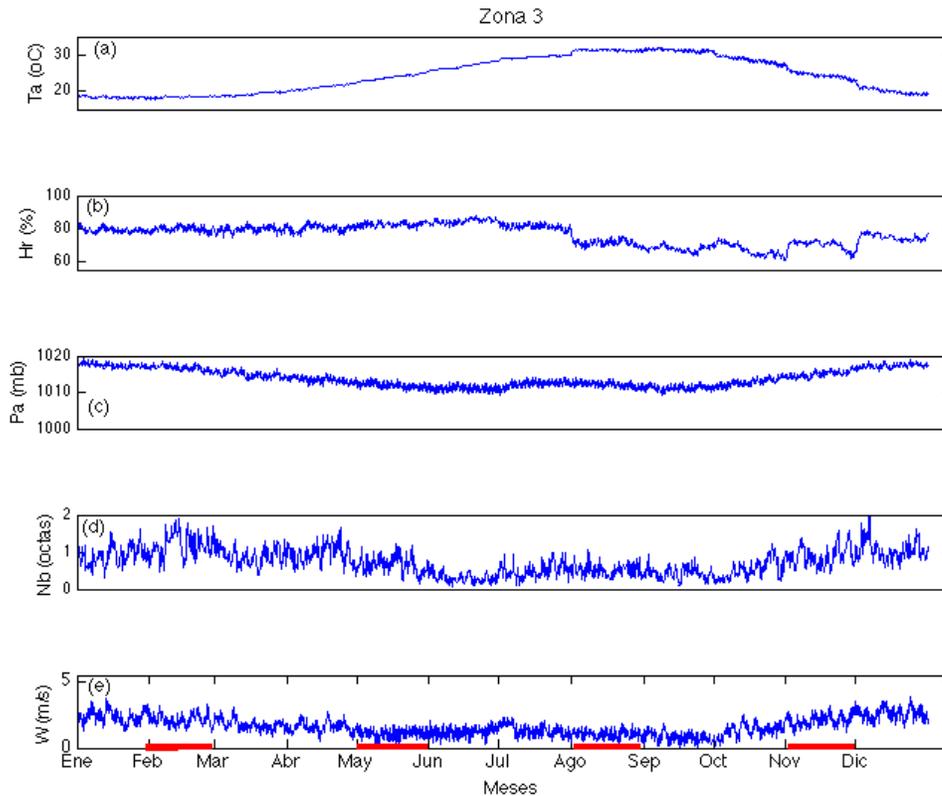


**Figura 15. Los flujos de: a) onda corta ( $Q_s$ ), b) onda larga ( $Q_b$ ), c) calor latente ( $Q_e$ ), d) calor sensible ( $Q_h$ ) y e) el flujo neto de calor a través de la superficie ( $Q_f$ ) para la zona 1 o Región Norte, estimaciones realizadas con datos del NARR y CCMP, además una comparación con Castro *et al.*, (1994).**

#### 4.2.1.2 Zona 3 o Cuenca Guaymas

En la figura 16 se muestra el comportamiento de las variables atmosféricas de la zona 3. Donde la temperatura del aire es menor en enero y diciembre con 20°C y mayor en agosto y septiembre con 31°C. La humedad relativa de enero a julio es mayor con 80% de humedad y menor en octubre alcanzando un 70%. La presión atmosférica en enero y diciembre es mayor con 1018 mb y es menor en junio con 1011 mb. La nubosidad es

mayor en febrero y diciembre donde se alcanzan 1.5 octas y menor en junio con 0.5 octas. La magnitud del viento es más fuerte en los meses de invierno (3 m/s) y es más débil en verano (0.4 m/s). Los meses que se indican con una línea roja (figura 15) se utilizaron para obtener el comportamiento de la temperatura y salinidad de las figuras 16 y 17 mediante el modelo unidimensional.



**Figura 16. Promedio cada 6 horas para los datos atmosféricos entre 1988 y 2010 en la zona 3: a) temperatura del aire ( $^{\circ}\text{C}$ ), b) humedad relativa (%), c) presión atmosférica (mb), d) nubosidad (octas) y e) viento (m/s).**

En las figuras 17 y 18 se muestra respectivamente el comportamiento de la temperatura y de la salinidad para cada una de las estaciones del año; para invierno (a), primavera (b), verano (c) y otoño (d), donde las temperaturas más altas ocurren en verano ( $32^{\circ}\text{C}$ ) y las más frías en invierno donde se alcanzan los  $20^{\circ}\text{C}$ .

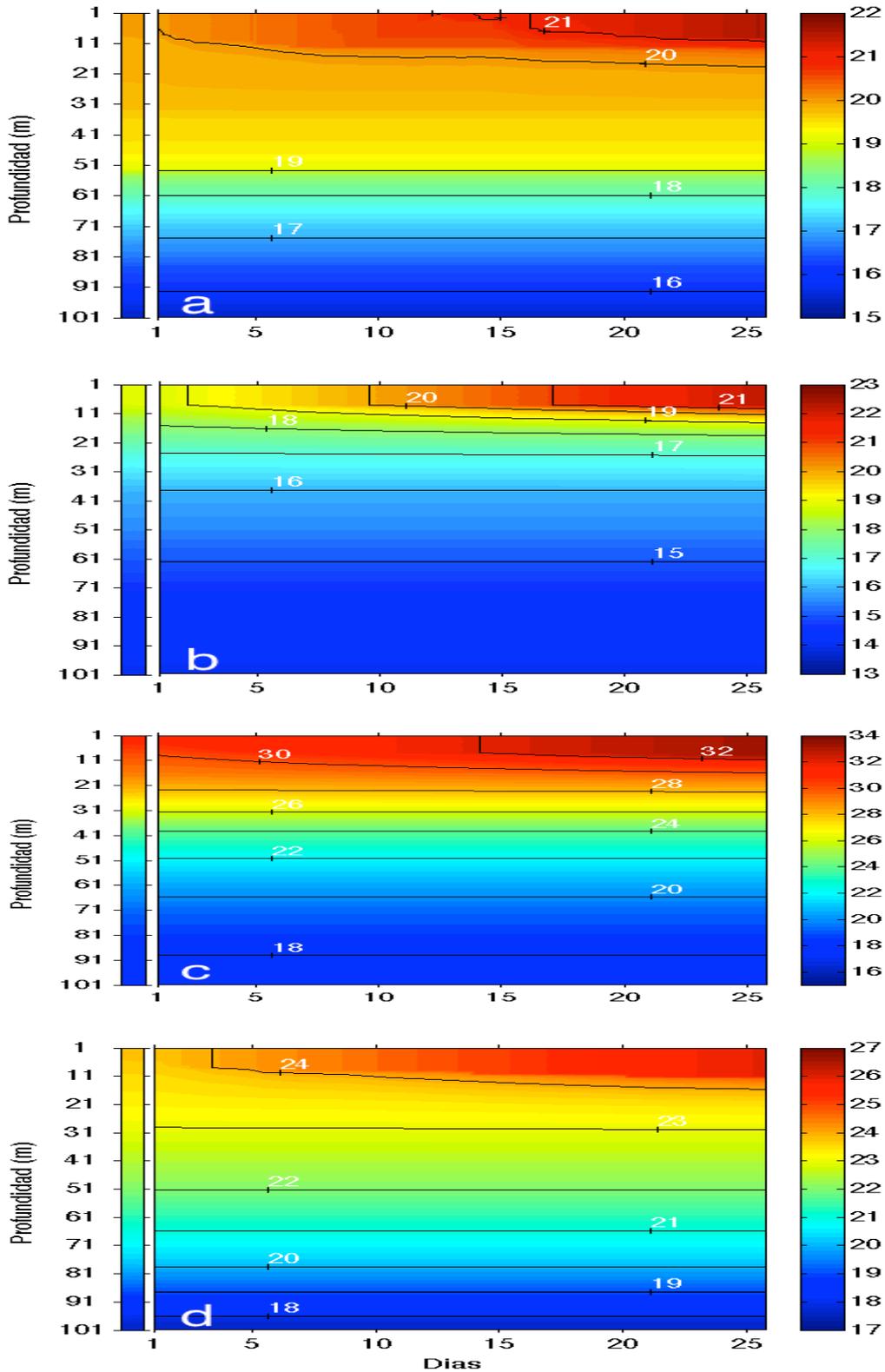


Figura 17. Resultados con el modelo unidimensional para la temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) en la capa mezclada de la zona 3 para el mes de: a) febrero (invierno), b) mayo (primavera), c) agosto (verano) y d) noviembre (otoño).

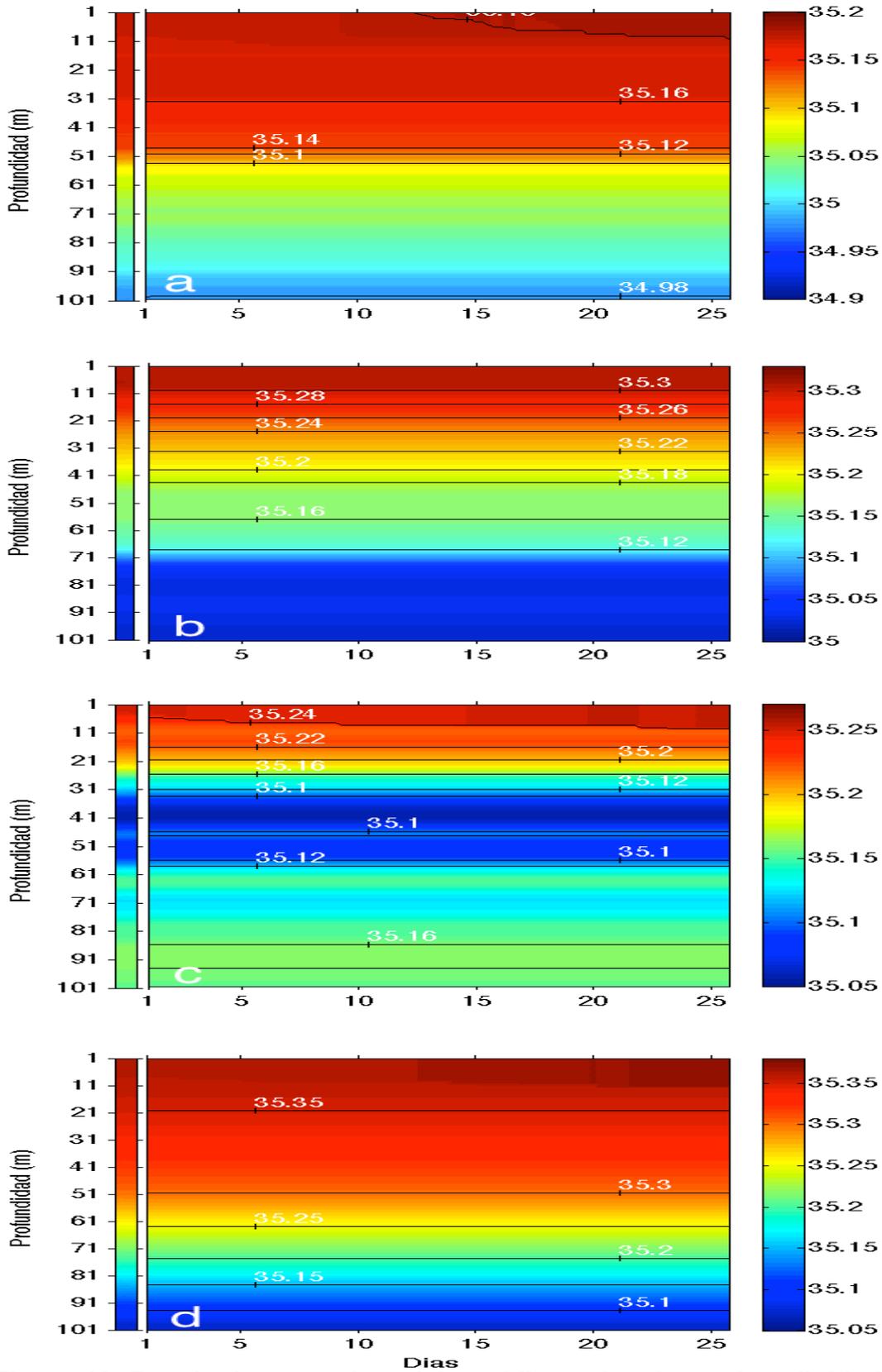
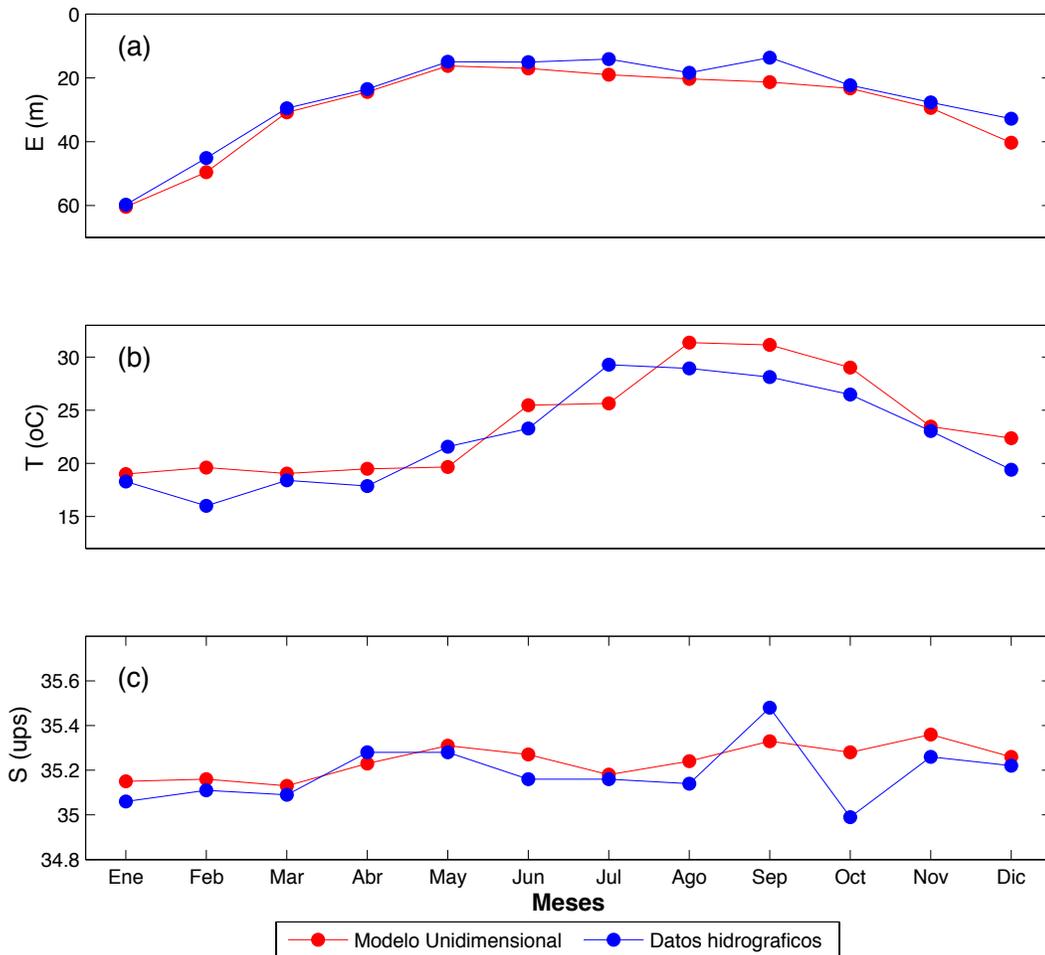


Figura 18. Resultados con el modelo unidimensional para la salinidad (ups) en la capa mezclada de la zona 3 para el mes de: a) febrero (invierno), b) mayo (primavera), c) agosto (verano) y d) octubre (otoño).

En la tabla 7 y figura 19 se muestra la comparación de los promedios mensuales entre los datos hidrográficos contra el modelo. Para el espesor de la capa de mezcla se tienen diferencias entre 2 y 5 m contra los datos hidrográficos. La temperatura obtenida con el modelo unidimensional es mayor en casi todo el año con una diferencia aproximada de 3°C. También con el modelo unidimensional se predice una mayor salinidad en casi todo el año. El error estándar entre el modelo unidimensional y los datos hidrográficos para el espesor es de 0.71 m, para la temperatura es de 0.72 °C y la salinidad es de 0.03 ups.

**Tabla 7. Promedio del espesor (m), temperatura (°C) y salinidad (ups) obtenidos con el modelo unidimensional para la zona 3. Los números entre paréntesis son los resultados de los datos hidrográficos.**

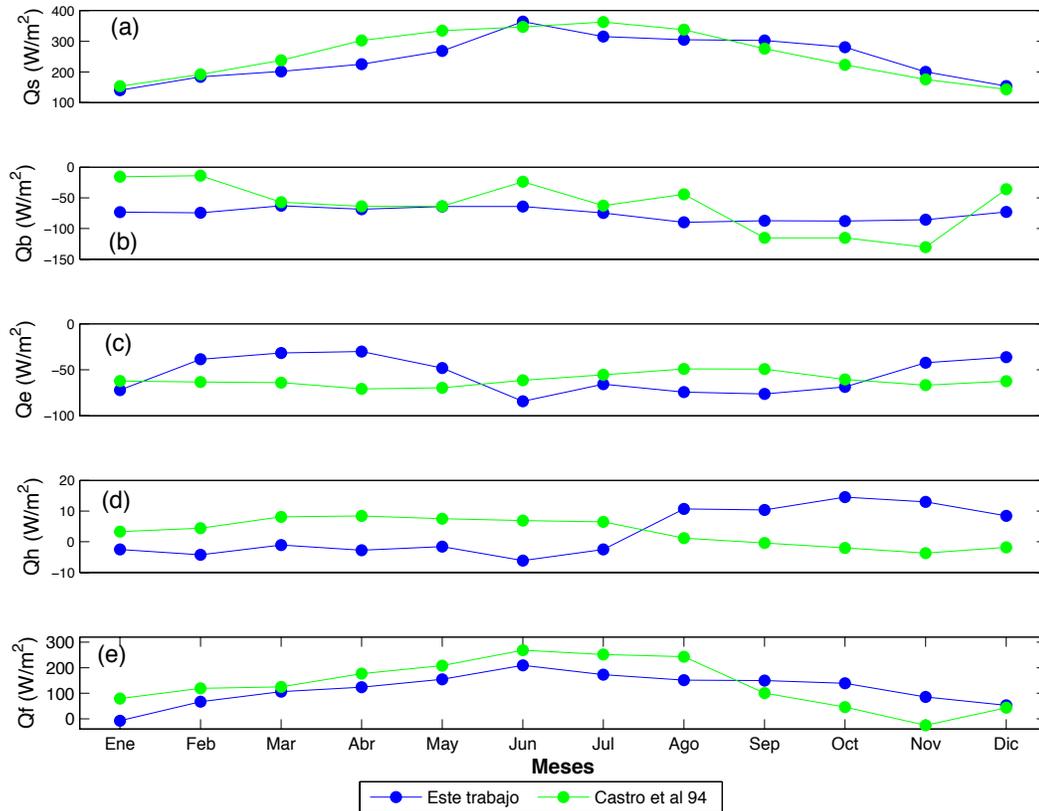
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
<b>Espesor (m)</b>	60.40 (59.75)	49.56 (45.14)	30.80 (29.52)	24.41 (23.54)	16.27 (14.95)	17.05 (15.06)	19.03 (14.10)	20.33 (18.40)	21.34 (13.67)	23.33 (22.31)	29.43 (27.70)	40.35 (32.81)
<b>Temperatura (°C)</b>	19.00 (18.30)	19.61 (16.00)	19.05 (18.40)	19.48 (17.87)	19.65 (21.57)	25.47 (23.27)	25.64 (29.28)	31.36 (28.94)	31.14 (28.12)	29.01 (26.48)	23.46 (23.04)	22.37 (19.40)
<b>Salinidad (ups)</b>	35.15 (35.06)	35.16 (35.11)	35.13 (35.09)	35.23 (35.28)	35.31 (35.28)	35.27 (35.16)	35.18 (35.16)	35.24 (35.14)	35.33 (35.48)	35.28 (34.99)	35.36 (35.26)	35.26 (35.28)



**Figura 19. Promedio de: a) espesor (m), b) temperatura (°C) y c) salinidad (ups) obtenidos con el modelo unidimensional (color rojo), y datos hidrográficos (azul) para la zona 3.**

El promedio mensual de los flujos de calor para la zona 3 se muestra en la figura 20. Se encontró que el flujo de onda corta tiene el mismo comportamiento que lo reportado por Castro *et al.*, (1994), donde reportan que el mayor flujo se tiene en junio aproximadamente de  $350 \text{ W/m}^2$  y menor en invierno con  $150 \text{ W/m}^2$ . Para el flujo de onda larga en la mayoría de los meses (enero, febrero, junio y de verano a otoño) se tiene una diferencia aproximadamente de  $60 \text{ W/m}^2$  entre lo estimado en este trabajo y lo reportado por Castro *et al.*, (1994) y de marzo a abril una diferencia menor de  $20 \text{ W/m}^2$ . Se tiene una mayor pérdida de calor latente de junio a septiembre en este trabajo que en el de Castro *et al.*, (1994), también difieren los valores reportados por Castro *et al.*, (1994); cuando se tiene un aumento en los valores reportados por Castro *et al.*, (1994), hay una disminución en los valores estimados en este trabajo. El flujo de calor sensible

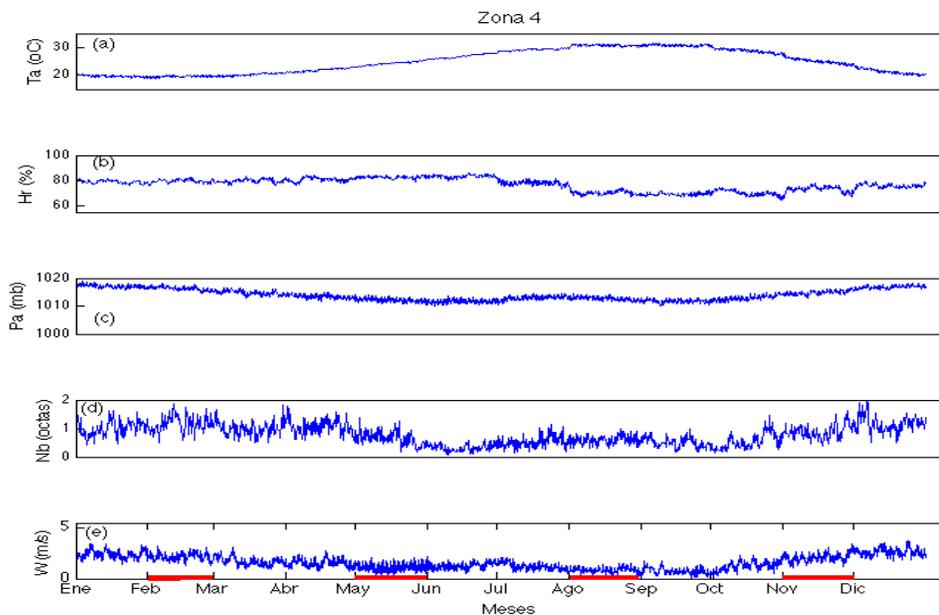
es mayor en Castro *et al.*, (1994) de enero a julio, con una diferencia de casi  $10 \text{ W/m}^2$ . De agosto a diciembre las estimaciones en este trabajo son mayores con una diferencia mayor a  $10 \text{ W/m}^2$ . Por último, el flujo neto de calor es más alto en las estimaciones que se hicieron en este trabajo de septiembre a diciembre, y de invierno a verano (enero a agosto) ocurre lo opuesto, los valores son más altos en Castro *et al.*, (1994).



**Figura 20.** Los flujos de: a) onda corta ( $Q_s$ ), b) onda larga ( $Q_b$ ), c) calor latente ( $Q_e$ ), d) calor sensible ( $Q_h$ ) y e) el flujo neto de calor a través de la superficie ( $Q_f$ ) para la zona 3 o Cuenca Guaymas, estimaciones realizadas con datos del NARR y CCMP, además una comparación con Castro *et al.*, (1994).

### 4.2.1.3 Zona 4 o Cuenca Farallón

En la Fig. 21 se muestra el comportamiento de las variables atmosféricas. La temperatura del aire es menor en enero y diciembre y en agosto y septiembre es mayor. La humedad relativa es mayor de enero a junio donde se alcanza el 80% de la humedad y es menor en agosto con un 70 % de humedad. La presión atmosférica en invierno es mayor y la menor presión es en junio. La nubosidad en febrero y diciembre es mayor y la menor nubosidad ocurre en junio. Por último, la magnitud del viento es mayor en los meses de invierno (alcanzando los 3.6 m/s) y más débil en verano (0.5 m/s). Los meses que se utilizaron para obtener las figuras del comportamiento de la temperatura y salinidad con el modelo unidimensional son los que se indican con una línea roja en la figura 21.



**Figura 21. Promedio cada 6 horas para los datos atmosféricos entre 1988 y 2010 en la zona 4: a) temperatura del aire ( $^{\circ}\text{C}$ ), b) humedad relativa (%), c) presión atmosférica (mb), d) nubosidad (octas) y e) viento (m/s).**

En la figura 22 se muestra el comportamiento de la temperatura para cada una de las estaciones del año al igual que para la salinidad en la figura 23, para invierno (a), primavera (b), verano (a) y otoño (d), las mayores temperaturas ocurren en verano donde se alcanza los  $29^{\circ}\text{C}$  y las más bajas en invierno con  $21^{\circ}\text{C}$ .

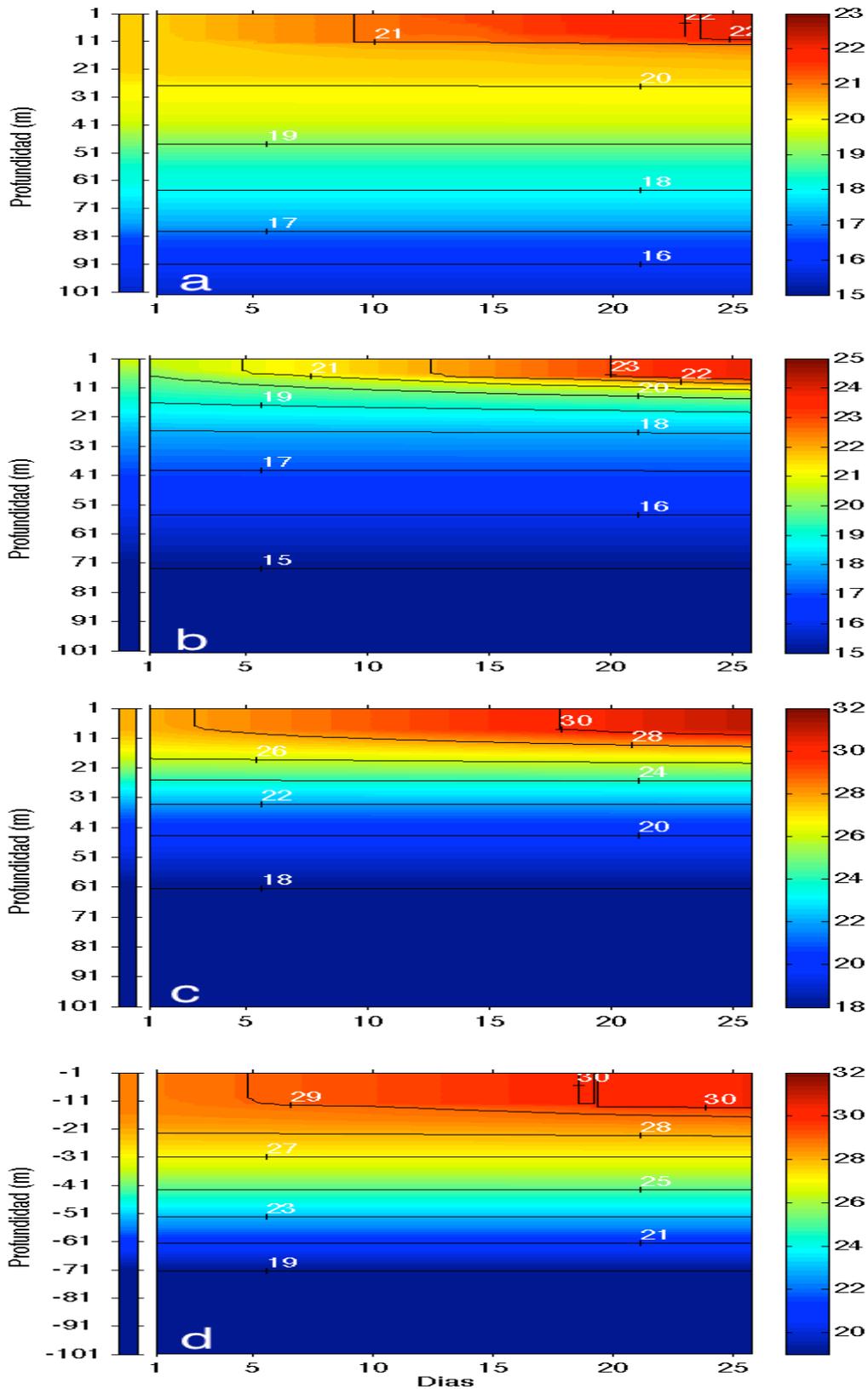


Figura 22. Resultados con el modelo unidimensional para la temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) en la capa mezclada de la zona 4 para el mes de: a) febrero (invierno), b) mayo (primavera), c) agosto (verano) y d) octubre (otoño). El intervalo de contornos en la figura (d) es de  $1^{\circ}\text{C}$  cerca de la superficie y de  $2^{\circ}\text{C}$  a mayor profundidad.

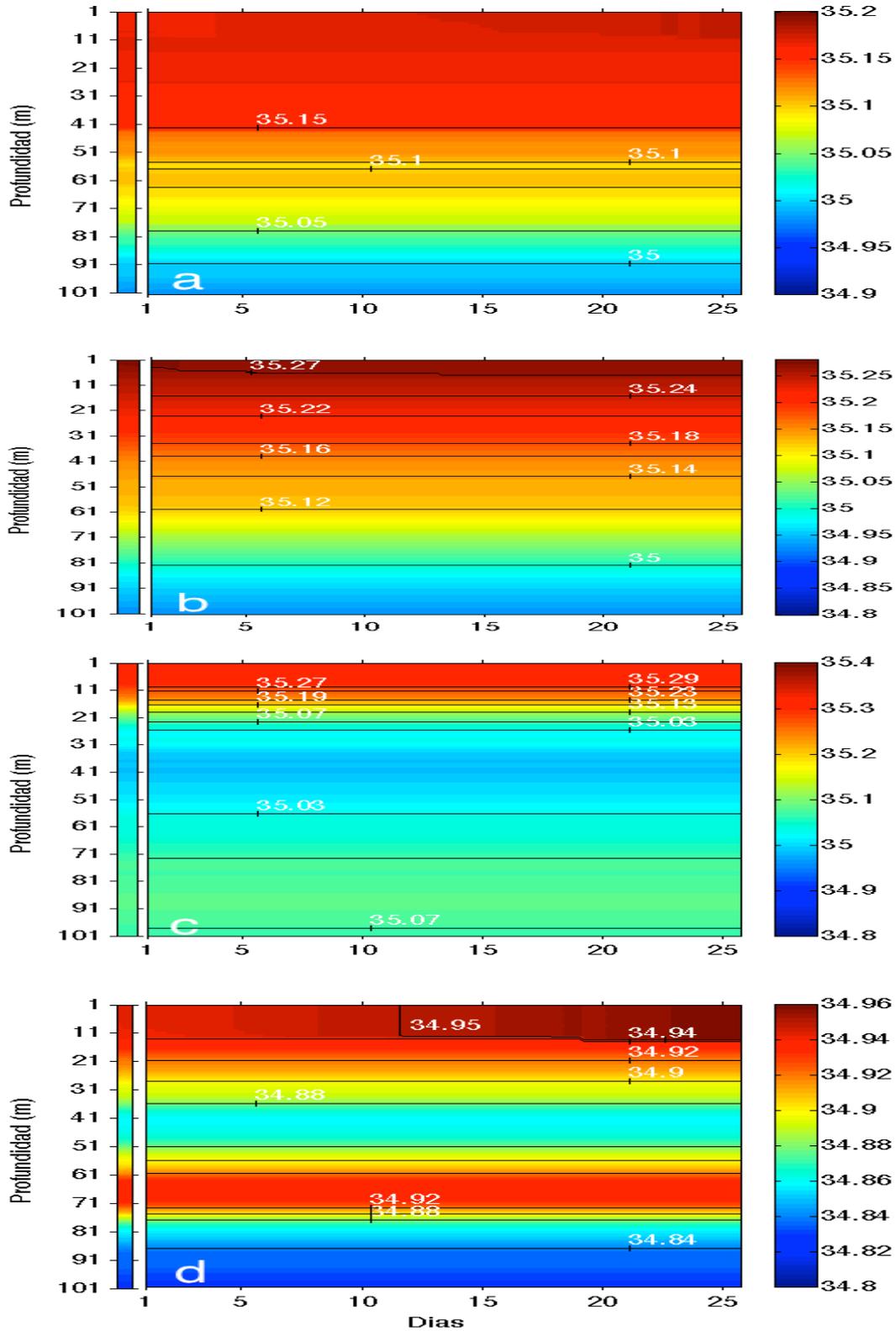
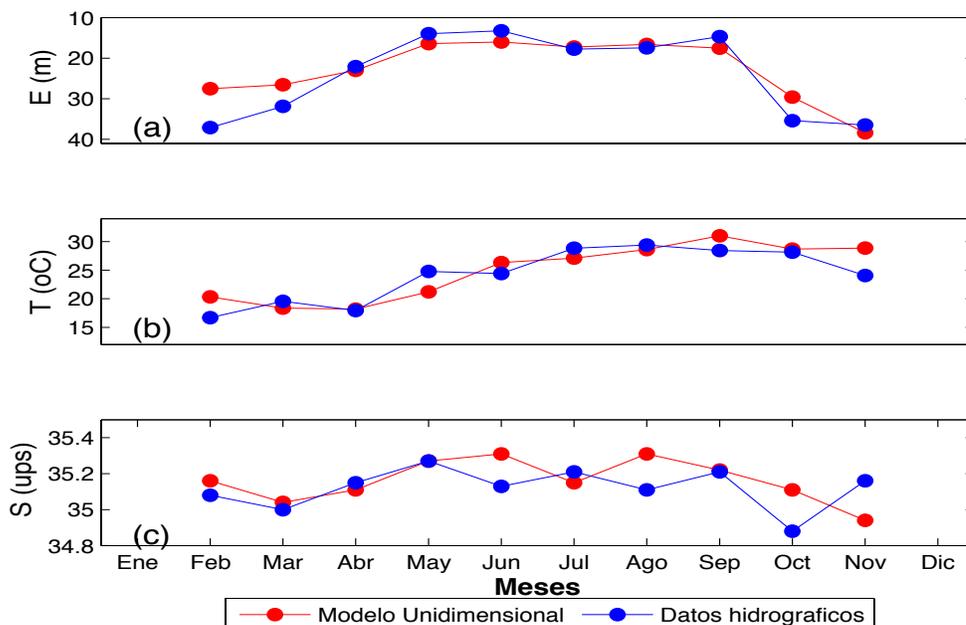


Figura 23. Resultados con el modelo unidimensional para la salinidad (ups) en la capa mezclada de la zona 4 para el mes de: a) febrero (invierno), b) mayo (primavera), c) agosto (verano) y d) octubre (otoño). El intervalo de contornos en la figura (d) es de 1°C cerca de la superficie y de 2°C a mayor profundidad.

En general, en la comparación de los promedios mensuales (figura 24 y tabla 8), del espesor, temperatura y salinidad, que fueron calculados con los datos hidrográficos y con el modelo unidimensional, se encontró que en el espesor de la capa mezclada hay una diferencia de casi 10 m a finales de invierno e inicio de primavera, disminuyendo hacia verano con una diferencia de casi 0.5 m. El error estándar entre los datos hidrográficos y el modelo es de 1.37 m. Para la temperatura, los valores son más altos con el modelo unidimensional en febrero, junio, septiembre y noviembre, con una diferencia de 3°C; y en marzo, abril, mayo, julio, agosto y octubre, los valores son más altos con los datos hidrográficos, con un error estándar de 0.82 °C. Por último, la salinidad en la mayoría de los meses (febrero, marzo, junio, agosto y octubre) es más alta con el modelo unidimensional, ocurriendo lo opuesto en abril, julio y noviembre donde la salinidad es más alta con los datos hidrográficos.

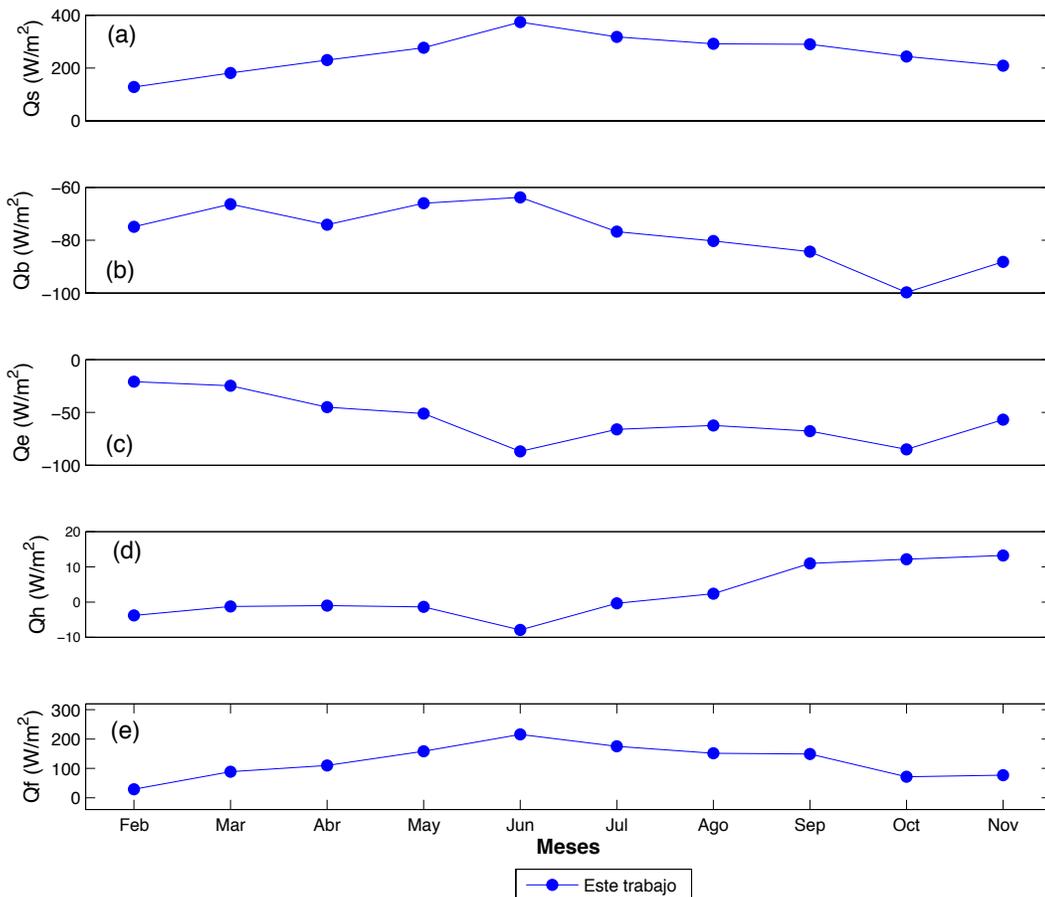
**Tabla 8. Promedio del espesor (m), temperatura (°C) y salinidad (ups) obtenidos con el modelo unidimensional para la zona 4, los números entre paréntesis son los resultados de los datos hidrográficos.**

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
<b>Espesor (m)</b>		27.50 (46.58)	26.55 (37.12)	23.00 (31.87)	16.43 (22.09)	16.03 (13.96)	17.27 (17.77)	16.63 (17.44)	17.52 (14.68)	29.60 (35.39)	38.39 (36.46)	--
<b>Temperatura (°C)</b>		20.32 (21.16)	18.36 (19.56)	18.20 (17.95)	21.19 (24.78)	26.32 (24.40)	27.10 (28.82)	28.61 (29.40)	31.00 (28.42)	28.68 (28.14)	28.86 (24.06)	--
<b>Salinidad (ups)</b>		35.16 (34.83)	35.04 (35.08)	35.11 (35.00)	35.27 (35.15)	35.31 (35.27)	35.15 (35.13)	35.31 (35.21)	35.22 (35.11)	35.11 (35.21)	34.94 (34.88)	--



**Figura 24. Promedio de: a) espesor (m), b) temperatura (°C) y c) salinidad (ups) obtenidos con el modelo unidimensional (color rojo), y datos hidrográficos (azul) para la zona 4.**

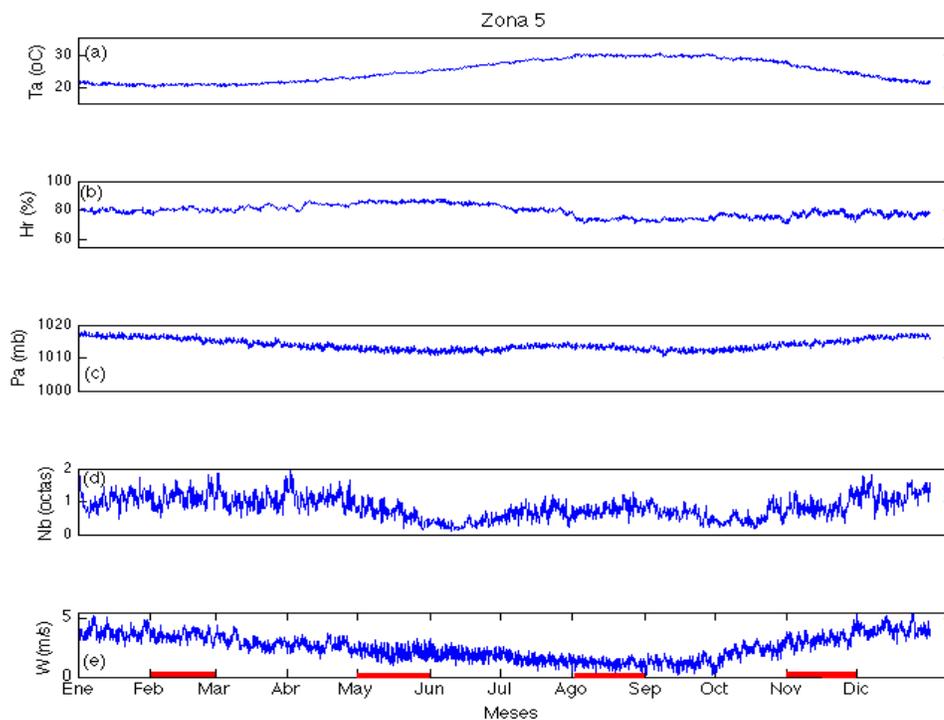
El promedio mensual de los flujos de calor para la zona 4 se muestra en la figura 25. Se encontró que el flujo de onda corta es menor en invierno con  $100 \text{ W/m}^2$  y el máximo en junio  $400 \text{ W/m}^2$ . El flujo de onda larga en junio alcanza los  $60 \text{ W/m}^2$  y en septiembre los  $100 \text{ W/m}^2$ . Se tiene en este trabajo mayor pérdida de calor latente de junio a octubre. El flujo de calor sensible aumenta de febrero a noviembre alcanzando el valor máximo en noviembre con  $13 \text{ W/m}^2$ . Por último, el flujo neto de calor calculado en este trabajo es menor en enero con aproximadamente  $30 \text{ W/m}^2$  y mayor en junio con  $230 \text{ W/m}^2$ .



**Figura 25.** Los flujos de: a) onda corta ( $Q_s$ ), b) onda larga ( $Q_b$ ), c) calor latente ( $Q_e$ ), d) calor sensible ( $Q_h$ ) y e) el flujo neto de calor a través de la superficie ( $Q_f$ ) para la zona 4 o Cuenca Farallón, estimaciones con datos del NARR y CCMP.

#### 4.2.1.4 Zona 5 o Cuenca Pescadero

El comportamiento de las variables atmosféricas se muestra en la figura 26. La temperatura del aire es menor en invierno ( $22^{\circ}\text{C}$ ) y es mayor en agosto y septiembre ( $30^{\circ}\text{C}$ ). La humedad relativa es mayor de mayo a junio donde se alcanza el 85 % de humedad y en agosto el 75 % de humedad. La presión atmosférica es mayor en enero y diciembre (1018 mb) y es menor en junio (1010 mb). La nubosidad es mayor de enero a abril y menor en junio. Por último, la magnitud del viento es mayor en los meses de invierno (5 m/s) y menor en otoño (1 m/s). Los meses que se utilizaron para forzar al modelo unidimensional y obtener las figuras del comportamiento de la temperatura y salinidad (figuras 27 y 28) son los que se indican con una línea roja en la figura 26.



**Figura 26. Promedio cada 6 horas para los datos atmosféricos entre 1988 y 2010 en la zona 5: a) temperatura del aire ( $^{\circ}\text{C}$ ), b) humedad relativa (%), c) presión atmosférica (mb), d) nubosidad (octas) y e) viento (m/s).**

En la figura 27 se muestra el comportamiento de la temperatura obtenida con el modelo unidimensional para cada una de las estaciones del año y para la salinidad en la figura 28, para invierno (a), primavera (b), verano (c) y otoño (d). Se observa que las mayores temperaturas ocurren en otoño donde se alcanzan los  $29^{\circ}\text{C}$  y las menores en invierno con  $23^{\circ}\text{C}$ .

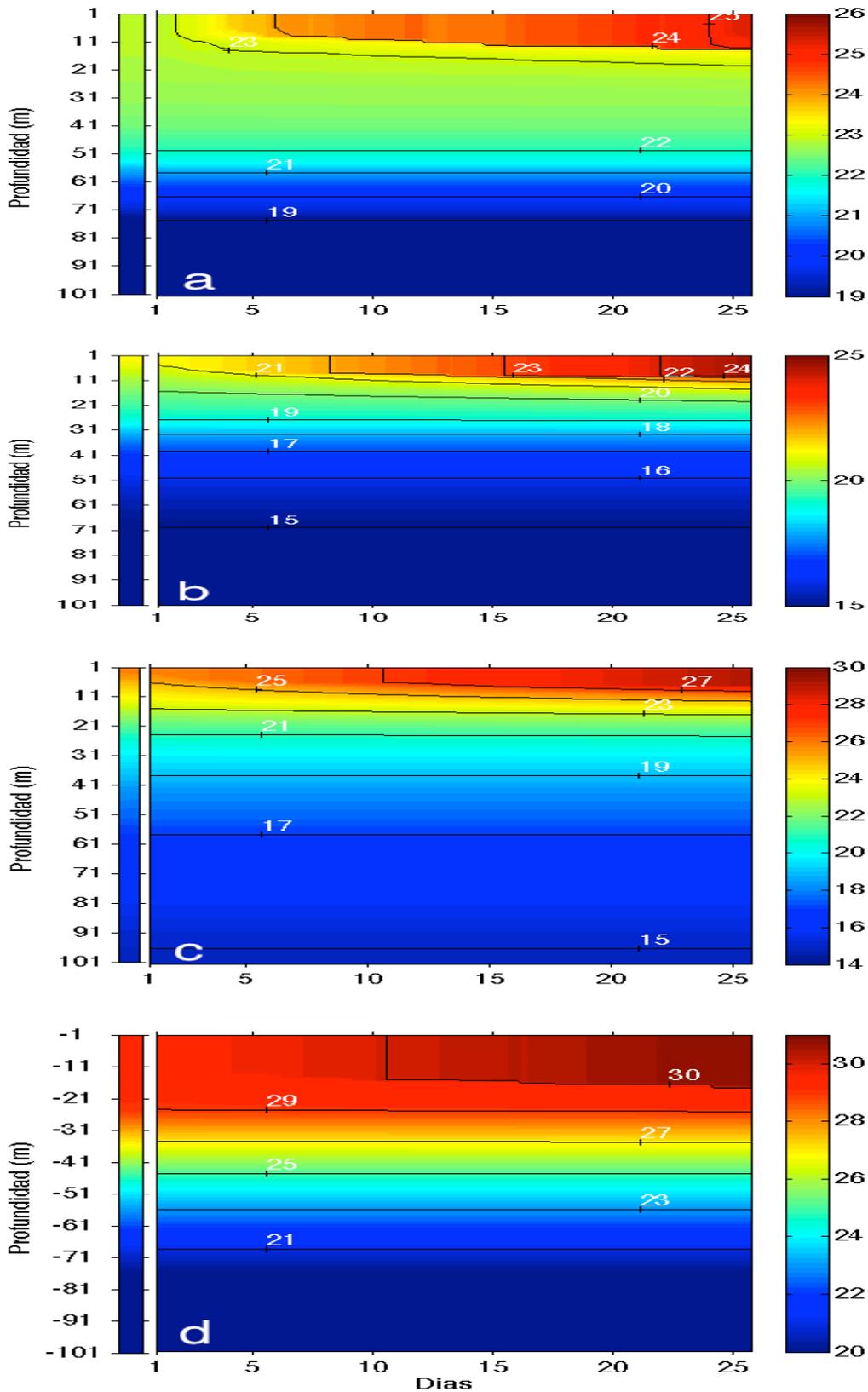


Figura 27. Resultados con el modelo unidimensional para la temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) en la capa mezclada de la zona 5 para el mes de: a) febrero (invierno), b) abril (primavera), c) agosto (verano) y d) octubre (otoño).

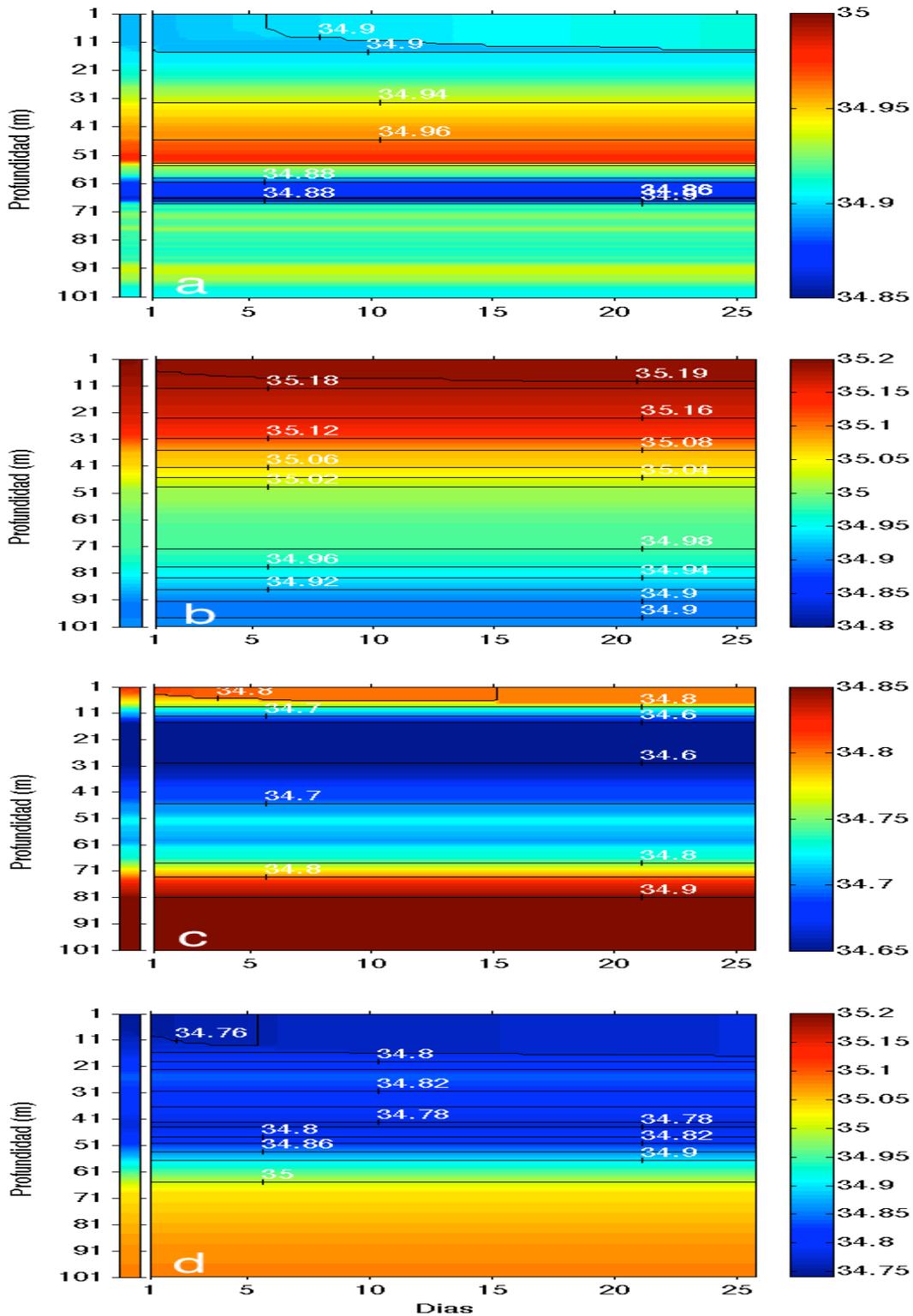
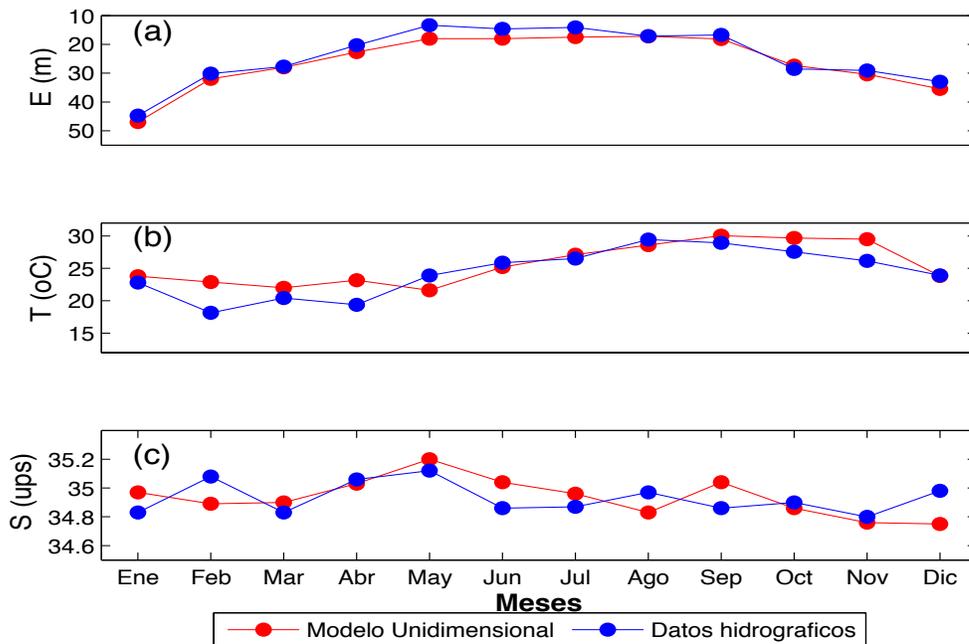


Figura 28. Resultados con el modelo unidimensional para la salinidad (ups) en la capa mezclada de la zona 5 para el mes de: a) febrero (invierno), b) abril (primavera), c) agosto (verano) y d) octubre (otoño).

Se hizo una comparación de los promedios mensuales del espesor, temperatura y salinidad calculados con los datos hidrográficos y con el modelo unidimensional (figura 29 y tabla 9). El espesor de la capa de mezcla de otoño a principios de verano es menor con los datos hidrográficos con una diferencia de 3 m. En agosto y octubre la diferencia es de 1 m. El error estándar entre los datos hidrográficos y el modelo es de 0.46 m. La temperatura obtenida con el modelo unidimensional es mayor en invierno, julio y finales de verano a otoño, con una diferencia de 4 °C y con un error estándar de 0.59 °C. Por último, la salinidad en enero, marzo, mayo, junio, julio y septiembre es mayor con el modelo unidimensional, mientras en febrero, abril, agosto y de octubre a diciembre la salinidad es mayor con los datos hidrográficos, con un error estándar de 0.04 ups.

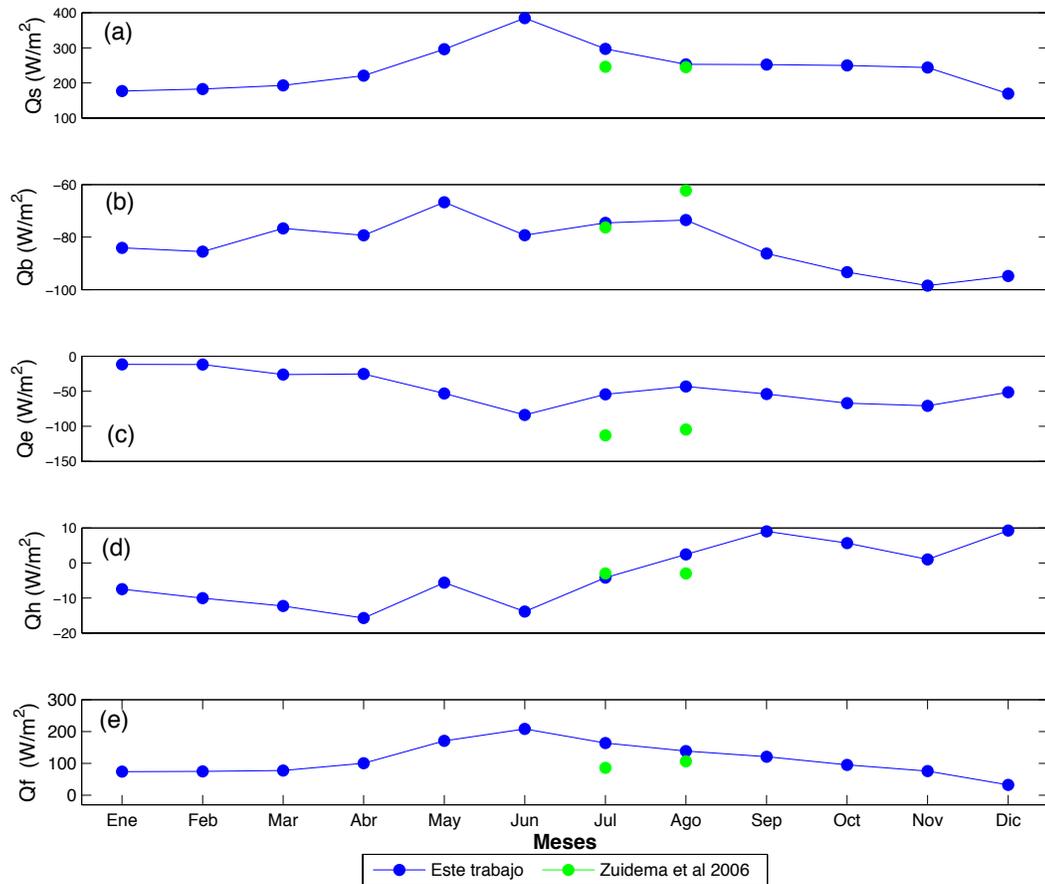
**Tabla 9. Promedio del espesor (m), temperatura (°C) y salinidad (ups) obtenidos con el modelo unidimensional para la zona 5, los números entre paréntesis son los resultados de los datos hidrográficos.**

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
<b>Espesor (m)</b>	47.00 (44.74)	32.00 (30.18)	28.00 (27.72)	22.69 (20.33)	18.01 (13.35)	18.00 (14.65)	17.50 (14.14)	17.19 (17.16)	18.16 (16.76)	27.36 (28.56)	30.40 (29.06)	35.45 (32.97)
<b>Temperatura (°C)</b>	23.80 (22.80)	22.88 (18.13)	22.00 (20.41)	23.17 (19.37)	21.60 (23.89)	25.20 (25.86)	27.10 (26.52)	28.60 (29.45)	30.04 (28.93)	29.67 (27.55)	29.50 (26.16)	23.82 (23.92)
<b>Salinidad (ups)</b>	34.97 (34.83)	34.89 (35.08)	34.90 (34.83)	35.03 (35.06)	35.20 (35.12)	35.04 (34.86)	34.96 (34.87)	34.83 (34.97)	35.04 (34.86)	34.86 (34.90)	34.76 (34.80)	34.75 (34.98)



**Figura 29. Promedio de: a) espesor (m), b) temperatura (°C) y c) salinidad (ups) obtenidos con el modelo unidimensional (color rojo), y datos hidrográficos (azul) para la zona 5.**

Los promedios mensuales de los flujos de calor para la zona 5 están representados en la figura 30. El flujo de onda corta es menor en diciembre y enero, aproximadamente de  $180 \text{ W/m}^2$ , en comparación a junio, donde se alcanza el máximo valor de  $400 \text{ W/m}^2$ . El flujo de calor de onda larga en noviembre alcanza los  $90 \text{ W/m}^2$  y en junio los  $70 \text{ W/m}^2$ . También se observa una disminución pronunciada de flujo de calor latente en junio. El flujo de calor sensible aumenta de enero a diciembre donde se alcanza el valor máximo en diciembre de  $10 \text{ W/m}^2$ , solo en el mes de abril y junio hay una disminución del flujo de  $-12 \text{ W/m}^2$ . Se tiene menor flujo neto de calor en diciembre con aproximadamente  $20 \text{ W/m}^2$  y en junio se alcanza el valor máximo de  $230 \text{ W/m}^2$ . También se hizo una comparación de los promedios mensuales de julio y agosto calculados con las formulas empíricas, contra los valores reportados por Zuidema *et al.*, (2006). Los valores estimados en este trabajo para el flujo de calor de onda corta, onda larga, calor latente, calor sensible y el flujo neto de calor son más altos excepto para agosto donde el flujo de onda larga es menor a lo reportado por Zuidema *et al.*, (2006) y en julio para el flujo de calor sensible. Esto puede deberse a que el promedio mensual de los datos reportados por Zuidema *et al.*, (2006) son de solo un año (2004) y también a que julio y agosto no están completos; en julio solo se tiene desde el día 7 al 21 y del 28 al 31 y para agosto del día 1 al 12.



**Figura 30.** Los flujos de: a) onda corta ( $Q_s$ ), b) onda larga ( $Q_b$ ), c) calor latente ( $Q_e$ ), d) calor sensible ( $Q_h$ ) y e) el flujo neto de calor a través de la superficie ( $Q_f$ ) para la zona 5 o Cuenca Pescadero, estimaciones con datos del NARR y CCMP, haciendo una comparación con Zuidema *et al.*, (2006) para el mes de Julio y Agosto.

## 5. Discusión

En los resultados del modelo unidimensional se observa una disminución en el espesor de la capa de mezcla en el Golfo de California entre los meses de mayo a septiembre, porque se tiene viento débil y mayor ganancia de calor por radiación, lo que ocasiona una capa de mezcla somera. En estos meses (mayo a septiembre) aumenta la ganancia de calor en el Golfo debido a un mayor flujo de calor de onda corta a través de su superficie (figuras 15, 20, 25 y 30), flujo que a su vez ocasiona por estratificación una disminución del espesor de la capa de mezcla (figuras 14a, 19a, 24a y 29a). Las profundidades de la capa de mezcla van de los 28 m a 15 m, desde la Región Norte hasta la Cuenca Pescadero respectivamente, en donde se encuentran las menores profundidades de esta capa. Entre otros factores, el flujo neto de calor en esta época del año está gobernado por la intensa radiación solar que a su vez origina un aumento en la temperatura de 28 °C a 30 °C.

Además, en los resultados del modelo unidimensional, se observa un incremento en el espesor de la capa de mezcla en el Golfo de California durante los meses de noviembre a febrero. Los espesores van de los 90 m a los 33 m desde la Región de las grandes Islas hasta la Cuenca Pescadero (figuras 14a, 19a, 24a y 29a). En estos meses el Golfo de California pierde calor latente a través de su superficie (figuras 15, 20, 25 y 30), debido, entre otros factores, a la baja humedad del aire y al aumento de la magnitud de viento, y a la vez, a la disminución en la radiación solar. Simultáneamente, el aumento en el esfuerzo del viento sobre la superficie del mar genera un frente de mezcla que se introduce por difusión turbulenta dentro de la columna de agua, profundizando la capa mezclada y ocasionando un descenso en la temperatura en esta capa con respecto al verano. La temperatura en la Región de las grandes Islas desciende a 14 °C, y a 24 °C en la Cuenca Pescadero.

En general, tanto los espesores como los cambios de espesor de la capa de mezcla que produce el modelo unidimensional en el Golfo de California reproducen adecuadamente a los reportados con los datos hidrográficos. Sin embargo, en los meses de noviembre a febrero, en la Región norte (zona 1) y en la Cuenca Farallón (zona 4), se aprecia cómo el modelo unidimensional sobrestima hasta en un 40% el

espesor de la capa mezclada (figuras 14a y 24a). Estas diferencias se pueden deber a que en el modelo unidimensional no se consideran los procesos advectivos, ya que se supone que las variaciones verticales son más importantes que las variaciones horizontales; y también se supone en el modelo unidimensional que el campo de densidad está dominado por la temperatura y salinidad. En otras palabras, con el modelo unidimensional solamente se puede estudiar la importancia relativa de los agentes causales de mezcla vertical que controlan la formación y desarrollo de la termohalina estacional. También se han utilizado modelos sencillos para simular la mezcla vertical en aguas estratificadas como el verticalmente integrado de Simpson *et al.*, (1978) y el de Simpson y Bowers (1981) donde probaron que el modelo produce simulaciones razonables de la cantidad de energía necesaria para mezclar verticalmente la columna de agua a una cierta profundidad en el mar.

Las estimaciones muestran que hay una mayor pérdida de calor en invierno que en verano. Una diferencia sustancial entre las estimaciones realizadas del flujo de calor neto en este trabajo y las observaciones; es que en las estimaciones realizadas se tiene una ganancia neta de calor de aproximadamente  $114 \text{ W/m}^2$  en la Región Norte y una ganancia neta de aproximadamente  $115 \text{ W/m}^2$  en la Cuenca Pescadero. En contraste, Castro *et al.*, (1994) obtuvieron que la ganancia neta es mayor en el sur ( $110 \text{ W/m}^2$ ) que en el norte ( $72 \text{ W/m}^2$ ) debido a que en el norte hay una mayor pérdida de calor por evaporación. Este hecho puede ser explicado a que se utilizó el viento de la base de datos globales derivado del proyecto Cross Calibrated Multi-Platform (CCMP) y para la temperatura del aire, humedad relativa, presión atmosférica y nubosidad se utilizaron los datos del NCEP North American Regional Reanalysis (NARR) que fueron un promedio de 22 años (1988 al 2010). Mientras que Castro *et al.*, (1994) utilizaron información del Servicio Meteorológico Nacional en estaciones costeras de Mazatlán, Loreto, Guaymas, Puerto Peñasco de 1984 a 1985.

En este trabajo se encontró que la Región Norte del Golfo de California la rapidez del viento es aproximadamente de  $3 \text{ m/s}$  en invierno y en verano de  $0.5 \text{ m/s}$ , mientras que en la Región central del golfo en invierno es de  $3 \text{ m/s}$  y en verano de  $0.4 \text{ m/s}$  y en la Región de la boca es de  $5 \text{ m/s}$  en invierno y de  $0.1 \text{ m/s}$  en verano. Mientras que Lavín *et al.*, (1997) encontraron que el viento sopla del noroeste durante el invierno con una

rapidez de 8 a 12 m/s y del sureste con una rapidez de 5 m/s durante el verano. La velocidad media del viento es de 5 m/s. Otra de las cosas mencionadas es que el viento es canalizado a lo largo de las cadenas montañosas y tiene un marcado ciclo estacional. Mientras que Bordoni *et al.* (2004) encontraron que el viento máximo es de 12 m/s a lo largo del Golfo de California, y cerca de la boca del Golfo el viento tiene una velocidad de 5 a 10 m/s. Estas fuertes discrepancias en la intensidad del viento, sobre todo durante la época invernal para la región norte donde existen mediciones directas (Reyes, 1993; Leal y Lavín, 2002) hacen dudar de la aplicación de las bases de datos globales a esta región en el interior del Golfo de California.

Para la Región de las Islas no se utilizó el modelo unidimensional debido a que es un modelo sencillo y esta zona tiene características oceanográficas únicas, como corrientes de marea muy intensas y una batimetría irregular; en la región sur de las Islas la temperatura disminuye regularmente con la profundidad, mientras que en el canal de ballenas la distribución de la temperatura es totalmente diferente. La interacción de fuertes corrientes de marea con los umbrales y con la batimetría tan irregular de dicha región generan mucha turbulencia (Badan-Dangon *et al.*, 1985). Estos factores influyen para intensificar la mezcla.

La evolución de la capa de mezcla y la turbulencia, están ligadas fuertemente a los procesos que tienen lugar en la interfaz océano-atmósfera.

Cabe mencionar que aun cuando era de esperarse que el modelo unidimensional no reprodujera cabalmente las características observadas de la capa de mezcla, los resultados de este modelo en el Golfo de California son satisfactorios en cuanto a que nos permite estimar a groso modo las características de la capa mezclada en función de las variables climatológicas, lo que a su vez lo convierte en una herramienta útil para estudios de paleoclimatología en la región cuando se analizan las abundancias relativas de las especies fitoplanctónicas encontradas en los núcleos de sedimento de las diferentes regiones del Golfo de California y para quienes estudian el entorno biológico marino pues les permite modelar ecosistemas dinámicos y mejorar aquello que se conoce sobre la productividad biológica del océano.

## Conclusiones

El espesor de la capa mezclada en el Golfo de California tiene una fuerte señal estacional y en general aumenta su amplitud de la boca hacia la cabeza y de verano a invierno. Los máximos valores del espesor de la capa de mezcla se presentan en la región de las grandes islas durante invierno asociado con las mínimas temperaturas, mientras que el mínimo espesor de la capa de mezcla se da en la cuenca pescadero durante el verano con las mayores temperaturas.

El análisis armónico al espesor, temperatura y salinidad indican que tanto la amplitud de la componente anual como la semianual aumentan de la boca a la cabeza, siendo el armónico anual el de mayor importancia en el Golfo de California. La máxima amplitud en la componente anual para el espesor ocurre en invierno y en verano para el armónico semianual. Para la temperatura la fase de la componente anual ocurre en verano y la semianual en invierno. Finalmente la fase de la componente anual para la salinidad ocurre en primavera en la boca, durante verano en la parte central y durante otoño en el norte. En la región de la Cuenca Guaymas el armónico anual y semianual para la salinidad tienen la misma amplitud.

Se encontró que las mayores diferencias del espesor de la capa de mezcla entre los datos hidrográficos y el modelo unidimensional ocurren durante noviembre a febrero en la región norte y la cuenca farallón. Esto puede ser porque en el modelo unidimensional no se consideran los procesos advectivos. Sin embargo, el modelo unidimensional reproduce muy bien el espesor de la capa de mezcla en todas las zonas durante mayo a septiembre. Esto puede ser porque el viento es más fuerte en la boca del golfo y más débil al interior del golfo.

## Referencias bibliográficas

- Álvarez Borrego, S. (2008). Oceanografía de la región de las grandes islas. En: Gustavo D. Danemann y Exequiel Ezcurra, Editores, Bahía de los Ángeles: recursos naturales y comunidad. Línea base 2007. México *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales*. 45-65.
- Badan-Dangon, A., Koblinsky, C., y Baumgartner, T. (1985). Spring and summer in the gulf of california: Observations of the surface thermal patterns. *Oceanol. Acta*, 8(1):13.22.
- Berón-Vera, F. J., Ripa. P. (2002). Seasonal salinity balance in the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research*, 107(C8). doi: 10.1029/2000JC00769.
- Bordoni, S., Ciesielski, P. E., Johnson, R. H., McNoldy, B. D & Bjorn, S. (2004). The low-level circulation of the North American Monsoon as revealed by QuikSCAT. *Geophysical Research Letters*, 31, doi: 10.1029/2004GL020009.
- Brainerd, K. E., Gregg, M. C. (1995). Surface mixed and mixing layer depths, *Deep Sea Res., Part A*, 9,1521-1543.
- Bray, N. A. (1988). Thermohaline circulation in the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research*, 93, 4993-5020.
- Castro, R., Lavín, M.F & Ripa, P. (1994). Seasonal heat balance in the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research*, 99(C2): 3249-3261.
- Chen, D., Busalacchi, A. J & Rothstein, L. M. (1994). The roles of vertical mixing, solar radiation, and wind stress in a model simulation of the sea surface temperature seasonal cycle in the tropical Pacific Ocean, *Journal of Geophysical Research*, 99, 20,345-20,359.
- Clement, B. M, G. M., Fischer, A. S., Lazar, A & Ludicone D. (2004). Mixed layer depth over the global ocean: An examination of profile data and a profile-based climatology. *Journal of Geophysical Research*, 109 (C12003). doi: 10.1029/2004JC002378.
- Cortes, L. M. D. C., Álvarez, B. S y Giles, G. A. D . (1999) Efecto de la mezcla vertical sobre la distribución de nutrientes y fitoplancton en dos regiones del Golfo de California, en verano. *Revista de la Sociedad Mexicana de Historia Natural*, 49: 193-206.
- Foltz, G. R., Grodsky, S. A., Carton, J. A & McPhaden, M. J. (2003). Seasonal mixed layer heat budget of the tropical Atlantic Ocean. *Journal of Geophysical Research*, 108(C5), 3146. doi: 10.1029/2002JC001584.

- García, S. G., Marinone, S. G. (1997). Modelado de corrientes residuales en el Golfo de California mediante la utilización de diferentes tamaños de malla. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, México, Publicación restringida. Recuperado de <http://usuario.cicese.mx/~marinone/publicaciones/pdfs/2002ymenos/17MODELING.PDF>
- Kara, A. B., Rochford, P. A. & Hurlburt, H. E. (2000). An optimal definition for ocean mixed layer depth. *Journal of Geophysical Research*, 105:16803-16821.
- Kara, A. B., Rochford, P.A. & Hurlburt, H. E. (2003). Mixed layer depth Variability over the global ocean. *Journal of Geophysical Research*, 105: 16783- 16801.
- Kraus, E. B., Turner, J. S. (1967). A one-dimensional model of the seasonal thermocline II. The general theory and it's consequences. *Tellus*, 19(1): 98-106.
- Lavín, P. M. F., Organista, S. S. (1988). Surface heat flux in the northern Gulf of California. *Journal of Geophysical Research*, 93(C11): 14033- 14038.
- Lavín Peregrina, M. F., Beier, E y Badan, A. (1997). Estructura hidrográfica y circulación del Golfo de California: escalas estacional o interanual. *Contribución a la Oceanografía Física en México. Unión Geofísica Mexicana Monografía 3*, Ensenada, B.C. 141-171
- Leal, J. C., Lavín, P. M. F. (2002). Comparación del viento costero y marino de la Región Norte del Golfo de California durante el invierno de 1994. *Geos*. 22(1): 12-17.
- Levitus, S. (1982). Climatological atlas of the world ocean, NOAA Prof. Pap. U.S. Government Printing Office., Washington. D.C. 13,173.
- Levitus, S., Boyer, T. P. (1994). World Ocean Atlas 1994. NOAA Atlas NESDIS, U.S. Government Printing Office., Washington, D. C. 4, 117.
- Makarov, V., Illescas, A. J. (2002). Corrientes básicas barotropicas en el Golfo de California. *Ciencias Marinas*, 29(2): 141-153.
- Marinone, S. G., Lavín, M. F. (1997). Mareas y corrientes residuales en el Golfo de California. En: Lavín M. F. (editor), *Contribución a la Oceanografía Física en México, Serie Monografías Geofísicas, Unión Geofísica Mexicana. Monografía 3*, 111-137.
- Martínez, D. L. A. (2001). Patrones de circulación en la capa superior del océano en la parte norte del Golfo de California, expresados en imágenes del radar de apertura sintética del ers-2. *Ciencias Marinas*. 27(2): 209-221.
- Martínez Sepúlveda, M. (1994). Descripción de la profundidad de la capa mezclada superficial en el Golfo de California. (Tesis de Licenciatura) *Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, México*.

- Monterrey, D., Levitus, S. (1997). Seasonal Variability of Mixed Layer Depth for the World Ocean. NOAA Atlas NESDIS, U.S. Government Printing Office., Washington. 14: 100.
- Obata, A., Ishizaka, J & Endoh, M. (1996). Global verification of critical depth theory for phytoplankton bloom with climatological in situ temperature and satellite ocean color data. *Journal of Geophysical Research*, 101,20,657-20,667.
- Organista Sandoval, S. (1987). Flujos de calor en el alto Golfo de California. (Tesis de Maestría) *Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California., Ensenada, México.*
- Paden, C. A. (1990). Tidal and atmospheric forcing of the upper ocean in the Gulf of California. (Tesis de Doctorado) *SCRIPPS Institution of Oceanography, UCSD.*
- Reyes Hernández, A. C. (1993). Efectos de las condiciones atmosféricas de otoño e invierno sobre la formación de masas de agua en el Golfo de California. (Tesis de Maestría) *Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California., Ensenada, México.*
- Ripa, P., Marinone, S. G. (1989). Seasonal variability of temperature, salinity, velocity and sea level in the central Gulf of California, as inferred from historical data. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 115: 887-913.
- Robinson, M. K. (1973). Atlas of monthly mean sea surface and subsurface temperature in the Gulf of California, Mexico. San Diego Society of Natural History, memoir 5.
- Robles, J. Ma., Marinone, S. G. (1987). Seasonal and interannual thermohaline variability in the Guaymas Basin of the Gulf of California. *Continental Shelf Research*, 7: 715-733.
- Roden, G. I., Emilson, I. (1979). Physical Oceanography of the Gulf of California, IN: A. Ayala Castannares, F. B. Phlager, R. Schwartzlose, and A. Laguarda. ed. Simposio el golfo de California realizado en Mazatlan, Sinaloa. *Universidad Nacional Autónoma de Mexico, Mexico.*
- Schneider, N., Muller, P. (1990). The meridional and seasonal structures of the mixed layer depth and its diurnal amplitude observed during the Hawaii-to Tahiti shuttle experiment. *Journal of Physical Oceanography*, 20: 1395-1404.
- Simpson, J. H., Allen, C. M & Morris, N. C. G. (1978). Fronts on the Continental Shelf. *Journal of Geophysical Research*, 83(C9): 4607-4614.
- Simpson, J. H., Bower, G. (1981). Models of stratification and frontal movement in shelf seas. *Deep-Sea Research*, 28: 727-738.

- Soto, M. L., Marinone, S. G. y Pares, S. A. (1999). Variabilidad espaciotemporal de la temperatura superficial del mar en el Golfo de California. *Ciencias Marinas*, 25(1): 1-30.
- Spall, M. A., Weller, R. A. & Furey, P. W. (2000). Modeling the three-dimensional upper ocean heat Budget and subduction rate during the Subduction Experiment. *Journal of Geophysical Research*, 105(26), 151-166.
- Sprintall, J., Roemmich, D. (1999). Characterizing the structure of the surface layer in the Pacific Ocean. *Journal of Geophysical Research*, 104(C10), 297-311.
- Suga, T., Motoki, K., Aoki, Y. & Macdonald, A. M. (2004). The north Pacific climatology of Winter mixed layer and mode waters. *Journal of Physical Oceanography*, 34: 3-22.
- Tabata, S., Weichselbaumer, W. E. (1992). An update statistics of oceanographic data base don hydrographic/STD casts made at stations 1 through 6 along line P during January 1959 through September 1990, *Canadian Data Report of Hydrography and Ocean Sciences*, 108: 317.
- Thompson, R. O. R. Y. (1976). Climatological numerical models of the surface mixed layer of the ocean. *Journal of Physical Oceanography*, 6: 496-603.
- Thompson, R. E., Fine, I. V. (2003). Estimating mixed layer depth from ocean profile data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 20(2): 319-329.
- Weller, R. A., Plueddemann. (1996). Observations of the vertical structure of the oceanic boundary layer. *Journal of Geophysical Research*, 101: 8789-8806.
- Zuidema, P., Fairall, C., Hartten, L. M., Hare, J. E. & Wolfe, D. (2006). On air-sea interaction at the Mouth of the Gulf Of California. *Jornal of Climate*, 20 (9): 1649-1661.

## Anexo

### Los flujos de calor

Los flujos de calor se describen a continuación (Castro *et al.*, 1994):

- a) La radiación de onda corta ( $Q_s$ ) es calculado en cada paso de tiempo usando la secuencia diaria de datos atmosféricos y la temperatura superficial y se expresa:

$$Q_s = Q_c(1 - 0.62C + 0.0019\alpha)(1 - A)$$

donde,  $Q_c$  es la insolación solar diaria en ausencia de nubes,  $(1-A)$  es el factor que introduce el efecto de la reflexión,  $A=0.06$  es el albedo,  $(1 - 0.62C + 0.0019\alpha)$  en este paréntesis se incluye el efecto de la nubes y la altura del sol al mediodía, medido desde la horizontal ( $\alpha$ ) y  $C$  es la nubosidad en décimas.

Un poco de geometría muestra que:

$$\alpha = 90^\circ - L + \delta - \eta$$

donde,  $\delta = 23.87 \sin[2\pi/(t-82)/365]$  es la declinación del sol,  $L$  es la latitud en grados y  $\eta < 0.002^\circ$  es el ángulo el ángulo subtendido por el radio de la tierra visto desde el sol y puede ser despreciable.

$Q_c$  es calculado analíticamente:

$$Q_c = A_0 + A_1 \cos\phi + B_1 \sin\phi + A_2 \cos 2\phi + B_2 \sin 2\phi$$

Donde:

$$A_0 = -15.82 + 326.87 \cos L, \quad A_1 = 9.63 + 192.44 \cos(L + 90^\circ), \quad B_1 = -0.64 + 7.80 \sin L, \quad B_2 = -0.50 + 14.42 \cos 2(L - 5^\circ)$$

y  $L$  es la latitud en grados,  $\phi = (2\pi/365)(t-21)$  y  $t$  es el día juliano.

La fracción penetrativa de la radiación solar total de acuerdo a la expresión:

$$I = I_0 e^{-Kz}$$

donde  $Q_s$  es la parte que llega a la superficie del agua y que decae exponencialmente en función de la profundidad ( $z$ ) y  $K$  en el coeficiente de atenuación. El 55 % de  $I_0$  queda atrapada en el primer metro de profundidad y el 45 % restante penetra en la columna de agua.

b) Radiación de onda larga ( $Q_b$ ):

$$Q_b = -\sigma\varepsilon(T_s + 274)^4(0.254 - 0.0049e_a)(1 - 0.8C)$$

$\sigma = 5.7 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$  es la constante de Stefan-Boltzman,  $\varepsilon = 0.97$  la emisividad de la superficie del mar,  $T_s$  la temperatura superficial del mar,  $e_a = (H/100)e_w$  es la presión de vapor de agua del aire, H la humedad relativa.

$e_w = 0.98[1 + 10^{-6}P(4.5 + 0.0006T_s^2)]10^Y$  es presión de vapor a saturación sobre la superficie del mar y  $Y = (0.7859 + 0.03477T_s)/(1 + 0.00412T_s)$ , P es la presión atmosférica y C es la cobertura de nubes.

c) Flujo de calor latente ( $Q_e$ ):

$$Q_e = \rho_a C_e W (q_s - q_a) L_v$$

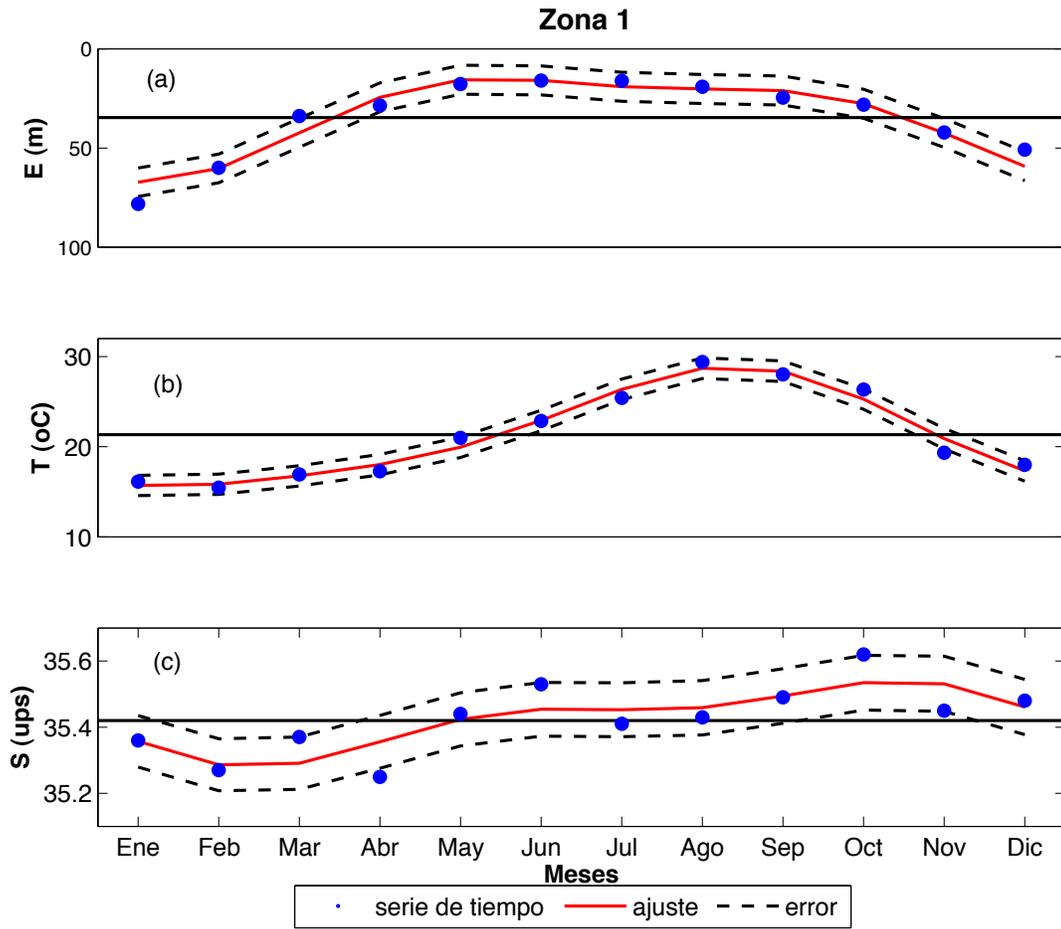
Donde  $\rho_a = 1.25 \text{ kg/m}^3$  es la densidad del aire,  $C_e$  coeficiente de intercambio, W la rapidez del viento,  $q_s = (0.62197e_w)/(P - 0.378e_w)$  la humedad específica de saturación en la superficie del mar,  $q_a = (0.62197e_a)/(P - 0.378e_a)$  la humedad específica del aire y  $L_v = (2.5008 \times 10^6) - (2.3 \times 10^3)T_s \text{ J/kg}^1$  el calor latente de evaporación.

d) Flujo de calor sensible ( $Q_h$ ) también llamado flujo de conducción turbulenta es debido a la diferencia de la temperatura del mar y la temperatura del aire:

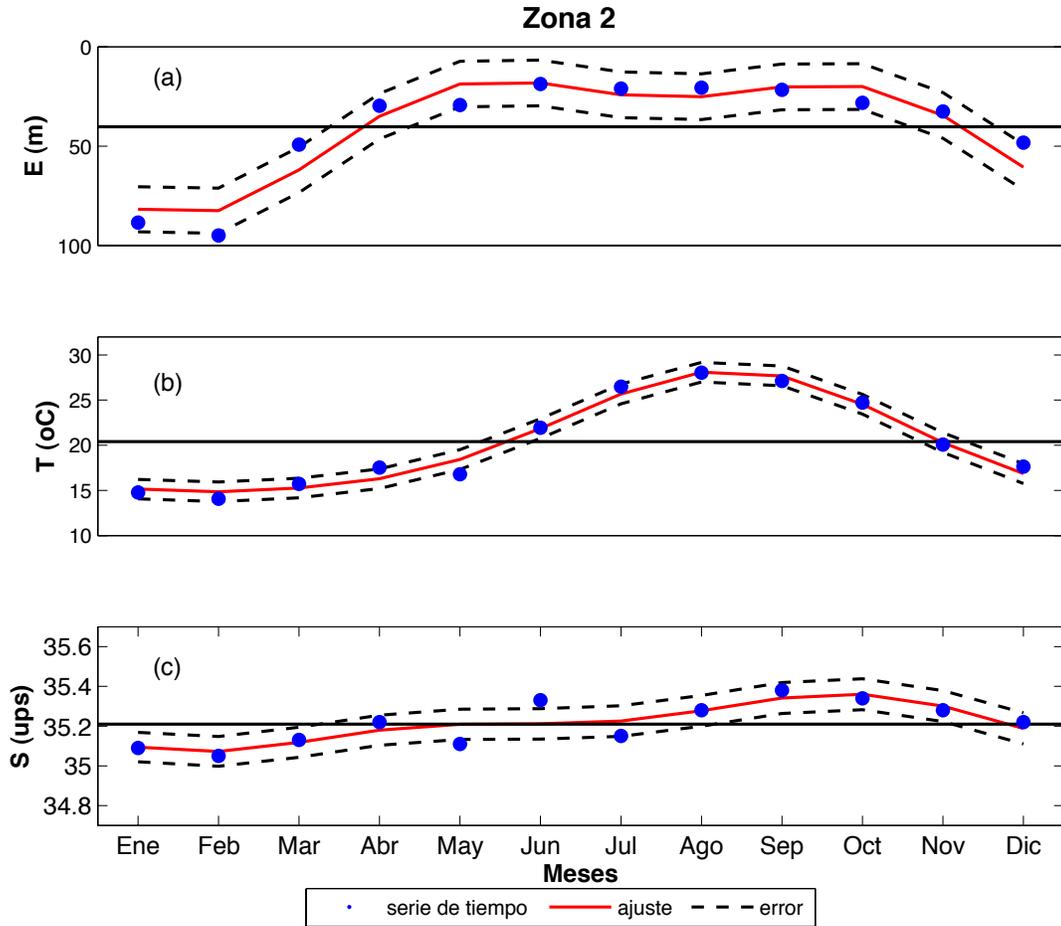
$$Q_h = \begin{cases} \rho_a C_p (0.0026 + 0.00086W\Delta T) & W\Delta T < 0 \\ \rho_a C_p (0.002 + 0.00097W\Delta T) & 0 < W\Delta T < 25 \\ \rho_a C_p (0.00146W\Delta T) & W\Delta T > 25 \end{cases}$$

$\Delta T = T_s - T_a$  es la diferencia de la temperatura entre la superficie del mar y el aire,  $C_p = 1004.6(1 + 0.8375q_a)$  es el calor específico del aire a presión constante.

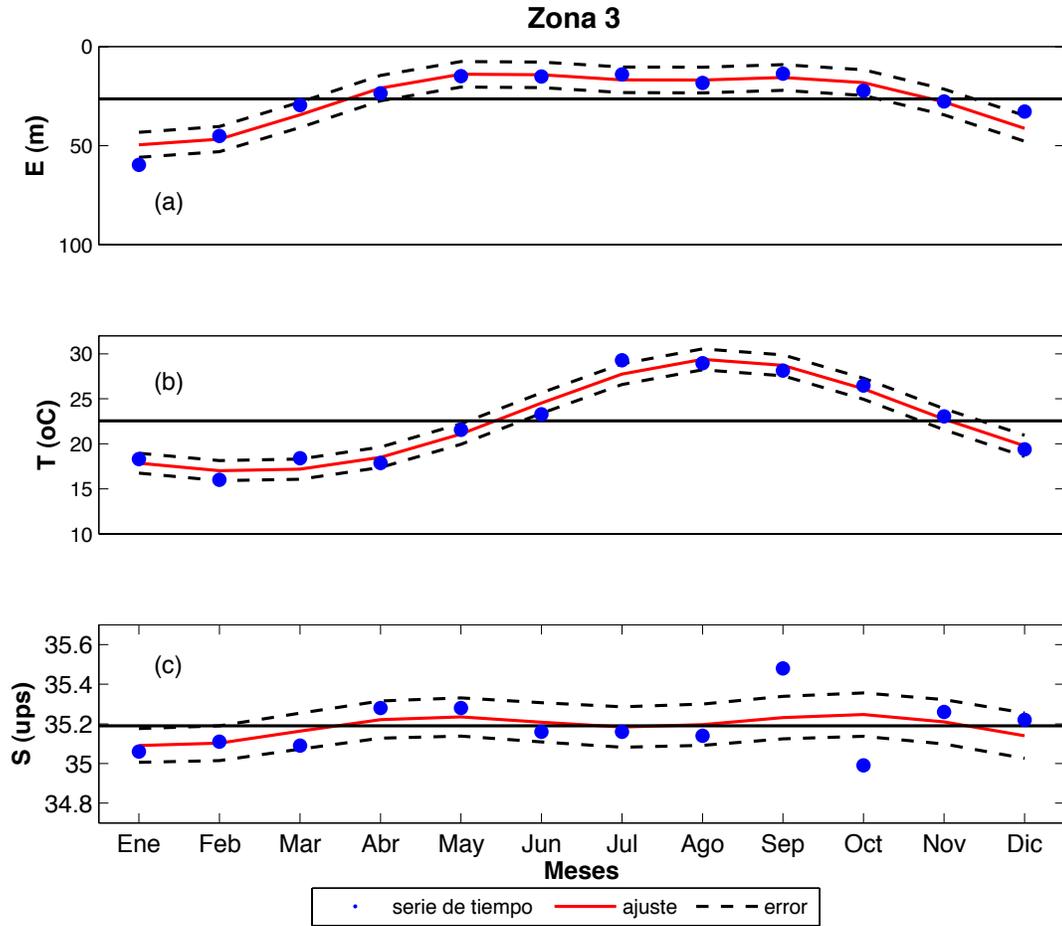
## Análisis armónico



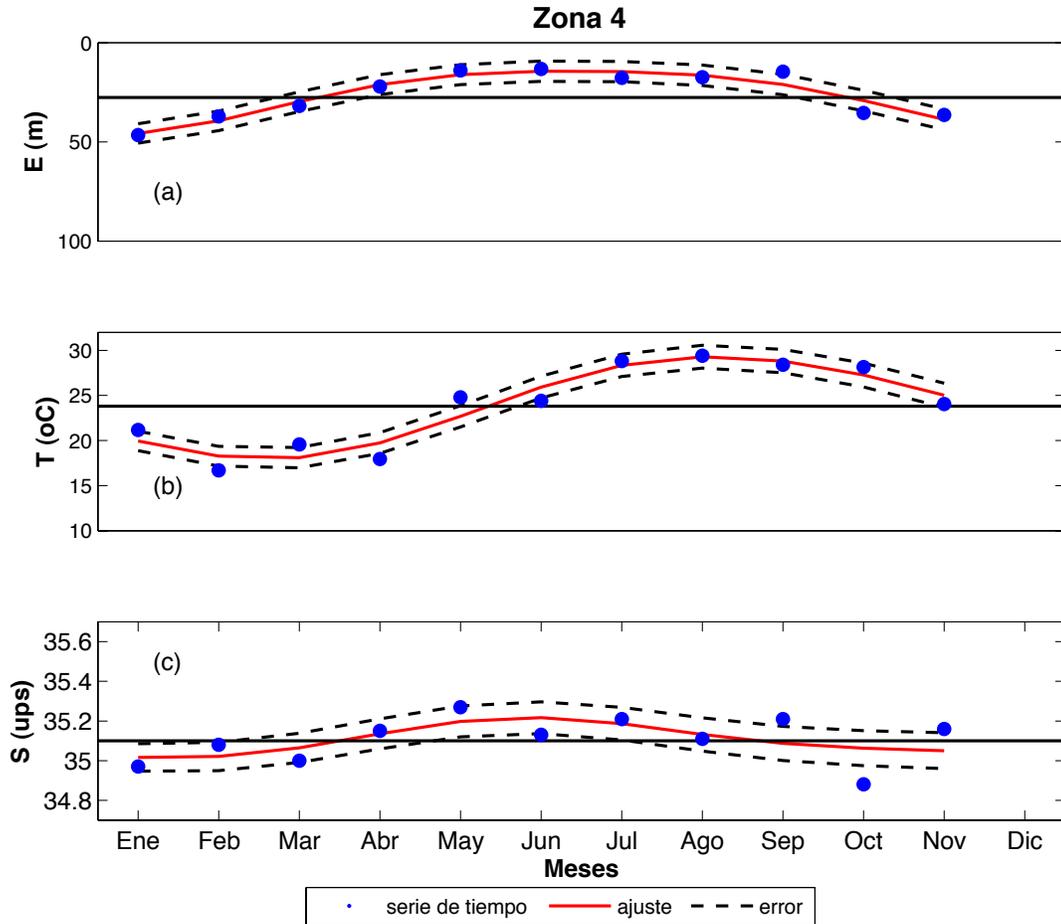
**Figura 1A. Análisis armónicos del a) espesor (m), b) temperatura (°C) y c) salinidad (ups) para la zona 1 (Región Norte). Se presenta la serie de tiempo, el ajuste y su error.**



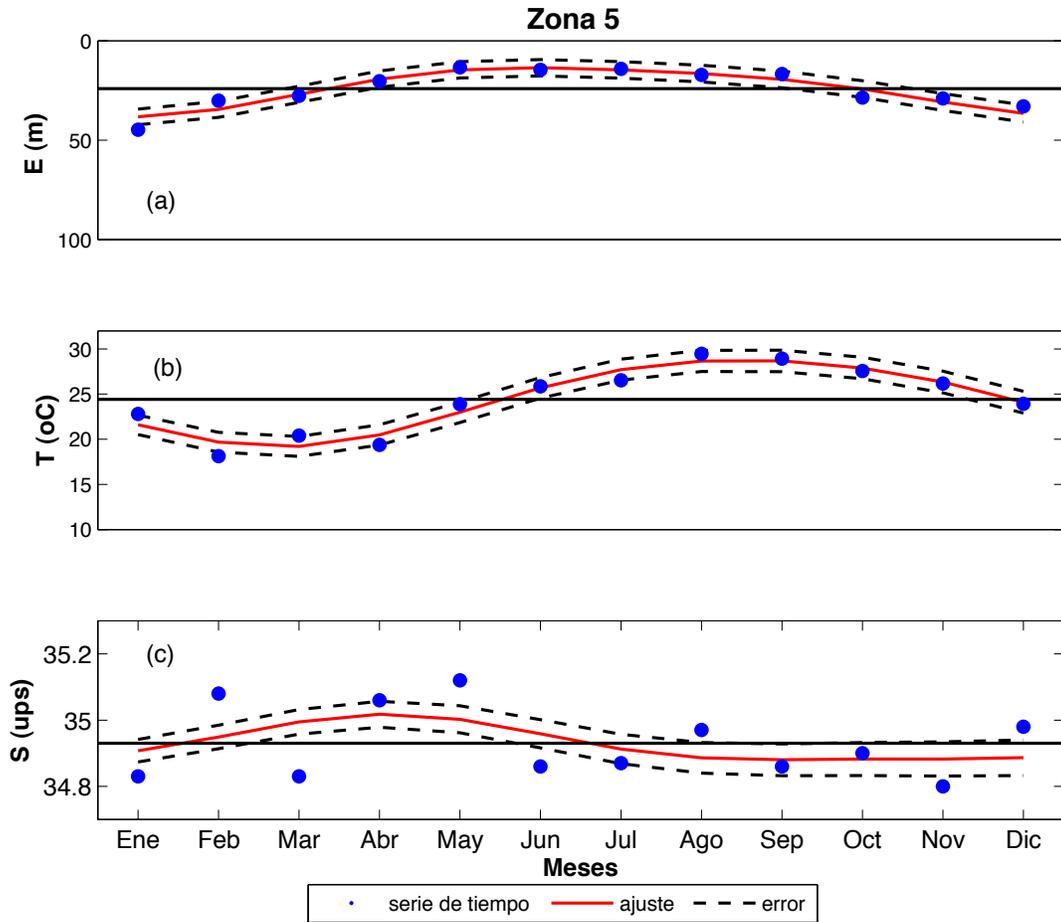
**Figura 2A. Análisis armónicos del a) espesor (m), b) temperatura (°C) y c) salinidad (ups) para la zona 2 (Región Islas). Se presenta la serie de tiempo, el ajuste y su error.**



**Figura 3A. Análisis armónicos del a) espesor (m), b) temperatura (°C) y c) salinidad (ups) para la zona 3 (Cuenca Guaymas). Se presenta la serie de tiempo, el ajuste y su error.**



**Figura 4A. Análisis armónicos del a) espesor (m), b) temperatura (°C) y c) salinidad (ups) para la zona 4 (Cuenca Farallón). Se presenta la serie de tiempo, el ajuste y su error.**



**Figura 5A. Análisis armónicos del a) espesor (m), b) temperatura (°C) y c) salinidad (ups) para la zona 5 (Cuenca Pescadero). Se presenta la serie de tiempo, el ajuste y su error.**

**Tabla 1A. La amplitud y fase del armónico del espesor (m) junto con el error.**

		<b>Amplitud</b>	<b>Fase</b>
<b>Zona 1</b>	Anual	24.12± 2.70	11 Ene± 06
	Semianual	8.69±2.70	20 Ene ± 09
<b>Zona 2</b>	Anual	29.74±4.24	29 Ene ± 08
	Semianual	15.22±4.24	01 Feb ± 08
<b>Zona 3</b>	Anual	16.47±2.38	20 Ene ± 10
	Semianual	7.18±2.38	24 Ene ± 09
<b>Zona 4</b>	Anual	16.10±1.99	01 Ene ± 06
	Semianual	2.75±1.95	02 Ene ± 19
<b>Zona 5</b>	Anual	12.10±1.59	03 Ene ± 07
	Semianual	2.35±1.59	18 Ene ± 19

**Tabla 2A. La amplitud y fase del armónico de temperatura (°C) junto con el error.**

		<b>Amplitud</b>	<b>Fase</b>
<b>Zona 1</b>	Anual	6.44±0.42	20 Ago ± 03
	Semianual	1.28±0.42	07 Mar ± 09
<b>Zona 2</b>	Anual	6.69±0.40	24 Ago ± 03
	Semianual	1.22±0.40	29 Feb ± 09
<b>Zona 3</b>	Anual	6.23±0.44	23 Ago ± 04
	Semianual	0.65±0.44	18 Feb ± 19
<b>Zona 4</b>	Anual	5.63±0.74	28 Ago ± 07
	Semianual	0.39±0.77	28 Dic ± 22
<b>Zona 5</b>	Anual	4.79±0.47	05 Sep ± 05
	Semianual	0.47±0.47	15 Dic ± 29

**Tabla 3A. La amplitud y fase del armónico de salinidad (ups) junto con el error.**

		<b>Amplitud</b>	<b>Fase</b>
<b>Zona 1</b>	Anual	6.44±0.42	20 Ago ± 03
	Semianual	1.28±0.42	07 Mar ± 09
<b>Zona 2</b>	Anual	6.69±0.40	24 Ago ± 03
	Semianual	1.22±0.40	29 Feb ± 09
<b>Zona 3</b>	Anual	6.23±0.44	23 Ago ± 04
	Semianual	0.65±0.44	18 Feb ± 19
<b>Zona 4</b>	Anual	5.63±0.74	28 Ago ± 07
	Semianual	0.39±0.77	28 Dic ± 22
<b>Zona 5</b>	Anual	4.79±0.47	05 Sep ± 05
	Semianual	0.47±0.47	15 Dic ± 29