



**INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE CIENCIAS
MARINAS**



CONTENIDO DE ALUMINIO Y TITANIO EN HECES DE BALLENA AZUL
(*Balaenoptera musculus*) Y SU POTENCIAL COMO INDICADORES
INDIRECTOS DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS
EN
MANEJO DE RECURSOS MARINOS

PRESENTA:

CYNDELL ALEJANDRA CORONA MELÉNDEZ

La Paz, B.C.S., JUNIO DE 2021



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de La Paz, B.C.S. siendo las 12:00 horas del día 24 del mes de Junio del 2021 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Posgrado de: CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE CIENCIAS MARINAS para examinar la tesis titulada:

"CONTENIDO DE ALUMINIO Y TITANIO EN HECES DE BALLENA AZUL (*Balaenoptera musculus*) Y SU POTENCIAL COMO INDICADORES INDIRECTOS DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA" del (la) alumno (a):

Apellido Paterno:	CORONA	Apellido Materno:	MELÉNDEZ	Nombre (s):	CYNDELL ALEJANDRA
-------------------	--------	-------------------	----------	-------------	-------------------

Número de registro: B 1 9 0 5 0 4

Aspirante del Programa Académico de Posgrado:

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN MANEJO DE RECURSOS MARINOS

Una vez que se realizó un análisis de similitud de texto, utilizando el software antiplagio, se encontró que el trabajo de tesis tiene 9 % de similitud. **Se adjunta reporte de software utilizado.**

Después que esta Comisión revisó exhaustivamente el contenido, estructura, intención y ubicación de los textos de la tesis identificados como coincidentes con otros documentos, concluyó que en el presente trabajo **SI** **NO** **SE CONSTITUYE UN POSIBLE PLAGIO.**

JUSTIFICACIÓN DE LA CONCLUSIÓN:

El % de similitud se localiza en metodologías adecuadamente referidas a fuente original

****Es responsabilidad del alumno como autor de la tesis la verificación antiplagio, y del Director o Directores de tesis el análisis del % de similitud para establecer el riesgo o la existencia de un posible plagio.**

Finalmente y posterior a la lectura, revisión individual, así como el análisis e intercambio de opiniones, los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR** **SUSPENDER** **NO APROBAR** la tesis por **UNANIMIDAD** o **MAYORÍA** en virtud de los motivos siguientes:

"SATISFACE LOS REQUISITOS SEÑALADOS POR LAS DISPOSICIONES REGLAMENTARIAS VIGENTES"

COMISIÓN REVISORA DE TESIS


DRA. DIANE GENDRON LANIER

Director de Tesis


DR. VÍCTOR MANUEL GÓMEZ MUÑOZ


DR. GUILLERMO MARTÍNEZ FLORES


DRA. LIDIA MARTÍNEZ LÓPEZ

Director de Tesis


DR. CÉSAR PAUL LEY QUIÑÓNEZ

DR. SERGIO HERNÁNDEZ TRUJILLO
PRESIDENTE DEL COLEGIO DE
PROFESORES



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de La Paz, B.C.S., el día 30 del mes de Junio del año 2021

El (la) que suscribe BIOL. CYNDELL ALEJANDRA CORONA MELÉNDEZ Alumno (a) del Programa
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN MANEJO DE RECURSOS MARINOS

con número de registro B190504 adscrito al CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE CIENCIAS MARINAS
manifiesta que es autor(a) intelectual del presente trabajo de tesis, bajo la dirección de:

DRA., DIANE GENDRON LANIEL Y DRA. AÍDA MARTÍNEZ LÓPEZ
y cede los derechos del trabajo titulado:

"CONTENIDO DE ALUMINIO Y TITANIO EN HECES DE BALLENA AZUL (*Balaenoptera musculus*)
Y SU POTENCIAL COMO INDICADORES INDIRECTOS DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA"

al Instituto Politécnico Nacional, para su difusión con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Éste, puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección: cyndell29@gmail.com - dgendron@ipn.mx - amartin@ipn.mx

Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

BIÓL. CYNDELL ALEJANDRA CORONA MELÉNDEZ

Nombre y firma del alumno



Tesis_CoronaMelendezCyndella.pdf

May 25, 2021

18747 palabras/99317 caracteres

MARIO ALBERTO CASTILLO SORIA

Tesis_CoronaMelendezCyndella.pdf

Biól. Cyndell Alejandra Corona Meléndez

Resumen de fuentes

6%

SIMILITUD GENERAL

1	repositoriodigital.ipn.mx INTERNET	1%
2	www.repositoriodigital.ipn.mx INTERNET	<1%
3	tesis.ipn.mx INTERNET	<1%
4	biblio.uabcs.mx INTERNET	<1%
5	pmcarbono.org INTERNET	<1%
6	www.scielo.org.mx INTERNET	<1%
7	agricola-www.redalyc.org INTERNET	<1%
8	courses.comet.ucar.edu INTERNET	<1%
9	delfin.cicimar.ipn.mx INTERNET	<1%
10	xdoc.mx INTERNET	<1%
11	doaj.org INTERNET	<1%
12	doczz.net INTERNET	<1%
13	www.biblioteca.cicimar.ipn.mx INTERNET	<1%
14	www.politicaneta.com INTERNET	<1%
15	www.meteovigo.es INTERNET	<1%
16	insights.ovid.com INTERNET	<1%

17	nova_scientia.delasalle.edu.mx INTERNET	<1%
18	repositorio.ipicyt.edu.mx INTERNET	<1%
19	www.mdpi.com INTERNET	<1%
20	www.mercanet.cnp.go.cr INTERNET	<1%
21	www.slideshare.net INTERNET	<1%
22	docplayer.es INTERNET	<1%
23	Carmen Gómez-Martínez, María de la Villa Moral-Jiménez. "Dehumanization and Islamophobia: attitudes towards the Syrian refugee cr... CROSSREF	<1%
24	fortworthtexas.gov INTERNET	<1%
25	hdl.handle.net INTERNET	<1%
26	mafiadoc.com INTERNET	<1%
27	s6250e2cbcd1c88c4.jimcontent.com INTERNET	<1%
28	www.edufi.ucr.ac.cr INTERNET	<1%
29	193.135.216.2 INTERNET	<1%
30	idoc.pub INTERNET	<1%
31	journals.ametsoc.org INTERNET	<1%
32	oa.upm.es INTERNET	<1%
33	repositorio.uchile.cl INTERNET	<1%
34	revistaccuba.sld.cu INTERNET	<1%
35	www.conacyt.mx INTERNET	<1%
36	www.publish.csiro.au INTERNET	<1%
37	www.tirsoferrol.com INTERNET	<1%
38	Michael A. Alexander. "Climate Variability in Regions of Amphibian Declines", Conservation Biology, 8/3/2001 CROSSREF	<1%
39	cienciasagricolas.inifap.gob.mx INTERNET	<1%
40	cimav.repositorioinstitucional.mx INTERNET	<1%

41	cybertesis.uach.cl	INTERNET	<1%
42	dspace.ucuenca.edu.ec	INTERNET	<1%
43	epub.sub.uni-hamburg.de	INTERNET	<1%
44	imecocal.cicese.mx	INTERNET	<1%
45	www.mastozoologiamexicana.org	INTERNET	<1%
46	www.scielo.org.ar	INTERNET	<1%
47	www.sia.juntaex.es	INTERNET	<1%
48	www.yumpu.com	INTERNET	<1%

Se excluyeron los depósitos de búsqueda:

- Ninguno

Excluido del Informe de Similitud:

- Bibliografía
- Citas textuales
- Citas
- Coincidencias menores (8 palabras o menos)

Se excluyeron las fuentes:

- Ninguno

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	i
LISTA DE FIGURAS	iv
LISTA DE ANEXOS.....	v
RESUMEN.....	vi
INTRODUCCIÓN.....	1
ANTECEDENTES	6
JUSTIFICACIÓN	9
HIPÓTESIS	9
OBJETIVOS.....	10
METODOLOGÍA.....	11
Área de estudio	11
Recolecta de heces	12
Efecto del método de conservación de las heces	14
Generación de serie de tiempo	15
Análisis estadísticos.....	16
<i>Método de conservación</i>	16
<i>Variabilidad en el tiempo</i>	16
<i>Relación entre el Ti y AI con la variabilidad climática</i>	17
<i>Estimación de datos faltantes: Modelo lineal-RMA</i>	20
<i>Evaluación de la relación causa-efecto entre forzantes climáticos y el Ti y AI</i> ... 20	
RESULTADOS	22
Métodos de conservación	22
Variabilidad en el tiempo	24
Variabilidad climática.....	26
<i>Correlaciones cruzadas</i>	29
DISCUSIÓN.....	31
Métodos de conservación	31
Variabilidad de AI y Ti en el tiempo y su relación con la variabilidad climática	33
<i>Correlación simultánea</i>	33
<i>Correlación con Oscilación del Atlántico Norte (NAO)</i>	42
CONCLUSIONES.....	48
BIBLIOGRAFÍA	49
ANEXOS.....	61

AGRADECIMIENTOS

Realizar una maestría implica mucho esfuerzo y colaboración de muchas personas e instituciones, por lo tanto, también implica muchos agradecimientos sinceros.

Primero que nada, debo agradecer a mis directoras la Dra. Diane Gendron y la Dra. Aída Martínez, por aceptarme en sus laboratorios y proyectos, que aun sabiendo que mi experiencia en sus áreas era escasa, me brindaron toda la confianza, apoyo, herramientas y paciencia, para desarrollar mi intelecto, aprender cosas nuevas, tener experiencias nuevas, que estoy segura de que me servirán en el camino, muchas gracias, no podría lograr esto sin su ayuda.

Al Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas (CICIMAR-IPN) por permitirme estudiar en su programa de estudios y cumplir un sueño, una meta más en mi vida. Así mismo, agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), Programa Institucional de Formación de Investigadores (PIFI), Beca Institucional de Posgrado del Instituto Politécnico Nacional, Proyectos SIP: 20200763, Indicadores de variabilidad climática y cambio ambiental (microplásticos) y SIP: 20200710, Condición corporal vs marcadores fisiológicos y bioquímicos en ballenas, así como a la Sociedad Mexicana de Mamíferos Marinos (SOMEMMA), por los apoyos económicos a este proyecto, sin los cuales hubiera sido imposible concluir el trabajo.

Al Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Sinaloa (CIIDIR-Guasave), el Laboratorio Fauna Silvestre y enfermedades emergentes de la misma institución, al Laboratorio Estatal de Salud Pública de Sinaloa y al Laboratorio Nacional de Biotecnología Agrícola, Médica y Ambiental (LAMBAMA), por permitirme utilizar sus instalaciones para el análisis de muestras necesarias para realizar este proyecto.

A la Dra. Diana Escobedo-Urías, Dr. Alan Alfredo Zavala Nozagaray, Michelle Ruiz, Ángel Tello y sobre todo al Dr. César Paúl Ley Quiñónez y Brenda Espinoza, por su apoyo y ayuda en mi estancia en el CIIDIR y el procesamiento de mis muestras.

A los miembros de mi comité Dr. Guillermo Martínez Flores, Dr. Víctor M. Gómez Muñoz y nuevamente al Dr. César Paúl Ley, por enseñanzas, apoyo, recomendaciones y comentarios en cada una de sus áreas, todos fueron de gran ayuda para que este trabajo mejorara.

A todos los profesores que me impartieron clases durante mi tiempo en la maestría, me llevo muchos conocimientos nuevos por parte de cada uno de ustedes y estoy segura de que me serán de utilidad durante el resto de mi vida profesional.

A los administrativos que me ayudaron en todos los papeleos necesarios durante mi estancia en la institución.

A mis padres, abuelitos, Tony y Lyana, a mi hermano y cuñada, así como a mis tíos, por todo su apoyo y por siempre impulsarme a seguir adelante, aunque eso implique estar lejos de ustedes, pero que saben que me hace feliz, pues cumpla mis sueños desde pequeña. Durante este proceso pasamos por un momento muy difícil, pero seguimos unidos y apoyándonos como la gran familia que somos y sin que la distancia nos afecte, cada día doy gracias infinitas por cada uno de ustedes, los AMO y como siempre les digo, GRACIAS POR SER MI LUZ, MI INSPIRACIÓN.

A mis mejores amigas Alba, Aby, Fers, Denise, Sonia y Gaby que son mi S.O.S en cualquier situación, gracias infinitas por su apoyo incondicional en cualquier momento, por esas locuras que hacemos, que, aunque de algún modo son diferentes con cada una, las amo por igual y agradezco que estén en mi vida.

Muchas gracias a todos.

DEDICATORIA

*“El camino sigue y sigue
desde la puerta.
El camino ha ido muy lejos,
y si es posible he de seguirlo,
recorriéndolo con pie decidido”
J.R.R. Tolkien*

A mis padres, mis sobrinos y abuelitos, que siempre me han apoyado, inspirado e impulsado a seguir adelante sin importar lo difícil que se ponga la situación o la falta de inspiración.

Los amo

Gracias.

LISTA DE FIGURAS

figura 1. Puntos de muestreos de heces de ballena azul realizados en el Golfo De California.....	13
Figura 2. Mapa que representa el cuadrante seleccionado para la generación de campos vectoriales en el GC.....	19
Figura 3. Concentración De Al en heces de ballena azul por método de conservación, sin diferencias significativas ($p=0.874$).....	22
Figura 4. Concentración de Ti en heces de ballena azul por método de conservación, sin diferencias significativas ($p=0.981$).....	23
Figura 5. Variabilidad temporal (promedio t_{d-m}] y desviación estándar) de Al (a) y Ti (b) a lo largo de la serie de tiempo (1996-2020). Valor medio (línea roja) de las concentraciones de Al (c) y Ti (d) entre periodo (1996-2008 y 2009-2020).	24
Figura 6. Correlación directa entre las concentraciones de Al y Ti en heces de ballena azul.....	25
Figura 7. Correlación inversa entre el valor del índice de vientos alisios (850 mb) y la concentración de Al (1996-2020).	26
Figura 8. Serie de tiempo completa con concentraciones estimadas de Al y Ti por medio del modelo lineal (EMR) representadas por barras verdes y amarillas.27	
Figura 9. Variación de la concentración de Al y cambios de régimen del índice de vientos alisios (850 mb) a lo largo de la serie de tiempo.	27
Figura 10. Comportamiento entre las concentraciones de Ti y cambios de régimen del índice de vientos alisios (850 mb) a lo largo de la serie de tiempo.	28
Figura 11. Variación del promedio de las concentraciones de Al y Ti, así como del promedio del índice ONI (1996-2020).....	28
Figura 12. Correlograma entre índice NAO y concentraciones de Al y Ti, que ilustran una correlación significativa ($r= 0.473$), en un desfase de 2 años.....	29
Figura 13. Correlograma de la serie de componente V y concentraciones de Al y Ti, que ilustran una correlación significativa ($r= 0.423$), en un desfase de 3 años.....	30
Figura 14. Índices (barras): PDO (a), NPGO (b) Y El Niño Modoki (c). Las líneas en cada caso representan los valores obtenidos por medio de la técnica CUSUM (Regier <i>et al.</i> , 2019). En donde el símbolo \square representa los cambios de régimen de cada modo climático.	35
Figura 15. Registro del valor promedio mensual (dic-mar) de las precipitaciones en la zona de Ligüi, B.C.S (25.73° N, -111.27°W) de 1996-2016.	36
Figura 16. Representación de la variabilidad aleatoria del NPO y los cambios inducidos alrededor de los 20°N. Incluye los cambios en el acoplamiento atmósfera-océano durante los meses invierno (parche naranja) y primavera verano (parche rojo). Modificado de Liguori (2018).	39
Figura 17. Representación de los CUSUM de los componentes del viento y el índice de vientos alisios (dic-mar). Las marcas verticales representan los	

cambios de régimen en los componentes U del viento e índice de vientos alisios (negro) y en la componente V del viento (rojo).....	40
Figura 18. Zonas desérticas potenciales para la emisión de polvo hacia el GC. Recuperado de Morales-Acuña (2015).....	46
Figura 19. Cambio de régimen de la dirección y rapidez del viento durante el tiempo de estudio. Registro de la dirección y rapidez de los vientos (en rojo y azul respectivamente (a). Rosa de los vientos (b).	47

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Información de los índices analizados incluyendo nombre, variables analizadas para conformar cada índice y la región a donde se aplica cada uno.	17
---	----

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Tabla de muestras de heces de ballena analizadas para la lectura de concentración de elementos mayores.	61
Anexo 2. Tabla de muestras ya analizadas por el laboratorio de ecología de cetáceos de cicimar-ipn para la detección de elementos mayores y traza.	63

RESUMEN

La ballena azul (*Balaenoptera musculus*) tiene una estrategia de alimentación denominada engullición, filtrando grandes cantidades de agua y presas. Al mismo tiempo, ingiere partículas minerales transportadas eólicamente desde la región semiárida que rodea el suroeste del Golfo de California (GC), convirtiéndolo en un receptor permanente de partículas. Dependiendo de su composición, estas partículas pueden contribuir significativamente al suplemento de elementos no esenciales como aluminio (Al) y titanio (Ti) hacia el ecosistema marino. Dichos elementos no participan en las rutas metabólicas de los rorcuales, por lo que se plantea la hipótesis de que son eliminados, sin modificación, mediante las heces, convirtiéndolos en indicadores indirectos del aporte de estos elementos al ecosistema y así ser utilizados como trazadores litogénicos, indicadores de variabilidad climática. Con base en 105 muestras de la colección de heces de ballena azul (1996-2020), analizadas por Espectrometría de Emisión Óptica de Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES), se confirmó la presencia de Al y Ti. Una asociación positiva significativa (Spearman, $r = 0.9$, $p < 0.05$) entre las series de tiempo de ambos elementos, indica que comparten la misma fuente de origen. Posteriormente, por medio de correlaciones de Spearman y correlaciones cruzadas, se compararon las fluctuaciones de las concentraciones de Al y Ti, con cambios de régimen de cuatro indicadores del viento (componente U [este a oeste] y V [norte a sur], así como la rapidez y dirección) y 6 índices climáticos (MEI, ONI, NAO, PDO, NPGO y vientos alisios) obtenidos de la NOAA. Los resultados indican que las concentraciones de Al y Ti son moduladas por los cambios en los vientos alisios (Spearman, $r = -0.72$, $p < 0.05$), cambios producidos en el Atlántico Norte (umbral de confianza $r > 0.395$, para $p < 0.05$) y cambios en el componente V del viento ($r > 0.395$, para $p < 0.05$), con un retraso de 2 y 3 años respectivamente ($r_{x,y(2,3)} = 0.47, 0.42$). Variaciones que estuvieron moduladas a su vez por modos de variación climática de escala decadal que dominan el Pacífico Norte, tales como el PDO y el NPGO, las cuales interactúan y modifican la dirección y rapidez de los vientos en el GC por medio de teleconexiones, resaltando el potencial del Al y Ti, para evidenciar la variabilidad climática registrada en el suroeste del GC a escala interanual y decadal.

ABSTRACT

The blue whale (*Balaenoptera musculus*) has a feeding strategy called gulping, filtering massive amounts of water and preys. At the same time, they ingest mineral particles transported by wind from the semi-arid region surrounding the southwestern Gulf of California (GC), making it a permanent particle receptor. Depending on their composition, these particles can significantly contribute to the supplement of non-essential elements such as aluminum (Al) and titanium (Ti) towards the marine ecosystem. These elements do not participate in the metabolic pathways of rorquals. Therefore, it is hypothesized that they are eliminated, without modification, through the feces, turning them into indirect indicators of the contribution of the major elements to the ecosystem and thus can be used as lithogenic tracers, indicators of climate variability. Based on 105 samples from the blue whale feces collection (1996-2020), analyzed by Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry (ICP-OES), the presence of Al and Ti was confirmed. A significant positive association (Spearman, $r = 0.9$, $p < 0.05$) between the time series of both elements, indicates that they share the same source of origin. Subsequently, by means of Spearman correlations and cross correlations, the fluctuations of the concentrations of Al and Ti were compared, with regime changes of four wind indicators (component U [east to west] and V [north to south], as well as speed and direction) and 6 climatic indices (MEI, ONI, NAO, PDO, NPGO and trade winds) obtained from NOAA. The results indicate that the concentrations of Al and Ti are modulated by the changes in the trade winds (Spearman, $r = -0.72$, $p < 0.05$), changes produced in the North Atlantic (confidence threshold $r > 0.395$, for $p < 0.05$) and changes in the V component of the wind ($r > 0.395$, for $p < 0.05$), with a delay of 2 and 3 years respectively ($r_{x,y}(2,3) = 0.47, 0.42$). These variations were in turn modulated by the decadal-scale modes of climatic variation that dominate the North Pacific, such as the PDO and the NPGO, which interact and modify the direction and speed of the winds in the GC through teleconnections. These results demonstrate the potential of Al and Ti, to reveal the climatic variability registered in the southwest of the GC at interannual and decadal scales.

INTRODUCCIÓN.

El Golfo de California (GC) es un sitio de alta productividad primaria, llegando a producir en promedio más de $300 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, similar a lo producido en promedio en otras regiones marinas de México, tales como, la costa occidental de la Península de Baja California ($280 \pm 113 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$), el Pacífico Oriental Tropical Mexicano ($236 \pm 208 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$) y el Golfo de México ($308 \pm 427 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$), según la estimación realizada por Sosa-Ávalos *et al.*, (2018). Por ello, sirve de sostén a distintas especies, entre ellas los rorcuales, como la ballena de aleta, residente en el GC y aislada del Pacífico Noroeste (Bérubé *et al.*, 2002), y la ballena azul (*Balaenoptera musculus*) que frecuenta el GC de diciembre a junio, utilizándolo como zona de crianza, alimentación y reproducción (Gendron, 2002; Valenzuela-Molina *et al.*, 2018). Su presencia en el suroeste de GC entre febrero y abril, coincide con las más altas biomásas de krill (*Nyctiphanes simplex*) del cual se alimentan (Gendron, 1992).

Estos mamíferos tienen una estrategia alimenticia única, por cada bocanada engullen aproximadamente 70 m^3 de agua y filtran toneladas de presas (Gregr *et al.*, 2005; Goldbogen *et al.*, 2007; Lesage *et al.*, 2018). Esta forma de alimentación con la cual cubren sus requerimientos nutricionales, entre ellos los de adquirir ciertos elementos esenciales para cumplir procesos metabólicos les confiere ciertas desventajas. Una de las más importantes es la exposición a la contaminación de varias maneras, sobre todo por la ingestión de desechos o de presas contaminadas (Gregr *et al.*, 2005). Lo que se ha evidenciado a través de la presencia de elementos no esenciales en sus tejidos, que, al no tener un papel biológico conocido para mamíferos marinos, pueden ser tóxicos en altos niveles y se formula la hipótesis de que en alguna medida son eliminados por medio de las heces (Soto-Jiménez, 2011).

Por otro lado, se tiene registro de la presencia de elementos traza como Cu, Zn, Fe, Cd y Mn en heces de ballena azul y sus principales presas (Casillas-López, 2018). Estos elementos participan en rutas metabólicas de ambos grupos (Hansen *et al.*, 2015) y su eliminación mediante sus heces, juegan un papel crucial en los

ciclos bioquímicos de los ecosistemas marinos (Morel & Price, 2003). Adicionalmente, las heces de los rorcuales potencialmente contienen elementos mayores no esenciales de origen terrígeno que ingresan al océano desde el continente (Vázquez-Figueroa *et al.*, 2014). Dada la forma de alimentación de las ballenas y la enorme cantidad de agua que pueden ingerir cada vez que se alimentan (Gregr *et al.*, 2005; Lesage *et al.*, 2018), en combinación con procesos en donde las partículas minerales se unen a la materia orgánica, p.ej. la sorción o agregación (Keil & Mayer, 2014); las heces de ballenas podrían servir para registrar el aporte terrígeno hacia el mar.

El aporte terrígeno, se refiere a la presencia de elementos de origen estrictamente terrígeno en aguas marinas debido al intercambio de materia constante que existe entre la tierra sólida y el océano (Vázquez-Figueroa *et al.*, 2014; Hansen *et al.*, 2015; Squadrone *et al.*, 2015). Entre los elementos químicos transportados hacia el océano en las partículas de origen terrígeno, pueden encontrarse elementos mayores y elementos traza. Estos son clasificados de acuerdo con la concentración en que se presentan en la corteza de la tierra, dividiéndose en elementos mayores (10,000-1,000,000 ppm), elementos intermedios (1,000-10,000 ppm), menores (100-1,000 ppm) y traza (<100 ppm) (Han & Singer, 2007).

El aporte de estas partículas al océano, se efectúa por: 1) transporte de elementos del continente de forma particulada o gaseosa en la atmósfera (transporte eólico), que se depositan en la superficie del agua, 2) materia en forma de partículas o disuelta, resultado de la erosión de la corteza continental, transportada por el flujo de ríos, escorrentías y aguas subterráneas, 3) cuando los sedimentos marinos actúan como un reactor químico para liberar y absorber elementos químicos hacia y desde el agua de mar y 4) el intercambio entre la corteza y manto de la Tierra (SCOR, 2007).

Para los fines del presente trabajo se considera el transporte por vía eólica que se produce en distintos entornos como la zona costera, regiones semiáridas y áridas (Lancaster, 2014). El transporte de polvo tiene una alta variabilidad espacial y temporal, pues la magnitud de las emisiones y su depósito dependerá de la

naturaleza de la partícula transportada, la cobertura vegetal de la zona, las características del suelo, así como de las condiciones meteorológicas prevalecientes, como la intensidad del viento (Solano-Marín 2005; Mhowald *et al.*, 2018; Morales-Acuña *et al.*, 2019), ya que el movimiento de las partículas se logra mediante una combinación de tensión del viento en la superficie y la turbulencia atmosférica. El proceso de emisión de polvo comienza cuando el viento cercano a la superficie excede un valor de umbral, por encima del cual las partículas del suelo comienzan a moverse, ya sea por el mecanismo de reptación, saltación o suspensión, el cual a su vez dependerá del radio de sedimentación y tamaño de la partícula, de modo que, vientos más energéticos lograrán transportar partículas de mayor tamaño desde el área de origen (Schulz *et al.*, 2012; Lancaster, 2014; López-González *et al.*, 2020).

En la superficie del mar, existen vientos dominantes que constituyen fuerzas externas, las cuales explican la circulación general de la superficie del océano (NOAA, 2019). Esto hace del medio eólico una vía de transporte de elementos importante al océano en forma de partículas parcialmente disueltas o compuestas (algunas son insolubles en agua) (Buat-Ménard, 1983). Así, la concentración de cualquier elemento litogénico particulado, como el aluminio (Al), es adecuado para calcular el flujo de polvo a partir de la tasa de sedimentación de partículas (Anderson *et al.*, 2016); por lo que el polvo mineral transportado al océano es un buen indicador de la variabilidad climática (Lamy *et al.*, 2014; Friese *et al.*, 2016). Las tasas de emisión de este polvo se ven afectadas por la variabilidad climática, lo que posibilita, en ciertas escalas de tiempo, una retroalimentación climática positiva o negativa a través del forzamiento polvo-clima (Schulz *et al.*, 2012), ya que el cambio de régimen climático podría afectar los procesos físicos y químicos de la atmósfera, como las vías de transporte atmosférico, el intercambio entre aire y superficie continental, así como las tasas naturales de emisión (Hansen *et al.*, 2015).

Se ha determinado que durante épocas de vientos fuertes, el depósito de polvo de zonas desérticas sirve como fuente de elementos mayores y traza tales como el

aluminio (Al), titanio (Ti), manganeso (Mn) y hierro (Fe), convirtiéndolo en uno de los aerosoles de mayor importancia (Mhowald *et al.*, 2018). Particularmente, el polvo erosionado de zonas áridas o semiáridas es muy sensible al clima, de manera que el depósito de polvo no es constante y puede aumentar con algunos eventos intensos (Guieu & Shevchenko, 2015). Okin & Reheis (2002), mencionan una relación inversa entre la tasa de depósito atmosférico en el suroeste de Estados Unidos y las anomalías de eventos interanuales como el fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur (ENSO), evento que genera cambios en la temperatura superficial del mar (TSM) y en la intensidad de los vientos alisios, llegando a debilitarse e incluso soplar en la dirección opuesta en su fase cálida, mientras que en la fase fría (La Niña) los vientos llegan a intensificarse (Bravo-Cabrera *et al.*, 2017).

El GC es una zona en donde los vientos están activos durante todo el año y se encuentra rodeado de zonas áridas y semiáridas; con una limitada entrada de agua dulce (Wilkinson *et al.*, 2009), pues las precipitaciones ocurren mayormente en el verano (Lluch-Cota-Cota *et al.*, 2007) y la cantidad de lluvia varía entre 200 mm y 1000 mm dependiendo de la zona. Por lo anterior, el GC es un receptor permanente de materia particulada de origen continental, sobre todo en la temporada de otoño a primavera, cuando se registran vientos dominantes del noroeste (Roden, 1958; Segovia-Zavala *et al.*, 2009).

En la zona del GC se han realizado estudios sobre depósito atmosférico de hierro (Fe) en periodos cortos, sin embargo, para explorar el potencial que tienen las heces de rorcuales como indicadores de variabilidad climática, se requiere una serie de tiempo lo más extensa posible; por lo que se construyó una serie temporal de concentraciones de elementos mayores en heces de ballena azul durante un periodo de 24 años (1996-2020), proveniente de la colección de muestras del Laboratorio de Ecología de Cetáceos del CICIMAR-IPN. Este periodo está caracterizado por una alta variabilidad climática interanual (Lavín *et al.*, 2003) y abarca al menos un cambio de régimen climático decadal, requisito para medir la

variabilidad climática en esta escala temporal (Ramamasy & Baas, 2007; Gohar & Cashman, 2016; Mishra, 2017).

El primer indicio de que existe un aporte de elementos de origen terrígeno hacia el GC se sustentó en las concentraciones de elementos traza (Cd, Cu, Fe, Mn y Zn) en heces de *B. musculus* y su variación en un periodo de 7 años (2002,2009-2016) (Casilla-López, 2018). Los cambios concurrentes de estos elementos durante este periodo sugirieron por primera vez que sus fluctuaciones estaban reguladas por un mecanismo común; un cambio en las presas principales o en los aportes terrígenos relacionados con la variabilidad climática. En el último caso, hipotéticamente, este aporte incluiría Al y Ti, principales elementos transportados por el medio eólico en zonas desérticas y semidesérticas (Mhowald *et al.*, 2018), como las que rodean el GC, lo cual soporta el planteamiento de este estudio.

ANTECEDENTES

Se ha detectado la presencia de 20 elementos traza y de Al en tejidos de hígado, riñón y cerebro en tres cachalotes varados en el Mar Adriático, en Italia (Squadrone *et al.*, 2015). Sin embargo, sus concentraciones fueron relativamente bajas y no alcanzaron niveles tóxicos. Esto fue atribuido a la baja captación intestinal y su rápida eliminación por parte de estos organismos.

Entre los estudios recientes, que abordan el papel que juegan las grandes ballenas en los ciclos biogeoquímicos del océano, se ha demostrado el papel de las heces en los ciclos biogeoquímicos a través del reciclaje de nutrientes incluido el hierro (Ratnarajah *et al.*, 2016), así como su participación en los ciclos productivos debido al aporte de otros elementos traza (Cd, Cu, Co, Mn y Zn) y al crecimiento del fitoplancton (Roman *et al.*, 2016).

Posteriormente Casillas-López (2018), evaluó el aporte de macronutrientes y elementos traza (Cd, Cu, Fe, Mn y Zn) contenido en las heces, así como su concentración en presas de la ballena azul, recolectadas en el Parque Nacional de Bahía Loreto, en el suroeste del GC.

En cuanto a los estudios sobre el aporte terrígeno al océano, Singer *et al.* (2003) determinaron el depósito de polvo en el mar Muerto en un periodo de 3 años (1997-1999), encontrando partículas de distintos tamaños, entre ellas el Al. Determinaron, además, mayores tasas de depósito de polvo durante primavera y otoño, que lo que observaron durante verano e invierno. Asimismo, encontraron una relación entre el tipo de partículas con la dirección y rapidez del viento, lo que les indicó que la variabilidad de las tasas estuvo relacionada con el régimen estacional del viento de la zona.

Por otro lado, Mahowald *et al.* (2003) analizaron la variabilidad interanual de aerosoles minerales atmosféricos en un periodo de 22 años (1979-2000) en África del Norte, utilizando un modelo de simulación y datos observacionales. En dicho estudio se compararon las medias anuales de los índices climáticos NAO y PDO con las medias mensuales de concentración de polvo. Se encontraron algunas correlaciones entre el depósito atmosférico de algunas estaciones de Hawaii,

Midway y Enewtak con el índice del PDO y otras con el índice de NAO y el depósito atmosférico en estaciones de Barbados, Izana, Mace Head, Enewtak y Funafuti, en datos observados y del modelo, indicando el efecto de estos en el depósito atmosférico en la zona. Además, establecieron una correlación entre el índice NAO con variables del modelo, tales como: la movilización promedio anual, columna de polvo, concentración superficial y la depositación, señal de que este índice afecta la variabilidad en la movilización y transporte de polvo desértico en el África del Norte. Por otro lado, el índice de PDO mostró una correlación con el depósito de polvo, así como la columna de polvo, este último también correlacionado con el índice de El Niño, modificando las concentraciones modeladas hacia el Pacífico, aunque parece tener una menor relación con el polvo desértico que el índice NAO, los autores lo atribuyen al hecho de que el modelo predice en su mayoría el depósito Norte de África y no en otras zonas.

Segovia-Zavala *et al.* (2009), mostraron que el depósito atmosférico, por el flujo y depósito eólico es una fuente importante de metales traza hacia la zona central del GC, específicamente del hierro particulado de origen continental con base al muestreo de partículas atmosféricas de septiembre de 1997 a septiembre de 1998 y comparado con muestras de agua recolectadas en primavera de 2003. Así mostraron una variabilidad de concentraciones mayores de Fe, durante el verano y otoño y menores durante la primavera, una variación que probablemente se deba a fenómenos como El Niño 97-98.

Posteriormente Morales-Acuña (2015) determinó seis regiones que rodean el GC y que potencialmente actúan como fuente de polvo hacia el mismo, las cuales son influenciadas por la variabilidad espacio-temporal del viento, determinando el flujo de polvo de tres zonas hacia el GC. Por medio de trampas de polvo, estimaron que el flujo promedio fue de $8.082 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ y que la zona determinada ZD4 (Puerto Peñasco) es la zona con mayor probabilidad de actuar como fuente de polvo hacia el GC, en los meses de enero a mayo y de octubre a diciembre.

Morales-Acuña *et al.* (2019) basado en series de tiempo mensuales (1991-2014) de variables hidrometeorológicas, determinaron que el depósito eólico en dos

zonas desérticas de la Península de Baja California tiene asociación directa con el aumento de la velocidad del viento, la temperatura del aire, las disminuciones en la precipitación y la humedad del suelo. Del mismo modo, seleccionaron una serie de tiempo mensual de flujo de polvo que coincidía con eventos “El Niño” fuertes, identificando una asociación con este fenómeno, pues cuando este evento climático comienza a perder intensidad, el flujo de emisión de polvo muestra anomalías positivas, indicando un aumento de la producción de polvo en las áreas de estudio.

JUSTIFICACIÓN

Esta propuesta aborda el rol de la ballena azul como filtradores y muestreadores biológicos, ya que, dada su forma de alimentación, filtran grandes cantidades de agua por bocada (ca 70 m³) (Gregr *et al.*, 2005) junto con sus presas, así como las partículas minerales, las cuales por procesos de sorción (Keil & Mayer, 2014), se unen a la materia orgánica particulada. A su vez, el proporcionar un seguimiento de los elementos mayores de origen terrígeno que llegan al GC y que son filtrados por los rorcuales. Se destaca el potencial que tienen las heces de ballena azul como indicadores de la variabilidad climática del GC. Un cambio en los patrones de viento, vía principal de transporte de partículas al GC, se reflejaría en un aumento de la concentración de elementos mayores en el mismo, esta evaluación debe realizarse en una serie de tiempo larga según lo establecido por la Organización Mundial de la Meteorología (Henson *et al.*, 2016; Martínez-López *et al.*, 2019), por ello es importante validar la calidad del acervo biológico a utilizar a pesar de que este se ha construido en base a la preservación de muestras en distintos métodos.

HIPÓTESIS

Las concentraciones de Al y Ti en heces de ballena azul no son afectadas por el método de preservación.

Debido a su forma de alimentación y la eliminación de elementos no esenciales por medio de heces, éstas presentarán evidencia del aporte de Al y Ti de origen netamente terrígeno vía eólica.

Sus concentraciones varían acorde a la velocidad de los vientos, correspondiente a los cambios que estos han presentado en el GC durante el periodo del 1993 al 2020.

OBJETIVOS

Objetivo general

- Determinar las concentraciones de Al y Ti, de origen terrígeno, presentes en las heces de ballena azul (1996-2020) y su relación con la variabilidad climática registrada en el Suroeste del Golfo de California.

Objetivos particulares

- Analizar la variabilidad en la concentración de los elementos mayores: Al y Ti en las heces de ballena azul, en función del método de conservación.
- Generar una serie de tiempo de las concentraciones de los elementos (Al y Ti) a partir del contenido en las heces de ballena azul.
- Determinar si la concentración de los elementos (Al y Ti), presentes en heces de ballena azul varía en el tiempo.
- Determinar si la concentración de los elementos Al y Ti, están relacionadas a cambios de patrones de viento registrados en el Golfo de California.

METODOLOGÍA

Área de estudio

El GC es un cuerpo de agua que separa a la Península de Baja California de la zona continental de México (Lluch-Cota *et al.*, 2007), con un clima más continental que oceánico y un rango de temperatura superficial entre 14 y 31°C (Zeitzschel, 1969). Su estacionalidad se caracteriza por el forzamiento atmosférico de los vientos del sureste en el verano, dominada por una baja presión sobre el desierto de Sonora, mientras que en el invierno se registra una mayor variabilidad y vientos fuertes provenientes del noroeste en todo el GC con una magnitud promedio de 4.93 ms⁻¹ y una dirección de 333.5° (Parés-Sierra *et al.*, 2003; Jiménez *et al.*, 2005), los cuales pueden durar de pocos días hasta un par de semanas, A su vez, estos modifican los flujos de calor entre aire y mar debido a la intensificación estacional del Centro de Baja Presión de las Aleutianas que domina sobre el Pacífico Norte en verano. La prevalencia de estos vientos en el invierno provoca surgencias en el borde oriental del GC, una pérdida de calor en la capa de mezcla (Bernal *et al.*, 2001; Bustos-Serrano & Castro-Valdez, 2006), además de transportar entre 100 a 143 mg m⁻² d⁻¹ de partículas litogénicas por vía atmosférica (Segovia-Zavala *et al.*, 2009).

El transporte de polvo ocurre debido a que a lo largo de la Península de Baja California se pueden observar condiciones semidesérticas con precipitaciones anuales menores a los 100 mm (Wilkinson *et al.*, 2009). Sin embargo, durante el verano y el otoño, se presenta el transporte de grandes cantidades de vapor de agua hacia el noreste, así como la ocurrencia de las tormentas tropicales y los huracanes. Estos pueden causar fuertes lluvias y escorrentías, intensificando el movimiento de sedimento y agua hacia el océano (Lluch-Cota *et al.*, 2007).

Estas condiciones climatológicas pueden verse modificadas cuando ocurre el fenómeno de El Niño o La Niña, resultado de la interacción océano-atmósfera en el Pacífico Tropical, que pueden afectar las condiciones meteorológicas y el clima del GC (Herrera-Cervantes, 2008; Lluch-Cota *et al.*, 2010; Girón-Nava & Johnson 2016). La condición de El Niño comienza en el Pacífico Ecuatorial Occidental y se

extiende hasta el Este en las costas de Perú. En la región ecuatorial está caracterizada por distintos cambios en la circulación atmosférica y el océano, tales como debilitamiento de los vientos atmosféricos, conocidos como vientos alisios, el aumento en la temperatura del Océano Pacífico Oriental Tropical, así como cambios drásticos en la profundidad de la termoclina y las corrientes (Kessler, 2006 & Rodríguez-Moreno *et al.*, 2014).

Por otro lado, durante eventos de escala decadal se han registrado cambios en el sistema océano-atmósfera, sobre todo en el Pacífico Noreste, los cuales generan ciertos cambios en la circulación atmosférica a gran escala, que aunado a forzantes externos como mareas nodales lunares y la actividad solar afectan los patrones de viento dominantes, generando cambios en la intensidad y ubicación de los centros de presión atmosférica y la fuerza de las celdas de circulación atmosférica (Saldívar-Lucio *et al.*, 2016). Un ejemplo es expresado por el patrón de Oscilación Decadal del Pacífico (PDO, por sus siglas en inglés), durante el cual se generan cambios en la temperatura de la superficie del mar. Durante su fase cálida, el centro de baja presión de las Aleutianas se intensifica, aumentando la precipitación durante el invierno (Dean *et al.*, 2004). Esto, debido a que de noviembre a marzo, las anomalías bajas de presión a nivel del mar (SLP, por sus siglas en inglés) sobre el Pacífico Norte provocan vientos intensificados en sentido antihorario y se extienden en la troposfera, por lo que son persistentes en el Pacífico Norte (Mantua & Hare, 2002). La influencia estos eventos de variabilidad climática, a escala interanual y decadal y los cambios que generan en la interacción océano-atmósfera, influye en los ciclos sedimentarios del océano (Dean *et al.*, 2004).

Recolecta de heces

El laboratorio de Ecología de Cetáceos del CICIMAR-IPN realiza salidas de prospecciones de cetáceos en el suroeste del GC (Fig. 1) para estudiar a la ballena azul mediante foto-identificación de individuos, generando un historial de avistamientos de individuos muy extenso (Gendron & Ugalde-De la Cruz, 2012). Durante estas prospecciones, se ha obtenido una colección de aproximadamente

450 submuestras de heces preservadas en diferentes métodos de conservación desde 1993 hasta el 2020.

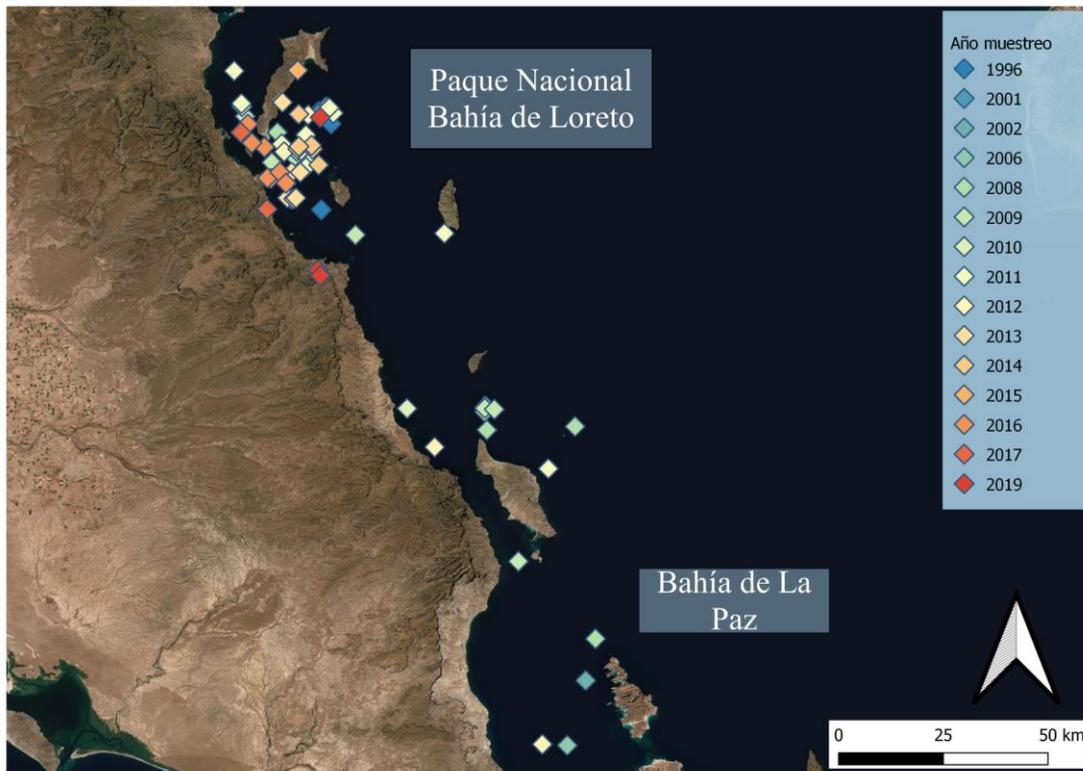


Figura 1. Puntos de muestreos de heces de ballena azul realizados en el Golfo de California.

Las heces observadas en la superficie del mar en el periodo de muestreo de ballenas (enero-marzo) fueron recolectadas en botes de 500 ml, según lo descrito por Flores-Cascante & Gendron (2012), quienes realizaron el seguimiento de individuos foto identificados hasta obtener las muestras. Las muestras han sido conservadas en distintos medios, buscando su aprovechamiento para diferentes tipos de estudios. Se obtuvieron muestras preservadas en formol (5%) desde 1993 y etanol (96%) desde 1996, para la realización de estudios sobre estructuras duras de presas (Del Ángel-Rodríguez, 1997), escatología molecular (Jiménez-Pinedo, 2010) y la cuantificación de cargas de huevos de helmintos (Flores-Cascante *et al.*, 2019). A partir del 2009, se inició el análisis de hormonas y cuantificación de elementos traza, para esto una porción de las muestras fue deshidratada a temperatura ambiente colocándolas en cajas Petri, a bordo de la embarcación, el

cual esta descrito por Valenzuela-Molina *et al.* (2018). Finalmente, a partir del año 2014 se incluyeron submuestras que se conservaron por congelamiento, para probar la identificación de individuos mediante microsatélites (Lili-Carrillo, 2016), así como explorar la variabilidad de la concentración de isótopos estables de C y N con respecto a otros métodos de preservación.

Efecto del método de conservación de las heces

Para esta primera etapa del análisis se determinó la concentración de elementos mayores en 16 submuestras de ballena azul, recolectadas en los años 2009, 2010, 2011 y 2019. Cada una con submuestras conservadas en etanol, formol y deshidratadas. Aproximadamente 2.5 gramos de cada submuestra se sometieron a un proceso de secado homogéneo en un horno VWR Scientific 1350 G, a 60°C por 48 horas. Una vez secas, las submuestras fueron pulverizadas en tubos Falcón y se pesaron 2 gramos de cada muestra en una balanza analítica ADAM PW254 (precisión = 0.0001 g).

En el Laboratorio Estatal de Salud Pública de Sinaloa las submuestras fueron sometidas a un procedimiento de digestión ácida mediante una mezcla digestiva de 2 ml de HNO₃, 0.6 ml de HCl y 10 ml de H₂O₂ al 30% en un microondas digestor. Adicionalmente, al grupo de las submuestras se agregaron blancos, dos muestras por duplicado fortificadas con estándares de referencia de la marca Perkin Elmer (GFAAS Mixed Standard), así como un material de referencia certificado (TORT-3) del Consejo Nacional de Investigación de Canadá como controles de posible contaminación y conocer los porcentajes de recuperación.

Una vez que se agregó la mezcla digestiva a cada uno de los tubos, se procedió a armar el rotor del horno y a programar el microondas con los parámetros necesarios para realizar la digestión (18 tubos, con un contenido de 13 ml). Los tubos se mantuvieron en el microondas por hora y media a una temperatura entre 190 y 200°C. Al terminar este proceso, los vasos de digestión se dejaron enfriar y se procedió a realizar un filtrado de las muestras utilizando filtros Whatman número 4 de 110 µm. Finalmente las muestras fueron aforadas con agua desionizada a 15 ml en matraces volumétricos y colectadas en tubos Falcón de 30

ml. Las submuestras y controles se observaron claras y transparentes. Las lecturas de concentración de metales en las muestras digeridas se realizaron por medio de Espectrometría de Emisión Óptica de Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES) en el Laboratorio Nacional de Biotecnología Agrícola, Médica y Ambiental del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica A.C (LAMBAMA-IPCYT). Los porcentajes de recuperación para todos los metales estuvieron entre 89-106%, obtenidos a partir de la fórmula:

$$\text{Porcentaje de recuperación} = \frac{(BFL - BLR) * 100}{S}$$

En donde:

BLF = blanco de laboratorio fortificado

BLR = blanco de laboratorio reactivo (en este caso su valor es 0)

S = concentración equivalente del analito añadido para fortificar el BLR

Generación de serie de tiempo

Después de verificar si existía un efecto del método de preservación (ver análisis estadístico), estableciendo que las muestras en etanol al 95% permiten cumplir con el objetivo del presente estudio y generar una serie de tiempo extensa, representando el periodo de estudio de 24 años. Sin embargo, debido a que en algunos años no se obtuvo ninguna muestra (1997-2000, 2003-2005 y 2007), la serie de tiempo no fue continua, por lo que se estimaron los valores de Al y Ti (ver Estimación de datos faltantes Modelo lineal-RMA). Se procedió a pesar 1.5 g de al menos cuatro muestras por año de distintos individuos, obteniendo un total de 47 submuestras (Anexo 1). Las submuestras sustraídas fueron sometidas a un proceso de secado homogéneo a temperatura ambiente, con una cubierta de plástico para evitar cualquier tipo de contaminación externa.

Posteriormente, las muestras fueron procesadas en el Laboratorio Fauna Silvestre y enfermedades emergentes -CIIDIR, Guasave. Se realizó la digestión ácida con una solución de 4 ml HNO₃, 2 ml HCl y 2 ml H₂O₂ en tubos de microondas digestor junto con los controles descritos previamente, una vez ingresada la mezcla

digestiva, los tubos se pusieron en placas de calentamiento por 75 minutos a 90°C. Una vez que se terminó el proceso de digestión, las muestras fueron aforadas en matraces de 25 ml, posteriormente fueron guardadas en tubos Falcón para su análisis mediante la técnica de Espectrometría de Emisión Óptica con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES) en el laboratorio LANBAMA-IPICYT. Una vez obtenidos los resultados de los análisis de estas muestras, se procedió a construir una serie de tiempo más robusta combinando estos datos con otros 50 ya existentes (Anexo 2) en el Laboratorio de Ecología de Cetáceos de CICIMAR-IPN, obtenida a partir de muestras analizadas con el mismo método de ICP-OES.

Análisis estadísticos

Método de conservación

En el primer conjunto de muestras para el análisis de elementos mayores, se confirmó la presencia de Aluminio (Al) y Titanio (Ti) y el aporte de estos hacia el Golfo de California. Con base a esto y debido al número de muestras analizadas, se procedió a realizar una prueba estadística no paramétrica Kruskal-Wallis para evaluar si existían diferencias significativas en las concentraciones de Al y Ti, dependiendo el método de conservación.

Variabilidad en el tiempo

Se realizó una prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov con los datos obtenidos de 105 muestras. Al no presentar normalidad, se realizó una prueba no paramétrica de correlación de Spearman para determinar si el Al y Ti mostraron el mismo comportamiento a lo largo de toda la serie de tiempo.

Posteriormente se empleó una prueba no paramétrica de Mann-Whitney para comparar las medias de dos grupos de datos que mostraron un comportamiento diferente a lo largo del tiempo, uno de 1996 hasta el 2008 (Al: $\bar{x}=69.45$, $SD \pm 20.44$, Ti: $\bar{x}= 2.98$, $SD \pm 1.00$) y otro de 2009 al 2020 (Al: $\bar{x}=209.73$, $SD \pm 122.284$, Ti: $\bar{x}=5.44$, $SD \pm 3.49$).

Relación entre el Ti y AI con la variabilidad climática.

Se descargaron datos de indicadores de variabilidad climática (Tabla 1) de sitios de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA, por sus siglas en inglés). Del sitio del Laboratorio de Ciencias Físicas (<https://psl.noaa.gov/data/climateindices/list/>) se obtuvieron los siguientes índices de variación climática a escala interanual del Pacífico Ecuatorial: Índice Multivariado del ENSO (MEI, por sus siglas en inglés), MEI versión 2 (MEI. v2); así como datos del modo de variación climática para el Pacífico Norte a escala multidecadal, el índice del PDO y el índice de Oscilación del Atlántico Norte (NAO, por sus siglas en inglés, NOAA PSL,2020). También se descargaron los datos el índice de Vientos alisios (850 mb) y índice Oceánico de El Niño (ONI, por sus siglas en inglés) de la página del Servicio Nacional Climático (NOAA National Weather Service, 2020, https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php) y valores del índice de índice de Oscilación del Giro del Pacífico Norte (NPGO, por sus siglas en inglés), que representa el segundo modo de variación climática del Pacífico Norte (Di Lorenzo *et al.*,2008, <http://www.o3d.org/npgo/>).

También se descargaron datos de los componentes U y V de la velocidad del viento (datos diarios de 1996 a 2020), con resolución espacial de 0.3° aproximadamente (32 km), en una malla de 349 × 277 celdas y 29 niveles de presión atmosférica. Estos se obtuvieron del sitio del Reanálisis Regional de América del Norte producido por los Centros Nacionales de Predicción Ambiental (NCEP, por sus siglas en inglés, <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.narr.html>). Los datos de viento fueron procesados con Matlab, (2020) para la generación de campos vectoriales correspondientes a la zona de estudio (rectángulo rojo Fig. 2; 112°-109°W, 23°-27°N).

Adicionalmente, a partir de estos datos se obtuvo la rapidez y dirección del viento diarios. Para cada variable se promediaron los datos mensuales de diciembre-marzo de cada año, obteniendo un dato por año, representativo de esta temporada. En adelante referidos como promedios t_{d-m} .

Tabla 1. Información de los índices utilizados incluyendo nombre, variables analizadas para conformar cada índice y la región a donde se aplica cada uno.

Índices		
Nombre	Variable	Región
MEI	6 variables del ENSO (SLP, SST, componentes U y V del viento, temperatura del aire superficial y fracción de nubosidad total del cielo)	Pacífico Ecuatorial (30° S -30° N 100° E- 70° W)
MEI v2	5 variables del ENSO (SLP, SST, componentes U y V del viento y radiación de onda larga saliente)	Pacífico Ecuatorial (30° S -30° N 100° E- 70° W)
ONI	Media móvil de tres meses de anomalías de la temperatura superficial del mar	Pacífico Ecuatorial (5° N -5° S, 120°- 170° W)
Índice vientos alisios	Fuerza de vientos alisios del este (850 mb) a una altitud de 1.5 km sobre el nivel del mar	Pacífico Ecuatorial (5° N -5° S 135° W-120° W)
Oscilación Decadal del Pacífico (PDO)	Temperatura superficial del mar	Pacífico Norte (A partir de 20° N)
Oscilación del Giro del Pacífico Norte (NPGO)	Anomalías: Temperatura superficial del mar Altura de la superficie del mar	Pacífico Norte (25° N – 62° N 180° W- 110° W)
Oscilación del Atlántico Norte (NAO)	Anomalías de altura media mensual de 1000 mb.	Hemisferio Norte (A partir de 20° N)

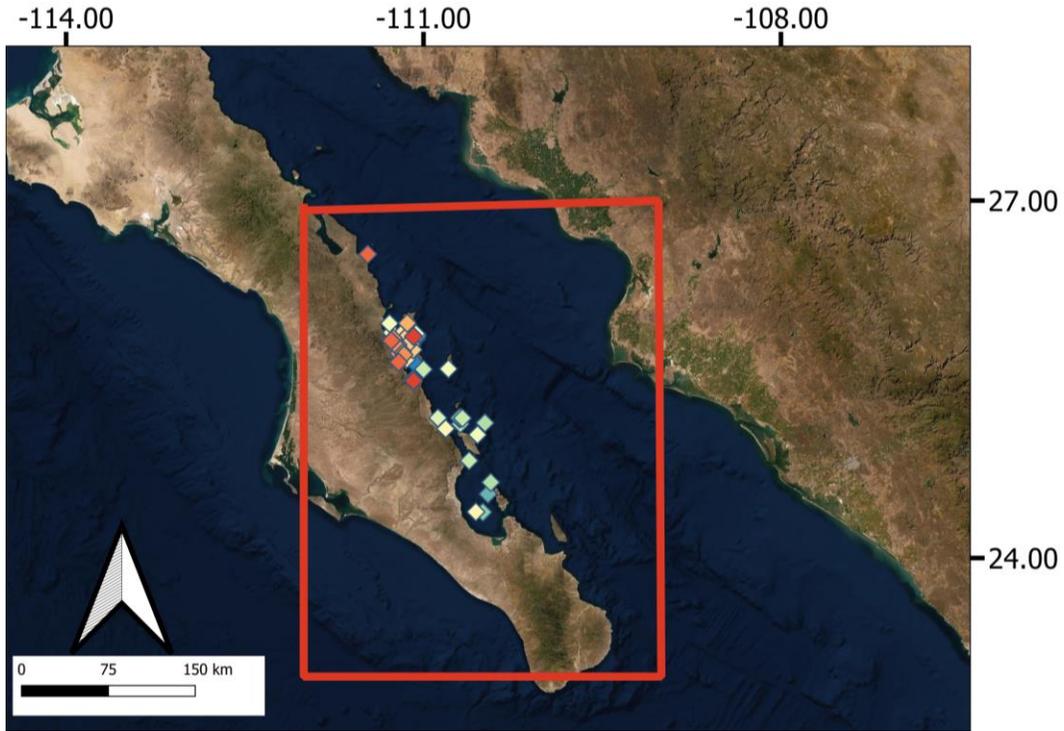


Figura 2. Mapa que representa el cuadrante seleccionado para la generación de campos vectoriales en el GC.

Con los promedios t_{d-m} de los cuatro parámetros del viento: componente U, componente V, rapidez y dirección e índices climáticos, se realizaron sumas acumuladas (CUSUM), para observar de manera rápida y eficaz los cambios que presentan series de tiempo complejas a lo largo del tiempo, mediante la suma acumulada de desviaciones estandarizadas, calculadas como una suma acumulada de datos normalizados por la media y desviación estándar del conjunto de datos, representado por las fórmulas (Regier *et al.*, 2019):

$$Z_i = (x_i - \bar{x})/s$$

$$Z_{i,s} = Z_i + Z_{i-1,s}$$

En donde:

Z_i = valor normalizado por la media y desviación estándar de x_1 hasta el valor i^{th} en la serie de tiempo.

$Z_{i,s}$ = suma acumulada de datos normalizados.

Posteriormente, se trabajó con los datos de los 7 índices climáticos, a los cuales se les hizo un pretratamiento por medio de un promedio móvil de tres puntos, para poder visualizar mejor la tendencia de los datos en la temporada de muestreo (diciembre-marzo).

Para analizar la relación entre las concentraciones de AI y Ti con la variabilidad climática, se realizaron pruebas de normalidad Kolmogorov-Smirnov con los datos de las concentraciones de AI y Ti en las heces de ballena azul, así como de los indicadores e índices elegidos. Debido a que no se presentó normalidad, se procedió a realizar pruebas de correlación de Spearman para determinar si existía una correlación lineal entre todas las series de tiempo climáticas y las concentraciones de AI y Ti.

Estimación de datos faltantes: Modelo lineal-RMA

Basado en una correlación lineal entre las concentraciones de AI y el índice de vientos alisios, se aplicó el modelo lineal en modalidad Eje Máximo Reducido (RMA, por sus siglas en inglés), para realizar una estimación de las concentraciones de AI y Ti, en los años faltantes. El fundamento de este modelo es estimar las líneas de regresión minimizando simultáneamente los errores del eje X y el eje Y, asumiendo que los errores en X y Y son independientes ($p=0$) y que $\lambda =$ la varianza del error de X y el error de Y es igual a S_{yy}/S_{xx} . Una vez obtenidos los datos faltantes de las concentraciones de los elementos mencionados, se realizaron nuevamente pruebas de normalidad Kolmogorov-Smirnov. Al no mostrar normalidad en los datos, se realizaron correlaciones de Spearman entre la línea de tiempo con las concentraciones estimadas, los 4 indicadores del viento y los 7 índices climáticos.

Evaluación de la relación causa-efecto entre forzantes climáticos y el Ti y AI

Para comparar dos series de tiempo y detectar si existe una relación causa-efecto entre una de ellas, se aplicó un análisis de correlaciones cruzadas entre todas las series de tiempo climáticas mencionadas anteriormente y aquellas de Ti y AI. El análisis de correlaciones cruzadas difiere de las correlaciones lineales en que, estas últimas, solo miden la asociación de series de tiempo simultáneas. Sin

embargo, en la naturaleza, generalmente los cambios en dos series de observaciones relacionadas no son simultáneos, por lo que esta técnica se usa en la climatología para evaluar la relación entre dos series de tiempo desfasadas en donde una de ellas parece solo estar desplazada en un tiempo diferente. En cada caso, el valor de r que tenga un valor estadísticamente significativo para $p < 0.05$, será determinado mediante la fórmula presentada por Guevara Díaz, (2014):

$$r_{xy}(k) > \frac{1.96}{\sqrt{(N-k)}}$$

En donde:

k = el valor absoluto de lag (retraso o adelanto) dado

N = número total de datos,

$\sqrt{(N-k)}$ = error estándar de $r_{xy}(k)$

1.96 es una constante para el 95% de confianza.

RESULTADOS

Métodos de conservación

En el análisis estadístico para evaluar el efecto del tipo de conservación en las muestras se observa que no existen diferencias significativas en las medias de las concentraciones de Al ($p=0.874$) (Fig.2) ni del Ti ($p= 0.981$) (Fig.3), por lo que se sugiere que el medio de conservación no influye en la concentración de elementos de interés para formar la línea de tiempo necesaria para el análisis de variabilidad climática.

Se determinó que las muestras conservadas en etanol al 96% permiten generar una línea de tiempo más extensa (1996 al 2020), lapso que permitirá realizar un mejor análisis de concentraciones de Al y Ti en las heces de ballena azul y su relación variabilidad climática en el Suroeste del GC.

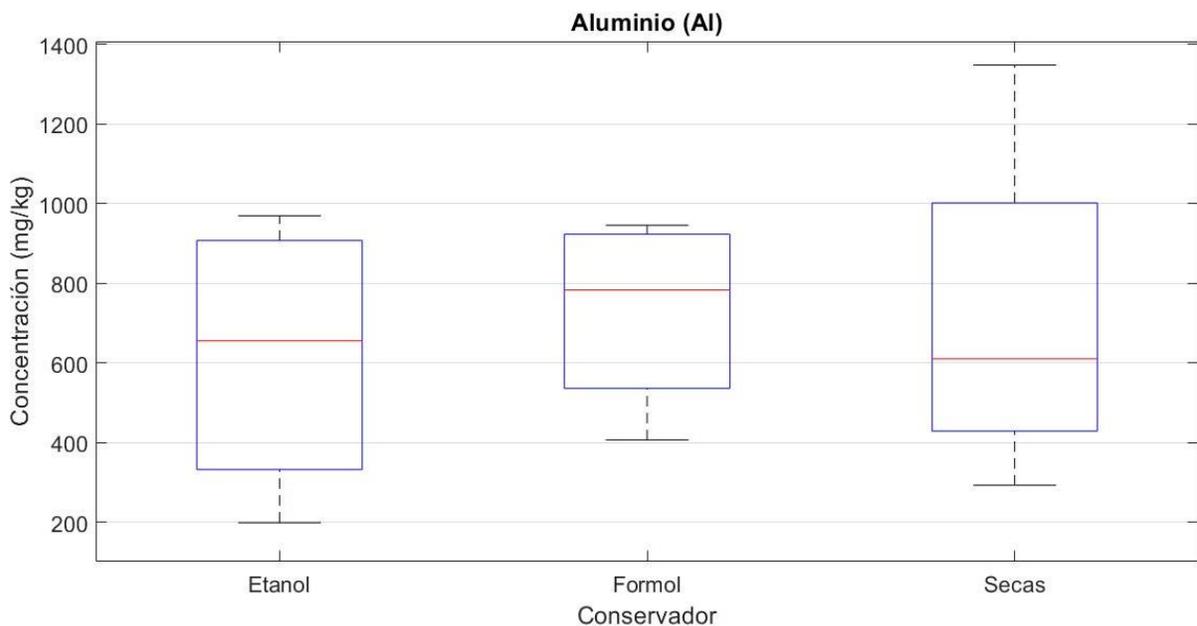


Figura 3. Concentración de Al en heces de ballena azul por método de conservación, sin diferencias significativas ($p=0.874$).

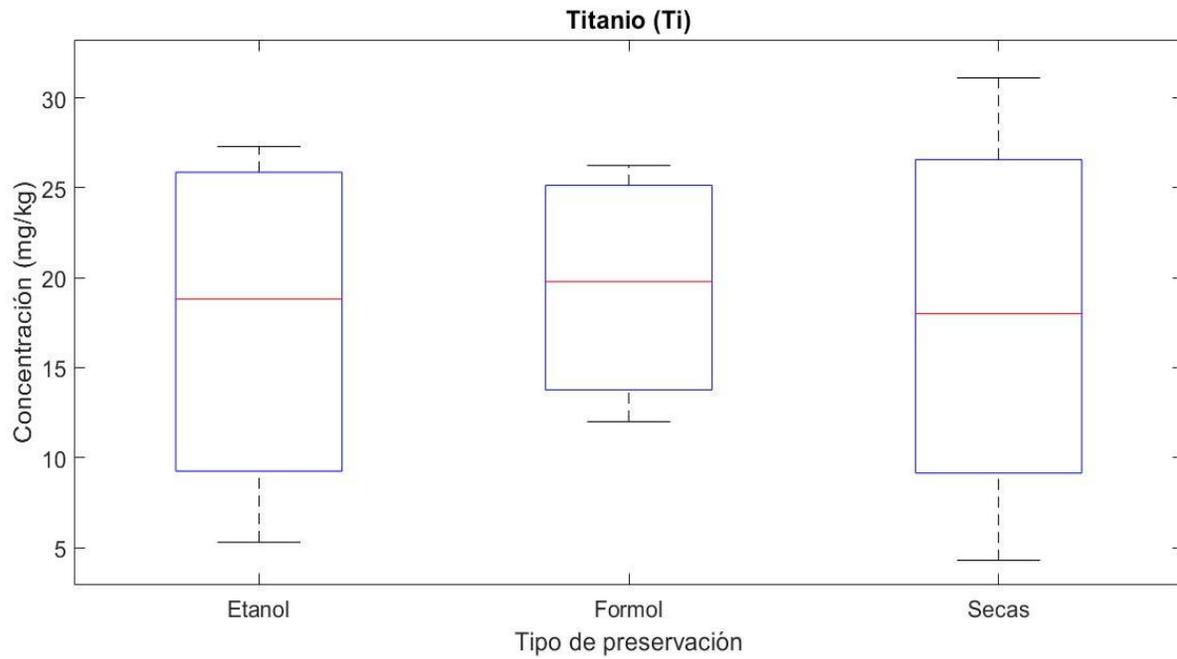


Figura 4. Concentración de Ti en heces de ballena azul por método de conservación, sin diferencias significativas ($p=0.981$).

Variabilidad en el tiempo

Las concentraciones de Al obtenidas de las muestras a lo largo del tiempo varían entre los 42 y 946 mg/kg (Fig. 5a), mientras que las concentraciones de Ti fueron de entre 0.18 a 26 mg/kg (Fig. 5b). Los análisis estadísticos de comparación de medias (Mann-Whitney) de las concentraciones de Al y Ti entre periodos (1996-2008 y 2009-2020) (Fig. 5c, d) muestran diferencias significativas tanto en Al ($p=0.006$), como en Ti ($p= 0.048$), comprobando la variación de las concentraciones de ambos elementos a lo largo del tiempo.

El análisis de correlación entre las concentraciones de ambos elementos arrojó una $p= 2.23e-07$ y una $r=0.91$, demostrando que existe una correlación positiva entre ambos elementos, lo que indica que ambos elementos comparten la misma fuente de origen (Fig. 6).

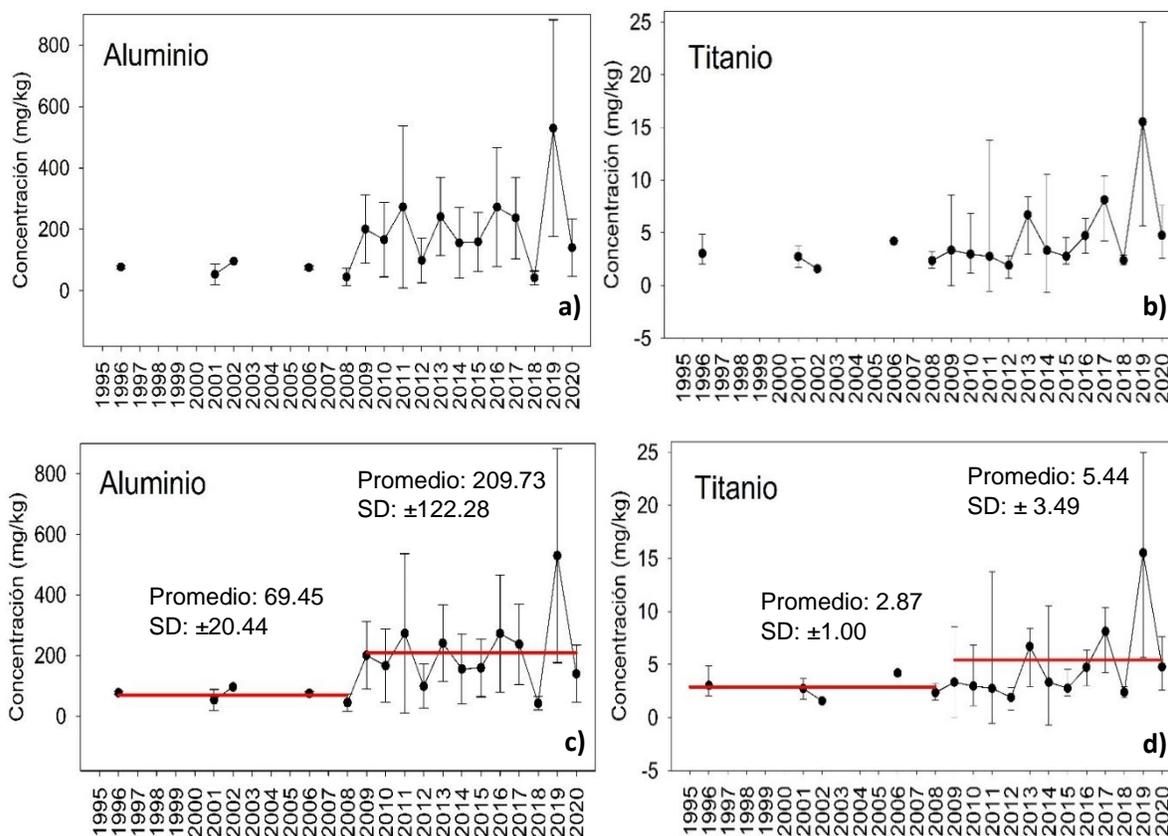


Figura 5. Variabilidad temporal (promedio t_{d-m}] y desviación estándar) de Al (a) y Ti (b) a lo largo de la serie de tiempo (1996-2020). Valor medio (línea roja) de las concentraciones de Al (c) y Ti (d) entre periodo (1996-2008 y 2009-2020).

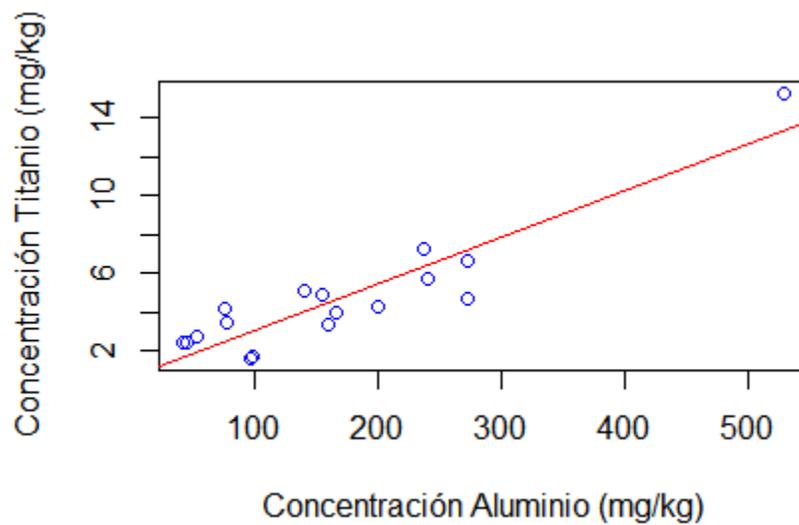


Figura 6. Correlación directa entre las concentraciones de Al y Ti en heces de ballena azul.

Variabilidad climática.

Los análisis de correlación de Spearman entre las concentraciones de Al y Ti de la serie de tiempo interrumpida, con todos los índices e indicadores del viento descargados, muestran una correlación significativa ($p= 0.010$) y negativa ($r= -0.59$) con el índice de vientos alisios y las concentraciones de Al. Esta correlación inversa, indica que cuando exista una disminución en el valor promedio del índice de vientos alisios implicaría un aumento en las concentraciones de Al en el suroeste del Golfo de California (Fig.7) y viceversa.

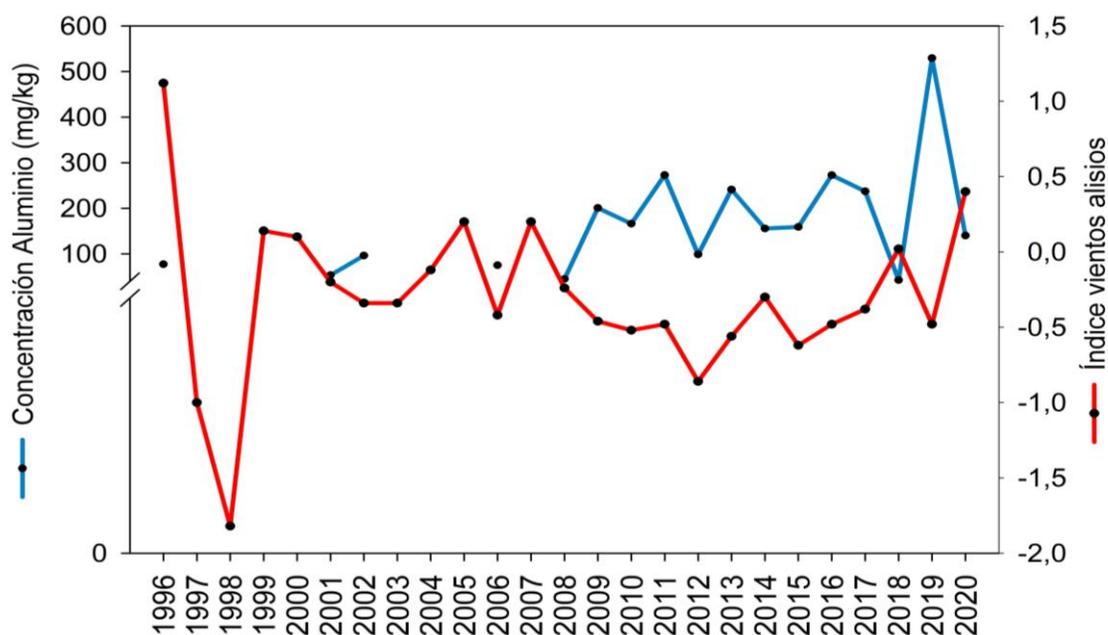


Figura 7. Correlación inversa entre el valor del índice de vientos alisios (850 mb) y la concentración de Al (1996-2020).

Por otro lado, con la serie de tiempo completa después de incluir las concentraciones estimadas de Al y Ti, en base al modelo lineal (EMR) (Fig. 8), se encontraron correlaciones significativas y negativas (Spearman), entre el índice de vientos alisios, las concentraciones de Al ($p= 4.40 E-01$) ($r=-0.74$) (Fig. 9), y las concentraciones de Ti ($p=0.024$) ($r=-0.42$) (Fig. 10), reafirmando la correlación descrita anteriormente.

Concentraciones Aluminio y Titanio

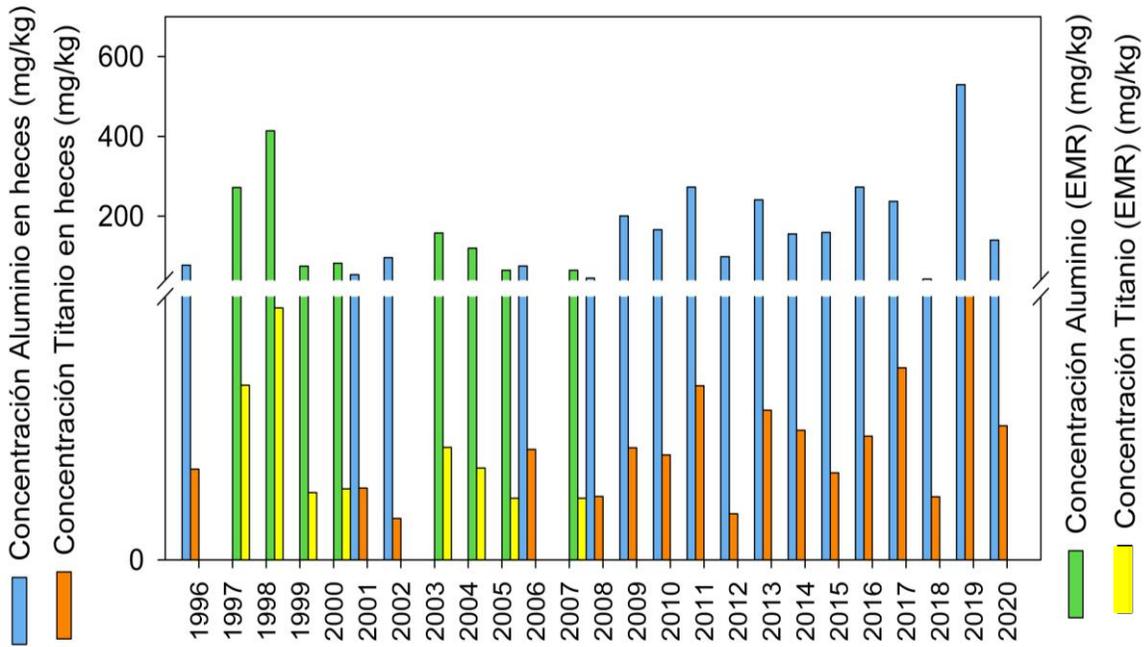


Figura 8. Serie de tiempo completa con concentraciones estimadas de Al y Ti por medio del modelo lineal (EMR) representadas por barras verdes y amarillas.

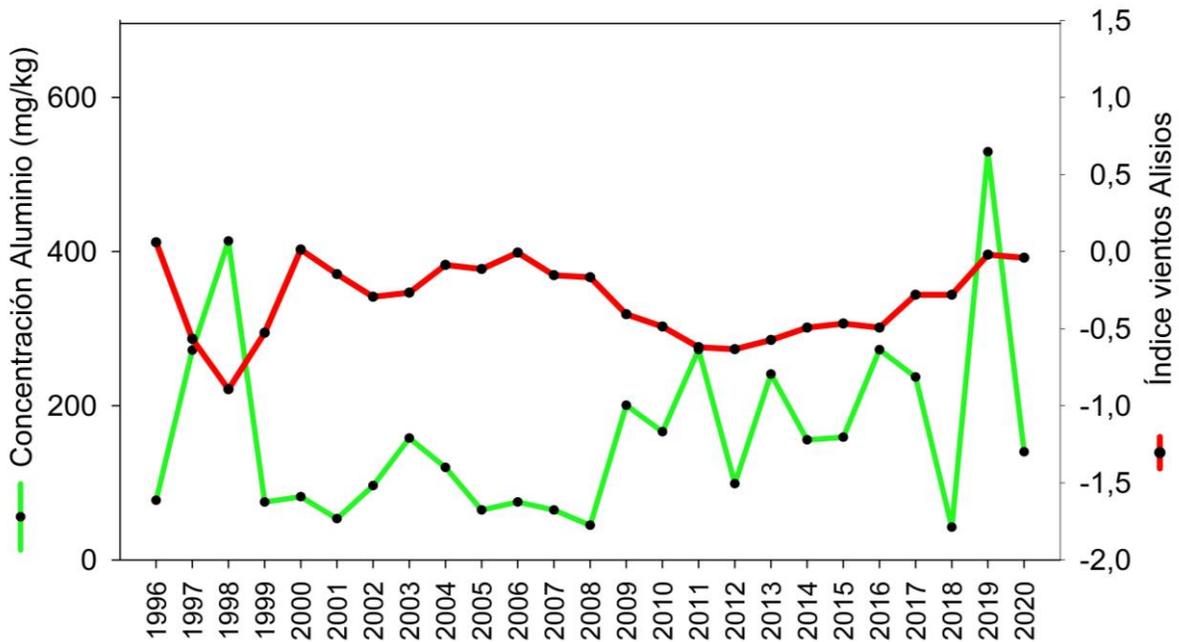


Figura 9. Variación de la concentración de Al y cambios de régimen del índice de vientos alisios (850 mb) a lo largo de la serie de tiempo.

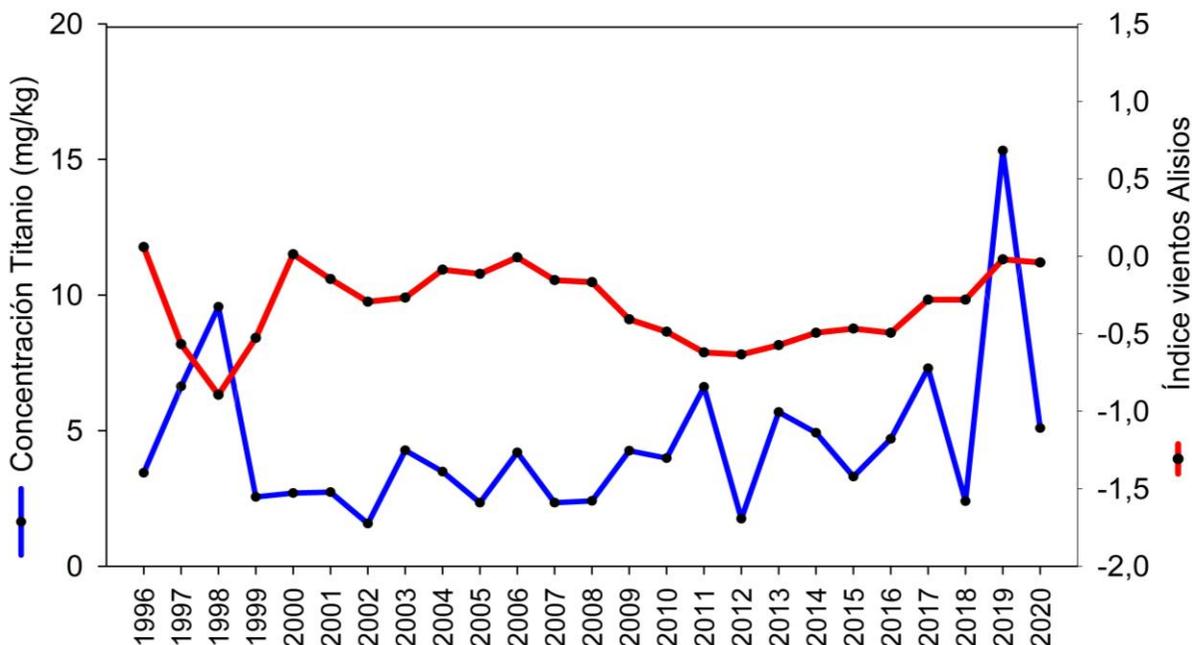


Figura 10. Comportamiento entre las concentraciones de Ti y cambios de régimen del índice de vientos alisios (850 mb) a lo largo de la serie de tiempo.

Las correlaciones de Spearman, entre las concentraciones de Al y Ti (modelo lineal: EMR) y el índice ONI (Fig. 11) fue significativa ($p=0.028$) y positiva ($r=0.43$), indicando que un aumento en los valores promedio del índice conlleva un aumento en las concentraciones de Al y Ti en la superficie del océano.

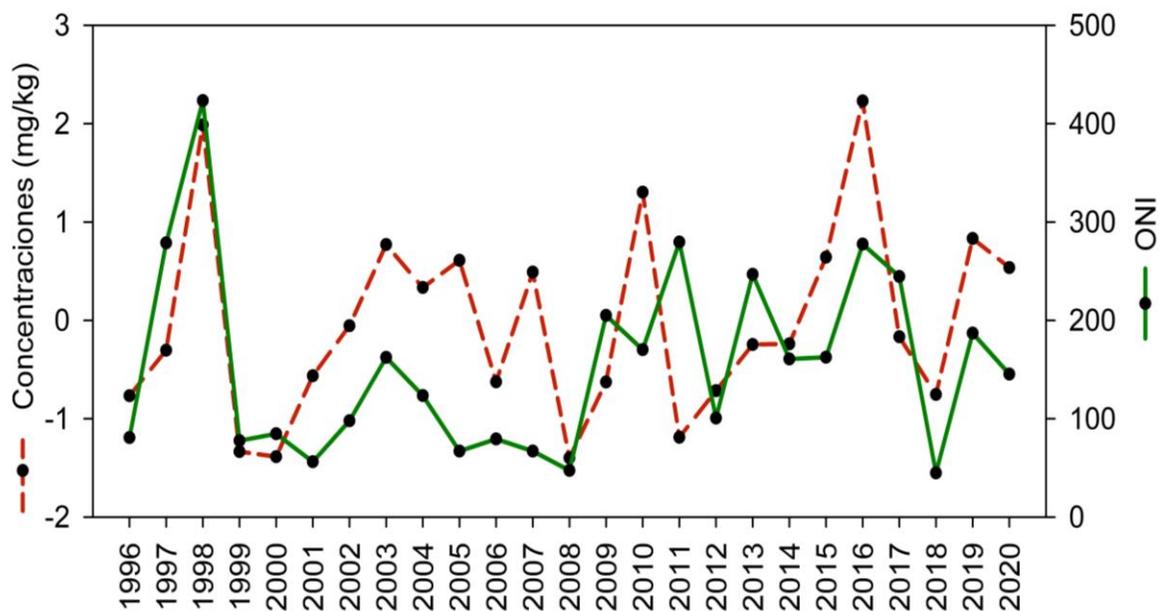


Figura 11. Variación del promedio de las concentraciones de Al y Ti, así como del promedio del índice ONI (1996-2020).

Correlaciones cruzadas

Mediante este análisis estadístico se obtuvo una correlación entre el componente V del viento y las concentraciones de Al y Ti, en donde, los valores de $r < 0.395$, según la fórmula de Guevara Díaz (2014) se consideran significativos ($p < 0.05$). De acuerdo con los valores obtenidos y al correlograma se puede establecer que el cambio en las concentraciones de Al y Ti, se inicia 2 y 3 años después de que se registra un aumento o descenso en el valor promedio del Índice NAO (Fig. 12) y el componente V, respectivamente (Fig. 13).

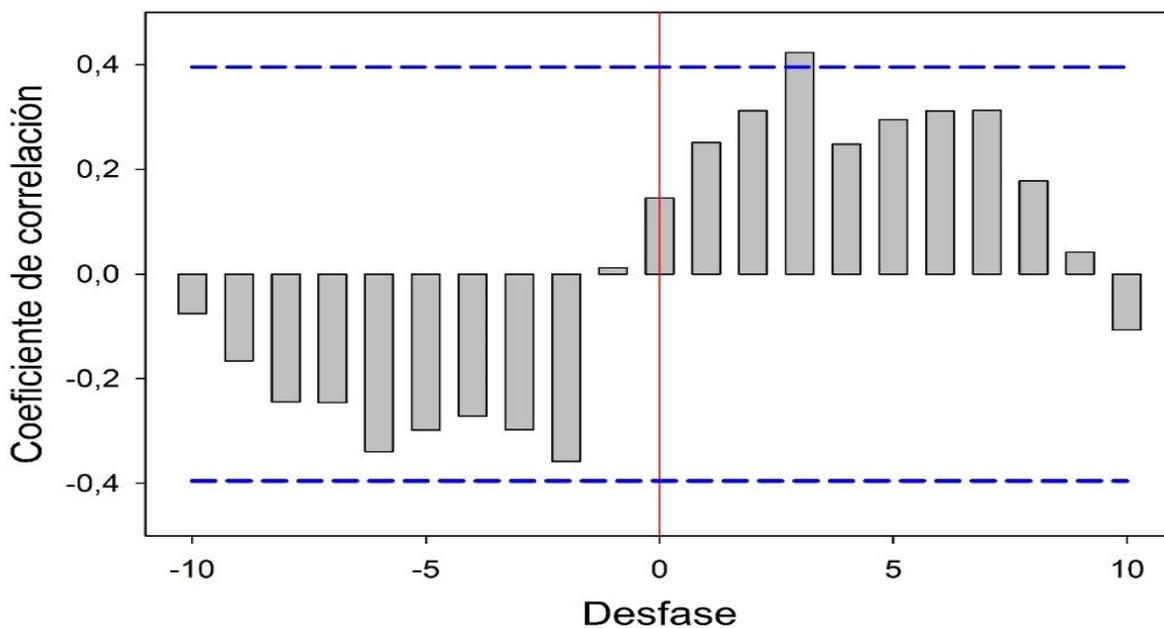


Figura 12. Correlograma entre Índice NAO y concentraciones de Al y Ti, que ilustran una correlación significativa ($r = 0.473$), en un desfase de 2 años.

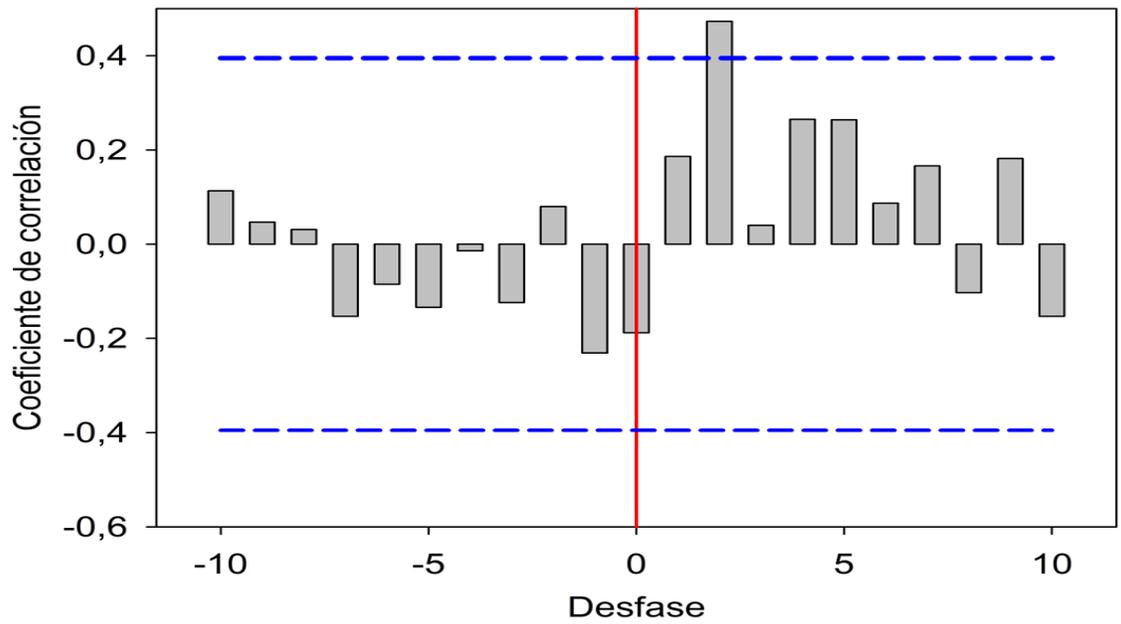


Figura 13. Correlograma de la serie de componente V y concentraciones de Al y Ti, que ilustran una correlación significativa ($r= 0.423$), en un desfase de 3 años.

DISCUSIÓN

Métodos de conservación

Los resultados sobre la comparación de los tres métodos de conservación empleados en el Lab. de Ecología de Cetáceos (CICIMAR-IPN), indicaron que la conservación en formol y etanol no afectan significativamente la lectura de concentraciones de Al y Ti, en las muestras de heces, que han sido conservadas hasta por 25 años.

Actualmente no se tiene registro de algún antecedente en donde se haya realizado el análisis de este tipo de elementos en heces y mucho menos en heces de ballena azul, por lo que no existe forma de comparar los resultados obtenidos en el presente trabajo respecto al efecto de método de conservación en las concentraciones de Al y Ti. Sin embargo, gracias a trabajos realizados por Sarakinos *et al.* (2002) y Barrow *et al.* (2014) se sabe que el método de conservación de cierto tejido puede afectar las concentraciones de los isotopos estables de ^{13}C y ^{15}N , ya que se encontró un decremento de 1.65% en formol comparado con el etanol, dependiendo el periodo de conservación.

Por otro lado, McCormack *et al.* (2020) determinaron que la conservación de tejidos de delfines nariz de botella (*Tursiops truncatus*) en formol, puede afectar la concentración de ciertos elementos traza (As, Cd, Cu, Hg, Ni, Se y Zn), comparado con tejidos congelados, indicando que la variabilidad de concentraciones entre ambos métodos de conservación podía explicarse por: la filtración de elementos traza de los tejidos al conservante o bien por la contaminación en las muestras.

Un enfoque más cercano al desarrollado en este trabajo es el trabajo de Hamanaka (1981), quien analiza el efecto de la conservación de organismos planctónicos en las concentraciones de metales pesados como el Cd y Zn almacenados en formol y congelados. Sus resultados indican que las concentraciones obtenidas en formol tienden a ser mayores que en las muestras congeladas (10-79%), dependiendo de la especie de zooplancton (copépodos o anfípodos). Estos cambios pueden darse por contaminación de las muestras por

factores externos, contaminación de otros organismos en la muestra, contaminación por el preservante o la pérdida por deshidratación.

Knauer *et al.* (1984) analizaron el efecto de conservadores como formol, ácido e iones de mercurio en la composición y concentración química de trampas de sedimentos en dos regiones oceánicas. Encontraron que los conservantes no generan un efecto en las concentraciones de Fe, que permaneció en su fase particulada durante el tiempo de estudio, mientras que el Mn y Cd pasaron a una fase soluble, dependiendo el tipo de conservante en que se almacenaron (formol y ácido). Por otro lado, el Zn permaneció en su fase particulada y se observó un menor efecto por el conservante en periodos cortos de conservación. Finalmente, el Pb permaneció en su fase particulada y el formol fue el mejor conservante. Dados estos resultados, se estableció que, aparentemente, ningún preservante retarda completamente la pérdida de un metal a su fase soluble, por lo que los autores mencionan la importancia de analizar las distintas opciones y variables que pueden afectar en las investigaciones biogeoquímicas.

Los resultados de estos trabajos parecen indicar que la conservación de muestras en formol tiende a aumentar la solubilidad de metales traza, isotopos y metales pesados, cuando se utilizan por largos periodos; contrario a los resultados presentados aquí, esto podría deberse a que la solubilidad del Al aumenta en medios con pH menores a 4.5 o bien en valores de pH muy altos (Lenntech, 2021). Sin embargo, las muestras procesadas mostraron valores de pH entre 5 y 7 (Anexo 1) sin importar el tipo de conservador empleado, lo que podría indicar que el Al permaneció en su estado particulado desde que se depositó en la superficie del océano, durante el tiempo de conservación, hasta su análisis en el laboratorio.

Aunque no se tiene más evidencia que soporte o contradiga lo obtenido en este proyecto, este trabajo podría ser la base para próximos proyectos en donde se pretenda conservar muestras de elementos de origen litogénico para su posterior análisis, los cuales son escasos a pesar de la importancia de utilizar conservadores adecuados para componentes orgánicos e inorgánicos (Knauer *et al.*, 1984) y evitar posibles alteraciones y sesgos en los resultados.

Variabilidad de Al y Ti en el tiempo y su relación con la variabilidad climática

El océano y la atmósfera conforman, dentro del sistema climático del planeta, un subsistema acoplado muy complejo en el cual se dan las principales variaciones climáticas a escala global, como consecuencia de procesos y ciclos naturales (Hurtado-Montoya & Poveda-Jaramillo, 2007). Particularmente, en el Océano Pacífico Norte las fluctuaciones o modos dominantes de variación climática natural a escala interanual (El Niño Canónico y EL Niño Modoki o El Niño del Pacífico Central (Ashok *et al.*, 2007; Capotondi *et al.*, 2015)) y decadal (PDO y NPGO. (Mantua & Hare, 2002; Di Lorenzo *et al.*, 2008)) afectan el clima de Norteamérica, generando transiciones importantes para los ecosistemas marinos a través del Océano Pacífico (Di Lorenzo *et al.*, 2010).

Estos modos de variación climática afectan otras condiciones climáticas y la interacción océano-atmósfera en puntos distantes por medio de las llamadas “teleconexiones” (Kiladis & Diaz, 1989). Es decir, aunque son representativos principalmente de las condiciones del Pacífico Norte y zona ecuatorial, también se han observado sus efectos sobre el suroeste de Norteamérica y el clima de México, los cuales se manifiestan principalmente en la temporada de invierno (Méndez-González *et al.*, 2010; Martínez-López *et al.*, 2019).

Correlación simultánea

Las diferencias significativas que se encontraron en las concentraciones de Al y Ti en dos periodos (1996-2008 y 2009-2020), sugiere una asociación con la variabilidad climática. El periodo cubierto en el presente estudio (1996-2020) esta caracterizado por la ocurrencia simultánea de diversos procesos atmosféricos y oceanográficos que ocurren a diferentes escalas espacio-temporales lo que complica determinar claramente las relaciones entre las concentraciones de Al y Ti y la variabilidad climática. Los cambios de régimen identificados con base en el análisis CUSUM de los índices del PDO y NPGO muestran en ambos casos que 1997-1998 fueron los años donde estos modos de variación cambiaron a una fase dominante negativa y positiva respectivamente (Fig. 14). Posteriormente, de 2013 a 2014 se presentó una tendencia inversa. Además de presentar variaciones de

escala temporal menor, donde resaltan dos de los eventos ENSO (1997-98 y 2015-16) más intensos de las últimas décadas (McPhaden *et al.*, 2020).

La separación de los dos grupos de años con base en las concentraciones de AI y Ti no mostraron una correlación significativa con estos índices climáticos de escala decadal. Sin embargo, para poder dar una explicación coherente de la variabilidad del AI y Ti en escalas de tiempo tanto interanuales como decadales, se plantea la hipótesis de que algunos mecanismos, no solo uno, pueden haber jugado un papel importante, por lo que estos se irán abordando gradualmente a lo largo de la discusión.

Así el índice del NPGO muestra que 2008 fue un año donde se reanudó su fase positiva, después de una interrupción de tres años (2005-2007) de valores negativos, lo que significa una situación predominante de fortalecimiento de los vientos del noroeste (Di Lorenzo *et al.*, 2008; Newman *et al.*, 2016). Los cambios de régimen identificados coinciden con otros autores, ya que el PDO ha mostrado fases cálidas desde 1900 hasta 1945 y de 1977 a 2007, mientras que de 1946 a 1976 y en años recientes se ha registrado una fase fría (Méndez-González *et al.*, 2010), aunque también se ha propuesto que pudiese presentar un cambio de régimen en periodos de 20 años (Newman *et al.*, 2016). En tanto que para el NPGO los resultados coinciden con lo establecido por McClatchie (2009), Durazo (2010) y López-Alcántar (2011) quienes identifican anomalías positivas del NPGO desde 1998 hasta el 2004, una pequeña fase negativa entre 2004 y 2005, para volver a valores positivos en el año 2008.

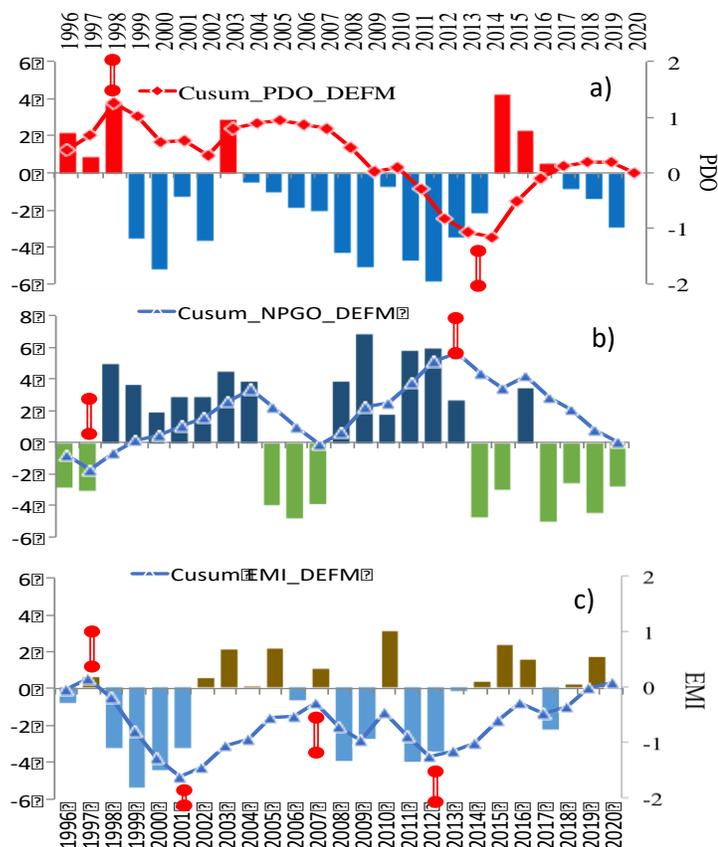


Figura 14. Índices (barras): PDO (a), NPGO (b) y El Niño Modoki (c). Las líneas en cada caso representan los valores obtenidos por medio de la técnica CUSUM (Regier *et al.*, 2019). En donde el símbolo  representa los cambios de régimen de cada modo climático.

Para este estudio, un aspecto de interés es el acoplamiento entre la variabilidad climática y los vientos superficiales en el Pacífico nororiental. La relación significativa que se encontró entre los valores de AI y Ti además de la ausencia de lluvias durante la mayoría de los años analizados, según los datos de una estación cercana al área de estudio en Ligüi, B.C.S. (25.73° N, -111.27°W), en donde el promedio anual de precipitación de 1995 a 2015 fue de 21.87 mm, con un promedio de 3.50 mm en la temporada de diciembre a marzo, tasa de precipitación baja comparada a los valores más altos, registrados en los meses de octubre y septiembre (71.35 y 118.68 mm, respectivamente) (CLICOM,2021; Fig.15) durante la temporada de ciclones tropicales, en donde se registra mayor frecuencia de lluvias intensas (Zuñiga-Magaña,2018). Aunado a la baja tasa de

precipitación, la corta duración de estos eventos y a las características de la zona que implican (como ha sido observado en otras regiones similares), una alta tasa de evaporación, infiltración, tipo de vegetación y la nula presencia de ríos (Pilgrim *et al.*, 1988; Critchley & Siegert 1991, Minnich *et al.*, 2000), las probabilidades de un transporte de partículas minerales de origen terrígeno, vía fluvial o pluvial por medio de escorrentías en invierno, son bajas, lo que sugiere un activo transporte de partículas minerales vía eólica. Por lo que es necesario analizar la variabilidad climática a escala interanual y decadal, ya que, el incremento en la emisión de polvo desde la superficie de zonas áridas hacia la atmósfera se ha podido explicar por cambios en las condiciones atmosféricas y el viento asociado a ellas (Mahowald *et al.*, 2003). En el Océano Pacífico norte los modos de variación climática dominantes representan procesos acoplados océano-atmósfera de gran escala, donde están implicadas variaciones en los centros de presión a nivel del mar, así como en los vientos dominantes durante el desarrollo o cambio de fases (Merrifield, 2011; Newman *et al.*, 2016; Litzow *et al.*, 2020; NOAA, 2020). Por ello no debe descartarse su influencia indirecta a través de las ya mencionadas teleconexiones.

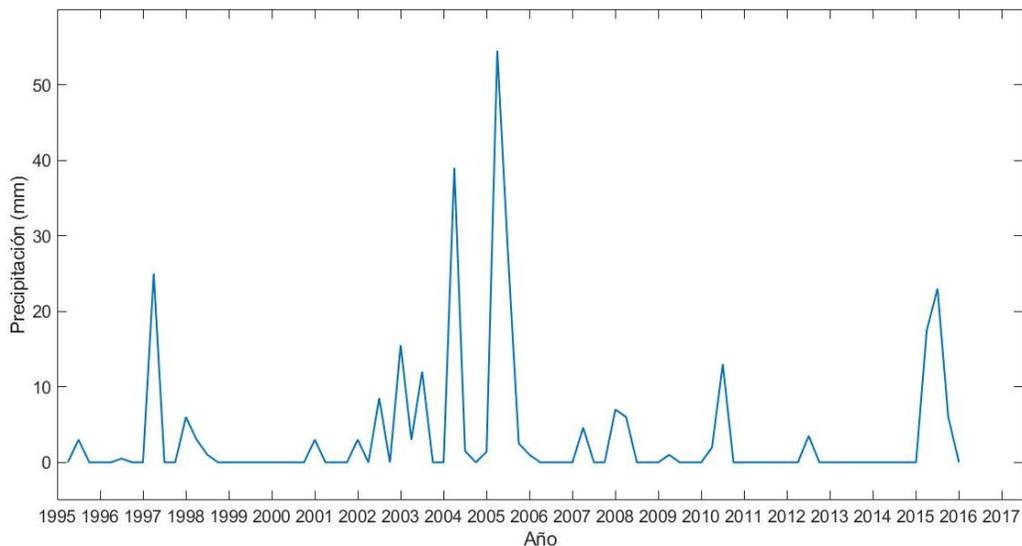


Figura 15. Registro del valor promedio mensual (Dic-Mar) de las precipitaciones en la zona de Ligüi, B.C.S (25.73° N, -111.27°W) de 1996-2016.

El retraso de 3 años entre las concentraciones de AI y Ti y el componente V del viento, podría coincidir con los cambios en las ondas Rossby atmosféricas, las cuales están ligadas a los cambios de temperatura superficial del mar (TSM) en el Pacífico influenciado tanto por el modo de variación del PDO como por el NPGO y otras variaciones a distintas escalas temporales, ya que el PDO solo explica una parte de la variabilidad en el Pacífico Norte (Di Lorenzo *et al.*, 2008).

Según estudios realizados en la zona del Pacífico Ecuatorial, la fase positiva del PDO que precedió el periodo de estudio (1977-2007), acompañada de un forzamiento del centro de baja presión de las Aleutianas, genera anomalías de SLP bajas en el Pacífico Norte, por lo que inducen vientos intensificados en sentido antihorario; mientras que anomalías altas de SLP sobre el Pacífico Subtropical Norte genera vientos intensificados en el sentido de las agujas del reloj (Mantua & Hare, 2002), esta variabilidad conecta el forzamiento de la TSM del Pacífico tropical (Johnson *et al.*, 2020) y una propagación de las ondas Rossby oceánicas hacia el oeste, impulsando variaciones de escala decenal sobre el Pacífico Norte occidental con un retraso de 3-4 años (Di Lorenzo *et al.*, 2010).

Debido a la posición geográfica del área de estudio en la franja subtropical, en ella confluyen señales climáticas de latitudes tropicales, extra tropicales e incluso provenientes de otras cuencas oceánicas (Badan-Dangon *et al.*, 1991; Bernal *et al.*, 2001, Lluch-Cota *et al.*, 2010). En el presente estudio se evidenció una relación inversa significativa entre las concentraciones de AI y Ti con el índice de vientos alisios y una relación directa significativa con el índice ONI. Si bien ambos índices se encuentran relacionados debido a que los vientos alisios, los cambios de la SLP y la estructura termal, modulan el ciclo del ENSO (Anderson *et al.*, 2013; Bordbar *et al.*, 2019; Li *et al.*, 2019). Esto no explica la relación inversa entre el índice de vientos alisios y las concentraciones de AI y Ti.

Sobre los eventos de mayor escala, Li *et al.* (2019) señalan que una intensificación de los vientos alisios inició en 1990. Sin embargo, este fortalecimiento no es uniforme en todo el Ecuador, ya que existen dos patrones muy claros: un fortalecimiento de los vientos alisios en la zona del Pacífico ecuatorial occidental

(5°S–5°N, 120°E–170°W) y un debilitamiento en el Pacífico ecuatorial oriental (5°S–5°N, 150–80°W). Esto coincide con lo establecido por England *et al.* (2014) quienes mencionan un calentamiento en la TSM de la franja ecuatorial, en la piscina cálida del Pacífico occidental, un enfriamiento en el Pacífico central y oriental tropical y anomalías positivas en el resto del Pacífico. Este patrón caracteriza en su fase positiva el modo climático denominado “lengua de agua fría” que también muestra una relación de dos fases de TSM en el Pacífico y que podría modificar la respuesta de las ondas Rossby y Kelvin. Aunque existen otros factores que podrían estar relacionados con este fenómeno, tales como El Niño canónico o su variación conocida como El Niño Modoki, caracterizado por anomalías de la TSM en el Pacífico ecuatorial central, fenómeno que cada vez es más frecuente y se cree genera la intensificación de vientos alisios (Furtado *et al.*, 2012; Bordbar *et al.*, 2019; Li *et al.*, 2019). Por lo tanto, se puede esperar que no sea solo el cambio en los vientos alisios lo que influye en el depósito de Al y Ti hacia el GC, si no que este se ve influenciado por los cambios que generan los demás fenómenos climáticos que interactúan en el complejo océano-atmósfera, aunque en menor medida.

Ejemplo de ello, es que la intensificación de los vientos alisios en el oeste del Pacífico inducido por la fase positiva del modo “lengua de agua fría” reduce los vientos de la zona este del Pacífico (Jian & Zu, 2018) que coincide con el cambio del clima global a una fase fría a escala decadal. Además de esto, durante este periodo de intensificación que comenzó en 1990, se registró un cambio en la circulación global de modo zonal a meridional, cambio evidenciado por medio de diversos índices climáticos, y que se piensa está asociado a un cambio de fase de los hemisferios Norte y Sur (Oviatt *et al.*, 2015). Fenómeno que se caracteriza por vientos hacia el ecuador sobre los continentes y vientos hacia los polos sobre los océanos subártico y subantártico, lo que resulta en formaciones de ondas Rossby oceánicas. Durante esta fase fría, los vientos del oeste se debilitan y los vientos norte-sur y los vientos alisios se fortalecen, además de que la circulación de los giros subtropicales se intensifica, evidencia de ello es que la fase positiva del NPGO prevalece desde 1993 (Oviatt *et al.*, 2015). Paralelamente, ocurre un

cambio a fase positiva en la Oscilación del Pacífico Norte (NPO, por sus siglas en inglés), patrón de forzamiento atmosférico del NPGO, y por lo tanto parte del Modo Meridional del Pacífico Norte (NPMM, por sus siglas en inglés), ya que este está asociado a la variación de la fuerza de los vientos zonales del oeste sobre el Pacífico y Norteamérica, así como con la termoclina ecuatorial por la excitación de ondas Rossby oceánicas (Capotondi *et al.*, 2019), conectando la variabilidad tropical y extratropical (Fig.16).

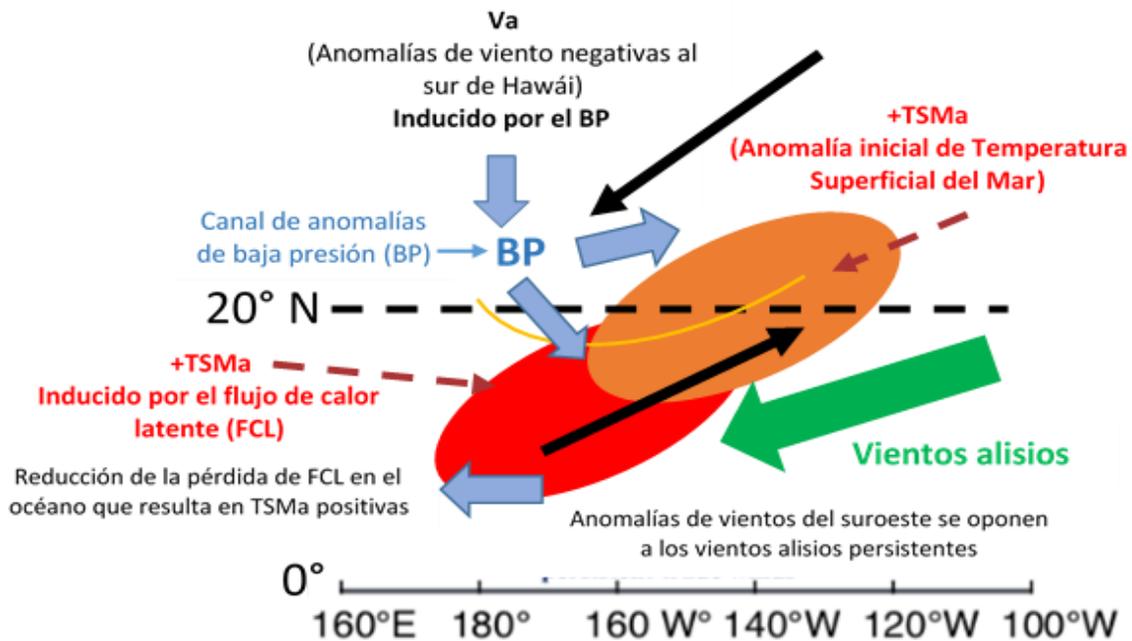


Figura 16. Representación de la variabilidad aleatoria del NPO y los cambios inducidos alrededor de los 20°N. Incluye los cambios en el acoplamiento atmósfera-océano durante los meses invierno (parche naranja) y primavera verano (parche rojo). Modificado de Liguori (2018).

El NPO tiene dos centros de acción con dinámicas diferentes, uno en el Golfo de Alaska y otro en la región noreste de Hawái, en donde este último, muestra la mayor correlación entre la variabilidad de SLP y la TSM, por lo que es importante independizarlos (Furtado *et al.*, 2012). Actualmente, se ha registrado una relación entre el monzón de invierno de Asia oriental (EAWM, por sus siglas en inglés) y el NPO, en donde se plantea que, el aire frío, que fluye hacia el ecuador, generado por el EAWM en noviembre, genera anomalías de calor en la atmósfera sobre la región del frente oceánico de la corriente tropical cálida de Kuroshio. Estas

anomalías generan, en la troposfera media-alta, ondas Rossby atmosféricas, que llevan a la intensificación del centro de acción de Hawái durante los meses de invierno (diciembre, enero y febrero) (Tseng *et al.*, 2020). Esto genera anomalías positivas de TSM en el sur de Hawái (Fig. 16), aunado a anomalías positivas en los vientos del oeste-suroeste en un canal de anomalías de baja presión frente a Baja California. Estos vientos son opuestos a los vientos alisios, lo que se traduce en la pérdida de flujo de calor latente al sur de los 20°N desencadenando tanto las anomalías positivas de la TSM en primavera-verano siguientes como un debilitamiento en los vientos alisios (Liguori, 2018) (Fig. 16). Esta variabilidad climática podría explicar los cambios en las concentraciones de Al y Ti, debido a que con el cambio impuesto por el NPO en los meses de invierno y a la oposición a los vientos alisios, se genera un cambio en la rapidez y dirección del viento que llega al GC. Como evidencia de ello, se muestran los cambios de régimen registrados por medio de CUSUM, en el índice de vientos alisios y los componentes del viento (Fig. 17).

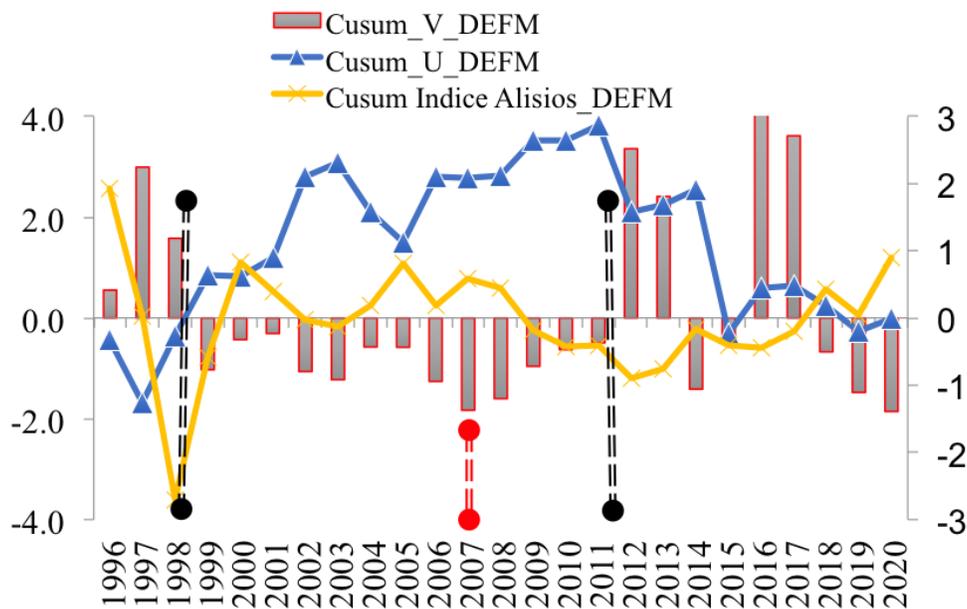


Figura 17. Representación de los CUSUM de los componentes del viento y el índice de vientos alisios (dic-mar). Las marcas verticales representan los cambios de régimen en los componentes U del viento e índice de vientos alisios (negro) y en la componente V del viento (rojo).

Estos coinciden con los cambios de régimen registrados para el índice del NPGO, por lo que después de que hay un cambio a régimen positivo en este modo, los vientos del noroeste que llegan al GC se intensifican y al coincidir con la oposición entre el polo sur del NPO y los vientos alisios y los cambios que esto conlleva, la dirección y rapidez de los vientos del noroeste podrían verse afectados, por lo que aunque el índice de vientos muestre valores mayores a su promedio, las concentraciones de Al y Ti que llegan a la superficie del GC disminuyen y viceversa.

En cuanto a la relación de las concentraciones de Al y Ti con el índice ONI, considerado el indicador primario para monitorear el fenómeno de El Niño y La Niña y está basado en TSM de la llamada Región el Niño 3.4 del Pacífico Tropical (NOAA, 2021). Para la formación y el mantenimiento del ENSO, las interacciones y dinámicas del Pacífico tropical y Norte, son importantes. Este patrón climático interanual está caracterizado por el debilitamiento de los vientos alisios y el calentamiento pronunciado del Pacífico oriental, generando anomalías positivas de presión en el Pacífico tropical occidental. Se sabe que las condiciones invernales del NPO influyen en la ocurrencia de este fenómeno, sin embargo, se ha determinado que estas condiciones tienen mayor relación con el segundo modo de variación de El Niño, conocida como El Niño Modoki, que se caracteriza por un calentamiento del Pacífico Central ecuatorial y un desplazamiento del centro de mayor convección hacia el oeste respecto a El Niño canónico (Di Lorenzo *et al.*, 2010). Este tipo de El Niño se presenta en dos escalas temporales: uno en periodos bianuales y otro cada 5 o 13 años, por lo que se piensa que juega un rol único en la variabilidad climática decadal del Pacífico, coincidiendo con la intensificación de los vientos alisios ecuatoriales en las últimas décadas y se plantea la hipótesis de que ambos fenómenos están relacionados.

A su vez, el Niño Modoki también presenta un tipo de teleconexión con el NPGO y con el NPO. El hemisferio sur del NPO, muestra la mayor correlación entre la variabilidad de SLP y el Niño Modoki (Furtado *et al.*, 2012). Por lo que su efecto en la TSM del Pacífico tropical central es fuerte, sugiriendo una fuerte conexión entre

los centros de El Niño Modoki, NPO y NPGO. Además de ello, Chen *et al.* (2018) han determinado que, durante los meses de invierno de los últimos años, debido al calentamiento global, se ha dado una fuerte relación entre el Niño Modoki y la intensificación de la teleconexión Pacífico-Norteamericana, que coincide espacialmente con el NPO, esta intensificación, podría manifestarse, a largo plazo, como cambios climáticos en Norteamérica. Debido a esto, todas estas teleconexiones se vuelven fuertes e importantes para los cambios oceánicos y atmosféricos del Pacífico, así como para los sistemas biológicos, por lo que este descubrimiento modifica la comprensión que se tenía de como el clima tropical del Pacífico se acopla con las latitudes extratropicales (Di Lorenzo *et al.*, 2010).

Con base en las características de estos eventos climatológicos, se considera que el fenómeno de mayor influencia en el periodo de estudio fue El Niño Modoki. Sin embargo, la relación obtenida con el índice del ONI sigue siendo asertiva, ya que como se ha mencionado, se calcula con la región El Niño 3.4, la cual es más amplia que los otros cuadrantes de monitoreo para estos eventos en el océano Pacífico ecuatorial (NOAA,2021). Además, ambos patrones de El Niño están relacionados con la variabilidad atmosférica.

Correlación con Oscilación del Atlántico Norte (NAO)

La correlación significativa con un desfase de dos años encontrada entre las concentraciones del Al y Ti con el índice de la Oscilación del Atlántico Norte (NAO), indica que el modo de variación climática no afecta de manera simultánea y directa el área de estudio. Investigaciones recientes han establecido teleconexiones, a escala decadal, entre el PDO, el ENSO y el océano Atlántico. De modo que, la variabilidad del Atlántico puede afectar la variabilidad climática del Pacífico Tropical a través del NAO que es el patrón atmosférico predominante en la zona y se ha registrado que su impacto climático es más prominente principalmente en NA y Europa, así como en otras regiones como Asia (Wu *et al.*, 2019). Se manifiesta como una fluctuación temporal de la fuerza de los vientos zonales a través del océano Atlántico, debido a cambios de presión en el cinturón anticiclónico subtropical y en el centro de baja presión subpolar. Esto ocasiona

una gran diferencia de presión asociada con la circulación de vientos entre las islas Azores e Islandia, durante la temporada de otoño e invierno. Es una medida de la variabilidad del flujo zonal, que es fuerte en su fase positiva y la onda de Rossby atmosférica meridional que bloquea los patrones norte-sur durante el ciclo negativo (Oviatt & Smith, 2019).

Estos factores podrían afectar también el transporte de Al y Ti hacia el GC, ya que, en su estudio, Vimont & Battisti (2001) han sugerido que en escala decadal, la variabilidad atmosférica intrínseca de latitudes medias podría influenciar la variabilidad tropical por medio de anomalías del estrés de los vientos zonales de los trópicos, sobre todo en la temporada de invierno, cuando las anomalías de SLP se extendieron hasta el sur de la latitud 20°N y las anomalías de vientos zonales se desvanecieron hasta 5°N, cerca del ecuador. Las anomalías de los vientos zonales son muy débiles y con dirección del este, por lo que se establece una relación entre la variabilidad atmosférica de latitudes medias y las anomalías de los vientos zonales tropicales, mientras que los trópicos ajustan estas anomalías produciendo una simetría ecuatorial parecida a la del ENSO.

Rogers (1984) estableció una covarianza entre el NAO y la Oscilación del Sur, actualmente conocida como ENSO. Estos patrones se correlacionan en periodos de entre 5-6 años. Aunque, como se ha mencionado, ambos modos afectan distintas zonas. Juntos se asocian con cambios significativos de presión y altura en todo el hemisferio norte. Así mismo, el autor menciona que la convergencia de ambos fenómenos podría darse por cambios en el movimiento de las ondas Rossby y que la circulación del Atlántico solo varía significativamente cuando el Pacífico Ecuatorial es frío, ya que esto se genera gracias a los fuertes vientos del oeste del Atlántico. Esto coincide con lo establecido por Exarchou *et al.* (2021) quienes mencionan que el océano Índico y Atlántico tropical pueden influenciar la variabilidad de este fenómeno por medio de cambios en la circulación atmosférica a escala decadal e interanual. Estos autores encontraron a su vez una teleconexión y correlación negativa entre una región del Atlántico, denominada ATL3 y los eventos El Niño de invierno. De modo que cuando la zona ATL3

muestra un periodo de calentamiento o enfriamiento durante verano (Niño/Niña Atlántico), se inducirá un evento del ENSO (La Niña/El Niño) en la región del Pacífico durante el invierno posterior. Esto debido a que cuando se presenta un “Niño Atlántico”, el calentamiento y la convergencia del viento local alteran la celda de Walker, aumentando los movimientos ascendentes del Atlántico y generando un hundimiento en el Pacífico. Esto genera una intensificación de los vientos del este en el Pacífico Occidental, mientras que, en el Pacífico este, ocurre un enfriamiento de la superficie por cambios en las ondas Kelvin oceánicas. Estos cambios también provocan la intensificación de los vientos alisios y el enfriamiento del Pacífico oriental, relacionados con el debilitamiento y movimiento hacia el oeste de la circulación de Walker que provoca una relación entre las anomalías del estrés del viento zonal del Pacífico central y anomalías de la TSM de la región El Niño 3.4 (Li *et al.*, 2020).

En el Pacífico tropical los vientos atmosféricos son en gran parte responsables de la distribución de la TSM tropical, pues determinan en parte la distribución de las precipitaciones y la circulación atmosférica de la zona; esto se ve reflejado en secuencias alternas de presiones altas y bajas, acompañadas de patrones de onda distintivos en las corrientes de chorro (Trenberth, 2017). Estos factores, junto con las otras variaciones climáticas que ocurren simultáneamente, podrían ejercer cambios en los componentes U y V del viento en el GC, que son los factores que modulan directamente el depósito de polvo de las zonas desérticas y semidesérticas hacia la superficie del océano.

Mahowald *et al.* (2009) establecen que los aerosoles minerales o el polvo de desierto son partículas del suelo suspendidas en la atmósfera por medio de vientos fuertes. Esto requiere suelos secos, sin vegetación y fáciles de erosionar. Por otro lado, los procesos de depositación seca incluyen la depositación turbulenta en la que los remolinos aleatorios obligan a las partículas a impactar el suelo, del mismo modo se menciona que la fuente de polvo hacia la atmósfera depende de la velocidad del viento en la superficie y que incrementa conforme aumenta esta velocidad. Estos autores mencionan que, el tamaño de la partícula

es importante para calcular el transporte y el patrón de depósito ya que con esto se estima el tiempo de vida atmosférico en la depositación. Debido a estos factores, el transporte de aerosoles minerales ocurre episódicamente definiendo una gran variabilidad espacial y temporal. Se ha establecido con base en modelos que del 30-90% de la depositación de polvo se observa en el 5% de los días, los cuales podrían ser días con una velocidad de viento mayor (Mahowald *et al.*, 2009).

De acuerdo con esto, se espera un mayor aporte atmosférico hacia el GC durante los meses de invierno, pues se sabe que durante esta época del año prevalecen los vientos más fuertes del norte debido al anticiclón que reside sobre el sudoeste de Estados Unidos que se encuentra más al sur durante la mayoría de los meses de invierno y a su vez se establece una celda de baja presión que domina el oeste de México (Badan-Dangon *et al.*, 1991), por lo que el GC muestra un ciclo anual muy distinto en circulación atmosférica, precipitación, surgencias y producción primaria en verano e invierno (Dean *et al.*, 2004). Alrededor del GC existen 6 áreas que son fuentes potenciales de polvo, las cuales están influenciadas por la variabilidad espacio-temporal del viento (Morales-Acuña, 2015). Los datos de dirección y rapidez del viento del presente estudio, indican que las zonas ZD1, ZD2, ZD3 y ZD4 (Fig.18), pertenecientes al Desierto del Vizcaíno, San Felipe, Reserva de la biosfera Alto Golfo de California y Delta del Río Colorado y Puerto Peñasco, podrían ser las fuentes potenciales de polvo desértico y semidesértico hacia el GC en la temporada de invierno, debido a la dirección de los vientos registrada que generalmente corresponden al noroeste (290°- 320°) y a que como el mismo autor menciona, el flujo eólico presenta un comportamiento estacional con preferencia en esta época del año.

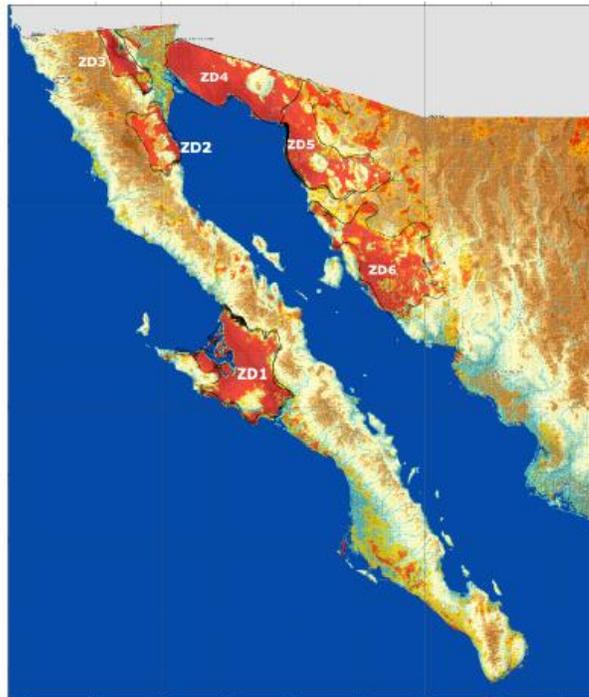


Figura 18. Zonas desérticas potenciales para la emisión de polvo hacia el GC. Recuperado de Morales-Acuña (2015).

Del mismo modo, se debe considerar que, los datos registrados en el área de estudio (1996-2020), muestran una tendencia de la dirección del viento que en 1997 fue del W cambia hacia el NW hasta el año 2008, mientras que la rapidez de los vientos registrada en el periodo de 1998 hasta 2007 mostraba una tendencia descendente. Mientras que, en el siguiente periodo del 2008 en adelante la rapidez comienza a aumentar y la dirección del viento registrada es WNW por un periodo de 3 años, para después revertirse en dirección NW (Fig.19). Estos cambios coinciden con el cambio de fase del NPGO y PDO (Di Lorenzo *et al.*, 2008; Méndez-González *et al.*, 2010), lo que conlleva a un cambio tanto en la principal fuente de origen del polvo desértico, que podría alternarse entre las zonas ZD 1-4 descritas por Morales-Acuña (2015) dependiendo de la dirección del viento dominante. Según los resultados del presente trabajo, se notaron cambios en la concentración de Al y Ti que sugieren cambios en la tasa de depósito de polvo desértico que llega hacia el GC, dependiendo de las características que tenga cada una de estas zonas (Mahowald *et al.*, 2009).

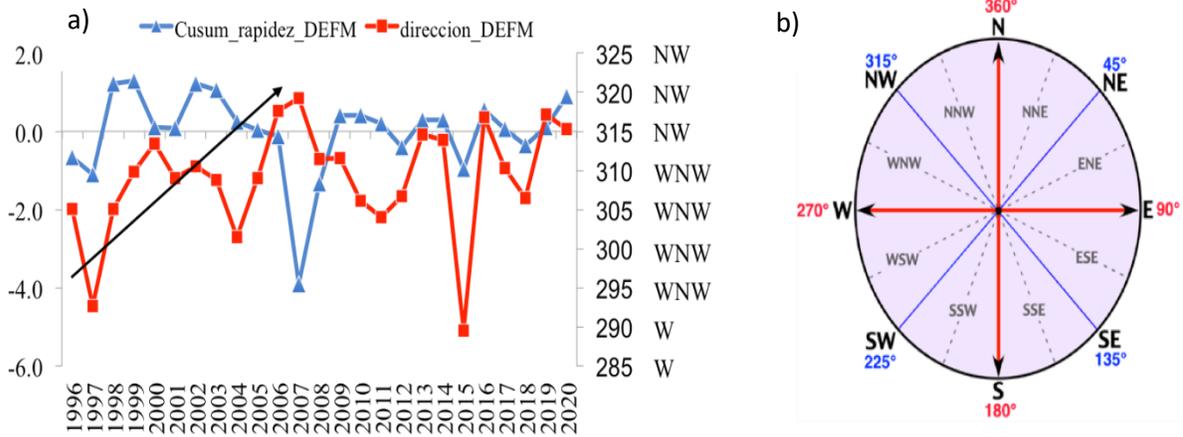


Figura 19. Cambio de régimen de la dirección y rapidez del viento durante el tiempo de estudio. Registro de la dirección y rapidez de los vientos (en rojo y azul respectivamente) (a). Rosa de los vientos(b).

El presente estudio es el primer trabajo que evalúa el aporte de elementos mayores como Al y Ti hacia el GC en una serie de tiempo de 24 años, por medio de heces de ballena azul. Los resultados muestran un gran potencial para detectar la variabilidad climática a escala interanual y decadal, así como cambios en el componente meridional de los vientos, por lo que este trabajo podría servir también como una línea base para mejorar los estudios de variabilidad climática en el GC, a través de muestras de heces de ballena azul. Esta ballena visita la zona cada año, lo que permitiría monitorear el aporte de elementos mayores al GC a través de la recolección de sus heces y así incrementar la serie de tiempo de estos indicadores climáticos. A su vez, este estudio demuestra la capacidad que tiene la ballena azul como filtrador biológico, que sirve para fomentar también la conservación de la especie y generar nuevos conocimientos, por medio de métodos de muestreo no invasivos.

CONCLUSIONES

- El papel de filtrador biológico de la ballena azul permitió comprobar, mediante las heces, la presencia de elementos de origen terrígeno, como el Al y Ti, que son característicos de zonas semidesérticas, lo cual evidencia el aporte terrígeno hacia el GC.
- Las concentraciones de Al y Ti de origen terrígeno no muestran diferencias significativas al ser conservadas en soluciones de etanol (96%), formol (5%) o por el proceso de deshidratación a temperatura ambiente y ser guardadas por largos periodos (1996-2020).
- Las concentraciones de Al y Ti muestran una variación similar entre ellas a lo largo del tiempo, confirmando que ambos elementos tienen la misma fuente de origen.
- Las concentraciones de Al y Ti muestran variación a lo largo del tiempo y esta es modulada directamente por los cambios del componente V del viento, que, a su vez, se ve influenciado por la convergencia de otros patrones de variación decadal de la zona ecuatorial, como los cambios en el índice de los vientos alisios y los componentes primarios de variación climática del Pacífico Norte.

BIBLIOGRAFÍA

- Anderson B.T, R.C. Pérez & A. Karspeck. 2013. Triggering of El Niño onset through trade wind–induced charging of the equatorial Pacific. *Geophys. Res. Lett.* 40: 1212-1216h
- Anderson R.F., H. Cheng, R. L. Edwards, M.Q. Fleisher, C.T. Hayes, K.-F. Huang, D. Kadko, P. J. Lam, W. M. Landing, Y. Lao, Y. Lu, C. I. Measures, S. B. Moran, P. L. Morton, D.C. Ohnemus, L. F. Robinson & R. U. Shelley. 2016. How well can we quantify dust deposition to the ocean? *Phil. Trans. R. Soc. A* 374: 20150285
- Ashok K., S. K. Behera, S. A. Rao, H. Weng & T. Yamagata. 2007. El Niño Modoki and its possible teleconnection. *J. Geophys. Res.* 112 (c11007): 1-27
- Badan-Dangon A., C.E. Dorman, M.A. Merrifield & C.D. Winant. 1991. The Lower Atmosphere Over the Gulf of California. *J. Geophys. Res.* 96 (C9):16,877-16,896
- Barrow L.M., K.A. Bjorndal & K.J. Reich. 2008. Effects of Preservation Method on Stable Carbon and Nitrogen Isotope Values. *Physiol Biochem Zool.* 81 (5): 688-693.
- Bernal G., P. Ripa & J.C. Herguera. 2001. Variabilidad oceanográfica y climática en el bajo Golfo de California: influencias del trópico y Pacífico Norte. *Cienc. mar.* 27 (4):595-617.
- Bérubé, M., J. Urbán, A.E. Dizon, R.L. Brownell & P.J. Palsboll. 2002. Genetic identification of a small and highly isolated population of fin whales (*Balaenoptera physalus*) in the Sea of Cortez, México. *Conserv Genet.* 3: 183-190.
- Bordbar M.H., M.H. England, A.S. Gupta, A. Santoso, A.S. Taschetto, W. Park & M. Latif. 2019. Uncertainty in near-term global surface warming linked to tropical Pacific climate variability. *Nat. Commun.* 10 (1990): 1-10
- Bravo-Cabrera J. L., E. Azpra-Romero, V. Zarraluqui-Such & C. Gay-García. 2017. Effects of El Niño in Mexico during rainy and dry seasons: an extended treatment. *Atmosphere.* 30 (3): 221-232.

- Buat-Ménard, P. 1983. The fate of reactive elements entering the ocean. pp. 491-496. En: P. S. Liss, & W. G. N. Slinn (Eds.), Air-sea exchange of gases and particles. Reidel Publishing Company. 561 pp.
- Bustos-Serrano, H. & R. Castro-Valdez. 2006. Flux of nutrients in the Gulf of California: Geostrophic approach. *Mar. Chem.*, 99: 210-219. doi:10.1016/j.marchem.2005.09.012
- Capotondi A., P. D. Sardeshmukh, E. Di Lorenzo, A. C. Subramanian & A. J. Miller. 2019. Predictability of US West Coast Ocean Temperatures is not solely due to ENSO. *Sci. Rep.* 9(10993): 1:10
- Casillas-López, C. 2018. Participación de la ballena azul (*Balaenoptera musculus*) en el reciclamiento de nutrientes del suroeste del Golfo de California. Tesis de maestría. CICIMAR-IPN. La Paz, B.C.S, México. 60 pp.
- Chen Z., B. Gan, L. Wu & F. Jia. 2018. Pacific-North American teleconnection and North Pacific Oscillation: historical simulation and future projection in CMIP5 models. *Clim. Dyn.*, 50: 4379-4403
- CLICOM, 2021. Base de Datos Climatológica Nacional (Sistema CLICOM) del SMN. Recuperado de: <http://clicom-mex.cicese.mx>. Última visita 25 de mayo de 2021.
- Critchley W. & Siegert K. 1991. Rainfall-runoff analysis. En: Critchley W. & Siegert K. 1991. Water harvesting. FAO. Recuperado de: <http://www.fao.org/3/u3160e/u3160e05.htm>. Última visita: 25 de mayo 2021.
- Dean W., Pride C. & Thunnell R., 2004. Geochemical cycles in sediments deposited on the slopes of the Guaymas and Carmen Basins of the Gulf of California over the last 180 years. *Quat. Sci. Rev.*, 23: 1817-1833.
- Del Ángel Rodríguez J.A. 1997. Hábitos alimentarios y distribución espacio-temporal de los rorcuales común (*Balaenoptera physalus*) y azul (*B. musculus*) en la Bahía De La Paz, Baja California Sur, Mexico. Tesis de maestría. CICIMAR-IPN. La Paz, B.C.S, México. 78 pp.
- Di Lorenzo E., N. Schneider, K.M. Cobb, K. Chhak, P.S.J Franks, A.J. Miller, J.C McWilliams, S.J. Bograd, H. Arango, E. Curchister, T.M Powell & P. Rivere. 2008. North Pacific Gyre Oscillation links ocean climate and ecosystem change. *Geophys. Res. Lett.* 35, L08607, doi: 10.1029 / 2007GL032838.
- Di Lorenzo E. & N. Schneider. 2010. An overview of Pacific climate variability. Recuperado de: <http://www.oces.us/npgo/docs/Decadal-Intro.pdf>. Última visita: 28 de mayo del 2021.
- Durazo R., A.M. Ramírez-Manguilar, L.E. Miranda & L.A. Soto-Mardones. 2010. Climatología de variables hidrográficas en la Corriente de California

- frente a Baja California. En: Gaxiola-Castro G., R. Durazo (eds.), *Dinámica del Ecosistema Pelágico frente a Baja California, 1997–2007: Diez años de Investigaciones Mexicanas de la Corriente de California*. 25-57 pp.
- England M.H., S. McGregor, P. Spence, G.A. Meehl, A. Timmermann, W. Cai, A. S. Gupta, M.J. McPhaden, A. Purich & A. Santoso. 2014. Recent intensification of wind-driven circulation in the Pacific and the ongoing warming hiatus. *Nat. Clim.* 4: 222- 227.
- Exarchou E., P. Ortega, B. Rodríguez-Fonseca, T. Losada, I. Polo & C. Prodhomme. 2021. Impact of equatorial Atlantic variability on ENSO predictive skill. *Nat. Commun.* 12(1612): 1-8
- Flores-Cascante, L. & D. Gendron. 2012. Application of McMaster's technique in live blue whales. *Vet. Rec.*, 171(220). doi:10.1136/vr.100749
- Friese, C. A., M. van der Does, U. Merkel, M. H. Iversen, G. Fisch, & J.-B. W. Stuut. 2016. Environmental factors controlling the seasonal variability in particle size distribution of modern Saharan dust deposited off Cape Blanc. *Aeolian Res.*, 22: 165-179. doi:https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2016.04.005
- Furtado J.C, E. Di Lorenzo, B.T. Anderson & N. Schneider. 2012. Linkages between the North Pacific Oscillation and central tropical Pacific SSTs at low frequencies. *Clim Dyn.* 39:2833-2846. doi: 10.1007/s00382-011-1245-4
- Gendron, D. 1992, Population structure of daytime surface swarms of *Nyctiphanes simplex* (Crustacea: Euphausiacea) in the Gulf of California, Mexico. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 1-6 pp. doi: https://doi.org/10.3354/meps087001
- Gendron, D. 2002. Ecología poblacional de la ballena azul *Balaenoptera musculus* de la Península de Baja California. Tesis de doctorado. CICESE, Ensenada, B.C., México. 100 pp.
- Gendron, D. & A. Ugalde-De la Cruz. 2012. A new classification method to simplify blue whale photo-identification technique. *J. Cetacean Res. Manage*, 12(1): 79-84.
- Girón-Nava & A. F. Johnson. 2016. Descripción de los efectos de El Niño/La Niña en el Golfo de California. DataMares. InteractiveResource. <http://dx.doi.org/10.13022/M31P43>
- Gohar, A. A. & A. Cashman. 2016. A methodology to assess the impact of climate variability and change on water resources, food security and economic welfare. *Agric. Syst.*, 147: 51-64. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.agsy.2016.05.008

- Goldbogen J. A., N. D. Pyenson & R. E. Shadwick. 2007. Big gulps require high drag for fin whale lunge feeding. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 289-301. doi: 10.3354/meps07066
- Gregg, E. J., J. Calambokidis, L. Convey, J. B. Ford, L. Spaven, & M. Zacharias. 2005. Proposed Recovery Strategy for Blue, Fin, and Sei Whales (*Balaenoptera musculus*, *B. physalus*, and *B. borealis*) in Pacific Canadian waters. Nanaimo: Fisheries and Oceans Canada, 54.
- Guevara Díaz, J. M. 2014. Uso correcto de la correlación cruzada en Climatología: el caso de la presión atmosférica entre Taití y Darwin. *Terra Nueva Etapa*, 47: 79-102
- Guieu C. & V. P. Shevchenkob. 2015. Dust in the Ocean. pp. 1-8 En: Harff , J., M. Meschede , S. Petersen, J. Thiede (Eds.). *Encyclopedia of Marine Geosciences*. Springer Nature. 961 pp. doi: 10.1007/978-94-007-6644-0_56-3
- Hamanaka T. 1981. Effects of Formalin Preservation on Heavy Metal Concentration in Zooplankton. *Bull. Fac. Fish. Hokkaido Univ.* 32(4): 376-387
- Han F.X. & A. Singer. 2007. Trace elements distribution in arid zone soils. pp. 49 En: Fengxiang X. H. *Biogeochemistry of Trace Elements in Arid Environments*. Springer Science & Business Media. 368 pp.
- Hansen, A. M., C. E. Bryan, K. West, & B. A. Jensen. 2015. Trace elements concentrations in liver of 16 species of cetaceans stranded on Pacific Islands from 1997 through 2013. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.*, 70(1): 75-95. doi:10.1007/s00244-015-0204-1
- Hansen K.M., J.H. Christensen & J. Brandt. (2015). The Influence of Climate Change on Atmospheric Deposition of Mercury in the Arctic- A Model Sensitivity Study. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 12: 11254-11268.
- Henson S.A., C. Beaulieu & R. Lampitt. 2016. Observing climate change trends in ocean biogeochemistry: when and where. *Glob. Chang. Biol.* 22: 1561-1571
- Hernández, F., R. Serrano, A. F. Roing-Navarro, Y. Martínez-Bravo & F. J. López. 2000. Persistent Organochlorines and Organophosphorus Compounds and Heavy Elements in Common Whale (*Balaenoptera physalus*) from the Western Mediterranean Sea. *Mar. Pollut. Bull.*, 40(5): 426-433.
- Herrera-Cervantes H. 2008. Firma del ENSO en el Golfo de California: temperatura superficial del mar y biomasa fitoplanctónica. Tesis de doctorado. CIBNOR. La Paz, B.C.S, México. 94 pp

- Hurtado- Montoya A.F. & Poveda-Jaramillo G. 2007. Variabilidad climática en el Pacífico Ecuatorial en las escalas espacio temporales del ENSO. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/249387193_Variabilidad_climatica_en_el_Pacifico_Ecuatorial_en_las_escalas_espacio-temporales_del_ENSO
- Jiang N. & C. Zhu. 2018. Asymmetric Changes of ENSO Diversity Modulated by the Cold Tongue Mode Under Recent Global Warming. *Geophys. Res. Lett.* 45: 12,506 –12,513.
- Jiménez A., S.G. Marinone & A. Parés-Sierra. 2005. Efecto de la variabilidad espacial y temporal del viento sobre la circulación en el Golfo de California. *Cienc. mar.* 31 (2):357-368.
- Jiménez Pinedo N.C. 2010. Hábitos alimentarios y relación interespecífica entre la ballena azul (*Balaenoptera musculus*) y la ballena de aleta (*B. physalus*) en el suroeste del Golfo de California. Tesis de maestría. CICICMAR-IPN. La Paz, B.C.S, México, 84 pp.
- Johnson Z.F, Y. Chikamoto, S.Y.S. Wang, M.J. McPhaden & T. Mochizuki. 2020. Pacific decadal oscillation remotely forced by the equatorial Pacific and the Atlantic Oceans. *Clim. Dyn.* 55:789-811
- Keil, R. G. & L. Mayer. 2014. Mineral matrices and organic matter. pp. 337-359. En: H. D. Holland & K. K. Turekian (Eds.), *Treatise on Geochemistry*. Elsevier. 9144 pp. doi:10.1016/B978-0-08-095975-7.01024-X
- Kessler W.S. 2006. The circulation of the eastern tropical Pacific: A review. *Prog. Oceanogr.*, 69: 181–217.
- Kiladis, G. N. & H. Diaz.1989. Global climatic anomalies associated with extremes in the Southern Oscillation. *J. Climate.* 2: 1069-1090.
- Knauer G.A., D.M. Karl, J.H. Martin & C.N. Hunter. 1984. *In situ* effects of selected preservatives on total carbon, nitrogen and metals collected in sediment traps. *J. Mar. Res.* 42:445-462
- Lamy, F., R. Gersonde, G. Winckler, O. Esper, A. Jaeschke, G. Kuhn, J. Ullermann, A. Martinez-Garcia, F. Lambert & R. Kilian. 2014. Increased Dust Deposition in the Pacific Southern Ocean During Glacial Periods. *Science.* 303: 403.
- Lancaster N. 2014. Aeolian Processes. pp. 1-17. En: *Reference Module in Earth Systems and Environmental. Sciences*, Elsevier. 17 pp. doi: 10.1016/B978-0-12-409548-9.09126-0.

- Lavín, M. F., E. Palacios-Hernández & C. Cabrera. 2003. Sea surface temperature anomalies in the Gulf of California. *Geoffs. Int.*, 42(3): 363-375.
- Leduc D. J. 1987. A comparative analysis of the reduced major axis technique of fitting lines to bivariate data. *Can. J. For. Res.* 17:654-659
- Lenntech. 2021. Water Treatment Solutions. *Aluminum (Al) and Water*. Miami, USA. Recuperado de: <https://www.lenntech.com/periodic/water/aluminium/aluminum-and-water.htm#:~:text=Solubility%20of%20aluminum%20and%20aluminum%20compounds&text=An%20example%20of%20a%20water,solubility%20of%20370%20g%2FL>.
- Lesage, V., J.-F. Gosselin, J. W. Lawson, I. McQuinn, H. Moors-Murphy, S. Pourde & Y. Simard. 2018. Habitats Important to Blue Whales (*Balaenoptera musculus*) in the Western North Atlantic. *DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res.*, 1-52.
- Li C., D. Dommenges & S. McGregor. 2020. Trans-basin Atlantic-Pacific connections further weakened by common model Pacific mean SST biases. *Nat. Commun.* 11(5677):1-8
- Li Y., Q. Chen, X. Liu, J. Li, N. Xing, F. Xie, J. Feng, X. Zhou, H. Cai & Z. Wang. 2019. Long-term trend of the tropical Pacific trade winds under global warming and its causes. *J. of Geophys. Res. Oceans.* 124:1-15
- Liguori G. 2018. The role of Meridional Modes in Pacific climate variability and change. Tesis de Doctorado. School of Earth and Atmospheric Sciences. Georgia, Atlanta, U.S.A. 104 pp.
- Lili-Carrillo, L. 2016. Identificación individual con base en la genotipificación de heces en la Ballena azul (*Balaenoptera musculus*) del Golfo de California. Tesis de maestría. CICICMAR-IPN. La Paz, B.C.S, México, 131 pp.
- Litzow M.A., M.E Hunsicker, N.A Bond, B.J. Burke, C.J. Cunningham, J.L. Gosselin, E.L. Norton, E.J. Ward & S.G. Zador. 2020. The changing physical and ecological meanings of North Pacific Ocean climate indices. *Proc Natl Acad Sci US A.* 117 (14):7665-7671
- Lluch-Cota, S. E., E. A. Aragón-Noriega, F. Arreguín-Sánchez, D. Auriol-Gamboa, J. J. Bautista-Sánchez, R. C. Brusca, R. Cervantes-Duarte, R. Cortés-Almirano, P. Del-Monte-Luna, A. Esquivel-Herrera, G. Fernández, M. E. Hendrickx, S. Hernández-Vázquez, H. Herrera-Cervantes, M. Kahru, M. Lavín, D. Lluch-Belda, D. B. Lluch-Cota, S. G. Marinone, M. O. Nevárez-Martínez, J. López-Martínez, S. Ortega-García, E. Palacios-Castro, A. Parés-Sierra, G. Ponce-Díaz, M. Ramírez-Rodríguez, C. A. Salinas-Zavala, R. A. Schwartzlose & A. Sierra-Beltrán. 2007. The Gulf of California: Review

- of ecosystem status and sustainability challenges. *Prog. Oceanogr.*, 73:1-26. doi:10.1016/j.pocean.2007.01.013
- Lluch-Cota S.E., A. Parés-Sierra, V.O. Magaña-Rueda, F. Arreguín-Sánchez, G. Bazzino, H. Herrera-Cervantes & D. Lluch-Belda. 2010. *Prog. Oceanogr.* 87(1-3):114-126
- López-Alcántan D.G. 2011. Variabilidad espacio temporal de la clorofila a y la productividad primaria en el sistema frontal de Baja California Sur. Tesis de Maestría. CIDIIR-IPN. Guasave, Sinaloa, México. 71 pp.
- López-González N., B. Alonso, D. Casas, C. Juan. G. Ercilla, G. Bozzano, I. Cacho, D. Palomino, P. Bárcenas, E. d'Acromont, C. Gorini & B. El Mourni. 2020. Reconstrucción de las áreas fuente de polvo eólico depositado en el drift contornítico asociado al monte submarino Villa de Djibouti (mar de Alborán). *Geogaceta*. 67 :23-26
- Mahowald N., C. Luo & J. del Corral. 2003. Interannual variability in atmospheric mineral aerosols from a 22-year model simulation and observational data. *J. Geophys. Res.* 108 (D12): 3-1:20. doi:10.1029/2002JD002821
- Mantua N.J & S.R. Hare. 2002. The Pacific Decadal Oscillation. *J. Oceanogr.*58: 35-44.
- Martínez López A., O de los A. Flores Castillo, R. Saldívar Lucio, D. C. Escobedo-Urías, G. Verdugo Díaz, L. Pérez Cruz, M. Albañez Lucero & J. D. Acevedo Acosta. 2019. Paleoclimate of the Gulf of California (Northwestern Mexico) During the Last 2000 Years. 7-39 pp. En: Torrescano Valle N., G. A. Islebe, P.D. Roy (Eds). 2019. The Holocene and Anthropocene Environmental History of Mexico. Springer. 280 pp.
- Matlab (Nº de versión 9.8.0.1451342). 2020. Windows. U.S: The MathWorks, Inc.
- McClatchie, S., R. Goericke, J. Koslow, F. Schwing, S. Bograd, R. Charter, W. Watson, N. Lo, K. Hill, J. Gottschalck, M. L'Heureux, Y. Xue, W. Peterson, R.T. Emmett, C. Collins, G. Gaxiola-Castro, R. Durazo, M. Kahru, B. Mitchell & E. Bjorkstedt. 2009. The state of the California Current, 2007–2008: La Niña conditions and their effects on the ecosystem, *CalCOFI Rep.*, 49, 39–76
- McCormack M.A, B.P. Jackson & J. Dutton. 2020. Effects of Formalin Fixation on Trace Element Concentrations in Bottlenose Dolphin (*Tursiops truncatus*) Tissues. *Environ. Toxicol. Chem.* 39:1149-1164.
- McPhaden M.J., A. Santoso & W. Cai. 2020. Introduction to El Niño Southern Oscillation in a Changing Climate. 1-19 pp. En: McPhaden M.J., A. Santoso, W. Cai (Eds). 2021. El Niño Southern Oscillation in a Changing Climate. American Geophysical Union. 506 pp.

- Méndez-González J., A. Ramírez-Leyva, E. Cornejo-Oviedo, A. Zárate-Lupercio & T. Cavazos-Pérez. 2010. Teleconexiones de la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) a la precipitación y temperatura en México. *Invest. Geog.* 73:57-70
- Merrifield M.A. 2011. A Shift in Western Tropical Pacific Sea Level Trends during the 1990s. *J. Clim.* 24: 4126-4138
- Mhowald, N. M., S. Engelstaedter, C. Luo, A. Sealy, P. Artaxo, C. Benitez-Nelson, S. Bonnet, Y. Chen, P. Y. Chuang, D. D. Cohen, F. Dulac, B. Herut, A. M. Johansen, N. Kubilay, R. Losno, W. Maenhaut, A. Paytan, J. M. Prospero, L. M. Shank & R. L. Siefert. 2009. Atmospheric Iron Deposition: Global Distribution, Variability, and Human Perturbations. *Annu. Rev. Mar. Sci.* 1:245-278
- Mhowald, N. M., D. S. Hamilton, K. R. Mackey, J. K. Moore, A. R. Baker, R. A. Scanza, R. Sears & Y. Zhang. 2018. Aerosol trace metal leaching and impacts on marine microorganisms. *Nat. Commun.*, 9: 1-15. doi:10.1038/s41467-018-04970-7
- Minnich R.A., E. Franco-Vizcaíno & R. J. Dezzani. 2000. The El Niño/Southern Oscillation and precipitation variability in Baja California, México. *Atmósfera.* 13:1-20
- Mishra, S. 2017. Impact of climate variability on soil-microbe interaction. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/317578232_IMPACT_OF_CLIMAT_E_VARIABILITY_ON_SOIL-MICROBE_INTERACTION. Última visita: 7 de mayo del 2019
- Morales Acuña E. (2015). Influencia de la variabilidad espacio-temporal del viento en el transporte de polvo hacia el Golfo de California. Tesis de maestría. CICIMAR-IPN. La Paz, B.C.S, México. 94 pp
- Morales Acuña E., C. R. Torres, F. Delgadillo-Hinojosa, J. R. Linero-Cueto, E. Santamaría-del-Ángel & R. Castro. 2019. The Baja California Peninsula, a Significant Source of Dust in Northwest Mexico. *Atmosphere* 10 (582): 1-18. doi:10.3390/atmos10100582
- Morel F.M.M & N.M. Price. 2003. The Biogeochemical Cycles of Trace Metals in the Oceans. *Science* 300: 944-947
- Newman M., M.A. Alexander, T. R. Ault, K.M. Cobb, C. Deser, E. Di Lorenzo, N. J. Mantua, A. J. Miller, S. Minobe, H. Nakamura, N. Schneider, D. J. Vimont, A. S. Phillips, J. D. Scott & C. A. Smith. 2016. The Pacific Decadal Oscillation, Revisited. *J. Clim.* 29: 4399- 4427

- NOAA. 2019. Currents. Retrieved from Surface Ocean Currents: https://oceanservice.noaa.gov/education/tutorial_currents/04currents2.html. Última visita: 10 de mayo del 2019.
- NOAA National Centers for Environmental Information. 2021. Equatorial Pacific Sea Surface Temperatures. Recuperado de: <https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/enso/indicators/sst/>. Última visita: 31 de mayo de 2021
- NOAA National Centers for Environmental Information. 2021. North Atlantic Oscillation (NAO). Recuperado de: <https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/nao/>. Última visita: 22 de junio del 2021
- NOAA National Weather Service, 2021. Cold & Warm Episodes by Season. Recuperado de: https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php. Última visita: 13 de marzo del 2021
- O'Hara, T. M., C. Hanns, V. M. Woshner, J. Zeh, G. Bratton & R. Taylor. 2008. Essential and non-essential elements in the bowhead whale: epidermis-based predictions of blubber, kidney, liver and muscle tissue concentrations. *J. Cetacean Res. Manag.*, 10(2): 107-117.
- Okin G. S. & M. C. Reheis. 2002. An ENSO predictor of dust emission in the southwestern United States. *Geophys. Res. Lett.* 29 (9): 46-1,46-3.
- Oviatt C.A, L. Smith, M.C. McManus & K. Hyde. 2015. Decadal Patterns of Westerly Winds, Temperatures, Ocean Gyre Circulations and Fish Abundance: A Review. *Climate*, 3(4): 833-857
- Parés Sierra A., A. Mascarenhas, S.G. Marinone & R. Castro. 2003. Temporal and spatial variation of the surface winds in the Gulf of California. *Geophys. Res. Lett.* 30 (6): 45-1,45-4
- Pilgrim D.H., T.G. Chapman & D.G. Doran. 1998. Problems of rainfall-runoff modelling in arid and semiarid regions, *Hydrol Sci J.*, 33:4, 379-400,
- PSL, NOAA. 2020. NCEP North American Regional Reanalysis: NARR. Recuperado de: <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.narr.html>. Última visita: 13 de marzo del 2021.
- PSL, NOAA. 2021. Climate Indices: Monthly Atmospheric and Ocean Time-Series. Recuperado de: <https://psl.noaa.gov/data/climateindices/list/>. Última visita: 13 de marzo 2021

- Ramamasy, S. & S. Baas. 2007. Understanding climate variability and climate change. pp.2. En: S. Ramamasy, & S. Baas, Climate Variability and change: Adaptation to drought in Bangladesh: FAO. 57 pp.
- Ratnarajah, L., J. Melbourne-Thomas, M. P. Marzloff, D. Lannuzel, K. M. Meiners, F. Chever, S. Nicol & A. R. Bowie. 2016. A preliminary model of iron fertilisation by baleen whales and Antarctic krill in the Southern Ocean: Sensitivity of primary productivity estimates to parameter uncertainty. *Ecol. Model.*, 320: 203-212.
- Regier P., H. Briceño & J. N. Boyer. 2019. Analyzing and comparing complex environmental time series using a cumulative sums approach. *MethodsX*, 6: 779–787
- Roden G. I. (1958). Oceanographic and Meteorological Aspects of the Gulf of California. *Pac. Sci.* 12: 21-45
- Rodríguez-Moreno, V. M., J. A. Ruíz-Corral, G. Medina-García, J. S. Padilla-Ramírez & T. Gunter Kretzschmar. (2014). Efecto de la condición ENSO en la frecuencia e intensidad de los eventos de lluvia en la península de Baja California (1998-2012). *Rev. Mex. Cienc. Agríc.*, 5(spe10).
- Rogers J.C. 1984. The Association between the North Atlantic Oscillation and the Southern Oscillation in the Northern Hemisphere. *Mon. Wea. Rev.* 112 (10): 1999-2015.
- Roman, J., J. Nevins, M. Altabet, H. Koopman & J. McCarthy. 2016. Endangered right whales enhance primary productivity in the Bay of Fundy. *PLoS ONE*, 11(6): 1-14. doi:10.1371/journal.pone.0156553
- Saldívar-Lucio R., E. Di Lorenzo, M. Nakamura, H. Villalobos, D. Lluch-Cota & P. Monte-Luna. 2016. Macro-scale patterns in upwelling/ downwelling activity at North American west coast. *PLoS One*. 11:e0166962
- Sarakinos H., M.L. Johnson & M. J. Vender Zander. 2002. A synthesis of tissue-preservation effects on carbon and nitrogen stable isotope signatures. *Can. J. Zool.* 80: 381–387
- Sanpera, C., M. González & L. Jover. 1996. Heavy metals in two population of North Atlantic fin whales (*Balaenoptera physalus*). *Environ. Pollut.*, 91(3): 299-307.
- Santamaria del Ángel, E. & S. Alvarez-Borrego. 1994. Gulf of California biogeographic regions based on coastal zone color scanner imagery. *J. Geophys. Res.*, 99(C4): 7411-7421.
- Schulz M, J. M. Prospero, A. R. Baker, F. Dentener, L. Ickes, P. S. Liss, N. M. Mahowald, S. Nickovic, C. Pérez García-Pando, S. Rodríguez, M. Sarin,

- I.Tegen, & R. A. Duce. 2012. Atmospheric Transport and Deposition of Mineral Dust to the Ocean: Implications for Research Needs. *Environ. Sci. Technol.* 46: 10390–10404.
- SCOR. 2007. GEOTRACES. An international study of the global marine biogeochemical cycles of trace elements and isotopes. *Chemie der Erde*, 85: 85-131. doi.org/10.1016/j.chemer.2007.02.001
- Segovia-Zavala, J. A., F. Delgadillo-Hinojosa, M. L. Lara-Reyes, M. A. Huerta-Diaz & E. V. Torres-Delgado. 2009. Aporte atmosférico y concentración de hierro disuelto en la capa superficial del Golfo de California. *Cienc. Mar.*, 35(1): 75-90. doi:https://doi.org/10.7773/cm.v35i1.1432
- Singer A., E. Ganot, S. Dultz & W. Fischer. (2003). Dust deposition over the Dead Sea. *J. Arid Environ.* 53: 41-59. doi:10.1006/jare.2002.1023,
- Solano-Marín, A. M. 2005. Movilización de metales pesados en residuos y suelos industriales afectados por la hidrometalurgia del cinc. Tesis doctoral. Universidad de Murcia. Murcia, España. 286 pp.
- Sosa-Ávalos, R., T. L. Espinosa-Carreón, E. Santamaría-del Ángel, J. Cepeda-Morales, A. Mercado-Santana, M. E. De la Cruz-Orozco, J. R. Lara-Lara, S. Álvarez-Borrego & G. Gaxiola-Castro. 2018. Diagnóstico y análisis de la producción primaria neta en los mares de México. *Elementos para Políticas Públicas.*, 2(3): 164-185
- Soto-Jiménez, M. F. 2011. Transferencia de elementos traza en tramas tróficas acuáticas. *Hidrobiológica*, 21(3): 239-248.
- Squadrone, S., P. Brizio, E. Chiaravalle, & M. C. Abete. 2015. Sperm whales (*Peper macrocephalus*), found stranded along the Adriatic coast (Southern Italy, Mediterranean Sea), as bio indicators of essential and no-essential trace elements in the environment. *Ecol. Indic.*, 58: 418-425. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.06.016
- Trenberth K.E. 2017. El Niño Southern Oscillation (ENSO). p.p 420-432. En: Cochran K.J. H.J. Bokuniewicz & Yager P.L. (Eds.). *Encyclopedia of Ocean Sciences* (Volumen 6). Elsevier. 578 pp.
- Tseng Y., R. Ding, S. Zhao, Y. Kuo & Y. Liang. 2020. Could the North Pacific Oscillation Be Modified by the Initiation of the East Asian Winter Monsoon?. *J. Clim.*, 3 (6): 2389-2406.
- Valenzuela-Molina, M., S. Atkinson, K. Mashburn, D. Gendron & R. L. Brownell. 2018. Fecal steroid hormones reveal reproductive state in female blue whales sampled in the Gulf of California. *Gen. Comp. Endocrinol.*, 261:127-135. doi:https://doi.org/10.1016/j.ygcen.2018.02.015

- Vázquez-Figueroa, V., C. Canet, R. M. Prol-Ledesma & R. E. Villanueva-Estrada. 2014. Procedencia de los elementos químicos en los sistemas marinos y su influencia en la composición de los sedimentos. p.p. 47-55. En: A. Low-Pfeng, & E. M. Peters Recagno (Eds.), *La frontera final: el océano profundo*. INECC-SEMARNAT. 304 pp.
- Vimont D.J. & D.S. Battisti. 2001. Footprinting' A seasonal connection between the tropics and mid-latitudes. *Geophys. Res. Lett.* 28 (20): 3923-3926.
- Wilkinson, T. A., E. Wiken, J. Bezaury Creel, T. F. Hourigan, T. Agardy, H. Herrmann, L. Janishevski, C. Madden & M. Padilla. 2009. Golfo de California. pp. 97-105. En: *Ecorregiones marinas de América del Norte*. Comisión para la Cooperación Ambiental. 200 pp.
- Wing, S. R., M. Gault-Ringold, C. H. Stirling, L. C. Wing, O. A. Shatova & R. D. Fre. 2017. $\delta^{56}\text{Fe}$ in seabird guano reveals extensive recycling of iron in the Southern Ocean ecosystem. *Limnol. Oceanogr.*, 62:1671-1681. doi:10.1002/lno.10524
- Wu Z., C. Jiang, M. Conde, J. Chen & B. Deng. 2019. The long-term spatio-temporal variability of sea surface temperature in the Northwest Pacific and the Near China Sea. *Ocean Sci. Discuss.* 1-23. doi: <https://doi.org/10.5194/os-2019-69>
- Zeitzschel, B. 1969. Primary productivity in the Gulf of California. *Mar. Biol.*, 3: 201-207.
- Zuñiga E. & V. Magaña. 2018. Vulnerability and risk to intense rainfall in Mexico: The effect of land use cover change. *Investigaciones Geográficas*. 2448-7179: 1-18

ANEXOS

Anexo 1. Tabla de identificación de muestras de heces de ballena analizadas con fecha de colecta, conservador utilizado y pH.

Número	Preservante	ID ballena	Día	Mes	Año	pH
19	Etanol		24	2	1996	7
20	Etanol		24	2	1996	7
22	Etanol		26	2	1996	7
44	Etanol		6	2	2001	7
45	Etanol		6	2	2001	7
52	Etanol		8	4	2006	7
53	Etanol		8	4	2006	7
68	Etanol		13	2	2008	7
71	Etanol		21	2	2008	5
74	Etanol		21	3	2008	5
77	Etanol		22	3	2008	6
90	Etanol	267	21	2	2009	8
108	Etanol	253	31	3	2009	SP
109	Etanol	303	1	4	2009	SP
110	Etanol	65	2	4	2009	SP
114	Etanol	12	19	3	2010	SP
116	Etanol	266	23	3	2010	6
118	Etanol		25	5	2010	5
120	Etanol		30	3	2010	7
121	Etanol		29	1	2011	7
121	Formol		29	1	2011	6
121	Seca		29	1	2011	7
123	Etanol	667	14	2	2011	7
123	Formol	667	14	2	2011	7
123	Seca	667	14	2	2011	7
124	Etanol	41	19	2	2011	5
125	Etanol		13	3	2011	7
127	Etanol	761	6	3	2012	7
128	Etanol	825	13	3	2012	7
129	Etanol	41	24	3	2012	6
131	Etanol		3	3	2013	6
132	Etanol	536	4	3	2013	7
134	Etanol	203	5	3	2013	7
137	Etanol	667	15	3	2013	6
142	Etanol	12	17	2	2014	7

143	Etanol	298	18	2	2014	seca
144	Etanol	298	18	2	2014	7
146	Etanol	667	21	2	2014	6
147	Etanol	477	10	2	2015	7
152	Etanol		2	3	2016	7
153	Etanol	144	4	3	2016	7
157	Etanol	329	17	2	2016	7
158	Etanol	12	3	3	2016	7
171	Etanol	12	28	2	2017	7
172	Etanol	12	9	3	2017	8
175	Etanol	144	15	3	2017	5
176	Etanol		16	3	2017	7
201	Etanol		9	3	2018	7
202	Etanol	667	10	3	2018	7
203	Etanol	67	22	3	2018	7
204	Etanol	67	23	3	2018	7
210	Etanol	144	10	3	2019	7
211	Etanol	67	13	3	2019	7
213	Etanol		17	3	2019	7
213	Formol		17	3	2019	7
213	Seca		17	3	2019	7
215	Etanol	67	27	3	2019	7
215	Formol	67	27	3	2019	6
215	Seca	67	27	3	2019	6

Anexo 2. Tabla de información de muestras complementarias previamente analizadas por el Laboratorio de Ecología de Cetáceos de CICIMAR-IPN.

Número	ID ballena	Día	Mes	Año
Avist39	303	1	4	2009
19	65	2	4	2009
20	59	27	2	2009
22	250	11	3	2009
23	395	30	3	2009
25	160	16	2	2009
109	334	20	3	2009
111	124	29	3	2009
115	41	5	3	2010
40	12	19	3	2010
41	266			2010
779	116	25	3	2010
DJ1	124	26	3	2010
DJ2	713			2010
DJ3		29	1	2011
121	106	31	1	2011
122	667	14	2	2011
123	41	19	2	2011
124	75	30	3	2011
125	134	28	3	2011
126	761	6	3	2012
	825	13	3	2012
127	49	24	3	2012
128	836	4	4	2012
129	106	26	2	2012
		3	3	2013
130	536	3	3	2013
1BI	203	5	3	2013
131	667	15	3	2013
132	75	15	2	2014
134	12	17	2	2014
137	298	18	2	2014
139	667	21	2	2014
141	477	10	2	2015
143		1	5	2015
146	329	29	2	2016
147		3	3	2016
149	144	3	3	2016
151	325	15	3	2016

151	325	17	3	2016
152				2015
153	12	17	2	2016