

**UNIVERSIDAD DEL MAR**  
*campus Puerto Ángel*



**Dinámica de nutrientes en la zona de mínimo oxígeno en el Pacífico  
Tropical Mexicano**

**TESIS**

Que para obtener el Título Profesional de  
**Licenciado en Biología Marina**

Presenta

**Juan Mario Ruiz Villegas**

Directora

**Dra. María Luisa Leal Acosta**

Codirector

**Dr. Rafael Cervantes Duarte**

Ciudad Universitaria, Puerto Ángel, Oaxaca, México, 2025

*Le quiero dedicar este trabajo a Maya, la mejor Madre y Padre que dios me pudo dar, quien siempre creyó en mí, dándome su amor, comprensión y gran apoyo para poder lograr y cumplir todas mis metas y sueños.*

## **Agradecimientos**

Se agradece al personal científico del Instituto Mexicano de Investigación en Pesca y Acuicultura (IMIPAS) y a la tripulación del buque de investigación oceanográfica "Jorge Carranza Fraser", por su colaboración en la colecta de muestras y medición de parámetros hidrográficos.

Se agradece de igual forma al proyecto "Variación espacio-temporal de los procesos biogeoquímicos de la zona costera del golfo de Tehuantepec y su relación con el zooplancton" financiado por PRODEP con la Clave de Unidad Programática (CUP): **2IR2001** y al proyecto "Programa de Monitoreo permanente de la acidificación del océano y su efecto en los corales formadores de arrecifes en México" financiado por el fondo sectorial SEMARNAT-CONACYT con clave 2016-01-278637

Se agradece al Laboratorio de Análisis Químico del CICIMAR, por el análisis de nutrientes en el agua del mar. Especialmente a la MC. Alondra Martínez Hernández y al Biol. Ma. Víctor Manuel Tinoco Camacho.

Se agradece a la Doctora María Luisa Leal Acosta por darme la oportunidad de llevar a cabo este proyecto a su lado, así como el tiempo que se tomó para ayudarme en todas las dudas que fueron surgiendo y sobre todo por tener paciencia. Ha sido un privilegio poder contar con su guía y ayuda.

Se agradece a los doctores Rafael Cervantes Duarte, Cecilia Chapa Balcorta y Antonio López Serrano por su decisivo apoyo en este trabajo de investigación, así como su colaboración durante la revisión y tutela de este trabajo.

Se agradece al M en C. Asbel Itahi de la Cruz por realizar el pretratamiento y corrección de los datos de CTD para los estudios correspondientes.

Agradezco a mi madre Maya, quien a lado de mi familia Elsa, Jorge y Alejandra, siempre me apoyaron creyendo en mí y estando a mi lado a lo largo de mi vida académica, a mi Linda quien fielmente estuvo todo este tiempo conmigo dándome una meta y el amor más puro que hay.

Estoy muy agradecido con Paulina Pérez Silva, mi bonita que a pesar de mis malos ratos y enojos siempre me enseñó a lidiar con todo y poder seguir adelante, quien me alentó a siempre a aspirar a más y nunca darme por vencido.

Agradezco a Andy, mi leal amigo desde hace más de 10 años que nunca me dejó solo en este proceso universitario, quien siempre me apoyó e impulsó a seguir adelante.

Le agradezco a Viri y Michelle mis grandes amigas que me dieron tanto consejos como su compañía en los momentos más difíciles.

Un especial agradecimiento a Oscar, Gisela, Francisco, Antonio, Leo, Fernanda y Laurita por su amistad y apoyo a lo largo de la carrera y de esta última etapa como estudiante, ya que sin ellos y sus consejos no podría lograr este mérito.

Le agradezco a Emilio, Carolina, Reno, Miriam y Jess quienes me apoyaron con grandes consejos y reflexiones durante mi carrera y mi proyecto de tesis.

## Índice

<b>1. Introducción</b> .....	1
1.1 Ciclo del nitrógeno.....	1
1.2 Ciclo de Fósforo.....	3
1.3 Estructura de la columna de agua .....	3
<b>2. Antecedentes</b> .....	8
<b>3. Justificación</b> .....	13
<b>4. Hipótesis</b> .....	14
<b>5. Objetivos</b> .....	14
5.1 Objetivo general.....	14
<b>5.2</b> Objetivos específicos .....	14
<b>6. Materiales y métodos</b> .....	15
6.1 Área de estudio .....	15
6.1.1 Región del Pacífico Central Mexicano (PCM) .....	15
6.1.2 Hidrología de la región.....	16
6.1.3 Región del Pacífico Mexicano Sur (PMS).....	18
6.1.4 Hidrología de la región.....	18
6.2 Colecta de muestras .....	20
<b>6.3 Mediciones hidrográficas</b> .....	22
6.3.1 Análisis de oxígeno disuelto .....	22
6.4 Análisis químico de nutrientes.....	22
6.4.1 Nitratos .....	22
6.4.2 Nitritos.....	23
6.4.3 Fosfatos .....	23
6.5 Tratamiento de los datos en el software Ocean Data View .....	24

<b>7. Resultados</b> .....	25
<b>7.1 Hidrografía</b> .....	25
7.1.1 Temperatura y salinidad por sectores.....	25
7.1.2 Sector 1 (Colima y Michoacán) .....	25
7.1.3 Sector 2 (Guerrero y Oaxaca).....	30
7.1.4 Sector 3 (Golfo de Tehuantepec) .....	35
7.2 Oxígeno Disuelto .....	40
7.2.1 Sector 1 (Colima y Michoacán) .....	40
7.2.2 Sector 2 (Guerrero y Oaxaca).....	42
7.2.3 Sector 3 (Golfo de Tehuantepec) .....	44
7.3 Distribución espacial de oxígeno disuelto .....	46
7.4 Masas de agua.....	48
7.4.1 Sector 1.....	48
7.4.2 Sector 2.....	49
7.4.3 Sector 3.....	50
7.5 Nutrientes Inorgánicos Disueltos.....	52
7.5.1 Nitritos ( $\text{NO}_2^-$ ).....	52
7.5.2 Nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) .....	53
7.5.3 Fosfatos ( $\text{PO}_4^{3-}$ ).....	54
7.6 Distribución espacial de nutrientes .....	56
7.6.1 Nitrato.....	56
7.6.2 Fosfato.....	58
<b>8. Discusión</b> .....	61
8.1 Niveles de nutrientes en el Pacífico oriental tropical.....	63
8.2 Procesos físicos que influyen en el aporte de nutrientes.....	65

<b>9. Conclusiones</b> .....	69
<b>10. Recomendaciones</b> .....	70
<b>11. Referencias</b> .....	71
<b>12. Anexo 1</b> .....	79
<b>13. Anexo 2</b> .....	80
<b>14. Anexo 3</b> .....	81
<b>15. Anexo 4</b> .....	82

## Índice de figuras

- Figura 1.** Tomada de Lam & Kuypers (2011). El ciclo del nitrógeno en las zonas oceánicas de oxígeno mínimo (OMZ). El  $N_2$  puede producirse tanto por anammox (naranja) como por desnitrificación (rojo). En esta última, cada paso también puede considerarse individualmente, con posible liberación de intermediarios, y cada uno podría ser responsable de la remineralización posterior, aunque aquí sólo se muestra el primer paso. Tanto la reducción de nitrato (púrpura) como la reducción disimilatoria de nitrato a amonio (DNRA; azul) son también procesos de remineralización, produciendo  $NO_2^-$  y  $NH_4^+$  adicionales respectivamente. La nitrificación se divide en dos pasos: oxidación del amoníaco (verde claro) y oxidación del nitrito (verde oscuro). También se muestra la fijación potencial de  $N_2$  (gris discontinuo) pero no se ha probado en la OMZ. .... 2
- Figura 2.** Tomada y modificada de Gilly *et al.*, 2013. Procesos biogeoquímicos microbianos activos en las zonas de oxígeno mínimo (ZMO) y en el océano oxigenado. .... 6
- Figura 3.** Tomada y modificada de Fiedler & Talley (2006). Secciones meridionales de medias de nutrientes ( $\mu\text{mol kg}^{-1}$ ) a lo largo de 110W a partir de los datos de flotadores Argos WOD01 (véase el Apéndice): a) nitrito ( $NO_2^-$ ), b) nitrato ( $NO_3^-$ ) y c) fosfato ( $PO_4^{3-}$ ). ..... 10
- Figura 4** Mapa de la costa del Pacífico mexicano. Las cuatro regiones marcadas tienen dinámicas diferentes: (a) región influenciada por la Corriente de California, (b) Golfo de California, (c) región central y (d) región sur. La línea roja es el límite a aproximado de la alberca de agua cálida (Warm pool), la línea azul es el límite del Tehuantepec Bowl, un descenso de la superficie del mar debido a efectos oceanográficos (Tomada de Chiappa-Carrara *et al.*, 2019). .... 15
- Figura 5.** Esquematación de la circulación media frente al suroeste de México. Las líneas continuas indican las corrientes cercanas a la superficie, y la línea discontinua indica el componente subsuperficial de la corriente costera mexicana. CC = Corriente de California, TCCD = Termoclina del Domo de Cabo Corrientes, MCC = Corriente Costera Mexicana, TTB = Termoclina del Domo de Tehuantepec, CRCC = Corriente Costera de Costa Rica (Tomada de Gómez-Valdivia *et al.*, 2015). .... 17
- Figura 6.** Representación esquemática de la circulación de agua con características de CCCR en el golfo de Tehuantepec en Sep. 2004 (Tomada de Reyes-Hernández *et al.*, 2016). ..... 19

<b>Figura 7.</b> Anomalía en la altimetría de la superficie del mar (cm) y corrientes geostróficas asociadas ( $m s^{-1}$ ), mostrando la evolución de los remolinos en el golfo de Tehuantepec y sus proximidades, antes de los eventos tehuanos (1 de marzo), justo después de los cuatro eventos tehuanos (29 de marzo) y durante la campaña de muestreo (13-19 de abril de 2013). C1= remolino ciclónico de Tehuantepec. A1= remolino anticiclónico de Tehuantepec. A2 5 Foucault anticiclónico de Papagayo. La cuadrícula del crucero de muestreo se muestra en magenta en el gráfico de los días 13 y 18 de abril ( <a href="http://www.aviso.oceanobs.com/duacs/">http://www.aviso.oceanobs.com/duacs/</a> ) (Tomada Chapa-Balcorta <i>et al.</i> , 2015). .....	20
<b>Figura 8.</b> Área muestreada en el Océano Pacífico tropical mexicano. a) Sector 1, b) Sector 2 y c) Sector 3.....	21
<b>Figura 9.</b> Perfiles verticales de a) temperatura conservativa y b) salinidad absoluta del sector 1. ....	25
<b>Figura 10.</b> Transectos A, B y C del sector 1 (Color rojo) abarcando las estaciones 1 a la 32. ....	26
<b>Figura 11.</b> Distribución vertical de temperatura conservativa para el sector 1 (Colima y Michoacán) en tres transectos a) estaciones 1 a 4, b) estaciones 13 a 16, c) estaciones 29 a 32, donde cada línea gris punteada representa una estación del transecto y el 0 en el eje x es la zona cercana a la costa.....	27
<b>Figura 12.</b> Distribución vertical de Salinidad para el sector 1 (Colima y Michoacán) en tres transectos a) estaciones 1 a 4, b) estaciones 13 a 16, c) estaciones 29 a 32, donde cada línea gris punteada representa una estación del transecto y el 0 en el eje x es la zona cercana a la costa. ....	29
<b>Figura 13.</b> Perfiles verticales de a) temperatura conservativa y b) la salinidad absoluta del sector 2.....	30
<b>Figura 14.</b> Transectos del A, B y C del sector 2 (Color rojo) abarcando las estaciones 33 a la 52 .....	31
<b>Figura 15.</b> Distribución vertical de temperatura para el sector 2 (Guerrero y Oaxaca) en tres transectos a) estaciones 33 a 36, b) estaciones 41 a 44, c) estaciones 49 a 52, donde cada línea gris punteada representa una estación del transecto y el 0 en el eje x es la zona cercana a la costa. ....	32

<b>Figura 16.</b> Distribución vertical de salinidad para el sector 2 (Guerrero y Oaxaca) en tres transectos a) estaciones 33 a 36, b) estaciones 41 a 44, c) estaciones 49 a 52, donde cada línea gris punteada representa una estación del transecto y el 0 en el eje x es la zona cercana a la costa. ....	34
<b>Figura 17.</b> Perfiles verticales de a) temperatura y b) salinidad del sector 3. ....	35
<b>Figura 18.</b> Transectos A, B y C del sector 3 (Remarcado en color rojo) abarcando las estaciones 53 a la 76. ....	36
<b>Figura 19.</b> Distribución vertical de temperatura para el sector 3 (Golfo de Tehuantepec) en tres transectos a) estaciones 53 a 56, b) estaciones 64 a 67, c) estaciones 74 a 76, donde cada línea gris punteada representa una estación del transecto y el 0 en el eje x es la zona cercana a la costa. ....	37
<b>Figura 20.</b> Distribución vertical de salinidad para el sector 3 (Golfo de Tehuantepec) en tres transectos a) estaciones 53 a 56, b) estaciones 64 a 67, c) estaciones 74 a 76, donde cada línea gris punteada representa una estación del transecto y el 0 en el eje x es la zona cercana a la costa. ....	39
<b>Figura 21.</b> Distribución vertical de OD para el sector 1 (Colima y Michoacán) a) estaciones 1 - 4, b) estaciones 13 - 16 y c) estaciones 29 - 32 en el sector 1, donde el 0 es la zona cercana a la costa. ....	41
<b>Figura 22.</b> Distribución vertical de OD para las a) estaciones 33 a la 36, b) estaciones 41 a la 44 y c) estaciones 49 a la 52 en el sector 2, donde el 0 es la zona cercana a la costa. ....	43
<b>Figura 23.</b> Distribución vertical de OD para las a) estaciones 53 a la 56, b) estaciones 60 a la 63 y c) estaciones 74 a la 76 en el sector 3 (Golfo de Tehuantepec), donde el 0 es la zona cercana a la costa. ....	45
<b>Figura 24.</b> Distribución espacial de OD a una profundidad de 5 metros, b) 100 metros y c) 500 metros. ....	47
<b>Figura 25.</b> Diagrama TS del sector 1 con los valores de a) OD ( $\mu\text{mol L}^{-1}$ ) y b) profundidad en la barra de colores. ....	49
<b>Figura 26.</b> Diagrama TS del sector 2 con los valores de a) OD ( $\mu\text{mol L}^{-1}$ ) y b) profundidad en la barra de colores. ....	50
<b>Figura 27.</b> Diagrama TS del sector 3 con valores de a) OD ( $\mu\text{mol L}^{-1}$ ) y b) profundidad (m) en la barra de colores. ....	51

<b>Figura 28.</b> Perfil vertical de $\text{NO}_2^-$ para el océano Pacífico oriental mexicano. ....	53
<b>Figura 29.</b> Perfil vertical de $\text{NO}_3^-$ para el océano Pacífico oriental mexicano. ....	54
<b>Figura 30.</b> Perfil vertical de $\text{PO}_4^{3-}$ para el océano Pacífico oriental mexicano. ....	55
<b>Figura 31.</b> Distribución espacial de $\text{NO}_3^-$ a) 3 m, b)100 m y c)500 m para el océano Pacífico oriental mexicano. ....	57
<b>Figura 32.</b> Distribución espacial de $\text{PO}_4^{3-}$ a)3 m, b)100 m y c)500 m para el océano Pacífico oriental mexicano. ....	59
<b>Figura 33.</b> Distribuciones espaciales de temperatura, $\text{NO}_3^-$ y $\text{PO}_4^{3-}$ para el golfo de Tehuantepec. ....	60
<b>Figura 34.</b> Perfiles de oxígeno en los océanos Atlántico y Pacífico norte. Tomada de Millero, 2013. ....	63
<b>Figura 35.</b> Promedio de la anomalía de la altura del nivel del mar y corriente geostrófica, para las fechas que se especifican en la figura, a partir de datos satelitales (cortesía del Servicio de Vigilancia Marina Copernicus). Tomado de Chapa-Balcorta <i>et al.</i> (en proceso). ....	67
<b>Figura 36.</b> Promedio de la anomalía de la altura del nivel del mar y corriente geostrófica en el golfo de Tehuantepec para las fechas que se especifican en la figura, a partir de datos satelitales (cortesía del Servicio de Vigilancia Marina Copernicus). Tomado de Chapa-Balcorta <i>et al.</i> , (en proceso). ....	68

## Índice de tablas

<b>Tabla 1.</b> Tomada de Berg J. S. <i>et al.</i> , (2022). Clasificación redox modificada a partir de Tyson & Pearson (1991) y Algeo & Li (2020).....	4
<b>Tabla 2.</b> Masas de agua del Océano Pacífico oriental tropical frente a México (ETPM). Los intervalos hidrográficos se basan en Durazo y Baumgartner (2002), Castro <i>et al.</i> , (2006) y Lavín <i>et al.</i> , (2009). (Tomada y modificada de Cepeda-Morales <i>et al.</i> , 2013 y Portella <i>et al.</i> , 2016).....	48
<b>Tabla 3.</b> Valores mínimos, máximos, media ( $\bar{x}$ ), desviación estándar (DE), número de muestras (n) y profundidad de la nutriclina de cada nutriente, por sectores. ....	52
<b>Tabla 4.</b> Tabla con valores de nutrientes ( $\mu\text{M}$ ) reportados en diferentes zonas. ....	65