



BOLETÍN

INSTITUTO DEL MAR DEL PERÚ

ISSN 0458 - 7766

Volumen 26, Números 1 y 2

CONCIMAR Perú



II Congreso de Ciencias del Mar del Perú

Piura, Perú. Del 24 al 28 de mayo 2010



Enero - Diciembre 2011

Callao, Perú

Caracterización de la Zona de Mínimo de Oxígeno (ZMO) frente a la costa peruana entre 3°N y 14°S, 1999 - 2009

Characterization of Oxygen Minimum Zone (OMZ) in front of Peruvian coast between 3°N and 14°S, 1999 - 2009

JESÚS LEDESMA

JORGE TAM

MICHELLE GRACO

VIOLETA LEÓN

GEORGINA FLORES

OCTAVIO MORÓN

Instituto del Mar del Perú. Esq. Gamarra y General Valle. Callao 01, Perú. jledesma@imarpe.gob.pe

Resumen

LEDESMA J, TAM J, GRACO M, LEÓN V, FLORES G, MORÓN O. 2011. Caracterización de la Zona de Mínimo de Oxígeno (ZMO) frente a la costa peruana entre 3°N y 14°S, 1999 - 2009. *Bol Inst Mar Perú*. 26(1-2): 49-57.- Se analizaron datos de oxígeno disuelto, frente a las costas del Perú, para comprender las variaciones de la ZMO, caracterizadas por: a) el espesor de esa zona, limitada por las isolíneas de oxígeno de 0,5 mL.L⁻¹; y b) la profundidad de su límite superior en la franja marino costera. Se muestran los resultados de las evaluaciones en la columna de agua, en la bahía de Callao en el periodo 1999 - 2009, y además en enero - febrero 2009 en un estudio de la ZMO, durante el Crucero Meteor 77-4 0901-02: *Interacción en el Océano Tropical, Biogeoquímica y Clima*. En la zona costera del Callao (12°S) se acentúa la hipoxia; la ZMO se ve restringida por la plataforma y su límite superior más superficial se ubicó a los 2,5 m de profundidad. A partir de la información obtenida en enero-febrero 2009 (Crucero 0901-02) se analizó la variabilidad espacial de la ZMO, en donde se halló un espesor de ~637,8 m, en la sección Punta Falsa (6°S). Se analizó la dinámica de la ZMO y su límite superior, debido al gran interés que ha tomado, por el posible incremento de su espesor, en el contexto de cambio climático, con grandes repercusiones sobre los recursos pesqueros. PALABRAS CLAVE: Zona de mínimo de oxígeno, ZMO, variabilidad, ecosistema de la Corriente de Humboldt, mar peruano.

Abstract

LEDESMA J, TAM J, GRACO M, LEÓN V, FLORES G, MORÓN O. 2011. Characterization of Oxygen Minimum Zone (OMZ) in front of Peruvian coast between 3°N and 14°S, 1999 - 2009. *Bol Inst Mar Perú*. 26(1-2): 49-57.- Data were analyzed for dissolved oxygen, in front of the coast of Peru, to understand the variations of the OMZ, characterized by: a) the thickness of the area bounded by the oxygen isolines of 0.5 mL.L⁻¹; and b) the depth of its upper limit in the marine coastal strip. We show the results of evaluations in the water column in the Bay of Callao during the period 1999 - 2009, and also in January-February 2009 in a study of the OMZ during Meteor Cruise 77-4 0901-02: *Interaction in the Tropical Ocean, Biogeochemistry and Climate*. In the marine coastal zone of Callao (12°S) hypoxia is accentuated, the OMZ is constrained by the platform and its upper surface is located more than 2.5 m deep. From the information obtained in January - February 2009 (Cruise 0901-02) examined the spatial variability of the OMZ, where a thickness of ~ 637.8 m was found in Punta Falsa section (6°S). We analyzed the dynamics of the OMZ and its upper limit, due to the great interest taken by the possible increase of its thickness in the context of climate change, with major impact on fisheries resources.

KEYWORDS: Oxygen minimum zone, OMZ, variability, ecosystem of the Humboldt Current, Peruvian sea.

Introducción

La Zona de Mínimo de Oxígeno (ZMO) es un sector del océano que se distribuye a profundidades intermedias, mayormente entre los 50 a 800 m y se caracteriza por presentar condiciones de muy bajo oxígeno e incluso anóxicas, identificándose a nivel mundial ZMO en: el Pacífico Suroriental (Perú - Chile); en el Pacífico Nororiental (Tropical y Subtropical); en el Océano Índico (Mar Árabe y Golfo de Bengala). Estas ZMO se desarrollan debido a tres factores principales: (1) una alta producción fitoplanctónica, luego remineralizada (proceso de descomposición de la materia orgánica particulada) en la columna de

agua, consumiendo grandes cantidades del oxígeno disuelto; (2) una estratificación vertical intensa y permanente, por el cambio súbito en la densidad vinculado con la profundidad (picnoclina), que impide la ventilación local de las aguas subsuperficiales y (3) una circulación profunda, lenta y compleja de aguas "viejas" caracterizadas por ser pobres en oxígeno (WYRTKI 1962; KAMYKOWSKI y ZENTARA 1990). Frente a Perú, la ZMO se identifica por presentar concentraciones de oxígeno disuelto (OD), entre 0,0 a 0,5 mL.L⁻¹ en la columna de agua (GRACO et al. 2007); exhibe importantes fluctuaciones a diferentes escalas, tanto estacionales como interanuales asociadas al ciclo El Niño y la Oscilación del Sur (ENOS), cuya señal es

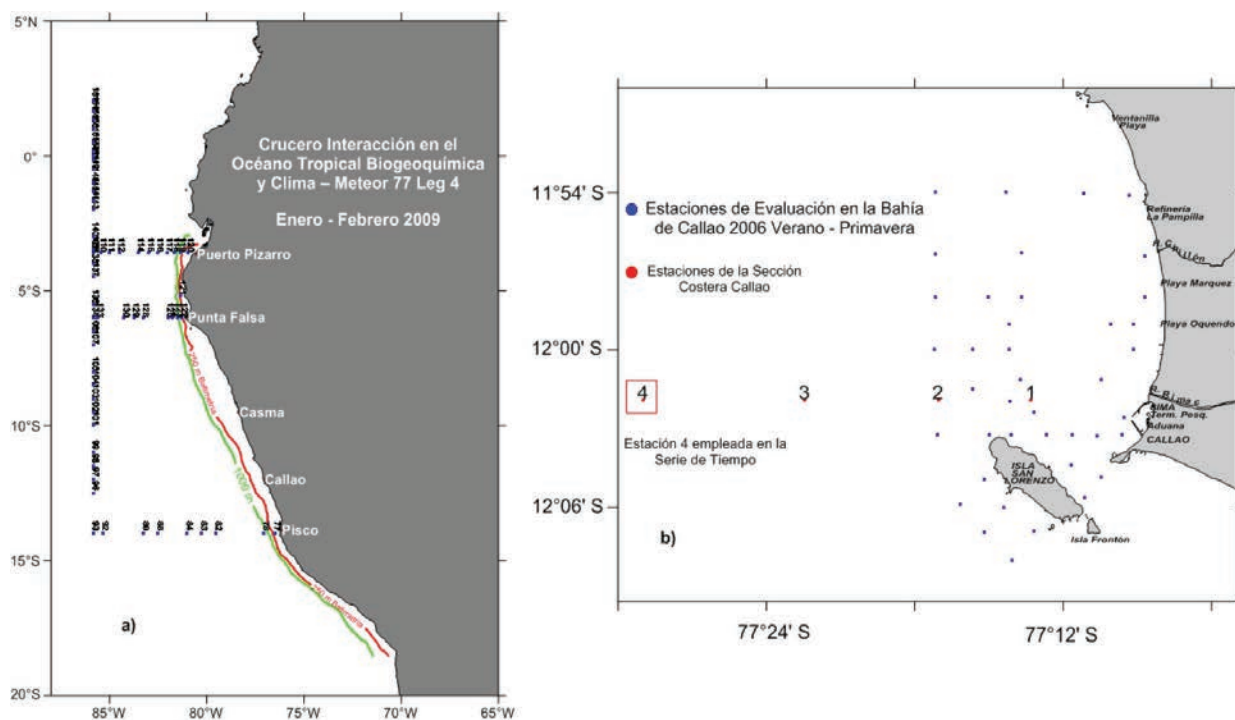


Figura 1.- Ubicación de las estaciones de muestreo: a) Crucero Meteor 77, Leg-4 0901-02; b) Estaciones costeras en verano – primavera 2006 y Estación fija de la sección Callao. 1999 - 2008.

una de las más intensas del planeta. En el ecosistema de la Corriente Humboldt se ha reportado muy poca información a niveles por debajo de los 500 m de profundidad. El Instituto del Mar del Perú (IMARPE) cuenta con una base de datos a estos niveles más profundos, que nos permitirá analizar las diferencias espaciales de la ZMO. El presente estudio explora la variabilidad de la ZMO en el norte del ecosistema de la Corriente de Humboldt.

Material y métodos

ÁREA DE ESTUDIO

Abarcó desde 3°N hasta 14°S. Se establecieron estaciones hidrográficas en las secciones de Puerto Pizarro, Punta Falsa, Callao y Pisco. Se tomaron muestras para medir el oxígeno disuelto a niveles estándares de: 0, 10, 20, 25, 30, 50, 75, 100, 200, 300, 500 - 4000 m. La distribución de las estaciones de muestreo se presenta en la Fig. 1: a) estación fija 4 de la sección costera Callao (12°S) a 20 mn de la costa; b) estaciones costeras en la bahía de Callao, a 10 mn de la costa; y c) Estaciones del Crucero Meteor, Leg 77-4, enero – febrero 2009 (Cr. 0901-02).

DETERMINACIÓN DE OXÍGENO DISUELTOS Y CONSIDERACIONES EN EL TRATAMIENTO DE DATOS

Se realizaron in situ empleando el método volumétrico de Winkler modificado por CARRIT y CARPENTER

(1966), las concentraciones de oxígeno disuelto se registran en mL.L⁻¹ y μM. En la interpolación se utilizaron dos programas computacionales: a) Ocean Data View (ODV) versión 4.3.8 (SCHLITZER, 2011), que construye una malla de resolución variable, a partir de una rejilla rectangular, donde la red de espaciado a lo largo de las direcciones X e Y varía en función de la densidad de datos; y b) Surfer versión 9.0 (Golden Software 2009) se empleó en una menor cantidad de datos, interpolándose en base a la minimización de la varianza, en la cual se estima un valor desconocido a través de datos vecinos cercanos.

TYSON y PEARSON (1991) definieron los siguientes niveles de oxigenación:

- *óxicos* (8,0 a 2,0 mL.L⁻¹)
- *dióxicos* (2,0 a 0,2 mL.L⁻¹)
- *subóxicos* (desde 0,2 hasta 0,1 mL.L⁻¹)
- *anóxicos* (0,0 mL.L⁻¹)

En relación con las respuestas fisiológicas de los organismos se usan los términos:

- *normoxia* (nivel normal de oxígeno)
- *hipoxia* (déficit de oxígeno en un organismo).

Otros autores, como CHEN et al. (2007), clasifican a la *hipoxia* como valores <2,1 mL.L⁻¹; O'CONNOR y WHITTALL (2007) definen la *hipoxia* como concentraciones por debajo de 1,4 mL.L⁻¹. RABALAIS et al. (2010), en el Grupo de Trabajo WG 128 del SCOR, acordaron con-

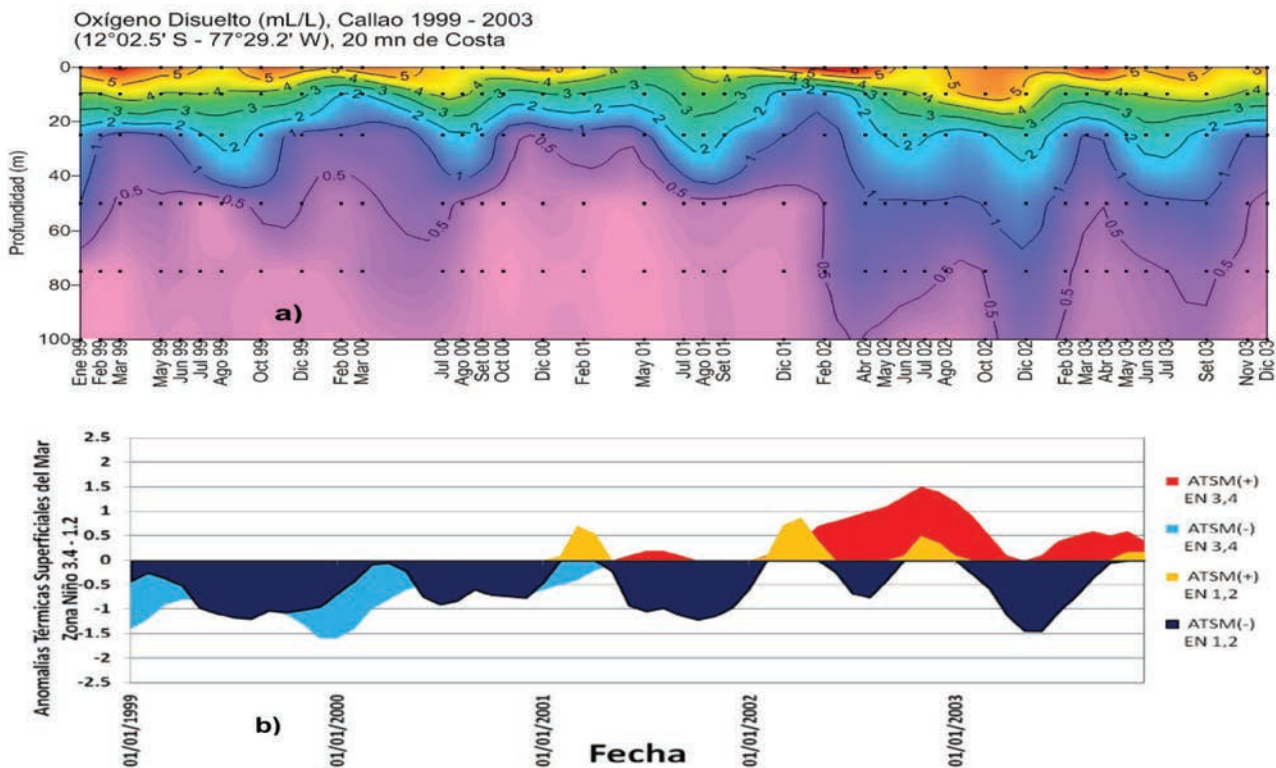


Figura 2.- a) Diagrama Hovmoller profundidad-tiempo del oxígeno disuelto a 20 mn de la costa frente al Callao (1999 – 2003); b) Serie de tiempo de las ATSM, en las regiones clasificadas por la NOAA 1,2

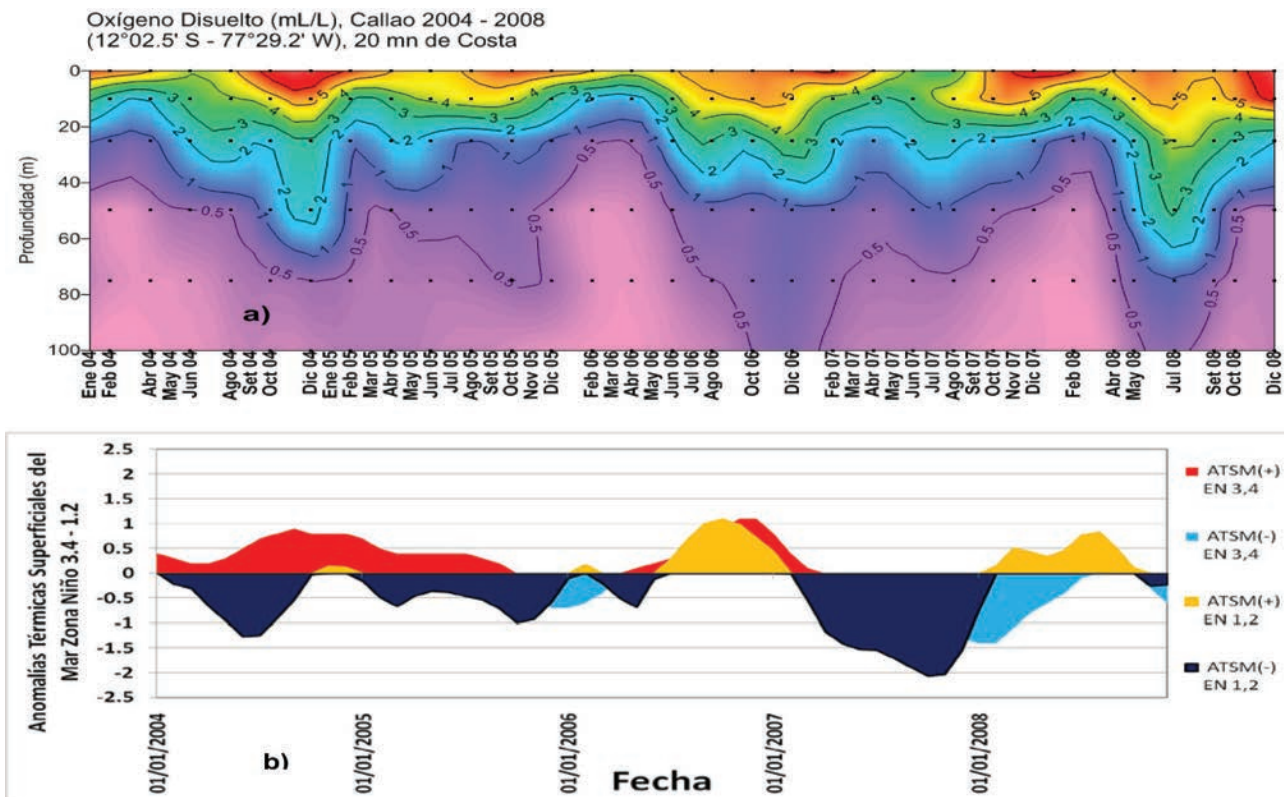


Figura 3.- a) Diagrama Hovmoller profundidad-tiempo del oxígeno disuelto a 20 mn de la costa frente al Callao (2004 – 2008); b) Serie de tiempo de anomalías térmicas en la superficie del mar, en las regiones clasificadas por la NOAA 1,2 (0 - 10°S, 90°W - 80°W) y 3,4, (5°N - 5°S, 170°W-120°W) para el periodo 2004-2008.

siderar a la *hipoxia* a los niveles de saturación de oxígeno menores a 30%, o unos 2,0 mg.L⁻¹ (1,4 mL.L⁻¹ ó 63 µM). Este valor es más relevante como un umbral para las aguas costeras y organismos que han evolucionado en aguas de *normoxia* sin condiciones severas de *hipoxia* como un estrés evolutivo.

LA PROFUNDIDAD DEL LÍMITE SUPERIOR DE LA ZMO

Se definió como la profundidad con contenido hipóxico de oxígeno disuelto (OD) de 0,5 mL.L⁻¹ o 22,5 µM. En este sentido el espesor de la ZMO se calculó a partir de las profundidades de las isolíneas de oxígeno de 0,5 mL.L⁻¹.

Resultados y discusión

OXÍGENO EN LA ESTACIÓN FIJA CALLAO A 20 mn DE LA COSTA (Figs. 2 y 3)

Se grafican dos periodos sucesivos de registros durante diez años: en la Fig. 2, los años 1999 – 2003; y en la Fig. 3, los años 2004 – 2008. La parte superior de cada figura se refiere al registro interanual del OD con la profundidad, y a la variación del límite superior de la ZMO. En la parte inferior se grafican las anomalías térmicas superficiales de mar (ATSM) durante dichos periodos, para la regiones denominadas NOAA 1,2 (0-10°S, 90°W-80°W) y 3,4, (5°N-5°S, 170°W-120°W). Para la interpretación, se debe relacionar la Fig. 2a con 2b y por otro lado, la Fig. 3a con 3b.

Entre 1999 – 2000, se aprecia la influencia de un periodo frío sobre el límite superior de la ZMO que alcanzó 50 m de profundidad; en verano – otoño 2001, este límite llegó alrededor de los 25 m. En el 2002, las condiciones cálidas propiciaron mayores concentraciones de OD, que profundizaron el límite superior de la ZMO por debajo de los 100 m hasta inicios del 2003 (Fig. 2a)

A partir del 2004 resalta la acentuada variación estacional, mayor hipoxia en verano y expansión de la ZMO; en el periodo de verano – otoño 2006 mostró menor profundidad del límite superior de esta zona hasta los 25 m, pero en invierno (agosto 2006) se presentó un evento cálido que profundizó la ZMO por debajo de los 100 m; una circunstancia similar se evidenció en mayo del 2008 (Fig. 3a).

Por lo anterior, puede asegurarse que en la estación costera de Callao a 20 mn, la ZMO recibe influencia de los eventos cálidos que profundizan su límite superior en cualquier estación del año. Durante los veranos, en periodos normales a fríos, la ZMO exhibe una mayor expansión, registrando menor profundidad del límite superior de la ZMO hasta los 25 m.

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA PROFUNDIDAD DEL LÍMITE SUPERIOR DE LA ZMO EN LA BAHÍA DEL CALLAO (HASTA 10 MN) (FIG. 4)

En la bahía del Callao dentro de las 10 mn, la ZMO ha mostrado una de las mayores extensiones. La Fig. 4, grafica la distribución espacial de la profundidad del límite superior de la ZMO, registrada en dos evaluaciones costeras de verano y primavera del 2006, donde se obtuvieron valores de oxígeno disuelto en los niveles de superficie, intermedio y fondo, y a partir de esta información se realizó una interpolación logarítmica entre los contenidos de oxígeno y la profundidad, calculándose la penetración de la isolínea de oxígeno de 0,5 mL/L.

En la zona próxima al litoral, la profundidad del límite superior de la ZMO alcanzó niveles muy someros, tuvo su mayor expansión en verano 2006; predominó la hipoxia en la columna de agua; el límite superior de la ZMO fluctuó entre 30,0 hasta 2,5 m. En la primavera 2006, el nivel llegó a 7,5 m, con mayor oxigenación que en verano, por efecto de la ventilación ejercida por el viento y el menor consumo de oxígeno por descomposición de la materia orgánica. Además, la primavera 2006 estuvo asociada a un evento cálido, lo que profundizó el límite superior de la ZMO hasta los 80 m por los contenidos de oxígeno superiores a lo habitual.

PERFIL VERTICAL DEL OXÍGENO DISUELTO (OD) HASTA LOS 4000 m DE PROFUNDIDAD (METEOR 77 LEG 4)

En la Fig. 5 se presenta el perfil vertical de oxígeno, en base a los datos obtenidos en el Crucero Interacción en el Océano Tropical, Biogeoquímica y Clima – Meteor 77 Leg 4, realizado en enero y febrero 2009 (Cr. 0901-02), que exploró la amplitud o espesor de la ZMO hasta 4000 m de profundidad.

En el perfil de 0 a 4000 m se puede observar el comportamiento típico del OD frente a la costa del Perú (Fig. 5a), con gradiente de 6,20 a 0,04 mL.L⁻¹ entre la capa de 250 m de profundidad, manteniendo los valores de hipoxia <1,4 mL.L⁻¹, hasta los 900 m, donde se inicia una tendencia clara al incremento, pues a partir de 1000 m, el contenido de oxígeno registra 1,04 a 1,59 mL.L⁻¹, y a los 4000 m de profundidad pasan de 3,14 a 3,54 mL.L⁻¹.

Las concentraciones mínimas de OD, 0,07 mL.L⁻¹ (50 m) y 0,56 mL.L⁻¹ (800 m), reflejan la extensión de la ZMO entre estos niveles (Fig. 5b). Destaca una zona de hipoxia permanente entre los 300 y 400 m de pro-

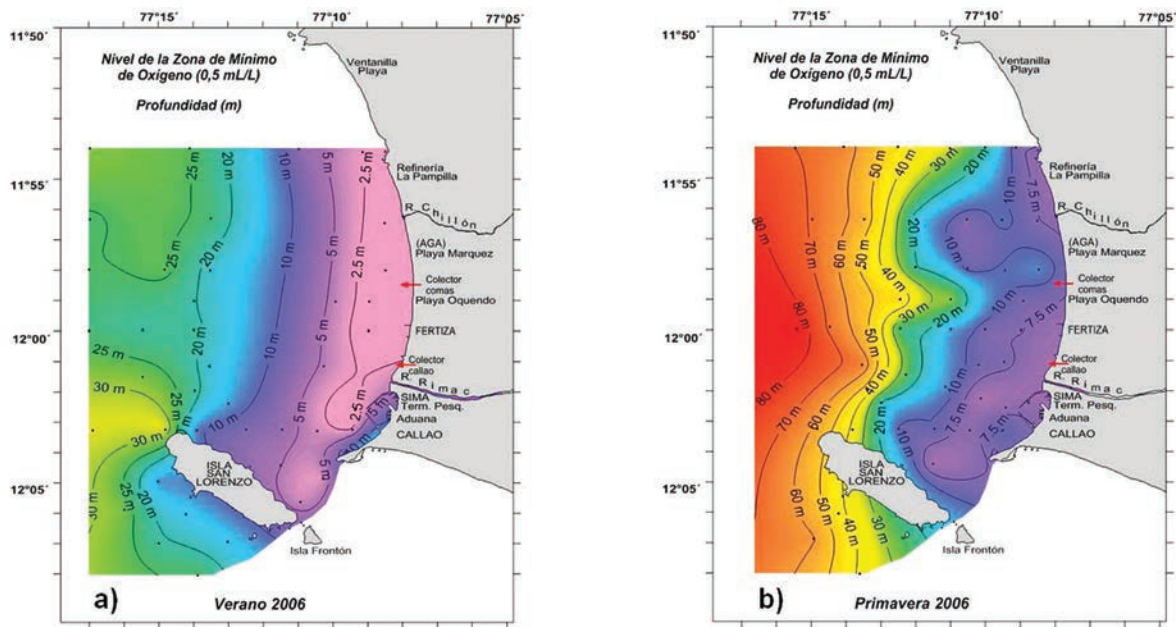


Figura 4.- Distribución espacial de la profundidad del límite superior de la Zona de Mínimo de Oxígeno, en la bahía de Callao durante: a) Verano 2006 y b) Primavera 2006.

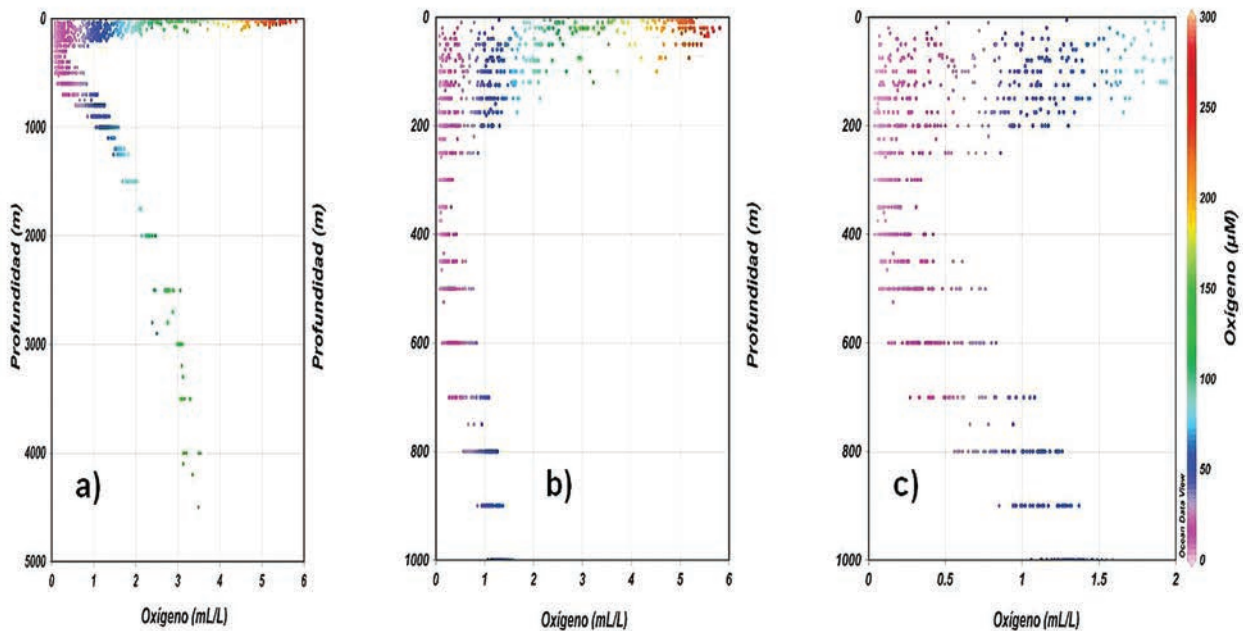


Figura 5.- Perfiles verticales de oxígeno (mL.L^{-1} y μM), usando todos los datos del Crucero Interacción en el Océano Tropical, Biogeoquímica y Clima – Meteor 77, Leg 4, 0901-02: a) Variación de 0 a 5000 m, b) Detalle de 0 a 1000 m y c) Detalle de 0 a 1000 m y hasta $2,0 \text{ mL.L}^{-1}$.

fundidad, con máximos de $0,34$ a $0,42 \text{ mL.L}^{-1}$ de OD (Fig. 5c). Por tanto, la profundidad del límite inferior de la ZMO entre los $03^{\circ}30' - 14^{\circ}00'S / 76^{\circ}30' - 85^{\circ}50'W$ se encuentra aproximadamente a los $677,28 \pm 50,90 \text{ m}$. A partir de los 1000 m , la columna de agua se vuelve más estable; las concentraciones de OD se van incre-

mentando y estabilizando por debajo del límite inferior de la ZMO, es así que a los 2000 m los valores de OD tienen un rango de $2,14$ y $2,47 \text{ mL.L}^{-1}$, en contraste con las grandes variaciones que ocurren a 50 m , donde el rango de OD es de $0,07$ a $5,43 \text{ mL.L}^{-1}$ (Tabla 1).

Tabla 1.- Estadística descriptiva de los contenidos de oxígeno disuelto (OD) en los principales niveles de la ZMO, a partir de los datos del Crucero Interacción en el Océano Tropical, Biogeoquímica y Clima. Meteor 77 Leg 4 - 0901-02.

Parámetro	Oxígeno Disuelto (mL.L ⁻¹)													
	50	100	200	250	300	400	500	600	700	800	1000	1500	2000	4000
Profundidad (m)	50	100	200	250	300	400	500	600	700	800	1000	1500	2000	4000
Cantidad datos	50	57	54	46	49	47	54	51	32	48	51	28	13	6
Promedio OD	2,19	1,15	0,40	0,22	0,13	0,17	0,28	0,43	0,65	0,93	1,33	1,87	2,30	3,40
Desv. Est. OD	1,65	0,94	0,38	0,21	0,07	0,10	0,18	0,18	0,25	0,21	0,11	0,08	0,09	0,18
Máximo OD	5,43	4,52	1,30	0,86	0,34	0,42	0,76	0,83	1,08	1,26	1,59	2,04	2,47	3,54
Mínimo OD	0,07	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,07	0,13	0,27	0,56	1,06	1,68	2,14	3,14

Tabla 2.- Concentraciones de Oxígeno Disuelto y Niveles de Profundidad, empleados en la estimación del espesor de la ZMO, a partir de los datos del Crucero Interacción en el Océano Tropical, Biogeoquímica y Clima, Meteor 77 Leg 4, enero – febrero 2009 (Cr. 0901 02)

Profundidad (m)	OXÍGENO DISUELTO (mL.L ⁻¹)					
	SECCIÓN PUERTO PIZARRO		SECCIÓN PUNTA FALSA		SECCIÓN PISCO	
	03°35,00'S 81°20,65'W 15 mn	03°35,00'S 85°50,02'W 300 mn	05°59,99'S 81°30,09'W 15 mn	06°00,03'S 85°50,02'W 290 mn	13°59,91'S 77°03,49'W 15 mn	13°59,99'S 85°50,01'W 330 mn
0	4,25	4,92	5,05	5,04	4,94	5,08
10			1,80			5,09
20			1,16		3,00	
25	1,82	4,85		4,62		5,11
40			0,19			
50	1,32	1,47		0,82	0,08	
75	1,26			0,48		5,18
100	1,32	0,98	0,16		0,06	4,52
150	1,21	1,03	0,14	0,22		0,22
175	1,08	0,80				0,07
200	0,65	0,22	0,14	0,18	0,06	0,06
225	0,15	0,10				
250	0,13	0,10	0,08			0,06
300	0,15	0,11	0,11	0,06	0,08	0,06
400	0,16		0,09	0,06	0,06	0,12
500	0,23	0,19	0,23	0,14	0,20	0,29
600	0,47	0,30	0,40	0,40		0,56
700		0,50				
750				0,78	0,94	
800	1,10		0,68			0,87
Límite Sup. ZMO (m)	207,5	187,9	33,6	73,5	45,7	146,7
Límite Inf. ZMO (m)	609,5	700,0	671,4	639,5	601,4	577,8
Espesor ZMO (m)	402,0	512,1	637,8	565,9	555,7	431,0

CARACTERIZACIÓN DE LOS LÍMITES SUPERIOR E INFERIOR DE LA ZMO

En la sección Puerto Pizarro (03°35'S) la profundidad del límite superior de la ZMO se ubicó alrededor de los 200 m, en contraste de la zona costera (~15 mn) de Punta Falsa y Pisco, donde este límite superior estuvo en 33 m y 45 m respectivamente. Asimismo, en la zona oceánica de Punta Falsa (300 mn) y Pisco (330 mn), se observó un gradiente de profundización del límite superior de la ZMO hasta 73 y 146 m (Tabla 2).

En la zona costera de Puerto Pizarro, 15 mn de la costa, la ZMO tuvo menor espesor (~402 m), y en la parte

oceánica, 300 mn de la costa, fue mayor (~512 m). Situación contraria ocurrió en Punta Falsa y Pisco, donde a 15 mn de la costa, hubo mayor espesor (~637 m y ~555 m, respectivamente); y a mar abierto, a 290 mn y 330 mn, el espesor se redujo a 565 m y 431 m (Fig. 6, Tabla 2).

Durante el Crucero Meteor 77 Leg 4, enero – febrero 2009 (Cr. 0901-02), el mayor espesor de la ZMO de 688 m se encontró en la parte central de la costa de Perú, frente a Casma (9°30'S - 85°50'W), situación que nos permite especular que, en la zona más próxima a la costa central y delimitada por la plataforma, la ZMO alcanzaría los 700 m de espesor. Estos resulta-

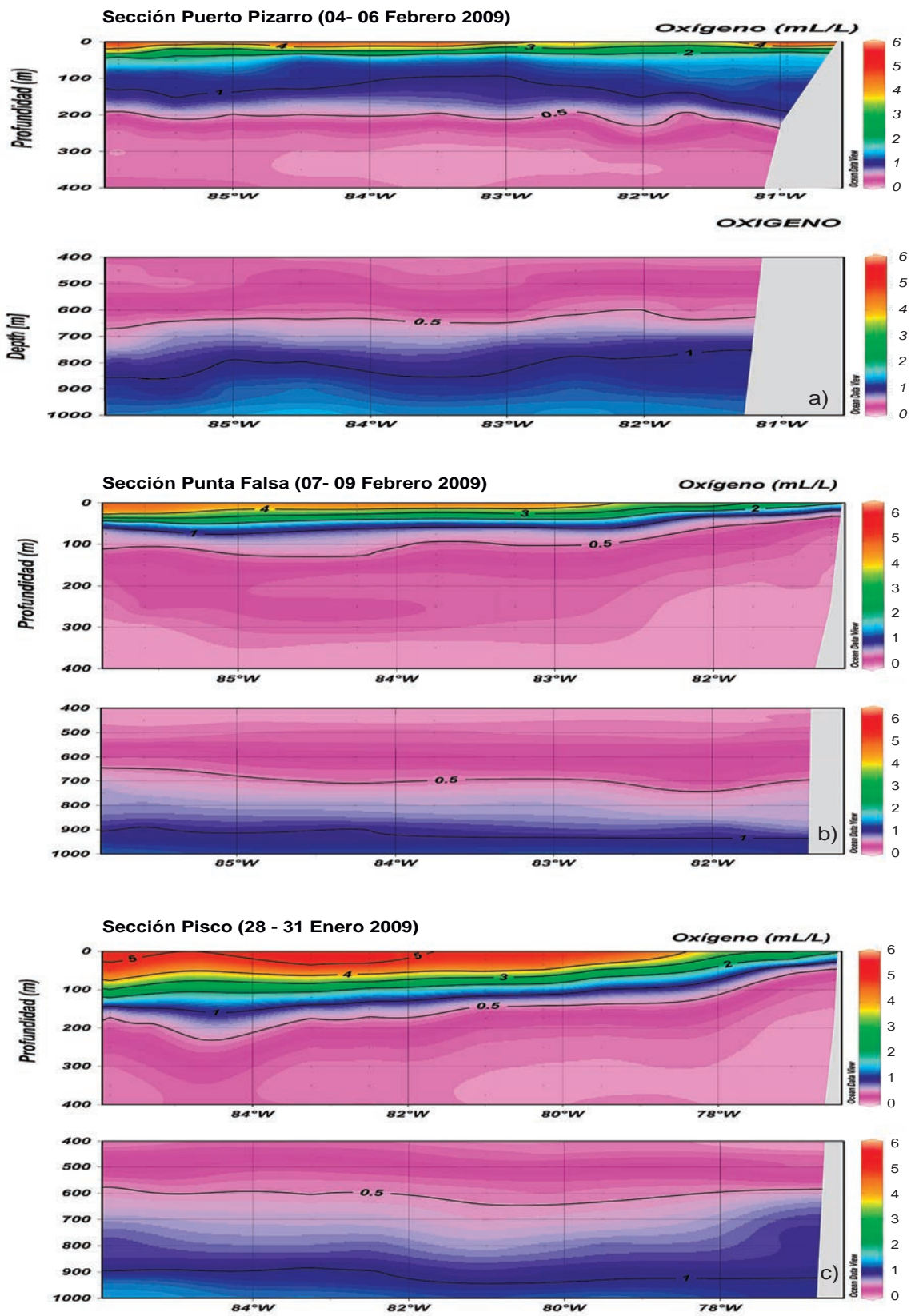


Figura 6.- Distribución vertical longitudinal de oxígeno disuelto (mL.L⁻¹) durante el Crucero Interacción en el Océano Tropical, Biogeoquímica y Clima – Meteor 77 Leg 4 0901-02: a) Sección Puerto Pizarro en los 81°20' – 85°50'W, 03°35'S, b) Sección Punta Falsa en los 81°30' - 85°50'W, 06°00'S y c) Sección Pisco en los 77°03' – 85°50'W, 14°S.

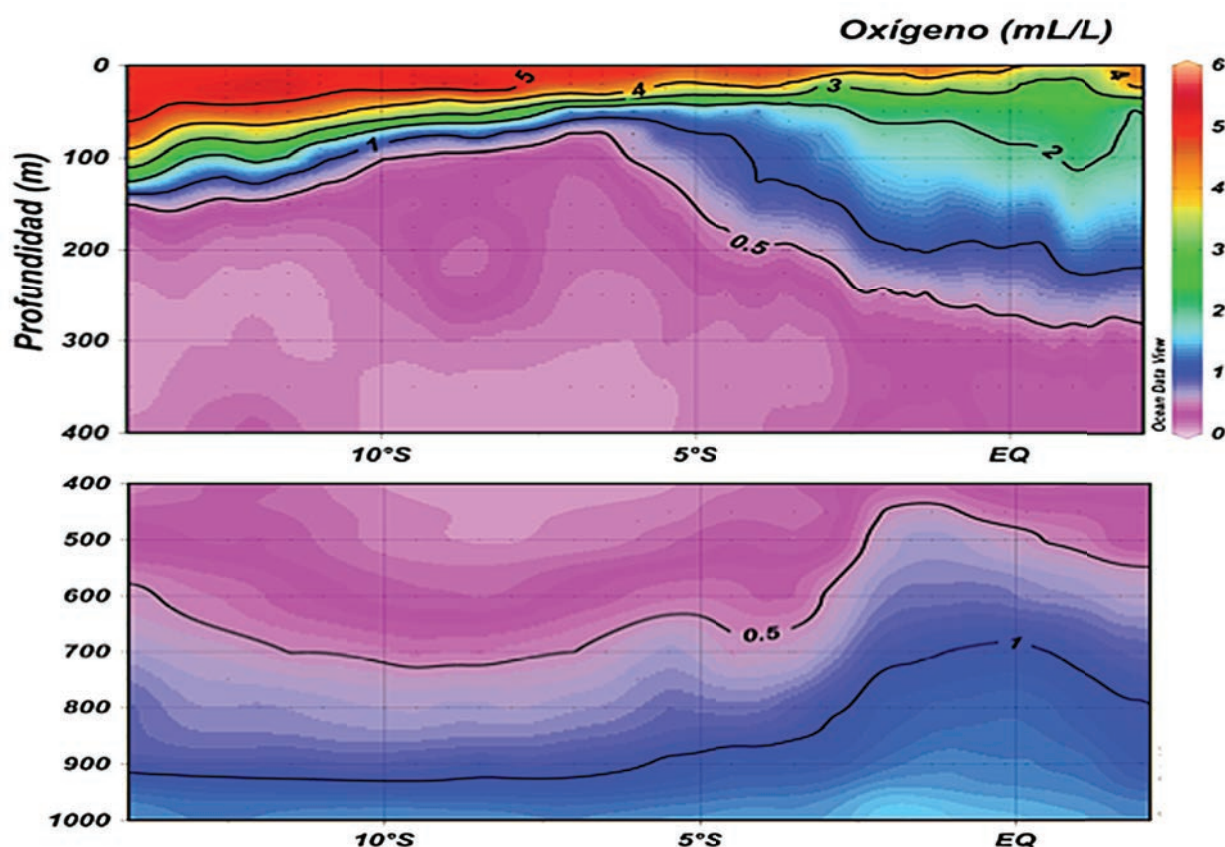


Figura 7.- Distribución Vertical latitudinal de Oxígeno Disuelto (mL.L^{-1}) durante el Crucero Interacción en el Océano Tropical, Biogeoquímica y Clima – Meteor 77 Leg 4 0901-02: Sección Oceánica en los $85^{\circ}50'W$, $14^{\circ}S$ - $03^{\circ}N$.

dos concuerdan con Fuenzalida et al. (2009), quienes encontraron que el espesor de la ZMO es más amplio (> 600 m) frente al Perú entre 5 y $13^{\circ}S$, a unas 600 mn de la costa.

En la sección Puerto Pizarro ($3^{\circ}35'S$) la profundidad del límite superior de la ZMO se encontró a ~ 200 m, se profundizó ligeramente en la zona costera a los 250 m, notándose en general un espesor de la ZMO de ~ 450 m (Fig. 6a).

En la sección Punta Falsa se observa un espesor de la ZMO entre 550 y 640 m, y la profundidad de su límite superior se ubica a los 15 m en la zona costera. Se marca así una gran diferencia con el espesor de la ZMO de 250 m de la sección Puerto Pizarro. A su vez el gradiente de $2,0$ a $1,0 \text{ mL.L}^{-1}$ ($3^{\circ}35'S$) presenta un espesor de 100 a 150 m, y en Punta Falsa ($6^{\circ}S$) dicho gradiente fluctúa por los 25 m (Fig. 6b).

En la sección Pisco el espesor de la ZMO osciló de 430 m a 550 m, presentando una tendencia similar a la sección Punta Falsa; sin embargo, la profundidad del límite superior de la ZMO se encontró por los 200 m en el extremo oceánico a 330 mn de la costa, ascendiendo

hasta los 45 m en la zona costera a 15 mn (Fig. 6c).

Merece un comentario, el hecho que en la Fig. 2a del diagrama Hovmoller a 20 mn de Callao ($12^{\circ}S$), se observe que la profundidad del límite superior de la ZMO ocurre a los 25 m, durante los veranos 2000 y 2001 . Esta profundidad es muy similar a la registrada durante el verano 2009 , en el Crucero Meteor a 15 mn de Punta Falsa ($6^{\circ}S$), que se localizó a 33 m de profundidad. GUTIÉRREZ et al. (2005), situaron el límite superior de la ZMO a 20 mn de San José ($7^{\circ}S$) al borde de los 25 m de profundidad para los veranos 2000 y 2001 , demostrándose la somerización de la ZMO en los periodos de verano, en años normales sin El Niño.

En la sección vertical latitudinal de OD a la longitud $85^{\circ}50'W$ (Fig. 7), entre los $14^{\circ}S$ y $3^{\circ}N$ (31 enero – 13 febrero 2009), se observó un espesor o amplitud de la ZMO de ~ 450 m en el extremo sur ($14^{\circ}00'S$ - $85^{\circ}50'W$); en la costa central del Perú se amplió a ~ 680 m, por una mayor intensidad de la ZMO. A los $6^{\circ}S$ se registró una reducción del espesor, que a los $5^{\circ}S$ fue ~ 450 m, y continuó reduciéndose hasta la línea ecuatorial donde llegó a ~ 250 m (Fig. 7).

Conclusiones

1. En el Callao (12°02'S - 77°29'W) a las 20 mn, la profundidad del límite superior de la ZMO durante los veranos sin El Niño (1999 - 2008), se ubica en promedio a los 30,6 ± 8,8 m y de manera general el promedio anual se ubica a los 47,5 ± 20,2 m. En particular, los valores hipóxicos se acentúan hacia el centro de la bahía de Callao (2 mn), registrándose el límite superior más somero de la ZMO a 2,5 m durante el verano 2006. Para el verano 2009 frente a las costas del Perú (03°30' - 14°00'S / 76°30' - 85°50'W) el espesor de la ZMO fue en promedio de 677,28 ± 50,90 m.
2. La variabilidad de la profundidad del límite superior de la ZMO y su espesor son indicadores clave para monitorear los cambios biogeoquímicos en el Ecosistema de la Corriente de Humboldt, a diferentes escalas temporales y espaciales. Finalmente, es trascendental continuar investigando la dinámica de la ZMO, teniendo en cuenta el posible efecto de intensificación de la ZMO frente al cambio climático, tal como lo sugirió STRAMMA et al. (2008), lo cual traería grandes repercusiones sobre los recursos pesqueros.

Referencias

- CARRIT D, CARPENTER J. 1966. Comparison and evaluation of currently y employed modifications of Winkler method for determination dissolved oxygen in sea water. *J. Mar. Res.* 24:286-318.
- CHEN C-C, GONG G-C, SHIAH F-K. 2007. Hypoxia in the East China Sea One of the largest coastal low-oxygen areas in the world. *Mar. Environ. Res.*, 64, 399-408.
- FUENZALIDA R, SCHNEIDER W, GARCES J, BRAVO L, LANGE C. 2009. Vertical and horizontal extension of the oxygen minimum zone in the eastern South Pacific Ocean.
- GOLDEN SOFTWARE. 2009. Surfer Getting Started Guide. Contouring and 3D Surface Mapping for Scientists and Engineers. 56 p.
- GRACO M, LEDESMA J, FLORES G, GIRON M. 2007. Nutrientes, Oxígeno y Procesos Biogeoquímicos en el Sistema de Surgencias de la Corriente de Humboldt frente a Perú. *Rev. Perú. Biol.* 14(1).
- GUTIÉRREZ D, ARONÉS K, CHANG F, QUIPÚZCOA L, VILLANUEVA P. 2005. Impacto de la variación oceanográfica estacional e inter-anual sobre los ensamblajes de microfitorplancton, mesozooplancton, ictioplancton y macrozoobentos de dos áreas costeras del norte del Perú entre 1994 y 2002. *Bol. Inst. Mar Perú* (22): 3-60.
- KAMYKOWSKI D, ZENTARA S J. 1990. Hypoxia in the world ocean as recorded in the historical data set. *Deep-Sea Research* (37): 1861-1874.
- O'CONNOR T, WHITALL D. 2007. Linking hypoxia to shrimp catch in the northern Gulf of Mexico, *Mar. Pollut. Bull.*, 54, 460-463.
- RABALAIS NN, DÍAZ RJ, LEVIN LA, TURNER RE, GILBERT D, ZHANG J. 2010. Dynamics and distribution of natural and human-caused hypoxia, *Biogeosciences*, 7, 585-619.
- SCHLITZER, R. 2011. Ocean Data View User's Guide Version 4.3.8
- STRAMMA L, JOHNSON G, SPRINTALL J, MOHRHOLZ V. 2008. Expanding Oxygen-Minimum Zones in the Tropical Oceans. *Science* V 320-2:655-658.
- TYSON RV, PEARSON TH (eds.). 1991. Modern and Ancient Continental Shelf Anoxia. Geological Society of London Special Publication No. 58, 470 p.
- WYRTKI K. 1962. The oxygen minima relation to ocean circulation. *Deep sea research* (9): 11-23