



Universidad Veracruzana

UNIVERSIDAD VERACRUZANA

INSTITUTO DE CIENCIAS MARINAS Y PESQUERÍAS
MAESTRÍA EN ECOLOGÍA Y PESQUERÍAS

“Variación hidrológica intermensual del Sistema Arrecifal Veracruzano”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE:

Maestría en Ecología y Pesquerías

PRESENTA:

Biólogo Marino José Otilio Avendaño Alvarez

BOCA DEL RÍO, VERACRUZ

Junio de 2013.



Universidad Veracruzana

UNIVERSIDAD VERACRUZANA

INSTITUTO DE CIENCIAS MARINAS Y PESQUERÍAS
MAESTRÍA EN ECOLOGÍA Y PESQUERÍAS

Variación hidrológica intermensual del Sistema Arrecifal Veracruzano

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE:

Maestría en Ecología y Pesquerías

PRESENTA:

Biólogo Marino José Otilio Avendaño Alvarez

COMITÉ TUTORAL:

Director de Tesis

Dr. David Salas Monreal

Asesores

Dr. César Meiners Mandujano

Dr. Mark Marín Hernández

Dr. Leonardo Uriel Arellano Méndez

Dr. Alejandro Granados Barba

BOCA DEL RÍO, VERACRUZ

Junio de 2013.



Universidad Veracruzana

**Instituto de Ciencias Marinas y Pesquerías
Coordinación del Posgrado en Ecología y Pesquerías**

**C. BIOL. JOSE OTILIO AVENDAÑO ÁLVAREZ
ESTUDIANTE DE LA MAESTRÍA EN ECOLOGÍA Y PESQUERÍAS
UNIVERSIDAD VERACRUZANA
P R E S E N T E**

Habiendo sido debidamente revisado y aceptado el trabajo escrito de su tesis denominada "Variación Hidrológica Intermensual del Sistema Arrecifal Veracruzano" por los integrantes de su comité tutorial y estando todos ellos de acuerdo que tanto el contenido como el formato de este trabajo es satisfactorio como prueba escrita para sustentar su examen final de posgrado de la MAESTRÍA EN ECOLOGÍA Y PESQUERÍAS se le autoriza a usted proceda a su impresión.

Sin otro particular, me es grato reiterarle la seguridad de mi más distinguida consideración.

ATENTAMENTE
"LIS DE VERACRUZ: ARTE, CIENCIA, LUZ"
Boca del Río, Ver. Junio 25 del 2013

Dra. María de Lourdes Jiménez Badillo
Directora

Calle
Independencia
No. 30
Pisos 1 y 2
Colonia Centro
CP 94290
Boca del Río,
Veracruz,
México

Teléfono
(229) 202 28 28

Dedicatoria

A mis Padres

Gracias por su apoyo y amor. Por los lagos, las montañas, las pirámides y los Andes. Este trabajo y todo lo que he hecho es de ustedes.

A mis Hermanos

Quienes me enseñaron a quedarme pequeño, aunque ellos ahora son grandes. Nunca pierdan el asombro de niño.

- Mira el cielo; cuenta las estrellas.
- No se pueden contar.
- Mira la tierra; cuenta los granos de arena.
- No se pueden contar.

Aunque no se conozca, existe el número de las estrellas y el número de los granos de arena. Pero lo que existe y no se puede contar y se siente aquí dentro, exige una palabra para decirlo. Esta palabra, en este caso, sería inmensidad. Es como una palabra húmeda de misterio. Con ella no se necesita contar ni las estrellas ni los granos de arena. Hemos cambiado el *conocimiento*, por la *emoción*: que es también una manera de penetrar en la verdad de las cosas (historia de Canek).

Agradecimientos

Dr. David Salas, gracias por brindarme su apoyo, ser mi profesor y amigo, pero sobre todo, por no ser complicado.

A mis asesores de tesis, Dr. Cesar Meiners y Dr. Mark Marín. Por sus lecciones, en donde todo tiene un porqué.

Dr. Leonardo Arellano, por el reto que conlleva decir cosas nuevas en la ciencia.

Dr. Alejandro Granados, por el consejo de todos los días.

A mis Directores Regionales May y Rober, por ser un equipo, amigos, consejeros y compañeros de vida.

A CONACyT por haberme otorgado la beca de manutención con el número 407867/260382, para realizar mis estudios de maestría en una institución dentro del padrón de calidad nacional. Además del apoyo para muestreos, con el proyecto SEP-CONACyT No. 78773, a cargo del Laboratorio de oceanografía costera, del Instituto de Ciencias Marinas y Pesquerías de la Universidad Veracruzana.

A mis amigos de todo el mundo, de muchos lados y del ICIMAP, así como profesores y amigos en administración, posgrado y a don Cipriano “el Capi”.

Resumen

La presente investigación analizó la variación espacio-temporal de 6 componentes hidrológicas (temperatura, salinidad, densidad, oxígeno, nitrógeno y clorofila-a) en el Sistema Arrecifal Veracruzano (SAV) en un periodo de 13 meses (marzo 2011 – marzo 2012). En el SAV se observó una temporalidad hidrológica compuesta por 3 periodos; secas, lluvias y nortes, la cual está relacionada con la temporalidad atmosférica del Golfo de México. Debido a la influencia de las descargas continentales del Río Jamapa y zonas urbanas. Las estructuras arrecifales y zonas de alta evaporación y descarga de ríos, generan variaciones locales que fueron registradas al analizar los parámetros físico-químicos y clorofila-a. Durante los periodos de secas y lluvias (marzo-septiembre de 2011), la masa de agua presente en el SAV se encontraba estratificada de 5 a 15 m, con valores en superficie y fondo que difirieron hasta en 12 °C y 8 ups. Durante secas la estratificación está relacionada con la temperatura (producto de la radiación solar), mientras que en lluvias las descargas continentales generan una haloclina más profunda. Debido a las descargas directas del Río Jamapa, se registró una variación puntual de las variables hidrológicas en la zona costera. En la zona expuesta y de mayor profundidad (hasta 40 m) del sistema, el viento es un factor importante de cambio hidrológico en la columna de agua; en secas, con un flujo de viento de sur a norte, se propician eventos advectivos (a profundidades mayores a 25 m); en nortes el viento presenta flujo de norte a sur con mayor intensidad que el resto del año, lo cual homogeniza los rangos hidrológicos, dando como resultado un cambio conforme aumenta la profundidad, principalmente en las concentraciones de clorofila-a, ya que la resuspensión de los sedimentos propicia eventos de productividad.

Palabras clave: Variación hidrológica, Sistema Arrecifal Veracruzano.

Abstract

This study analyzed the spatial-temporal variation of 6 hydrological variables (temperature, salinity, density, oxygen, nitrogen and chlorophyll-a) in the Veracruz Reef System (VRS) during 13 months (march 2011- march 2012). The VRS show a hydrological temporality integrated by 3 periods; dry, rain and windstorms called locally with the name of “nortes”, this variation is related with the atmospheric temporality of the Gulf of Mexico. However, due to the influence of continental discharge of the Jamapa River and the urban areas, the reef structures and high evaporation areas, there is local variations, which were recorded throughout the analysis of physicochemical parameters and chlorophyll-a. During the periods of dry and rain (March-September 2011), the water mass of the VRS was stratified from 5 to 15 m, with differences from surface to bottom of up to 12 °C and 8 ups. During the dry season the stratification is related with the temperature (due to solar radiation) and rain. Due to the direct discharges of the Jamapa River it was observed a local variation of the hydrological variables in the coastal zone. In the exposed area of the system which is the deeper area (40 m), the wind is the most important factor of hydrological change in the water column; during the dry season, with southerly winds, there is advective events (> 25 m deep), and during the northern season the wind show a direction from north to south, with higher intensity than during the rest of the year, resulting in a gradient increasing with deep, mainly related with the chlorophyll-a, due the resuspension of sediments, which promotes productivity events.

Keywords: Hydrological variation, Veracruz Reef System.

Índice de Contenido

No. de Página

1. Introducción.....	1
2. Antecedentes.....	3
2.1 Golfo de México.....	3
2.2 Sistema Arrecifal Veracruzano.....	5
3. Pregunta de Investigación.....	8
4. Hipótesis.....	9
5. Objetivos.....	9
5.1 Objetivo General.....	9
5.2 Objetivos Particulares.....	9
6. Materiales y métodos.....	10
6.1 Área de estudio.....	10
6.2 Muestreo.....	11
6.3 Análisis de Información.....	12
7. Resultados.....	14
7.1 Flujo de viento.....	14
7.2 Cambio en la profundidad de la pycnoclina.....	15
7.3 Diagramas T-S.....	17
7.4 Variación de temperatura superficial.....	19
7.5 Variación intermensual de rangos hidrológicos.....	20

7.5.1	Temperatura.....	20
7.5.2	Salinidad.....	21
7.5.3	Densidad.....	22
7.5.4	Oxígeno.....	23
7.5.5	Nitrógeno.....	24
7.5.6	Clorofila-a.....	25
7.6	Análisis de similitud.....	26
7.6.1	Promedio anual por estación de muestreo.....	26
7.7	Variación temporal vertical de los parámetros hidrográficos.....	29
7.7.1	Temperatura.....	29
7.7.2	Salinidad.....	31
7.7.3	Densidad.....	32
7.7.4	Oxígeno.....	33
7.7.5	Nitrógeno.....	34
7.7.6	Clorofila a.....	35
7.8	Variación Horizontal superficial.....	36
7.8.1	Temperatura.....	36
7.8.2	Salinidad.....	42
7.8.3	Densidad.....	48
7.8.4	Oxígeno	55
7.8.5	Nitrógeno.....	61
7.8.6	Clorofila-a.....	66

8. Discusiones.....	71
8.1 Variación intermensual de los parámetros hidrográficos.....	71
8.2 Flujo de viento en el SAV.....	72
8.3 Variación en la profundidad de la pycnoclina	72
8.4 Análisis de disimilitud.....	73
8.5 Temperatura, Salinidad y Densidad.....	74
8.5.1 Temperatura superficial.....	74
8.5.2 Rangos de variación.....	74
8.5.3 Variación en la vertical.....	75
8.6 Oxígeno.....	77
8.7 Nitrógeno.....	79
8.8 Clorofila-a.....	80
8.9 Variación a nivel superficial.....	82
8.9.1 Secas.....	82
8.9.2 Lluvias.....	83
8.9.3 Nortes.....	85
9. Conclusiones.....	87
10. Recomendaciones.....	88
10. Literatura citada.....	89

1. Introducción

En la actualidad se han generado avances significativos en el estudio de las ciencias marinas gracias al desarrollo de teorías y tecnologías en el ámbito de la oceanografía, por ejemplo, instrumentos tales como los termosalinómetros ayudan en la medición de los parámetros hidrológicos de cualquier ecosistema marino. (Emery y Thomson, 2004; Obeso-Niebla *et al.*, 2007; Thorpe, 2007; Boyce *et al.*, 2010). La caracterización de ecosistemas marinos a través de la medición de sus variables hidrológicas ha sido de vital importancia (Sunyé y Servain, 1998), debido a que los rangos de oscilación de los parámetros ambientales, determinan la distribución y biodiversidad de especies (Spalding *et al.*, 2007).

Sobre la plataforma continental se generan el mayor número de procesos hidrográficos en relación a aquellos que ocurren en el océano (Gattuso *et al.*, 1998). Esto es debido a que la zona costera es un ecotono entre el hábitat marino y terrestre, el cual es influenciado por fenómenos de ambos ambientes (Ray y Hayden, 1992; Wollast, 1998). Generando fenómenos como alta productividad o la dilución del agua costera debido a descargas de ríos, entre otros (Ray y Hayden, 1992; Wollast, 1998; Lens, 2001).

La importancia del fitoplancton radica en que son los activadores de las cadenas tróficas, al ser los encargados de la productividad primaria en el océano (Cloern, 1996). El fitoplancton marino fija el CO² disuelto en el agua para elaborar carbohidratos, lípidos, aminoácidos y bases nitrogenadas (Curtis, 1985), produciendo en la actualidad la mitad de la productividad primaria global (Raymont, 1980; Field *et al.*, 1998; Falkowski *et al.*, 2004; Katz *et al.*, 2004; González *et al.*, 2006). Esta producción primaria influye en el rendimiento potencial de los organismos en niveles tróficos mayores, el flujo de carbono entre el océano y la atmósfera y la sedimentación de materia orgánica al suelo marino (Wasmund *et al.*, 2010). Los fenómenos de productividad varían con respecto a la distancia de la costa, aumentando con su cercanía por la influencia de descargas continentales, depositación de polvo por el viento (Müller-Karger y Walsh, 1991; Smith y Hollibaugh, 1993; de la Lanza-Espino 2001; Marín *et al.*, 2004; Boyce *et al.*, 2010), estratificación de la columna de agua (Müller-Karger y Walsh, 1991; Zavala-Hidalgo *et al.*, 2002), espesor de la capa eufótica (Katara *et al.*, 2008), disponibilidad de nutrientes (de la Lanza-

Espino 2001; Katara *et al.*, 2008), cantidad de luz (Signoret *et al.*, 1998; Boyce *et al.*, 2010) y a los eventos de advección o surgencias (Nowlin *et al.*, 1998; Mateos-Jasso *et al.*, 2012).

Raven y Geider (1988), han mencionado que los parámetros ambientales con mayor relevancia ecológica son la temperatura y salinidad. Ya que estos controlan las tasas en las que se realizan procesos biológicos y reacciones químicas como: respiración, crecimiento, motilidad, fotosíntesis, fijación de carbono, nutrientes, osmosis, etc. (Raven y Geider 1988; Litchman y Klausmeier, 2008). Además de determinar parcialmente las concentraciones de gases disueltos como el dióxido de carbono y el oxígeno (Mann y Lazier 1996, Lalli y Parsons 1997, Mann 2000).

El Sistema Arrecifal Veracruzano (SAV), es un ecosistema en el cual se han registrado características ambientales particulares que se salen del contexto establecido para los arrecifes coralinos tropicales (Salas-Pérez y Granados-Barba, 2008); sin embargo la variabilidad espacio-temporal a escala local de los parámetros hidrológicos no ha sido suficientemente documentada y las investigaciones dirigidas a comprender procesos biofísicos son casi nulas (Carrillo *et al.*, 2007; Salas-Pérez y Granados-Barba, 2008). La mayoría de la información con que se cuenta actualmente se encuentra a una escala espacial inadecuada para estudiar los procesos hidrográficos (Jiménez-Hernández *et al.*, 2007; Monreal-Gómez *et al.*, 2004) y aquellos trabajos realizados de forma local se basan en mediciones indirectas para elucidar el efecto de los ríos sobre los arrecifes (Krutak, 1997; Okolodkov *et al.*, 2011).

El presente estudio tiene la finalidad de describir la variación hidrológica de forma espacio-temporal en el SAV. Mediante el registro de temperatura, salinidad, densidad, oxígeno, nitrógeno y clorofila-a, a nivel superficial (1 y 5 metros) y de fondo en tres diferentes zonas (frente a la desembocadura del Río Jamapa, al sur del arrecife Cabezo y al norte del arrecife de Anegada de Adentro). Los análisis de variación espacio-temporal se realizaron mediante análisis estadísticos multivariados, para encontrar tendencias de correlación entre variables ambientales y biológicas.

2. Antecedentes

2.1 Golfo de México

El Golfo de México (GoM) es considerado un gran ecosistema marino (Zavala-Hidalgo *et al.*, 2002) con características ecológicas resultantes de la combinación de medio ambientes tropicales y templados (Monreal-Gómez *et al.*, 2004; Spalding *et al.*, 2007). En él se reconocen tres ecoregiones: la del Norte del Golfo de México, ubicada sobre la plataforma de Luisiana y Texas, la de Florida, sobre la Plataforma del estado de Florida y la del Sur del Golfo de México, que comprende las plataformas de Tamaulipas Veracruz (TAVE) y el banco de Campeche (Tabasco, Campeche y Yucatán) (Zavala-Hidalgo *et al.*, 2003; Spalding *et al.*, 2007).

La cuenca del GoM presenta variación temporal en sus flujos de viento (Zavala-Hidalgo *et al.*, 2002). Caracterizada por tormentas tropicales durante el verano (de las cuales el 60% alcanza la intensidad de huracán (Zavala-Hidalgo *et al.*, 2002; Salas-Pérez *et al.*, 2012) y durante el invierno se ve influenciada por masas de aire frío y seco provenientes del norte del continente (Canadá, Estados Unidos de América y México), que al encontrarse con las masas de aire del GoM (de origen marítimo y tropical) provocan fuertes frontogénesis (ráfagas > 100 km/h) y descenso de temperatura, principalmente de octubre a marzo (Tapánes y González-Coya, 1980; Zavala-Hidalgo *et al.*, 2002; Morey *et al.*, 2006; Dubranna *et al.*, 2011; Salas-Pérez *et al.*, 2012).

Zavala Hidalgo *et al.* (2002), mencionan que el GoM presenta una temperatura superficial de 28 a 29 °C durante el verano, con un incremento en las aguas superficiales de noroeste a sureste de hasta 5 °C, debido a la intromisión de la Corriente del Lazo. El aumento en la temperatura del GoM es mayor de marzo a septiembre, llegando a alcanzar valores de hasta 30 °C (Zavala-Hidalgo *et al.*, 2002). En invierno la temperatura superficial disminuye hasta los 19 o 20 °C, resultado de la interacción con vientos fríos provenientes del norte, que ponen resistencia a las aguas cálidas procedentes del sureste, las cuales en su trayectoria hacia el noroeste, transmiten su calor a la atmósfera (Nowlin y McLellan, 1967; Expósito-Díaz *et al.*, 2009). Siendo el mes de noviembre cuando se registra la mayor transferencia de calor, provocado por el aumento en los vientos con flujo de noreste a suroeste (Biggs, 1992; Zavala-Hidalgo *et al.*, 2002; Salas-Pérez y Arenas-Fuente, 2011).

Müller-Karger y Walsh (1991), señalan que de julio a septiembre la temperatura superficial de las regiones oeste y este del GoM, tienen una temperatura similar >29 °C, pero de diciembre a abril la región del este presenta ~ 4 °C más que la región oeste, debido a que las aguas de la región oeste están más alejadas de la influencia de la Corriente del Lazo y sus temperaturas mínima y máxima se mantienen durante periodos más prolongados, en comparación a las aguas del este. Las altas temperaturas en la región este se deben a la continua intromisión de las aguas cálidas del Caribe hacia el GoM (Weatherly *et al.*, 2003; Vázquez-de-la-Cerda, 2004).

El agua típica del GoM presenta una salinidad de 36.5 ups, producto de la mezcla del Agua Subtropical Subsuperficial (36.6 ups) (Biggs, 1992; Weatherly *et al.*, 2003; Vázquez de la Cerda *et al.*, 2006). Las bajas salinidades de las aguas costeras están asociadas a descargas de los estuarios, como producto de la dilución entre las aguas marinas y continentales (de la Lanza-Espino y Gómez-Rojas, 2004). La salinidad en el GoM durante el invierno es menor en su zona norte (32.1 ups) debido a las descargas del Río Mississippi (Nowlin y McLellan, 1967) y las mayores concentraciones de salinidad se registran en la plataforma de Campeche con valores que llegan a alcanzar los 36.4 a 36.6 ups (Nowlin, 1971).

Dentro del GoM el contenido de oxígeno es uniforme en la capa superficial de mezcla (de 0 a 150 m de profundidad) con 4.5 ml/l, misma concentración que se observa en la plataforma de Campeche, Veracruz y el Caribe (Biggs, 1992). La zona más grande de aguas costeras con poco oxígeno en el GoM se encuentra en la parte norte, sobre la plataforma continental de Louisiana/Texas, presentando valores menores a los 2 ml/l, estos valores prevalecen desde la primavera hasta finales de verano, distribuyéndose desde los 5 hasta los 60 m, desapareciendo durante invierno debido a la mezcla producida por el viento (Biggs, 1992; Díaz y Rosenber, 1995; Signoret *et al.*, 1998; Signoret *et al.*, 2006; Rabalais y Turner, 2001; Rabalais, 2004). Con respecto al territorio Mexicano, el único lugar mencionado en que se ha presentado hipoxia es la laguna de Nichupté-Bojorquez, en Cancún, debido a la carga excesiva de materia orgánica y sobrepoblación algal (Monreal-Gómez *et al.*, 2004).

De acuerdo con Walsh *et al.* (1989), el factor que controla la variación estacional de la concentración de clorofila-a en las aguas del GoM es la profundidad de la capa de mezcla y la

disponibilidad de nutrientes. En el GoM los mayores valores de productividad primaria se presentan de octubre a marzo asociados al desarrollo de vientos fuertes provenientes del norte. Así mismo, en la parte norte del GoM las fluctuaciones de clorofila-a están relacionadas con las descargas de los ríos los cuales aumentan sus descargas durante el periodo de lluvias (julio a septiembre) (Soto y Escobar, 1995).

El contenido mínimo superficial de clorofila-a se ubica en la región oceánica (0.03 mg/m^3) y los máximos (5 mg/m^3) en la zona costera frente a la desembocadura de los ríos en los estados de Texas, Veracruz y Tabasco (Martínez-López y Zavala-Hidalgo, 2009). En la plataforma de Yucatán, se han registrado contenidos de 1.61 mg/m^3 y zonas de afloramiento con 4.24 mg/m^3 de clorofila-a en la superficie, mientras que en la porción centro del GoM se registran valores de 0.4 a 0.7 mg/m^3 a 20 m de profundidad (Signoret *et al.*, 1998; Signoret *et al.*, 2006).

2.2 Sistema Arrecifal Veracruzano

El SAV se ha desarrollado en un ecosistema terrígeno influenciado por la desembocadura de tres ríos, los cuales ejercen una importante variación en la salinidad (Krutak, 1997; Withers y Tunnell, 2007). El Río Jamapa desemboca en medio del complejo arrecifal, con descargas de hasta $180 \text{ m}^3/\text{s}$ en el periodo de lluvias (julio-octubre) (CONAGUA, 2006), la disminución de salinidad, así como la materia orgánica acarreada por dicho río, limita el desarrollo de las colonias de coral al centro del sistema (Krutak, 1997; Salas-Pérez y Granados-Barba, 2008). El Río La Antigua limita el desarrollo del sistema hacia la parte norte y el Río Papaloapan limita el desarrollo del sistema hacia el sur (Tamayo, 1999). Llegándose a registrar en el SAV valores de salinidad entre los 29 a 34 ups así como cambios en la temperatura del agua de 20 a $33.5 \text{ }^\circ\text{C}$ (Hernández-Téllez y Salgado-Rivero 1996; Salas-Monreal *et al.*, 2009).

Los factores forzantes de la temporalidad atmosférica del GoM, influyen la climatología del SAV (Zavala-Hidalgo *et al.*, 2003; Morey *et al.*, 2006; Dubranna *et al.*, 2011). Donde se tienen tres periodos, “secas” en primavera, “lluvias” en verano y otoño, con algunas tormentas tropicales y huracanes y, durante otoño e invierno inciden vientos predominantemente del norte

con ráfagas >120 km/h, conocidos localmente con el nombre de “nortes” (Gutiérrez-de-Velasco y Winant, 1996; Zavala-Hidalgo *et al.*, 2003).

Durante el periodo de “nortes” el viento ejerce mayor mezcla en la columna de agua sobre la plataforma continental de Veracruz (la cual tiene alrededor de 40 km de ancho) (Zavala-Hidalgo *et al.*, 2002; Dubranna *et al.*, 2011; Mateos-Jasso *et al.*, 2012), lo cual modifica la posición de la termoclina e influye en la circulación hidrológica de forma general (Monreal-Gómez *et al.*, 2004).

El SAV se desarrolla en aproximadamente 33 km lineales de distancia a la costa sobre la plataforma continental (Mateos-Jasso *et al.*, 2012), en un área de hasta 40 m de profundidad (Tunnell *et al.*, 2007), debido a esta característica podría pensarse que la dirección de las corrientes es la misma que la dirección de los vientos. Sin embargo las estructuras coralinas agregan complejidad estructural y funcionan como barreras físicas que causan rectificación de la corriente (Salas-Monreal *et al.*, 2009). Favoreciendo con ello la formación de giros en el sistema, lo cual eventualmente modifica la posición de la picnoclina dependiendo de las áreas de convergencia y divergencia (Salas-Monreal *et al.*, 2009; Salas-Pérez *et al.*, 2012).

Las corrientes en el SAV, además suelen verse influenciadas por el giro de Campeche durante verano y otoño, cuando la circulación a meso escala interactúa con las descargas de los ríos, generando características locales en el movimiento del agua en el sistema, resultando en un mecanismo eficiente para el intercambio de propiedades físicas y biogeoquímicas entre el mar abierto y la zona costera (Aldeco *et al.*, 2009; Salas-Pérez *et al.*, 2012).

Esta temporalidad y condición geográfica, generan características particulares al medio ambiente, las cuales varían en el tiempo (Zavala-Hidalgo *et al.*, 2003; Morey *et al.*, 2006; Dubranna *et al.*, 2011). Por ejemplo, la incidencia de los ríos locales suele ser diferenciada durante el transcurso del año (Krutak, 1997).

El Río Jamapa tiene influencia durante todo el año sobre el SAV con mayor efecto en la zona centro durante el periodo de lluvias (Krutak, 1997; Okolodkov *et al.*, 2011); sin embargo durante el invierno cuando las corrientes van hacia el sur, el río puede incidir sobre el sistema frente a

Antón Lizardo (zona sur) y durante el verano cuando las corrientes van hacia el norte, su influencia se observa frente a Boca del Río (zona norte). Mientras que la descarga del Río La Antigua incide sobre la parte norte del sistema frente al puerto de Veracruz durante otoño e invierno. Finalmente el Río Papaloapan incide sobre el subsistema frente a Antón Lizardo durante el verano cuando las corrientes van hacia el norte (Krutak, 1997; Salas-Pérez y Granados-Barba, 2008).

Hernández-Téllez y Salgado-Rivero (1996), identificaron dos masas de agua para esta zona. Una es la masa de agua costera (34-36.5 ups y 21-29 °C) resultante de la mezcla del agua común del GoM y las aguas cercanas a la costa, y la segunda es la masa de agua diluida (29-34 ups y 27-33.5 °C), resultante de la mezcla de las descargas de los ríos y la masa de agua costera.

Okolodkov *et al.* (2011), mencionan que de abril de 2007 a mayo de 2008, el periodo con mayor registro de temperatura fue durante mayo a octubre y el periodo con menor temperatura fue de noviembre a marzo, siendo homogénea la distribución espacial de temperatura en el sistema.

Salas-Monreal *et al.* (2009), describieron que esta zona presenta características baroclínicas durante lluvias, con una estratificación continua en la columna de agua y gradiente de temperatura y salinidad de 0.4 °C m⁻¹ y 0.5 ups m⁻¹ respectivamente, con rangos de 25 a 29.5 °C, y 32 a 39 ups desde la superficie hasta el fondo. Los valores altos de salinidad (>34 ups) son producidos por las áreas de alta evaporación generadas por los arrecifes de coral más cercanos a la zona conurbana de Veracruz-Boca del Río. Durante este mismo período, la haloclina y la termoclina fueron observadas sobre los 5 m como valor promedio. Los datos de temperatura superficial obtenidos con un ADCP, mostraron la presencia de un par de giros, uno ciclónico y uno anticiclónico entre los dos grupos de colonias de corales, producidos por el corte de velocidad originado por la saliente geomorfológica de Antón Lizardo.

Se ha descrito que los volúmenes planctónicos en el SAV presentan variación durante el transcurso del año (Okolodkov *et al.*, 2011; Salas-Pérez *et al.*, 2012). Los valores mínimos se presentan durante el periodo de secas (primavera), incrementando durante lluvias (verano) debido al aporte de materia por los ríos Jamapa y Papaloapan y, las concentraciones más elevadas se presentan durante invierno, característica que está relacionada con el incremento en las

velocidades del viento que generan mezcla en la columna de agua, provocando que los nutrientes del fondo se pongan a disposición de los organismos fitoplanctónicos (Salas-Monreal *et al.*, 2009; Okolodkov *et al.*, 2011; Salas-Pérez *et al.*, 2012).

Tras haber realizado un análisis de las investigaciones sobre aspectos hidrográficos a nivel local, Salas-Pérez y Granados-Barba (2008) mencionan que: “La circulación del SAV es resultado de la interacción de diferentes componentes de la circulación y procesos atmosféricos, que tienen efecto en la generación de gradientes de propiedades escalares, los cuales pueden afectar a la comunidad coralina del SAV”.

Para comprender los procesos clave de variación oceanográfica y físico-química de forma local, es necesario obtener datos de forma temporal de los valores de parámetros hidrológicos en diferentes zonas del sistema (Salas-Pérez *et al.*, 2012). Es por eso que, con la finalidad de conocer aspectos sobre las condiciones físico-químicas del sistema arrecifal, se realiza la descripción de la variación espacio-temporal de forma intermensual, de seis parámetros hidrológicos en el SAV. Lo cual proveerá información científica que ayudará en el conocimiento de cuáles podrían ser algunas adaptaciones que deben desarrollar los organismos para su supervivencia.

3. Pregunta de Investigación

- ¿Cómo es la variación espacio-temporal de: temperatura, salinidad, densidad, oxígeno, nitrógeno y clorofila-a, en el Sistema Arrecifal Veracruzano a lo largo de un año?

4. Hipótesis

- Si las características oceanográficas y meteorológicas del Sistema Arrecifal Veracruzano generan una variación de sus condiciones hidrológicas respecto a las del Golfo de México, entonces esta variación podrán ser registrada de forma intermensual en diferentes puntos del sistema arrecifal.

5. Objetivos

5.1 Objetivo General

- Analizar la variación espacio-temporal de forma intermensual de los parámetros temperatura, salinidad, densidad, oxígeno (O^2), nitrógeno (N^2) y clorofila-a, de forma superficial y en la columna de agua en tres zonas del Sistema Arrecifal Veracruzano (norte, centro y sur).

5.2 Objetivos Particulares

- Determinar las características hidrológicas SAV de acuerdo a la variación espacio-temporales de: temperatura, salinidad, densidad, oxígeno, nitrógeno y clorofila-a en el SAV.
- Analizar la variación mensual en la vertical de los seis parámetros hidrológicos en tres zonas distintas del SAV (norte, centro y sur).
- Conocer la variación espacio-temporal de forma superficial (a uno y cinco metros) en el SAV.

6. Materiales y métodos

6.1 Área de estudio

El Sistema Arrecifal Veracruzano se localiza al suroeste del Golfo de México, frente a los municipios de Veracruz, Boca del Río y Alvarado en el Estado de Veracruz, México. Cuenta con una extensión de 52,238 Ha (DOF, 1992), está constituido por 23 estructuras coralinas orientadas en dirección noroeste-sureste (Juárez-Sarvide *et al.*, 1991) y sus coordenadas geográficas son $19^{\circ} 02' 03''$ y $19^{\circ} 15' 18''$ Norte y $-95^{\circ} 46' 41''$ y $-96^{\circ} 11' 16''$ Oeste, (Fig. 1) (DOF, 1992). Debido a su relevancia ecológica, fue decretado como Parque Marino Nacional el 24 de agosto de 1992, (DOF, 1992; Salas-Pérez y Granados-Barba, 2008), como sitio RAMSAR en el 2004 y en el 2006 como reserva de la biosfera por la UNESCO (Tunnell *et al.*, 2007). Además este sistema está conectado con otros hábitats costeros, como el Río Jamapa, Laguna de Mandinga, el Río La Antigua y el Río Papaloapan (Tamayo, 1999).

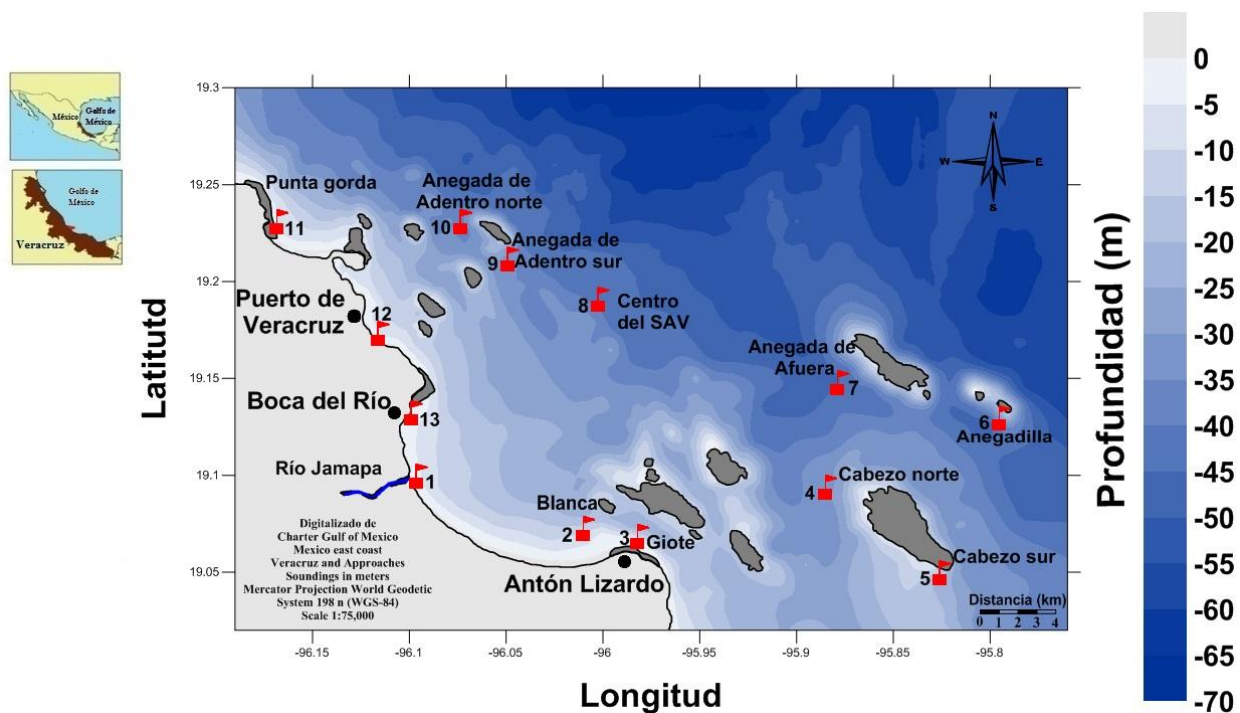


Figura 1. Localización geográfica del Sistema Arrecifal Veracruzano y estaciones de muestreo.

6.2 Muestreo

Para la medición de los parámetros hidrológicos, se realizó una salida mensual de marzo de 2011 a marzo de 2012 (a excepción del mes de julio y, durante el mes de agosto se realizaron 2 muestreos), registrando los valores presentes de: temperatura, salinidad, densidad, oxígeno, nitrógeno y clorofila-a en el SAV. Los muestreos se realizaron a bordo de la embarcación “CEPIA” del Instituto de Ciencias Marinas y Pesquerías (ICIMAP) de la Universidad Veracruzana.

Los parámetros hidrológicos fueron registrados en 13 estaciones de muestro (Fig. 1; Tabla 1), cubriendo las fronteras del SAV en un lapso de tiempo no mayor a 6 horas. El registro de los parámetros ambientales se realizó mediante un perfilador CTD (conductividad-temperatura-profundidad) *Seabird* Term19plusV2, con interface RS-232. El cual capturó información en intervalos de 2 Hz o 0.5 segundos, con una velocidad de descenso promedio de un metro por segundo.

Tabla 1. Coordenadas geográficas de las estaciones de muestreo en el Sistema Arrecifal Veracruzano.

No.	Estaciones	Latitud Norte	Longitud Oeste
1	Bocana Jamapa	19° 05' 58.4''	-96° 05' 42.8''
2	Blanca	19° 04' 21.6''	-96° 00' 32.0''
3	Giote	19° 04' 06.7''	-95° 58' 52.5''
4	Cabezo Norte	19° 05' 36.8''	-95° 53' 02.3''
5	Cabezo Sur	19° 02' 58.5''	-95° 49' 29.4''
6	Anegadita	19° 07' 47.5''	-95° 47' 29.4''
7	Anegada de Afuera	19° 08' 52.0''	-95° 52' 39.8''
8	Centro del SAV	19° 11' 27.2''	-96° 00' 05.0''
9	Sur de Anegada de Adentro	19° 12' 41.0''	-96° 02' 52.8''
10	Norte de Anegada de Adentro	19° 13' 51.6''	-96° 04' 20.9''
11	Punta Gorda	19° 13' 51.8''	-96° 10' 03.2''
12	Veracruz	19° 10' 24.2''	-96° 06' 53.5''
13	Boca del Río	19° 07' 56.8''	-96° 05' 52.7''

6.3 Análisis de Información

Para observar la influencia del viento en el SAV se elaboró un análisis de astillas de viento para cada mes de muestreo, en el cual se representa la dirección y magnitud del viento de cinco días (cuatro días antes y el día de muestreo). Este análisis fue elaborado mediante el programa MATLAB 2011, y los datos fueron obtenidos de la estación meteorológica ubicada en Isla de Sacrificios frente al puerto de Veracruz. Los equipos pertenecen al Centro Nacional de Datos de Boyas (NDBC) de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA), los cuales están transmitiendo en tiempo real datos meteorológicos (C-MAN) con un intervalo de una hora por registro. Estos datos son de acceso público en la siguiente liga: http://www.ndbc.noaa.gov/maps/West_Caribbean.shtml

Con el fin de conocer los rangos de variación intermensual de los parámetros hidrológicos en el SAV, se agruparon los valores observados en las 13 estaciones de muestreo y se desarrollaron diagramas *Boxplot* graficando los valores máximo, 3er cuartil, mediana, 1er cuartil y mínimo. Utilizando los valores agrupados de las variables temperatura y salinidad, se graficaron diagramas T-S para conocer la estratificación presente en la columna de agua de forma intermensual utilizando el programa SeaBird del CTD.

Se realizó un análisis de la temperatura superficial registrada por satélites de la *Woods Hole Oceanographic Institution* (WHOI) en su programa *Objectively Analyzed air-sea Fluxes (OAFlux) for the Global Oceans*. Los datos fueron tomados de las coordenadas 20 ° N, -95.625 ° E, a 104.4 Km de distancia al puerto de Veracruz, para realizar una comparación con los datos tomados durante el tiempo de muestro. El análisis fue desarrollado mediante el programa GOTM-GUI (*General Ocean Turbulence Model*), y los datos oceanográficos y atmosféricos de la WHOI fueron descargados del siguiente link:

<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis2.gaussian.html>

Para cada una de las estaciones de muestreo se construyeron perfiles verticales de densidad con datos mensuales, con la finalidad de obtener la profundidad de la piconclina en cada punto de muestreo. La piconclina fue calculada a la profundidad en donde la temperatura y la salinidad cambian en al menos una unidad respecto al punto anterior ($\Delta 0.5$ m). Utilizando el valor de la

profundidad de la picnoclina se elaboraron perfiles horizontales del cambio espacio-temporal en la profundidad de la picnoclina.

Los registros de cada una de las variables hidrológicas fueron agruparon por estación de muestreo, durante los 13 meses de estudio, a fin de calcular el valor promedio anual por estación. El cual fue utilizado para desarrollar un análisis de clasificación clúster de disimilitud entre las estaciones. La base de datos fue transformada a logaritmo natural para su estandarización y el análisis se corrió mediante el método de *Ward's* o mínima varianza y una función euclidiana, para obtener una escala de 1 a 0, en donde 1 significa 100 % de disimilitud y 0 el 0 % de disimilitud. Para corroborar los resultados obtenidos en el clúster se desarrolló un análisis PCA (*Parametric Correlation Analysis*) para conocer la correlación entre variables y entre estaciones. Los análisis multivariados fueron desarrollados mediante el programa de *Community Analysis Package* (CAP 3).

Usando como herramienta el análisis de clasificación, se eligieron tres estaciones que representaran a tres zonas diferentes del SAV (norte, centro y sur). Estas estaciones fueron utilizadas para analizar la variación espacio-temporal en la columna de agua, con la finalidad de conocer los cambios que se producen en la vertical al paso del tiempo. Este análisis fue elaborado con el software Surfer 9 mediante una función lineal y el método de *Krigin*. Obteniendo imágenes que muestra en el eje de las “x” el tiempo y en el eje de las “y” la profundidad.

Para cada estación de muestreo por mes, se obtuvo el valor registrado a 1 y 5 metros de profundidad de las seis variables hidrológicas estudiadas. Los valores se utilizaron para generar perfiles de variación horizontal superficial de forma intermensual y así evidenciar el cambio espacio-temporal a nivel superficial del SAV. Los análisis fueron elaborados mediante el programa Surfer 9, empleando como cálculo estadístico el análisis de interpolación lineal por el método de *natural neighbor*. Los análisis realizados con el programa Surfer 9, arrojan un historial estadístico el cual menciona la representatividad de los resultados, eligiéndose aquellas imágenes con una confiabilidad mayor al 80 % para su descripción, ya que en la interpolación, no se consideran los arrecifes intermedios.

7. Resultados

7.1 Flujo de viento

En el análisis de la magnitud del viento (Fig. 2), realizado con los datos provenientes de la estación meteorológica de la NOAA, muestran que de marzo a octubre de 2011, la dirección del viento fue principalmente de sur a norte, con intensidades no mayores a los 5 m s^{-1} .

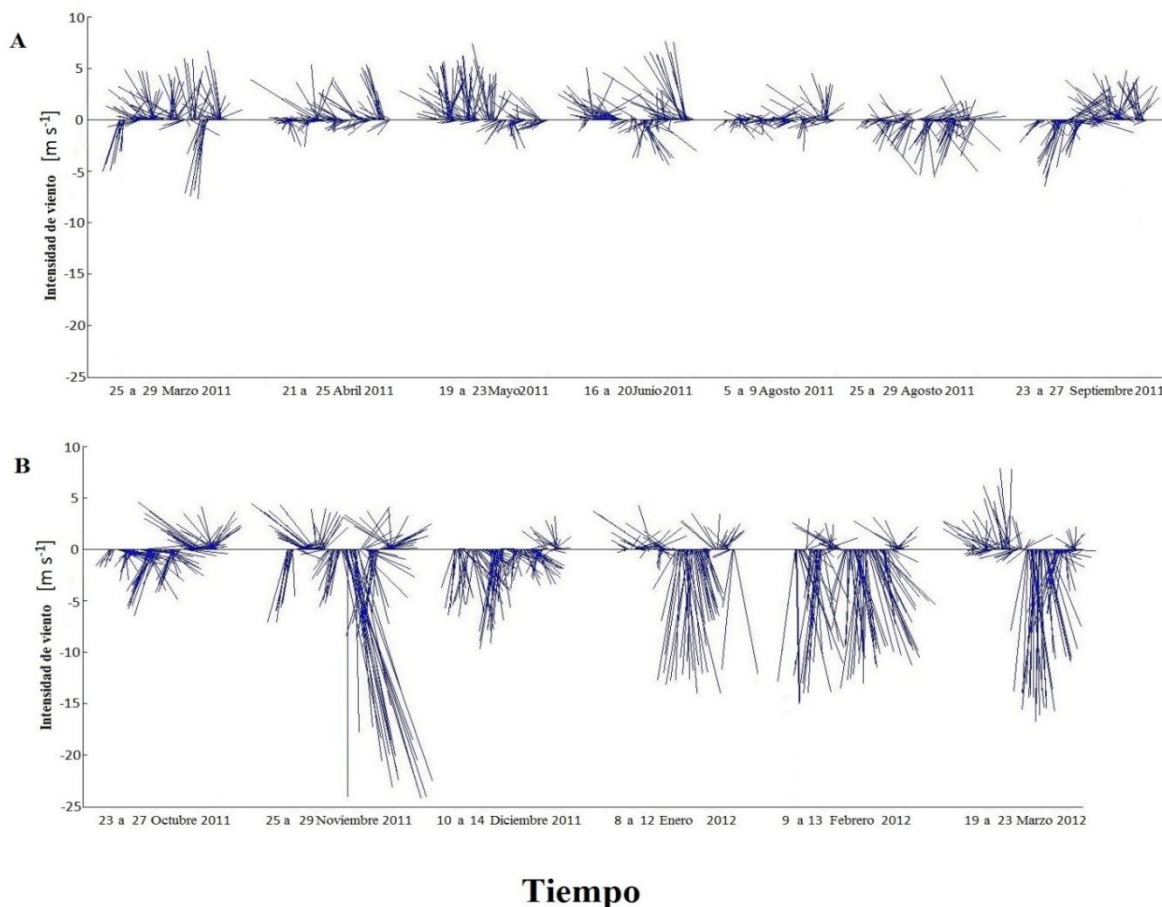


Figura 2. Análisis de estacas de viento para los distintos meses de muestreo de marzo de 2011 a marzo de 2012. (A) Periodo de vientos predominantes del sur, (B) periodo de vientos predominantes del norte.

De agosto a octubre se comenzaron a registrar incidencias de vientos con dirección del norte, viento del noroeste y a partir de noviembre de 2011 a marzo de 2012, el flujo de viento fue

predominante del norte, siendo noviembre el mes que presentó la mayor magnitud de flujo de viento alcanzando los 24 m s^{-1} . En el SAV la componente principal del viento es paralela a la costa (norte-sur), con intensidades de hasta 25 m/s^{-1} y un promedio de 4.7 m/s^{-1} durante los periodos de muestreo.

7.2 Cambio en la profundidad de la piconclina

La profundidad de la piconclina en El SAV vario notoriamente de forma espacio-temporal. En el período de marzo a junio (Fig. 3). Se puede observar una piconclina a no más de 10 m de profundidad, con lo cual podría pensarse en una estratificación superficial a esa profundidad, sin embargo existen zonas de variación local; por ejemplo, en el mes de mayo (Fig. 3), se formó un giro anticiclónico en la zona sur del sistema. En agosto y octubre (Fig. 4), se registraron los primeros efectos de los “nortes”, siendo más evidente en el mes de octubre al mostrarse un incrementos en la profundidad de la piconclina al sur y en la parte expuesta del medio del SAV se formo un giro anticiclónico. En noviembre (Fig. 5), inician los “nortes”, los cuales homogenizan la columna de agua del sistema, ya que a partir de ese mes y hasta marzo de de 2012 la piconclina está relacionada con la batimetría debido a la mezcla producida por el viento, más que a una diferencia hidrológica.

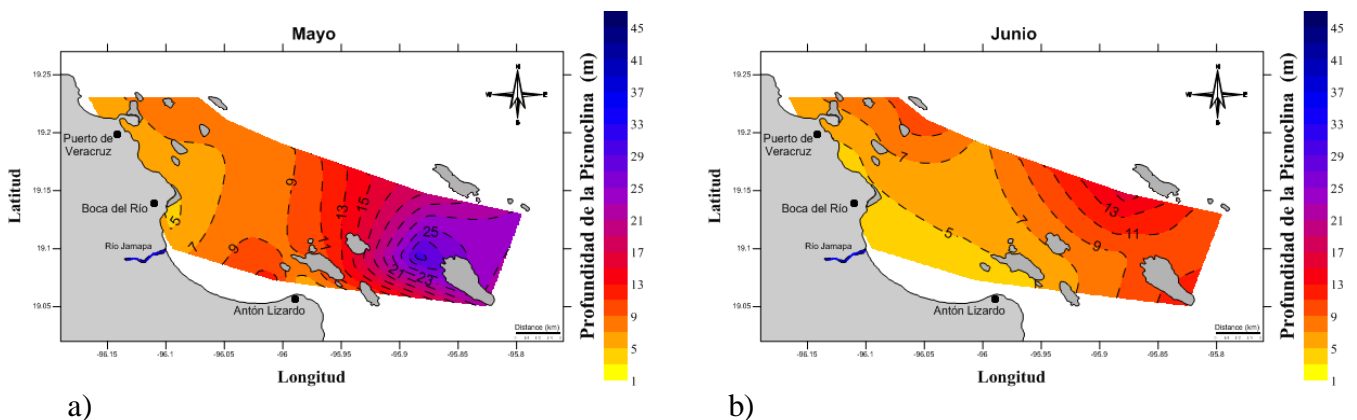


Figura 3. Variación intermensual de la profundidad de la piconclina en el SAV para los meses del periodo de secas, (a) marzo y (b) junio de 2011.

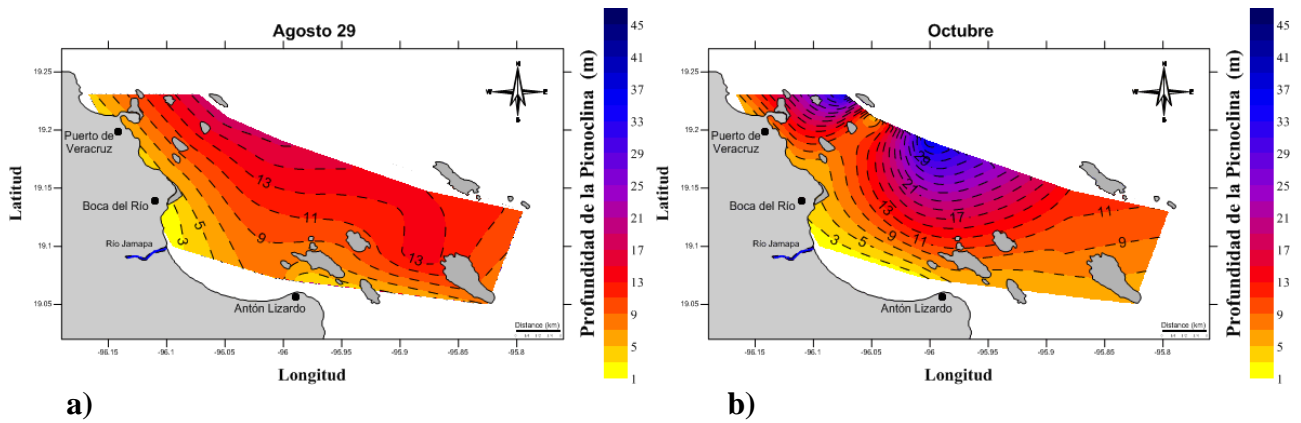


Figura 4. Variación intermensual de la profundidad de la piconclina en el SAV para los meses del periodo de lluvias, (a) 29 de agosto y (b) octubre de 2011.

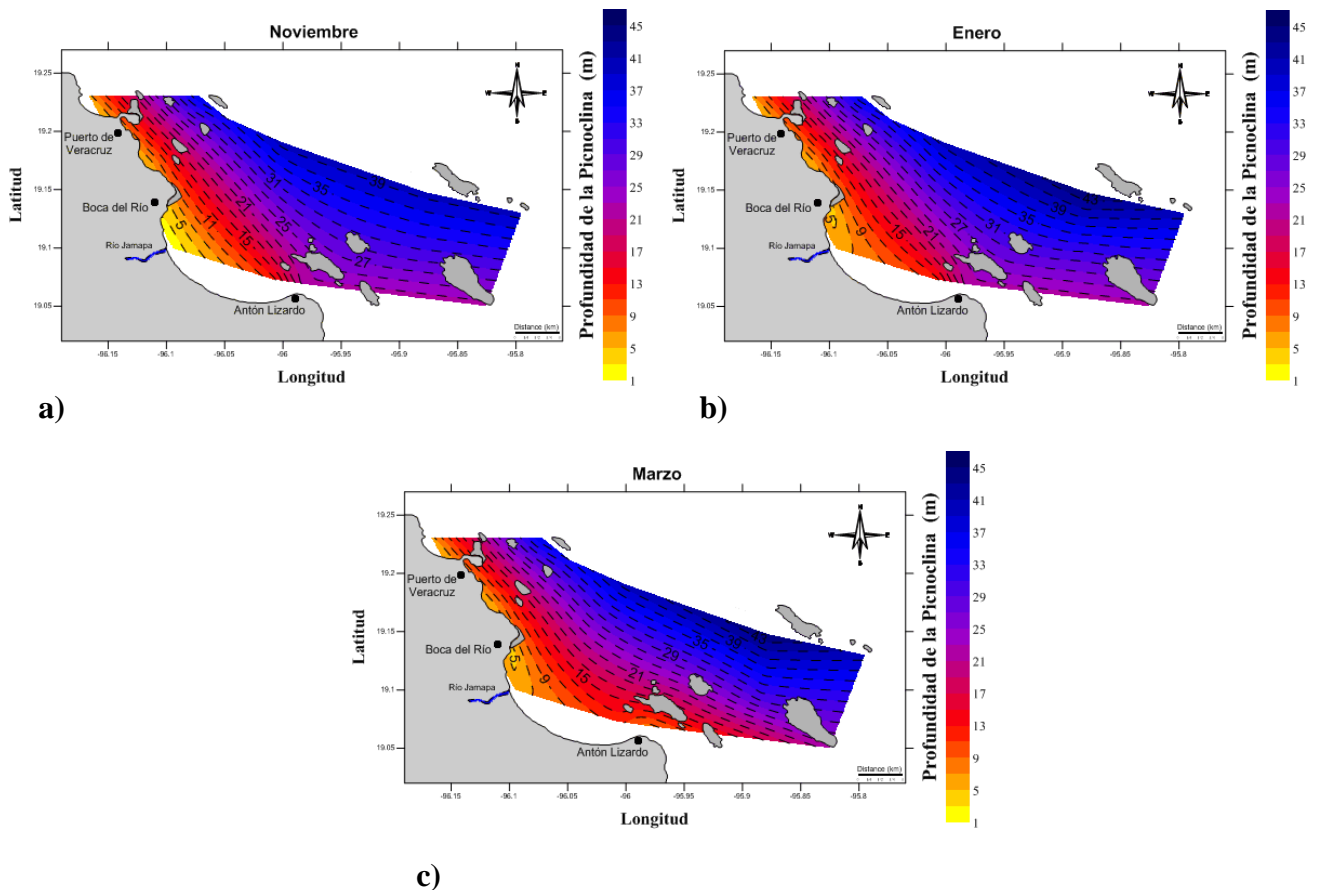


Figura 5. Variación intermensual de la profundidad de la piconclina en el SAV para los meses del periodo de nortes, (a) noviembre de 2011, (b) enero y (c) marzo de 2012.

7.3 Diagramas T-S

Se observó un cambio en la estratificación de la columna de agua en el SAV con el transcurso de los meses, presentándose tres periodos, secas, lluvias y nortes. Durante secas (marzo-junio 2011) se registraron valores que fluctúan entre los 19 y 30 °C y entre los 34 y 37 ups (Fig. 6). Durante este periodo se observa estratificado el sistema por temperatura en la columna de agua, en marzo de 2011 además se observa una estratificación en salinidad, sin embargo esta se va perdiendo con forme transcurren los meses (Fig. 6).

Los muestreos realizados durante lluvias (agosto-octubre de 2011) arrojan valores que presentan intervalos de variación entre los 21 a 32 °C y 28.5 a 37 ups (Fig. 7). Apreciándose una estratificación por salinidad además de temperatura; en el mes de agosto fue registrada la temperatura más alta y octubre presentó una estratificación en salinidad pero no una marcada de temperatura (Fig.7).

Durante nortes (noviembre 2011 - marzo 2012) el SAV presenta intervalos de variación que van de los 22 a 26.2 °C y de los 34.5 a 36.8 ups (Fig. 8). El periodo de nortes, se registró a partir del mes de noviembre de 2011 hasta marzo de 2012. Al graficar los valores presentes en la columna de agua podemos observar que forman conglomerados, señal de mezcla del agua en el SAV (Fig. 8), aunque cierto número de valores en los diferentes meses presentan separación hacia una mayor temperatura o menor salinidad.

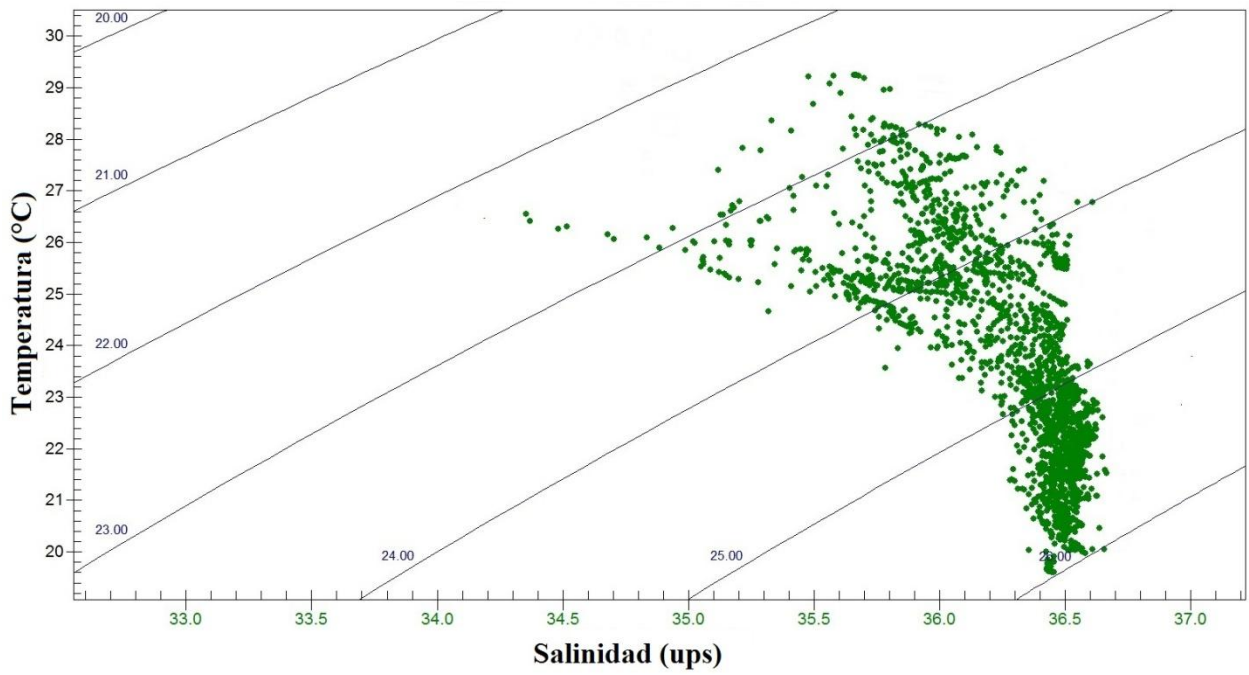


Figura 6. Diagramas T-S para el periodo de secas en el SAV.

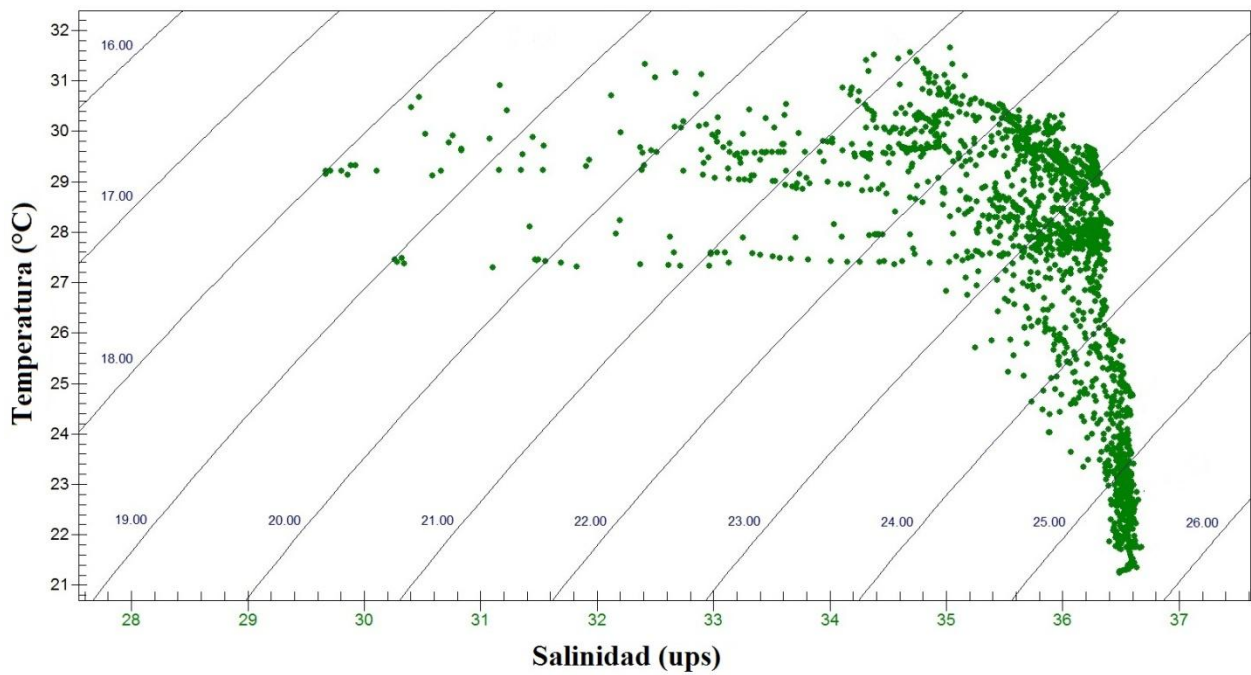


Figura 7. Diagramas T-S para el periodo de lluvias en el SAV.

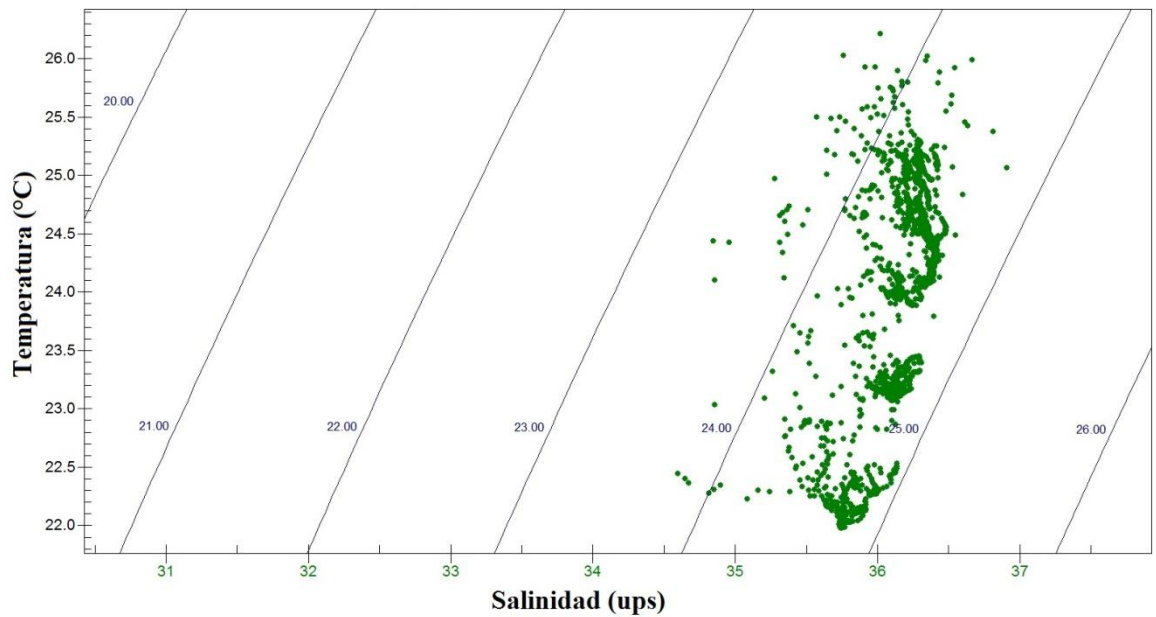


Figura 8. Diagramas T-S para el periodo de lluvias en el SAV.

7.4 Variación de temperatura superficial (TSS)

La TSS del mar a 104 km del SAV, aumento de 25.8 a 30.4 °C de marzo a septiembre de 2011(Fig. 9), y partir del mes de octubre de 2011 la temperatura superficial comienza a descender hasta los 23.8 °C hasta febrero de 2012, siendo la tasa de enfriamiento más pronunciada que la de calentamiento.

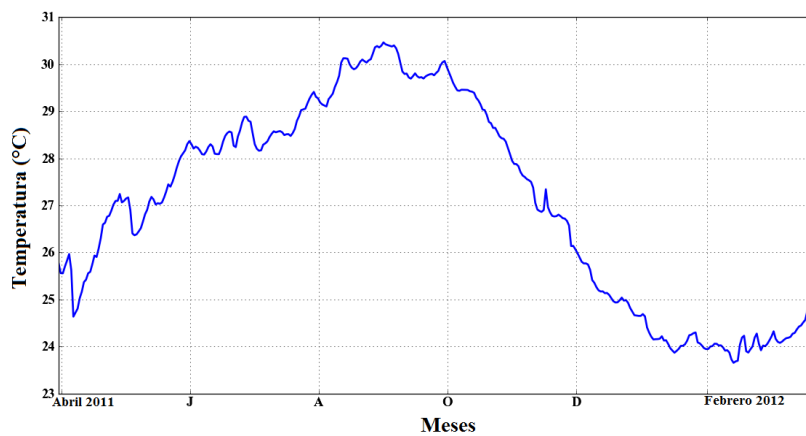


Figura 9. Variación de temperatura superficial del mar en los 20 °N y -95.625 °E. Registros del 29 de marzo de 2011 al 23 de marzo de 2012.

7.5 Variación intermensual de rangos hidrológicos

El análisis de variación intermensual mediante gráficas de *boxplot*, da como resultado una variación con tres periodos en el sistema arrecifal: secas de marzo a junio de 2011, lluvias de agosto a octubre de 2011 y nortes de noviembre de 2011 a marzo de 2012, para las variables de temperatura, salinidad y densidad. Las variaciones locales fueron observadas en el análisis de los parámetros oxígeno, nitrógeno y clorofila-a.

7.5.1 Temperatura

La variable temperatura (Fig. 10), muestra un rango de fluctuación anual que va de los 19.6 a 32 °C. Durante secas se presenta un rango que va de 19.6 a 30 °C; es posible notar un incremento en los valores de temperatura así como en el rango de variación a partir del mes de junio el cual continúa incrementándose hasta agosto. El periodo de lluvias presentó un rango de oscilación entre los 21.2 y 31.8 °C, en septiembre los valores máximos de temperatura comienzan a disminuir, y el rango entre el valor máximo y el mínimo también incrementa. A partir de octubre de 2011 y hasta marzo de 2012, la amplitud del rango de oscilación de temperatura disminuye, llegándose a observar hasta una diferencia menor de 2 °C entre su valor máximo y mínimo en el mes de febrero de 2012. El periodo de nortes registró valores de temperatura entre los 22 a 26.2 °C.

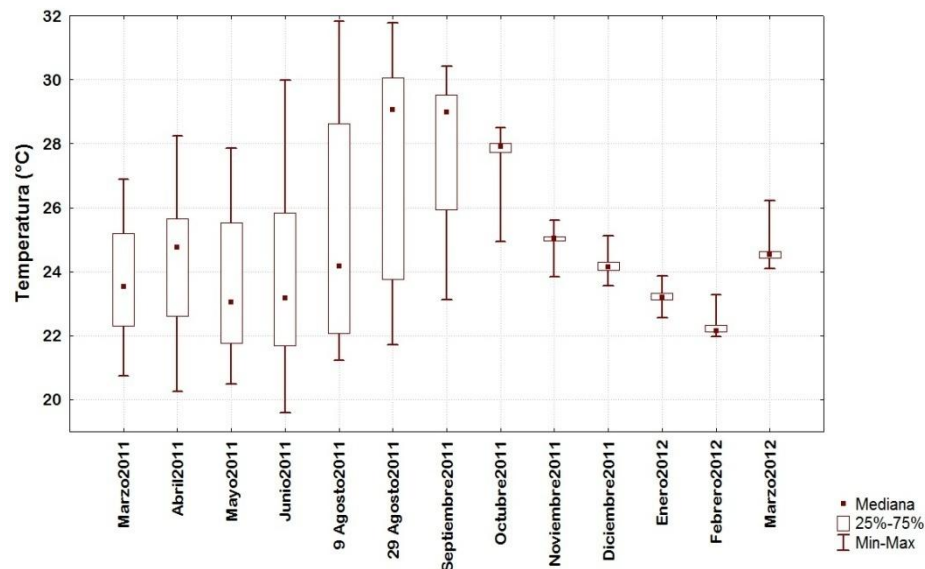


Figura 10. Variación intermensual de temperatura en el SAV.

7.5.2 Salinidad

Durante secas, se registraron valores entre los 33.9 y 36.9 ups (Fig. 11). Durante lluvias, los valores mínimos disminuyen de agosto a octubre, llegándose a registrar valores entre los 28.8 y 37 ups. los valores máximos, 3er cuartil, mediana y 1er cuartil, presentan diferencias mayores a 1 ups. Durante nortes (de octubre de 2011 a marzo de 2012) los valores máximos de concentración de salinidad se acercan al valor promedio y el rango de variación va de los 34.5 a 36.5 ups.

La salinidad solo disminuye durante el periodo de lluvias (de agosto a octubre), pero los valores máximos de concentración disminuyen en nortes, durante secas y lluvias los valores máximos son mayores a 36.8 ups.

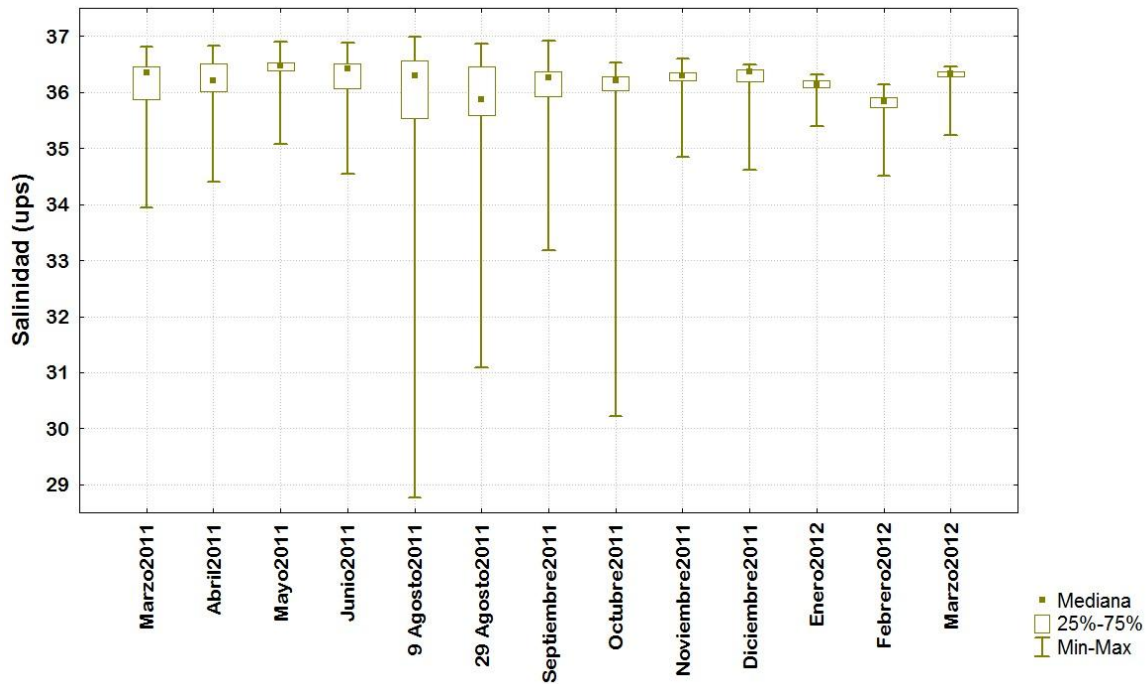


Figura 11. Variación intermensual de salinidad en el SAV.

7.5.3 Densidad

La variación de densidad (σ_t) (Fig. 12) muestra que durante el periodo secas (de marzo-junio de 2011), los valores de σ_t , presentaron una oscilación entre los 21.4 y 26.3 kg/m^3 . El rango de variación en la densidad del agua de mar en el SAV aumenta en lluvias (de agosto a octubre) encontrándose valores entre los 17.3 y 25.8 kg/m^3 , siendo agosto el mes con los menores registros. Durante el periodo de nortes (de noviembre de 2011 a marzo de 2012), se aprecia una vez más la homogeneidad en los valores de densidad presentes en el SAV, con un rango de variación de 23.8 a 25 kg/m^3 .

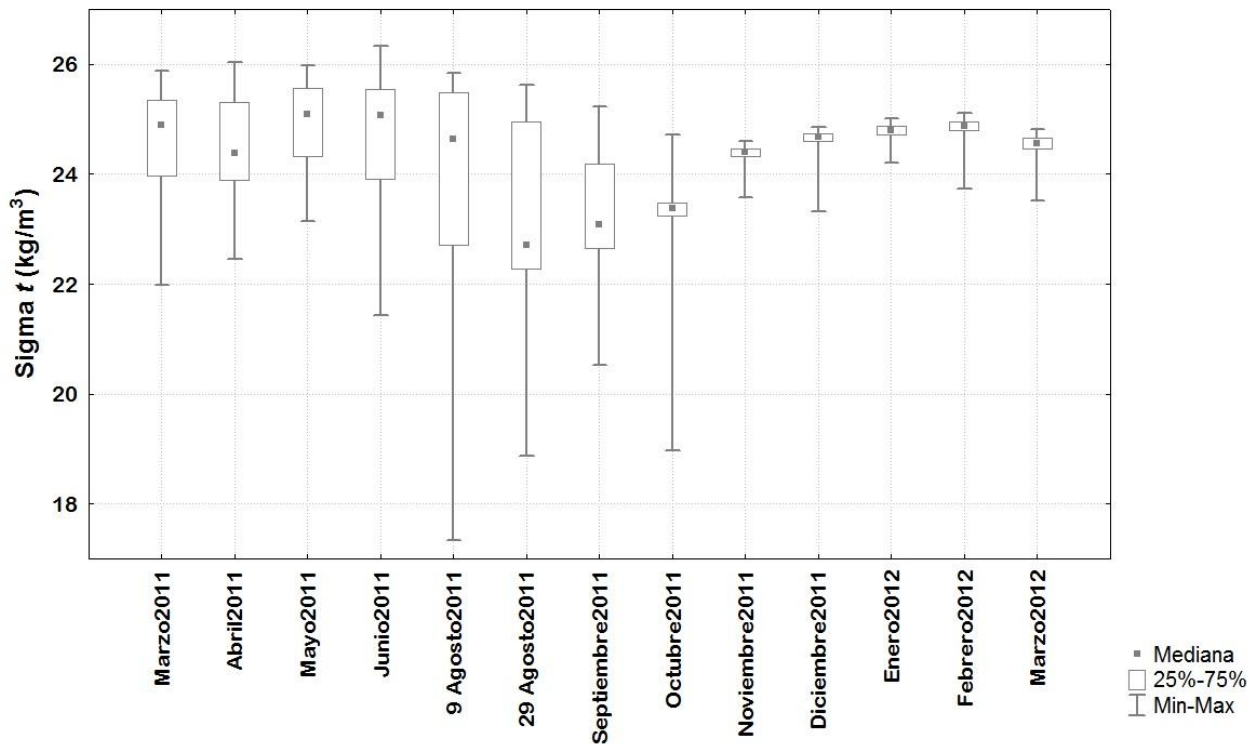


Figura 12. Variación intermensual la de densidad en el SAV.

7.5.4 Oxígeno

El oxígeno presenta un rango de oscilación anual que va de 1.6 a 9.1 ml/l (Fig. 13), con una temporalidad distinta a las variables anteriores. El periodo de secas (de marzo a abril), mostró valores entre 2.9 y 5 ml/l. El periodo en que se observa un incremento en las concentraciones de oxígeno en el sistema es el de lluvias (de agosto a noviembre), con un valores entre 2 y 9.1 ml/l, siendo el mes de octubre el que registrara el valor más alto. El periodo de nortes mostró valores entre 2.5 y 5.3 ml/l, y un cuarto tipo de variación fue registrada en los meses de junio de 2011 y enero de 2012 con un rango que va de 1.6 a 2.9 ml/l, considerados como meses de transición entre periodos.

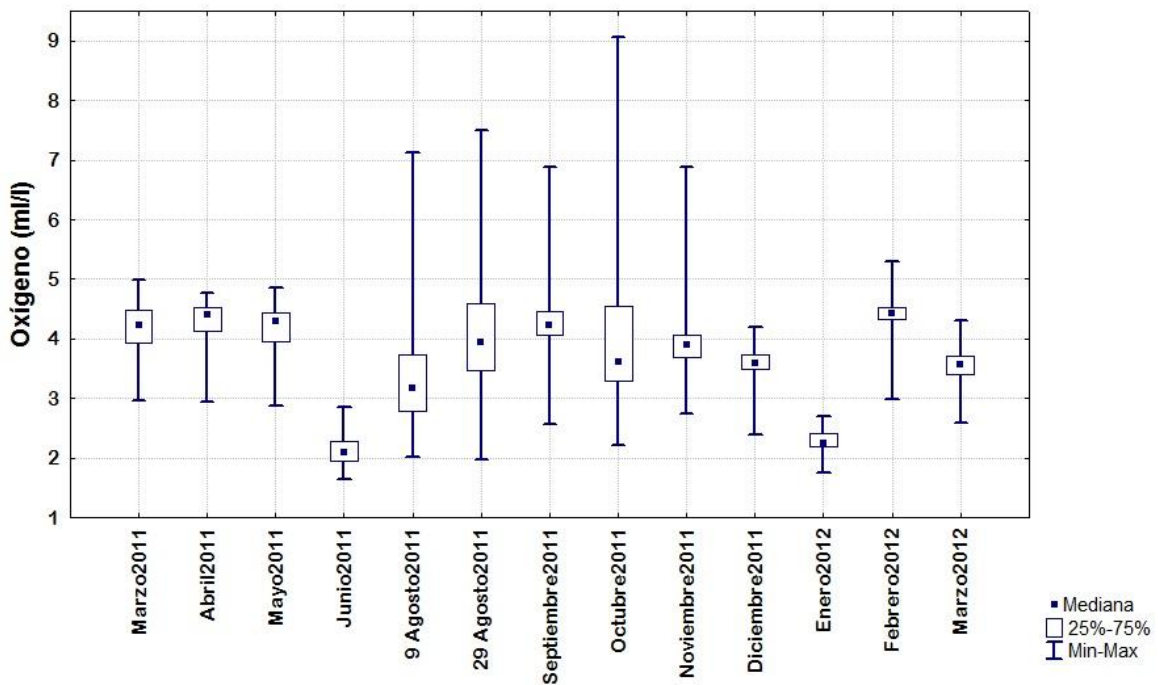


Figura 13. Variación intermensual de oxígeno en el SAV.

7.5.5 Nitrógeno

La variación temporal de nitrógeno (N^2) (Fig. 14) muestra dos periodos, el primero de marzo a septiembre de 2011, donde es posible notar un intervalo de 8 a 9.5 mg/l, el cual además es un intervalo de variación anual, y el periodo de nortes se distingue por la reducción de los rangos de variación, mostrándose homogéneos, en un intervalo que va de los 8.3 a 9.2 mg/l. La reducción de los rangos de variación se comenzó a registrar en octubre de 2011, hasta marzo de 2012.

Si observamos la variación del valor de la mediana a lo largo del periodo de estudio podemos ver que sus valores disminuyen en el periodo de agosto, septiembre y octubre, recuperándose de noviembre de 2011 a febrero de 2012, haciéndonos pensar que valores altos se encuentran de forma puntual en el SAV.

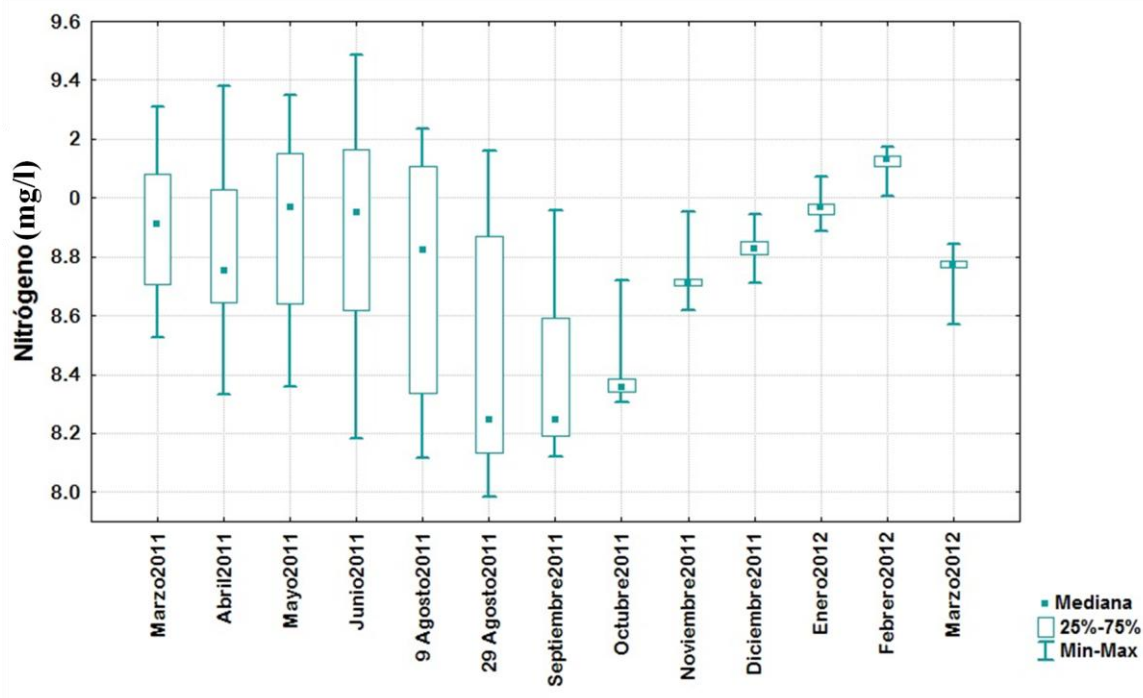


Figura 14. Variación intermensual de nitrógeno en el SAV.

7.5.6 Clorofila-a

El rango de variación anual de clorofila-a en el SAV (Fig. 15), va de 1.6 a 5.6 $\mu\text{g/l}$. El nivel mínimo de clorofila-a nunca fue menor a 1.5 $\mu\text{g/L}$. Con respecto a la concentración del valor de la mediana de clorofila-a, puede observarse que en el SAV no disminuye más de 1.9 $\mu\text{g/l}$ y en la mayoría de los meses se registraron valores de 4 $\mu\text{g/l}$ o cercanos a éste.

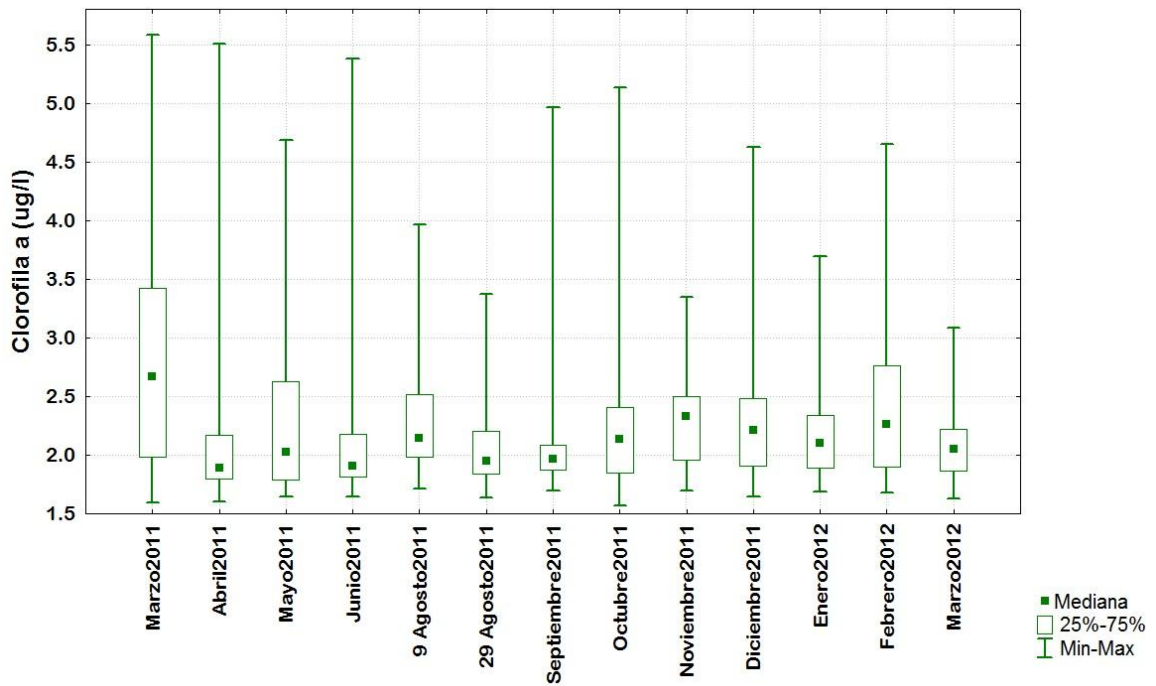


Figura 15. Variación intermensual de clorofila-a en el SAV.

7.6 Análisis de disimilitud

7.6.1 Promedio anual por estación de muestreo

Con el objetivo de determinar si existen diferencias espaciales en el SAV debido al área que abarca (52,238 km), se realizó un análisis de disimilitud (Fig. 16) de los promedios anuales calculados por estación de muestreo. Ya que estos análisis son exploratorios y cualitativos, se utilizó un 15% de disimilitud como umbral de corte para realizar el análisis entre estaciones de acuerdo a su promedio anual. Este análisis agrupó a las estaciones en tres áreas (Fig. 17). La primera, es la zona costera influenciada por el Río Jamapa y las descargas de las ciudades de Boca del Río y Veracruz (ST1, ST12, ST13). La segunda es la frontera sur del SAV (ST5 y ST6) al sur de los arrecifes Cabezo y Anegadilla y la zona norte del lado expuesto, la cual cuenta con una mayor influencia de agua oceánica (ST7, ST8, ST9, ST10).

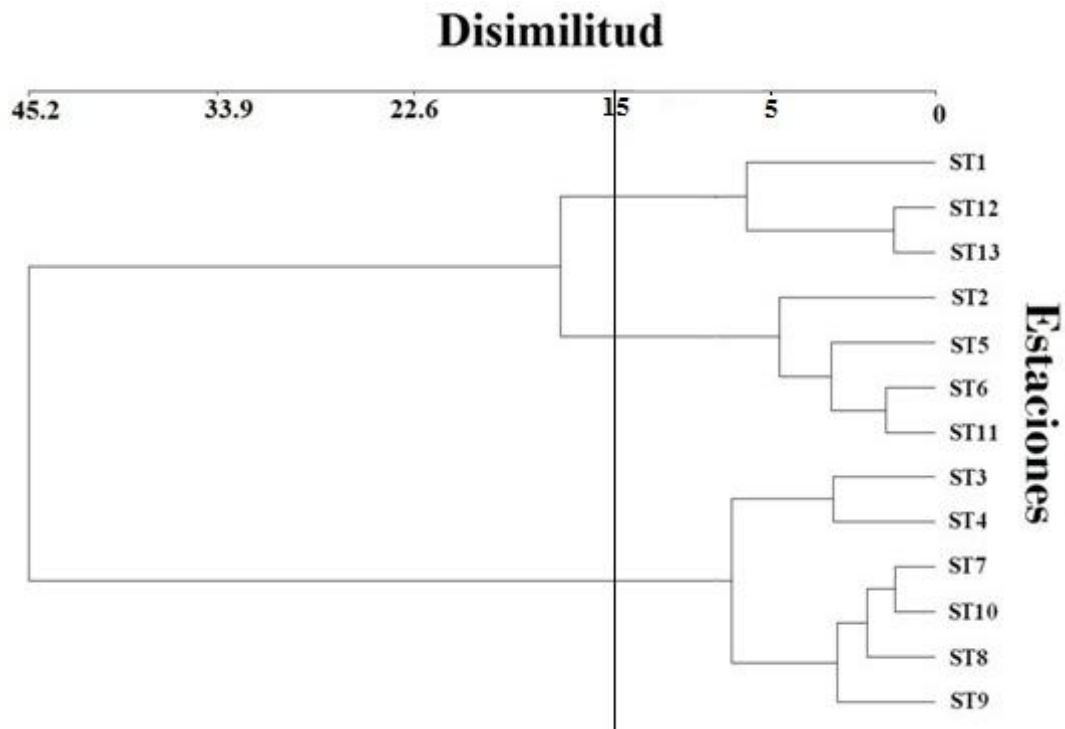


Figura 16. Análisis de clúster de disimilitud entre estaciones comparando el valor promedio anual de las variables hidrológicas estudiadas.

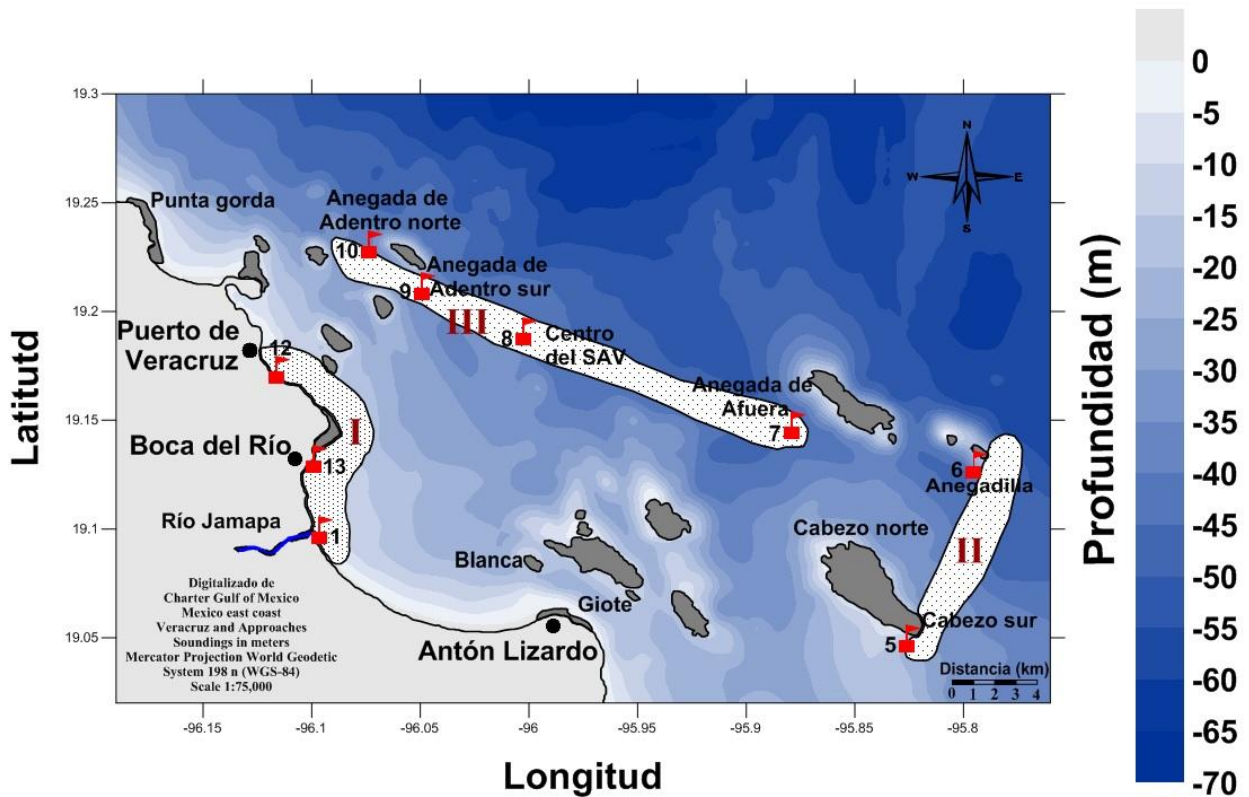


Figura 17. Localización geográfica del Sistema Arrecifal Veracruzano, estaciones de muestreo y zonas de similitud (I) centro, (II) sur y (III) norte.

De acuerdo con el PCA (*Parametric Community Analysis*) (Fig. 18), el parámetro que determina la variación hidrológica en el SAV es la temperatura, la cual varía inversamente al resto de los demás parámetros. La salinidad y la densidad aumentan en las estaciones que presentan menor temperatura, debido a que estas estaciones se encuentran alejadas de la influencia de los ríos. La Clorofila-a nos indica que las estaciones con mayores concentraciones son aquellas que se encuentran alejadas de la costa. La variable nitrógeno aumenta en las estaciones de frontera norte del sistema y el oxígeno mostró incremento en las estaciones de condiciones de frontera, más que aquellas que se encuentran en el centro del SAV.

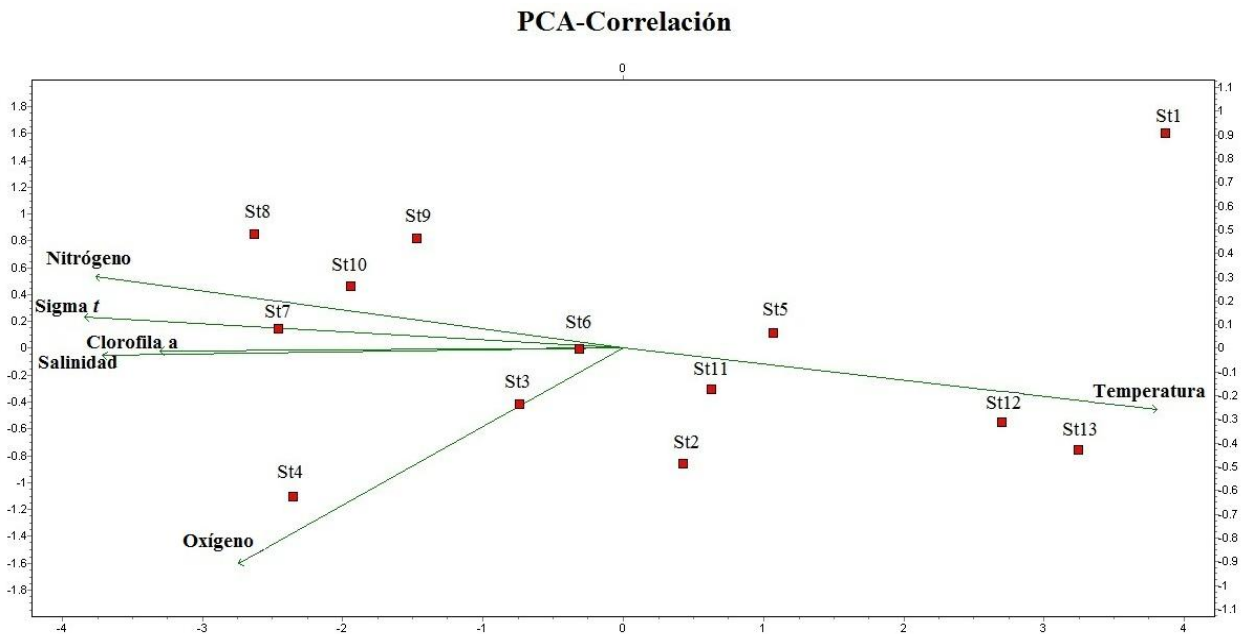


Figura 18. Análisis PCA entre estaciones comparando el valor promedio anual de las variables hidrológicas estudiadas.

La agrupación de las estaciones 11 y 2 y las estaciones 5 y 6, que se observó previamente en la figura 16, es producto de las descargas de los ríos; por efecto del Río la Antigua en la ST11 y en la ST2 el Río Jamapa. Estas descargas, otorgaron características similares a la zona sur, sin embargo, debido a su separación geográfica no se consideran dentro de un mismo grupo. En el caso de las estaciones 3 y 4, las cuales se agrupan en el análisis de disimilitud con el grupo de estaciones al norte (Fig. 16) y en el análisis PCA con las estaciones del grupo sur (Fig. 18), no fueron consideradas dentro de ningún grupo, debido a que la batimetría y las corrientes, modifican las condiciones hidrológicas dependiendo de la época del año.

7.7 Variación temporal vertical de los parámetros hidrográficos

Después de haber separado a las estaciones en base a un 15 % de disimilitud en el promedio anual de sus variables hidrológicas (Fig. 16 y 18), se eligió una estación dentro de cada área descrita como diferente en el sistema (Fig. 17), y que además cumpliera con las condiciones de frontera del SAV (norte, centro y sur). Las estaciones seleccionadas fueron la uno “ST1” (centro), la cual debido a su cercanía con el Río Jamapa representa a las estaciones costeras influenciadas por las descargas continentales, la estación cinco “ST5” (al sur del arrecife Cabezo) representa las estaciones de la frontera sur del sistema y la estación diez “ST10” (al norte de Anegada de Adentro), representando las estaciones de la frontera expuesta de la parte norte del SAV.

7.7.1 Temperatura

En la Fig. 19, se muestra la variación de la temperatura, la cual sigue un patrón diferenciado con los tres periodos antes mencionados. Durante secas (marzo a mayo de 2011), la columna de agua presentó un gradiente de variación respecto a la profundidad hasta los 20 m, estratificándose únicamente en la ST1, esta estratificación se incrementa en el mes de mayo y es posible observar en la ST5 y ST10 un remanente de agua fresca en el fondo, la cual muestra el menor valor de temperatura (19.5 °C) durante el tiempo de estudio. En los meses de agosto y septiembre, se observa que el incremento de la temperatura es en toda la columna de agua quedando estratificada únicamente la ST10 por ser la más profunda. Durante nortes se presenta una capa homogénea en toda la columna de agua, así como una disminución de temperatura la temperatura, hasta convertirse es una variación gradual con la profundidad y una variación de 1 °C.

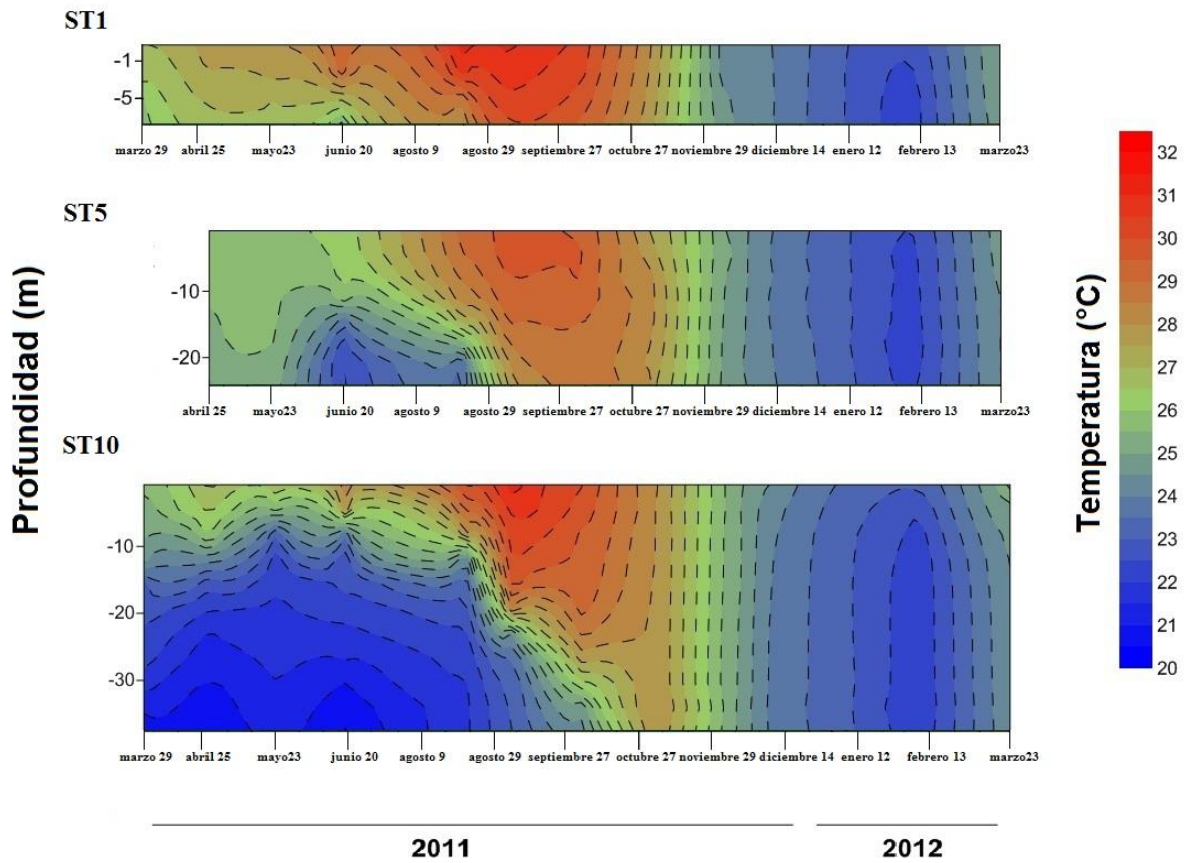


Figura 19. Variación temporal de temperatura en la columna de agua en tres diferentes áreas del SAV; centro (ST1), sur (ST5) y norte (ST10).

7.7.2 Salinidad

Se observaron diferencias espacio-temporales en la concentración de salinidad en el SAV (Fig. 20). En la ST5 y ST10 se aprecia una haloclina en los primeros 10 metros de profundidad durante el periodo de lluvias, y en la ST1 se observa a 5 m, principalmente de agosto a octubre de 2011. La ST1 muestra una estratificación constante, la cual se pierde en nortes. En el caso de las tres estaciones la menor estratificación en la columna de agua se notó en secas (principalmente el mes de mayo) y la mayor estratificación en lluvias con un rango que va de 28.5 a 36 ups. La ST5 (al sur) fue la única en presentar una segunda disminución de salinidad marcada en el mes de octubre, con una variación de 7 ups entre la superficie y el fondo. Durante nortes los valores observados en la columna de agua en las tres estaciones presentan una variación menor a 1 ups de la superficie al fondo.

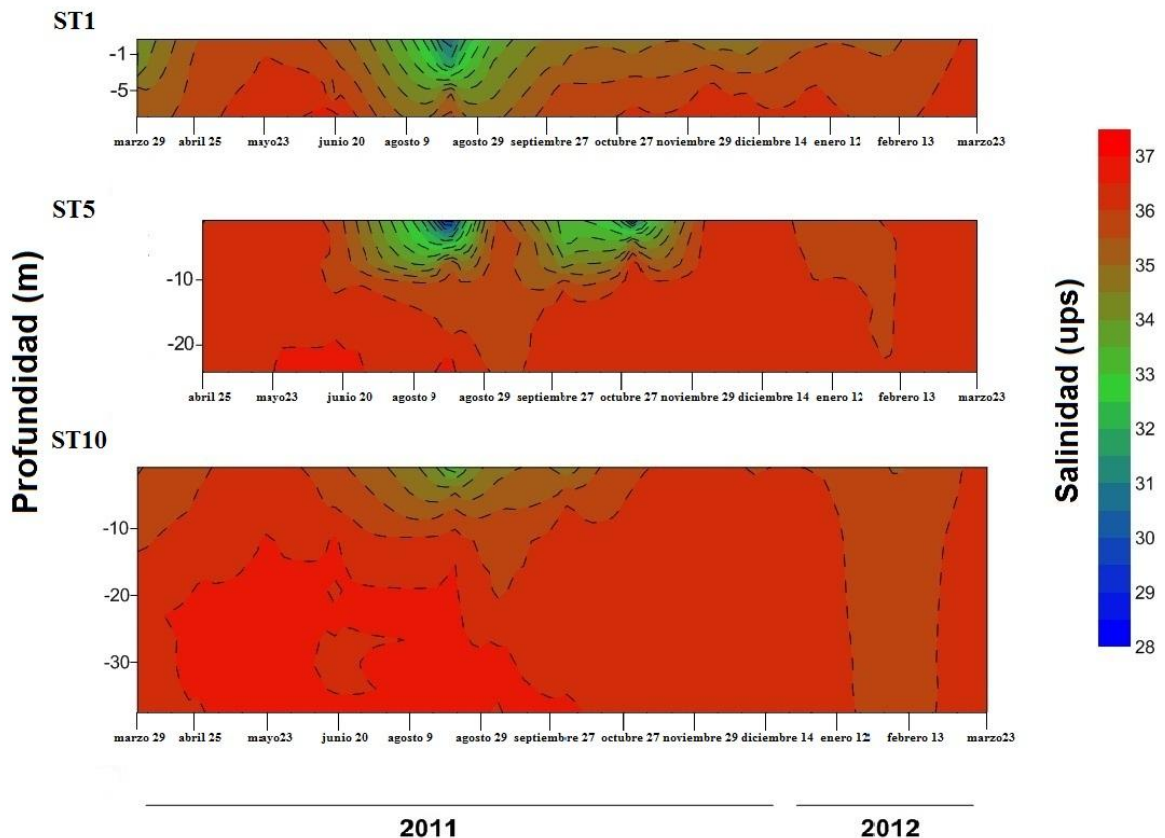


Figura 20. Variación temporal de salinidad en la columna de agua en tres diferentes áreas del SAV; centro (ST1), sur (ST5) y norte (ST10).

7.7.3 Densidad

En la Fig. 21 de variación de densidad (σ_t), se puede notar que existe estratificación permanente en la columna de agua en la ST1 y en las ST5 y 10, la estratificación se presenta durante el periodo de secas y lluvias, perdiéndose en el periodo de nortes. Durante lluvias (junio a octubre) la estratificación en la columna de agua es mayor que el resto de los periodos con agua más densa en fondo que en superficie (de 18.5 a 25.5 kg/m^3), la disminución en la densidad se repite en la ST5 en el mes de octubre influenciando hasta los 5 m de profundidad. En septiembre la estratificación es casi nula comportándose más bien en forma de gradiente. En el mes de octubre se observa una mezcla en la columna de agua de la ST5 y ST10, a partir de noviembre la ST10 muestra una columna mezclada y la ST1 y ST5 presentan una estratificación de 0.5 °C entre la superficie y el fondo.

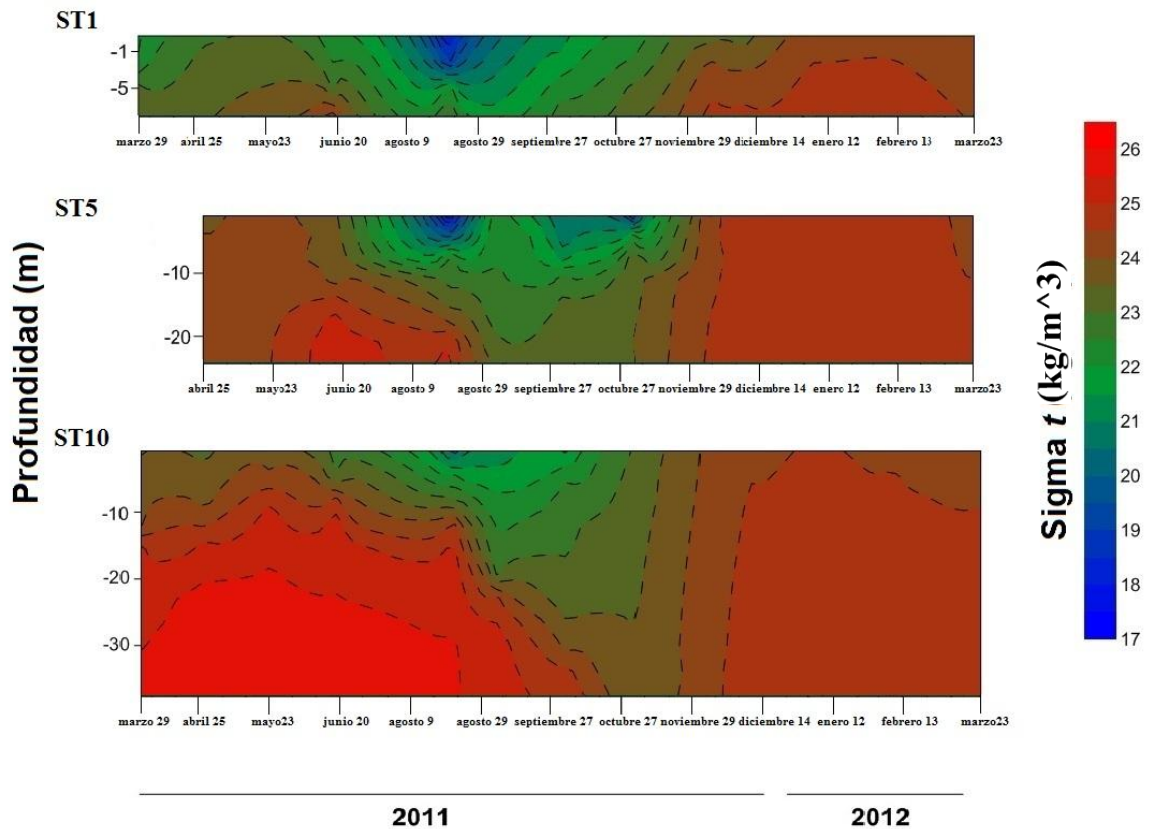


Figura 21. Variación temporal de densidad en la columna de agua en tres diferentes áreas del SAV; centro (ST1), sur (ST5) y norte (ST10).

7.7.4 Oxígeno

Los diagramas de variación vertical de oxígeno (Fig. 22) muestran que sus concentraciones oscilan de forma similar en las tres áreas el SAV durante todo el año, con una estratificación en la columna de agua a menos de 5 m, con valores alrededor de los 2 ml/l. La disminución de las concentraciones de oxígeno en toda la columna de agua, se presentaron en los meses de transición de temporadas (de secas a lluvias y de nortes a secas) a finales de junio de 2011 y finales de enero de 2012 y, los valores máximos de concentración se registraron en lluvias frente a la desembocadura del río Jamapa en el fondo (agosto a octubre, estación ST1).

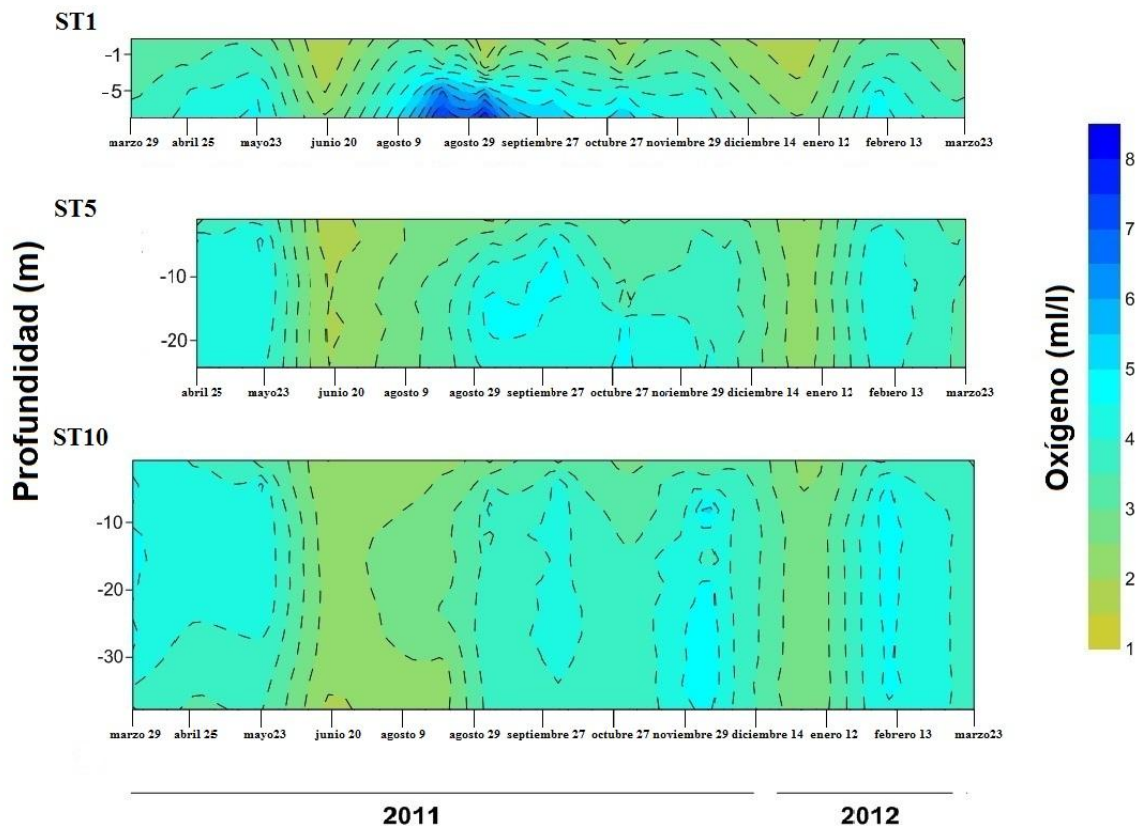


Figura 22. Variación temporal de oxígeno en la columna de agua en tres diferentes áreas del SAV; centro (ST1), sur (ST5) y norte (ST10).

7.7.5 Nitrógeno

Se observaron variaciones espacio-temporal en la concentración, de nitrógeno (N^2), diferenciándose tres temporadas al norte (ST10) y sur (ST5) del sistema, en la zona centro (ST1) se registraron las mayores concentraciones de nitrógeno. Las estaciones 5 y 10 reflejan una variación temporal en los periodos de secas, lluvias y nortes, resultado de la estratificación de la columna de agua. Durante secas se notan valores más altos en el fondo que en superficie y a final de lluvias e inicio de nortes, la concentración de nitrógeno presentó los menores valores en toda la columna de agua respecto a los demás periodos. Durante nortes la columna de agua se homogeniza, mostrando menos de 1 mg/l entre los valores de superficie y los de fondo.

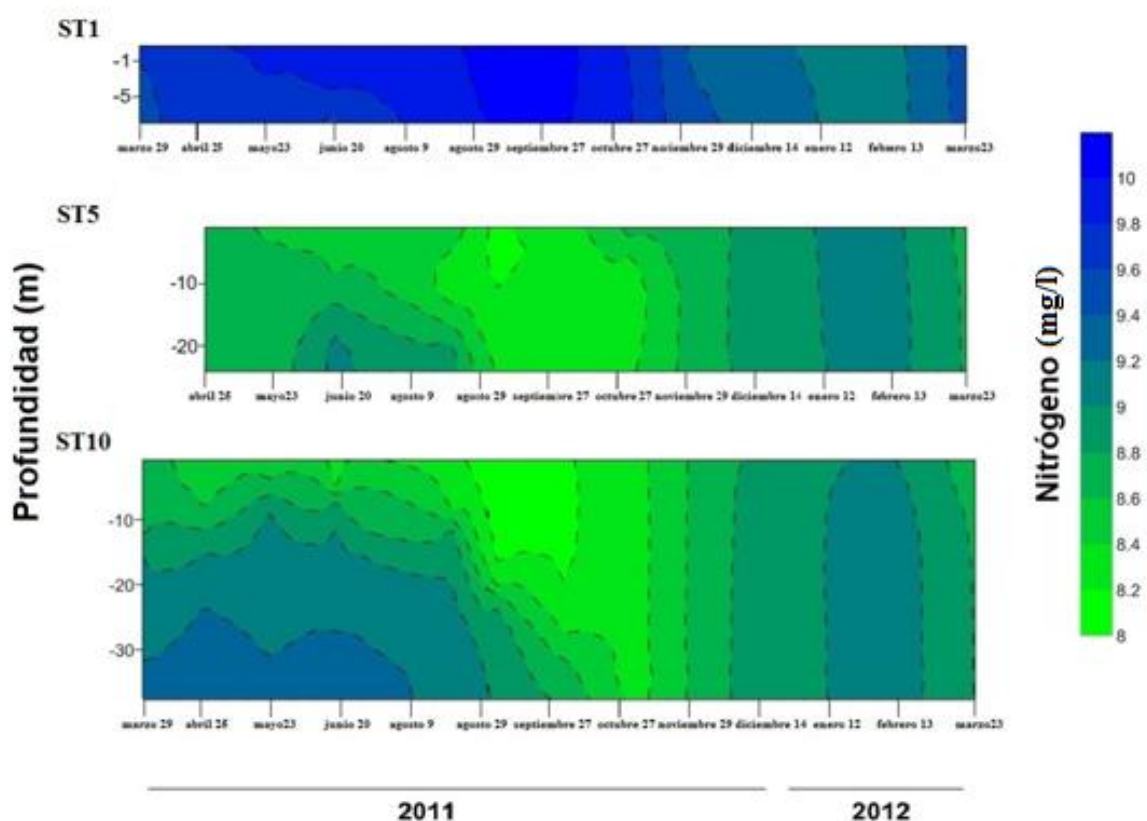


Figura 23. Variación temporal de nitrógeno en la columna de agua en tres diferentes áreas del SAV; centro (ST1), sur (ST5) y norte (ST10).

7.7.6 Clorofila a

La variación de clorofila-a en el SAV (Fig. 24), muestra que existe mayor concentración de clorofila-a en el fondo en las tres estaciones, sin embargo la ST10 (al norte), es la que mostró las mayores concentraciones ($>4 \mu\text{g/l}$). La variación-espacio temporal de Clorofila-a reflejó diferencias en las tres estaciones, durante secas la ST1 y ST5 mostraron valores de entre 1.5 a 2 $\mu\text{g/l}$, mientras que la ST10 presenta valores de hasta 4.5 $\mu\text{g/l}$ en el fondo ($> 20 \text{ m}$), el mes de abril es el único registro con un punto de 3 $\mu\text{g/l}$ en superficie. Para el periodo de lluvias, la ST1 y ST5 son las que muestran mayores concentraciones de clorofila-a (3.5 $\mu\text{g/l}$) en superficie a no más de 10 m de profundidad, mientras que la ST10 mostró disminución en sus valores de concentración en fondo, llegándose a registrar hasta 2.5 $\mu\text{g/l}$. Durante el periodo de nortes, la ST10 incrementa de nuevo sus valores en el fondo (4 $\mu\text{g/l}$) y la ST1 y ST5 presentan menores concentraciones con valores de hasta 2.5 $\mu\text{g/l}$.

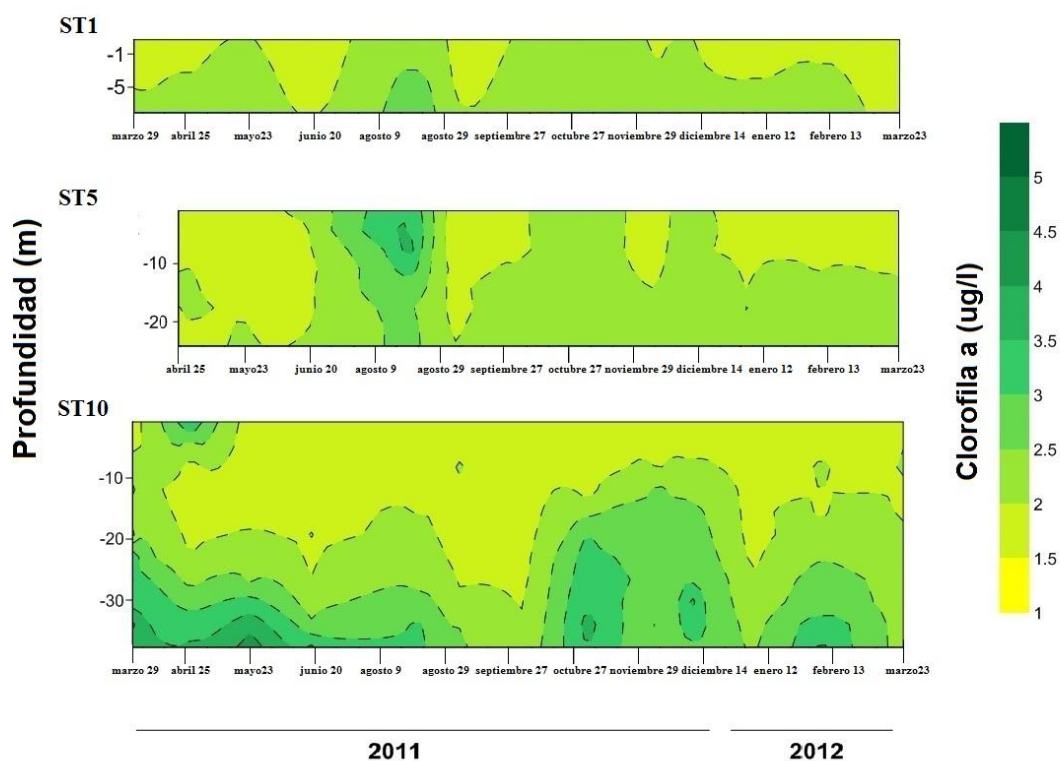


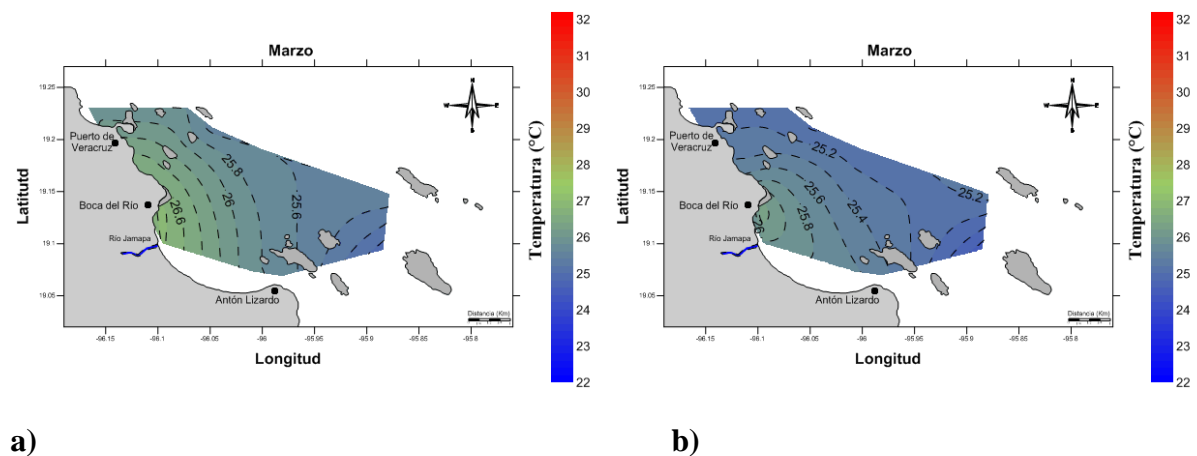
Figura 24. Variación temporal de clorofila a en la columna de agua en tres diferentes áreas del SAV; centro (ST1), sur (ST5) y norte (ST10).

7.8 Variación Horizontal superficial

7.8.1 Temperatura

La variación de temperatura a un metro de profundidad en el SAV (considerada como temperatura superficial) describe un patrón temporal similar al observado con los análisis anteriores, mostrándose tres periodos. Durante secas (de marzo a junio) (Fig. 25), el área que se encuentra próxima a la costa y frente a los municipios de Boca del Río y Veracruz es más cálida que el resto del SAV, y el intervalo de variación para este periodo es de 25.5 a 29.4 °C. Para lluvias (agosto a octubre de 2011) (Fig. 26), la temperatura superficial aumenta y se presenta de forma más homogénea, con un rango de 27.6 a 31 °C. Durante nortes (noviembre de 2011 a marzo de 2012) (Fig. 27), se observa la disminución de los valores de temperatura así como del rango de variación, además es el periodo en que se muestra más homogéneo el SAV.

Los análisis de variación a 5 m de profundidad nos señalan que para secas (Fig. 25) existe un gradiente de variación con respecto a la costa, disminuyendo los valores conforme nos alejamos de ella. En lluvias (Fig. 26) este gradiente se pierde debido a la estratificación de la termoclina (menor a 5 metros), esta estratificación da como resultado que las aguas de fondo mantengan valores bajos de temperatura (< 20 °C). Durante nortes (Fig. 27) se observa la homogenización de los rangos de variación (de 22.4 a 25.6 °C).



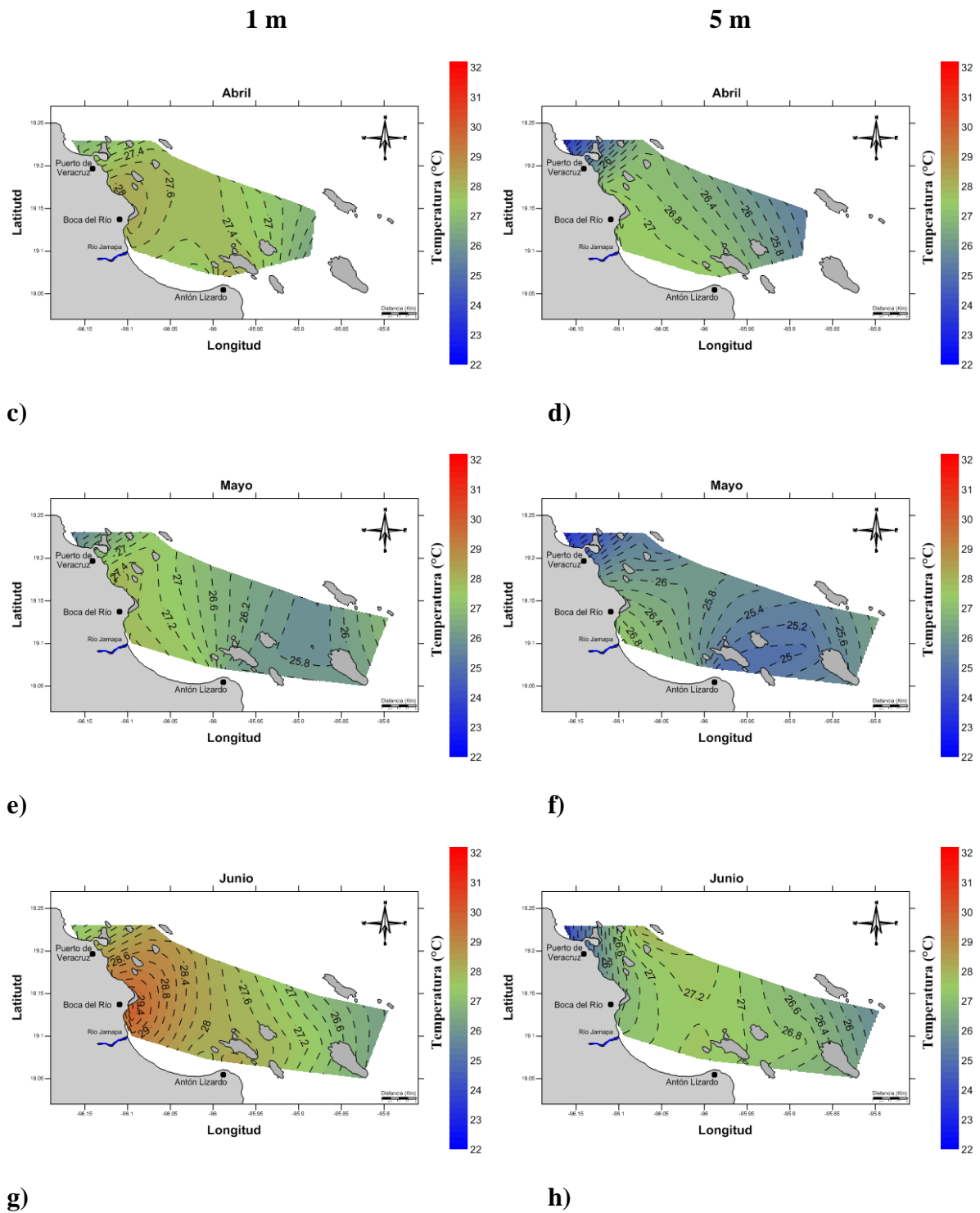
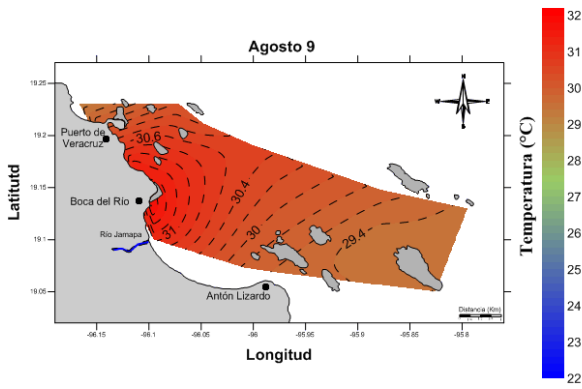
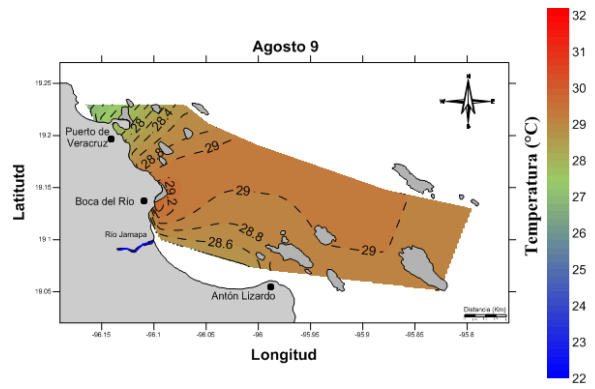


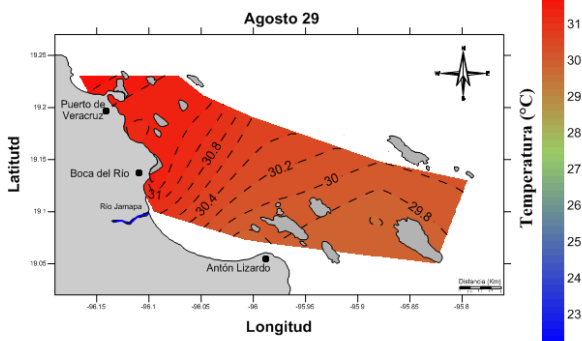
Figura 25. Variación horizontal de temperatura a nivel superficial a 1 (izquierda) y 5 (derecha) metros durante el periodo de secas en el SAV.



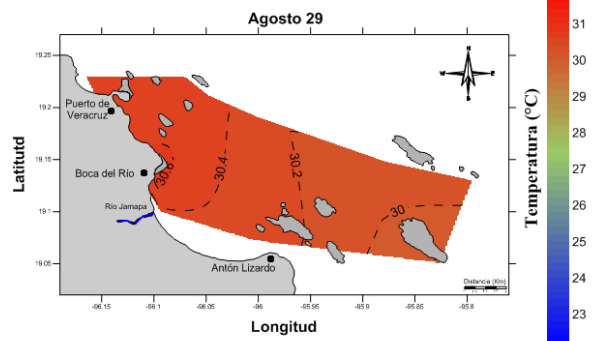
a)



b)



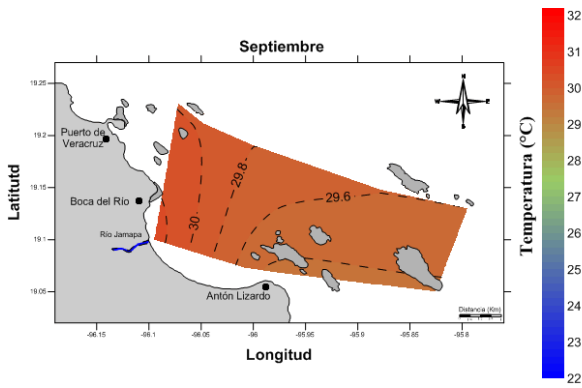
c)



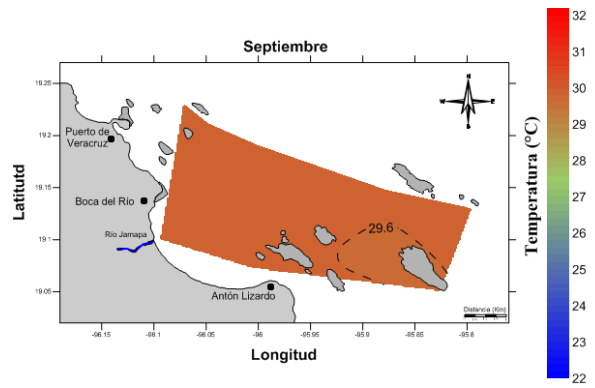
d)

1 m

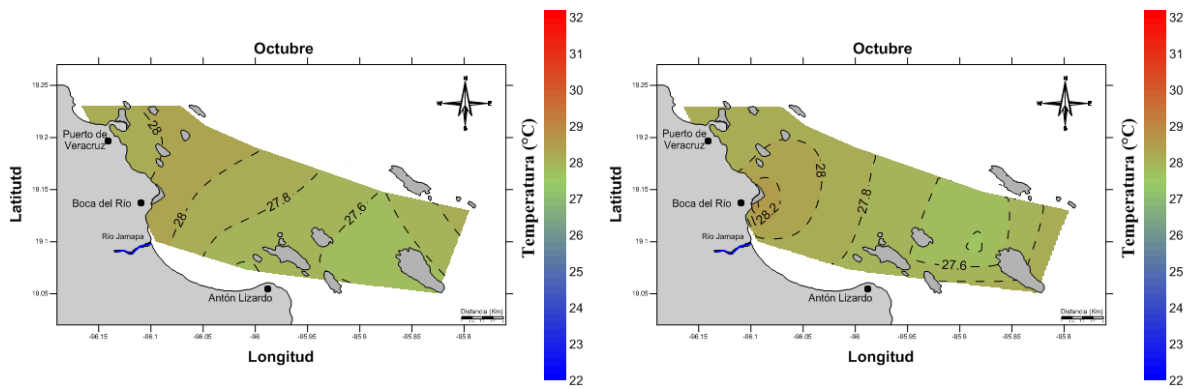
5 m



e)



f)

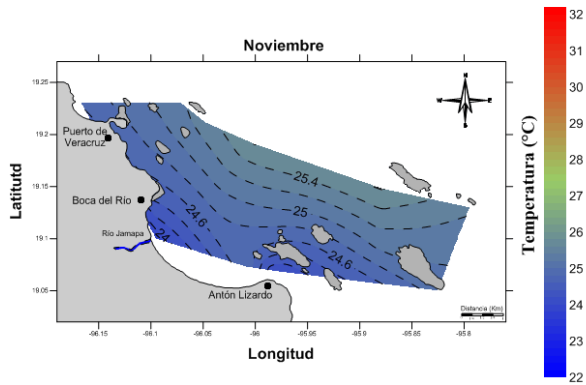


g)

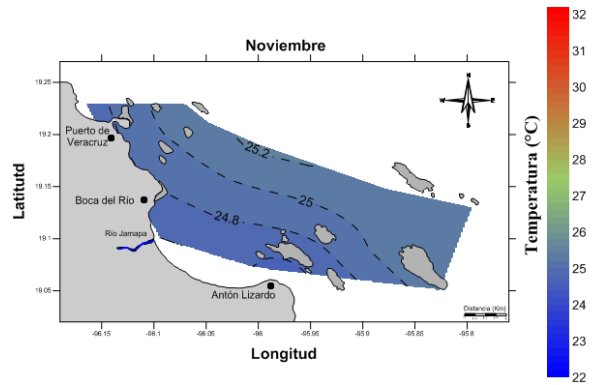
h)

Figura 26. Variación horizontal de temperatura a nivel superficial a 1 (izquierda) y 5 (derecha) metros durante el periodo de lluvias en el SAV.

1 m

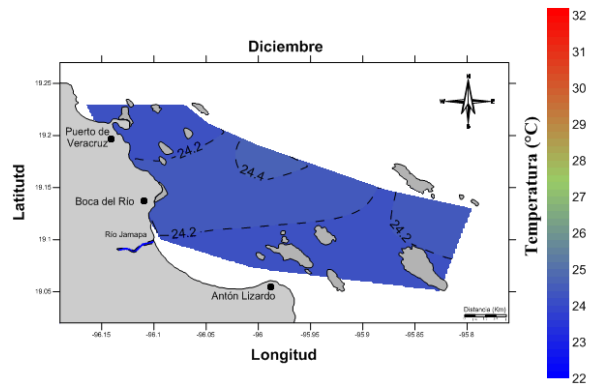
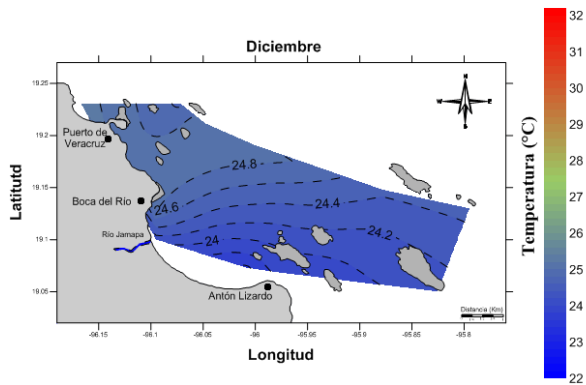


5 m



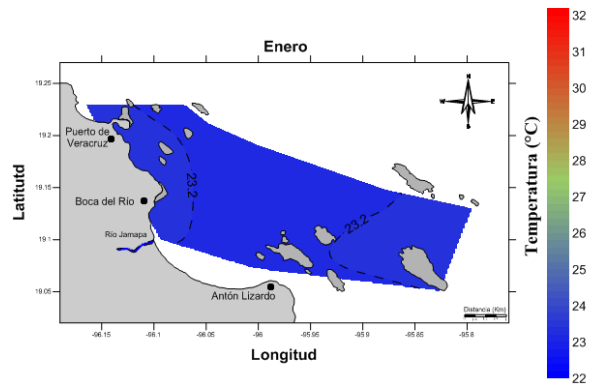
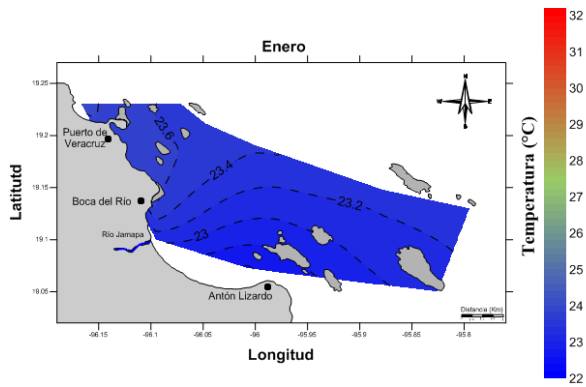
a)

b)



c)

d)



e)

f)

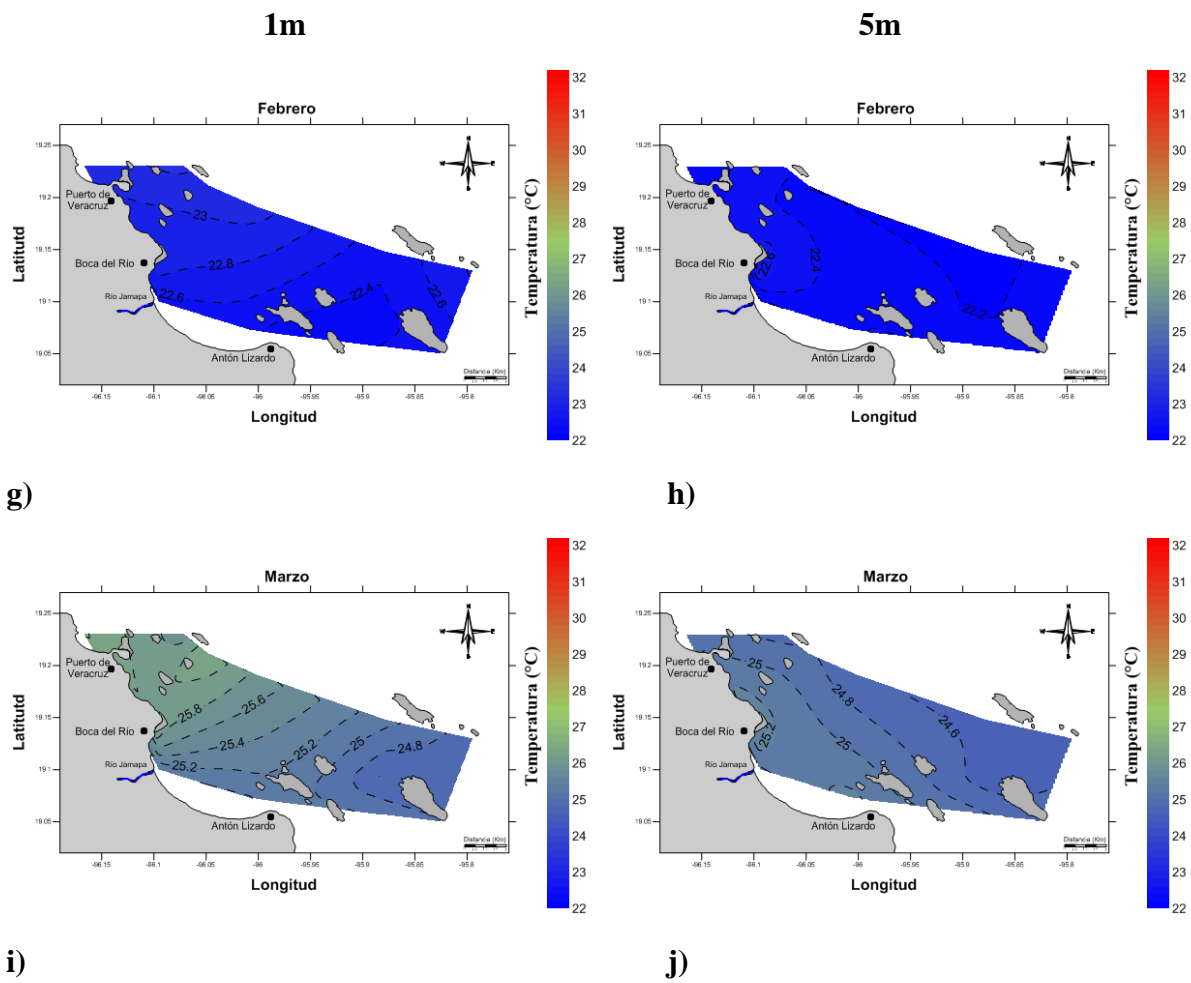
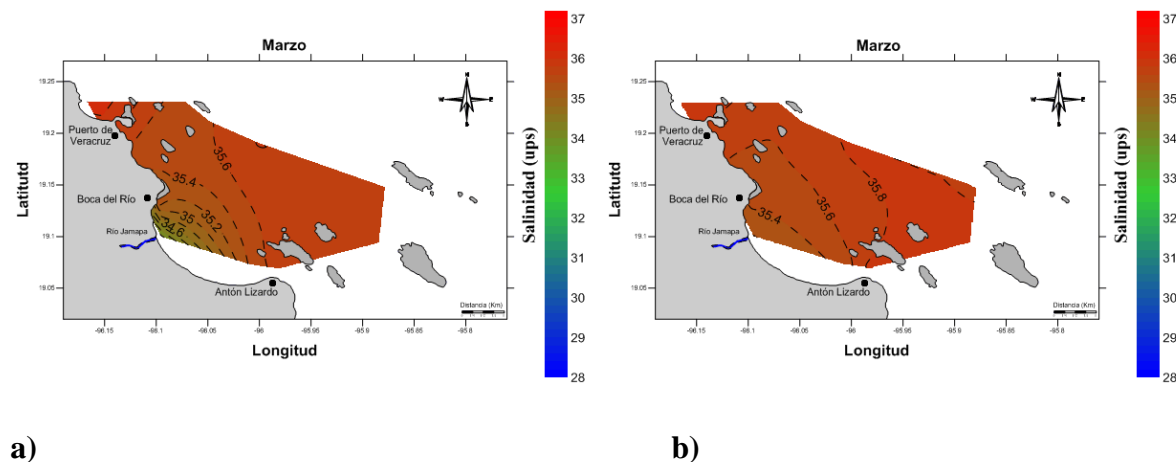


Figura 27. Variación horizontal de temperatura a nivel superficial a 1 (izquierda) y 5 (derecha) metros durante el periodo de lluvias en el SAV.

7.8.2 Salinidad

La variación espacio-temporal de salinidad en el SAV mostró una temporalidad en sus rangos de concentración. Durante secas (Fig. 28), se observan zonas de menor salinidad en puntos cercanos a la costa para los meses de marzo, mayo y junio de 2011 (Fig. 28 a, e y g), el intervalo de oscilación de salinidad para este periodo es de 34.6 a 36.2 ups. A partir del mes de junio se comienza a observar una disminución de salinidad de 1 ups frente al puerto de Veracruz, respecto al resto del sistema. Durante lluvias (Fig. 29) en los meses de agosto y septiembre (Fig. 29 a y e), se observa un decremento en la concentración de salinidad de forma general en el sistema, siendo agosto el mes que presenta los menores registros en la superficie, y el mes de octubre muestra una reducción de salinidad en la parte sur del sistema. Los rangos para lluvias fluctúan entre los 30 y 35.8 ups. El periodo de nortes (Fig. 30) registró, en los meses de noviembre 2011 a marzo de 2012, la menor variación espacial, con un rango no mayor a una unidad, los rangos de salinidad para el periodo de nortes va de los 35 a 36.4 ups.

La variación de salinidad a cinco metros de profundidad da como resultado que para secas y nortes, se presente un gradiente de oscilación con valores menores (de hasta 34.6 ups) cercanos a la costa los cuales aumentan conforme nos alejamos de ella. Las zonas con menor salinidad son las que se encuentran frente al área conurbana de Boca del Río y frente a la desembocadura del Jamapa. Los rangos de fluctuación en secas (Fig. 28) van de 35.4 a 36.4 ups y para nortes de 35.6 a 36.4 ups (Fig. 30). En lluvias (agosto a octubre de 2011) (Fig. 29), se observa una mayor disminución hacia la zona sur del SAV con un rango de 33.6 a 36 ups.



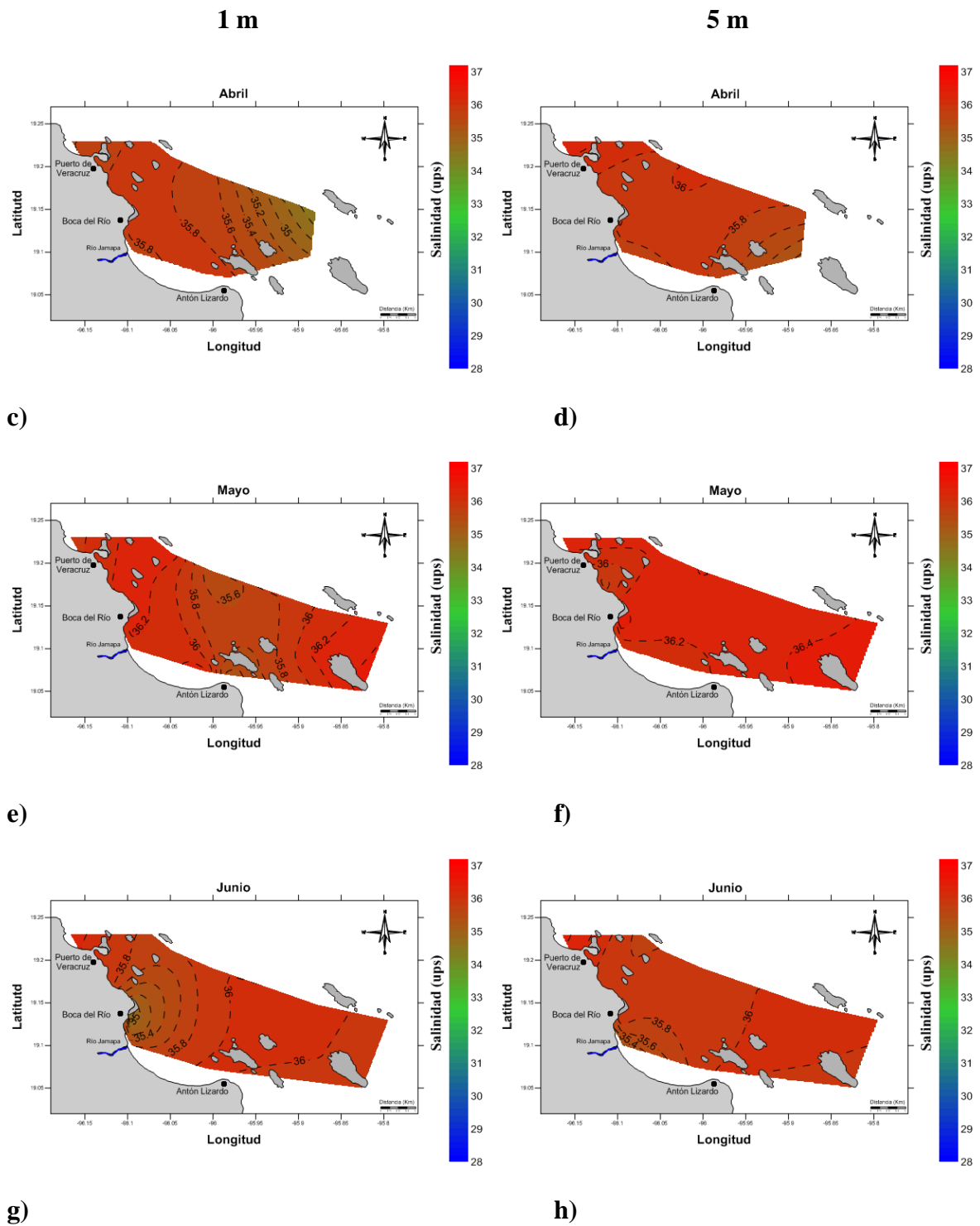
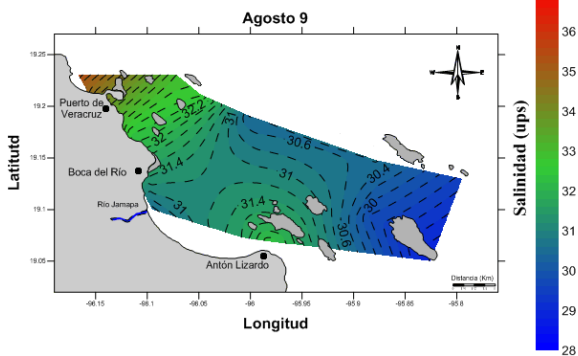


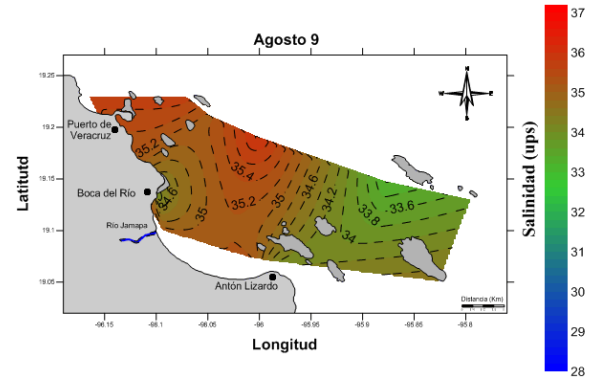
Figura 28. Variación horizontal de salinidad a nivel superficial a 1 (izquierda) y 5 (derecha) metros durante el periodo de secas en el SAV.

1 m



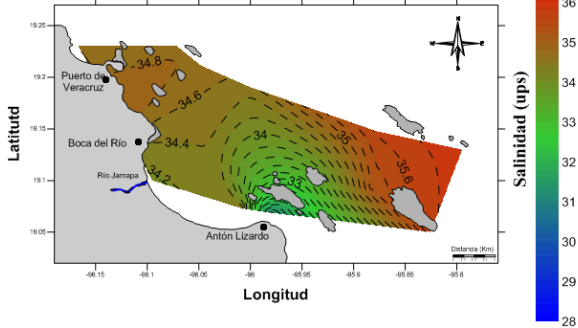
a)

5 m



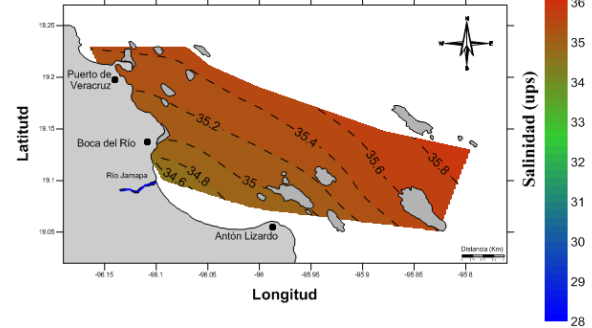
b)

Agosto 29



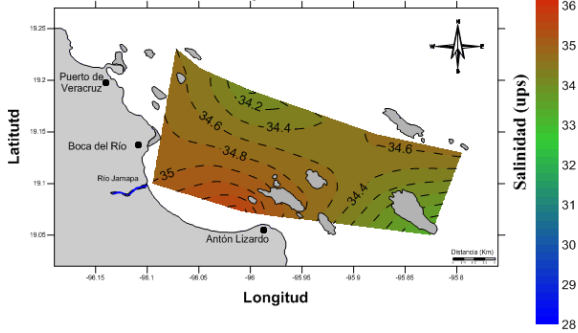
c)

Agosto 29



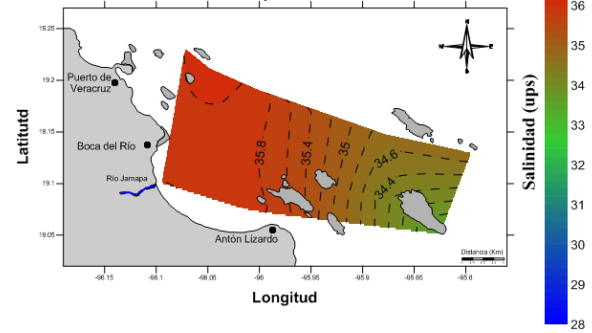
d)

Septiembre



e)

Septiembre



f)

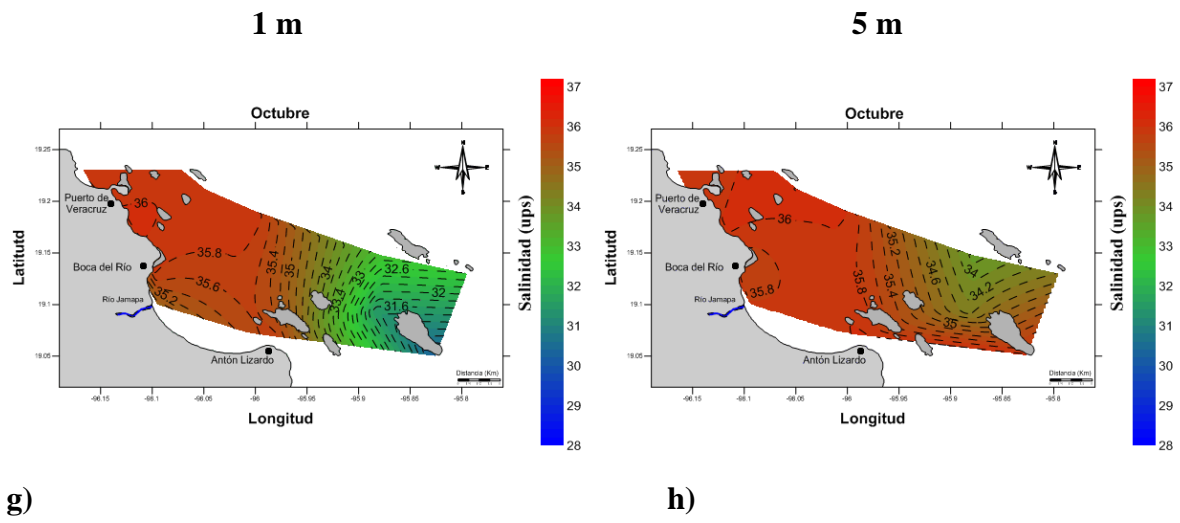
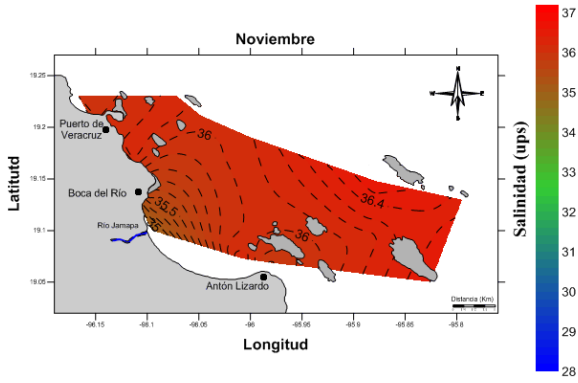


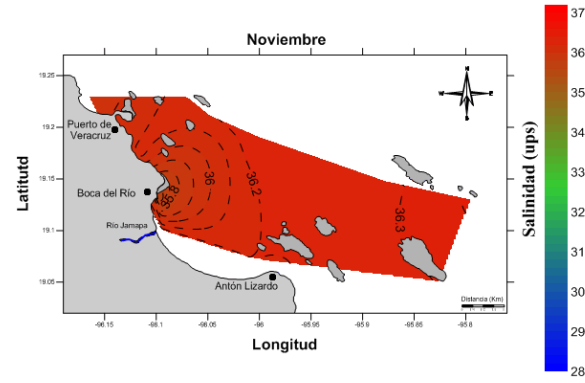
Figura 29. Variación horizontal de salinidad a nivel superficial a 1 (izquierda) y 5 (derecha) metros durante el periodo de lluvias en el SAV.

1 m



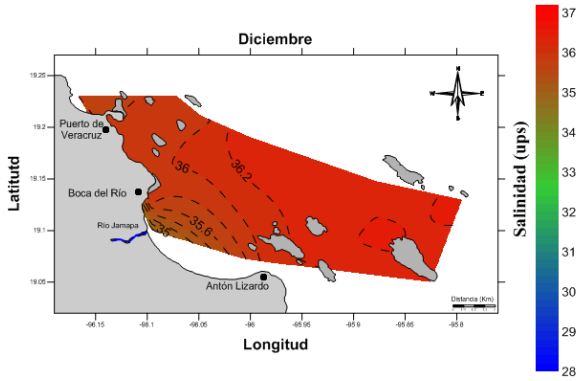
a)

5 m



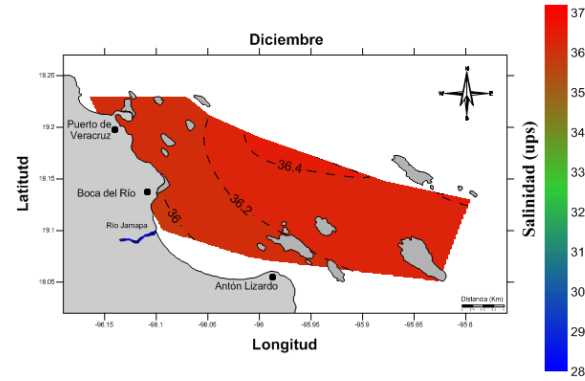
b)

Diciembre



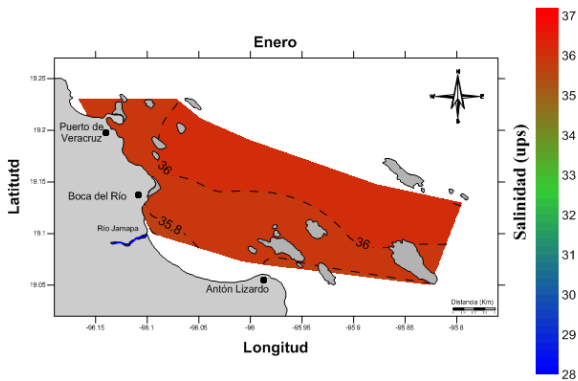
c)

Diciembre



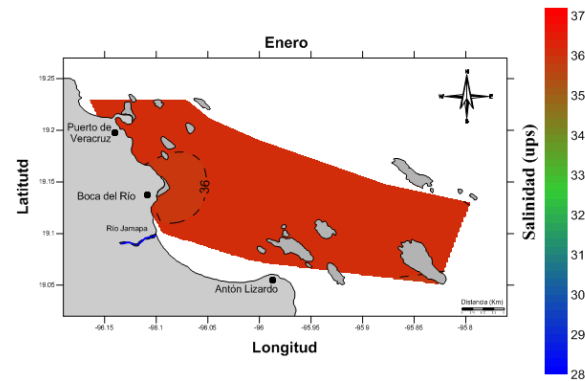
d)

Enero



e)

Enero



f)

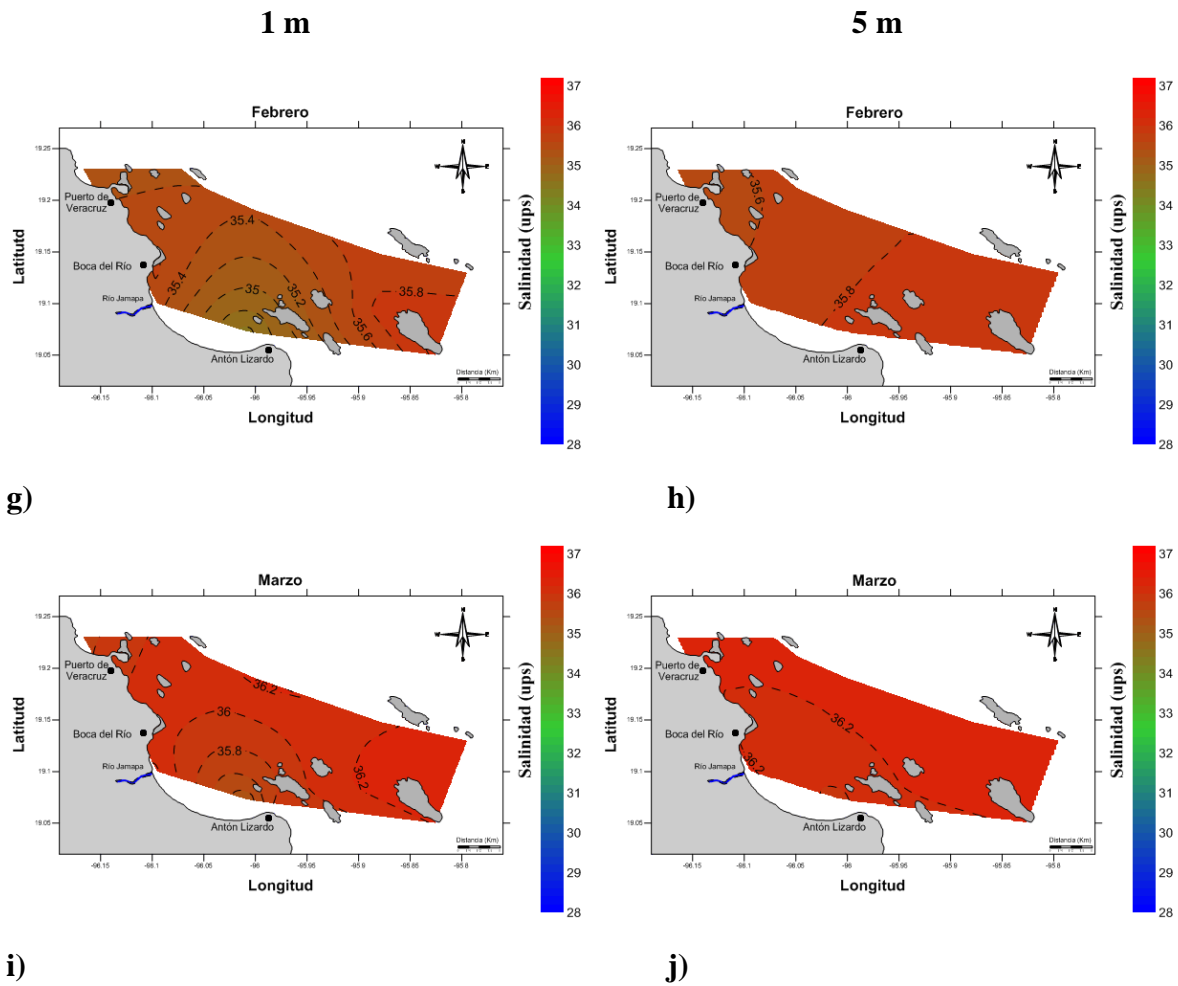


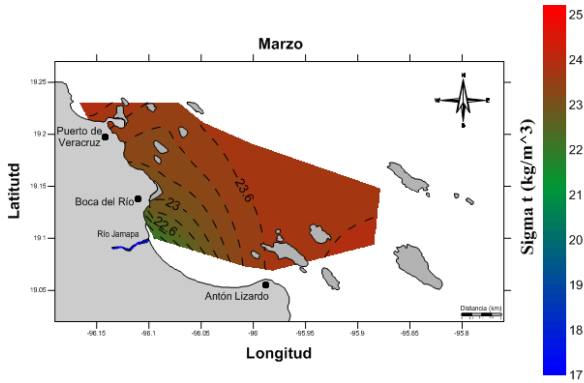
Figura 30. Variación horizontal de salinidad a nivel superficial a 1 (izquierda) y 5 (derecha) metros durante el periodo de nortes en el SAV.

7.8.3 Densidad

La variación de densidad (σ_t) en el SAV presentó tres periodos. Durante secas (marzo a junio de 2011) (Fig. 31), se aprecia un decremento en la densidad en zonas cercanas a la costa (de 22 a 23.8 kg/m³), el mes de junio indica una disminución de densidad más pronunciada (< 22 kg/m³) frente a la desembocadura del Río Jamapa y Boca del Río. Durante lluvias (agosto a octubre de 2011) (Fig. 32), la variación de densidad en el sistema es más pronunciada respecto a los otros periodos, iniciando con el mes de agosto (Fig. 32, a) el cual presenta además los menores valores de densidad con un rango de 18 a 21 kg/m³. Como se observa con la salinidad, el mes de octubre presenta una reducción en las concentraciones de densidad hacia la parte sur del sistema (< 20 kg/m³), misma que se registró en el análisis de variación vertical. El rango de oscilación para lluvias va de los 18 a 23 kg/m³. Durante nortes (Fig. 33), la variación espacial muestra mayor homogeneidad respecto a los demás periodos, con zonas de menor densidad cercana de la costa (< 23.6 kg/m³) y el rango de densidad para este periodo es de 23.6 a 24.6 kg/m³.

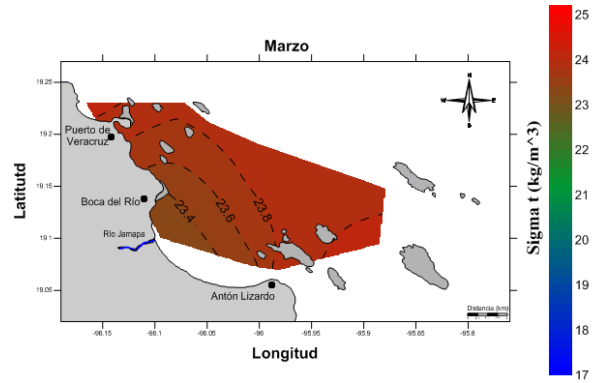
El análisis de variación a 5 metros muestra una oscilación temporal más pronunciada. Durante el periodo de secas se registraron valores de 23.2 a 24.4 kg/m³ (Fig. 34). Con una disminución hacia el municipio de Boca del Río, y un aumento en la densidad hacia la zona expuesta del sistema. Durante lluvias a 5m (Fig. 32) de profundidad en los registros del mes de agosto (9 y 29 de agosto) (Fig. 32, b y d), se nota una disminución en la densidad al centro del sistema, frente al Río Jamapa y el municipio de Boca del Río. En los meses de septiembre y octubre (lluvias), el decremento en la densidad es más notable hacia la zona sur del sistema (< 21.8 kg/m³). El rango de densidad para este periodo va de 21 a 23 kg/m³. Durante nortes (Fig. 32) se registraron valores más homogéneos de 24 a 24.8 kg/m³ y una variación de densidad de 0.8 kg/m³, conforme se aleja de la costa, encontrándose los mayores valores al centro del sistema frente a la desembocadura del Río Jamapa y el municipio de Boca del Río.

1 m



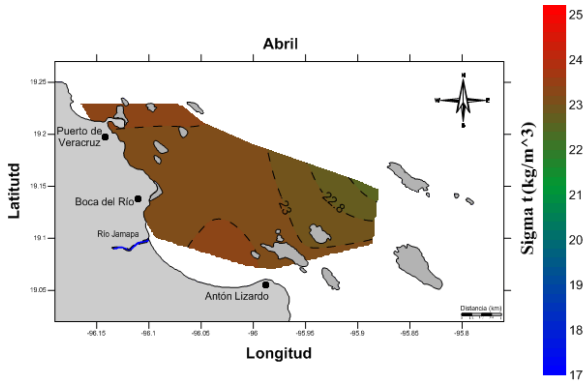
a)

5 m



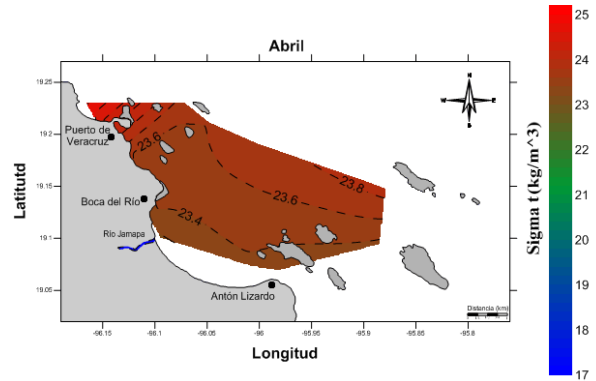
b)

Abril



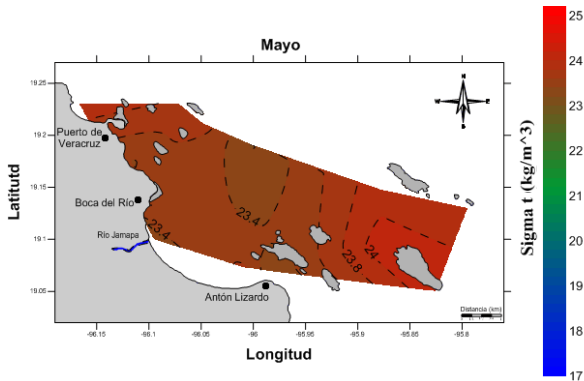
c)

Abril



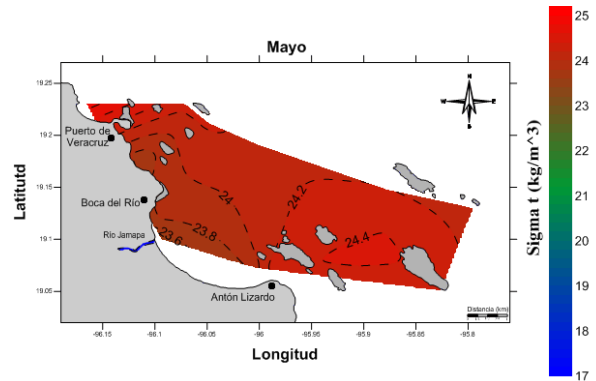
d)

Mayo



e)

Mayo



f)

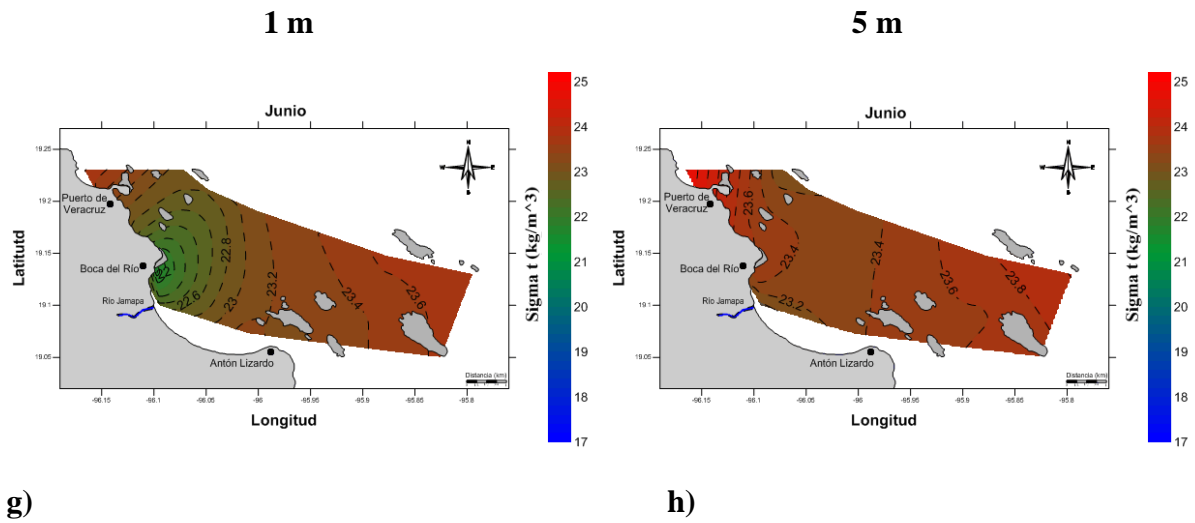
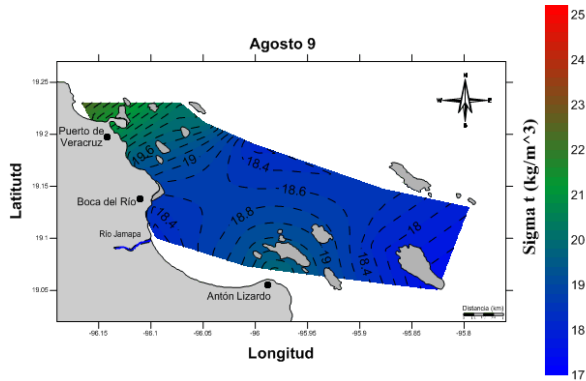


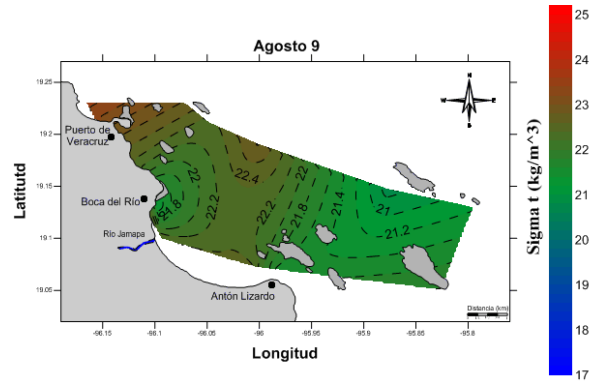
Figura 31. Variación horizontal de salinidad a nivel superficial a 1 (izquierda) y 5 (derecha) metros durante el periodo de secas en el SAV.

1 m

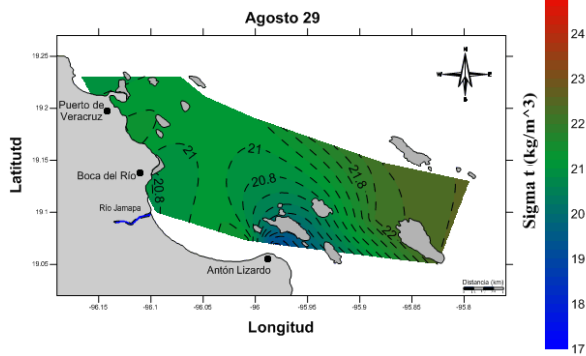


a)

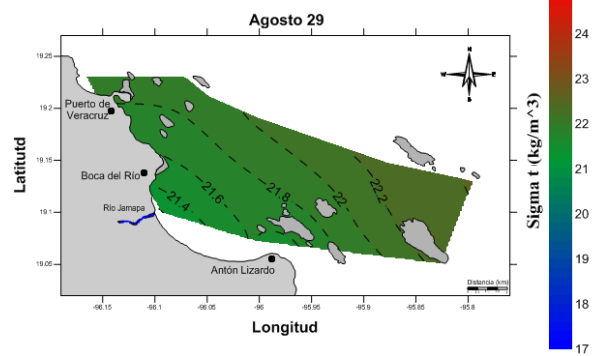
5 m



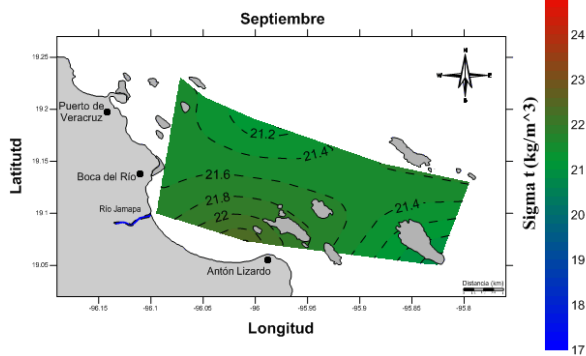
b)



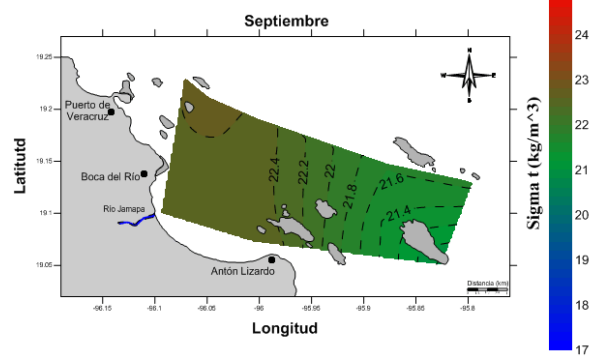
c)



d)



e)



f)

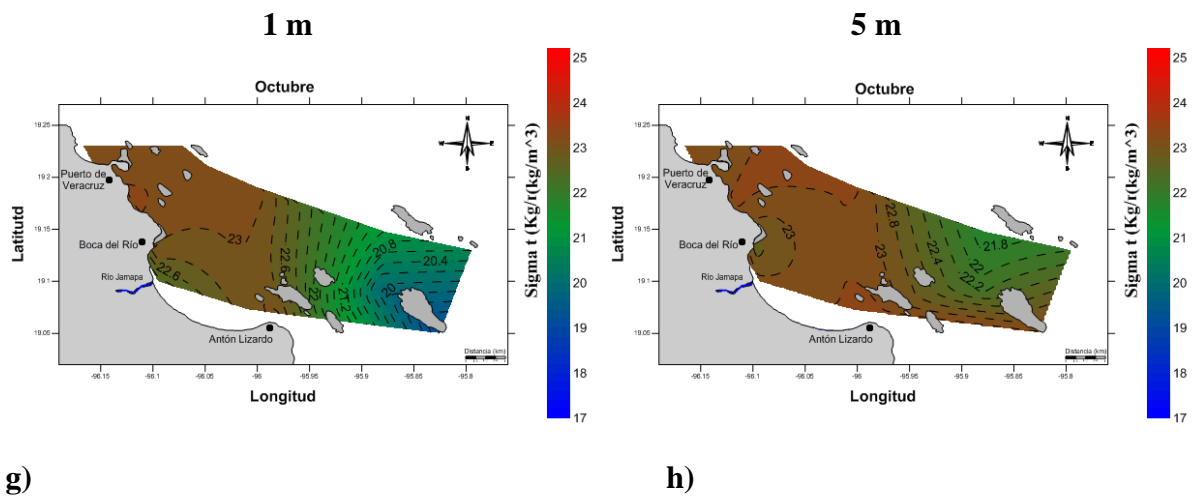
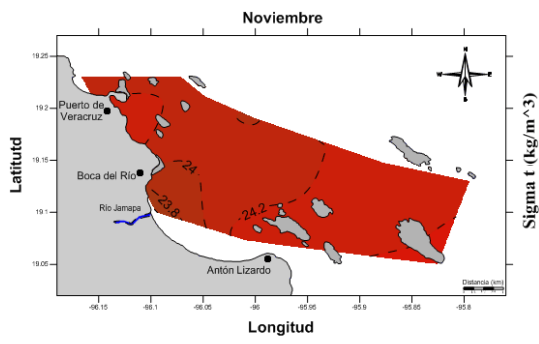


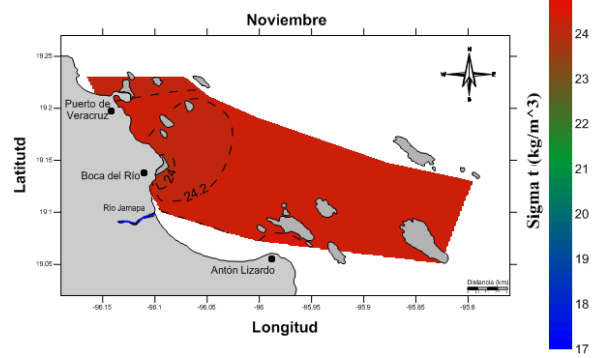
Figura 32. Variación horizontal de salinidad a nivel superficial a 1 (izquierda) y 5 (derecha) metros durante el periodo de lluvias en el SAV.

1 m



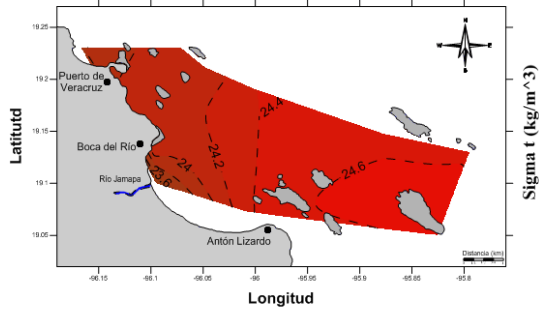
a)

5 m



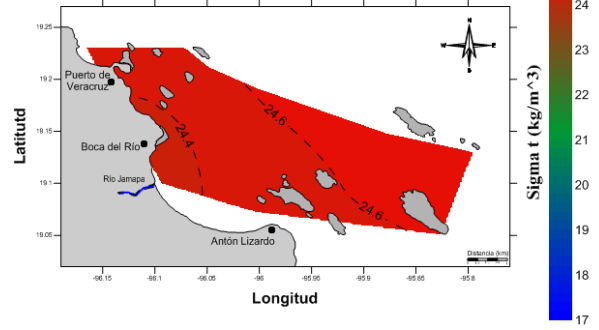
b)

Diciembre



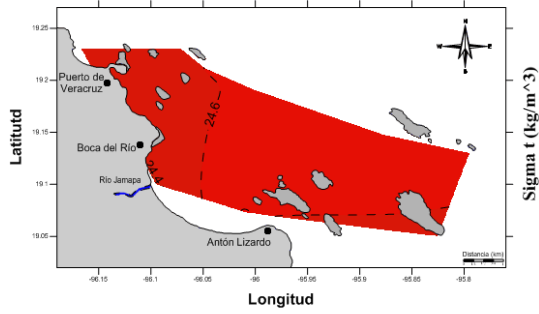
c)

Diciembre



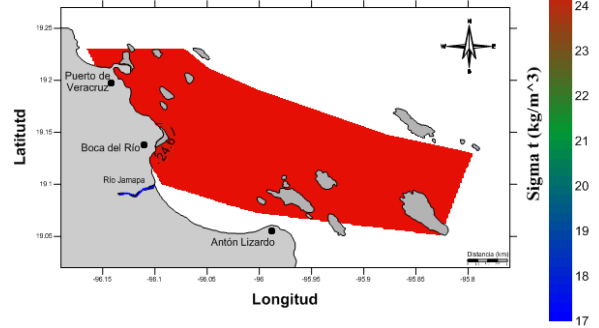
d)

Enero



e)

Enero



f)

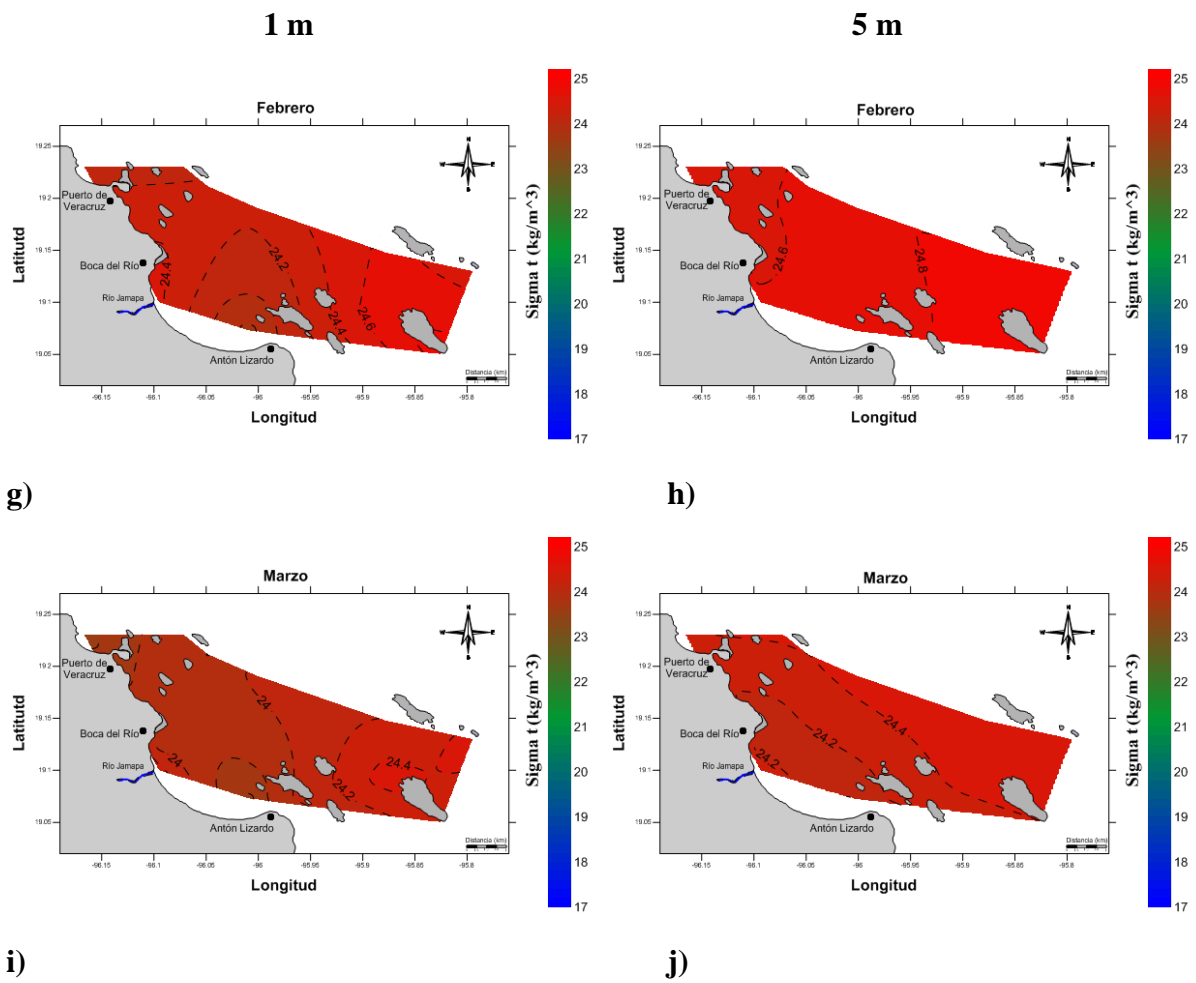


Figura 33. Variación horizontal de salinidad a nivel superficial a 1 (izquierda) y 5 (derecha) metros durante el periodo de nortes en el SAV.

7.8.4 Oxígeno

La variación temporal de oxígeno a nivel superficial (1 m) denotó un comportamiento diferente a las variables anteriores. El periodo de secas (marzo a mayo de 2011) (Fig. 34), presentó un intervalo de 3.2 a 3.6 ml/l. La concentración de oxígeno en el sistema incremento durante lluvias (agosto a noviembre de 2011) (Fig. 35), durante el cual se registraron valores de 2.2 a 4.4 ml/l. El mes de noviembre (Fig. 35, i) se incorporó a lluvias, debido a la similitud de sus rangos de fluctuación respecto a los meses de ese periodo. Durante nortes (diciembre de 2011, febrero y marzo de 2012) (Fig. 36), se registraron valores entre los 2.6 a 3.6 ml/l.

A un metro de profundidad, durante los meses de junio y enero (Fig. 37, a y c), se mostraron los valores más bajos del registro anual, con un rango entre 1.8 a 2.2 ml/l, por lo cual se nombran como meses de transición entre periodos.

La concentración de oxígeno varió de forma similar a 1 m como a 5m, describiéndose tres periodos y meses de transición. Los meses de transición, junio (Fig. 35, b) y enero (Fig. 36, d), muestran disminución en los valores de concentración de oxígeno (de 2 a 2.2 ml/l). El periodo que presentó los valores más altos fue el de lluvias (agosto a noviembre de 2011) (Fig. 35), con un rango entre los 3 a 7.2 ml/l. De febrero a marzo de 2012 la concentración de oxígeno incrementa nuevamente con un rango de 4 a 4.8 ml/l (Fig. 34).

La variación espacial se presentó, de forma puntual a 5 m de profundidad en los meses de agosto (Fig. 35, d) y octubre (Fig. 36, h), registrándose un incremento en el área de barlovento del arrecife Cabezo (7.5 ml/l); el mes de noviembre (Fig. 35, i y j) mostró mayor concentración de oxígeno frente al municipio de Boca del Río (5.4 ml/l). Otro tipo de fluctuación se registró en los meses de mayo (Fig. 34, f) y septiembre (Fig. 35, f), donde los valores máximos ocurrieron al centro del sistema en su parte más alejada.

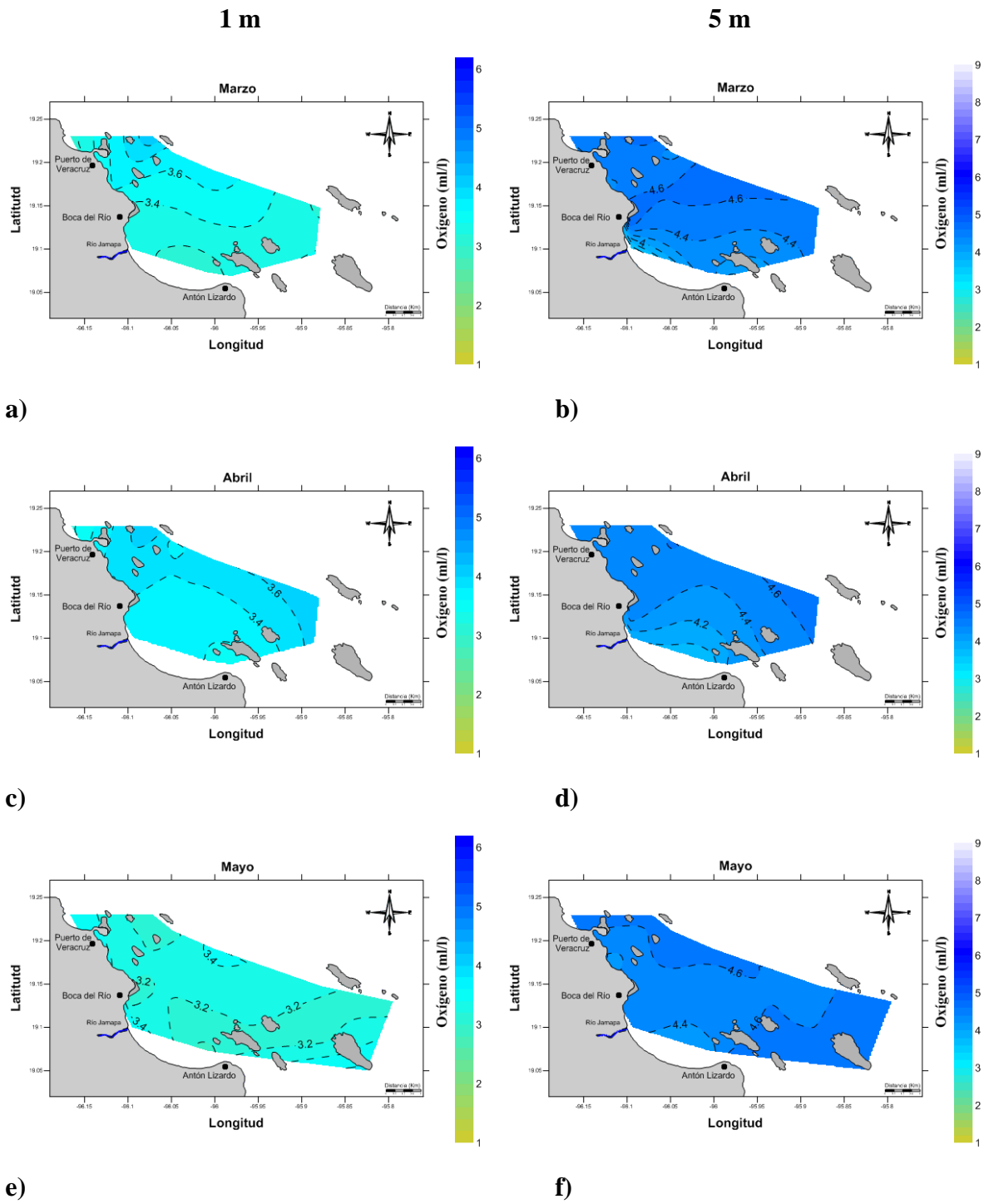
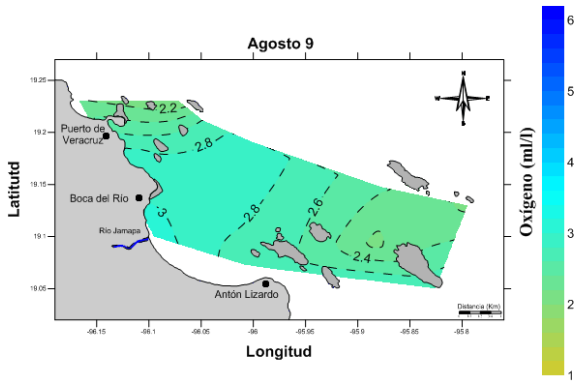


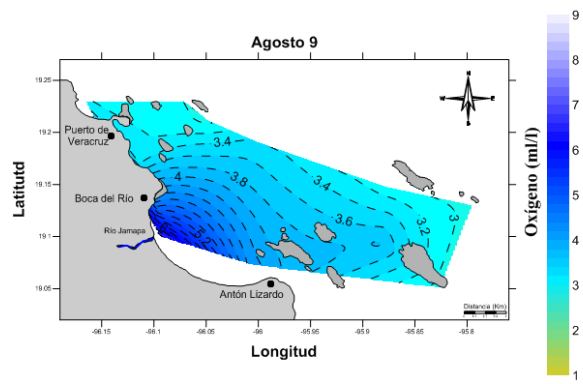
Figura 34. Variación horizontal de oxígeno a nivel superficial a 1 (izquierda) y 5 (derecha) metros durante el periodo de secas en el SAV.

1 m



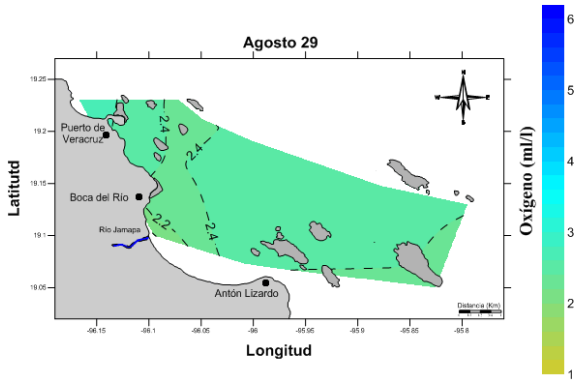
a)

5 m



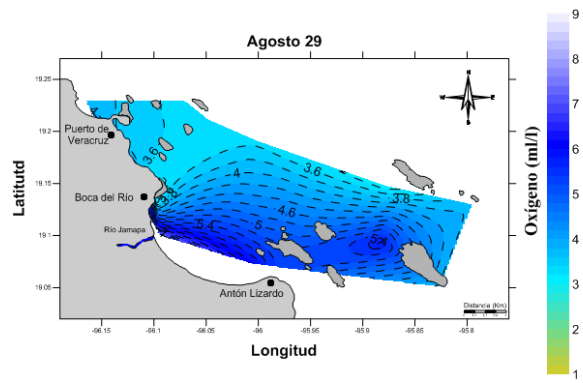
b)

Agosto 29



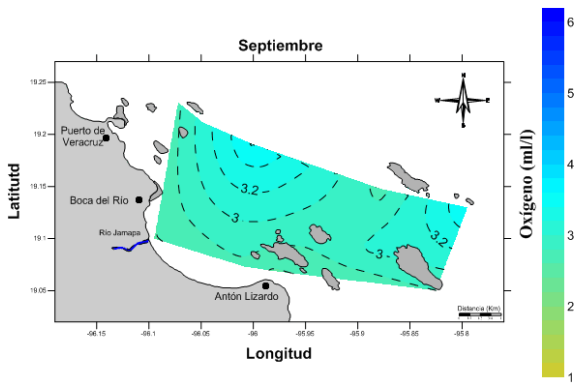
c)

Agosto 29



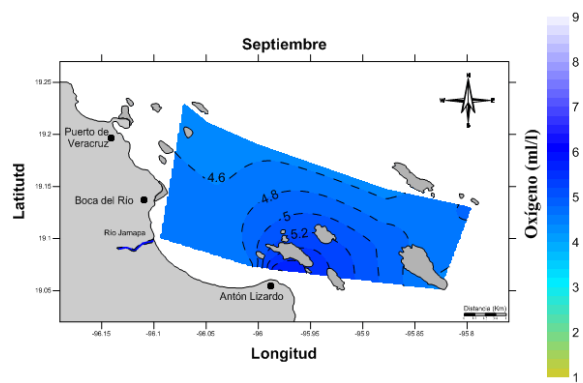
d)

Septiembre



e)

Septiembre



f)

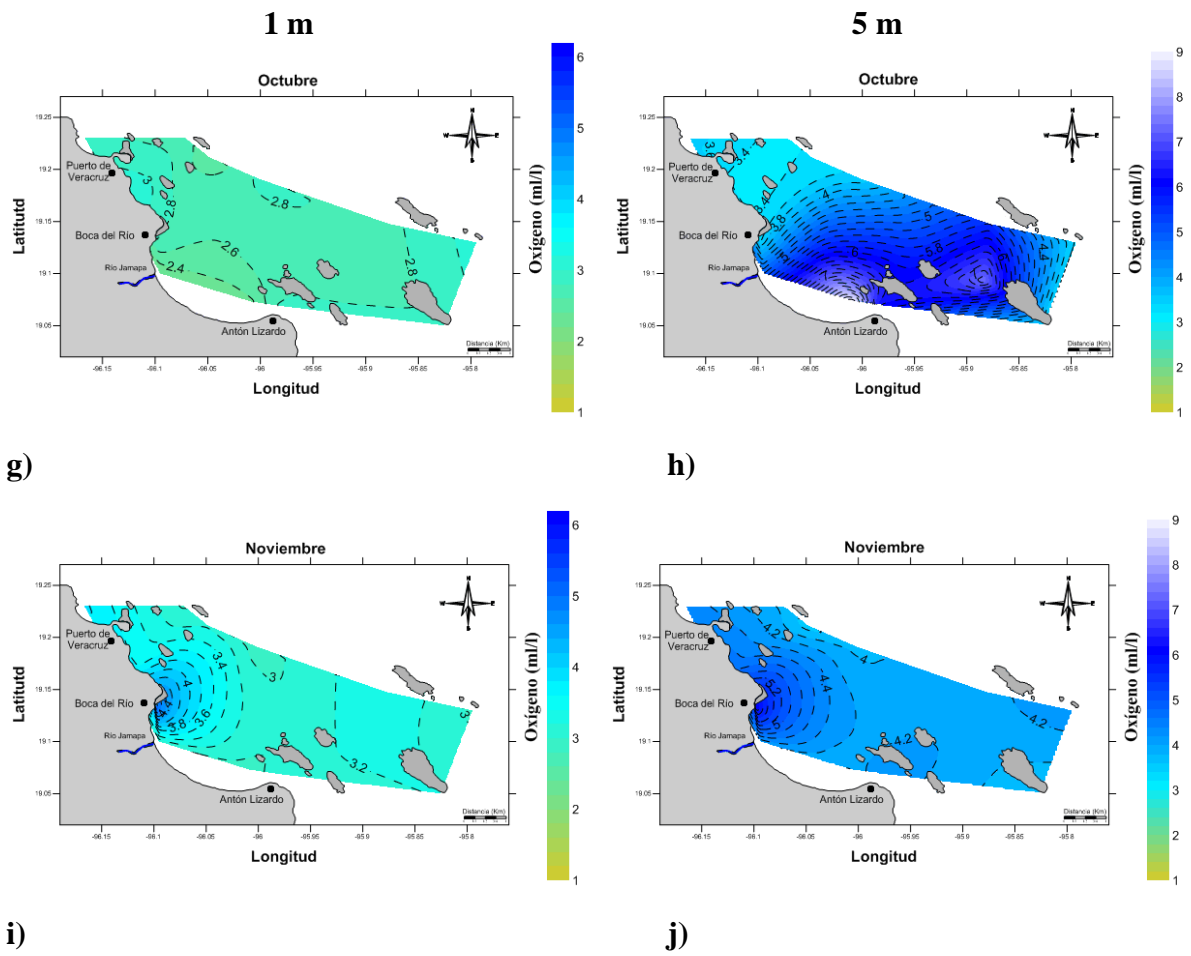


Figura 35. Variación horizontal de oxígeno a nivel superficial a 1 (izquierda) y 5 (derecha) metros durante el periodo de lluvias en el SAV.

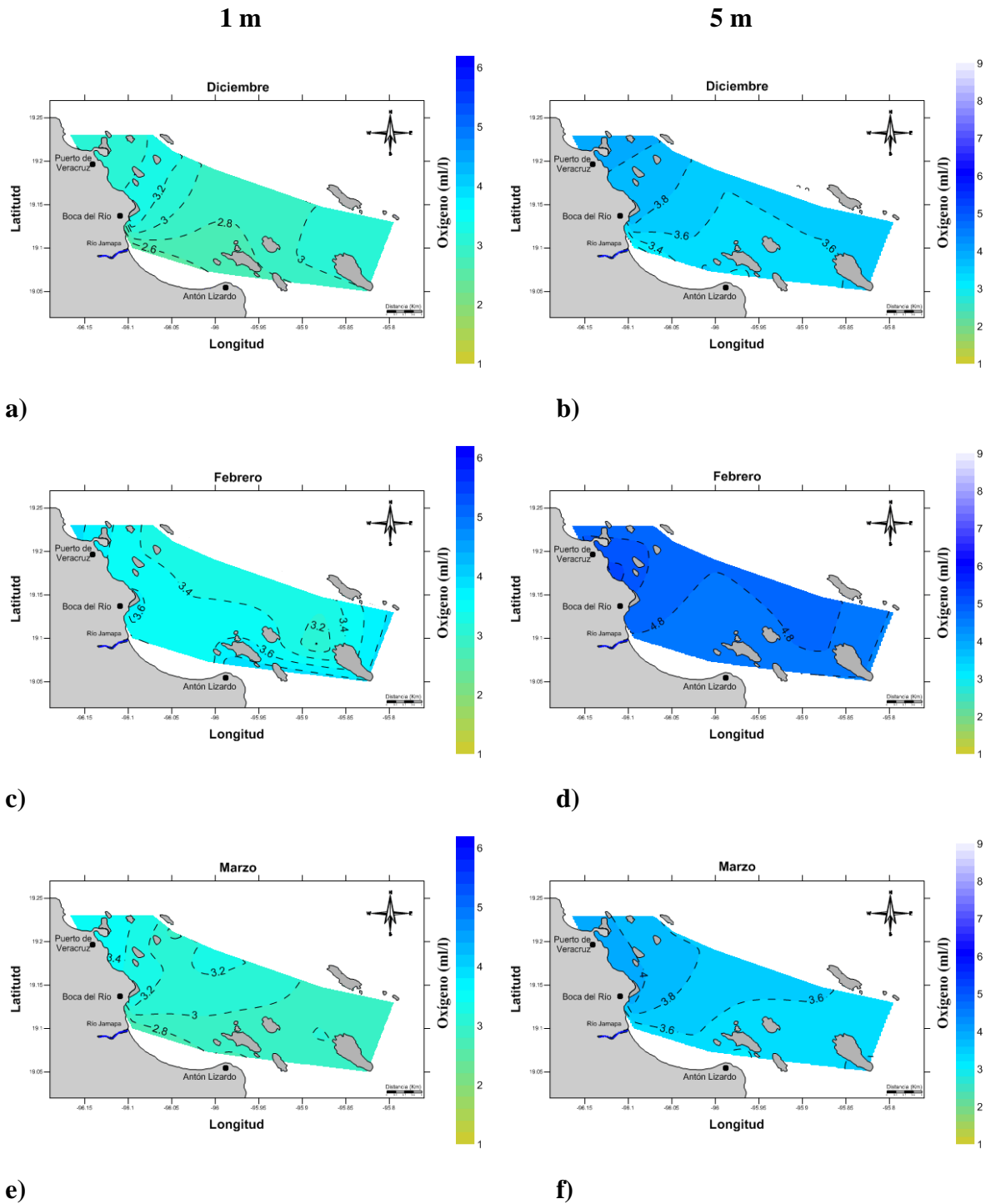


Figura 36. Variación horizontal de oxígeno a nivel superficial a 1 (izquierda) y 5 (derecha) metros durante el periodo de nortes en el SAV.

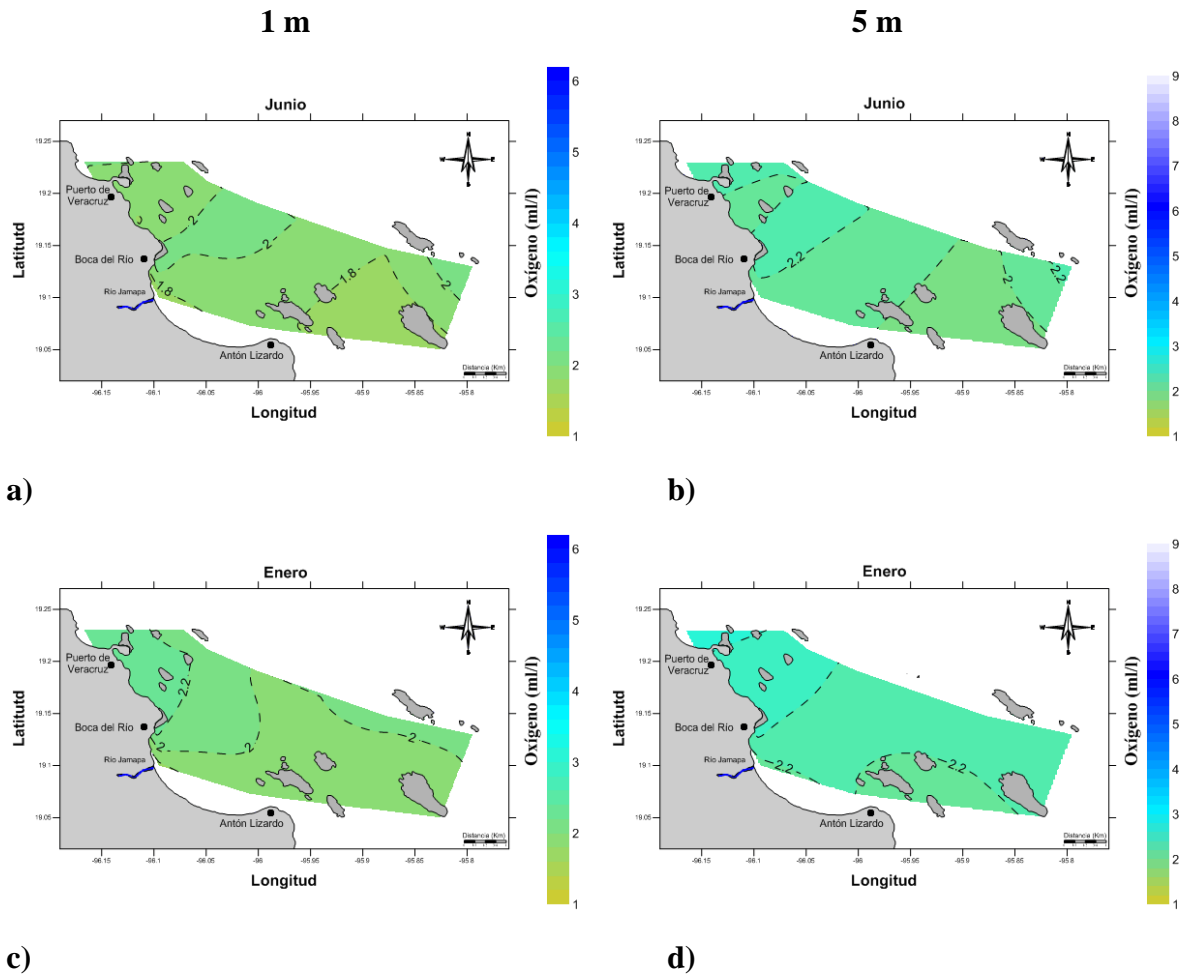
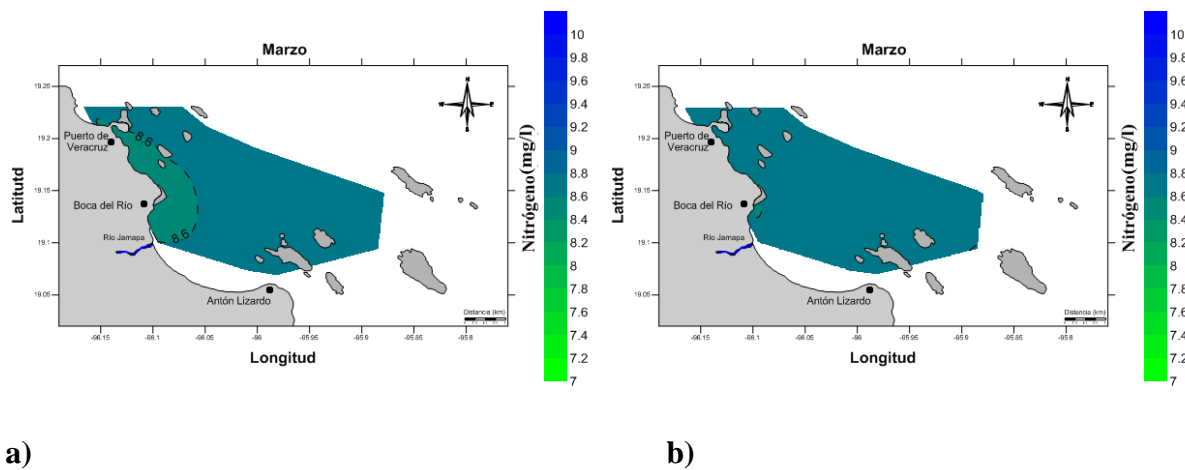


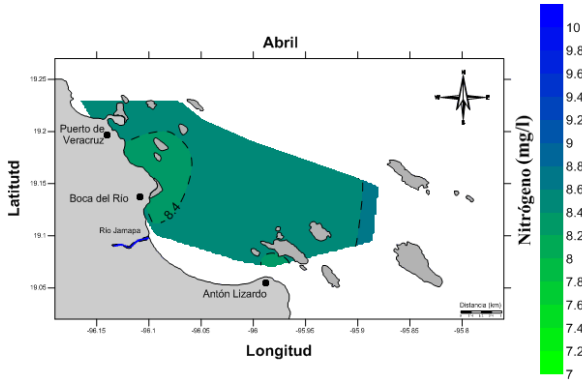
Figura 37. Variación horizontal de oxígeno a nivel superficial a 1 (izquierda) y 5 (derecha) metros durante los meses de transición en el SAV.

7.8.5 Nitrógeno

La variable nitrógeno (N^2) a nivel superficial (1 m de profundidad) presenta una fluctuación espacial homogénea en todo el sistema, con una temporalidad compuesta por dos periodos. Los meses sin eventos de “norte” (Fig. 38), comprendieron el primer periodo y el periodo de nortes el segundo (Fig. 39). Durante el periodo sin nortes los valores de nitrógeno presentan una variación de 8.2 a 8.6 mg/l y los valores más altos se registran en la zona norte del SAV. En el periodo de nortes la concentración de nitrógeno aumenta, presentando un rango de variación que va de los 8.4 a 9.2 mg/l, estando los valores más altos cercanos a la costa y al centro del SAV. A 5 m el nitrógeno presentó la misma variación espacio-temporal. Durante el periodo sin nortes (Fig. 38), se registraron valores de 8.2 a 8.8 mg/l y durante nortes (Fig. 39) se registró un rango de 8.4 a 9.2 mg/l. La fluctuación que se presenta a 5 m de profundidad es homogénea de forma espacial en el SAV con variaciones puntuales, como la disminución observada en la parte sur del SAV en los meses de abril y mayo (Fig. 38, d y f).

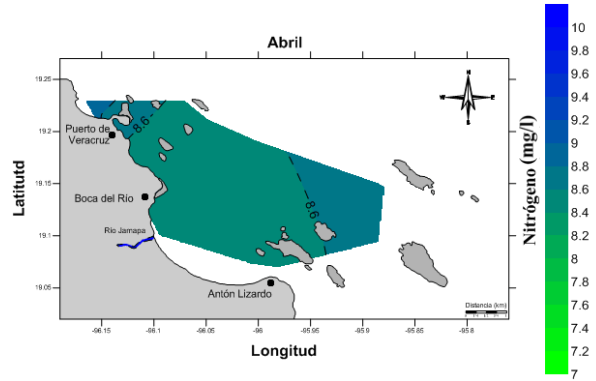


1 m

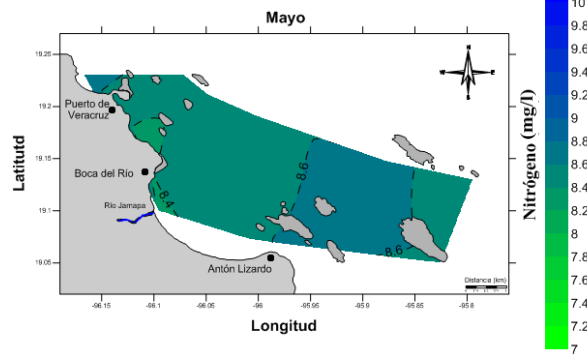


c)

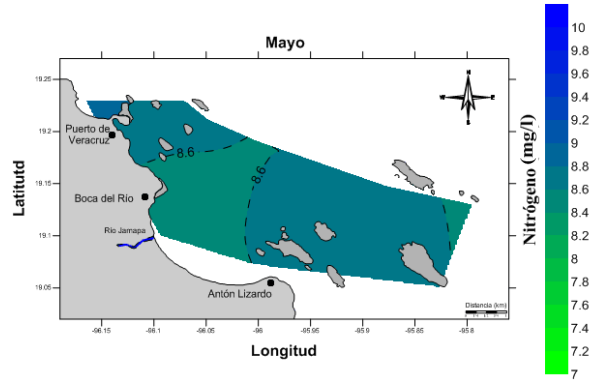
5 m



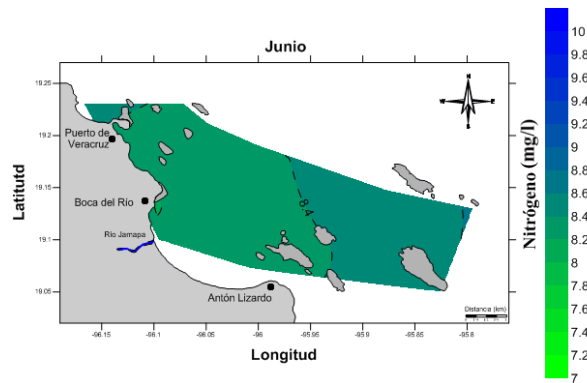
d)



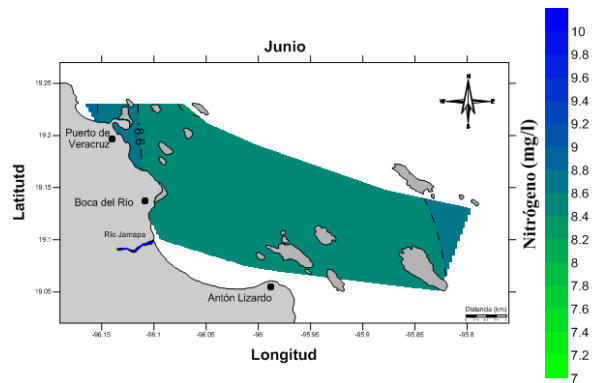
e)



f)



g)



h)

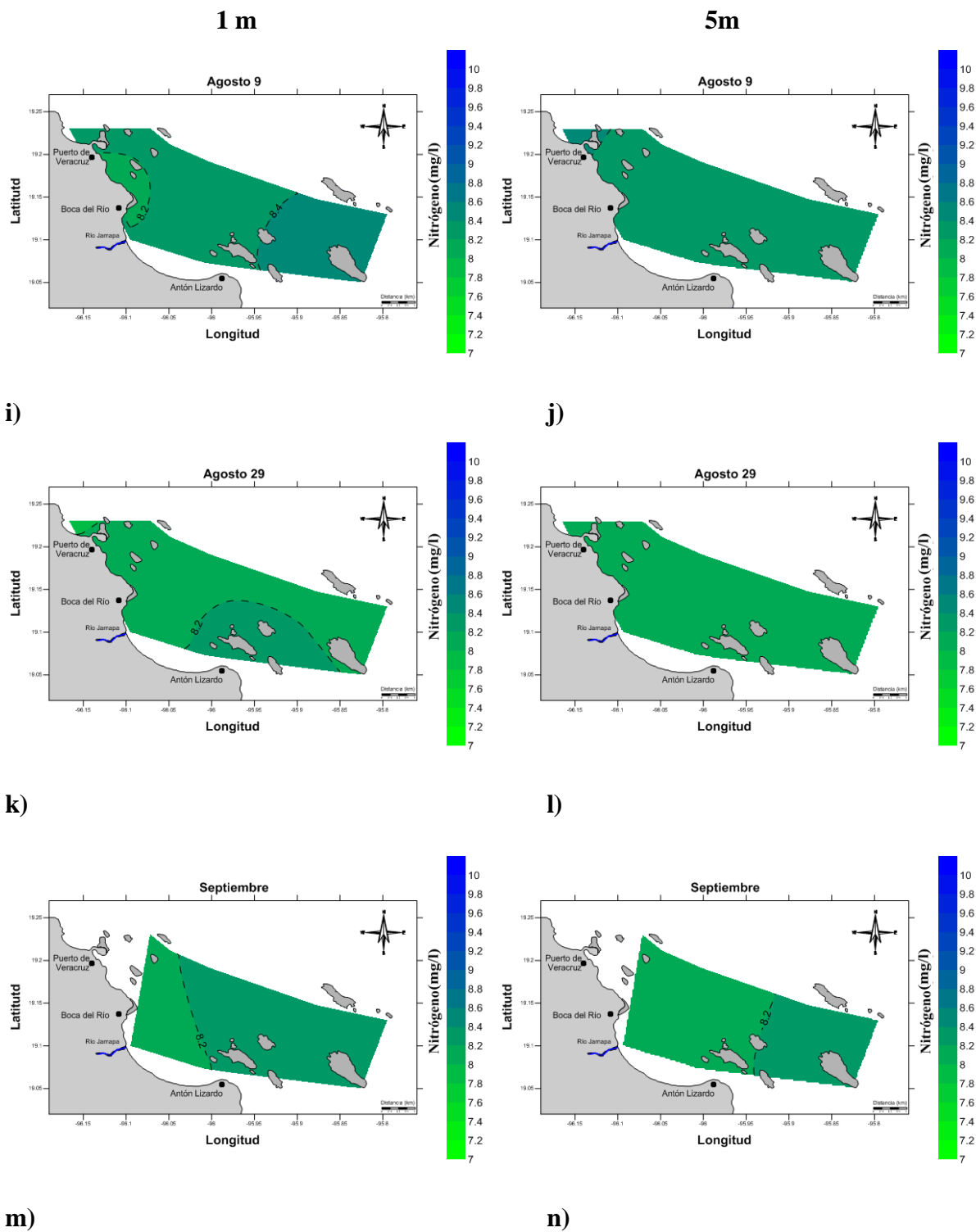
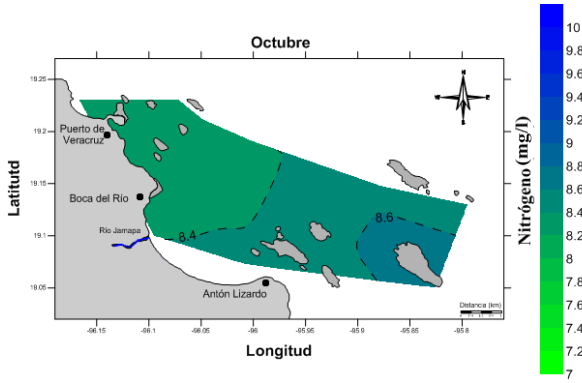


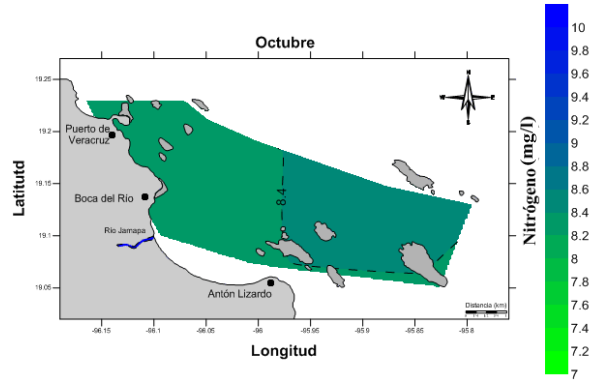
Figura 38. Variación horizontal de nitrógeno a nivel superficial a 1 (izquierda) y 5 (derecha) metros durante el periodo sin nortes en el SAV.

1 m



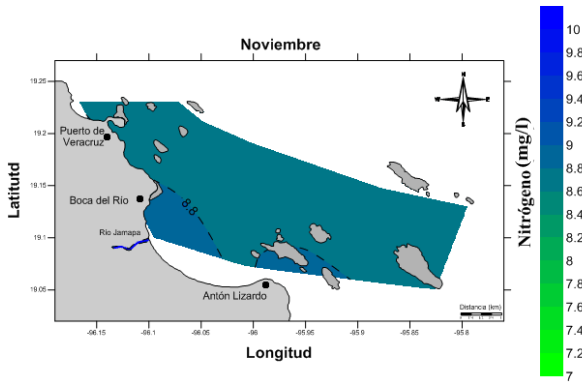
a)

5 m



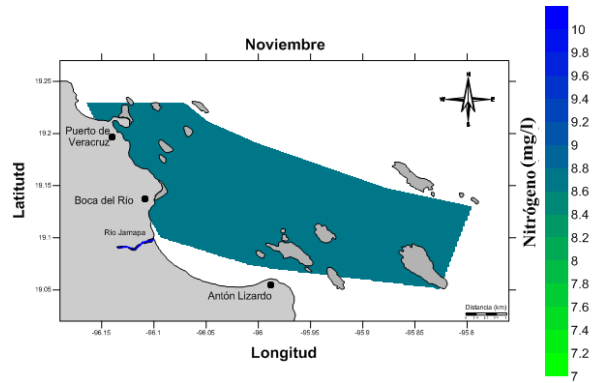
b)

Noviembre



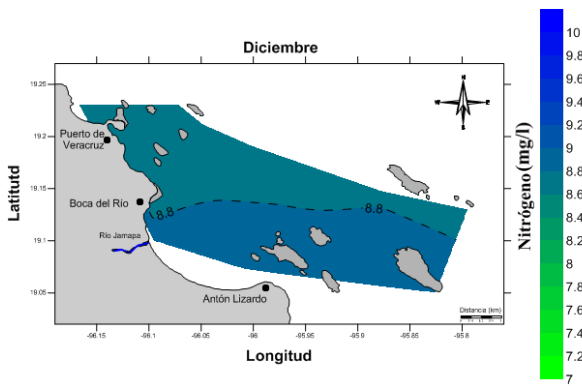
c)

Noviembre



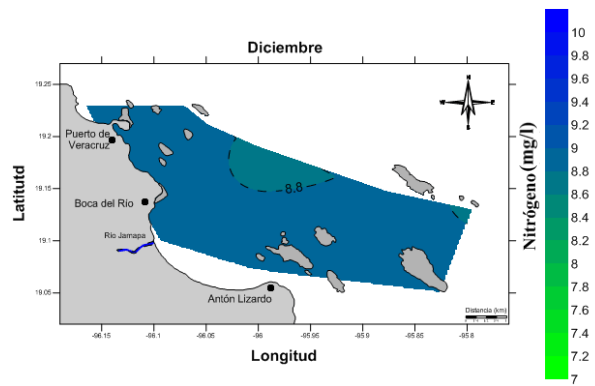
d)

Diciembre



e)

Diciembre



f)

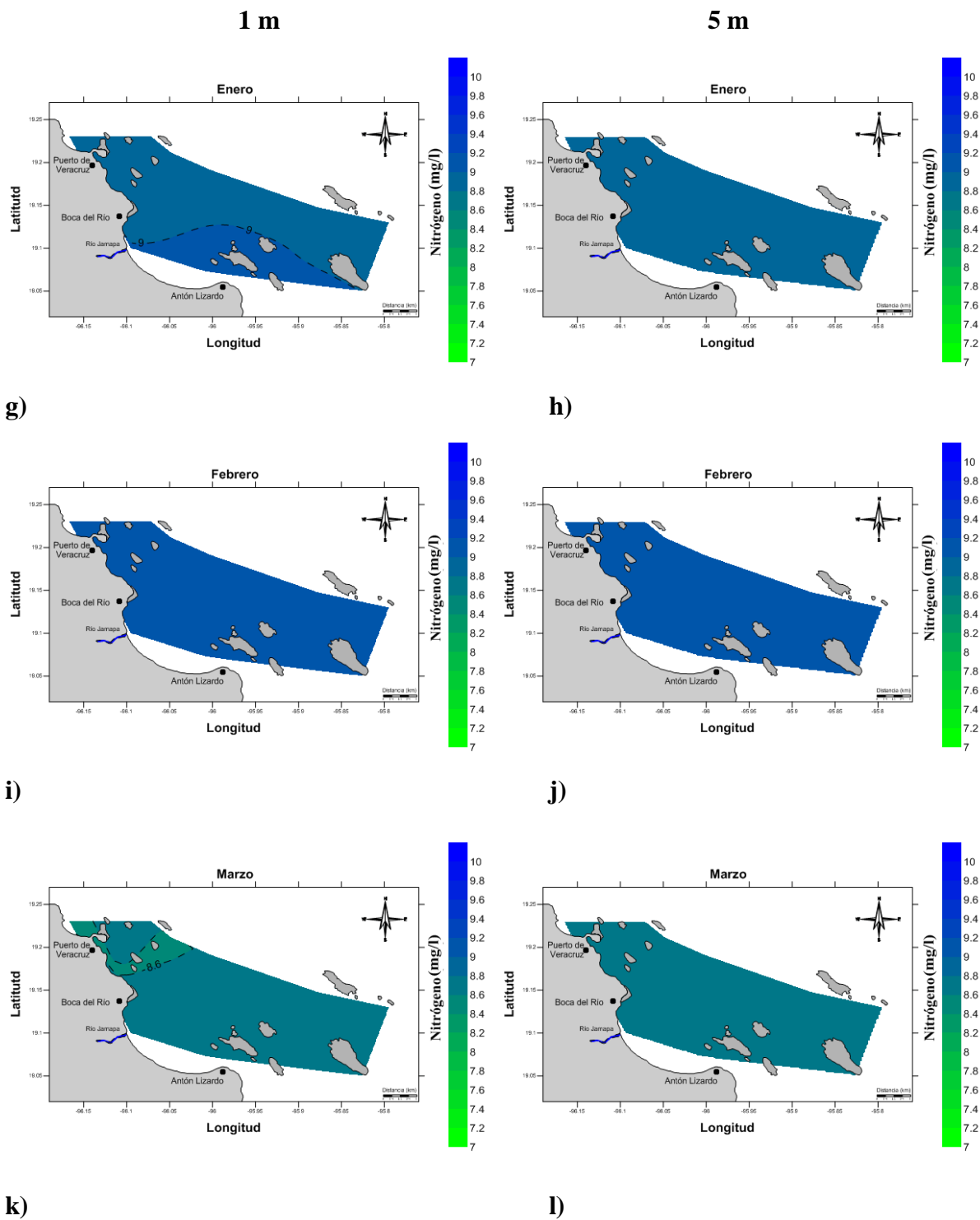
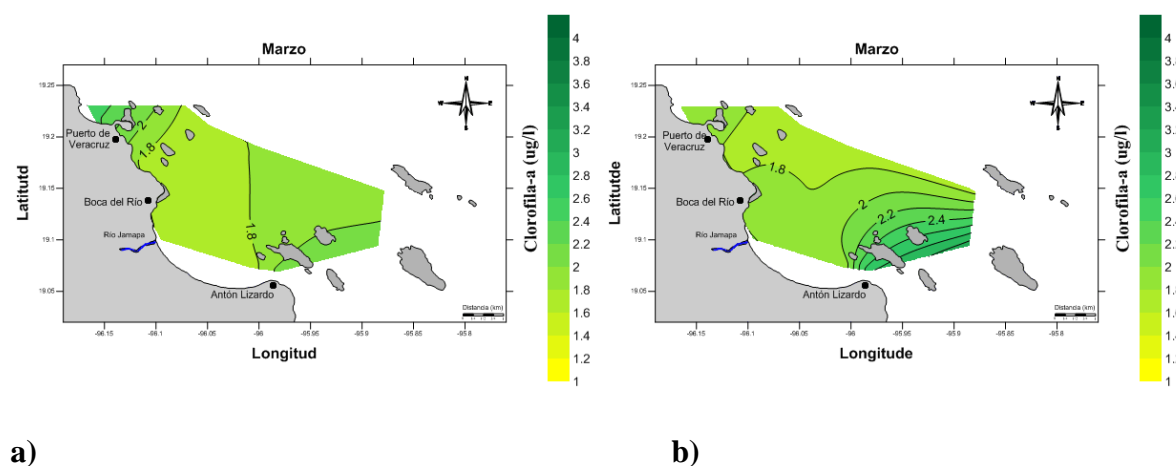


Figura 39. Variación horizontal de nitrógeno a nivel superficial a 1 (izquierda) y 5 (derecha) metros durante el periodo de nortes en el SAV.

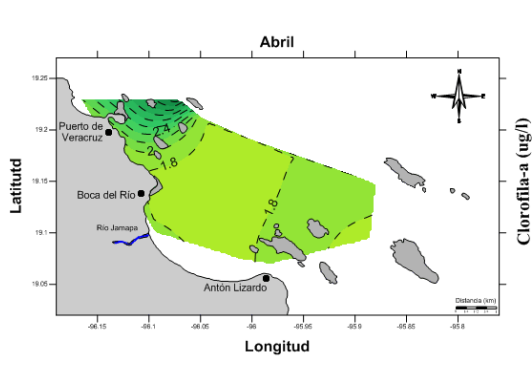
7.8.6 Clorofila-a

De forma general la clorofila-a presenta un rango de variación temporal que va de 1.8 a 2.6 $\mu\text{g/l}$. Durante el muestreo no se registraron valores mayores a 3 $\mu\text{g/l}$ a nivel superficial, observándose una fluctuación espacial en el sistema en las zonas de mayor concentración de clorofila-a. En el mes de abril (Fig. 40) el rango de valores fue de 1.6 a 2.8 $\mu\text{g/l}$, con incremento hacia la zona norte expuesta de la costa. El mes de junio (Figura 40, g) mostró un rango de 1.6 a 2.6 $\mu\text{g/l}$, con incremento en la zona sur expuesta del sistema y durante el mes de febrero, se observaron rangos de 1.6 a 2.6 $\mu\text{g/l}$, con incremento en la zona centro del SAV.

La fluctuación de clorofila-a, a 5 metros de profundidad mostró valores de hasta 4 $\mu\text{g/l}$ durante el periodo de muestreo. De forma general se registraron valores más altos cerca de la costa frente al municipio de Boca del Río y la descarga del Río Jamapa. Una vez más la variación fue de forma puntual, en el mes de marzo se pueden notar valores de 1.6 a 2.8 $\mu\text{g/l}$, aumentando hacia los arrecifes más cercanos y al centro del SAV frente a Antón Lizardo. A partir del mes de abril (Fig. 40, d) se incrementa la concentración de clorofila-a en la zona costera frente al municipio de Boca del Río y el Río Jamapa. En los meses de mayo, junio y agosto (Fig. 40, f, h y j), la concentración de clorofila-a en la misma zona registra valores entre 1.6 a 2.8 $\mu\text{g/l}$ y en el mes de enero de 2012, se observan rangos de variación de 1.6 a 3 $\mu\text{g/l}$ en la zona centro costera del SAV.

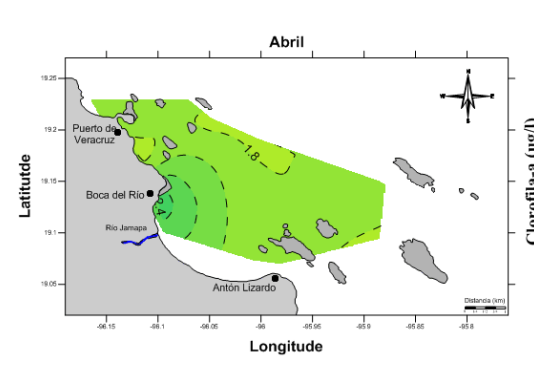


1 m

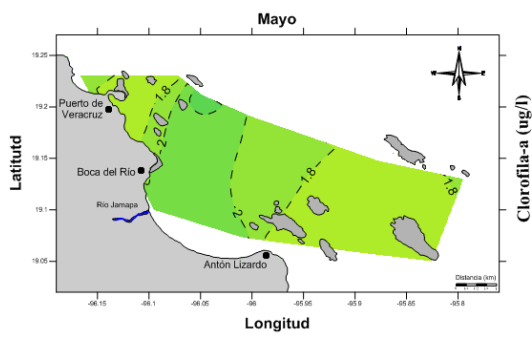


c)

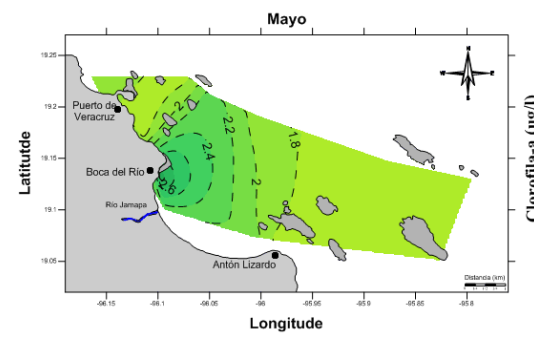
5m



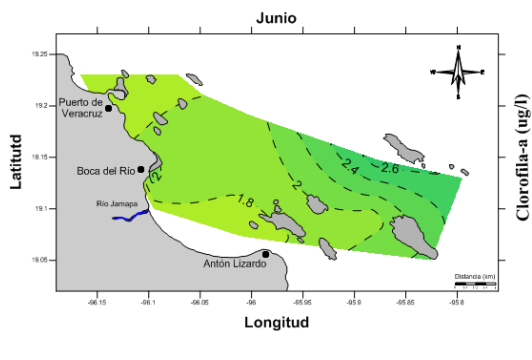
d)



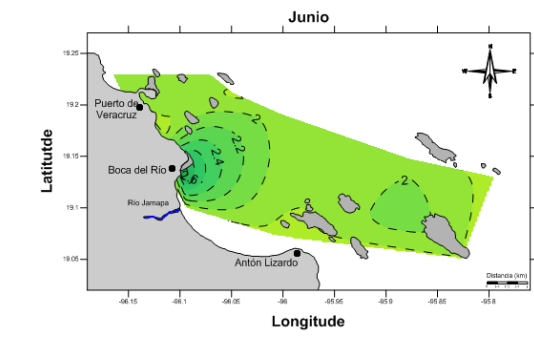
e)



f)

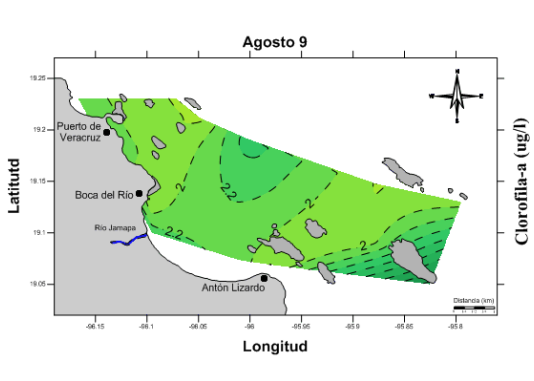


g)



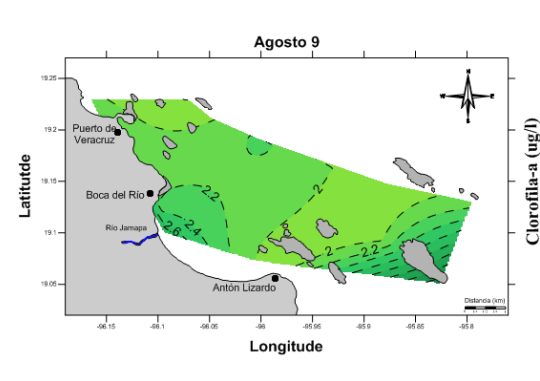
h)

1 m

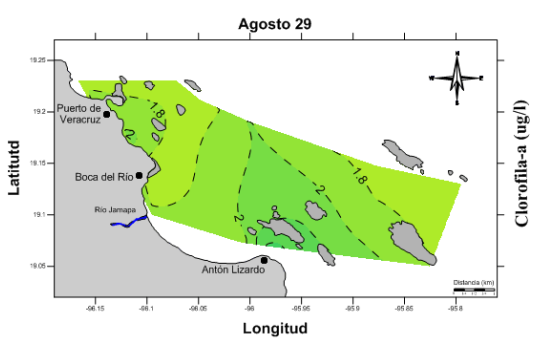


i)

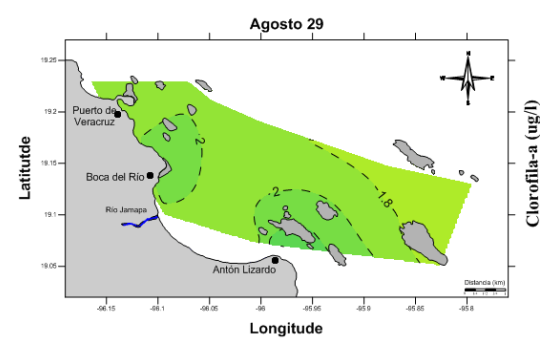
5m



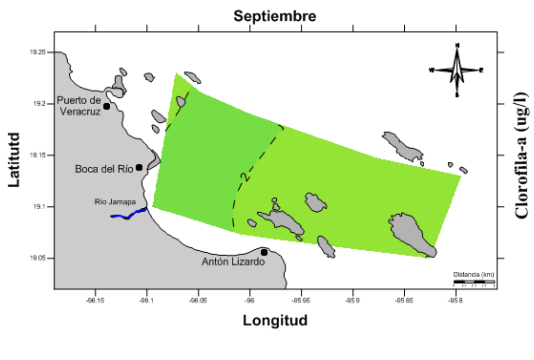
j)



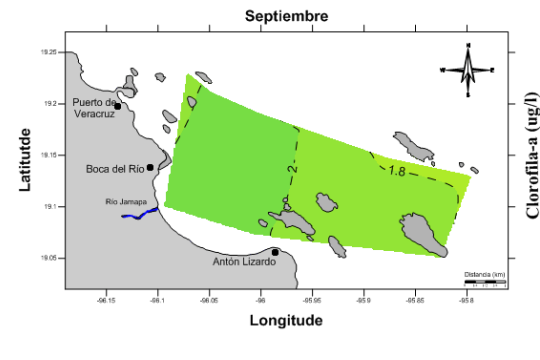
k)



l)

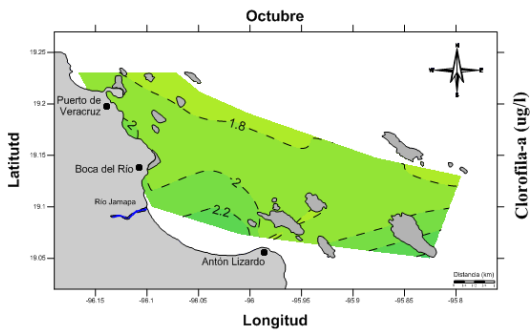


m)



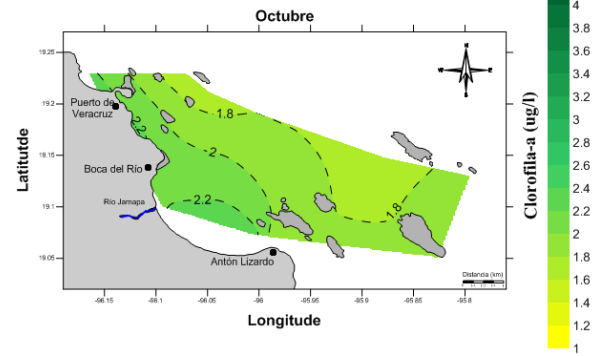
n)

1 m

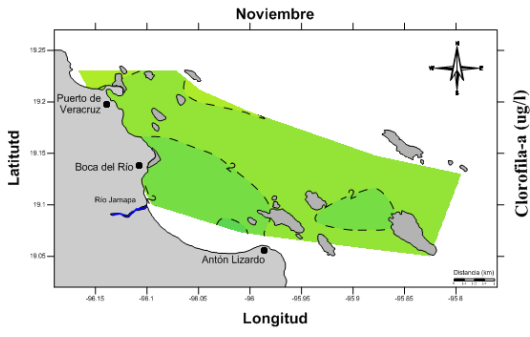


n)

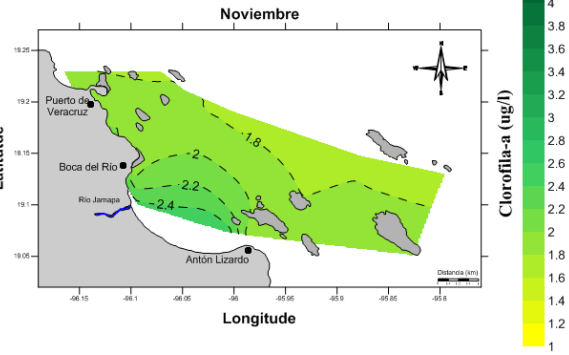
5m



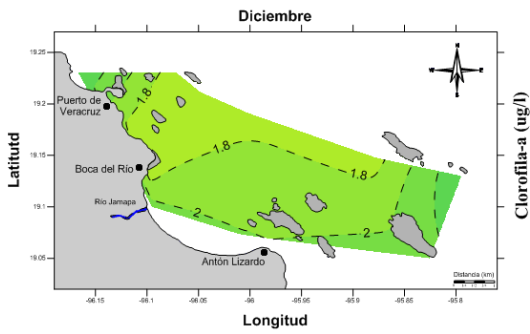
o)



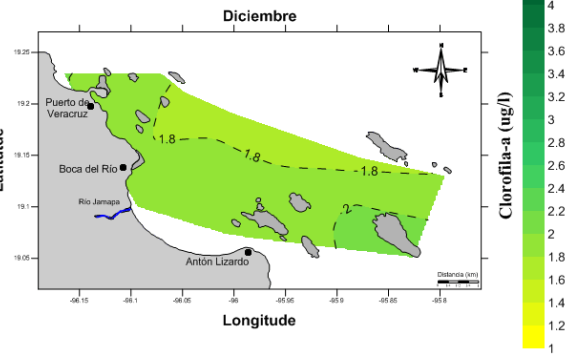
p)



q)



r)



s)

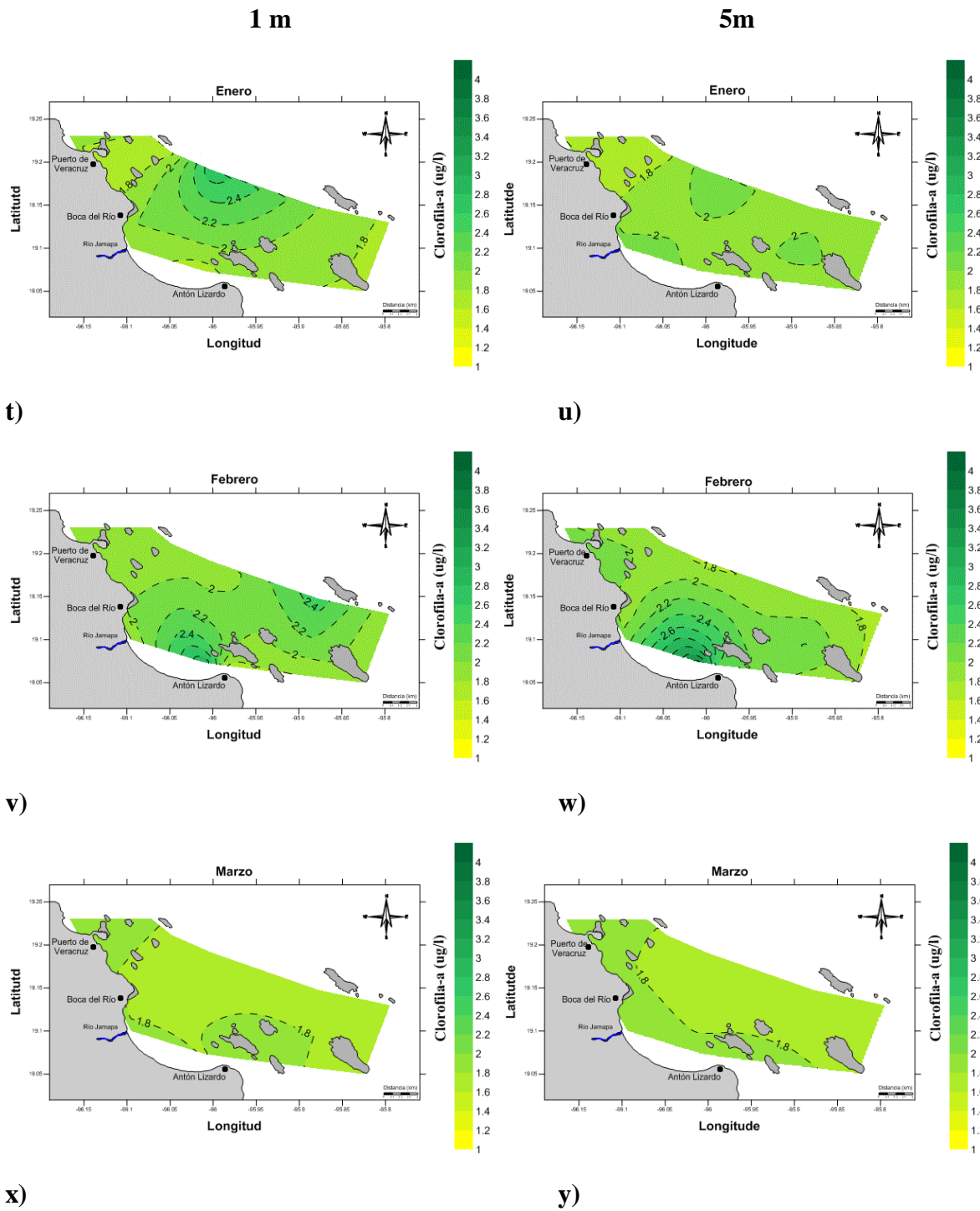


Figura 40. Variación horizontal de clorofila-a a nivel superficial a 1 (izquierda) y 5 (derecha) metros durante el periodo de nortes en el SAV.

8. Discusiones

8.1 Variación intermensual de los parámetros hidrográficos

Los cambios intermensuales en los parámetros hidrológicos dieron como resultado una variabilidad integrada, en general, por tres periodos a lo largo del año, denominados de acuerdo a su dependencia climatológica como: secas, lluvias y nortes. Esta variación es la resultante de la interacción ambiental a escala local con los factores de la variabilidad atmosférica en el GoM (meso escala), ya que el periodo de secas abarca los meses de marzo a junio, el periodo de lluvias de junio a octubre y el periodo de nortes comprende de octubre a marzo, estos resultados concuerdan con varios autores (entre otros Zavala-Hidalgo *et al.*, 2002; Carrillo *et al.*, 2007; Dubranna *et al.*, 2011; Salas-Pérez y Arenas-Fuentes, 2011; Okolodkov *et al.*, 2011; Mateos-Jasso *et al.*, 2012). Así mismo, se observó que la variación local está determinada principalmente por el efecto de las descargas de los ríos Jamapa y Papaloapan (Krutak, 1997), por el efecto de los arrecifes que modifica las características hidrológicas en diferentes zonas del sistema (Salas-Monreal *et al.*, 2009) y por aquellas variaciones producidas por el viento (Salas-Pérez y Arenas Fuentes, 2011; Mateos-Jasso *et al.*, 2012). La temporalidad descrita fue especialmente obvia a través de la temperatura, salinidad y consecuentemente la densidad. El oxígeno, nitrógeno y clorofila-a, variables relacionadas con procesos biológicos, indican una variación local, atribuida a cambios en la densidad de poblaciones, lo cual fue por primera vez, registrado gráficamente.

En marzo de 2011 se observaron características del periodo de secas; sin embargo, en marzo de 2012, las características fueron de nortes. Esto se debe, al corrimiento en las estaciones del año (Salas de León *et al.*, 2006), ya que marzo ha sido descrito anteriormente como un mes que presenta gradientes marcados por el efecto de los vientos en la estación de invierno (Zavala-Hidalgo *et al.*, 2002; Okolodkov *et al.*, 2011). Con ello, al fijar periodos climáticos dentro de un rango de meses específico, es importante considerar las características atmosféricas particulares de cada año. Esto debe ser clave en los periodos de transición entre temporadas.

De acuerdo con Hernández-Téllez y Salgado-Rivero (1996), los valores de salinidad, temperatura y densidad presentes en el SAV, corresponden a dos masas de agua, una es la masa de Agua

Costera (AC) y la otra es la masa de Agua Diluida (AD), aunque en este estudio registramos que el AC presenta un rango de 34 a 36.8 ups, de 19.6 a 30 °C y de 22 a 26 kg/m³, siendo 1.4 °C menor que el valor mínimo y 1 °C más que el valor máximo.

8.2 Flujo de viento en el SAV

Durante primavera y verano, la dirección del viento dominante fue de sur a norte franco y durante otoño e invierno se presentó de manera inversa. Dicha periodicidad atmosférica corresponde a la temporalidad de vientos registrada en el GoM, que presenta eventos de huracanes en verano (mayo-agosto) y de “nortes” en invierno (septiembre-marzo) (Zavala-Hidalgo *et al.*, 2002; Morey *et al.*, 2006; Martínez-López y Zavala-Hidalgo, 2009; Dubranna *et al.*, 2011; Mateos-Jasso *et al.*, 2012; Salas-Pérez y Arenas-Fuentes, 2011). La intensidad de la velocidad del viento comprendió valores entre 5 m s⁻¹ y 24 m s⁻¹ y un promedio de 4.7 m s⁻¹, se ha reportado un promedio anual para la región de 12 m s⁻¹, con ráfagas de hasta 19 m s⁻¹ (Salas-Pérez y Arenas-Fuentes, 2011). Esta variación existe debido a las diferencias de liberación de energía, dependiente de las características de cada año. El evento con mayor intensidad sucedió durante noviembre, mismo que ha sido descrito como el mes donde la interacción océano-atmosfera se intensifica, producto de los eventos de “nortes”, lo que incrementa la transferencia de calor de las aguas del GoM a la atmosfera (Zavala-Hidalgo *et al.*, 2002; Zavala-Hidalgo *et al.*, 2003). Los datos registrados durante el tiempo de investigación, denotaron que la componente principal del viento en el SAV fue paralela a la costa, con cambios en su dirección dependiendo de la época del año, influenciada por la temporalidad del GoM.

8.3 Variación en la profundidad de la picnoclina

A pesar de que las corrientes en el SAV son influenciadas por la dinámica del GoM, el giro de Campeche y la plataforma de Luisiana y Texas (Zavala-Hidalgo *et al.*, 2002), las estructuras arrecifales del SAV modifican la dirección de la corriente generando giros ciclónicos y/o anticiclónicos. Mediante el análisis de variación de la picnoclina se aprecia en distintos meses del

año, que el “arrecife Cabezo” durante mayo generó zonas de divergencias, lo que propició la formación de un giro anticiclónico; La formación de estos giros se debe a la modificación del flujo de la corriente litoral por efecto batimétrico local (Salas-Monreal *et al.*, 2009; Salas-Pérez *et al.*, 2012). En octubre de 2011 se registró la primera evidencia de la influencia del periodo de nortes, debido a que el agua proveniente del norte, al encontrarse con las estructuras arrecifales del SAV y la plataforma continental, formaron un giro anticiclónico en el área expuesta del sistema, hacia el centro de éste. Esto concuerda con el patrón de corrientes mencionado por Salas-Monreal *et al.* (2009), sin embargo es en este estudio donde se describe este fenómeno con datos hidrográficos por primera.

Se ha descrito que al suroeste del GoM sobre la plataforma TAVE el viento tiene mayor efecto en la columna de agua en comparación con otras zonas costeras del GoM (Zavala-Hidalgo y Fernández-Eguiarte, 2006; Dubrana *et al.*, 2011). Es por eso que a partir del mes de noviembre de 2011 y hasta marzo de 2012, la variación en la profundidad de la piconclina obedece a la batimetría del sistema, ocasionado por la mezcla de la columna de agua provocada por la influencia de los vientos del norte (Monreal-Gómez *et al.*, 2004; Zavala-Hidalgo *et al.*, 2002).

8.4 Análisis de disimilitud

Las tres áreas delimitadas mediante el análisis de disimilitud del valor promedio anual de las variables hidrológicas en el SAV, concuerdan con lo descrito por Okolodkov *et al.* (2011), ya que en ambos casos la zona cercana al Río Jamapa y la zona conurbana Veracruz-Boca del Río, presentan menor concentración de salinidad, debido a las descargas del Río Jamapa en la zona centro del SAV, así como las múltiples descargas de drenaje de la zona conurbana Veracruz-Boca del Río. Okolodkov *et al.* (2011) mencionan que para determinar diferencias en la temporalidad climática en el SAV debe usarse la temperatura, sin embargo en este estudio se observó que la salinidad y densidad son variables que robustecen el análisis estadístico ayudando a delimitar las diferencias intragrupos y entregrupos.

8.5 Temperatura, Salinidad y Densidad

8.5.1 Temperatura superficial

Müller-Karger y Walsh (1991) y Zavala-Hidalgo *et al.* (2002) registraron valores mayores a 30 °C al suroeste del GoM durante el verano, similares a los registrados con los datos de TSS en secas y lluvias registrada por la *WHOI* a 100 km de la costa frente al puerto de Veracruz. En el SAV se registraron 2 °C más, ocasionado por zonas de alta evaporación generadas por las estructuras arrecifales y plataforma interna (Carrillo *et al.*, 2007; Salas-Monreal *et al.*, 2009). La TSS registrada en la *WHOI* durante nortes, concuerdan con los valores máximos registrados en el SAV, la disminución de temperatura se debe principalmente al efecto de los vientos, el cual es muy marcado durante los meses de invierno (Zavala-Hidalgo *et al.*, 2002). En los rangos de variación de TSS obtenidos en el presente estudio se pueden diferenciar los distintos periodos de dependencia climatológica que se han descrito (secas, lluvias y nortes).

8.5.2 Rangos de variación

Los valores mínimos de temperatura, salinidad y densidad, que se registraron en este estudio, son menores a aquellos reportados para el Agua común del GoM (ACGM) (Monreal-Gómez *et al.*, 2004), debido a que se tomaron registros frente a la desembocadura del Río Jamapa. Los valores altos (> 30 °C) registrados se deben a las zonas cercanas a la costa y a las estructuras arrecifales las cuales funcionan como áreas de evaporación (Biggs, 1992; Monreal-Gómez *et al.*, 2004; Salas-Pérez y Arenas-Fuentes 2011; Mateos-Jasso *et al.*, 2012). Mediante los datos obtenidos se puede apreciar que el SAV cuenta con áreas de influencia de descarga continentales, así como con influencia de zonas bajas con agua cristalina, dando como resultado rangos diferentes a las del ACGM.

Durante el periodo de secas se presentó el mayor rango de variación de temperatura (11 °C), así como el valor más alto de densidad (26.3 kg/m³) y el más bajo de temperatura registrado para el

SAV (19 °C), el cual es 2 °C menor a lo reportado por Mateos-Jasso *et al.*, (2012), quienes registraron la temperatura de mayo de 2006 a octubre de 2010.

Durante lluvias se registraron bajas concentraciones de salinidad y densidad como resultado de la dilución del ACGM con la descarga de los ríos locales, con concentraciones salinas de 28.8 ups y densidades de hasta 17.5 kg/m³ (Krutak, 1997; de la Lanza-Espino y Gómez-Rojas, 2004; Okolodkov *et al.*, 2011; Salas-Pérez *et al.*, 2012; Mateos-Jasso *et al.*, 2012). El hecho de haber encontrado valores más altos de temperatura y salinidad de hasta 32 °C y 37 ups, respectivamente, con respecto al ACGM, se debe al incremento de radiación solar en la franja tropical durante el transcurso del año (Trujillo y Thurman 2008) y a zonas de alta evaporación generadas por los arrecifes y zona costera (Salas-Monreal *et al.*, 2009).

El periodo de nortes presentó valores homogéneos, con no más de 4.2 °C, 2 ups y 1.2 kg/m³ en relación al máximo y mínimo, como producto de la mezcla de la columna de agua ocasionada por el viento (Carrillo *et al.*, 2007). Este estudio registró que de noviembre de 2011 a febrero de 2012 el SAV presentó una disminución de 3 °C y una disminución de 1 ups en los valores máximos. Salas-Pérez y Arenas-Fuentes (2011), reportan para febrero de 2005 valores de 19.47 a 23.5 °C y 33.26 a 36.46 ups, mencionando que después de un evento de “nortes” el agua en el centro del SAV puede disminuir hasta 2 °C y 2 ups, ya que el agua marina y las descargas de aguas continentales (producto de las lluvias ocasionales durante este periodo) se mezclan (Carrillo *et al.*, 2007).

8.5.3 Variación en la vertical

Las condiciones que influyen directamente sobre la variación de temperatura, salinidad y densidad del SAV son la descarga fluvial del sistema rivereño Jamapa-Cotaxtla (Krutak, 1997; Salas-Pérez y Granados-Barba, 2008) y las zonas de alta evaporación generadas por los arrecifes y la plataforma costera (Salas-Monreal *et al.*, 2009).

Hasta ahora, las concentraciones de salinidad más altas para el GoM, se habían registrado en la plataforma de Campeche (36.4 a 36.6 ups) (Monreal-Gómez *et al.*, 2004), sin embargo en el SAV

se han registrado valores de 39 ups reportadas por Salas-Monreal *et al.*, (2009), en la presente investigación se registraron salinidades de hasta 0.4 ups mayores que las de Campeche, aunque 2 ups menores que las del SAV para el mes de junio de 2007. Estos resultados concuerdan con los valores registrados en este estudio para la zona centro y sur del sistema, encontrándose en la zona norte (ST10) una estratificación en la columna de agua a 15 m de profundidad con aguas superficiales de 28 °C y 34 ups y aguas de fondo (40 m) de 19 °C y 37 ups para este mismo mes. Este fenómeno se debe a que el agua del fondo del suroeste del GoM conserva por mayor tiempo su baja temperatura al estar más alejada de la influencia de la corriente de lazo (Müller-Karger y Walsh, 1991). Nowlin *et al.* (1998), Zavala-Hidalgo *et al.* (2002), Carrillo *et al.* (2006) y Mateos-Jasso *et al.* (2012), mencionan que son un producto de las condiciones favorables de vientos (dirección sur-sureste) durante los meses de abril a septiembre sobre la capa superficial, lo cual genera eventos de advección, presentando sitios de menor temperatura, a profundidades mayores a 25 m al norte (ST10) del SAV.

Durante secas y lluvias la columna de agua en el SAV presentó estratificación superficial, así como disminución de temperatura y aumento de salinidad conforme incrementa la profundidad. La estratificación entre periodos es diferente, ya que durante secas la columna se encuentra mayormente estratificada por temperatura, con una picnoclina no mayor a los 10 m de profundidad, incrementándose conforme pasan los meses hasta llegar al fondo. Este incremento se presenta en forma de un gradiente durante agosto y septiembre, con una diferencia de hasta 6 °C. Durante la temporada de lluvia se presenta una estratificación de salinidad en superficie (hasta 10 m) debido a la disminución de la concentración salina, como un producto del incremento en la descarga del río.

La variación en las descargas locales así como la variación en la columna de agua concuerda con lo reportado anteriormente para el SAV por Krutak (1997), CONAGUA (2006), Salas-Pérez *et al.* (2012), Mateos-Jasso *et al.* (2012). Carrillo *et al.* (2007) mencionan, de acuerdo a un análisis del promedio mensual de lluvias, que de enero de 1943 a diciembre de 1993, el periodo de lluvias en el SAV ha comprendido los meses de junio a octubre, con máxima precipitación en septiembre. De acuerdo con CONAGUA (2006), los ríos Jamapa y Papaloapan presentaron sus mayores descargas en el periodo de julio a noviembre con picos en el mes de octubre. Este

trabajo registró un periodo de lluvias durante los meses de agosto a octubre con mínimos de salinidad en agosto. Estas variaciones en los registros máximos del volumen de descarga del afluente, podrían indicar un desfase en los picos máximos en la descarga de los ríos locales, lo cual es normal, sobre todo en la convergencia intertropical. Con esto se piensa que, el segundo periodo de disminución de salinidad y densidad observada en la zona sur (ST5) en el mes de octubre, es atribuido a un desfase en las descargas de los ríos locales.

La mezcla producida por el efecto de los “nortes” sobre la columna de agua (Dubranna *et al.*, 2011; Salas-Pérez y Arenas-Fuentes, 2011; Mateos-Jasso *et al.*, 2012), homogenizó los valores de temperatura, salinidad y densidad de la superficie hasta el fondo, presentándose una variación en forma de gradiente, con valores entre los 23.8 a 25 kg/m³ y un diferencia de hasta 1.2 °C, 1.5 ups y 1.2 kg/m³. A excepción de la ST1 donde prevaleció una disminución de salinidad y densidad de manera superficial (hasta 2 m), como producto de las descargas continentales de lluvias invernales (de la Lanza-Espino y Gómez-Rojas 2004) comunes en esta zona durante la temporada de nortes.

8.6 Oxígeno

Roldán-Pérez (1992) menciona que el oxígeno es utilizado en la caracterización y dinámica de sistemas acuáticos, al describir mediante su variación distintos tipos de procesos físico-químicos y biológicos. En el SAV las concentraciones de oxígeno presentaron un intervalo de concentración anual de 1.6 a 9.1 ml/l y cuatro tipos de variación, una más de la temporalidad antes descrita, considerando el cuarto caso como periodos de transición.

En el GoM el contenido de oxígeno es uniforme en la capa superficial de mezcla (de 0 a 150-250 m de profundidad) con 4.5 ml/l, misma concentración que se observa en la plataforma de Campeche, Veracruz y el Caribe (Biggs, 1992; Caso *et al.*, 2004), coincidiendo con lo registrado en el SAV. Durante el periodo de secas se registraron valores entre 3 y 5 ml/l y la columna de agua presentó valores homogéneos, con menores concentraciones en superficie (hasta 5 m) al centro y sur del sistema, la diferencia entre la capa superficial y el fondo fue de 2 ml/l.

En los meses de junio de 2011 y enero de 2012, se presentó una disminución en los rangos de concentración de oxígeno (de 1.6 a 2.9 ml/l), siendo caracterizados como periodos de transición temporales. Los valores registrados durante los meses de transición son 0.4 ml/l menores a los reportado frente a las descargas del Mississippi (Signoret *et al.*, 1998), sin embargo, la condición hipoxica es provocada por el afluente del río, el cual genera una estratificación en la capa superficial en los primeros 60 metros, dando como resultado que el agua de bajo no se ponga en contacto con el aire y disminuya sus concentraciones a estados de hipoxia. Esta condición se pierde con la llegada de los “nortes” los cuales rompen la estratificación y favorecen la mezcla (Diaz y Rosenber, 1995; Signoret *et al.*, 1998; Signoret *et al.*, 2006; Rabalais, 2004). La disminución de oxígeno en el SAV durante los meses de transición, depende de procesos biológicos de consumo de oxígeno de los organismos presentes en el SAV, más que a una componente estrictamente hidrológica.

La solubilidad del oxígeno en el medio marino aumenta cuando disminuye la temperatura y la salinidad, lo que afecta el porcentaje de saturación óptima de oxígeno en un cuerpo de agua (Alvarado y Aguilar, 2009; Roldán-Pérez, 1992), pero niveles bajos de oxígeno como los encontrados a nivel superficial, de hasta 1.7 ml/l en el SAV durante lluvias, pueden ser indicativo de altas concentraciones bacterianas (Rogers *et al.*, 2001). Además, se presentó una variación de forma puntual, en el mes de agosto en la ST1 (centro), donde se registró un incremento (7.5 ml/l) en el fondo (5 m). La razón por la cual se encuentran mayores concentraciones de oxígeno en esta estación, es debido a las descargas del Jamapa se intensificaron, generando turbulencia en el fondo con el agua marina entrante del sur rica en oxígeno (Zavala-Hidalgo y Fernández-Eguiarte 2006), pero en la superficie las concentración de oxígeno son menores debido a la mayor cantidad de organismos bacterianos que consumen el oxígeno (Rogers *et al.*, 2001). CONAGUA (2006) y Carrillo *et al.* (2007), mencionan que el hecho de encontrar mayores concentraciones de oxígeno durante lluvias, se debe al aporte de agua dulce proveniente de las descargas de los ríos locales, los cuales presentan picos máximos de descarga durante los meses de julio a octubre.

El mes de noviembre registró valores altos de concentraciones de oxígeno, similares a los meses de lluvia y es por eso que se cataloga dentro de este periodo, aunque en las variables anteriores no

haya sido considerado de esa manera, sin embargo el aumento en sus concentraciones, pudo deberse además, al efecto del viento sobre la columna de agua, por ser el mes que presentó las mayores intensidad. Durante el periodo de nortes la columna de agua en la ST1 (centro), se encuentra estratificada hasta los 5 m de profundidad, influenciada por las descargas del Río Jamapa (de la Lanza-Espino y Gómez-Rojas, 2004; Carrillo *et al.*, 2007), ya que las estaciones al sur y norte del sistema presentan una columna de agua homogénea como un producto de la mezcla producida por el viento.

8.7 Nitrógeno

El nitrógeno es un nutriente con importancia ecológica por ser considerado fundamental para realizar procesos celulares (Raymond, 1980; de la Lanza-Espino, 2001; Lenés *et al.*, 2001; Walsh *et al.*, 2006). De acuerdo con el patrón vertical de distribución, los nutrimentos disminuyen en la zona eufótica y aumentan con la profundidad, este perfil se atribuye al consumo que realiza el fitoplancton para su crecimiento (Raymond, 1980). Así mismo en ecosistemas costeros-estuarinos la sobreproducción de nutrientes es ocasionada por el aporte de materia acarreada por ríos y viento, los cuales pueden ser aprovechados por el fitoplancton (Díaz y Rosenberg, 1995; Nixon, 1995; Gupta *et al.*, 2009; Korotenko, 2012), y desde hace más de 20 años el principal factor de cambio en las concentraciones de nitrógeno en las zonas costeras así como la modificación de procesos oceanográficos y eventos de productividad, han sido las descargas residuales antropogénicas (de la Lanza-Espino y Gómez-Rojas 2004). En el SAV, el área frente las ciudades de Veracruz y Boca del Río, presento características hidrológicas similares a la estación frente a la desembocadura del Río Jamapa, lo cual confirma que las descargas antropogénicas, inciden sobre las condiciones normales de este ecosistema.

En secas existe una estratificación en la columna de agua del SAV de 5 a 10 metros de profundidad debido a la temperatura, así como al consumo por organismos bacterianos (Rogers *et al.*, 2001) con valores 8 mg/l en superficie y de 9.2 mg/l en el fondo, con concentraciones más altas en junio al norte (ST10) y en el fondo (> 30 m), esto se relacionado con los procesos advectivos. En el periodo de lluvias la estratificación de la concentración de nitrógeno en la

estación centro (ST5) y norte (ST10) disminuye con el paso del tiempo, hasta convertirse en una variación en forma de gradiente, aumentando conforme incrementa la profundidad. En lluvias es posible notar un tercer factor de oscilación en las concentraciones de nitrógeno, el cual se ve relacionado con la descarga del Río Jamapa. En la estación centro (ST1), se puede notar la influencia directa de la descarga del Río Jamapa, al incrementarse la concentración de nitrógeno en toda la columna de agua (mayores a 9.4 mg/l).

La variación espacio-temporal del nitrógeno tiene relación con tres factores. El primero es la temporalidad de los flujos de viento en el SAV, ya que como lo mencionan Walsh *et al.* (1989), la disponibilidad de los nutrientes en la columna de agua está delimitada por la estratificación de la capa superficial. Durante el periodo de nortes desaparece por efecto del flujo de viento, produciendo en las zonas costeras resuspensión de sedimentos, mezclando los nutrientes que se habían depositado en el fondo a la columna de agua. Observándose esta influencia de octubre de 2011 a marzo de 2012, que da como resultado una diferencia menor a 0.5 mg/l entre el valor mínimo y el máximo, en los tres puntos de comparación del sistema. El rango de oscilación en las concentraciones de nitrógeno en esta temporada sigue siendo alto (> 8.6 mg/l) indicando que existe incremento en la concentración de nutrientes durante nortes en el SAV. Observándose la relación inversa entre la temperatura y el nitrógeno.

8.8 Clorofila-a

Aunque en el GoM la variación estacional en la concentración de clorofila-a está asociada a los eventos de mezcla durante nortes (Walsh *et al.*, 1989; Zavala-Hidalgo *et al.*, 2002). En las zonas costeras, las descargas de los ríos generan eventos de incremento en la productividad, principalmente durante lluvias sobre la plataforma TAVE, sucediendo las mayores descargas de los ríos durante el periodo de julio a agosto (Soto y Escobar, 1995; Martínez-López y Zavala-Hidalgo, 2009; Zavala-Hidalgo *et al.*, 2002). Estas características, sumadas a las descargas antropogénicas generadas por la zona conurbana de Veracruz-Boca del Río y el municipio de Antón Lizardo, generan zonas de incremento en las concentraciones de clorofila-a, lo cual, nos

hace pensar que el SAV es un sistema al menos 7 veces más productivo que el centro del GoM durante todo el año.

Durante el periodo secas la estación norte (ST10) presentó las mayores concentraciones de clorofila-a, dicho incremento en el fondo, está relacionado con los procesos advectivos (Nowling *et al.*, 1998; Sverdrup, 1999; Mateos-Jasso *et al.*, 2012), debido a que los puntos coinciden con las zonas de agua con baja temperatura y altas concentraciones de salinidad, densidad y nitrógeno en el fondo (> 25 m). Además, en el mes de abril se registra el único punto de concentraciones de clorofila-a en superficie, mayor a 3 µg/l en la misma estación.

Al término de secas e inicio de lluvias, las mayores concentraciones de clorofila-a comienzan a invertirse, pasando de estar en el fondo en el norte (ST10), a superficie en la estación sur (ST5), registrándose valores de hasta 4 µg/l a menos de 10 m de profundidad, así como un aumento de clorofila-a en el fondo en la estación centro (ST1) a 5 m de profundidad.

Durante lluvias, en septiembre, se presentan los mayores valores registrados en las zonas centro (ST1) y sur (ST5) del SAV. Lo cual concuerda con Okolodkov *et al.*, 2011, quienes registraron un pico de producción planctónica en el SAV en septiembre de 2007, relacionado con el pico de descarga del Río Jamapa para ese año.

De acuerdo con Walsh *et al.* (1989), el factor que controla la variación estacional de la concentración de clorofila-a en las aguas del GoM es la profundidad de la capa de mezcla y la disponibilidad de nutrientes incrementando la productividad de octubre a marzo, asociada a los eventos de “nortes” provenientes del norte de los Estados Unidos. En el SAV, durante el periodo de nortes las mayores concentraciones de clorofila-a se presentan de nuevo en el fondo, en la estación norte (ST10). Mostrándose una estratificación de la columna de agua, con valores de 1.5 µg/l en superficie, que se incrementa conforme aumenta la profundidad (> 4.5 µg/l). Las mayores concentraciones observadas en el fondo tienen relación con la resuspensión de sedimentos ocasionada por el viento, poniendo a disposición los nutrientes, activando la producción primaria (Walsh *et al.*, 1989; Zavala-Hidalgo *et al.*, 2002).

8.9 Variación a nivel superficial

8.9.1 Secas

Durante este periodo el agua que se encuentra frente a la desembocadura del Río Jamapa y los municipios de Boca del Río y Veracruz, presentan mayor temperatura (29.4 °C), así como menor salinidad (34.6 ups) y densidad (22 kg/m³) que el resto del sistema. Salas-Monreal *et al.* (2009) mencionan que esto se debe a que esta zona es menos profunda y se generan áreas de alta evaporación, lo que provoca el aumento de la temperatura. La disminución de salinidad y densidad es producto de la descarga del Río Jamapa así como descargas antropogénicas de la zona conurbana (Krutac, 1997; Okolodkov *et al.*, 2011). La temperatura a nivel superficial se muestra en forma de gradiente y se relaciona con la distancia a la costa, disminuyendo conforme nos alejamos de esta. Dicho gradiente ocurre inverso para la salinidad y la densidad, las cuales aumentan con forme nos alejamos de la costa. Estos resultados concuerdan parcialmente con lo descrito por Okolodkov *et al.* (2011), en lo referente a la disminución de salinidad frente a la desembocadura del Río Jamapa, pero no así con la temperatura, ya que no encontraron diferencias entre zonas, mientras que en la presente investigación se observó un gradiente horizontal a mar abierto.

Es posible notar la estratificación típica (5 m), generada por la temperatura durante este periodo. Provocando disminución de oxígeno en superficie (1 ml/l y 0.2 ml/l) respecto a los 5 m, Rogers *et al.*, (2001) adjudican la disminución de oxígeno a la proliferación bacteriana en zonas con influencia antropogénica como lo es la zona conurbana de Veracruz-Boca del Río. Así como al aumento en la temperatura de la capa superficial (Roldán-Pérez, 1992).

Las concentraciones de clorofila-a en el sistema son menores a 1 m que a 5 m de profundidad debido a las condiciones de tolerancia de luz en los organismos fotosintéticos, ya que la radiación solar, ocasiona inhibición fotosintética, es por ello que comúnmente los máximos de clorofila-a son subsuperficiales y no puramente superficiales (Signoret *et al.*, 1998; Boyce *et al.*, 2010), sumado a la disminución de oxígeno y nitrógeno (Roldán-Pérez, 1992). La variación observada

para clorofila-a en superficie es de forma puntual durante el periodo de abril a junio, observándose mayores concentraciones en la zona frente a la desembocadura del Río Jamapa y la ciudad de Boca del Río, las cuales incrementan con forme pasan los meses (de 2.4 a 2.6 $\mu\text{g/l}$), ya que las descargas rivereñas, generan puntos de productividad (Müller-Karger y Walsh, 1991; Smith y Hollibaugh, 1993). De acuerdo con lo mencionado por Martínez-López y Zavala-Hidalgo (2009), el aumento en la concentración de clorofila-a al norte del sistema (ST10) a 1 m de profundidad en abril, está relacionado con la productividad resultante de las descargas del Río Bravo y la Antigua que por efectos de corrientes en esa temporada llegan hasta esta área. Y en junio frente a la desembocadura del Río Jamapa y la ciudad de Boca del Río existen mayores concentraciones de clorofila-a, indicando que las descargas continentales, así como el aporte de materia generada por el río generan eventos de productividad en el SAV.

8.9.2 Lluvias

Las bajas salinidades de las aguas costeras se asocian a descargas de los ríos con características hidrodinámicas estuarinas, como un producto de la dilución entre las aguas marinas y las continentales (de la Lanza-Espino y Gómez-Rojas, 2004; Salas-Pérez *et al.*, 2012). En el mes de agosto se registró la mayor temperatura superficial del ciclo anual (32 °C), debido a que en la región tropical la incidencia solar se incrementa de marzo a septiembre, aumentando la temperatura de forma superficial (Trujillo y Thurman, 2008). La temperatura superficial disminuye conforme nos alejamos de la zona costera, del municipio de Boca del Río hacia los arrecifes “Cabezo y Anegadilla” (sur) con una variación de hasta 2 °C; la salinidad y densidad tienen un patrón de variación invertido, pues los arrecifes presentan menor concentración que el área frente al municipio de Boca del Río. Las descargas del Río Papaloapan, presentan mayor afluente sobre la plataforma al suroeste del GoM durante este periodo (Soto y Escobar, 1995; Martínez-López y Zavala-Hidalgo, 2009), ocasionando la dilución del agua en la zona sur del SAV influenciado por las corrientes hacia el norte (Krutak, 1997; Mateos-Jasso *et al.*, 2012). Hacia la zona centro, de acuerdo con lo descrito por Trujillo y Thurman (2008), debido al efecto de coriolis las descargas del Río Jamapa se deflectan hacia la derecha del flujo comprimiéndose

hacia la zona costera de Antón Lizardo, es por eso que las concentraciones de salinidad en los arrecifes de esa zona también presenta disminución.

De acuerdo con Morey *et al.* (2006), los asentamientos poblacionales en las costas del Golfo de México, modifican de forma directa las concentraciones de nutrientes y las características biológicas, principalmente en las zonas cercanas a las costas, en donde las descargas de los ríos son los principales vertedores de desechos antropogénicos. En el SAV el transporte de las descargas de agua dulce de los ríos Jamapa y Papaloapan, por ende de nitrógeno, se realiza de forma superficial en los primeros 5 metros de profundidad, ya que en el análisis a 1 m se observa que existe mayor concentración de nitrógeno hacia la zona sur y centro del sistema (hasta 0.6 ml/l); a 5 m de profundidad no existe una variación en la concentración de nitrógeno de forma general en todo el SAV (8.2 mg/l). Estos mismos efectos se han observado en otras zonas del GoM debido a las descargas adyacentes, por ejemplo la zona de descargas del Río Mississippi (Rabalís y Turner, 2001).

Las concentraciones de oxígeno en el margen costero, son menores a 1 m que a 5 m, llegando a diferir hasta en 5.5 ml/l. Durante el mes de agosto, la zona norte del SAV (3.4 ml/l) presenta menor concentración de oxígeno respecto de la zona sur (5.4 ml/l), mientras que la zona centro presentó la mayor concentración de oxígeno (7 ml/l), confirmando la incidencia de las descargas del Río Jamapa mencionado por Krutak (1997). Soto y Escobar (1995) mencionan que en la parte norte del GoM las fluctuaciones de clorofila-a están relacionadas con las descargas de los ríos, los cuales aumentan durante la temporada de lluvias (julio a septiembre). Las concentraciones de oxígeno en los registros del 29 de agosto y del mes de octubre, denotan un punto de incremento en la zona norte del arrecife “Cabezo”, mismo lugar en el que se había descrito el giro anticiclónico en el análisis de profundidad en la picnoclina en el mes de mayo, este incremento se debe a la batimetría irregular la cual genera turbulencia, incrementando los niveles de oxígeno (Caso *et al.*, 2004), o como en el mes de agosto, giros debido a la dirección de la corriente.

La variación de clorofila-a presentó menores concentraciones a 1 m que a 5 m, siendo más importante el aporte de nutrientes provenientes de manera directa por el Río Jamapa que lo aportado por el Río Papaloapan, debido a que las descargas del Jamapa llegan de forma directa,

mientras que el aporte del Papaloapan llega en menores cantidades por la distancia que presenta con el SAV (Krutak, 1997). Aunque cabe señalar que con la influencia de los dos ríos de forma superficial, la zona centro y sur del SAV presentan mayores concentraciones de clorofila-a que la zona norte. El mayor registro de concentraciones de clorofila-a en superficie fue en agosto con valores de hasta 2.6 $\mu\text{g/l}$ frente a la desembocadura del Río Jamapa y en la zona sur del arrecife “Cabezo”.

8.9.3 Nortes

Los eventos de “nortes” ocasionan la disminución de los máximos de temperatura y homogenizan las demás variables hidrológicas. En esta ocasión, los valores mínimos de temperatura, salinidad y densidad se registraron cercanos a la costa, frente a la descarga del Río Jamapa y hacia los arrecifes frente a Antón Lizardo, ya que las descargas del Jamapa son producto del deshielo y escorrentía en zonas altas del pico de Orizaba, así como las lluvias estacionales presentes de forma local (de la Lanza-Espino y Gómez-Rojas, 2004) y, debido al efecto de coriolis (Trujillo y Thurman, 2008), las descargas se hacen evidentes en el sur sobre la zona costera. Los rangos de variación entre un área y otra, aunque mínimas, debido a mezcla ocasionada por el viento y el efecto de coriolis, son un buen descriptor de la incidencia del Río Jamapa sobre la zona centro del sistema, existiendo una diferencia entre la zona centro y las aledañas de hasta 1.4 °C, 1.6 ups y 1.2 kg/m^3 .

La mezcla producida por el viento, homogeniza los parámetros hidrológicos en la columna de agua del SAV, con incrementos puntuales de oxígeno en la zona costera frente a la desembocadura del Río Jamapa (9 ml/l) y una diferencia de hasta 5 ml/l para el resto del sistema. A escala local, pueden presentarse picos de clorofila-a, debido al efecto del viento sobre la columna de agua y el de las estructuras arrecifales que integran al SAV, produciendo la resuspensión y mezcla de la materia del fondo marino, los cuales durante periodos breves activan los procesos de productividad primaria (Walsh *et al.*, 1989; Sverdrup, 1999). Las concentraciones de clorofila-a a nivel superficial oscilaron una vez más de forma puntual, a nivel superficial (1 y 5 m), fue posible observar mayores concentraciones de clorofila-a en la zona costera, frente la

desembocadura del Río Jamapa ($2.8 \mu\text{g/l}$), debido al aporte pluvial y de materia continental por las lluvias ocasionales (de la Lanza-Espino y Gómez-Rojas 2004), así como por el efecto del viento en la zona costera y coriolis (Dubrana *et al.*, 2011; Salas-Pérez *et al.*, 2012; Okolodkov *et al.*, 2011). Martínez-López y Zavala-Hidalgo (2009), mencionan que durante los meses de octubre a marzo, debido al efecto de los vientos, la materia orgánica arrojada por los ríos durante el periodo de lluvias, es mezclada en la columna de agua, existiendo eventos de productividad, principalmente sobre la plataforma continental de los estados de Tamaulipas, Veracruz, Tabasco y Campeche y Yucatán.

De acuerdo con lo expuesto en las secciones previas, podemos decir que el Sistema Arrecifal Veracruzano es un sistema hidrológicamente complejo con una marcada heterogeneidad a lo largo de un ciclo anual. Posee tres temporadas hidrológicas principales; secas, lluvias y nortes, con periodos de transición entre ellas. Las aguas del SAV presentan estratificación térmica en secas e halina en lluvias, formando una capa superficial de hasta 15 m de profundidad. El viento es un factor clave en la variabilidad hidrológica, ya que genera eventos advectivos en secas, así como una capa bien mezcla en nortes. Por su parte, las estructuras arrecifales modifican la dirección de la corriente litoral formando giros en distintos puntos del sistema. Debido a la conectividad e interacción con ambientes estuarinos y las descargas pluviales de la zona conurbana de Veracruz-Boca del Río, el SAV posee áreas focales de salinidad disminuida, con incremento de la concentración de Nitrógeno, que favorecen eventos de productividad subsuperficiales hacia la zona costera, que lo hacen un sistema con productividad primaria más elevada de lo esperado para un arrecife coralino y hasta 7 veces más que el centro del GoM.

9. Conclusiones

- 1.- En el Sistema Arrecifal Veracruzano se distinguió una temporalidad hidrológica en la que se denotan tres periodos: secas, lluvias y nortes, apreciándose además meses de transición.
- 2.- En este estudio se puede observar que la componente principal del viento fue paralela a la costa (en la componente norte-sur), con una dirección dependiendo de la temporada del año.
- 3.- Las estructuras arrecifales que conforman al SAV, generan zonas de divergencia en la corriente marina, formándose giros al interior del sistema. En la temporada de nortes, la mezcla producida por el flujo constante, así como el aumento de la intensidad de los vientos, dan como resultado que se pierda la picnoclina por la mezcla.
- 4.- Se determinaron tres zonas con características hidrológicas bien diferenciadas, con respecto a su valor promedio anual. La zona centro integrada por las estaciones frente a la desembocadura del Río Jamapa (ST1) y la zona litoral de Punta Mocambo (ST12 y ST13), la zona sur conformada por la zona de la plataforma sur del arrecife “Cabezo” (ST5), hacia la zona sur del arrecife “Anegadilla” (ST6) y, la zona expuesta integrada por la zona de plataforma externa de los arrecife “Anegada de Adentro” hacia “Anegada de Afuera” (ST7 a la 10).
- 5.- La temperatura, la salinidad y la densidad fueron las variables más robustas para describir la temporalidad del SAV.
- 6.- Para registrar procesos que ocurran de forma puntual, es necesario que los análisis hidrológicos incluyan la medición de oxígeno, nitrógeno y clorofila-a.
- 7.- La columna de agua en el SAV se estratifica por temperatura durante secas y por salinidad en lluvias. En el periodo de secas se registran procesos advectivos en la franja expuesta del sistema a más de 25 m de profundidad. En nortes en esta misma zona, se registran los mayores valores de clorofila-a, producto de la mezcla de la materia depositada durante el periodo de lluvias.
- 8.- Las zonas de menor profundidad frente a la plataforma interna, funcionan como áreas de alta evaporación, presentando una mayor temperatura que la plataforma expuesta del sistema.

9.- Las descargas de aguas continentales fluviales y pluviales que se vierten sobre la plataforma interna del PNSAV ocasionan máximos de clorofila-a en la temporada de lluvias.

10. Recomendaciones

La presente investigación establece una línea base para futuros trabajos hidrológicos en el SAV, los cuales se deben integrar con variables químicas, geológicas y biológicas, así como una mayor extensión temporal, que permitan un mejor entendimiento de los cambios ecológicos en el sistema en un contexto de incremento en la influencia antropogénica y la sinergia con escenarios de cambio climático global. También es importante hacer llegar la información a los tomadores de decisión para coadyuvar a un manejo integral del Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano.

11. Literatura citada

Aldeco J, MA Monreal-Gómez, M Signoret, DA Salas-de-León y DU Hernández-Becerril. 2009. Occurrence of a subsurface anticyclonic Eddy, fronts, and *Trichodesmium* spp. Over the Campeche Canyon region, Gulf of Mexico. *Ciencias Marinas*. 35(4): 333-344 pp.

Alvarado JJ y JF Aguilar. 2009. Batimetría, salinidad, temperatura y oxígeno disuelto del Parque Nacional Marino Ballena, Pacífico, Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*. 57(1): 19-29. ISSN-0034-7744.

Biggs DC. 1992. Nutrients, plankton, and productivity in a warm core ring in the western Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research*. American Geophysical Union. 97(2):143-154 pp.

Boyce DG, MR Lewis y B Worm. 2010. Global phytoplankton decline over the past century. *Nature*. 466(7306): 591-596 pp. doi: 10.1038/nature09268

Carrillo L, G Horta-Puga y JP Carricart-Ganivet. 2007. Climate and Oceanography In: Tunnell JW Jr., EA Chavez, and K Withers. Coral reefs of the southern Gulf of Mexico. *Harte Research Institute, Texas A&M University*. Corpus Christi, USA. Pp. 48-60. ISBN-978-6'7-00-2395-8

Caso M, I Pisanty y E Ezcurra. 2004. Diagnóstico ambiental del golfo de México vol. 1 y 2. *INE-SEMARNAT*. Distrito Federal. México. ISBN: 968-817-705-9

Cloern JE. 1996. Phytoplankton bloom dynamics in coastal ecosystems: A review with some general lessons from sustained investigation of San Francisco Bay, California. *Journal of Geophysical Research*. 34(2): 127-168 pp.

CONAGUA. <http://www.cna.gob.mx/>

Curtis H. 1985. Biología. Cuarta Edición. *Editorial Médica Panamericana*. Buenos Aires. Argentina. 450 pp. ISBN: 84-7903-809-8

de la Lanza-Espino G y JC Gómez-Rojas. 2004. Características Físicas y Químicas del Golfo de México. In: Caso M, I Pisanty y E Ezcurra (Eds.). Diagnóstico ambiental del golfo de México vol. 2. *INE-SEMARNAT*. Distrito Federal. México. 103-132 pp. ISBN: 968-817-705-9

de la Lanza-Espino. 2001. Características físico-químicas de los mares de México. Temas selectos de Geografía de México. *Instituto de Geografía*. D.F. México. 151 pp. ISBN: 986-656-950-X.

Diario Oficial de la Federación. 1992. Decreto Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano. Lunes 24 de Agosto. Distrito Federa, México.

Díaz RJ y R Rosenberg. 1995. Marine benthic hypoxia: A review of its ecological effects and the behavioural responses of benthic macrofauna. *Oceanography and Marine Biology. an Annual Review* 33: 245-303 pp. ISSN: 0078-3218

Dubranna J, P Pérez-Brunius, M López y J Candela. 2011. Circulation over the continental shelf of the western and southwestern Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research*. 116(8): 1-17 pp. doi:10.1029/2011jc007007

Emery WJ y RE Thomson. 2004. Data analysis methods in physical oceanography. Second Edition. *Elsevier*. The Netherlands. Amsterdam. 655 pp. ISBN: 0-444-50756-6

Expósito-Díaz G, DA Salas-de-León, MA Monreal-Gómez, D Salas-Monreal, F Vázquez-Gutiérrez. 2009. Inertial currents in the southern Gulf of Mexico. *Ciencias Marinas*. 35(3): 287-296 pp.

Falkowski PG, ME Katz, AH Knoll, A Quigg, JA Raven. 2004. The evolution of modern eukaryotic phytoplankton. *Science*. 305(5682): 354–360 pp. doi: 10.1126/science. 1095964

Field CB, MJ Behrenfeld, JT Randerson, PG Falkowski. 1998. Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components. *Science*. 281(5374): 237–240 pp. doi: 10.1126/science.281.5374.237

Gattuso JP, M Frankignoulle y R Wollast. 1998. Carbon and carbonate metabolism in coastal aquatic ecosystems. *Annual Reviews of Ecology and Systematics*. 29: 405-434 pp. URL: <http://www.jstor.org/stable/i211035>

González F, E Zoppi-de-Roa, E Montiel. 2006. Productividad primaria del fitoplancton en la bahía de Mochima, Venezuela. *Investigaciones Marinas. Valparaíso*. 34(2): 37-45 pp.

Gupta GVM, SD Thottathil, KK Balachandran, NV Madhu, P Madeswaran, S Nair. 2009. CO₂ supersaturation and net heterotrophy in a tropical estuary (Cochin, India): influence of anthropogenic effect. *Ecosystems*. 12(7): 1145–1157 pp.

Gutiérrez de Velasco G y CD Winant. 1996. Seasonal patterns of wind stress and wind stress curl over the Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research*. 101(18): 127-140 pp.

Hernández-Téllez J y J Salgado-Rivero. 1996. Masas de agua en la costa de la Ciudad de Veracruz, Ver. (MACCV), enero 1995 a febrero 1996. *Secretaría de Marina. D.G.O.M.* México. 39 pp.

Jiménez-Hernández MA, A Granados-Barba y L Ortiz-Lozano. 2007. Análisis de la información científica en el sistema arrecifal veracruzano. In: A Granados-Barba, LG Abarca-Arenas y JM Vargas-Hernández, (Eds). *Investigaciones científicas en el sistema arrecifal veracruzano. Universidad Autónoma de Campeche.* México. 1-16 pp. ISBN: 968-5722-53-6

Juárez-Sarvide J, D Goeritz-Rodríguez, VD Murrieta-Martínez, JM Sánchez-Juárez, MC González-Rivera, AM Álvarez-Ríos, M Osorio-Rivas, HA Barrientos-Escamilla y H Kamio. 1991. Propuesta Parque Marino Nacional “Chalchicueye”. Estación de Investigación Oceanográfica Veracruz. *Secretaría de Marina.* México. 129 pp.

Katara I, J Illian, GJ Pierce, B Scott y J Wang. 2008. Atmospheric forcing on chlorophyll concentration in the Mediterranean. *Hydrobiologia*. 612(1): 33-48 pp. doi: 10.1007/s10750-008-9492-z

Katz ME, ZV Finkel, D Grzebyk, AH Knoll, PG Falkowski. 2004. Evolutionary trajectories and biogeochemical impacts of marine eukaryotic phytoplankton. *Annual Reviews of Ecology and Evolutionary Systematic*. 35: 523–556 pp. doi: 10.1146/annurev.ecolsys. 35.112202.130137

Korotenko KA, PO Zavialov, K Ruey-Chy, D Chung-Feng. 2012. Model for predicting the transport and dispersal of contaminants incoming with submarine groundwater: case study for the southwestern Taiwan coastal zone. *Open Journal of Marine Science*. 2(2): 70-83 pp.

- Krutak PR. 1997. Petrography and provenance of siliciclastic sediments, Veracruz-Antón Lizardo Reefs, México. In: J San-John y Y Hi-Il, (Eds). *Paleoceanography and paleoclimatology in the northwest Pacific region. Ocean Research.* 19(3): 231-243 pp.
- Lalli CM y TR Parsons. 1997. *Biological oceanography an introduction. Second edition. Elsevier Butterworth y Heinemann.* Oxford. Inglaterra. 323 pp. ISBN: 0-7506-3384-0
- Litchman E y CA Klausmeier. 2008. Trait-based community ecology of phytoplankton. *Annual Reviews of Ecology, Evolution, and Systematics.* 39(1): 615-639 pp. doi: 10.1146/annurev.ecolsys.39.110707.173549
- Mann KH y JRN Lazier. 1996. Dynamics of marine ecosystems: Biological-Physical interactions in the oceans. *Blackwell Science.* 49(2): 272-273. doi: 10.1515/ BOT.2006.033
- Mann KH. 2000. *Ecology of coastal waters: With implications for management. Blackwell Science.* Oxford. Inglaterra. 390 pp. ISBN: 978-0-86542-550-7
- Marín BC, Lodeiros, D Figueroa y B Márquez. 2004. Distribución vertical y abundancia estacional del microzooplancton y su relación con los factores ambientales en Turpialito, Golfo de Cariaco, Venezuela. *Revista Científica.* 14(2): 133-139 pp.
- Martínez-López B y J Zavala-Hidalgo. 2009. Seasonal and interannual variability of cross-shelf transport of chlorophyll in the Gulf of Mexico. *Journal of Marine Systems.* 77(1): 1-20 pp.
- Mateos-Jasso A, J Zavala-Hidalgo, R Romero-Centeno y ME Allende-Arandía. 2012. Variability of the thermohaline structure in the northern Veracruz Coral Reef System, Mexico. *Continental Shelf Research.* 50(3): 30-40 pp. doi: /10.1016/j.csr.2012.10.001
- Monreal-Gómez MA, DA Salas-de-León y H Velasco-Mendoza. 2004. La hidrodinámica del Golfo de México. In: M Caso, I Pisanty y E Ezcurra (Eds.). *Diagnóstico ambiental del Golfo de México Vol. 1. INE-SEMARNAT.* Distrito Federal. México. 47-68 pp.
- Morey SL, Zavala-Hidalgo J y O'Brien JJ. 2006. The seasonal variability of continental shelf circulation in the northern and western Gulf of Mexico from a high-resolution numerical model. In: Sturges W y A Lugo-Fernandez (Eds.). *Circulation in the Gulf of Mexico. Observations and*

models. *Geophysical Monograph Series*. Washington, DC. USA. 203-218. ISBN-13: 978-0-87590-426-9.

Müller-Karger FE y JJ Walsh. 1991. On the seasonal phytoplankton concentration and sea surface as determined by satellites. *Journal of Geophysical Research. American Geophysical Union*, Washington D. C. USA. 96(C7): 645-665 pp.

Nixon SW. 1995. Coastal marine eutrophication: A definition, social causes, and future concerns. *Ophelia*. 41(1): 199-219 pp.

Nowlin WD y McLellan HJ. 1967. A characterization of the Gulf of Mexico water in winter. *Journal of Marine Research*. Kline Geology Laboratory. Yale University George Veronis. 25(1): 29-59 pp.

Nowlin WD, Jr., AE Jochens, RO Reid y SF DiMarco. 1998. Texas-Louisiana shelf circulation and transport processes study. In: Synthesis report, Vol 11: Appendicies. OCS Study MMS 2001-064, U.S. Dept. of the interior, minerals management service, Gulf of Mexico OCS Region, New Orleans, LA. 288 pp.

Nowlin WD. 1971. Water masses and general circulation of the Gulf of Mexico. *Oceanology*. 6(2), 28-33 pp.

Obeso-Niebla M, BS Germán, JH Gaviño-Rodríguez, H Obeso-Huerta, EL Pérez-Lezama, AR Jiménez Illescas. 2007. Hidrografía en la boca norte de la bahía de la Paz, Baja California Sur, México. *Ciencias Marinas*. 33(3): 281-291 pp.

Okolodkov YB, JA Aké-Castillo, MG Gutiérrez-Quevedo, H Pérez-España y D Salas-Monreal. 2011. Annual cycle of the plankton biomass in the National Park Sistema Arrecifal Veracruzano, Southwestern Gulf of Mexico. *Zooplankton and Phytoplankton*. cap(3): 1-26. ISBN 978-1-61324-508-8.

Rabalais NN y Re Turner. 2001. Coastal Hypoxia: Consequences for living resources and ecosystems. *Coastal and Estuarine Studies. American Geophysical Union*. Washington, DC. USA. 463 pp.

- Rabalais NN. 2004. Hipoxia en el Golfo de México. In: Caso M, I Pisanty y E Ezcurra. 2004. Diagnóstico ambiental del Golfo de México, Vol. 2. *INE-SEMARNAT*. Distrito Federal. México. 493 pp.
- Raven JA, y RJ Geider. 1988. Temperature and algal growth. *New Phytologist*. 110(4): 441-461 pp.
- Ray GC y BP Hayden. 1992. *Coastal zones ecotones*. In: Hansen Aj y F di-Castri (Eds.). Landscape Boundaries, consequences for biotic diversity and ecological flows. *Springer-Verlag*. N. York. USA. 403-420 pp.
- Raymont JEG. 1980. Plankton and productivity in the oceans. Vol. 1 phytoplankton. 2th Edition. *Pergamon Press*. New York. USA. 489 pp.
- Rogers CS, G Garrison. R Grober, ZM Hillis, y MA Franke. 2001. Manual para el monitoreo de arrecifes de coral en el Caribe y el Atlántico occidental. Servicio de Parques Nacionales. *T.N.C.* y *W.W.F.* Islas Vírgenes-USA.
- Roldán-Pérez G. 1992. Fundamentos de limnología neotropical. *Editorial Universidad Antioquía*. Medellín, Colombia. 371p. ISBN: 978-958-714-144-3
- Salas-de-Léon DA, MA Monreal-Gómez, D Salas-Monreal, ML Riverón-Enzástiga y NL Sánchez-Santillan. 2006. Inter-annual sea level variability in the southern Gulf of Mexico (1966-1976). *Geophysical Research letters*. 33(8). 4 pp. L08610. doi: 10.1029/2006GL025832.
- Salas-Monreal D, MA Monreal-Gómez, ML Riverón-Enzástiga. 2009. Current rectification in a tropical coral reef system. *Coral Reefs, Springer*. 28(4) 871-870 pp. doi: 10.1007/s00338-009-0521-9.
- Salas-Pérez JJ y A Granados-Barba. 2008. Oceanographic characterization of the Veracruz reefs system. *Atmósfera*. 21(3): 281-301 pp.
- Salas-Pérez JJ y V Arenas-Fuentes. 2011. Winter water mass of the Veracruz Reef System. *Atmósfera*. 24(2): 221-231 pp.

- Salas-Pérez JJ, D Salas-Monreal, MA Monreal-Gómez, ML Riverón-Enzástiga y C Llasat. 2012. Seasonal absolute acoustic intensity, atmospheric forcing and currents in a tropical coral reef system. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 100(1). 102-112 pp. doi: 10.1016/j.ecss.2012.01.002
- Signoret M, C Bulit y R Pérez. 1998. Patrones de distribución de clorofila a y producción primaria en aguas del Golfo de México y del Mar Caribe. *Hidrobiológica*. 8(2): 81-88 pp.
- Signoret M, MA Monreal-Gómez, J Aldeco y DA Salas-de-León. 2006. Hydrography, oxygen saturation, suspended particulate matter, and chlorophyll-a fluorescence in an oceanic región under freshwater influence. *Estuarine Coastal and Shelf Science*. 69(1):153-164 pp.
- Smith S y Hollibaugh. 1993. Coastal metabolism and the oceanic carbon balance. *Review of Geophysics*. 31(1): 75-89 pp.
- Soto L y E Escobar. 1995. Coupling Mechanisms related to benthic production in the SW Gulf of Mexico. In: A Eleftheriou, A Ansell y J Smith (Eds.). *Biology and Ecology of Shallow Coastal Waters*. Proceedings 28th European Symposium International. Symposium Series. Institute of Marine Science of Crete. Greece. 233-242 pp.
- Spalding MD, HE Fox, GR Allen, NDavison, ZA Ferdaña, M Finlayson, BS Halpern, MA Jorge, A Lombana, SA Lourie, KD Martin, E McManus, J Molnar, CA Recchia and J Robertson. 2007. Marine ecoregions of the world: A bioregionalisation of coastal and shelf areas. *BioScience*. 57(7): 573-583 pp.
- Sunyé PS y J Servain. 1998. Effects of seasonal variation in meteorology and oceanography on the Brazilian sardine fishery. *Fisheries Oceanography*. 7(2): 89-100 pp.
- Sverdrup K, A Duxbury y A Duxbury. 1999. Fundamentals of oceanography. 5th ed. *McGraw-Hill*. Ciudad. USA. 312 pp. ISBN: 978-0073040813.
- Tamayo JL. 1999. Geografía Moderna de México. 11^a Ed. *Trillas*. D.F. México. 512 pp.
- Tapánes JJ y F González-Coya. 1980. Hidrometeorología del Golfo de México y Banco de Campeche. Geofísica Internacional, *Unión Geofísica Mexicana*. México. D.F. 19: 335-354 pp.

Thorpe SA. 2007. An introduction to ocean turbulence. *Cambridge University Press*. United Kingdom. 240 pp. ISBN: 978-0-521-85948-6

Trujillo AP y HV Thurman. 2008. Essentials of Oceanography. Ninth Edition. *Pearson, Prentice Hall*. USA. 534 pp. ISBN-10: 0-13-240122-3

Tunnell JW Jr., EA Chavez y K Withers. 2007. Introduccion. Coral reefs of the southern Gulf of Mexico. *Harte Research Institute*. Texas A&M University. Corpus Christi, USA. 360 pp. ISBN: 978-607-00-2395-8

Vázquez de la Cerda AM, RO Reid, SF Di Marco y AE Jochens. 2006. Bay of Campeche circulation: An Update. In: Sturges W y A Lugo-Fernandez (Eds.). Circulation in the Gulf of Mexico. Observations and models. *Geophysical Monograph Series*. Washington, DC. USA. 279-293. ISBN-13: 978-0-87590-426-9.

Vázquez-de-la-Cerda AM. 2004. Análisis descriptivo de las masas de agua oceánica que arriban al Golfo de México. In: Caso M, I Pisanty y E Ezcurra, (Eds.). Diagnostico ambiental del Golfo de México. Vol. 1. *Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT)*. D.F. México. 69-105 pp. ISBN:

Walsh JJ, JK Jolliff, BP Darrow, JM Lenes, SP Milroy, A Remsen, DA Dieterle, KL Carder, FR Chen, GA Vargo, RH Weisberg, KA Fanning, FE Müller-Karger, E Shinn, KA Steidinger, CA Heil, CR Tomas, JS Prospero, TN Lee, GJ Kirkpatrick, TE Whitledge, DA Stockwell, TA Villareal, AE Jochens, PS Bontempi. 2006. Red tides in the Gulf of Mexico: Where, when, and why? *Journal of Geophysical Research Oceans*. 111, C11003. Doi:10.1029/2004JC002813.

Walsh JL, DA Dieterle, MB Meyer y FE Müller-Krager. 1989. Nitrogen Exchange ant the continental margin: A numerical study of the Gulf of Mexico. *Progress in Oceanography*. 23(4): 248-301 pp.

Wasmund N, HU Lass y G Nausch. 2010. Distribution of nutrients, chlorophyll and phytoplankton primary production in relation to hydrographic structures bordering the Benguela-Angolan frontal region. *African Journal of Marine Science*. 27(1): 177-190 pp.

Weatherly G, N Wienders y R Harkema. 2003. Temperature inversion in the open Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical research*. 108(C6): 3177 pp. Doi: 10.1029/2002JC001680.

Withers K y JW Jr. Tunnell. 2007. Reef biodiversity. In: JW Jr. Tunnell, EA Chávez y K Withers, (Eds.). Coral reefs of the southern Gulf of Mexico. *Texas A&M University Press, College Station*. Texas. USA. 68-87 pp.

Wollast R. 1998. Evaluation and comparison of the global carbon cycle in the coastal zone and in the open ocean. In: Brink KH y AR Robinson, (Eds.). *The Sea*. Willey and Sons. New York. USA. 213-252 pp.

Zavala-Hidalgo J y A Fernández-Eguiarte. 2006. Propuesta para la regionalización de los mares mexicanos desde el punto de vista de los procesos físicos: el caso del Golfo de México. In: A Córdova y Vázquez, F Rosete-Verges, G Enríquez-Hernández y B Fernández de la Torre (Eds.). Ordenamiento ecológico marino. Visión temática de la regionalización. *Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales – Instituto Nacional de Ecología*. D.F. México. 21-32 pp. ISBN: 968-817-807-1.

Zavala-Hidalgo J, SL Morey y JJ O'Brien. 2003. Seasonal circulation on the western shelf of the Gulf of Mexico using a high-resolution numerical model. *Journal of Geophysical Research*, 108(19): 1-19 pp.

Zavala-Hidalgo J, A Parés-Sierra y J Ochoa. 2002. Seasonal variability of the temperature and heat fluxes in the Gulf of Mexico. *Atmósfera*. 15(2): 81-104 pp.