



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

VARIABILIDAD DE LA CONCENTRACIÓN DE INPs
EN PRESENCIA Y AUSENCIA DE AFLORAMIENTOS
DE FITOPLANCTON EN LAS COSTAS DEL PACÍFICO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

LIC. EN CIENCIAS DE LA TIERRA

P R E S E N T A :

DANIELA ALEJANDRA LEAL VILLALVAZO

TUTOR

DR. LUIS ANTONIO LADINO MORENO



CIUDAD UNIVERSITARIA, Cd. Mx., 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Dedicado con mucho amor a mi familia, a mi padre Pedro, a mi madre Alejandra, a mis hermanos, a mi tía Conchita, por ser mi más grande apoyo y motivación.

El mar, una vez que lanza su hechizo, te sostiene en su red de maravillas para siempre. - Jacques Yves Cousteau

Agradecimientos

- A mi asesor de tesis el Dr. Luis Ladino por apoyarme desde de mi taller de investigación y brindarme una oportunidad para realizar mi tesis, por su paciencia, apoyo, dedicación, enseñanzas que desde un principio me brindó sin dudarle y por la confianza que ha depositado en mi durante todo este proceso.
- A Luis Ángel por siempre brindarme su apoyo incondicional, por ser una parte importante en mi vida durante todo este proceso, por contagiarme de su motivación, alegría, comprensión y amor.
- Al apoyo económico del proyecto PAPIIT- DGAPA-UNAM (IN111120) y a la Fundación Marcos Moshinsky.
- Al Instituto de Ciencias Atmosféricas y Cambio Climático (ICAyCC), por brindarme oportunidades.
- A la Dra. Graciela Binimelis de Raga, directora del grupo de Investigación de Interacción de Micro y Meso escala del ICAyCC.
- Al Dr. Aramis Olivos Ortíz, quien facilitó el espacio para la toma y análisis de muestras.
- A los miembros del jurado: Dr. Fernando García García, Dra. Graciela B. Raga, Dr. Aramis Olivos, Dr. Harry Alvarez.
- A Mafe por siempre ser un gran apoyo, por brindarme sus conocimientos y experiencia, por ser una gran amiga y por ser alguien del que aprendí día a día.

- A Selina por todos estos años de amistad, de llenarme de cariño y acompañamiento, por permitirnos cercar y aprender juntas.
- A Montse, Isa, Karlita por todo el apoyo y momentos que pasamos en el laboratorio, muestreando y en el cubículo, por aligerar siempre el trabajo con sus risas y acompañamiento.
- A Dany, Angie y Papita por brindarme una red de apoyo y amistad durante todo este proceso, por dejarme vivir en su sala y llenarme siempre de amor.

Comité Tutorial

El jurado académico designado por la **Facultad de Ciencias** de la **Universidad Nacional Autónoma de México** para la evaluación de esta Tesis por el grado en **Licenciatura en Ciencias de la Tierra** que presenta la alumna **Daniela Alejandra Leal Villalvazo** con número de cuenta **418003767** son:

Presidente: Dr. Fernando García García

Vocal: Dra. Graciela Binimelis de Raga

Secretario: Dr. Luis Antonio Ladino Moreno

1er Suplente: Dr. Aramis Olivos Ortiz

2do Suplente: Dr. Harry Alvarez Ospina

Índice general

Agradecimientos	II
Índice de figuras	VIII
Índice de Tablas	XII
Lista de acrónimos	XIII
Resumen	XVI
1 Marco teórico	1
1.1 Aerosol atmosférico	1
1.1.1 Tipos y Características de un aerosol	1
1.1.2 Aerosol de origen marino	3
1.1.3 Composición del aerosol marino	5
1.1.4 Microcapa superficial del océano (SML)	5
1.1.5 Composición de la SML	5
1.1.6 Fenómeno de Surgencias	6
1.1.7 Producción de fitoplancton	8
1.1.8 Aerosol de origen antropogénico	10
1.2 Nubes	11
1.2.1 Definición de las nubes	11
1.2.2 Clasificación de las nubes	11
1.2.3 Nubes frías	14
1.2.4 Nubes mixtas	15

1.2.5	Importancia e influencia de la nubes mixtas en el sistema climático	15
1.2.6	Nucleación heterogénea	17
1.3	INPs	19
1.3.1	Propiedades de los INPs	19
1.4	Aerosol marino como INP	20
1.5	Motivación del trabajo	22
1.6	Hipótesis	22
1.7	Objetivos	23
1.7.1	Objetivo general	23
1.7.2	Objetivos particulares	23
2	Metodología	24
2.1	Sitio de muestreo	24
2.1.1	Descripción general del área de estudio	25
2.1.2	Climatología de Manzanillo	26
2.1.3	Puntos de muestreo	27
2.2	Técnica Glass Plate	29
2.2.1	Requerimientos de recolección	30
2.2.2	Limpieza del material	31
2.3	Sistema DFA-UNAM	32
2.3.1	Preparación de la muestra y procedimiento.	33
2.4	Análisis de datos	36
3	Discusión y análisis de resultados	38
3.1	Parámetros químicos y físicos que se midieron en el sitio de muestreo.	38
3.2	Condiciones ambientales que influyen en el sitio de muestreo.	39
3.3	Curvas de Fracción Congelada (FF)	41
3.3.1	Comparación entre ambos días de muestreo.	46
3.4	Temperatura inicial de congelamiento (T_0)	47
3.5	Temperatura media de congelamiento (T_{50})	49
3.6	Correlación de parámetros fisicoquímicos con T_{50}	50

3.7	Efecto del material orgánico activo presente en la SML y SSW.	52
3.8	Comparación de los resultados con otros estudios de SML y SSW (Golfo de México vs Pacífico Mexicano)	54
4	Conclusiones	56
5	Recomendaciones y trabajo a futuro	58
	Bibliografía	59

Índice de figuras

1.1	Ciclo general de las partículas de aerosol atmosféricas (Pöschl, 2005). . .	3
1.2	Diferentes tipos de aerosol (Heintzenberg et al.,2006).	4
1.3	Clasificación conceptual de la capa superficial del océano (Hardy, 1997).	6
1.4	Esquema que ejemplifica el fenómeno de surgencia en el hemisferio norte (National Oceanic and Atmospheric Administration, 2016).	7
1.5	Áreas de surgencias y afloramientos en México indicadas con color gris oscuro (Lara-Lara et al., 2008)	8
1.6	Vías microbianas que contribuyen a la diversidad de partículas en el aerosol marino (Cochran et al., 2017).	9
1.7	Representación de los principales grupos de nubes de acuerdo a la Or- ganización Meteorológica Mundial (Adaptación del International Cloud Atlas, 2017)	14
1.8	Balance radiativo de la Tierra. Tomada de: (www.meteorologiaenred.com/la- radiación-solar.html)	16
1.9	Trayectorias para la formación de hielo en la atmósfera, se muestran los modos de nucleación heterogénea y homogénea (Kanji et al., 2017) . . .	18
1.10	Formación del aerosol marino enriquecido con materia orgánica (Wilson et al., 2015).	21
2.1	Localización del sitio de muestreo. Bahía de Santiago, Manzanillo, Co- lima (Google maps).	24

2.2	A) Velocidad y dirección de las corrientes marinas a 5m de profundidad en las Bahías de Manzanillo en febrero del 2004; B) Velocidad y dirección de las corrientes marinas a 5m de profundidad en las Bahías de Manzanillo en septiembre del 2004 (SEMAR, 2004).	26
2.3	Puntos de muestreo tomados ambos días de recolección de muestras (Márquez, 2022).	28
2.4	Técnica Glass Plate utilizada durante campañas de muestreo en el Pacífico Norte y el Golfo de México (Juarez, 2018).	29
2.5	Uso de la técnica Glass Plate durante el muestreo de la SML en Manzanillo Colima.	30
2.6	Sistema de iluminación-enfriamiento del DFA-UNAM encerrado en rojo y sistema de vídeo encerrado en azul.	33
2.7	Procedimiento de llenado de la placa ELISA y colocación de ésta en el sistema DFA-UNAM (Modificada. Ladino et al., 2022).	34
2.8	Placa ELISA con 8 pozos desde una vista lateral, sumergida en polidimetilsiloxano al nivel de la muestra (Modificada. Cascajo, 2017).	34
2.9	Placa ELISA durante el experimento, en donde se pueden apreciar los pozos congelados (amarillos) y los pozos por congelarse (rojos) (Ladino et al., 2022)	35
2.10	Hoja Excel utilizada para el análisis de los vídeos de las muestras.	36
3.1	Curvas de fracción congelada de muestras de SML recolectadas en Manzanillo, a) durante el primer y b) segundo día de muestreo en función de la distancia de la costa.	42
3.2	Comparación de las curvas de fracción congelada de muestras de SML recolectadas en Manzanillo, durante el primer y segundo día de muestreo en función de la distancia a la costa. Las curvas de color azul corresponden al día 06/04/22 y las curvas de color rojo corresponden al día 09/04/22.	43

3.3	Curvas de fracción congelada de muestras de SSW recolectadas en Manzanillo durante el primer a) y segundo b) día de muestreo, en función de la distancia a la costa.	44
3.4	Comparación de las curvas de fracción congelada de muestras de SSW recolectadas en Manzanillo durante el primer y segundo día de muestreo en función de la distancia a la costa. Las curvas de color azul corresponden al día 06/04/22 y las curvas de color rojo corresponden al día 09/04/22.	45
3.5	Comparación de las curvas de fracción congelada de muestras de SML y SSW recolectadas en Manzanillo durante el primer y segundo día de muestreo en función de la temperatura. Las curvas de color rojo y violetas son correspondientes al día 6/04/22 y las curvas de color azul rey y azul celeste son correspondientes al día 9/04/22.	46
3.6	Gráficas de T_0 en relación a la distancia (cercanía o lejanía de la costa). La gráfica superior corresponde a las temperaturas iniciales de congelamiento del primer día de muestreo y la inferior corresponde a las del segundo día de muestreo. Las curvas de color azul corresponden a las muestras de SML y las curvas de color rojo corresponden a las muestras de SSW.	48
3.7	Diagramas de caja en donde se muestra el valor T_{50} de los 10 puntos de muestreo de SML (A y B) y SSW (C y D) recolectadas en Manzanillo. Las gráficas de lado izquierdo muestran los resultados del primer día de muestreo y las del lado derecho muestran resultados del segundo día de muestreo.	49
3.8	Gráficas de correlación entre T_{50} y clorofila-a obtenidas de las muestras en Manzanillo, Colima.	53

3.9 Gráfica de T_{50} de las muestras tomadas en el Golfo de México y en el Pacífico Mexicano en relación a la distancia a la costa (cercanía o lejanía). Las curvas de color naranja corresponden a la SML y SSW del Golfo de México y las curvas de color azul son corresponden a la SML y SSW del Pacífico Mexicano. 54

Índice de Tablas

Tabla 2.1 Climatología del área de muestreo (Manzanillo, Colima) a lo largo de los meses del año 2019 (SEMAR, 2019).....	28
Tabla 2.2 Recuento de las muestras.....	28
Tabla 3.1 Variables obtenidas en los sitios de muestreo.....	38
Tabla 3.2 Promedio de las variables obtenidas en los sitios de muestreo.....	39
Tabla 3.3 Condiciones ambientales observadas durante los días de muestreo, (1.1-1.10) corresponden al día 6 de abril del 2022 y (2.1-2.10) corresponden al día 9 de abril del 2022. Los resultados de estas variables fueron determinados por medio de observación de forma cualitativa.....	40
Tabla 3.4 Presencia de productividad primaria y de zooplancton observados durante los días de muestreo, (1.1-1.10) corresponden al día 6 de abril del 2022 y (2.1-2.10) corresponden al día 9 de abril del 2022. Los resultados de estas variables fueron determinados por medio de observación de forma cualitativa.....	41
Tabla 3.5 Coeficiente de correlación p entre los valores de T_{50} con la salinidad, TSM, clorofila-a y oxígeno disuelto. En negrita se resaltan los valores más altos.....	51

Lista de acrónimos

Ca	Calcio
CCN	Núcleos de condensación de nube
CE	Carbono elemental
C_{inp}	Concentración de INPs
Cla	Clorofila
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
DFA	Droplet Freezing Assay
DMS	Dimetil sulfuro
ELISA	Enzyme-Linked Immuno Sorbent Assay
EPA	Agencia de Protección Ambiental
FF	Frozen Fraction / Fracción Congelada

F_{uf}	Fracción de gotas que no se congelaron
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
INP	Partículas nucleadoras de hielo
ITCZ	Zona de Interconvergencia Tropical
km	Kilómetros
LED	Diodo emisor de luz
Mg	Magnesio
N	Total de gotas en la placa ELISA
Na	Sodio
Nf	No. de gotas congeladas
nm	Nanómetro
NO_x	Óxidos de nitrógeno
OD	Oxígeno disuelto
p	Valor p de significancia estadística
r	Coefficiente r de correlación estadístico

RHi	Humedad relativa respecto al hielo
SEMAR	Secretaría de Marina (México)
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SML	Microcapa superficial del océano
SO_2	Dióxido de azufre
SO_4	Sulfato
SSW	Aguas subsuperficiales
T	Temperatura
TSM	Temperatura superficial del mar
T_0	Temperatura inicial de congelamiento
T_{50}	Temperatura a la cual la mitad de las gotas se congelan
UNAM	Universidad Nacional Autónoma de México
UV	Ultravioleta
V_{drop}	Volumen de la gota
μm	Micrómetro

Resumen

Este trabajo de investigación surge desde la necesidad e interés de determinar el papel que juegan las emisiones de las aguas del Océano Pacífico Mexicano en la formación de nubes mixtas y por lo tanto en el ciclo hidrológico. Algunos estudios sugieren que la presencia de partículas biológicas marinas como las diatomeas pueden facilitar la formación de cristales de hielo dentro de las nubes; sin embargo, este fenómeno ha sido poco estudiado en las aguas del Pacífico Mexicano. Para poder evaluar el impacto que tiene el fitoplancton marino en la concentración de INPs, se realizó la recolección de muestras de microcapa superficial del océano (SML, por sus siglas en inglés) y de aguas subsuperficiales (SSW, por sus siglas en inglés), las cuales se encuentran a 5m de profundidad en el océano Pacífico Mexicano (Manzanillo, Colima). La recolección de muestras se realizó los días 6 de abril del 2022 y 9 de abril del 2022, en un transecto paralelo de 10 km de longitud, a bordo de una embarcación con motor fuera de borda. El análisis de INPs en las muestras recolectadas se realizó por medio de la técnica de congelación por inmersión, con ayuda del sistema DFA-UNAM, con el objetivo de determinar su eficiencia de congelación en periodos de alta y baja producción de fitoplancton.

Los resultados obtenidos de las muestras de las SML presentaron una mayor eficiencia para catalizar hielo en contraste con las muestras de la SSW. Así mismo las muestras de la SML obtenidas el día 6/04/22 presentaron una mayor eficiencia para catalizar la congelación debido a la materia orgánica presente en la SML durante ese día. En contraste las curvas obtenidas el día 9/04/22 mostraron que hubo una menor eficiencia congelación.

Por otro lado se encontró que la cantidad de oxígeno disuelto presenta una correlación positiva con la eficiencia de congelación tanto para las muestras de SML como para las muestras de SSW. La temperatura superficial del océano presenta una correlación positiva con la eficiencia de congelación de las muestras SML únicamente. Por último se realizó una comparación con las aguas del Golfo de México, encontrando que las aguas del Pacífico Mexicano presentaron una menor eficiencia en comparación con estas.

Marco teórico

1.1. Aerosol atmosférico

Un aerosol se define como un sistema disperso de partículas sólidas o líquidas suspendidas en un gas portador, en este caso, aire (Lohmann et al., 2016). Las partículas suspendidas en la atmósfera afectan directa e indirectamente el balance radiativo y el clima de la tierra (Horvath, 1993).

Las partículas de aerosol pueden modificar el clima debido a la interacción que tienen tanto con la radiación de onda corta (radiación solar o visible) como de onda larga (infrarroja). Dado que estas partículas pueden difractar, reflejar, dispersar o absorber la radiación que incide sobre ellas, son capaces de modificar tanto la intensidad como la dirección de la radiación que reciben (Penner et al., 2001). La variabilidad espacial y temporal del aerosol es un factor importante para los impactos del clima, y son esenciales para la formación y precipitación de las nubes, lo que influye directamente en el ciclo hidrológico regional (Boucher et al., 2013). También las partículas de aerosol pueden modificar las propiedades microfísicas de las nubes y duración (Lohmann, 2016).

1.1.1. Tipos y Características de un aerosol

Las partículas de aerosol se pueden dividir en base a tres criterios: por tamaño, de acuerdo a su origen y de acuerdo a su proceso de formación.

Conforme a su distribución y tamaño de partícula, se dividen en:

- Modo de nucleación: Partículas con un diámetro menor a $0.02 \mu\text{m}$ en donde la

mayor concentración de partículas oscila entre tamaños de 5nm a 15 nm (Viana, 2003).

- Modo Aitken: Presentan tamaños típicos de 0.02 μm a 0.1 μm y pueden emitirse directamente a la atmósfera o pueden formarse en ella mediante el crecimiento de partículas de modo de nucleación (Viana, 2003).
- Modo de acumulación: Comprende partículas de tamaños entre 0.1 μm a 1 μm y ocupan la mayor densidad de número de partículas en la atmósfera (Kulmala et al., 2000).
- Modo grueso: Presentan tamaños mayores a 1 μm . Típicamente la fracción gruesa tiene una vida muy corta en la atmósfera y viaja solo unas pocas decenas de km antes de ser depositadas por gravedad (Viana, 2003).

Según su origen se dividen en:

- Aerosol primario: Las partículas primarias son aquellas que se emiten directamente a la atmósfera desde su fuente y proceden principalmente de los volcanes, la superficie oceánica, incendios forestales, polvo del suelo y ambientes biológicos (polen, hongos y bacterias).
- Aerosol secundario: Las partículas secundarias se forman por reacciones atmosféricas a partir de precursores gaseosos. Este proceso generalmente ocurre en la atmósfera por procesos químicos o fotoquímicos para formar especies poco volátiles que se condensan en partículas preexistentes o que forman nuevas partículas por nucleación (Salcedo, 2007).

Como se muestra en la **figura 1.1** las partículas del aerosol pueden tener origen natural o antropogénico. El aerosol natural hace referencia a las partículas que se forman o se emiten a la atmósfera por medio de procesos naturales, como emisiones volcánicas y partículas arrastradas por el viento (materia mineral y oceánica). El aerosol antropogénico actualmente constituye solo una pequeña fracción de la masa total del aerosol en todo el mundo (Cochran et al., 2017), es emitido por procesos industriales,

medios de transporte, quema de biomasa, agricultura, etc. Este trabajo esta enfocado en el estudio del aerosol marino con la finalidad de entender su importancia en la formación de partículas de hielo.

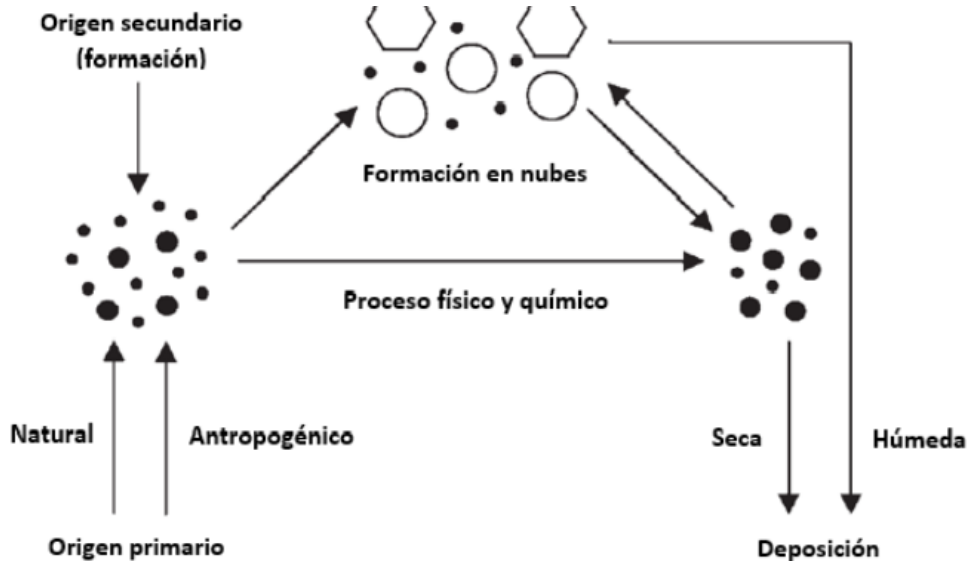


Figura 1.1: Ciclo general de las partículas de aerosol atmosféricas (Pöschl, 2005).

1.1.2. Aerosol de origen marino

El aerosol marino respecto a la cantidad total de emisiones es considerado el segundo de mayor importancia después de las partículas de tipo mineral, aportan el 38% del volumen de las emisiones globales (Collin, 2007). Su composición se basa principalmente en sales inorgánicas, materia orgánica y componentes biológicos (p.ej. virus, proteínas, bacterias y microalgas). No tiene una composición constante debido a que pueden llegar a tener reacciones que llegan a alterar sus propiedades químicas y físicas. La **figura 1.2** muestra los distintos tipo de aerosol según su origen, entre ellos el aerosol marino. El aerosol marino se puede clasificar en dos tipos:

- Sal marina producida por procesos mecánicos, cuyas concentraciones son dependientes de la velocidad del viento (De Leeuw et al., 2011).
- Sulfatos y especies orgánicas, de los cuales el DMS (dimetilsulfuro) producido por el fitoplancton, es un precursor para su formación en ambientes marinos. La

transferencia de DMS del mar a la atmósfera depende de dos variables importantes, depende de la velocidad del viento y de la diferencia de temperatura entre el mar y la atmósfera (De Leeuw et al., 2011).

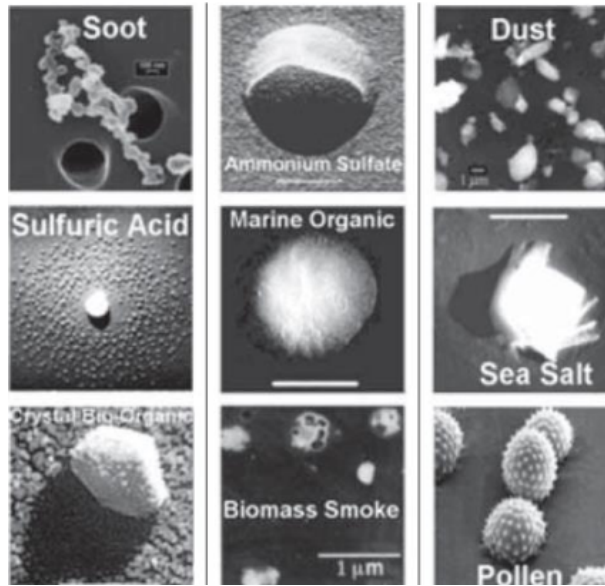


Figura 1.2: Diferentes tipos de aerosol (Heintzenberg et al.,2006).

Los océanos, la atmósfera y las nubes están interconectados a través de la liberación y depósito de especies químicas que brindan información crítica para controlar la composición de nuestra atmósfera y clima (Cochran et al., 2017). Muchos de los procesos que controlan la composición del aerosol marino desempeñan un papel importante en la regulación de la química atmosférica y el clima. Su tamaño varía desde 0.1 a 100 μ permitiendo su dispersión a grandes distancias o sedimentar inmediatamente (Charlson et al., 1987). El aerosol marino contribuye significativamente a la carga global de aerosoles, y en consecuencia tiene una participación en la formación de nubes bajas (De Leeuw, 2011).

1.1.3. Composición del aerosol marino

Existen dos tipos de aerosol, uno es formado por la incidencia de los vientos sobre la superficie del océano, compuesto principalmente por sal marina e iones inorgánicos (Na, Mg, Ca, KC, Cl, SO_4) y el otro tipo de aerosol está compuesto por material orgánico (carbohidratos, lípidos, microorganismos, virus marinos, microalgas) (Orellana et al., 2011).

Se ha demostrado que el papel de las bacterias heterótrofas es uno de los principales impulsores de la química del aerosol marino, controlando los tipos y la cantidad de material orgánico transferido del agua de mar a la atmósfera en forma de aerosol marino (Prather et al., 2013). Combinados todos estos factores se crea un listado de partículas primarias de aerosol marino que son diversas en composición molecular, estado de mezcla, morfología y reactividad (Wilson et al., 2015).

Otro aspecto importante son las reacciones heterogéneas secundarias que pueden transformar aún más la composición química y las propiedades relacionadas con el aerosol marino naciente (Orellana et al., 2011).

1.1.4. Microcapa superficial del océano (SML)

La microcapa superficial del océano (SML, por sus siglas en inglés) en oceanografía es de gran importancia ya que tanto el viento, como la acción de movimientos de superficie como son las olas, pueden causar la mezcla turbulenta, la cual confiere características únicas al agua oceánica ya que están formados por distintas masas de agua con propiedades particulares (Terray et al., 1999). La SML también se define como la superficie de 1 a 1000 μm que tiene propiedades físicas, químicas y biológicas diferentes al océano subyacente (Hunter, 1997)

1.1.5. Composición de la SML

La SML está enriquecida con materia orgánica, iones y microorganismos (Cunliffe et al., 2013). Generalmente está compuesta de una película orgánica natural de lípidos y polisacáridos que actúan como tensoactivos (Cunliffe et al., 2013). Además de bac-

terias, hongos, actinomicetos y virus, como los podemos observar en la **figura 1.3**. La importancia de la SML radica en la cantidad de micro y macro procesos que suceden en ese estrato, que además sirven como fuente y sumidero de materiales en la atmósfera y la columna de agua (Hardy, 1997).

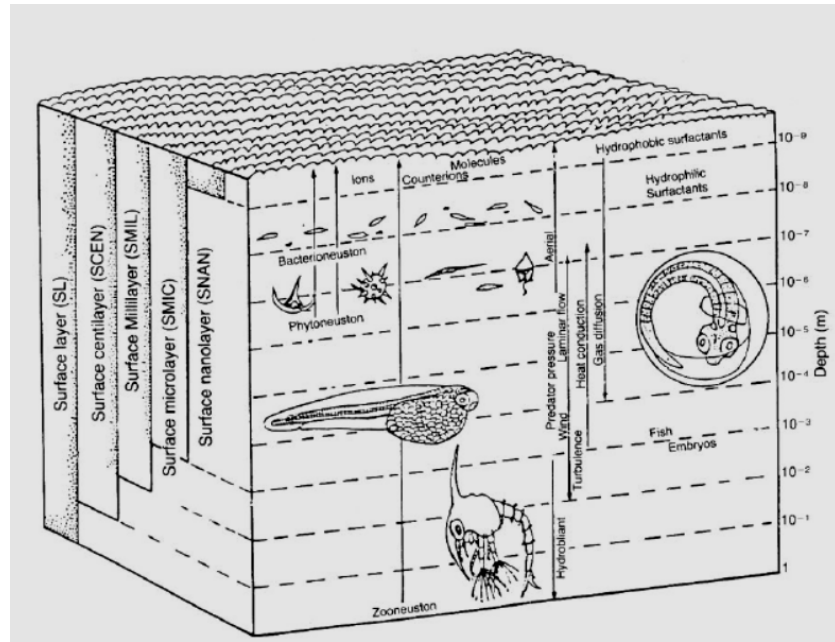


Figura 1.3: Clasificación conceptual de la capa superficial del océano (Hardy, 1997).

1.1.6. Fenómeno de Surgencias

Las surgencias (upwelling en inglés) son movimientos ascendentes de agua subsuperficial de baja temperatura y rica en nutrientes en la superficie (Pisoni et al., 2014). Este fenómeno normalmente se mantiene en un periodo de días a semanas y causa el ascenso de masas de agua de profundidad de aproximadamente 100 m o más (Chapman, 2016). Estos eventos ocurren generalmente cuando los vientos que fluyen paralelos a la costa empujan el agua de la superficie hacia el mar abierto, que en combinación con la rotación de la Tierra y el transporte de Ekman, dan como resultado que el agua subsuperficial asciende y reemplaza el agua que se ha alejado, provocando que la temperatura superficial del mar disminuya (Chapman, 2016). En la **figura 1.4** podemos observar como las aguas superficiales son reemplazadas por aguas frías ricas en nutrientes. Las

condiciones son óptimas para afloramientos cuando los vientos soplan a lo largo de la costa (Lara-Lara et al., 2008). Es importante recalcar que existe una diferencia entre afloramiento y surgencia, un afloramiento es la generación de biomasa fitoplanctónica, que se da gracias a los procesos fotosintéticos, posterior a estos procesos el fitoplacton fija los nutrientes que vienen de aguas frías y de mayor profundidad.

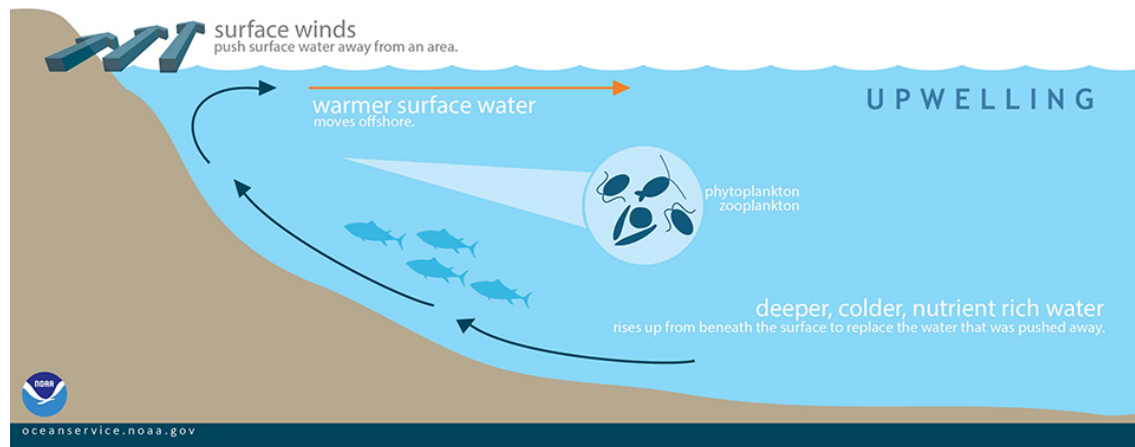


Figura 1.4: Esquema que ejemplifica el fenómeno de surgencia en el hemisferio norte (National Oceanic and Atmospheric Administration, 2016).

En el Océano Pacífico Mexicano encontramos importantes zonas de surgencias costeras que están asociadas a centros de alta presión atmosférica. En la **figura 1.5** se muestran las áreas grises más oscuras como las áreas de surgencias y afloramientos presentes en México, existen surgencias y afloramientos en las costas de Baja California, en el Golfo de California, en Cabo Corrientes, el Golfo de Tehuantepec y en la Península de Yucatán, todas causadas por mecanismos diferentes.



Figura 1.5: Áreas de surgencias y afloramientos en México indicadas con color gris oscuro (Lara-Lara et al., 2008)

1.1.7. Producción de fitoplancton

El fitoplancton es la puerta de entrada de la energía solar en el ecosistema pelágico y la base de su mantenimiento. En ocasiones la energía potencial de la materia orgánica sintetizada por las algas no es utilizada por los animales sino hasta después de dar un largo rodeo a través de detritos, materia orgánica disuelta o bacterias, que pasan la materia disuelta a la forma particulada con un 30 ó 40 % de eficiencia (Berdalet et al., 2017).

Las diátomeas son conocidas por ser uno de los grupos de organismos fitoplanctónicos que más cantidad de sílice absorben, son importantes en este proceso ya que posteriormente de absorber el sílice, bioprocesan en estructuras útiles como exoesqueletos o frústulas. Tras la muerte celular, las frústulas liberan material silíceo en la columna de agua, que posteriormente se trasfiere al aerosol marino (Charlson et al., 1987). Los sacáridos que se encuentran en la SML y en el aerosol marino, se encuentran en forma polimérica u oligomérica y pueden existir polisacáridos celulares como laminarina, crisolaminarina, quitina, ácido algínico y dextrosa (Cochran et al., 2017). Tras la muerte del fitoplancton, se liberan formas particuladas de lípidos, polisacáridos y material silíceo en el agua de mar. La digestión de enzimas autótrofas libera ácidos

grasos de lípidos de orden superior mientras genera fragmentos más pequeños de poli y oligosacáridos celulares (Cochran et al., 2017). En la **figura 1.6** podemos observar las vías microbianas que nos llevan a la diversidad de partículas en el aerosol marino. Las vías de degradación de las diatomeas y también de las bacterias dan lugar a especies orgánicas que se transportan del agua del mar al aerosol marino en forma de película o gotas (Cochran et al., 2017).

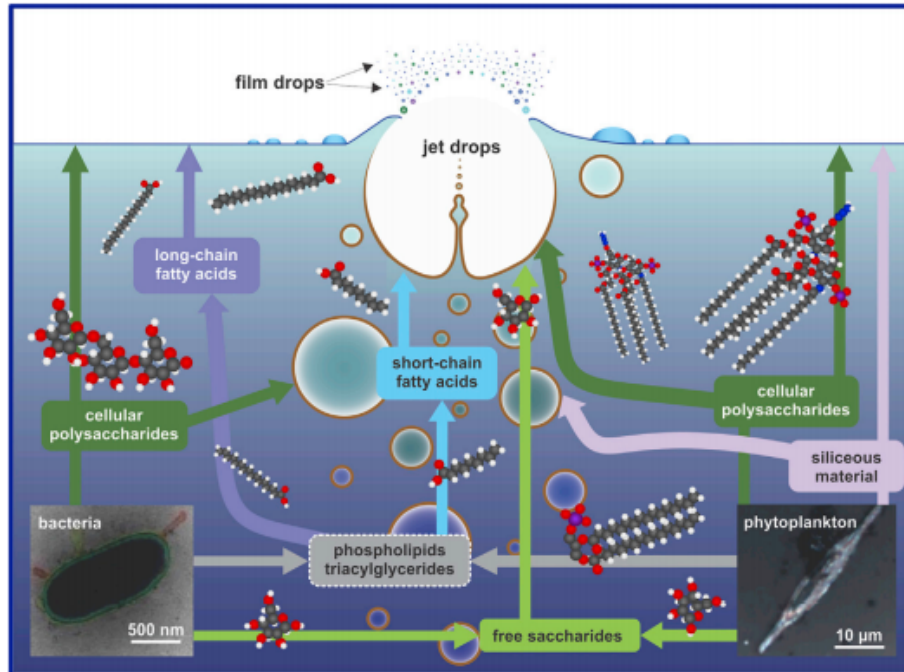


Figura 1.6: Vías microbianas que contribuyen a la diversidad de partículas en el aerosol marino (Cochran et al., 2017).

Las bacterias heterótrofas contribuyen aún más con ácidos grasos y fragmentos de sacáridos a través de la digestión enzimática eficiente del fitoplacton. La degradación heterótrofa de polisacáridos en fragmentos de oligosacáridos más pequeños también nos ayuda a explicar el aumento en la fracción de partículas de tipo polisacárido en el aerosol marino antes y después del pico en concentración de fitoplancton (Jayarathne et al., 2016). Muchas de estas vías como fuentes biológicas de las moléculas se centran en el papel principal de los procesos de degradación heterotrófica dentro de las células bacterianas y fitoplanctónicas (Cochran et al., 2017).

Las diatomeas y los dinoflaelados son los dos grupos más dominantes y diversos en el

fitoplancton en los mares de México; presentan una gran diversidad morfológica y funcional, en su mayoría son unicelulares, pero algunos forman colonias o pseudo-colonias (Gómez, 2011). Estas especies son componentes importantes del plancton, tanto en aguas continentales como en aguas marinas. En el Golfo de México las diatomeas son los organismos más abundantes y representan el 50% del fitoplancton presente (Hernández-Becerril, 2014).

Por otro lado el grupo de las cianobacterias, juegan un papel importante en los procesos ecológicos marinos de la microcapa superficial del océano y se han reconocido especies de los géneros *Prochlorococcus* y *Synechococcus* (Hernández-Becerril, 2014). En el océano Pacífico el cuál es nuestra área de interés las especies de microalgas abundantes son: *Micromonas pusilla*, *Nphroselmis olivacea*, *Pyramimonas orientalis*, *P.coradata* y *Resultor mikron*. (Hernández-Becerril, 2014).

1.1.8. Aerosol de origen antropogénico

Las partículas de aerosol antropogénicas provienen principalmente de la quema de combustibles, quema de basura y/o actividades industriales. De manera similar a las partículas de origen natural también podemos encontrar material particulado mineral, pero en este caso es producido por actividades tales como la construcción, la demolición o la agricultura (EPA, 2009). Las principales fuentes antropogénicas son:

Procesos industriales: Los compuestos de azufre como SO_2 son liberados generalmente por la quema de combustibles fosiles en el sector industrial (Tan et al., 2002).

Transporte: Los medios de transporte son una fuente importante de aerosol antropogénico. En su mayoría liberan monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2), óxidos de nitrógeno (NO_x), carbono elemental (CE) y algunos metales pesados (Wang et al., 2016).

Las emisiones agrícolas: Se deben a procesos mecánicos como el polvo arrastrado por el viento en terrenos de cultivo y caminos rurales, procesos como la cosecha y la inclinación de los terrenos de cultivo influyen en la liberación de aerosol agrícola (Claiborn, 2006).

1.2. Nubes

Las nubes son uno de los elementos más importantes del sistema atmosférico y desempeñan varios papeles clave (Seinfeld, 1992). Un pequeño cambio en los parámetros de las nubes puede amplificar o compensar significativamente las perturbaciones de la temperatura en el sistema climático debido al aumento del CO_2 y otros gases de efecto invernadero (Seinfeld, 1992). La importancia de la cubierta nubosa radica en que las nubes tienen efectos sobre el balance energético de la Tierra y el ciclo hidrológico. Las nubes dependen de procesos microfísicos que abarcan la formación de gotas de nubes, cristales de hielo y diferentes tipos de precipitación (Lohmann et al., 2016). Para que una nube sea visible las gotas o cristales de hielo que la conforman deben estar en grandes concentraciones (Lohmann et al., 2016).

1.2.1. Definición de las nubes

Las nubes son un agregado de gotas líquidas, cristales de hielo, o una combinación de ambos suspendidas en el aire. Las nubes se forman cuando el aire se vuelve ligeramente sobresaturado con respecto al agua líquida (o en algunos casos con respecto al hielo) (Lohmann et al., 2016). El medio más común por el cual esto se logra en la atmósfera es a través del ascenso de parcelas de aire, lo que resulta en la expansión y enfriamiento del aire por debajo de su punto de rocío (Albrecht, 1989).

Las nubes son un componente importante de la atmósfera que se debe tomar en cuenta en los estudios que involucren modelos climáticos. La superficie ocupada por las nubes es un factor de relevancia climática debido a que juegan un papel decisivo en el balance radiativo, la distribución de la humedad y la precipitación (Stocker et al., 2013).

1.2.2. Clasificación de las nubes

Las nubes se clasifican según su apariencia cuando se ven desde la superficie de la Tierra. Las formas básicas son:

- Las nubes cirrus: Son altas, blancas y delgadas. Forman delicados parches en forma de velo, y a menudo tienen un aspecto plumoso; cabe notar que cirrus significa filamento en latín (Lohmann et al., 2016).
- Las nubes cumulus: Consisten en masa de nubes globulares que a menudo se describen como de apariencia algodonosa. Normalmente, los cumulos exhiben una base plana y aparecen como cúpulas o torres ascendentes (Cumulus significa montón en latín). Las nubes cumulus se forman dentro de una atmósfera inestable donde hay algo de convección y aire ascendente (Lohmann et al., 2016).
- Las nubes stratus: consisten en láminas o capas (estratos) que cubren gran parte de cielo. Cuando los estratos cubren todo el cielo, se torna gris y puede no tener ninguna estructura. En contraste con las nubes cumulus, las nubes stratus suelen formarse por movimientos verticales a gran escala en aire estáticamente estable (Rogers, 1978).

Todas las nubes tienen al menos una de estas tres formas básicas y algunas son una combinación de ellas. Por ejemplo, las nubes stratocumulus son en su mayoría en forma de láminas compuestas de largos rollos paralelos (Lutgens y Tarbuck, 2014).

El segundo aspecto de la clasificación de las nubes es la altura a la cual se forman y se reconocen tres niveles: alto, medio y bajo, como se muestra en la **figura 1.7**.

- Las nubes altas se forman en la región más fría de la tropósfera y normalmente tienen sus bases por encima de los 6000 metros (Inoue, 1987). Las temperaturas de estas altitudes suelen estar por debajo del punto de congelación, por lo que las nubes altas generalmente están compuestas por cristales de hielo (Lutgens y Tarbuck, 2014).
- Las nubes medias ocupan alturas de 2000 a 6000 metros y pueden estar compuestas por gotas de agua superenfriadas o por cristales de hielo según la época del año y el perfil de temperatura de la atmósfera (Lutgens y Tarbuck, 2014).

- Las nubes bajas se forman más cerca de la superficie de la tierra, hasta una altitud de 2000 metros, y generalmente están compuestas por gotas de agua. Estas altitudes pueden variar un poco según la estación del año y la latitud (Lutgens y Tarbuck, 2014). Por ejemplo, en latitudes altas (hacia los polos) y durante los meses fríos de invierno, las nubes altas generalmente ocurren en altitudes más bajas (2000 m) (Lutgens y Tarbuck, 2014).

Las nubes de desarrollo vertical se extienden para abarcar un rango mayor de altura, presentan un gran tamaño con un aspecto masivo. Presentan una base horizontal y en la parte superior protuberancias verticales de gran tamaño que se deforman continuamente. Los topes suelen estar entre 8 y 14 km de altura. Se forman en situaciones de alta inestabilidad atmosférica (Lutgens y Tarbuck, 2014).

De acuerdo a la fase en la que se encuentran se clasifican en nubes cálidas, que están compuestas por agua líquida y las nubes frías que están compuestas de hielo y agua líquida superenfriada (Lohmann et al., 2016). Se ha observado mediante satélites que la precipitación de este tipo de nubes se encuentra predominante en la Zona de Interconvergencia Tropical (ITCZ) (Lohmann et al., 2016).

Las nubes frías pueden estar compuestas principalmente por partículas de hielo ó pueden ser de fase mixta, es decir que están compuestas por hielo y agua líquida superenfriada. Un ejemplo de nubes de fase mixta son las nubes cumulonimbus, que están formadas por gotas de agua en la base y a medida que aumenta la altura de la nube cambia a cristales de hielo (Lamb y Verlinde, 2011). La manera más fácil para la formación de nubes de hielo en función de la temperatura y humedad relativa, es mediante partículas de aerosol capaces de catalizar la formación de hielo dentro de la nube (Kanji et al., 2017).



Figura 1.7: Representación de los principales grupos de nubes de acuerdo a la Organización Meteorológica Mundial (Adaptación del International Cloud Atlas, 2017)

1.2.3. Nubes frías

El hielo en las nubes frías se forma por dos procesos principales denominados nucleación homogénea y nucleación heterogénea. La nucleación homogénea se logra con la presencia de una sustancia única por aglomeraciones moleculares; y la nucleación heterogénea se logra por la presencia de ciertas partículas de aerosol que catalizan el cambio de fase (INPs) a temperaturas más cálidas que la nucleación homogénea (Kanji et al., 2017). Los cristales de hielo que influyen en la lluvia fría pueden formarse a través de dos procesos, por nucleación homogénea, la cual ocurre a temperaturas menores a -38°C y humedad relativa respecto al hielo mayor a 140 %; o por la nucleación heterogénea en la cuál el proceso puede ocurrir a temperaturas mayores a -38°C y humedad relativa respecto al hielo (RH_i) menores a 140 % (Kanji et al., 2017).

Las nubes frías son de suma importancia debido a que además de proporcionar la mayor precipitación en la ITCZ, en los océanos de latitudes medias, y en general, en todos los continentes, las nubes frías también tienen influencia en el forzamiento radiativo

(Mülmenstädt et al., 2015).

1.2.4. Nubes mixtas

La microfísica y formación de este tipo de nube es de las más complicadas debido a que la fase condensada del agua no es homogénea en toda la nube (Seifert et al., 2011). Su precipitación puede ser convectiva y esta se da debido a corrientes de aire que causan un ascenso del aire caliente, que pueden arrastrar gotas de lluvia dentro de la nube y llevarlas a alturas con temperaturas significativamente frías muy por debajo de los 0°C (Mülmenstädt et al., 2015). Este tipo de nube se forma generalmente en condiciones por arriba del 100 % de RH_i, con temperaturas aproximadas entre -38°C y 0°C (Tobo, 2016).

1.2.5. Importancia e influencia de la nubes mixtas en el sistema climático

La nubes mixtas son importantes en el sistema climático de la Tierra debido a que tienen una gran influencia en la regulación de la temperatura del planeta debido al papel que juegan en el balance radiativo reflejando la radiación solar (radiación de onda corta) de regreso al espacio, de esta manera es menor la cantidad de radiación que llega a superficie, a este efecto lo conocemos como efecto albedo de las nubes (Penner et al., 2001).

Otro aspecto importante es que las nubes generan un efecto de invernadero. En la **figura 1.8** podemos observar el proceso en donde se absorbe parte de la energía que es emitida en la superficie terrestre (radiación de onda larga) y una parte de este es reemitida de vuelta, debido a este proceso se provoca un calentamiento (Lohmann et al., 2016).

Si nos enfocamos principalmente en la nubes de fase mixta, podemos decir que la precipitación de estas nubes es altamente estacional y debido a esto son muy importantes porque dominan la precipitación sobre los océanos latitudinales, en la zona de convergencia intertropical (ITCZ) y continentes (Mülmenstädt et al., 2015). El 60 % de

la precipitación total es iniciada por nubes mixtas, estas nubes controlan de manera importante el intercambio de agua entre el océano y los continentes (Lohmann et al., 2006). Por otro lado las nubes mixtas proveen distintas formas de precipitación, puede ser líquida o sólida (lluvia, nieve, llovizna, granizo), siendo así un factor determinante en la regulación del ciclo hidrológico (Lamb y Verlinde, 2011). La influencia de la nubes mixtas tiene un efecto directo en el desarrollo socio económico, en actividades como la agricultura y la ganadería y en los ecosistemas continentales (Lamb y Verlinde, 2011).



Figura 1.8: Balance radiativo de la Tierra. Tomada de: (www.meteorologiaenred.com/la-radiación-solar.html)

1.2.6. Nucleación heterogénea

Es el proceso de nucleación dominante en las nubes de fase mixta y en las nubes cirrus (Lohmann et al., 2016). La presencia de CCN (núcleos de condensación de nube por sus siglas en inglés), son partículas microscópicas presentes en la atmósfera que facilitan la formación de las gotas de nube (Haywood y Boucher, 2000). Para que esto suceda, el aire húmedo en la atmósfera al enfriarse debe alcanzar una humedad relativa próxima al 100 %, bajo estas condiciones los CCN empiezan a actuar como un centro de condensación (Clarke et al., 2006). Si el ascenso continúa, el sobreenfriamiento ocasionará niveles de sobresaturación, este nivel es alcanzado al superar el 100 % de humedad relativa y se agota por condensación sobre los núcleos (Clarke et al., 2006). Las partículas nucleantes de hielo son partículas de aerosol que proporcionan una superficie sobre la cuál es probable que las moléculas de agua se absorban, se unan y formen agregados con una estructura similar al hielo (Lohmann et al., 2016).

La nucleación puede ocurrir en casi cualquier ambiente si se cumple con ciertas condiciones: Una fuerte corriente de vapor condensable, alta intensidad de radiación UV, distribución moderada de aerosol y alta humedad relativa (Verheggen, 2006). En la **figura 1.9** podemos observar las diferentes trayectorias para la nucleación heterogénea del hielo en la atmósfera.

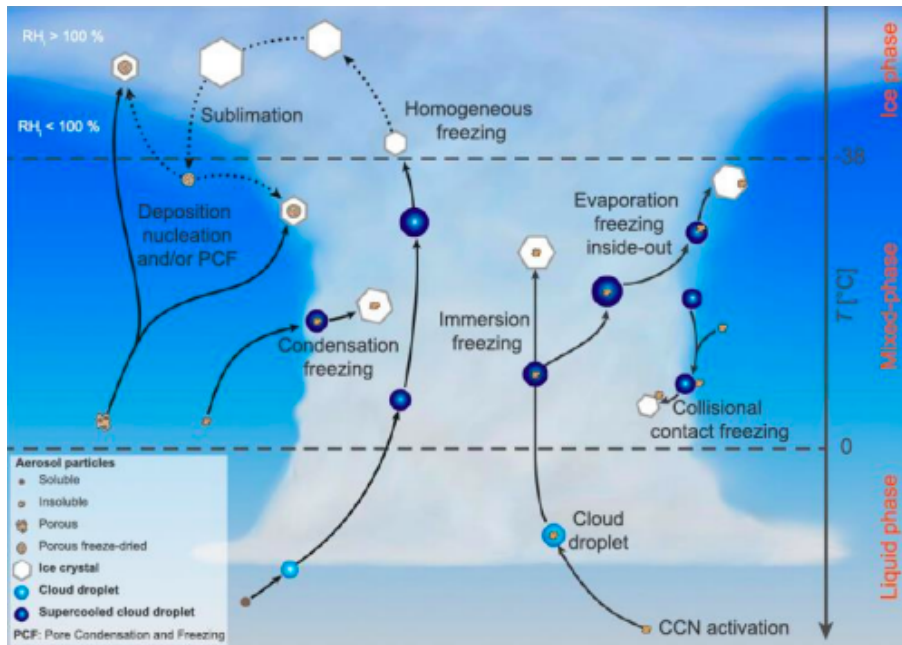


Figura 1.9: Trayectorias para la formación de hielo en la atmósfera, se muestran los modos de nucleación heterogénea y homogénea (Kanji et al., 2017)

La partícula de aerosol puede catalizar la formación del hielo de diferentes maneras, dependiendo de las condiciones ambientales y el tiempo de vida de la nube (Rogers, 1978). Puede hacerse por contacto, condensación, depósito o inmersión.

- Congelación por contacto: Se da cuando la partícula colisiona con una gota de nube súperenfriada y en la interfaz agua, aire y partícula se forma el embrión del cristal de hielo (Ladino et al., 2013).
- Congelación por depósito: En este mecanismo de nucleación el agua líquida está ausente. El hielo se nuclea de vapor supersaturado con respecto al hielo (RH_i mayor al 100 %) directamente sobre un INP (Kanji et al., 2017). La nucleación por depósito suele ocurrir a temperaturas muy bajas.
- Congelación por inmersión: El INP puede actuar como CCN durante la formación de una nube a temperaturas cercanas a 0°C (Kanji et al., 2017), ó puede sumergirse en una gota ya formada y quedar inmerso en ella. Conforme esta gota ascienda a niveles más altos y disminuya la temperatura de la nube, se favorecerá la formación de hielo (Kanji et al., 2017). Este método de congelación es el más

relevante para la formación de hielo en las nubes de fase mixta (Tobo, 2016).

- Congelación por condensación: El inicio de la congelación es simultánea con la formación inicial de una gota líquida sobre un CCN a temperaturas superenfriadas, en este modo la conversión gas-líquido se da a temperatura por debajo de los 0°C (Kanji et al., 2017). En este proceso el vapor de agua se condensa en el INP e inmediatamente se congela formando el cristal de hielo.

1.3. INPs

Los INPs son partículas de aerosol que tienen la capacidad de reducir drásticamente la barrera energética para la nucleación del hielo, logrando que cristales de hielo se formen a temperaturas mayores a -38°C pudiendo llegar a temperaturas cercanas a los 0°C (Lohmann et al., 2016; Kanji et al., 2017) y $\text{RH}_i < 140\%$. Mientras mayor sea la temperatura a la que inicia la formación del cristal de hielo debido al INP, éste será considerado más eficiente.

1.3.1. Propiedades de los INPs

Hasta el momento no se conoce con suficiente detalle qué propiedades exactamente hacen un INP eficiente (Kanji et al., 2017). Sin embargo se han propuesto algunas propiedades fisicoquímicas que pueden definir a un buen INP, entre ellas esta su estado físico, solubilidad, epitaxia, tamaño y sus sitios activos (Lohmann et al., 2016; Pruppacher, 1997).

- Tamaño y sitios activos: Los sitios activos hacen referencia a grietas o cavidades que se encuentran en la superficie de una partícula donde puede desencadenarse la nucleación del hielo. Mientras mayor sea el área superficial de una partícula mayor será la cantidad de sitios activos que contenga. El diámetro de partícula con el que cumple la mayoría de los INPs para las nubes mixtas es mayor a $500\ \mu\text{m}$ (Kanji et al., 2017).

- **Higroscopicidad:** Es la afinidad que tiene la partícula a las moléculas de agua. Especies químicas como los grupos hidroxilo ayudan a catalizar el proceso de nucleación en el modo de inmersión. De igual manera, la presencia de grupos hidroxilo es importante porque es capaz de enlazar el hidrógeno con las moléculas de agua. También compuestos biológicos altamente higroscópicos como las proteínas presentes en membranas celulares de algunos organismos son los responsables de catalizar el hielo (Lohmann et al., 2016).
- **Epitaxia:** Forma en la que los átomos o moléculas de un cristal se acomodan. La estructura cristalina puede aportarle la capacidad a una partícula de actuar como un INP. Una partícula con una estructura cristalina similar a la del hielo es un INP potencial (Lohmann et al., 2016).
- **Solubilidad:** Las partículas de aerosol que presentan una superficie sólida e insoluble tienen la capacidad de reducir drásticamente la barrera energética para la nucleación del hielo, dado que la superficie sólida permite que un embrión de hielo alcance el radio crítico con un menor número de moléculas de agua en la fase de hielo (Lohmann, et al., 2016; Kanji et al., 2017).

La mayoría de los INPs encontrados son insolubles, como el polvo mineral o el carbono negro. Sin embargo partículas solubles como el sulfato de amonio, cloruro de sodio o microorganismos también han sido reportadas como INPs bajo ciertas condiciones específicas (Kanji et al., 2017).

1.4. Aerosol marino como INP

Como se puede observar en la **figura 1.10** el aerosol marino contiene una gran cantidad de materia orgánica que es emitida a la atmósfera durante el rompimiento de burbujas de aire en la SML. Las burbujas van en ascenso y retiran material orgánico de la columna de agua. Gracias a este proceso se forma la SML enriquecida de material

orgánico, que después pasa a la atmósfera siendo inyectada por las burbujas durante su rompimiento (Wilson et al., 2015)

Hasta ahora, gran parte del enfoque en el aerosol marino se ha centrado en la producción de aerosol a partir de sulfatos de sal marina; sin embargo se ha demostrado que los procesos de producción de aerosol marino también involucran la presencia de cloruro de sodio y especies biológicas. La materia orgánica puede mejorar la concentración de gotas de nubes y es un componente importante del sistema de retroalimentación aerosol-nube-clima que involucra a la biota marina (Cochran et al., 2017).

Las partículas de aerosol marino pueden influir en la formación de nubes cirrus y nubes de fase mixta debido a que una fracción de estos puede actuar como INP, lo que facilita la formación de cristales de hielo a través de diferentes vías heterogéneas de nucleación de hielo (Wilson et al., 2015; Ladino et al., 2019).

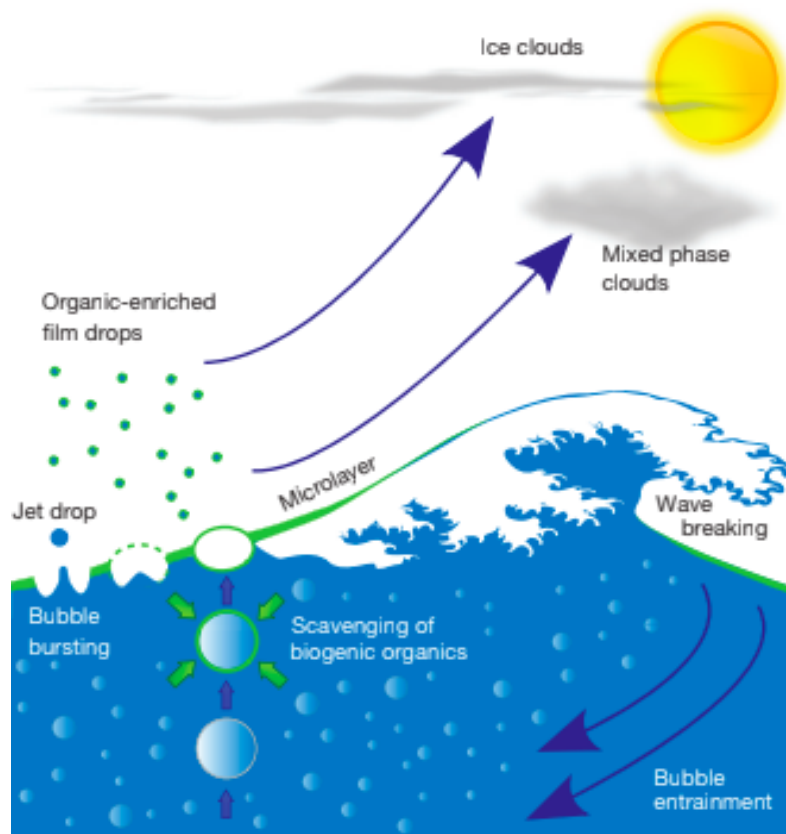


Figura 1.10: Formación del aerosol marino enriquecido con materia orgánica (Wilson et al., 2015).

El aerosol marino tiene la capacidad de actuar como INP, la interacción entre especies orgánicas e inorgánicas conducen a propiedades estructurales que favorecen la nucleación del hielo (Wilson et al., 2015). Se ha demostrado que durante afloramientos de fitoplancton y comunidades microbianas la composición del aerosol marino cambia, además de aumentar su eficiencia como INP (Charlson et al., 1987; Ladino et al., 2022).

1.5. Motivación del trabajo

Este trabajo de investigación surge desde la necesidad e interés de determinar el papel que juegan las emisiones de las aguas del Océano Pacífico en la formación de nubes mixtas y por lo tanto en el ciclo hidrológico. Algunos estudios como el de Wilson et al. (2015) sugieren que la presencia de partículas biológicas por actividad fitoplanctónica pueden facilitar la formación de cristales de hielo dentro de las nubes; sin embargo, este fenómeno ha sido poco estudiado en las aguas del Pacífico, y aún menos en el Pacífico tropical. Para lograr este objetivo se utilizó el sistema DFA-UNAM (Droplet Freezing Assay). Se realizó una parte del proyecto en campo para la recolección de muestras de agua marina y los experimentos para analizar las habilidades nucleadoras se llevaron a cabo en el laboratorio. Los resultados fueron comparados con el estudio realizado por Ladino et al., (2022) el cuál evalúa la capacidad de nucleación de hielo de las muestras de SML y las aguas subsuperficiales (SSW) del Golfo de México. En este proyecto no se realizó análisis de composición química ni biológica de las muestras, ya que se trato de complementar información de trabajos previos, aportando datos sobre las habilidades nucleadoras de las aguas del Pacífico Mexicano.

1.6. Hipótesis

Las muestras colectadas en presencia de alta producción de fitoplancton presentan una alta eficiencia como INPs en comparación con las muestras colectadas en presencia de baja producción de fitoplancton.

1.7. Objetivos

1.7.1. Objetivo general

Determinar la eficiencia de congelación de las muestras colectadas en el Pacífico (Manzanillo, Colima) entre zonas de alta y baja producción de fitoplancton, así como los factores físicos que pueden afectar la concentración de INPs.

1.7.2. Objetivos particulares

- Obtener la temperatura de congelación de las muestras de la SML y de SSW colectadas en Manzanillo Colima con ayuda del sistema DFA-UNAM
- Cuantificar la eficiencia de congelación y la concentración de INPs de las muestras de SML y de SSW en periodos de baja y alta producción de fitoplancton.
- Establecer un patrón de comportamiento de la capacidad de congelación de las muestras de SML y SSW.
- Comparar la capacidad de congelación de las muestras obtenidas en el Pacífico Mexicano con muestras de estudios previos obtenidas en el Golfo de México.

Metodología

2.1. Sitio de muestreo

El sitio de muestreo seleccionado se situó en el Pacífico Mexicano, un transecto paralelo a la costa de la Bahía de Santiago, en el municipio de Manzanillo, Colima (**figura 2.1**) ($19^{\circ}07'08''\text{N}$ $104^{\circ}22'57''\text{O}$). Manzanillo se ubica al oeste sobre la costa del Pacífico en la región occidente de México, con una superficie de $5,455 \text{ km}^2$, limita al N y al E con el Estado de Jalisco, al SE con Michoacán y al S y W con el Océano Pacífico y la mayor parte de su territorio se encuentra sobre la Sierra Madre del Sur y el Eje Neovolcánico. Está constituido por numerosas bahías y lagunas costeras (SEMAR, 2015) y cuenta con una población de 159,853 habitantes (INEGI, 2020).

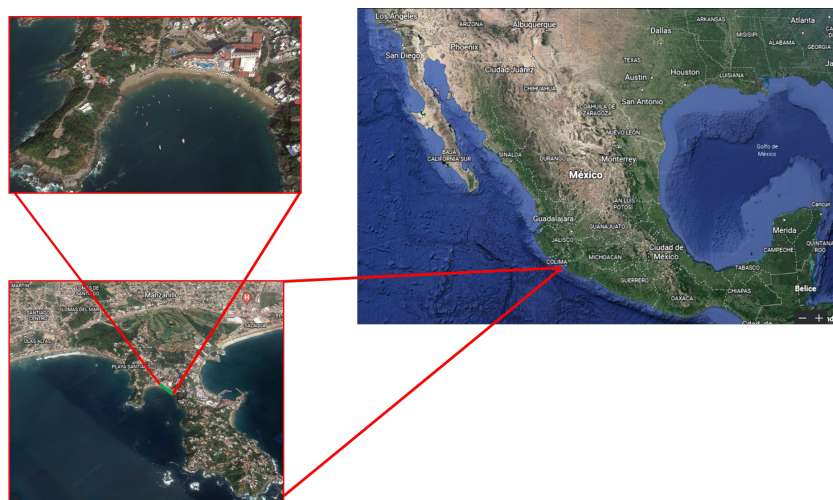


Figura 2.1: Localización del sitio de muestreo. Bahía de Santiago, Manzanillo, Colima (Google maps).

2.1.1. Descripción general del área de estudio

La bahía de Santiago se abre hacia el sur. Está limitada al Oeste por la Punta de Juluapan y al Este por la Punta de Santiago (Lancin, 1997). Su profundidad es de 3.6 km y su envergadura máxima es de 5 km de un extremo a otro de la playa (Lancin, 1997). Está formada por rocas volcánicas, especialmente de andesitas con un estado de descomposición superficial avanzado (Pinot, 1969).

Agentes dinámicos: Oleaje, vientos y presencia de corrientes

La región de Manzanillo tiene un régimen de olas largas y altas, las olas de este tipo son oscilatorias (Lancin, 1997). Dada la orientación de la bahía de Santiago, el oleaje con mayor energía proviene del Sur, los vientos dominantes provienen del Oeste-Noreste (46.6% de las horas de viento), los vientos del Este y Sur-Sureste (9.4%), los del Noreste (7%), Sureste (6.8%) y del Sur (1.8%) (SEMAR, 2019). Los vientos dominantes en Manzanillo alcanzan una velocidad media anual de 4.38 m/s y 4.77 m/s (SEMAR, 2019).

Sus aguas se encuentran influenciadas mayoritariamente por las condiciones cálidas impulsadas por la Corriente Ecuatoriana a través de la masa de agua de la Corriente Tropical Superficial, esto cambia en la interfase de invierno a primavera cuando la zona se ve influenciada por la parte limítrofe sureña de la Corriente de California entre enero y marzo. En 2020, la temperatura superficial del mar (TSM) promedio fue en abril 27.8°C, en mayo 29.8°C y de junio a diciembre se presentaron las temperaturas más altas de 30.5°C a 31.3°C. Para enero-abril 2007, las TSM se mantuvieron entre los 27.6°C y 28.2°C (SEMAR, 2019).

Las corrientes superficiales aproximadamente 15 millas mar adentro no pueden ser fácilmente entendidas dado que la configuración del fondo marino y la línea costera, influyen en la dinámica en áreas someras menores de 200 metros de profundidad; así como los procesos turbulentos que se dan en la confluencia de las corrientes superficiales. Como podemos observar en la **figura 2.2** las corrientes cambian de lugar y dirección estacionalmente año con año (SEMAR, 2019).

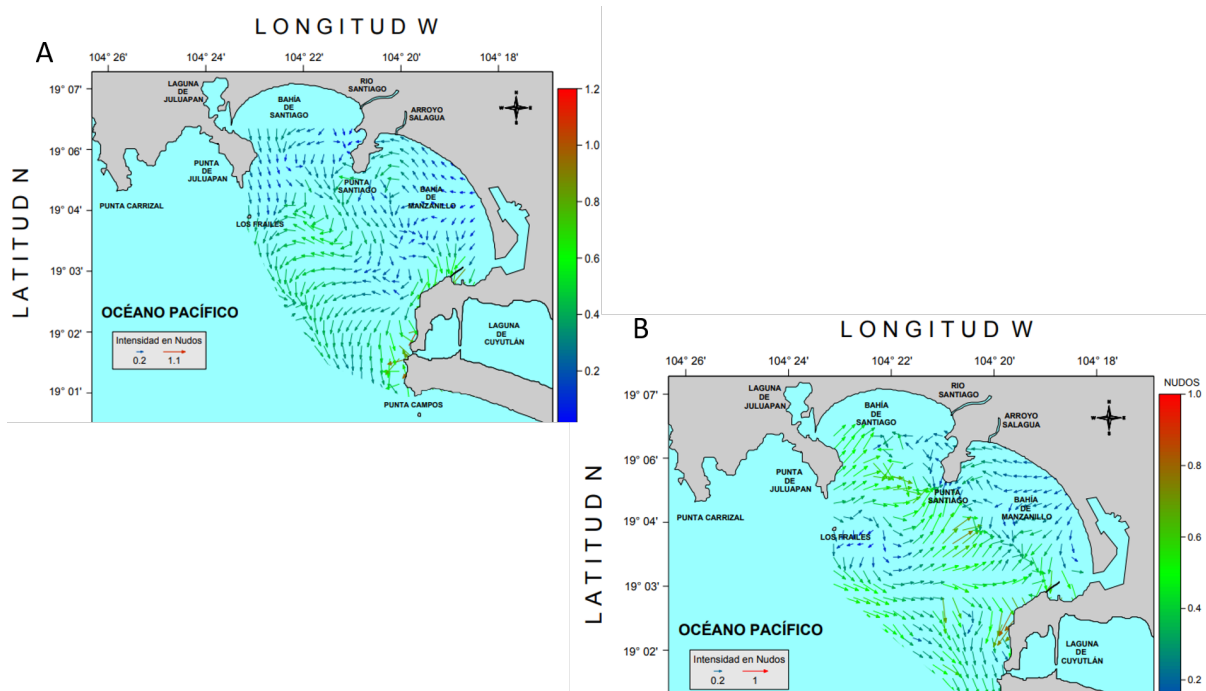


Figura 2.2: A) Velocidad y dirección de las corrientes marinas a 5m de profundidad en las Bahías de Manzanillo en febrero del 2004; B) Velocidad y dirección de las corrientes marinas a 5m de profundidad en las Bahías de Manzanillo en septiembre del 2004 (SEMAR, 2004).

Las corrientes marinas presentan una dirección hacia el exterior de la Bahía de Santiago a través de Punta Juluapan para luego dirigirse al Sureste rumbo a Punta Campos. Se sabe de la existencia de un giro anticiclónico entre Punta Santiago y de una convergencia de corrientes al centro de la Bahía de Manzanillo. La circulación es muy homogénea en las capas de 5, 10, 15 y 20 m de profundidad, en la capa de 25 m de profundidad se encontró una circulación muy marcada hacia el Noroeste de la Bahía de Manzanillo. Las velocidades promedio de las corrientes marinas de esta convergencia son del orden de 34 cm/s (0.660 nudos) (SEMAR, 2019).

2.1.2. Climatología de Manzanillo

Se describe al clima de Manzanillo como tropical lluvioso y la temperatura media anual es de 26.4°C, en el mes más cálido la temperatura promedio es de 27.4°C y en el mes más frío es de 19°C como se muestra en la **tabla 2.1** (SEMAR, 2009). Durante

la temporada de invierno existe un proceso de calentamiento diurno y nocturno en las zona costera por el efecto de brisa marina en el día y brisa terral nocturna desde el continente, dando lugar a la presencia de la bruma, las cuales se deben a diferencias térmicas entre el océano y el continente (SEMAR, 2012).

Esta región se caracteriza según la clasificación de Köppen modificada por Enriqueta García (1964) como de tipo Awo(w), que corresponde a un clima tropical cálido subhúmedo, con lluvias en verano, de menor humedad (88.95 %) (INEGI, 2009).

La temporada de lluvias corresponde a los meses de junio a octubre; siendo septiembre el mes más lluvioso debido a los frecuentes ciclones. El promedio anual de humedad relativa es del 77 % siendo el mes de septiembre el que alcanza mayor humedad con un promedio de 83 % (SEMAR, 2012).

Tabla 2.1: Climatología del área de muestreo (Manzanillo, Colima) a lo largo de los meses del año 2019 (SEMAR, 2019).

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Temperatura media (°C)	23.8	23.7	23.8	24.5	25.9	26.3	26.6	26.5	26	26.1	25.3	24.2
Temperatura min. (°C)	19.9	19.7	19.4	20.4	22.4	24	24.2	24.1	23.9	23.8	22.3	20.6
Temperatura máx. (°C)	28.2	28	28.1	28.6	29.5	29	29.1	29	28.4	28.6	28.7	28.3
Precipitación (mm)	21	14	14	10	9	153	176	221	295	157	30	12
Humedad (%)	72	72	70	72	81	83	84	86	86	85	79	75

2.1.3. Puntos de muestreo

Se obtuvieron en total 80 muestras, 60 de la SML y 20 de SSW. La recolección de muestras se realizó en 10 puntos, en cada punto se tomaron 3 muestras de la SML y 1 muestra de SSW. En la **Tabla 2.2** se muestra un recuento de las muestras colectadas ambos días de muestreo.

Tabla 2.2: Recuento de las muestras.

MUESTRAS COLECTADAS			
Primer día de muestreo (06/04/22)		Segundo día de muestreo (09/04/22)	
SML	30	SML	30
SSW	10	SSW	10
Total	40 muestras	Total	40 muestras

En la **figura 2.3** se muestra el transecto paralelo a la costa, que consistió en 11 estaciones de muestreo en ambos días. Se utilizó una embarcación de 30 pies de eslora con motor fuera de borda. Se recorrieron estaciones entre las 8 y 14 horas, entre las estaciones marcadas con puntos rojos hay una separación de 1 km para tener un gradiente costa a océano con el cual inferir cambios en la actividad fitoplanctónica. La estación 11 corresponde a la parte central de un florecimiento algal. En cada toma de muestra se tomaron datos como la TSM, concentración de oxígeno disuelto, salinidad y conductividad específica.

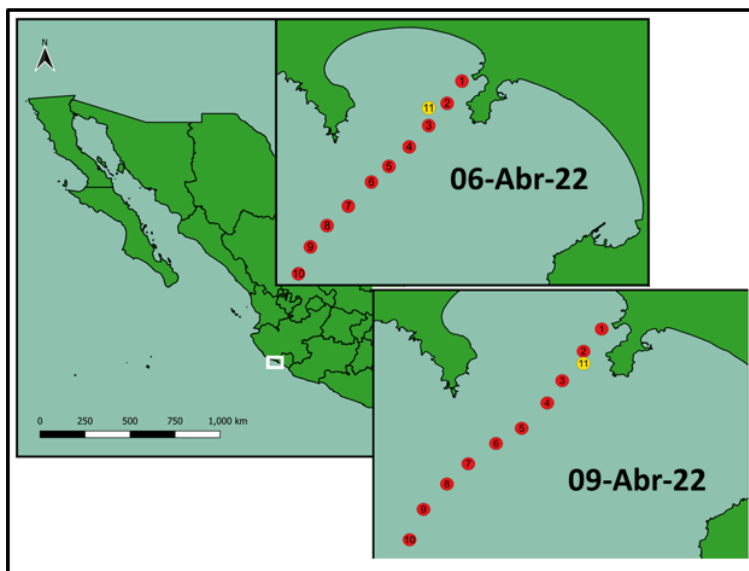


Figura 2.3: Puntos de muestreo tomados ambos días de recolección de muestras (Márquez, 2022).

2.2. Técnica Glass Plate

Las muestras de la SML fueron tomadas por medio de la técnica Glass Plate, una herramienta útil para colectar este tipo de muestras (Harvey y Burzell, 1972; Cunliffe y Wurl, 2014). Se utilizó un placa de 30x20 cm de vidrio templado previamente enjuagada al menos tres veces con agua des ionizada por ambos lados. Para colectar la muestra de la SML se sumergió la placa en la superficie y se levantó lentamente a una velocidad constante (Cunliffe y Wurl, 2014). El principio de la técnica es la inmersión de una superficie hidrofílica verticalmente y perpendicular a la superficie del agua, seguida de su extracción a una velocidad controlada (Cunliffe y Wurl, 2014). La SML se adhiere a la placa y posteriormente se remueve con la ayuda de una escobilla de goma de neopreno como se muestra en la **Figura 2.4**.



Figura 2.4: Técnica Glass Plate utilizada durante campañas de muestreo en el Pacífico Norte y el Golfo de México (Juarez, 2018).

2.2.1. Requerimientos de recolección

Esta técnica de recolección se caracteriza por evitar la contaminación por manipulación, por este motivo, en el muestreo se requiere que las condiciones sean cuidadosamente monitoreadas, y se sigan los protocolos de limpieza y manejo (Cunliffe y Wurl, 2014).

Como se observa en la **figura 2.5**, el muestreo se lleva a cabo desde una lancha, un bote o balsa (Cunliffe y Wurl, 2014). Para que no haya alteraciones en las muestras es importante que se situé lo más lejos posible del bote y alejado del camino que deja este, esto debido a que se busca evitar cualquier contaminación potencial (Cunliffe y Wurl, 2014).

Durante la recolección de muestras se necesitó de dos personas que recolecten las muestras de la SML, con ayuda de una tercera persona se fue recolectando en cada punto de muestreo información meteorológica y visual del sitio.



Figura 2.5: Uso de la técnica Glass Plate durante el muestreo de la SML en Manzanillo Colima.

2.2.2. Limpieza del material

Para el proceso de limpieza del Glass Plate se siguieron los siguientes pasos:

1. Se realizó un enjuague extensivo en agua ultra pura.
2. Enjuague extensivo con etanol de alta pureza.
3. Entre cada inmersión el Glass Plate, se colocó en una bolsa de plástico limpia para evitar cualquier tipo de contaminación.
4. Entre cada inmersión se repitieron los pasos 1 y 2 para eliminar cualquier resto de muestra anterior.

2.3. Sistema DFA-UNAM

En este método simula el modo de congelación por inmersión. La congelación ocurre cuando una gota con una partícula de aerosol inmersa es expuesta a temperaturas decrecientes, entonces debido a las bajas temperaturas se forma hielo en la superficie de la partícula de aerosol y hace que la gota se congele (Murray et al., 2012). El sistema de DFA-UNAM fue construido en tres partes, las cuales son descritas a continuación.

Sistema de iluminación y vídeo.

Está compuesto por una lámpara emisora de luz blanca por medio de iluminadores LED (Ladino et al., 2022). Para poder obtener los vídeos de la congelación de cada muestra analizada, se utilizó una cámara de celular con lente a 10x, el cual fue colocado de forma en la que se pudiera ver completa la placa Enzyme-Linked ImmunoSorbent Assay (ELISA), donde se llevan a cabo los ensayos con las muestras obtenidas, simultáneamente se grabó la temperatura con ayuda de otro celular.

Sistema mecánico.

Consta de un soporte hecho de acero inoxidable resistente al polímero refrigerante y las bajas temperaturas. Fue construido a la medida de la tina de recirculación para las medidas exteriores y a medida de una placa para ELISA para las medidas interiores (Ladino et al., 2022).

Sistema de enfriamiento y recirculación.

Como se observa en la **figura 2.6** está conformado por un termostato LAUDA (PRO-RP 1090), el cuál trabaja con un rango de temperaturas de -50°C a los 200°C . Se utiliza un líquido refrigerante de polidimetilsiloxano.

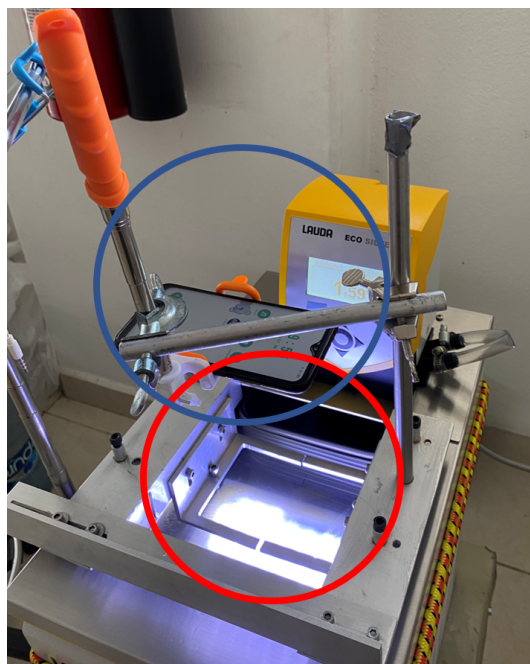


Figura 2.6: Sistema de iluminación-enfriamiento del DFA-UNAM encerrado en rojo y sistema de vídeo encerrado en azul.

2.3.1. Preparación de la muestra y procedimiento.

En un principio es necesario descongelar las muestras a temperatura ambiente. Para comenzar con los ensayos es necesario primero acomodar las cámaras en la base de acero inoxidable, uno de ellos es dirigido a la placa ELISA que es iluminada con la lámpara y el segundo celular es dirigido al termostato que registra la rampa de temperatura. Posteriormente se utiliza una micro pipeta de 8 canales (Eppendorf) de $200 \mu L$ para el llenado de los pozos de la placa ELISA. La pipeta de 8 canales resulta ser más eficiente en este proceso haciendo que disminuya significativamente la incertidumbre del experimento (Juarez, 2018). Una vez se encuentran llenos los pozos de la placa ELISA se sella la placa con una mica adherible transparente, esto con la finalidad de evitar contaminación por parte del aire ambiente.

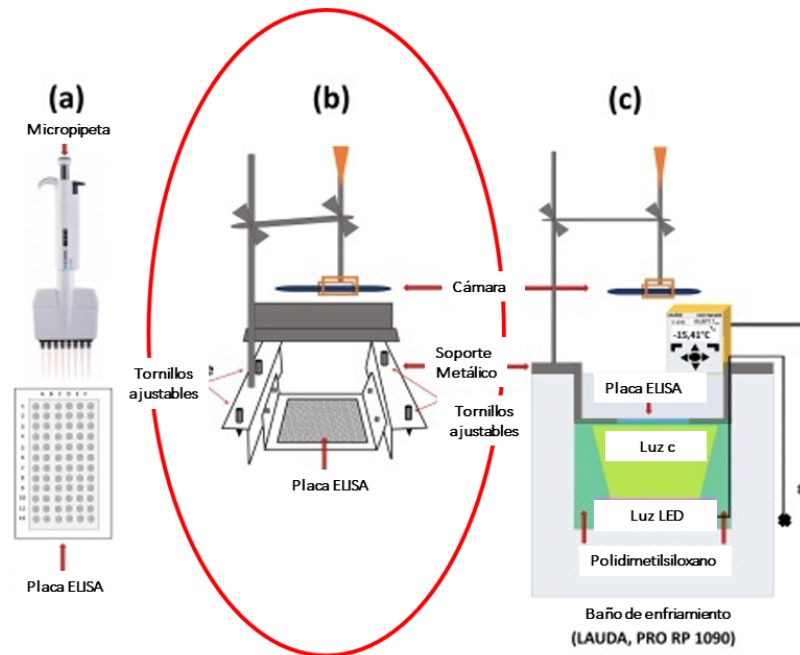


Figura 2.7: Procedimiento de llenado de la placa ELISA y colocación de ésta en el sistema DFA-UNAM (Modificada. Ladino et al., 2022).

Como se puede observar en la **figura 2.7** una vez llenada y sellada la placa ELISA, se coloca en la base de acero inoxidable sin ninguna inclinación, la posición de la placa ELISA debe ser verificada y ajustada con ayuda de los tornillos de cada una de las esquinas de la base de acero, estos se van ajustando hasta que la placa ELISA quede completamente en posición horizontal y sumergida en el polidimetilsiloxano, como se observa el la **Figura 2.8**.

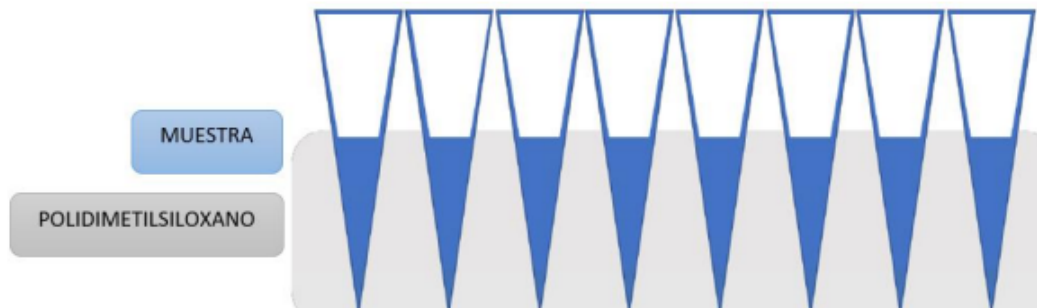


Figura 2.8: Placa ELISA con 8 pozos desde una vista lateral, sumergida en polidimetilsiloxano al nivel de la muestra (Modificada. Cascajo, 2017).

Mientras la temperatura baja se está grabando con la cámara la congelación de cada pozo, como se muestra en **Figura 2.9** la congelación se puede observar por el cambio en su opacidad en la transición de líquido a sólido (Ladino et al., 2022). El ensayo experimental termina cuando todos los pozos se encuentran congelados o llega la temperatura a -40°C . El procedimiento fue realizado tres veces para una misma muestra, esto con el objetivo de evaluar el rango de error.

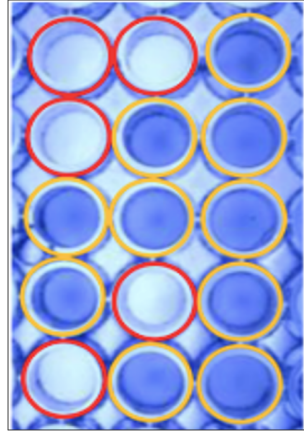


Figura 2.9: Placa ELISA durante el experimento, en donde se pueden apreciar los pozos congelados (amarillos) y los pozos por congelarse (rojos) (Ladino et al., 2022)

2.4. Análisis de datos

Para el análisis de datos se utilizó una base de datos en excel. Se obtuvo la fracción congelada (FF, por sus siglas en inglés), la temperatura inicial de congelamiento (T_0) y la temperatura a la cuál la mitad de las gotas de la muestra se encontraron congeladas (T_{50}).

- Base de datos: En la hoja de excel se realizó una representación de la placa ELISA con 96 pozos repartidos en 8 columnas y 12 filas, esta distribución permitió registrar la temperatura a la cual cada pozo llegó a su punto de congelación. Obtenidos los datos de la temperatura de congelación, se organizaron de mayor a menor. Posteriormente se contó acumulativamente los pozos que se congelaron grado a grado.

18:00	17:38	19:45	20:02	18:06	19:20	18:05	10:09		0	0	0	96
22:09	29:32	18:03	23:04	15:43	20:08	20:38	19:27		-0.5	0	0	96
24:56	10:09	19:45	21:22	19:09	21:21	24:27	20:21		-1	0	0	96
22:36	20:03	27:56	19:07	20:20	22:37	23:38	24:38		-1.5	0	0	96
32:09	22:09	24:00	20:54	23:46	19:19	29:09	25:27		2	0	0	96
21:09	17:54	22:56	29:57	29:07	18:09	20:30	20:45		-2.5	0	0	96
18:56	18:57	20:43	22:34	17:04	18:11	24:18	21:27		-3	0	0	96
19:34	18:04	21:34	21:46	17:44	17:09	22:01	21:09		-3.5	0	0	96
20:17	20:39	26:18	29:08	24:19	18:19	19:07	28:00		-4	0	0	96
23:45	21:21	21:11	19:09	25:57	19:38	20:26	34:56		-4.5	0	0	96
33:45	30:00	32:09	18:56	28:09	20:05	19:00	21:00		-5	0	0	96
32:09	27:17	33:56	24:47	22:37	21:37	28:07	21:27		-5.5	0	0	96
	BC								-6	0	0	96
17:04	-14.98								-6.5	0	0	96
17:09	-14.99								-7	0	0	96
17:38	-15								-7.5	0	0	96
17:44	-15.66								-8	0	0	96
17:54	-16.67								-8.5	0	0	96
18:00	-17.89								-9	0	0	96
18:04	-18.09								-9.5	0	0	96
18:05	-18.19								-10	0	0	96
18:06	-18.22								-10.5	0	0	96
18:09	-18.34								-11	0	0	96
18:11	-18.5								-11.5	0	0	96
18:19	-19.09								-12	0	0	96
18:56	-20.03								-12.5	0	0	96
18:56	-21.07								-13	0	0	96
18:57	-22.34								-13.5	0	0	96
19:00	-22.98								-14	0	0	96

Figura 2.10: Hoja Excel utilizada para el análisis de los vídeos de las muestras.

- Cálculo de la FF: Para la obtención de la FF se utilizó la siguiente ecuación:

$$FF = \frac{NF}{N}$$

donde NF es el número de pozos congelados a una T específica y N es el total de gotas en la placa ELISA. Una vez se obtuvo el análisis de las tres replicas para cada muestra, se obtuvieron el promedio y la desviación estándar. De esta manera se obtuvieron las gráficas de FF para cada muestra realizadas en MATLAB.

La concentración de INPs se estima a partir de la siguiente ecuación (Yadav et al., 2019).

$$C_{inp}(T) = \frac{-\ln(F_{uf})}{V_{drop}}$$

donde C_{inp} es la concentración de INPs, F_{uf} es la fracción de gotas que no se congelaron a temperatura en °C y V_{drop} es el volumen de la gota (L).

- T_0 : Se determinó mediante la temperatura a la cuál congeló la primera gota de cada experimento y posteriormente se obtuvo el promedio de las replicas de cada muestra.
- T_{50} : Se obtiene encontrando el valor de temperatura a la cuál la FF es "0.5", posteriormente se obtuvo el promedio de las replicas de cada muestra.
- Se realizaron gráficas en MATLAB para representar cada uno de los resultados obtenidos.

Discusión y análisis de resultados

3.1. Parámetros químicos y físicos que se midieron en el sitio de muestreo.

En la **Tabla 3.1** se muestran las variables que se midieron como la TSM, la salinidad, oxígeno disuelto (OD) y clorofila (Cla). Para cada punto de muestreo se realizó el promedio de las variables.

Tabla 3.1: Variables obtenidas en los sitios de muestreo.

Punto de muestreo (km)	Salinidad (ppt)	TSM ($^{\circ}\text{C}$)	OD (mg/mL)	Cla (mg/m ³)
1	32	20.9	5.71	9.17
2	31.3	22.1	4.5	6.42
3	30	24.5	4.5	2.01
4	30.6	24	3.7	13.75
5	32.3	21.5	7.56	12.69
6	32.3	21.1	8.36	21.05
7	32.3	21.7	6.36	16.56
8	32.3	21.7	7.14	13.99
9	32.3	21.8	8.02	68.43
10	31.6	22.1	7.44	6.32

En la **Tabla 3.2** podemos observar una mayor concentración de OD el día (06/04/22), en cambio los datos de salinidad y temperatura son mayores en las muestras tomadas el segundo día de muestreo (09/03/22).

Tabla 3.2: Promedio de las variables obtenidas en los sitios de muestreo.

Variable	Día 1	Día 2	Desviación estándar
Salinidad (ppm)	31.7	32.4	0.49
TSM (°C)	22.1	23.0	0.64
Oxígeno disuelto (mg/mL)	6.3	4.9	0.99
Clorofila (mg/m ³)	17.04	15.38	1.17

3.2. Condiciones ambientales que influyen en el sitio de muestreo.

Es de suma importancia poder describir el sitio de muestreo y sus condiciones ambientales, esto nos ayuda a poder comprender mejor los procesos en la superficie del mar ya que influyen bastante en las muestra tanto de la SML como de SSW (Cunliffe y Wurl, 2014). En la **Tabla 3.3** se resumen las condiciones ambientales observadas durante los dos días de muestreo. En el segundo día de muestreo los vientos fueron de mayo intensidad que en el primer día de muestreo, esto puede ser un factor determinante en la formación de la SML y la concentración de material orgánico en ella.

Registrar las condiciones ambientales que influyen en nuestro sitio de muestro fue de suma importancia, cada condición ambiental tiene un efecto, como es el caso del viento que irrumpe la SML, la precipitación influye en el material atmosférico depositado en la SML, el oleaje crea y mueve "manchones" de material orgánico sobre la superficie del agua, la productividad primaria y la presencia de zooplancton producen sustancias tenso activas susceptibles de acumulación en la SML (Cunliffe y Wurl, 2014). En la **Tabla 3.4** se presenta la productividad primaria y zooplancton observados durante los dos días de muestreo. En el primer día de muestreo se observó una mayor cantidad de presencia de productividad primaria y de zooplancton.

Tabla 3.3: Condiciones ambientales observadas durante los días de muestreo, (1.1-1.10) corresponden al día 6 de abril del 2022 y (2.1-2.10) corresponden al día 9 de abril del 2022. Los resultados de estas variables fueron determinados por medio de observación de forma cualitativa.

Puntos de muestreo	Bruma	Nubosidad	Viento	Oleaje	Precipitación
1.1	Ausencia	Ausencia	Moderado	Moderado	Ausencia
1.2	Ausencia	Ausencia	Moderado	Moderado	Ausencia
1.3	Ausencia	Ausencia	Moderado	Bajo	Ausencia
1.4	Ligera	Ausencia	Moderado	Moderado	Ausencia
1.5	Ausencia	Ausencia	Moderado	Bajo	Ausencia
1.6	Ausencia	Ausencia	Moderado	Moderado	Ausencia
1.7	Ausencia	Nubes Cumulus (cu)	Fuerte	Moderado	Ausencia
1.8	Ligera	Nubes Cumulus (cu)	Fuerte	Moderado	Ausencia
1.9	Ligera	Nubes Cumulus (cu)	Moderado	Bajo	Ausencia
1.10	Ligera	Nubes cirrus (ci)	Moderado	Moderado	Ausencia
2.1	Ausencia	Ausencia	Fuerte	Fuerte	Ausencia
2.2	Ausencia	Ausencia	Fuerte	Fuerte	Ausencia
2.3	Ausencia	Ausencia	Fuerte	Fuerte	Ausencia
2.4	Ausencia	Ausencia	Moderado	Fuerte	Ausencia
2.5	Ausencia	Ausencia	Moderado	Fuerte	Ausencia
2.6	Ausencia	Nubes cirrus (ci)	Moderado	Bajo	Ausencia
2.7	Ausencia	Nubes cirrus (ci)	Fuerte	Fuerte	Ausencia
2.8	Ligera	Nubes cirrus (ci)	Fuerte	Fuerte	Ausencia
2.9	Ligera	Ausencia	Moderado	Fuerte	Ausencia
2.10	Ligera	Ausencia	Moderado	Fuerte	Ausencia

Tabla 3.4: Productividad primaria y de zooplancton observados durante los días de muestreo, (1.1-1.10) corresponden al día 6 de abril del 2022 y (2.1-2.10) corresponden al día 9 de abril del 2022. Los resultados de estas variables fueron determinados por medio de observación de forma cualitativa.

Puntos de muestreo	Presencia de productividad primaria	Presencia de zooplancton
1.1	Moderada	Presencia de ctenóforos
1.2	Abundante	Presencia de ctenóforos
1.3	Abundante	Ausencia
1.4	Baja	Ausencia
1.5	Moderada	Presencia de ctenóforos
1.6	Baja	Ausencia
1.7	Moderada	Presencia de sinóforos
1.8	Moderada	Ausencia
1.9	Moderada	Presencia de sinóforos
1.10	Abundante	Presencia de sinóforos
2.1	Baja	Ausencia
2.2	Baja	Ausencia
2.3	Baja	Ausencia
2.4	Moderada	Presencia de Ostrácodos
2.5	Alta	Presencia de Ostrácodos
2.6	Moderada	Ausencia
2.7	Moderada	Ausencia
2.8	Baja	Ausencia
2.9	Alta	Ausencia
2.10	Moderada	Presencia de sinóforos

3.3. Curvas de Fracción Congelada (FF)

En las curvas de fracción congelada se muestra el promedio de los tres ensayos realizados para cada muestra recolectada, también se muestra la curva de congelamiento homogénea la cuál se obtuvo usando muestras de agua ultra pura. La curva de congelamiento se uso para establecer un punto de referencia para evaluar la capacidad de la materia orgánica presente en las muestras para catalizar la congelación a temperaturas superiores a la establecida para la congelación homogénea. Mientras más cercana a 0°C sea la temperatura de congelación, la muestra tiene más habilidades para actuar como un INP eficiente. La **figura 3.1** muestra las curvas de fracción congelada

de la SML en ambos días de muestreo. La gráfica superior nos muestra las curvas de congelación del primer día de muestreo (06/04/22) y la gráfica inferior muestra las curvas de congelación de las muestra obtenidas el segundo día de muestreo (09/04/22).

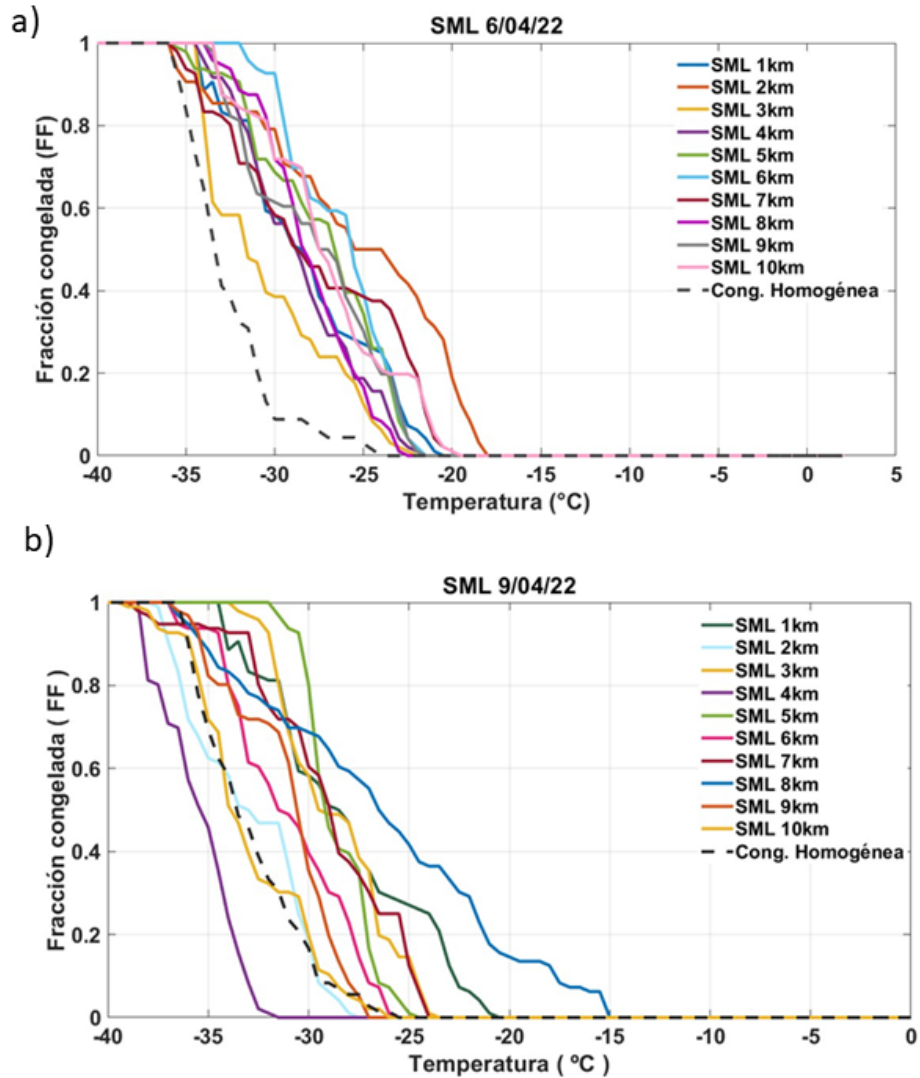


Figura 3.1: Curvas de fracción congelada de muestras de SML recolectadas en Manzanillo, a) durante el primer y b) segundo día de muestreo en función de la distancia de la costa.

Como se observa en la **Figura 3.2** existe una tendencia a mejorar la capacidad de congelación de las muestras del primer día de muestreo, siendo las curvas de la gráfica superior las que tienen FF más cercanas a 0°C, es decir son más eficientes. Esto supone la presencia de material activo con mayor capacidad de catalizar la formación de cristales de hielo a temperaturas más altas. Al igual que las anteriores curvas de FF, el estudio de Wilson et. al., (2015) muestra que el material orgánico presente en las aguas del Atlántico Norte, Pacífico Norte y el Ártico funcionan como catalizador de la formación de cristales de hielo por encima de -40°C.

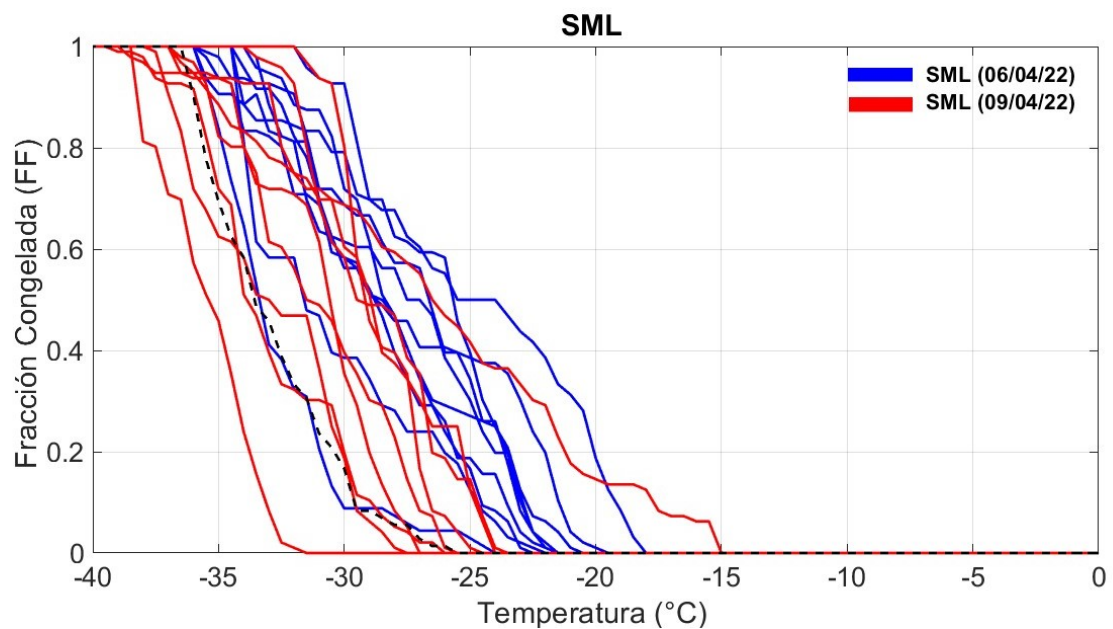


Figura 3.2: Comparación de las curvas de fracción congelada de muestras de SML recolectadas en Manzanillo, durante el primer y segundo día de muestreo en función de la distancia a la costa. Las curvas de color azul corresponden al día 06/04/22 y las curvas de color rojo corresponden al día 09/04/22.

En la **Figura 3.3** la cuál muestra las curvas de FF correspondientes a la SSW, podemos observar una tendencia de las curvas de SSW a tener un rango de temperatura de congelación más reducido en comparación a la SML, con un rango que va de los -15°C a los -25°C , por lo que podemos suponer la presencia de material activo similar en la mayoría de los puntos de muestreo.

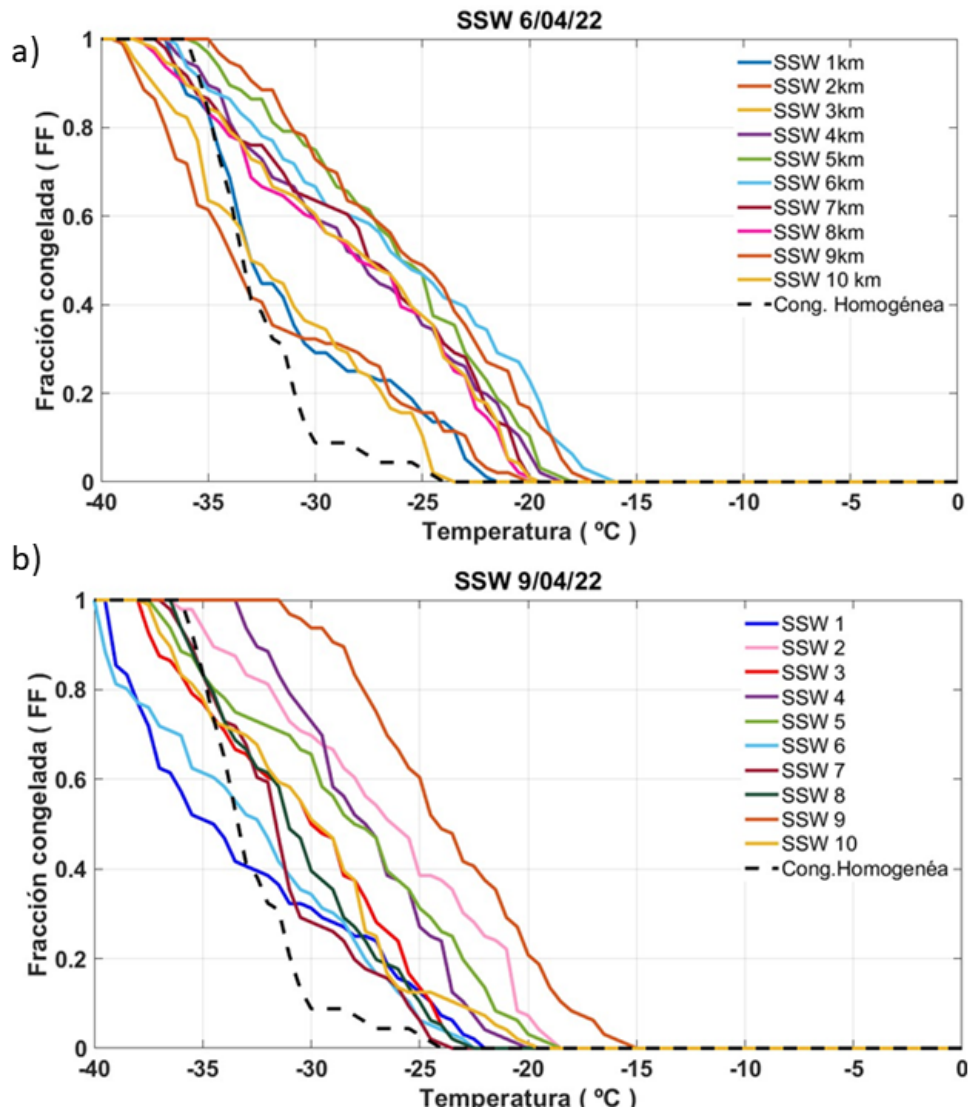


Figura 3.3: Curvas de fracción congelada de muestras de SSW recolectadas en Manzanillo durante el primer a) y segundo b) día de muestreo, en función de la distancia a la costa.

Como se puede observar en la **figura 3.4** existe una tendencia a mejorar la capacidad de congelación de las muestras del segundo día de muestreo (09/04/22), siendo las curvas rojas más cercanas a 0°C, es decir, son más eficientes. La temperatura más alta registrada fue de -14.7°C.

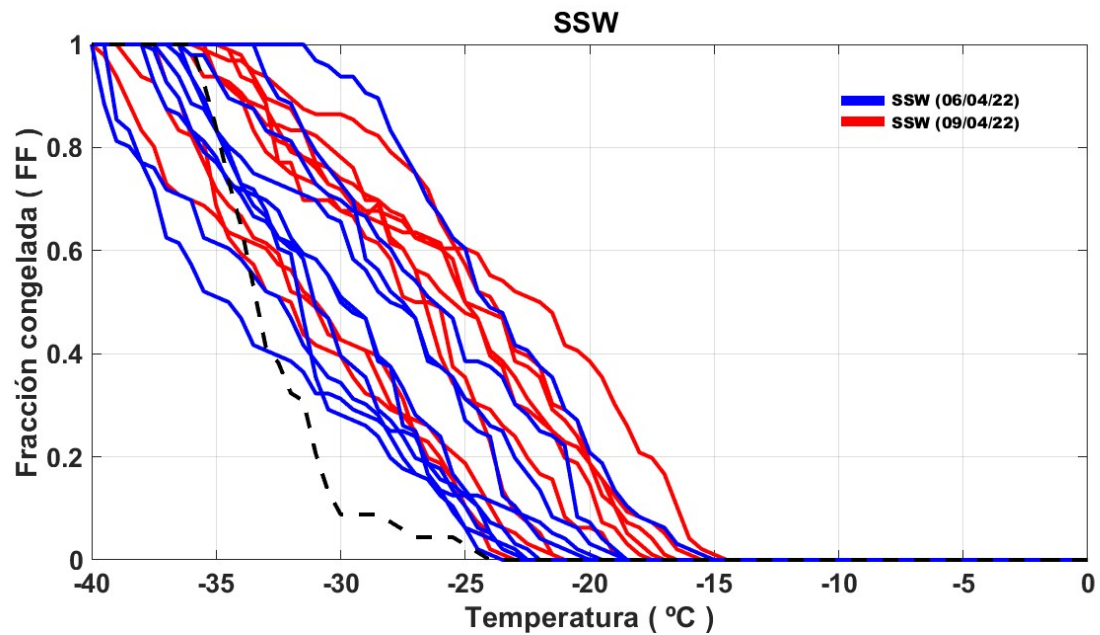


Figura 3.4: Comparación de las curvas de fracción congelada de muestras de SSW recolectadas en Manzanillo durante el primer y segundo día de muestreo en función de la distancia a la costa. Las curvas de color azul corresponden al día 06/04/22 y las curvas de color rojo corresponden al día 09/04/22.

3.3.1. Comparación entre ambos días de muestreo.

La actividad de las muestras de ambos días es distinta debido a distintos factores, los cuales pueden ser el material disuelto presente, la dinámica del océano o eventos meteorológicos.

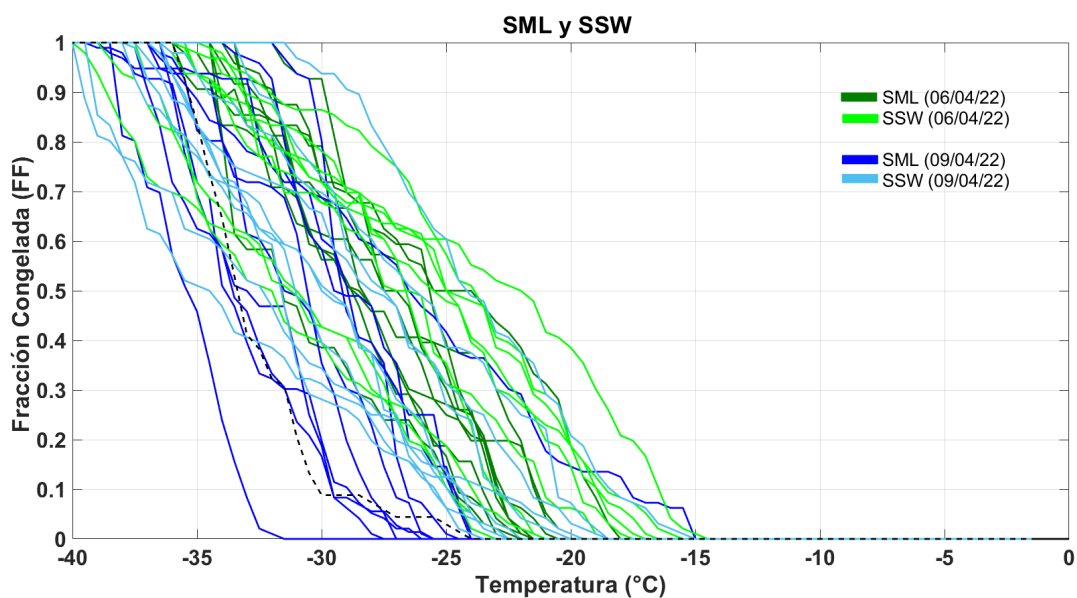


Figura 3.5: Comparación de las curvas de fracción congelada de muestras de SML y SSW recolectadas en Manzanillo durante el primer y segundo día de muestreo en función de la temperatura. Las curvas de color rojo y violetas son correspondientes al día 6/04/22 y las curvas de color azul rey y azul celeste son correspondientes al día 9/04/22.

En la **Figura 3.5** se observan dos conjuntos de curvas del primer y segundo día de muestreo. Se puede observar una diferencia en lo que respecta a los grupos de datos, las curvas del primer día de muestreo (06/04/22) están en un rango de -14.7°C a -24.5°C y las curvas del segundo día de muestreo (09/04/22) cubren un rango de temperatura de -15°C a -32.5°C . Lo anterior indica que las muestras del segundo día de muestreo presentan una mayor variación, que puede ser explicada por variaciones en el material activo presente en las muestras. De igual manera el oleaje y la dinámica del océano durante los días de muestreo tienen efectos directos en la presencia de material activo en la SML. El primer día de muestreo hubo presencia de una alta actividad de oleaje y vientos (**Tabla 3.3**). Una alta actividad de oleaje y viento irrumpe en la formación

de la SML enriquecida con material orgánico, la cizalla del viento con la superficie del mar y un rompimiento abrupto de olas pueden provocar la dilución del material activo presente y en consecuencia desplazar éste material a aguas más profundas.

3.4. Temperatura inicial de congelamiento (T_0)

En la **Figura 3.6** se encuentran las gráficas que indican la T_0 de las muestras de cada uno de los puntos. En ambos días el punto de muestreo del kilometro 9 fue la muestra más eficiente, ya que comenzaron a congelar a temperaturas más cálidas (-15°C en el primer día de muestreo y -16°C en el segundo día de muestreo). Para el segundo día de muestreo se puede observar un patrón de similitud en las curvas de congelamiento en los primeros 7 puntos de muestreo. En la mayoría de los puntos de muestreo de la SML las T_0 son más cálidas en comparación a las de SSW.

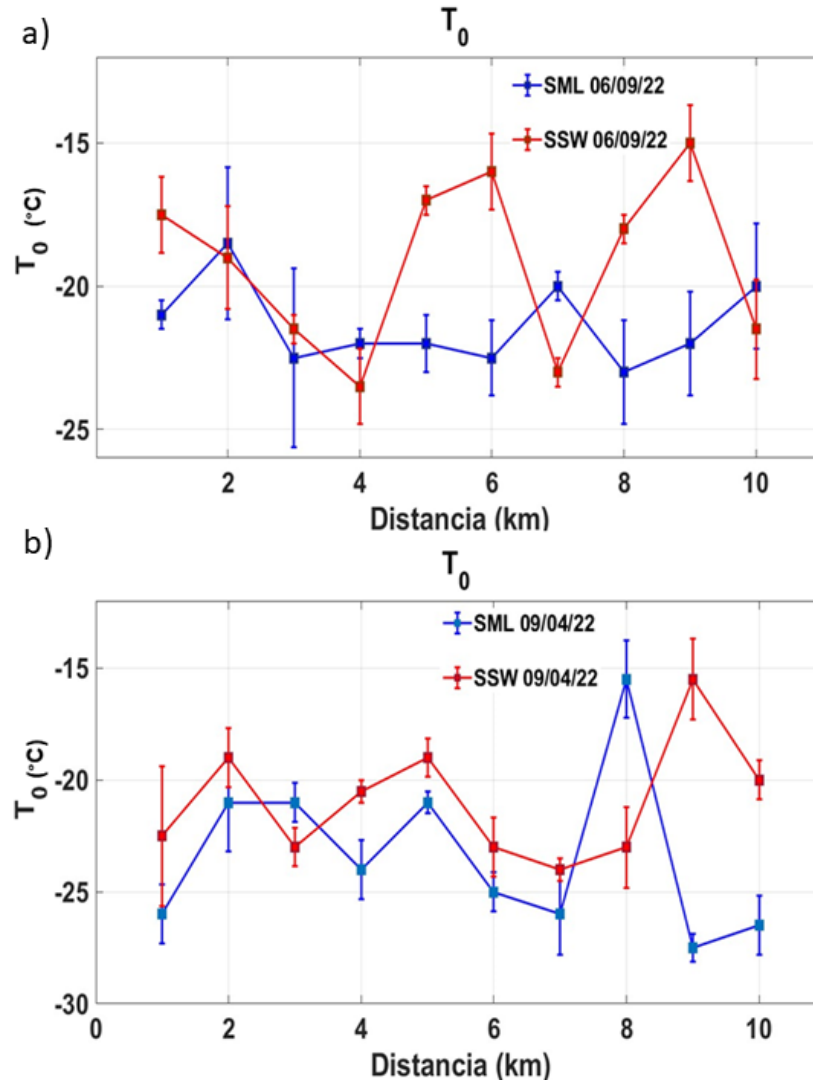


Figura 3.6: Gráficas de T_0 en relación a la distancia (cercanía o lejanía de la costa). La gráfica superior corresponde a las temperaturas iniciales de congelamiento del primer día de muestreo y la inferior corresponde a las del segundo día de muestreo. Las curvas de color azul corresponden a las muestras de SML y las curvas de color rojo corresponden a las muestras de SSW.

3.5. Temperatura media de congelamiento (T_{50})

En la **figura 3.7** se observan los diagramas de T_{50} la cual es una medida estadística que nos ayuda a determinar la eficiencia de las muestras en la nucleación de hielo. Se comparan la temperatura media de congelación de los conjuntos de gráficas para evaluar el comportamiento de la temperatura de congelación en función de la distancia (cercanía o lejanía) de la costa.

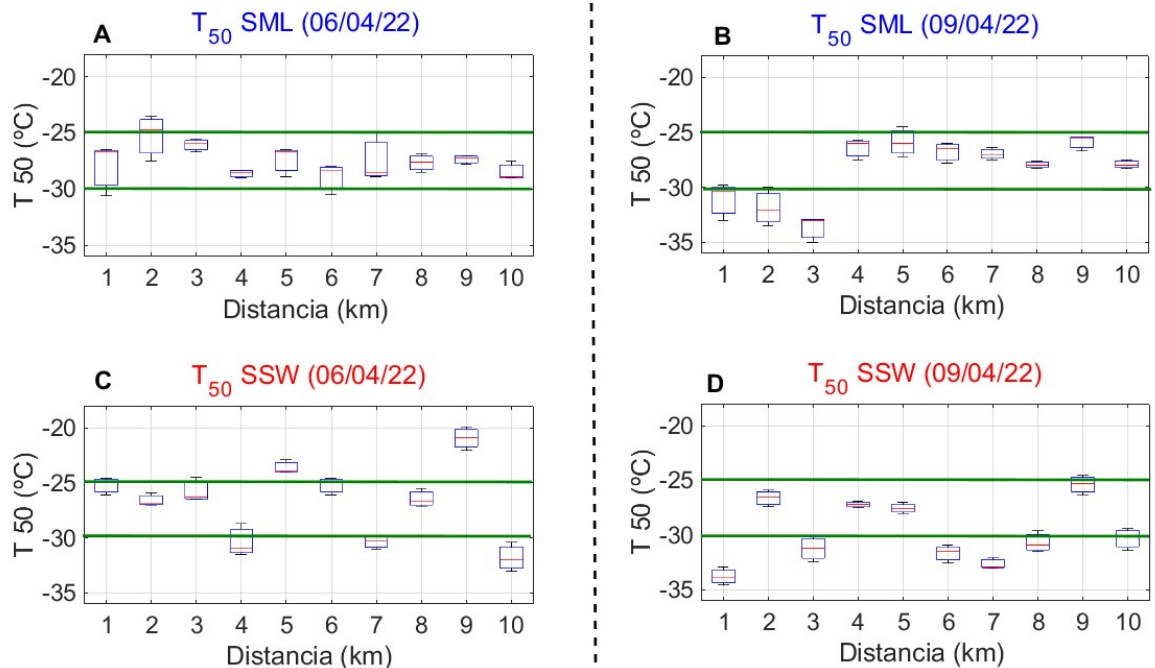


Figura 3.7: Diagramas de caja en donde se muestra el valor T_{50} de los 10 puntos de muestreo de SML (A y B) y SSW (C y D) recolectadas en Manzanillo. Las gráficas de lado izquierdo muestran los resultados del primer día de muestreo y las del lado derecho muestran resultados del segundo día de muestreo.

La muestra de SML recolectada en el punto 2 del primer día de muestreo (06/04/22) se destaca por presentar la temperatura más cálida de las muestras de SML recolectadas en Manzanillo, con un T_{50} de -25°C . En cuanto a las muestras de la SSW la muestra que presentó un T_{50} más cálido fue la muestra 9 del primer día de muestreo, con un T_{50} de -21°C .

De las muestras colectadas, las muestras de la SSW son las que presentan una gran variabilidad en los valores de T_{50} , lo que nos indica que sus habilidades como INPs no

son altamente reproducibles. Si realizamos una comparación entre las muestras de SML y SSW, se podría decir que las muestras de SML presentan una mayor eficiencia de congelación, como se puede observar en el panel A y C de la **Figura 3.7**. Es importante resaltar que el T_{50} de ambos días de muestreo entra dentro del rango marcado en color verde que va de -25°C a -30°C , lo cual nos indica que las habilidades como INPs de la SML son altamente reproducibles, ya que no muestran tanta variabilidad.

Cabe notar que si bien los valores de T_0 fueron más altos para las muestras de SSW, los valores de T_{50} muestran un comportamiento opuesto. En este caso, los valores de T_{50} son más confiables ya que dependen de un número de gotas mucho mayor que en el caso de T_0 .

3.6. Correlación de parámetros fisicoquímicos con T_{50}

Se calcularon las correlaciones de Spearman para los T_{50} de las muestras de SML y SSW de ambos días con respecto a parámetros como salinidad, TSM, clorofila y OD. Para evaluar si hay una correlación entre estos parámetros y la eficiencia de nucleación de hielo se realizó la prueba estadística de Spearman utilizando el promedio de T_{50} para las muestras de SML y SSW.

De acuerdo a los coeficientes obtenidos los parámetros que están relacionados con la eficiencia de nucleación de la SML son la salinidad, la TSM y el OD. Por otro lado, los parámetros relacionados con las muestras de SSW son la clorofila y el OD, como se muestra en la **Tabla 3.5**. El OD fue la variable que presentó coeficientes $p > 0.5$ tanto para las muestras de SML como de SSW.

Tabla 3.5: Coeficiente de correlación r^2 entre los valores de T_{50} con la salinidad, TSM, clorofila-a y oxígeno disuelto. En negrita se resaltan los valores más altos. Los valores señalados con un asterisco son aquellos estadísticamente significativos, es decir con un valor de $p < 0.05$.

Muestra	Salinidad (ppt)	TSM (°C)	Clorofila (mg/m ³)	Oxígeno disuelto (mg/mL)
T_{50} SML(1)	0.557*	0.701	0.116	0.863 *
T_{50} SML(2)	0.693	0.724*	0.385	0.863 *
T_{50} SSW(1)	0.380	0.386	0.505	0.597*
T_{50} SSW(2)	0.149	0.369	0.381	0.697*

Si bien se encontró que la TSM presenta una correlación positiva con la eficiencia de congelación de la SML, es poco probable que éste factor sea muy determinante ya que existen estudios previos como el de Wilson et. al. (2015) que indican relación inversa entre una muestra de INPs y la TSM.

El oxígeno disuelto es una medida de la productividad primaria en los ecosistemas acuáticos, la actividad primaria a través de la fotosíntesis durante el día libera OD a la columna de agua, lo cuál se relaciona con la presencia de Clo-a, la biomasa fitoplanctónica y la concentración de OD. debido a que cuando los productores primarios realizan la respiración celular la cantidad de oxígeno disuelto disminuye, lo que nos permite determinar si hay o no presencia de productividad primaria (Libes, 2014). Sin embargo en superficie, que es en donde encontramos la SML el contenido de oxígeno es mucho más alto debido a que es donde el oxígeno se disuelve en el océano desde la atmósfera, y las aguas superficiales es donde el oxígeno es producido por el fitoplancton a través de la fotosíntesis, de esta forma podemos explicar los valores de relación obtenidos entre la eficiencia de congelación y el oxígeno disuelto.

3.7. Efecto del material orgánico activo presente en la SML y SSW.

Como se puede observar en la **Tabla 3.5** y en la **Figura 3.8** los valores de relación de eficiencia de congelación con la cantidad de clorofila-a no fueron significativos, los valores de p en la mayoría de las muestras fueron menores a ".5". No se pudo identificar presencia de grupos de fitoplancton dominantes en los días de muestreo; sin embargo, sabemos que para que una muestra resulte eficiente para la congelación de hielo, no es necesario que haya grandes cantidades de fitoplancton presente, ya que si bien es un factor determinante hay otros factores que hacen que una muestra cuente con material activo para facilitar la formación de hielo.

Muchas especies de fitoplancton como las diatomeas son conocidas por ser uno de los grupos de organismos fitoplanctónicos que más cantidad de sílice absorben y a la hora de su muerte celular liberan material silíceo, polisacáridos y ácidos grasos a la columna de agua, que contribuyen a la concentración de material activo para la formación de INPs (Cochran et al., 2017). Existe la posibilidad que en nuestras muestras haya existido una mayor concentración de sílice y polisacáridos arrojados de especies de fitoplancton ya en proceso de degradación, lo cual también puede explicar también la cantidad de oxígeno disuelto presente.

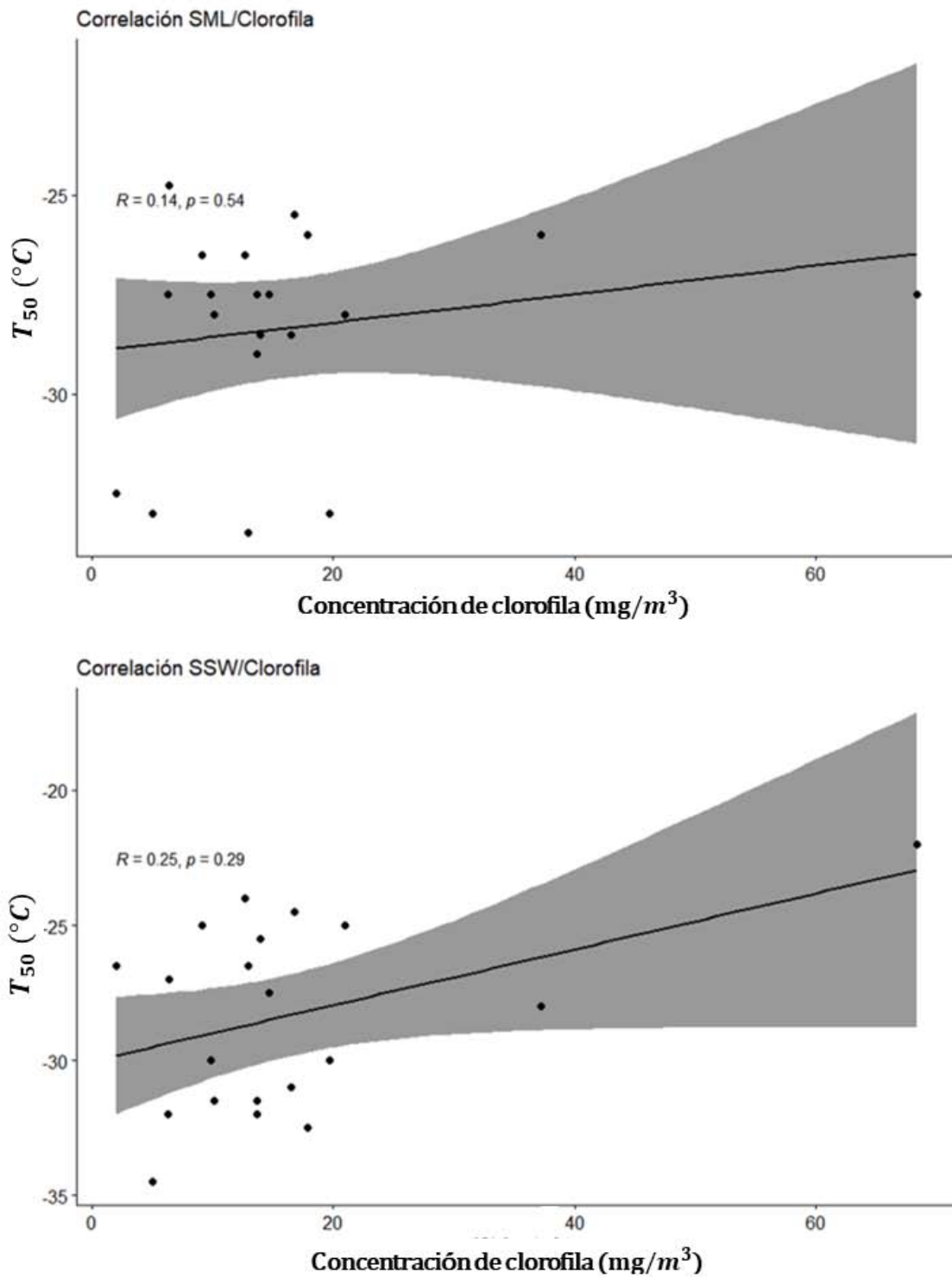


Figura 3.8: Gráficas de correlación entre T_{50} y clorofila-a obtenidas de las muestras en Manzanillo, Colima.

3.8. Comparación de los resultados con otros estudios de SML y SSW (Golfo de México vs Pacífico Mexicano)

En la **Figura 3.9** se encuentran las curvas de T_{50} obtenidas durante este proyecto, en contraste con el estudio de Juárez (2018) donde se evaluó la capacidad de congelación de muestras de SML y SSW del Golfo de México. Las curvas obtenidas de las muestras del Golfo de México presentan un rango de congelación de -19°C a -24°C en las muestras de la SML, y un rango de -22°C a -29°C en las muestras de SSW, en cambio las curvas obtenidas para las muestras del Pacífico mexicano presentaron un rango de -26°C a -34°C en las muestras de la SML y un rango de -23°C a -32°C en las muestras de SSW.

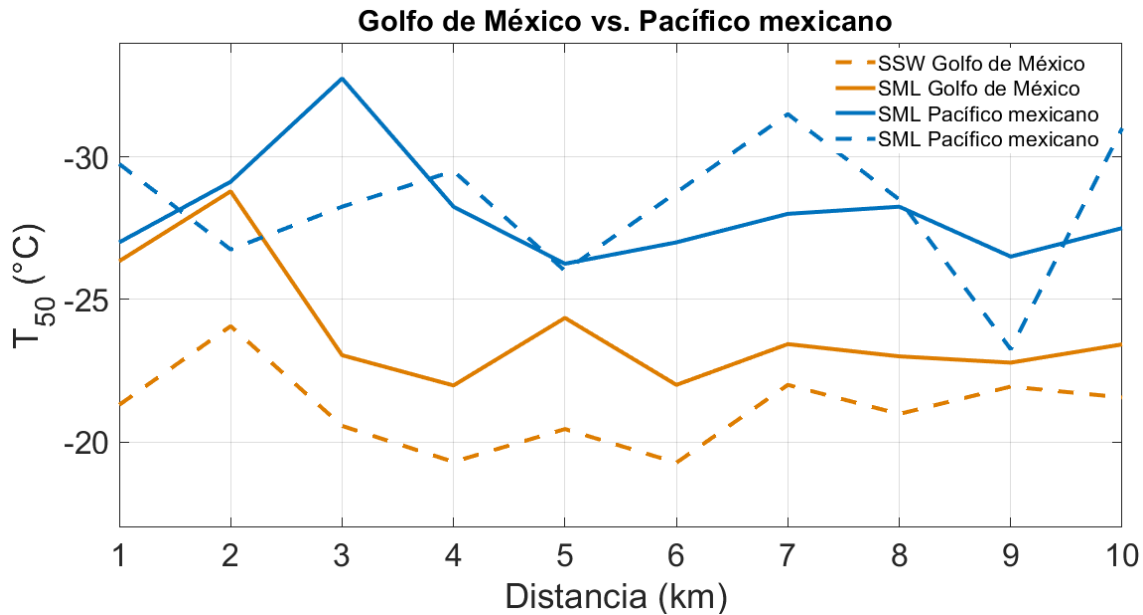


Figura 3.9: Gráfica de T_{50} de las muestras tomadas en el Golfo de México y en el Pacífico Mexicano en relación a la distancia a la costa (cercanía o lejanía). Las curvas de color naranja corresponden a la SML y SSW del Golfo de México y las curvas de color azul son corresponden a la SML y SSW del Pacífico Mexicano.

En comparación con los resultados obtenidos en este proyecto, las muestras para el estudio realizado en el Golfo de México presentaron material activo en la SML y

SSW que favoreció la congelación de hielo a temperaturas más cálidas. En el estudio realizado en el Golfo de México se encontró que el material activo presente en la SSW fue favorable para la catalización de formación de hielo a diferencia del material presente en la SML. En contraste, en el estudio presente las muestras más eficientes fueron las tomadas de la SML. En el estudio presente el rango en las curvas para la SSW fue menor; sin embargo, el promedio de los valores de la SML presento una temperatura mayor, es decir tuvo una congelación más eficiente. La SML del Pacífico Mexicano tiene una actividad similar a los resultados reportados en Wilson et al. (2015), es decir las muestras de SML facilitaron la congelación a temperaturas más cálidas en comparación con las muestras de SSW.

Conclusiones

- El objetivo principal, el cuál fue determinar la eficiencia de congelación de las muestras colectadas en el Pacífico mexicano, entre zonas de alta y baja producción de fitoplancton, así como determinar los factores físicos que pueden afectar la concentración de INPs, se cumplió satisfactoriamente debido a que fue posible coleccionar de manera exitosa las muestras de SML y SSW del Pacífico mexicano (Manzanillo, Colima) y evaluar a partir de estas su eficiencia para catalizar la formación de hielo. Estos datos servirán para mejorar el entendimiento de la influencia del aerosol marino en México en la formación de nubes mixtas en territorio Mexicano; y los resultados obtenidos fueron los siguientes:
- Gracias a la técnica DFA-UNAM fue posible evaluar las habilidades de nucleación de hielo de cada muestra por medio del método de nucleación por inmersión.
- Con los resultados obtenidos de las muestras de SML y SSW se concluyó que las muestras obtenidas el día 6/04/22 presentaron una mayor eficiencia como INPs, debido al material activo presente ese día de muestreo.
- La SML del Pacífico Mexicano presentó una mayor capacidad de catalizar el proceso de congelación en comparación a la SSW, resultados similares a los reportados en Wilson et al. (2015).
- Se obtuvieron los coeficientes de correlación de Spearman entre la T_{50} y parámetros fisicoquímicos. Tales datos proporcionaron información cualitativa acerca de la influencia del oxígeno disuelto en el material activo presente. Se encontró que

la cantidad de oxígeno disuelto presenta una correlación positiva con la eficiencia de congelación tanto de la SML como de la SSW.

- Se encontró que la TSM presenta una correlación positiva con la eficiencia de congelación de la SML únicamente.
- No existe una correlación estadística entre la T_{50} y la clorofila-a presente en los días de muestreo; sin embargo, existe la posibilidad que en las muestras obtenidas en este proyecto, haya existido una mayor concentración de sílice y polisacáridos arrojados de especies de fitoplancton ya en proceso de degradación, lo que favoreció la catalización de formación de hielo a temperaturas más cálidas.
- Las muestras de SML y SSW tomadas en el Pacífico mexicano presentaron menor eficiencia para catalizar la formación de hielo comparado con las muestras tomadas en el Golfo de México.

Recomendaciones y trabajo a futuro

- Se recomienda ampliar el estudio, incluyendo el análisis biológico de diferenciación de especies para determinar las características que pueden resultar eficientes para catalizar la formación de hielo.
- Se pueden incluir estudios químicos que determinen la cantidad de óxido de silicio presente en las muestras recolectadas en Manzanillo, Colima.
- Resultaría de gran utilidad determinar el número de INPs presentes en las muestras de SML y SSW obtenidas en el Pacífico Mexicano para poder determinar cuantitativamente cuál fue la diferencia existió entre ambas.
- Determinar el número de INPs presente en las muestras en los distintos puntos e identificar si existe una relación entre la cantidad de INPs y la cercanía o lejanía a la costa.

Bibliografía

Albrecht, B. (1989). Aerosols Cloud Microphysics, and Fractional Cloudiness. American Association for the Advancement, vol. 245, pp. 1227-1230.

Berdalet, E., Tester, P. A., Chinain, M., Fraga, S., Lemée, R., Litaker, W., Penna, A., Usup, G., Vila, M., Zingone, A. (2017). Harmful Algal Blooms in Benthic Systems: Recent Progress and Future Research. *Oceanography*, vol. 30, pp. 36–45.

Boucher, O., Randall, D., Artaxo, P., Bretherton, C., Feingold, G., Froster, P., Kerminen, V., Kondo, Y., Liao, H., Lohmann, U. Rasch, P., Satheesh, S., Sherwood, S., Stevens B., Zhang, X. (2013). In *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, vol. 3, pp. 571-657.

Cascajo, C. M. (2017). Morphology and dynamics of ice crystals and the effect of proteins (PhD). University of the Basque Country, Department of Physic, pp. 34.

Charlson, R.J., Lovelock, J.E., Andreae, M.O., Warren, S. (1987). Oceanic Phytoplankton, Atmospheric Sulphur, Cloud Albedo and Climate. *Nature*, vol. 326, pp. 655-661.

Chapman, P. (2016). *Upwelling Systems of the World*. Springer International Publishing Switzerland, vol. 1, pp. 343.

Claiborn, C. (2006). Agriculture and Air Quality Airborne Particulate Matter. In Workshop on Agricultural Air Quality, vol. 1, pp. 355–6.

Clarke, A., Owens, S., Zhou, J. (2006). An Ultrafine Sea-Salt Flux from Breaking Waves: Implications for Cloud Condensation Nuclei in the Remote Marine Atmosphere. *Geophys [Atmosphere.]*, vol. 111, pp. 1-14.

Cochran, R.E., Laskina, O., Trueblood, J. V., Estillore, A. D., Morris, H. S., Jayarathne, T., Sultana, C. M., Lee, C., Lin, P., Laskin, J. (2017). Molecular Diversity of Sea Spray Aerosol Particles: Impact of Ocean Biology on Particle Composition and Hygrosopicity. *Accounts of Chemical Research*, vol.3, pp. 245-256.

Collin, D., De Leeuw. (2007). Marine Aerosol Production: a Review of the Current Knowledge. *J. Royal Society*, vol. 365, pp. 1753-1774.

Cunliffe, M., Engel, A., Frka, S., Gasparovic, B., Guitart, C., Murrell, J., Salter, M., Stolle, C., Upstill, R., Wurl, O. (2013). Sea Surface Microlayers: A Unified Physicochemical and Biological Perspective of the Air-ocean Interface. *Progress in Oceanography*, vol. 109, pp. 104-16.

Cunliffe, M., Wurl, O. (2014). Guide to Best Practices to Study the Ocean's Surface. *Occasional Publications of the Marine biological Association of the United Kingdom*, vol. 1, pp. 116-118.

De Leeuw, G., Andreas, E. L., Anguelova, M. D., Fairall, C., Lewis, E. R., O'Dowd, C., Schulz, M., Schwartz. (2011). Production Flux of Sea Spray Aerosol. *Reviews of Geophysics*, vol. 2, pp. 49.

EPA (2009). A Review of the Impact of Climate Variability and Change on Aero-

allergens and their Associated Effects, pp. 32-35.

Haywood, J., Boucher, O. (2000). Estimates of the Direct and Indirect Radiative Forcing Due to Tropospheric Aerosols: A Review. *Reviews of geophysics*, vol. 12, pp. 513-543.

Heintzenberg, J., Wiedensohler, T., Tuch, T., Covert, D., Sheridan, P., Ogren, J., Gras, J., Nessler, R., Kleefeld, C., Kalivitis, N., Aaltonen, V., Wilhelm, R., Havlicek, M. (2006). Intercomparisons and Aerosol Calibrations of 12 Commercial Integrating Nephelometers of Three Manufacturers. *Atmospheric Ocean Technology*. vol. 23, pp. 902–914.

Hernández-Becerril, D. (2014). Biodiversidad de algas planctónicas marinas (Cyanobacteria, Prasinophyceae, Euglenophyta, Chrysophyceae, Dictyochophyceae, Eustigmatophyceae, Parmophyceae, Raphidophyceae, Bacillariophyta, Cryptophyta, Haptophyta, Dinoflagellata) en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, vol. 85, pp. 34-56.

Horvath, H. (1993). Atmospheric Light Absorption-a Review. *Atmospheric Environment Part A General Topics*, vol.1, pp. 293-317.

Hardy, J. T. (1997). The Sea Surface Microlayer: Biology, Chemistry and Anthropogenic Enrichment. *Program of Oceanography*, vol. 11, pp. 301-328.

Harvey, G. W., Burzell, L. A. (1972). A Simple Microlayer Method for Small Samples. *Limnology and Oceanography*, vol. 11, pp. 156–157.

Hunter K. A., Liss P. S. (1997). The Input of Organic Material to Oceans: Air-Sea Interactions and the Organic Chemical Composition of the Sea Surface. *Ocean Chemistry*, vol. 5, pp. 361-379.

INEGI. (2009) Información Cartográfica y Climatológica del Estado de Manzanillo. Recuperado de: <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825490836>

INEGI. (2020) Información Cartográfica y Climatológica del Estado de Manzanillo. Recuperado de: <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=9765334567901>

Inoue, T. (1987). A Cloud Type Classification. NOAA 7 Split-Window Measurement, vol. 92, pp. 399-400.

Jayarathne, T. (2016). Molecular Diversity of Sea Spray Aerosol Particles. Impact of Ocean Biology on Particles Composition and Hygroscopicity, vol. 1, pp.665-667.

Juarez, J (2018). Determinación de las habilidades de la microcapa superficial del océano para la formación de cristales de hielo: Golfo de México vs. Pacífico norte. Facultad de Química (UNAM). Tesis de Licenciatura para obtener el Título de Químico Farmacéutico Biólogo. pp.45-50

Kanji .Z, A., Ladino, L. A., Wex, H., Boose, Y., Burkner-Kohn, M., Cziczo, D. J., Martina, K. (2017). Chapter 1: Overview of Ice Nucleating Particles. Meteorological Monographs, vol. 4, pp. 1-33.

Ladino, L. A., Stetzer, O., Lohmann, U. (2013). Contact Freezing: A review of Experimental Studies. Atmospheric Chemistry and Physics, vol. 13, pp. 9745-9767.

Ladino, L. A, Raga G. B, Alvarez-Ospina H., Andino-Enriquez M. A., Rosas, I., Martinez, L., Salinas, E., Miranda, J., Ramírez-Díaz, Z., Figueroa, B., Chou, C., Bertram, A. K., Quintana E. ,T., Maldonado L. A., García-Reynoso, A., Si, M., Irish V. E. (2019). Ice Nucleating Particles in a Coastal Tropical Site, Atmospheric Chemistry and Physics, vol. 19, pp. 6147–6165.

Ladino, L .A., Juarez-Perez, J., Ramirez-Diaz, Z., Miller, L. A., Herrera, J., Raga, G. B., Simpson, K., Cruz, G., Pereira, D., F. Cordoba. (2022). The UNAM-Droplet Freezing Assay: An Evaluation of the Ice Nucleating Capacity of the Sea-Surface Microlayer and Surface Mixed Layer in Tropical and Subpolar Waters. *Atmósfera*, vol. 35, pp. 127-141.

Lancin, M. (1997). Estudio Geomorfológico de la Bahía y de la Playa de Santiago en Manzanillo. *Geociencias UNAM*, vol.1, pp. 14-19.

Lohmann, U., Lüönd, F., y Mahrt, F. (2016). An Introduction to Clouds: From the Microscale to Climate. Cambridge University Press, vol.3, pp. 1-25.

Lutgens, F., Tarbuck, E., Tasa, D. (2015). *Atmosphere: An Introduction to Meteorology*, vol. 13, pp. 97-102.

Lamb D., Verlinde, J. (2011). *Physics and Chemistry of Clouds*. Cambridge University Press, vol.4, pp. 65-73.

Lara, J. R., Arenas, V., Bazán, C., Díaz, V., Escobar, E., García, M. C., Gaxiola, G., Robles, G., Sosa, R., Soto, L. A., Tapia, M., Valdez, J.E., Bezaury, J., Millán, R. (2008). Los Ecosistemas Marinos en Capital Natural de México. *Conocimiento actual de la Biodiversidad (CONABIO)*, vol. 1, pp. 135-159.

Libes, S. (2014). *Introduction to Marine Biogeochemistry*. College of Natural and Applied Sciences Coastal Carolina University Conway, vol.1, pp. 156-167.

Murray, B., O'Sullivan, D., Atkinson, J., Webb, M.(2012). Ice Nucleation by Particles Immersed in Supercooled Cloud Droplets. *Chemical Society Reviews*, vol. 41, pp. 6519–6554.

Orellana, M. V., Matrai, P. A., Leck, C., Rauschenberg, C. D., Lee, A. M., Coz, E. (2011). Marine Microalgae as a Source of Cloud Condensation Nuclei in the High Arctic. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 108, pp. 13612– 13617.

Penner, J. E., Hegg, D., y Leaitch, R. (2001). Peer Reviewed: Unraveling the Role of Aerosols in Climate Change. *Environmental Science Technology*, vol. 35, pp. 332-340.

Pinot, J. P. (1969). Reseña Geológica del estado de Colima. Plages in *Encyclopedia Universalis*, vol. 13, pp. 95-102

Pisoni, J .P., Rivas, A. L., Piola, A. R. (2014). Satellite Remote Sensing Reveals Coastal Upwelling vents in the San Matías Gulf—Northern Patagonia. *Remote Sensing of Environment*, vol. 152, pp. 270-278.

Pöschl, U. (2005), Atmospheric Aerosols: Composition, Transformation, Climate and Health Effects. *Chemistry Introductory Edition*, vol. 44, pp. 7520–7540.

Prather, K.A., Bertram, T., Grassian, V., Grant, D., Stokes, M., DeMott, P., Lihini, I., Palenik, B., Faroo, A., Seinfeld, J., Moffet, R., Molina, M., Cappa, C., Geiger, F., Roberts, G., Russell, L., Ault, A., Baltrusaitis, J., Collins, D., Corrigan, C., Cuadra-Rodriguez, L., Ebben, J., Forestieri, S., Guasco, T., Hersey, S., Kim, M., Lambert, W., Modini, R., Mui, W., Pedler, B., Ruppel, M., Ryder, O., Schoepp, N., Sullivan, R., Zhao, D. (2013). Bringing the Ocean into the Laboratory. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 19 pp. 7550-7555.

Pruppacher, H., Klett, J. (1997). *Microphysics of Clouds and Precipitation*. Springer, Vol. 4, pp. 10-73.

Kulmala, M., Rannik, Ü., Pirjola, L., Del Maso, M., Karimäki, J., Asmi, A., Jäppinen, A., Karhu, V., Korhonen, H., Malvikko, S. P. (2000). Characterization of Atmospheric Trace Gas and Aerosol Concentrations at Forest Sites in Southern and Northern Finland using Trajectories. *Boreal Environment Research*, vol. 5, pp. 315-336.

Rogers, R. R., Vali, G. (1978). Recent Developments in Meteorological Physics. *Physics Reports*, vol. 6, pp. 65-177.

Salcedo, D. (2007). Educación Química para un Futuro Sostenible. *Educación Química*, vol. 18, pp. 169-176.

Seinfeld, J. H. (1992). Secondary Organic Aerosol Formation and Transport. *Atmospheric Environment, Part A, General Topics*, vol. 26, pp. 2269-2282.

Seifert, A., Kohler, C., y Beheng, K. (2011), Aerosol-Cloud-Precipitation Effects over Germany as Simulated by a Convective-Scale Numerical Weather Prediction Model. *Atmospheric Chemistry Physics Discussions*, vol. 11, pp. 76-90.

SEMAR. (2004). Datos de Estación Mareográfica de Manzanillo, Colima, Recuperado de: <https://meteorologia.semar.gob.mx/dirmet/estaciones/manzanillo.html>

SEMAR. (2009). Datos de Estación Mareográfica de Manzanillo, Colima, Recuperado de: <https://meteorologia.semar.gob.mx/dirmet/estaciones/manzanillo.html>

SEMAR. (2012). Datos de Estación Mareográfica de Manzanillo, Colima, Recuperado de: <https://meteorologia.semar.gob.mx/dirmet/estaciones/manzanillo.html>

SEMAR. (2015). Datos de Estación Mareográfica de Manzanillo, Colima, Recuperado de: <https://meteorologia.semar.gob.mx/dirmet/estaciones/manzanillo.html>

SEMAR. (2019). Datos de Estación Mareográfica de Manzanillo, Colima, Recuperado de: <https://meteorologia.semar.gob.mx/dirmet/estaciones/manzanillo.html>

Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G. K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P. M. (2013). Climate Change: The physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, vol. 5, pp. 535.

Tan, Q., Huang, Y., Chameides, W. L. (2002). Budget and Export of Anthropogenic SO_x From East Asia During Continental Outflow Conditions. *Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 6, pp. 107.

Terray, E., Drennan, W., Donelan, M. (1999). The Vertical Structure of Shear and Dissipation in the Ocean Surface Layer. Department of Defence, vol. 1, pp.67-89.

Tobo, Y. (2016). An Improved Approach for Measuring Freezing in Large Droplets Over a Wide Temperature Range. *Scientific Reports*, vol. 6, pp. 1-9.

Verheggen, B., Walter, S., Connolly, P., Ebert, M., Schneider, J., Bower, K., Cozic, J., Weinbruch, S., Baltensperger, U. (2006). Counterflow Virtual Impactor Based Collection of Small Ice Particles in Mixed-Phase Clouds for the Physico-Chemical Characterization of Tropospheric Ice Nuclei: Sampler Description and First Case Study. *Aerosol Science and Technology*, vol. 41, pp .848–864.

Viana, M. (2003). Niveles de Composición y Origen del Material Particulado Atmosférico. Universidad de Barcelona, Tesis doctoral del Departamento de Geoquímica, Petrología y Prospección Geológica, pp.45-67.

Wang, F., Chen, Y., Meng, X., Fu, J., Wang, B. (2016). The contribution of Anth-

ropogenic Sources to the Aerosols Over East China Sea. *Atmospheric Environment*, vol. 127, pp. 22–33.

Wilson, T. W, Ladino, L.A., Theodore, W., Alpert, P., Breckels, M., Brooks, I., Browse, J., Burrows, S., Carslaw, J., Huffman, Judd, C., Kalthau, W., Mason, R., McFiggans, G., Miller, L., Nájera, J., Polishchuk, E., Rae, S., Schiller, C., Si, M., Vergara, J., Whale, J., Wurl, O., Yakobi, J., Abbatt, J., Aller, J., Bertram, A., Knopf, D., Murray, J. (2015). A marine Biogenic Source of Atmospheric Ice-Nucleating Particles. *Nature*. vol. 525, pp. 234-238.